

CAPITOLUL 7

TRADUCTOARE DE VIBRAȚII



7.1 Principiile fizice ale traductoarelor de vibrații

Vibrațiile sunt mișcări oscilante care apar în urma aplicării unei forțe oscilante sau variabile asupra unei structuri. Vibrațiile pot fi continue sau intermitente, periodice sau neperiodice. Oscilațiile depind de natura forței aplicate și de structură.

Cele mai multe vibrații pot fi modelate ca sisteme cu un singur grad de libertate și mulți senzori de vibrații folosesc un sistem cu arc elastic și masă. Arcul este caracterizat de constanta elastică k , iar masa m de greutatea sa, G . Aceste caracteristici determină atât comportarea statică (deformarea statică, d) a structurii, cât și comportarea dinamică.

Dacă $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ este accelerația gravitațională, atunci:

$$F = ma, G = mg, k = F/d \sim G/d, d = F/k = G/V = m \cdot g/k.$$

Comportarea dinamică a unui sistem cu masă și arc poate fi exprimată de comportarea sistemului în vibrație liberă și / sau în vibrație forțată.

a) Comportarea dinamică a unui sistem în vibrație liberă.

Vibrația liberă apare atunci când arcul este deformat și apoi eliberat, vibrând liber. Trebuie evidențiate două caracteristici:

- prin amortizarea sistemului, amplitudinea oscilațiilor scade în timp;
- frecvența oscilației nu depinde de amplitudinea deflexiei inițiale (cât timp nu se depășesc limitele de elasticitate).

Frecvența oscilațiilor libere este numită frecvență naturală și are expresia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

b) Comportarea dinamică a unui sistem în vibrație forțată.

Vibrațiile forțate apar când se adaugă continuu energie sistemului masă și arc, printr-o forță oscilantă, cu o frecvență de forțare, f_f . Dacă energia aplicată depășește amortizarea, mișcarea va continua atât cât continuă excitația.

Vibrațiile forțate pot fi:

- autoexcitate, dacă forța de excitație este generată în sau pe masa excitată;

- cu excitație externă, dacă forța de excitație se aplică arcului, de exemplu când baza pe care este stă arcul se mișcă.

Când oscilează baza și forța este transmisă masei suspendate prin intermediul arcului, mișcarea masei va fi diferită de mișcarea bazei. Mișcarea bazei este denumită mișcare de intrare, I , iar mișcarea masei reprezintă răspunsul, R .

Se definește transmisibilitatea T , ca raportul acestor mărimi: $T_r = \frac{R}{I}$.

La frecvențe de forțare mult sub frecvența naturală a sistemului, $R \sim I$ și $T_r \sim 1$. Cu cât frecvența de forțare este mai apropiată de frecvența naturală, transmisibilitatea crește datorită rezonanței. Rezonanța reprezintă stocarea energiei în sistemul mecanic. La frecvențe de forțare apropiate de frecvența naturală, energia se acumulează și crește, rezultând o creștere a amplitudinii răspunsului. Crește de asemenea amortizarea și energia absorbită de amortizare într-o perioadă egalează energia forței de excitație, atingându-se echilibrul. Vârful transmisibilității se obține pentru $f_f \approx f_n$, condiția fiind numită *rezonanță*.

Dacă frecvența de forțare crește peste f_n , răspunsul R scade. Atunci când $f_f = 1,414 f_n$ se obține $R = I$ și $T_r = 1$; la frecvențe superioare, $R < I$ și $T_r < 1$. La frecvențe pentru care $R < I$, sistemul se spune că este în *izolare*, adică o parte a mișcării vibratorii de intrare este izolată de masa suspendată.

Din relațiile de mai sus se observă că frecvența naturală este proporțională cu rădăcina pătrată a constantei elastice k și invers proporțională cu rădăcina pătrată din greutatea G sau masa m . Astfel, crescând constanta elastică a arcului sau scăzând masa, va crește frecvența naturală.

Amortizarea este orice efect care înlătură energia cinetică potențială din sistemul masă și arc. Este uzual rezultatul efectelor vâscozității fluidelor sau a frecării. Toate materialele și structurile au un anumit grad de amortizare internă. În plus, mișcarea prin aer, apă sau alte fluide absoarbe energia și o convertește în căldură. Frecarea internă intermoleculară sau intercristalină convertește tensiunea mecanică a materialului în căldură. De asemenea, și frecarea externă produce amortizare.

Amortizarea determină scăderea amplitudinii vibrației libere în timp și limitează transmisibilitatea maximă în vibrație forțată.

Se notează uzual cu litera grecească ζ și se definește ca raportul $\zeta = C / C_c$, unde C este amortizarea structurii sau materialului iar C_c este amortizarea critică. Amortizarea critică este dată de expresia $C = 2\sqrt{k \cdot m}$ și se definește ca mărimea amortizării care permite ca sistemul masă și arc deplasat să revină la poziția de echilibru, fără supracreșteri și oscilații.

Un sistem subamortizat va avea supracreșteri și va oscila când este deplasat și eliberat.

Un sistem supraamortizat nu se va întoarce niciodată la poziția sa de echilibru, el deplasându-se asimptotic spre echilibru.

Deplasarea, viteza și accelerația vibrației

Deoarece vibrația este definită ca o mișcare oscilatorie, ea implică o schimbare a poziției sau deplasării. Viteza este definită ca viteza de variație în timp a deplasării, iar accelerația este viteza de variație în timp a vitezei. Se folosește uneori și viteza de variație în timp a accelerației, denumită *șoc*.

Sistemul masă și arc cu un singur grad de libertate în vibrație forțată, menținut la o amplitudine constantă a deplasării are o mișcare armonică simplă sau sinusoidală. Pentru o deplasare maximă X și o frecvență f , deplasarea instantanee este dată de relația:

$$x = X \cdot \sin 2\pi ft$$

Viteza este derivata în timp a deplasării. Viteza instantanee este:

$$v = 2\pi f X \cdot \cos 2\pi ft$$

Deoarece deplasarea vibrației este măsurată vârf la vârf, se notează $D = 2X$ și relația devine:

$$v = \pi f D \cdot \cos 2\pi ft, \text{ unde } V = \pi f D X \text{ reprezintă viteza de vârf, rezultă:}$$

Similar, accelerația este derivata expresiei vitezei:

$$a = 4\pi^2 f^2 X \cdot (-\sin 2\pi ft) \text{ cu } A = 2\pi^2 f^2 D = \text{accelerația de vârf.}$$

În concluzie, mișcarea de joasă frecvență produce accelerații de amplitudine scăzută, chiar dacă deplasările sunt mari. Mișcarea cu frecvență mare produce deplasări de amplitudine scăzută, chiar dacă accelerația este mare.

7.2 Măsurarea deplasării vibrației

Pentru măsurarea deplasării vibrației se folosesc:

- tehnici optice de măsurare,
- senzori electromagnetici și capacitivi de deplasare,
- senzori de deplasare pe bază de contact și
- senzori bazați pe dubla integrare a accelerației.

Tehnicile optice de măsurare diferă în funcție de frecvență. La frecvențe joase și când deplasarea este mare ($> 2,5\text{mm}$) se folosesc pentru măsurare rigle, șublere, filme de mare viteză, camere video sau stroboscoape. La frecvențe mari, tehnicile optice sunt mai complicate, de exemplu variația intensității sau unghiului unui fascicol de radiație optică pe o suprafață reflectorizantă. Instrumentul cel mai sensibil și mai precis care poate fi folosit în aceste cazuri este *interferometrul Michelson*. Principiul de funcționare este următorul: fascicolul reflectat de piesa în mișcare interferă cu fascicolul reflectat de o oglindă plată fixă, producând fanje de interferență. Se pot măsura astfel deplasări de peste 100 mm, prin numărarea franjelor. Interferometrele cu laser se folosesc drept instrumente standard de calibrare până la frecvențe ale vibrațiilor de 25 kHz.

Senzorii electromagnetici de proximitate sunt fără contact și măsoară distanța relativă în funcție de cuplajul electromagnetic sau capacitiv (electrostatic). Deoarece acești senzori se bazează pe efecte inductive sau capacitive, este necesar ca obiectul de măsurat (ținta) să fie conductiv. Calibrarea se face pentru fiecare tip de material dintre țintă și sonda sensorului și pentru fiecare țintă.

Senzorii de proximitate electromagnetici sunt denumiți și senzori de curenți induși deoarece folosesc ca mecanisme de conversie curenții generați în țintă prin legea inducției electromagnetice. Cu cât distanța dintre bobina senzor și țintă este mai mare, cu atât cuplajul electromagnetic este mai mic, curenții induși în țintă mai mici și energia generată mai mică.

Alți senzori electromagnetici sesizează distorsionarea unui câmp electromagnetic generat de senzor ca o măsură a distanței dintre senzorul generator și țintă.

Traductoarele capacitive de proximitate măsoară capacitatea între senzor și țintă și o convertesc în distanță.

Senzorii de deplasare pe bază de contact folosesc contactul direct între două obiecte pentru a măsura distanța dintre ele. Exemple: transformatorul diferențial liniar variabil, traductoarele potențiometrice rezistive.

Senzorii bazați pe dubla integrare a accelerației se mai numesc *accelerometre*. Sunt robuste, au raport mare semnal/zgomot, calitate bună.

7.3 Măsurarea vitezei vibrației

Viteza vibrației se măsoară folosind:

- senzori electrodinamici de viteză,
- vibrometre cu laser,
- traductoare de viteză cu integrarea accelerației.

Senzorii electrodinamici de viteză conțin un magnet fixat pe un sistem cu arc pentru a forma un sistem inerțial. Magnetul este suspendat într-o carcasă cu una sau mai multe bobine cu spire. Când carcasa vibrează la frecvențe peste frecvența

naturală a sistemului masă și arc, masa magnetului este izolată de vibrația carcasi. Astfel, magnetul este staționar și carcasa cu bobine se mișcă peste el cu viteza structurii de care este atașată. Tensiunea electrică generată la ieșire este proporțională cu viteza bobinei care se mișcă în câmp magnetic. Senzorii de viteză sunt folosiți pentru frecvențe între 10 Hz și sute Hz, au dimensiuni mari, sunt grei, supuși la uzură și pot produce tensiuni electrice false la ieșire.

Vibrometrele cu laser sunt instrumente mai noi, denumite și vitezometre cu laser, având sensibilitate mare și acuratețe. Folosesc un fascicol laser care este divizat în fascicol obiect și fascicol de referință. Fascicolul obiect reflectat de obiectul în vibrație are imprimată o deplasare instantanee de frecvență Doppler, proporțională cu viteza instantanee a vibrației obiectului. Un modulator acusto - optic (celulă Bragg) a introduce o deplasare statică de frecvență de 40 MHz pe unul din fascicule. Sunt critice alinierea și distanța față de obiectul care vibrează. Gama de frecvență de lucru este de 0 Hz ... 1 MHz, iar gama dinamică poate ajunge la 0 ... 10 m/s.

O versiune a vibrometrlui cu laser scanează fascicolul laser pe suprafața unui câmp de imagine, măsurând viteza în fiecare punct. Semnalul compus rezultat este afișat ca o hartă a conturilor sau o imagine pseudocolor. Harta vibrațiilor este suprapusă pe o imagine video pentru a obține cantitatea maximă de informații despre variațiile vitezei pe o suprafață mare.

Traductoarele de viteză cu integrarea accelerației folosesc circuite de procesare numerică pentru integrarea semnalelor de la accelerometre. Există și accelerometre care au în aceeași capsulă integroare electronice analogice sau numerice, crescând astfel raportul semnal / zgomot.

7.4 Măsurarea accelerației vibrației

Traductoarele care măsoară accelerația sunt denumite obișnuit *accelerometre*. Există cinci tipuri de accelerometre de bază și anume:

- piezoelectric,
- piezoelectric cu adaptor electronic în aceeași capsulă,
- piezorezistiv,
- cu capacitate variabilă și
- tip balanță de forțe (servoaccelerometru).

Cu toate că au senzori electromecanici diferiți, toate accelerometrele folosesc variația sistemului masă - element elastic, denumit obișnuit senzor seismic (inerțial).

Accelerometrele seismice folosesc o masă seismică suspendată de o structură elastică, ambele închise într-o carcasă. Când carcasa este supusă accelerației, masa seismică este și ea accelerată de forța transmisă prin structura elastică. Apoi deplasarea elementului elastic, deplasarea masei în interiorul carcasi sau forța

transmisă de arcul elastic este transformată într-un semnal electric, proporțional cu accelerația.

7.4.1 Accelerometre piezoelectrice

Accelerometrele piezoelectrice nu necesită tensiune de alimentare. Folosesc efectul piezoelectric al elementelor sensibile pentru a genera sarcină electrică la ieșire. Elementele piezoelectrice cu rol de elemente elastice produc sarcină electrică proporțională cu efortul aplicat.

Materialele piezoelectrice au o structură moleculară cristalină regulată cu o distribuție a sarcinilor care variază când sunt supuse la efort (materiale naturale sau artificiale cum sunt cristalele, materialele ceramice, unii polimeri).

Materialele piezoelectrice au un dipol (separare netă a sarcinilor pozitive și negative de-a lungul unei direcții cristaline particulare) când nu sunt supuse la efort. În aceste materiale pot fi generate câmpuri electrice prin deformarea produsă de efort sau temperatură, determinând respectiv ieșire piezoelectrică sau piroelectrică. Ieșirile piroelectrice sunt semnale perturbatoare mari, au loc în perioade lungi de timp și variații de temperatură (de exemplu, materialele piezoelectrice din polimeri).

Sarcinile electrice nu sunt generate ci doar deplasate (ca și energia și momentul, sarcinile se conservă). Când se generează un câmp electric de-a lungul direcției dipolului, electrozii metalici de pe fețe opuse produc electroni mobili care se mută de la o față, prin rezistența de sarcină (rezistența de intrare a circuitului de condiționare, tipic, convertor sarcină - tensiune electrică), spre cealaltă față a senzorului, pentru a anula câmpul electric generat. Cantitatea de electroni depinde de tensiunea creată și de capacitatea dintre electrozi. Unitatea de sarcină electrică produsă de accelerometrul piezoelectric este pC.

Alegerea materialului piezoelectric reprezintă un compromis între sensibilitatea de sarcină, coeficientul dielectric, coeficienții termici, temperatura maximă, caracteristicile de frecvență și stabilitate. Raporturile cele mai bune semnal / zgomot se obțin pentru coeficienții piezoelectrice mari. Cristalele piezoelectrice naturale (turmalina, cuarțul) au sensibilitate de 100 de ori mai mică decât materialele feroelectrice, care sunt ceramici artificiale. Turmalina este un cristal natural care are depolarizare, de aceea se folosește la temperaturi foarte mari. Senzorii piezoelectrice nu pot fi folosiți la măsurarea accelerațiilor sau forțelor statice.

Măsurarea tensiunii generate de senzorii piezoelectrice necesită atenție la comportarea dinamică a cablului de semnal și a caracteristicilor de intrare ale preamplificatorului. Deoarece capacitatea cablului de legătură afectează direct amplitudinea semnalului, mișcarea excesivă a cablului în timpul măsurării poate determina variații ale capacității sale și trebuie evitată. Trebuie acordată atenție și

impedanței de intrare a preamplificatorului, care trebuie să fie $> 1 \text{ G}\Omega$ pentru a asigura răspunsul la joasă frecvență.

În practică, pentru senzori piezoelectrice se folosesc convertoare sarcină - tensiune cu amplificator operațional, denumite obișnuit preamplificatoare de sarcină electrică. Acestea conțin un amplificator operațional integrator, cu impedanță mare de intrare, fig. 7.1.

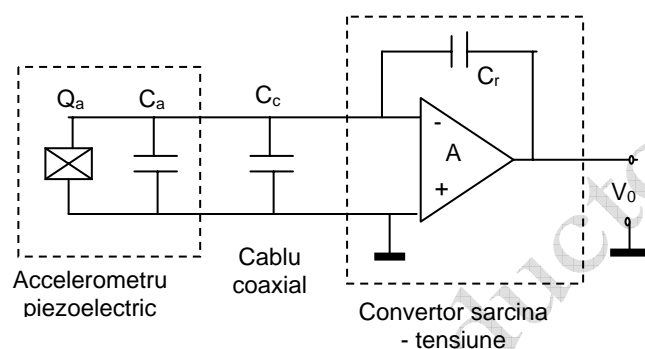


Fig. 7.1

Tensiunea de ieșire este proporțională cu sarcina generată de accelerometru și invers proporțională cu capacitatea de reacție și nu depinde de capacitatea de ieșire a accelerometrului sau capacitatea cablurilor, deoarece capacitatea de intrare a convertorului sarcină - tensiune este $A \cdot C_r$, prin efect Miller, unde A este amplificarea în buclă deschisă:

$$V_0 = \frac{-Q_a}{C_r}$$

Se pot astfel folosi cabluri de legătură de diverse lungimi, fără necesitatea recalibrării. Frecvența limită superioară este fixată de condensatorul și rezistența de reacție a convertorului sarcină - tensiune și nu de caracteristicile accelerometrului. Impedanța de ieșire a accelerometrului piezoelectric schimbă caracteristicile de zgomot, nu și frecvența.

Limitarea importantă introdusă de impedanța mare de ieșire a accelerometrelor piezoelectrice este utilizarea unor cabluri de legătură speciale, cu impedanță foarte mare și zgomot redus (de exemplu, cu izolație cu teflon).

Tipurile cele mai comune de accelerometre piezoelectrice sunt cele care lucrează prin compresie și cele cu torsiune. Variantele prin torsiune au izolație mai

bună la efecte perturbatoare din mediul înconjurător cum sunt variațiile de temperatură și de efort ale bazei și sunt în general mai scumpe. Variantele tip grindă (fixată într-un singur capăt) care lucrează prin compresie sunt mai fragile și au bandă de frecvență limitată.

7.4.2 Accelerometre piezoelectrice cu preamplificator electronic

Aceste accelerometre conțin un preamplificator electronic hibrid miniatură și, datorită semnalului mare de ieșire de pe impedanța mică de ieșire, nu mai au nevoie de cabluri speciale de legătură de zgomot mic. Cele mai multe necesită surse de curent constant de alimentare. Curentul de alimentare și semnalul de ieșire sunt produse pe aceleași două fire. Impedanța mică de ieșire oferă imunitate față de rezistența de izolație mică a cablului, zgomotului electric și a semnalelor perturbatoare.

Sensibilitatea accelerometrelor cu preamplificator încorporat este mai mare decât la accelerometrele piezoelectrice fără preamplificator. În partea electronică se pot introduce și funcții suplimentare, de exemplu, filtre, circuite de protecție și autoidentificare, iar circuitele de condiționare exterioare sunt minime.

Sensibilitatea accelerometrelor piezoelectrice cu preamplificator electronic încorporat nu este afectată semnificativ de variațiile sursei de alimentare. Gama dinamică a tensiunii de ieșire este însă afectată de tensiunea de alimentare. La variații mari ale curentului de alimentare apar probleme la răspunsul în frecvență, când se comandă sarcini cu capacitate electrică mare.

Un dezavantaj al circuitelor electronice încorporate este limitarea gamei de temperaturi de lucru și a fiabilității.

Preamplificatorul electronic intern nu este necesar să fie convertor sarcină - tensiune deoarece capacitatea electrică dintre firele de legătură între senzor și preamplificator este mică și bine controlată. Cuarțul este folosit ca generator de tensiune electrică. Preamplificatoarele de tensiune ajută și ceramicile feroelectrice care au răspunsul în frecvență mai scăzut la folosirea convertoarelor sarcină - tensiune; datorită coeficientului dielectric dependent de frecvență. În cazul preamplificatoarelor de tensiune răspunsul în frecvență este destul de plat.

7.4.3 Accelerometre piezorezistive

Un accelerometru piezorezistiv conține o punte Wheatstone de rezistoare, pe unul sau mai multe brațe, ce își schimbă valoarea rezistenței electrice sub acțiunea efortului. Deoarece senzorii sunt alimentați cu tensiune electrică exterioară, ieșirea poate fi cuplată în curent continuu pentru a răspunde și la condiții statice.

Sensibilitatea unei punți Wheatstone variază direct proporțional cu tensiunea de alimentare (de excitație), care trebuie să fie stabilă și nezmotoasă.

Ieșirea punții este flotantă, fiind nevoie de un amplificator diferențial sau ambele legături de la tensiunea de excitație trebuie să fie flotante pentru ca ieșirea din punte să fie față de masă. Configurația cu ieșire diferențială are avantajul rejecției de mod comun. Cele mai multe punți cu senzori piezorezistivi folosesc două sau patru elemente active. Tensiunea la ieșire a unei punți cu două brațe active (semipunte) este jumătate din cea a unei punți cu patru brațe active (punte completă).

Cerințele de stabilitate a tensiunii de excitație a punții cu piezorezistoare și a elementelor de condiționare sunt mai severe decât la preamplificatoarele încorporate cu accelerometrele piezoelectrice.

Traductoarele cu senzori piezorezistivi au impedanță mică și imunitate la zgomote. Sensibilitatea provine din răspunsul elastic al structurii și rezistivitatea materialului.

Senzorii piezorezistivi sunt fabricați dintr-o singură piesă din Si, cu avantajul realizării întregului senzor într-un singur bloc de material omogen, adică stabilitate mai bună, coeficienți termici buni și fiabilitate mare. Sunt folosiți la eforturi mari, chiar dacă Si este un material fragil. Datorită răspunsului în curent continuu, sunt folosiți la măsurători de lungă durată.

Accelerometrele piezorezistive de mare sensibilitate sunt proiectate cu amortizare pentru a extinde gama de frecvență și posibilitățile de depășire a gamei dinamice.

7.4.4 Accelerometre cu variația capacității electrice

Sunt realizate sub formă de condensatoare plane cu plăci paralele și dielectric aer, în care mișcarea este perpendiculară pe plăci.

La unele variante există o placă centrală fixată de o muchie, astfel că mișcarea devine rotație. Alte plăci sunt fixate elastic de jur împrejur.

Într-un accelerometru cu variația capacității, excitația este dată de un oscilator cu frecvență mare. Variațiile de capacitate ale senzorilor datorită accelerației sunt sesizate de o pereche de convertoare curent - tensiune.

Senzorii cu variația capacității sunt realizați prin microprelucrare pe mai multe substraturi suprapuse de Si, cu un interstițiu de aer de câțiva μm , pentru a permite amortizarea. Deoarece vâscozitatea aerului variază cu câteva procente pe o gamă largă de temperaturi de lucru, se obține un răspuns în frecvență mai stabil decât la accelerometrele piezorezistive amortizate cu ulei. Pentru creșterea robusteții se plasează opritoare în interstiții, pe direcția sensibilă, iar rezistența la accelerații mai mari decât cele maxime pe direcții transversale este dată de suspensie.

Senzorul unui accelerometru cu variația capacității, obținut prin micro-prelucrare, are trei elemente de Si îmbinate într-un ansamblu închis ermetic. Două elemente sunt electrozii unui condensator cu plăci paralele cu dielectric aer. Elementul din mijloc este gravat chimic pentru a forma o masă centrală rigidă, suspendată pe legături subțiri, flexibile. Caracteristicile de amortizare sunt controlate de debitul de gaz prin orificiile din masa centrală.

Accelerometrele cu variația capacității au cele mai bune caracteristici de funcționare. Dezavantajele sunt costul, gabaritul mare, complexitatea circuitelor de condiționare. Pentru detecția capacității se folosesc circuite de înaltă frecvență, frecvențele purtătoare fiind de peste 1000 ori mai mari decât frecvențele maxime ale semnalelor de ieșire.

7.4.5 Accelerometre cu balanță de forțe

Sunt denumite tipic *servoaccelerometre* și sunt folosite în sistemele de ghidare inerțiale, în aplicații de măsurare de vibrații.

Toate accelerometrele descrise anterior sunt dispozitive în buclă deschisă, în care ieșirea datorată deflexiei elementului sensibil se citește direct.

În accelerometrele cu servo control, sau în buclă închisă, semnalul de deflexie se folosește ca reacție într-un circuit care comandă fizic sau reechilibrează masa înapoi, în poziția de echilibru. Deplasările sunt menținute foarte mici prin reechilibrarea electrică a masei, crescând liniaritatea și acuratețea.

Servoaccelerometrele sunt realizate în două variante:

- liniare (de exemplu difuzor) și
- tip pendul

Varianta tip pendul este cel mai mult folosită.

Forța de reechilibrare este electrică și există doar când există tensiune de alimentare. Elementele elastice au coeficient elastic mare, iar în zona părții electronice sunt prevăzute amortizoare. Stabilitatea polarizării este controlată de circuitele electronice de reacție, deriva de zero fiind mică.

Se folosesc în măsurători de vibrații, la frecvențe de 0 ... 1000 Hz.

