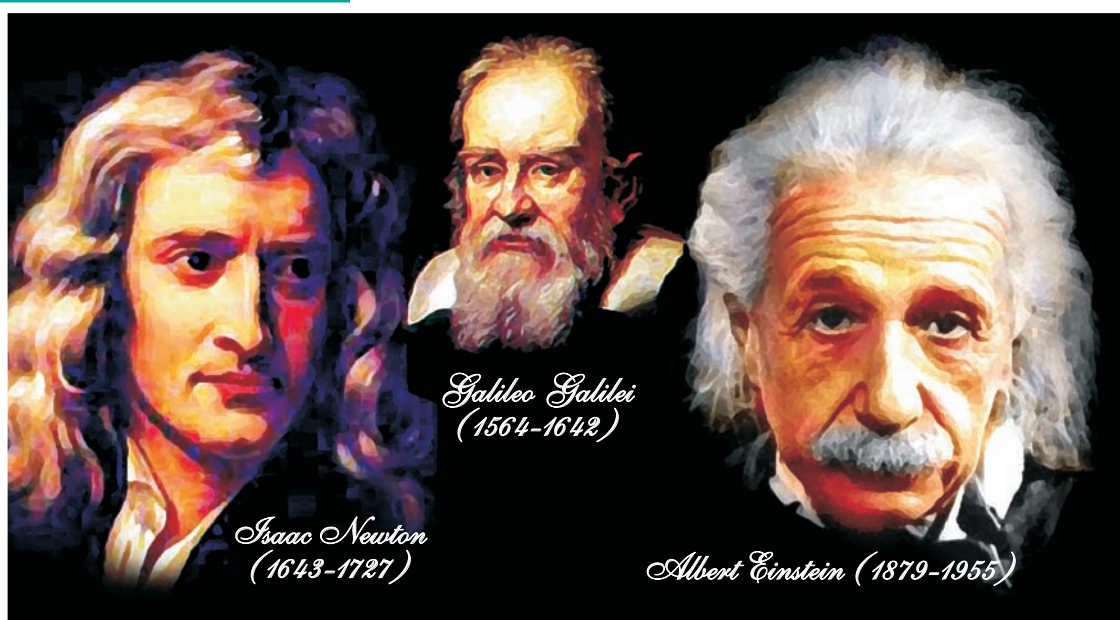


Ministerul Educației
și Cercetării

CONSTANTIN MANTEA
MIHAELA GARABET

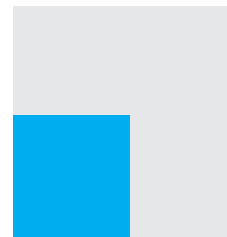
Manual pentru clasa a 11-a



FIZICĂ

F2

Editura
ALL



CONSTANTIN MANTEA
MIHAELA GARABET

FIZICĂ

Manual pentru clasa a 11-a

F2

filiera tehnologică / toate
calificările cu 1-2 ore pe săptămână

Editura
ALL

Manualul a fost aprobat prin Ordinul ministrului Educației și Cercetării nr. 4446 din 19.06.2006 în urma evaluării calitative organizate de către Consiliul Național pentru Evaluarea și Difuzarea Manualelor și este realizat în conformitate cu programa analitică prin Ordin al ministrului Educației și Cercetării nr. 3252 din 13.02.2006.

FIZICĂ – Manual pentru clasa a XI-a: F2
Constantin MANTEA, Mihaela GARABET

Copyright © 2006, 2013 **BIC ALL**

Toate drepturile asupra prezentei ediții aparțin Editurii **BIC ALL**.
Nici o parte din acest volum nu poate fi copiată fără permisiunea scrisă a editurii.
Drepturile de distribuție în străinătate aparțin în exclusivitate editurii.

ISBN 978-606-587-232-5

Referenți: prof. gr. I **Liviu Blanariu**
 prof. gr. I **Daniela Beuran**

Redactor: **Mihaela Garabet**
Coperta colecției: **Alexandru Novac**
Tehnoredactare: **Stoica Niculina**

Editura **BIC ALL** B-dul Timișoara, nr. 58, sect. 6
 Cod: 061317 – București
 Tel.: 402 26 00
 Fax: 402 26 10

Departamentul distribuție: Tel.: 402 26 23; 402 26 25; 402 26 34
Comenzi la: comenzi@all.ro
URL: <http://www.all.ro>

Capitolul 1

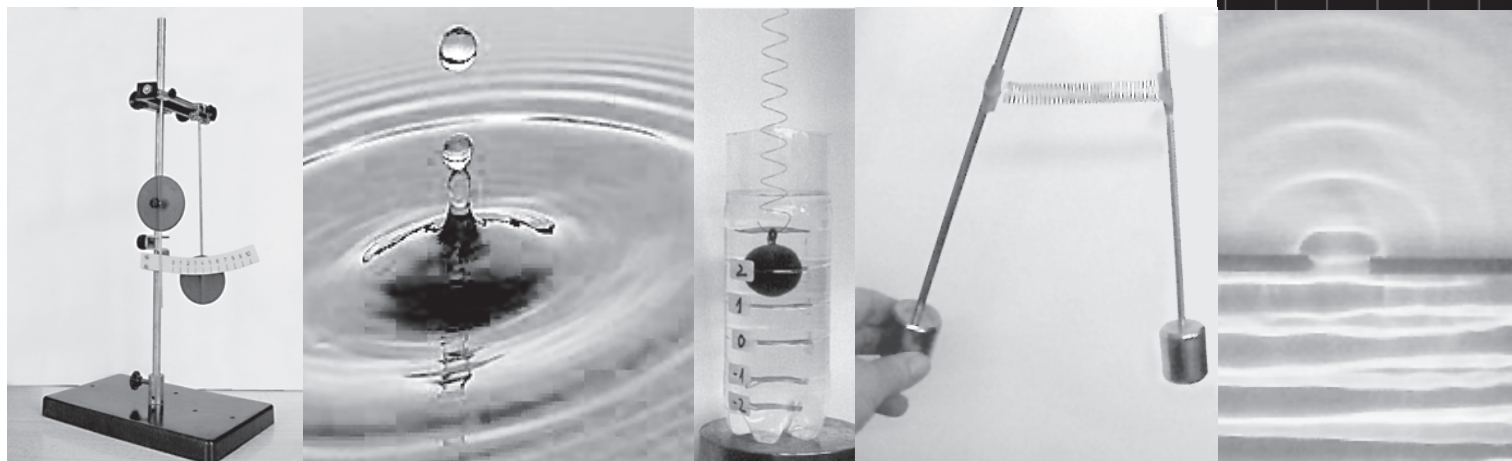
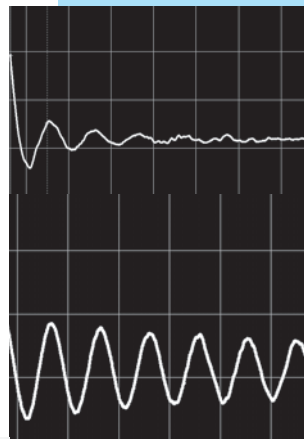
Oscilații și unde mecanice

În acest capitol veți studia:

- 1.1. Oscilatorul mecanic
 - 1.1.1. Fenomene periodice. Procese oscilatorii în natură și în tehnică
 - 1.1.2. Mărimi caracteristice mișcării oscilatorii
 - 1.1.3. Oscilații mecanice amortizate
 - 1.1.4. (*) *Modelul oscilatorului liniar armonic*
 - 1.1.5. Compunerea oscilațiilor paralele
- 1.2. Oscilatori mecanici cuplați
 - 1.2.1. Oscilații mecanice întreținute. Oscilații mecanice forțate
 - 1.2.2. (*) *Rezonanța*
 - 1.2.3. Consecințele rezonanței
- 1.3. Unde mecanice
 - 1.3.1. Propagarea unei perturbații într-un mediu elastic. Transferul de energie
 - 1.3.2. (*) *Modelul „undă plană”. Periodicitatea spațială și temporală*
 - 1.3.3. Reflexia și refracția undelor mecanice
 - 1.3.4. Unde seismice
 - 1.3.5. Interferența undelor
 - 1.3.6. Acustică
 - 1.3.7. Ultrasunete și infrasunete. Aplicații în medicină, industrie, tehnică militară

ACTIVITĂȚI DE EVALUARE

* Subcapitole cu caracter opțional



1.1. Oscilatorul mecanic

1.1.1. Fenomene periodice. Procese oscilatorii în natură și în tehnică

1

În secolul al XVI-lea, Galileo Galilei cronometra oscilația unui candelabru din Catedrala din Pisa cu ajutorul propriului său puls. El constata că mișcarea acestuia este din ce în ce mai puțin amplă, datorită forțelor de rezistență întâmpinate la înaintare. În natură apar multe tipuri de oscilații. De la vibrația corzilor vocale la cea din corzile și tuburile instrumentelor muzicale, de la ticăitul ceasurilor clasice, la legănatul în balansoare, de la mișcarea de agitație termică care duce la încălzirea ceștii în care s-a turnat ceai fierbinte, la mișcările scoarței terestre în timpul seismelor, avem de-a face cu existența unei surse de oscilație.

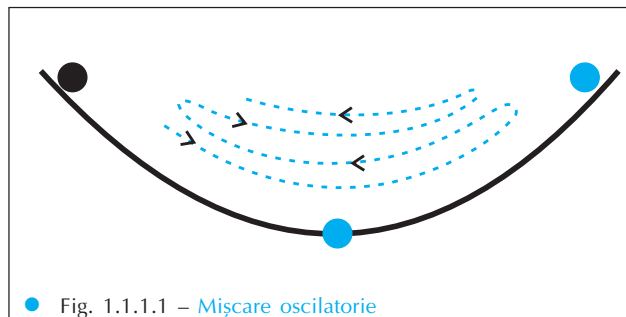
De câte ori o forță acționează asupra unui corp scoțându-l din poziția de echilibru stabil, acesta va oscila sub acțiunea unei forțe de revenire până la restabilirea ei.

Atunci când deplasarea față de poziția de echilibru este mică, forța de revenire depinde liniar de deplasare (într-o aproximație destul de bună) și oscilația se numește armonică fiind descrisă cu ajutorul funcțiilor armonice $\sin$ sau $\cos$.

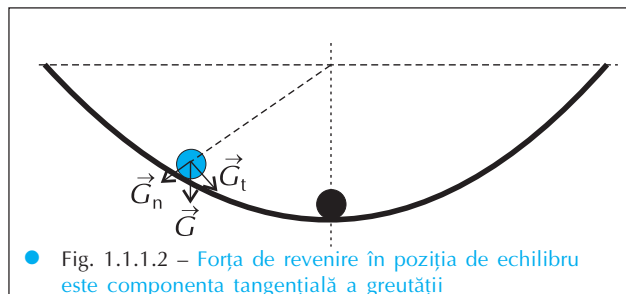
Exemple:

1. O bilă metalică este lăsată liberă la marginea unui recipient semisferic. Ea va efectua o mișcare oscilatorie, în jurul poziției sale de echilibru stabil, aflate în poziția cea mai joasă a recipientului (figura 1.1.1.1).

Forța care va readuce bila spre poziția de echilibru este componenta tangențială a greutateii sale, G_t , care reprezintă cauza acestei oscilații (figura 1.1.1.2).



● Fig. 1.1.1.1 – Mișcare oscilatorie



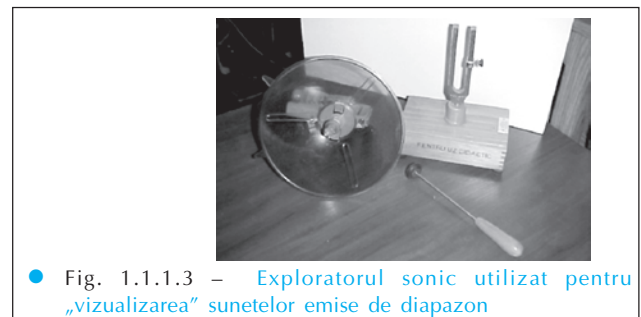
● Fig. 1.1.1.2 – Forța de revenire în poziția de echilibru este componenta tangențială a greutateii

2. Alt oscilator este diapazonul lovit cu un ciocănel de lemn. Vibrația pe care o produce se va propaga prin aerul atmosferic, din aproape în aproape, dând naștere la ceea ce numim **undă sonoră**. Oscilația diapazonului din figura 1.1.1.3, acordat pentru a emite nota LA, a fost înregistrată spre a fi „vizualizată” cu ajutorul unui microfon (exploratorul sonic din figura 1.1.1.3) cuplat cu o placă de achiziție de semnal, instalată într-un computer. Amplitudinea semnalului înregistrat este proporțională cu amplitudinea oscilației diapazonului (figura 1.1.1.4).

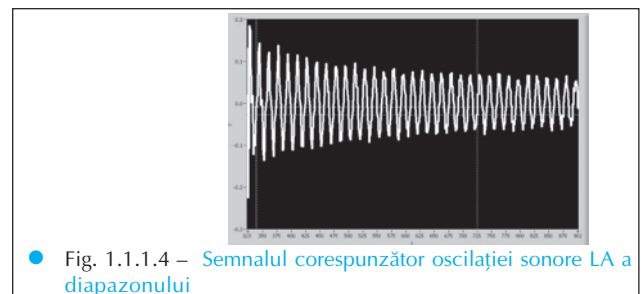
Acest sistem de achiziție de semnale va fi prezent în mai multe experimente descrise în acest manual. Dacă vom studia sunete vom utiliza ca senzori microfoane, dacă vom studia alte tipuri de oscilații mecanice vom utiliza alți senzori cuplați cu placa de achiziție de semnal din computer.

Sistemele reale oscilează amortizat: amplitudinile scad treptat din cauza acțiunii forțelor de frecare și a forțelor de rezistență la înaintarea prin mediu.

Mișcările oscilatorii pot fi întâlnite în tehnică, în timpul funcționării unor mașini precum ciocanul pneumatic, ciocanul hidraulic etc. Motoarele vehiculelor grele produc trepidații ale pieselor componente, ale pereților clădirilor pe lângă care trec. Efectele distructive ale trepidațiilor trebuie împiedicate prin utilizarea de amortizoare.



● Fig. 1.1.1.3 – Exploratorul sonic utilizat pentru „vizualizarea” sunetelor emise de diapazon

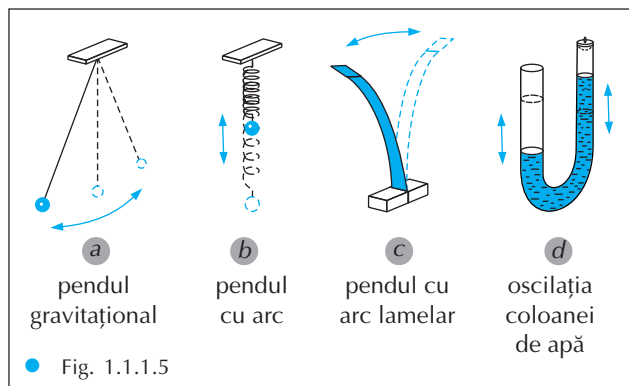


● Fig. 1.1.1.4 – Semnalul corespunzător oscilației sonore LA a diapazonului

Definiție: Se numește **mișcare periodică** a unui punct material acea mișcare care se repetă la intervale de timp egale.

Observație: În clasa a 9-a ați studiat o astfel de mișcare periodică: mișcarea circulară uniformă.

ACTIVITATE EXPERIMENTALĂ



Realizați dispozitivele din figura 1.1.1.5. Scoateți corpurile din poziția de echilibru, așa cum se indică în figură și, apoi, lăsați-le libere. Ce observați?

În toate cazurile se constată că:

- a) mișcarea este periodică;
- b) corpul se deplasează mereu pe aceeași traiectorie;
- c) mișcarea se realizează simetric față de poziția de echilibru;
- d) mișcarea se efectuează între două poziții limită, numite **puncte de întoarcere**, situate de o parte și de cealaltă a poziției de echilibru.

Definiție: Se numește **mișcare oscilatorie** acea mișcare periodică a unui sistem fizic care se efectuează pe aceeași traiectorie, de o parte și de alta a poziției sale de echilibru.

Observație: Când sistemul parcurge traiectoria complet, și într-o parte și în cealaltă, se spune că a efectuat o **oscilație completă**.

1.1.2. Mărimi caracteristice mișcării oscilatorii

Vom defini câteva mărimi fizice necesare studiului mișcării oscilatorii. Unele dintre ele au fost prezentate și în clasa a 9-a, în lecția intitulată *Mișcarea circulară uniformă*. Este vorba despre perioadă și frecvență.

Definiție: Se numește **perioadă** a mișcării oscilatorii mărimea fizică notată T definită de relația:

$$T = \frac{\Delta t}{N},$$

unde Δt este timpul în care sistemul efectuează N oscilații complete, $[T]_{SI} = 1 \text{ s}$.

Observație: Pentru $N = 1$ rezultă $T = \Delta t$. Deci: *perioada T este timpul necesar efectuării unei oscilații complete.*

Definiție: Se numește **frecvență** a mișcării oscilatorii mărimea fizică scalară ν definită de relația:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t},$$

Observații:

1) Luând $\Delta t = 1 \text{ s}$ rezultă $\nu = N$. Deci: *frecvența măsoară numărul de oscilații efectuate într-o secundă.*

2) Unitatea de măsură a frecvenței se numește Hertz (Hz): $[v]_{SI} = s^{-1} = 1 \text{ Hz}$.

3) Din definițiile perioadei și a frecvenței rezultă că $v \cdot T = 1$.

Definiție: Se numește **elongație** a mișcării oscilatorii, notată cu x sau y , deplasarea oscilatorului, la un moment dat, față de poziția sa de echilibru.

Observație: $[x]_{SI} = 1 \text{ m}$.

1

Definiție: Se numește **amplitudine** a mișcării oscilatorii mărimea fizică scalară A egală cu modulul elongației maxime x_{max} pe care o poate avea oscilatorul în cursul oscilației:

$$A = |x_{max}|.$$

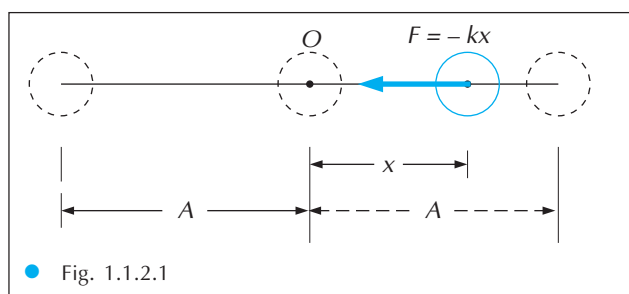


Fig. 1.1.2.1

Observație: Amplitudinea este, conform definiției, pozitivă întotdeauna. Ea reprezintă distanța dintre poziția de echilibru și punctul de întoarcere (figura 1.1.2.1).

Definiție: Se numește **mișcare oscilatorie neamortizată** acea mișcare oscilatorie în care amplitudinea *nu* se schimbă de la o oscilație la alta.

Mișcarea oscilatorie neamortizată este un model ideal. În practică, datorită frecărilor, sistemul pierde energie și, corespunzător, amplitudinea oscilațiilor devine din ce în ce mai mică.

1.1.3. Oscilații mecanice amortizate

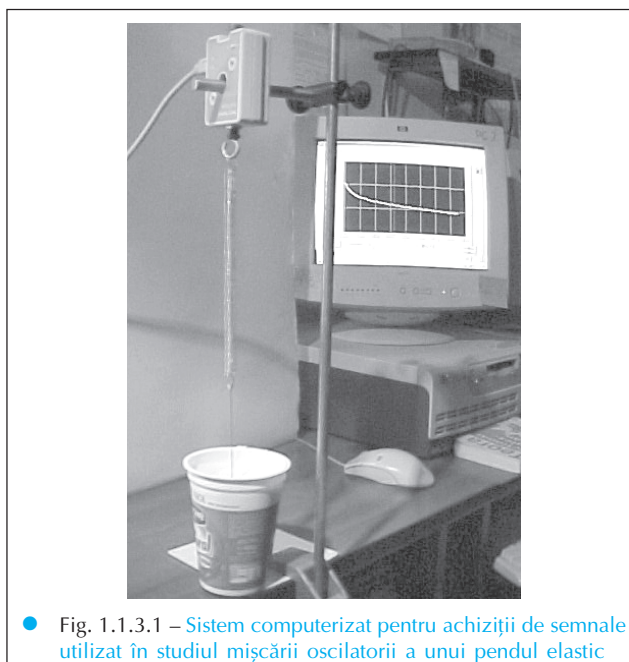


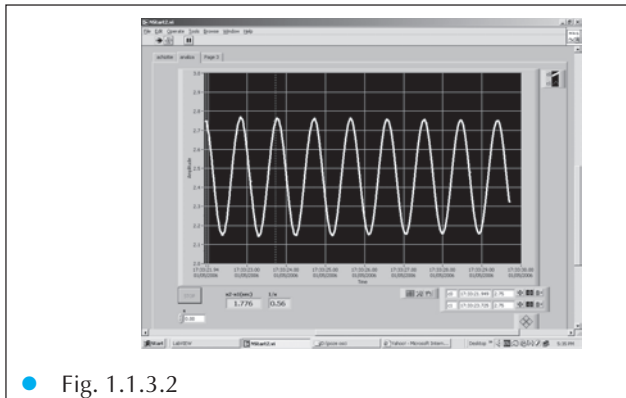
Fig. 1.1.3.1 – Sistem computerizat pentru achiziții de semnale utilizat în studiul mișcării oscilatorii a unui pendul elastic

În timpul mișcărilor oscilatorii sistemele pierd energie prin interacțiunea cu mediul, ceea ce duce la scăderea amplitudinii, adică la amortizarea lor și implicit la stingerea treptată a oscilațiilor.

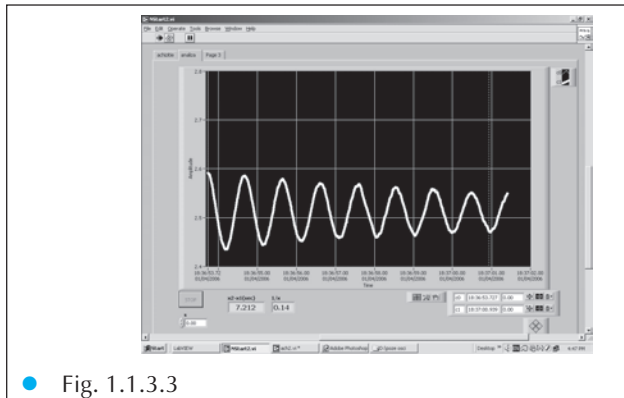
Oscilația a cărei amplitudine scade în timp se numește **oscilație amortizată**.

Prin utilizarea plăcii de achiziție de semnal instalată în computer am înregistrat spre a vizualiza semnalul generat de un senzor de forță, în cârligul căruia a fost suspendat un pendul elastic care oscilează (figura 1.1.3.1). Senzorul de forță indică valoarea forței elastice din resortul pendulului, deci semnalul pe care îl achiziționează este proporțional cu elongația oscilației acestuia. Mișcarea pendulului a avut loc inițial în aer, apoi în apă. Observați semnalele înregistrate în figurile 1.1.3.2 și 1.1.3.3.

Ce se întâmplă cu amplitudinea de oscilație?



● Fig. 1.1.3.2



● Fig. 1.1.3.3

În timpul mișcării, asupra corpului suspendat de resort acționează o forță de rezistență la înaintarea prin mediu. Evident, forța este mai puternică în apă decât în aer, ceea ce produce amortizarea vizibilă în figura 1.1.3.3.

Disiparea energiei oscilatorului în mediu este un proces complex care, în general, nu se face numai sub acțiunea acestei forțe. Într-o aproximare suficient de bună, forța de rezistență la înaintarea prin fluid este direct proporțională cu viteza corpului și poate fi descris de relația:

$$R = -r \cdot v$$

unde r este **coeficientul de rezistență** la înaintarea prin fluid,

$$[r]_{SI} = 1 \frac{kg}{s}$$

Valoarea acestui coeficient, în cazul când fluidul este aerul, este suficient de mică pentru a considera forța R neglijabilă.

Dacă fluidul utilizat este apa, amplitudinea oscilației scade în timp după legea:

$$A = A_0 \cdot e^{-b \cdot t}$$

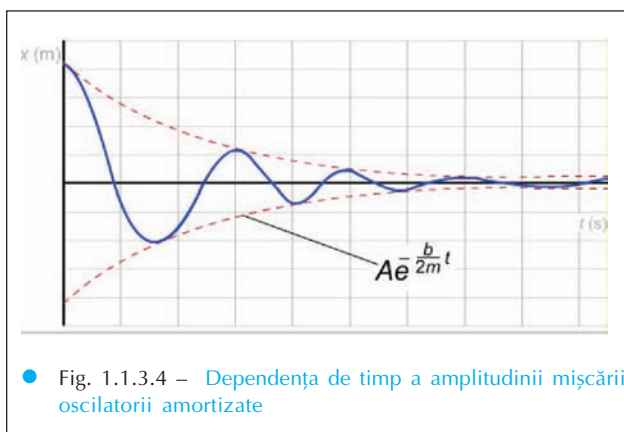
unde A este amplitudinea la momentul de timp t , A_0 este amplitudinea la momentul inițial, iar b este **coeficientul de amortizare**, o altă mărime caracteristică mișcărilor oscilatorii amortizate.

$$[b]_{SI} = 1s^{-1}$$

În cazul când oscilația are loc în apă, urmărim după câte oscilații complete (N_0) amplitudinea scade la jumătate. Definim **decrementul logarithmic** D prin relația:

$$D = b \cdot T'$$

Unde T' este perioada de oscilație în apă. Decrementul logarithmic D se poate calcula în practică



● Fig. 1.1.3.4 – Dependența de timp a amplitudinii mișcării oscilatorii amortizate

din relația:

$$D = \frac{\ln 2}{N_0}$$

O altă mărime caracteristică oscilațiilor amortizate este **timpul de viață τ** , care măsoară intervalul de timp necesar pentru ca amplitudinea să scadă de $e = 2,718$ ori.

Dacă amplitudinea este mică, $b < \omega_0$, unde ω_0 este pulsația în aer, atunci decrementul logarithmic $D \ll 1$ și numărul de oscilații $N_0 \gg 1$, deci în timpul de viață se efectuează un număr mare de oscilații.

Cu același sistem de achiziție computerizată a semnalelor electrice generate de senzorul de forță au fost înregistrate dependențele de timp ale elongației pendulului elastic aflat pe rând în soluții apoase de iaurt. Se poate evidenția trecerea de la regimul aperiodic din mediul vâcos, prin regimul tranzitoriu o dată cu diluarea iaurtului, la regimul fără amortizare al oscilației pendulului în aer.

Observați imaginile din figurile 1.1.3.5 -1.1.3.12!

Ce se întâmplă cu timpul de viață al oscilației atunci când vâscozitatea mediului scade ?

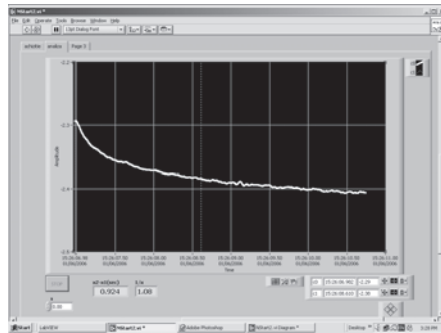


Fig. 1.1.3.5

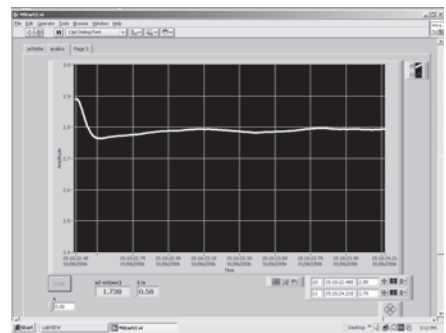


Fig. 1.1.3.6

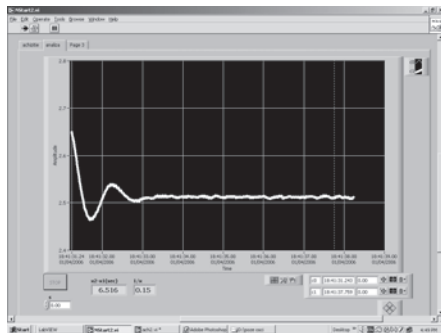


Fig. 1.1.3.7

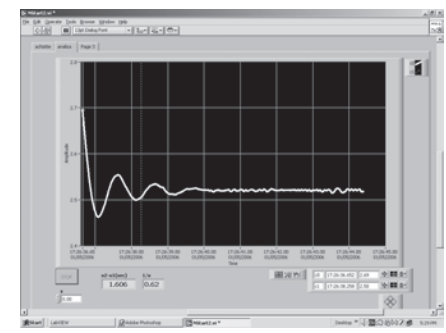


Fig. 1.1.3.8

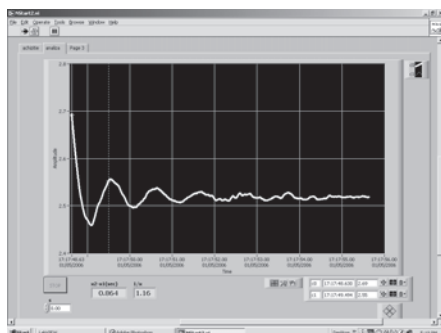


Fig. 1.1.3.9

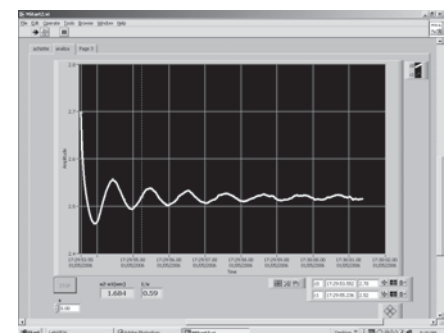


Fig. 1.1.3.10

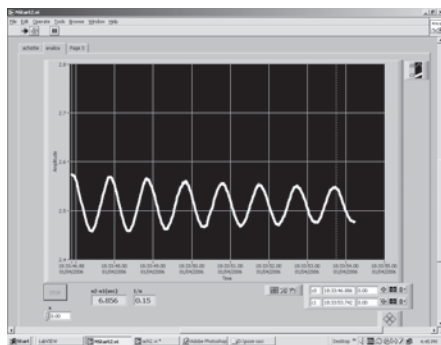


Fig. 1.1.3.11

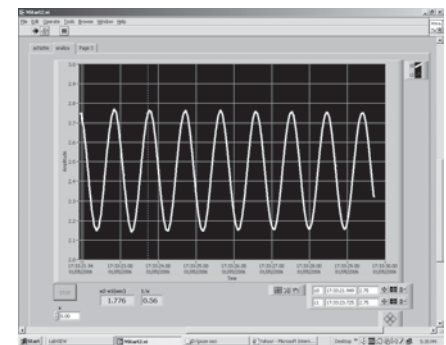


Fig. 1.1.3.12

LUCRARE DE LABORATOR

Studiul amortizării oscilațiilor mecanice

Veți studia oscilațiile unui pendul elastic cu masa cunoscută, în medii precum aerul și apa. Veți calcula perioada sa de oscilație în aer T , și respectiv în apă T' , cronometrând 10-20 de oscilații și utilizând relația:

$$T = \frac{\Delta t}{N}$$

Pentru mișcarea sa amortizată în apă veți calcula coeficientul de rezistență la înaintarea prin apă, r , coeficientul de amortizare, b și decrementul logaritmico D . Numărați după câte oscilații complete, N_0 , amplitudinea scade la jumătate. Calculați întâi decrementul logaritmico:

$$D = \frac{\ln 2}{N_0}$$

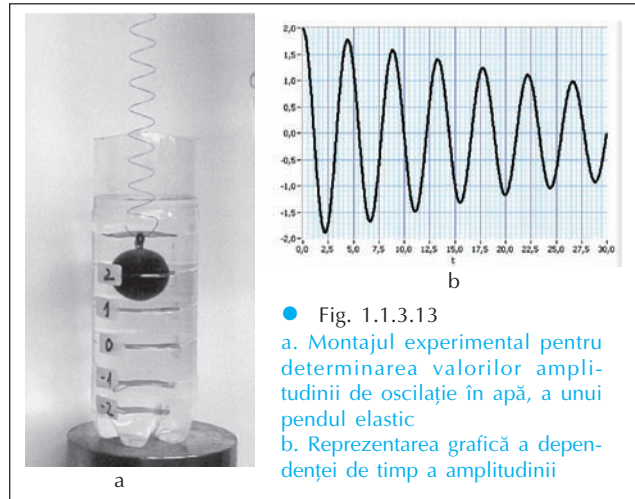
apoi coeficientul de amortizare și timpul de viață:

$$b = \frac{D}{T'} \quad \tau = \frac{1}{b}$$

și coeficientul de rezistență:

$$r = 2 \cdot m \cdot b$$

Materiale necesare sunt: pendulul elastic (figura 1.1.3.13), un stativ cu suport, un vas transparent cu apă și un cronometru. Alegeți un resort și un corp suficient de greu pentru a vă asigura că în apă veți obține cel puțin 6-7 oscilații complete. Deviați pendulul din poziția verticală de echilibru astfel încât să aibă o amplitudine pe care să o puteți ușor înregistra. Notați valorile descrescătoare ale amplitudinii într-un tabel de forma alăturată. Având în vedere că mișcarea se repetă periodic și simetric, încercați reprezentarea grafică a dependenței de timp a elongației pendulului elastic. Dacă aveți posibilitatea, utilizați o foaie de calcul tabelar (Excel) pentru a realiza tabelul de date experimentale și pentru a realiza reprezentarea grafică.



Nr. oscilației	1	2	3	4	5	6	7
Amplitudinea							



Experiment virtual: la adresa: <http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/applst/damped/d.htm> puteți investiga efectul forțelor de rezistență la înaintare în cazul unui pendul elastic virtual. Modificați valorile parametrilor pentru a ilustra regimurile de oscilație ale pendulului!

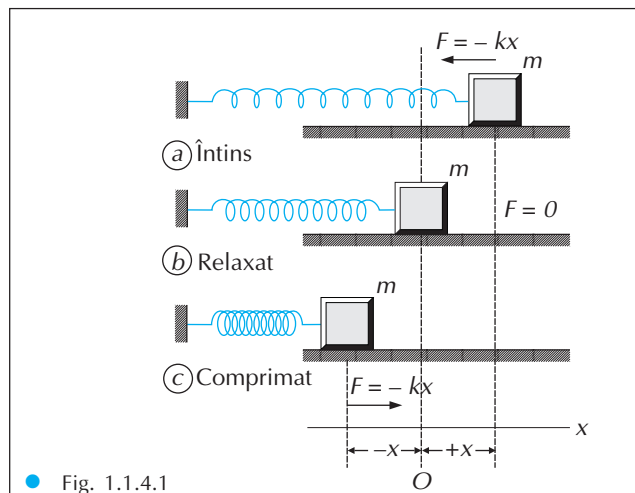
1.1.4. (*) Modelul oscilatorului liniar armonic

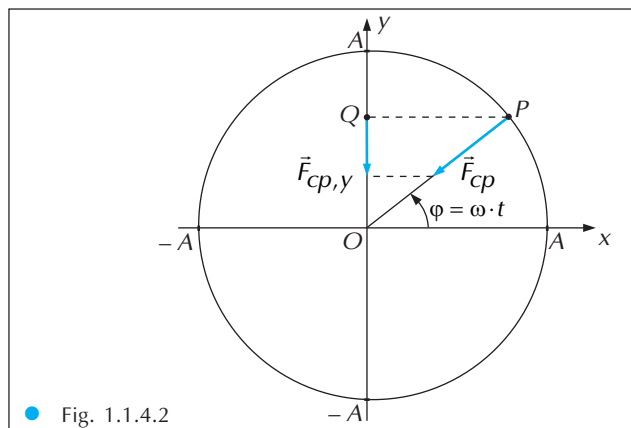
Cel mai simplu exemplu de mișcare oscilatorie este mișcare unui punct material de masă m sub acțiunea unei forțe de revenire elastice (figura 1.1.4.1).

Definiție: Se numește **oscilator liniar armonic** un punct material care se mișcă rectiliniu sub acțiunea unei forțe de forma $F = -k \cdot y$ (sau $F = -k \cdot x$).

Observație: Oscilatorul armonic liniar este un *model teoretic ideal* pentru oscilatoarele reale. Mișcarea sa de oscilație este numită **mișcare oscilatorie armonică**.

Din ecuația principiului al II-lea al mecanicii, $F = -k \cdot y = m \cdot a$, rezultă că $a = -\frac{k}{m} \cdot y$.





● Fig. 1.1.4.2

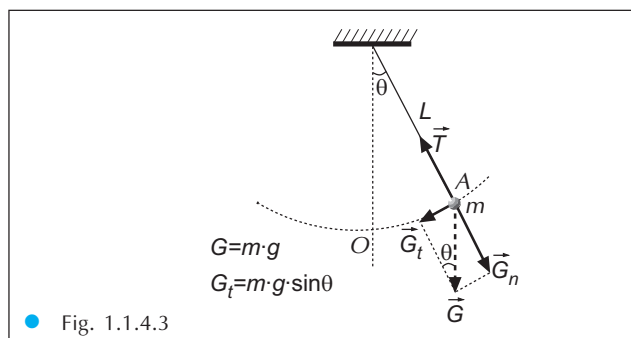
Deci: **mișcarea oscilatorie armonică este o mișcare cu accelerație variabilă, proporțională cu elongația și de sens opus acesteia.**

Considerăm un punct material P , în mișcare circulară uniformă, cu viteza unghiulară ω , pe un cerc de rază A (figura 1.1.4.2).

Accelerația punctului P va fi:

$$\vec{a}_{cp} = -\omega^2 \cdot \vec{A}$$

Pendulul gravitațional



● Fig. 1.1.4.3

Forța de revenire nu este proporțională cu θ , ci cu $\sin \theta$ și, de aceea, **mișcarea pendulului gravitațional nu este o mișcare armonică.**

Pentru unghiuri mici, dacă θ este exprimat în radiani, se poate arăta că

$$\sin \theta \cong \theta .$$

De exemplu, pentru $\theta = 0,1$ rad (aproximativ $\theta = 5,73^\circ$), $\sin \theta = 0,0998$. Diferența este de 2‰. Pentru unghiuri mai mici de 6° diferența între θ și $\sin \theta$ este suficient de mică pentru a fi neglijată. Folosind aproximația discutată expresia forței de revenire devine: $F = -m \cdot g \cdot \theta$, unde s-a folosit și următoarea convenție.

Convenție: Pentru pozițiile pendulului situate la dreapta poziției de echilibru unghiul θ este considerat pozitiv, iar pentru pozițiile situate la stânga poziției de echilibru unghiul θ este considerat negativ.

Deoarece unghiul θ este exprimat în radiani,

$$\theta = \frac{x}{L} ,$$

Proiecția punctului P pe axa Oy (punctul Q), va executa o mișcare cu accelerație egală cu proiecția accelerației centripete pe axă, adică:

$$a_{cp} = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin \varphi = -\omega^2 \cdot y .$$

Pentru a urmări mișcarea punctului Q cu ajutorul unui punct material de masă m , asupra acestuia trebuie să acționeze o forță:

$$F = m \cdot a_{cp,y} = -m \cdot \omega^2 \cdot y$$

Se constată că proiecția unui punct aflat în mișcare circulară uniformă pe un diametru al cercului traiectorie efectuează o mișcare oscilatorie liniar armonică sub acțiunea unei forțe F de tip elastic. Comparând această relație cu relația de definiție rezultă:

$$k = m \cdot \omega^2 .$$

Deoarece $\omega = 2\pi \cdot \nu = \frac{2\pi}{T}$, rezultă că perioada oscilației armonică linare este dată de relația:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} .$$

Pendulul gravitațional este format dintr-un punct material de masă m suspendat de un fir inextensibil de masă neglijabilă și de lungime L (figura 1.1.4.3). Dacă pendulul este deplasat din poziția sa verticală de echilibru și este lăsat liber, el oscilează în plan vertical sub acțiunea forței de greutate. Traectoria descrisă de punctul material este un arc de cerc. În figura 1.1.4.3 s-au reprezentat și forțele care acționează asupra punctului material. Forța de revenire, care tinde să readucă pendulul în poziția de echilibru este

$$F = G_t = m \cdot g \cdot \sin \theta .$$

unde x este lungimea corzii care subîntinde arcul de cerc cuprins între poziția de echilibru, O , și poziția, A , ocupată de punctul material. Atunci expresia forței de revenire ia forma

$$F = -\frac{m \cdot g}{L} \cdot x \equiv -k \cdot x,$$

ceea ce arată că, **pentru oscilații de mică amplitudine** (unghiuri $\theta < 6^\circ$) **forța de revenire este de tip elastic și mișcarea pendulului este o mișcare oscilatorie armonică**.

Perioada T de oscilație a pendulului este dată de relația

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Folosind aici relația $k = (m \cdot g)/L$, se obține pentru perioada de oscilație a pendulului gravitațional expresia

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}},$$

unde:

- L este lungimea pendulului, $[L]_{SI} = m$;
- g este accelerația gravitațională, $[g]_{SI} = m/s^2$.

Observații:

- 1) Această expresie a perioadei pendulului gravitațional este adevărată în cazul micilor oscilații, adică atunci când firul pendulului se abate de la verticală cu un unghi mai mic de 6° .
- 2) Perioada pendulului gravitațional este independentă de masa sa.
- 3) Deoarece perioada pendulului gravitațional nu depinde nici de amplitudinea oscilațiilor, pendulul poate fi folosit la măsurarea timpului.
- 4) Deoarece L și T pot fi ușor și precis măsurate, pendulul gravitațional poate fi folosit la determinarea valorii accelerației gravitaționale g .

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$



Experiment virtual: la adresa http://www.walter-fendt.de/ph14ro/pendulum_ro.htm puteți investiga mișcarea oscilatorie a unui pendul gravitațional virtual. Modificați valorile parametrilor și vizualizați dependențele de timp ale elongației, ale vitezei, ale accelerației, ale forței de revenire a pendulului în poziția de echilibru și respectiv a energiei acestuia!

LUCRARE DE LABORATOR

Studiul experimental al unor oscilatori mecanici simpli

Pendulul gravitațional

Veți determina perioada de oscilație a unui pendul bifilar (figura 1.1.4.4) utilizând relația:

$$T = \frac{\Delta t}{N}$$

Pentru aceasta veți cronometra intervalul de timp Δt necesar efectuării unui număr N de oscilații complete. Pendulul gravitațional oscilează în condiții de izocronism (amplitudine unghiulară mică) cu perioada:



● Fig. 1.1.4.4 – Montaj experimental – pendul bifilar

Dacă în această relație se cunosc valorile determinate ale perioadei de oscilație T și respectiv ale lungimii firului, l , atunci se poate calcula valoarea accelerației gravitaționale a locului:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

Materiale necesare sunt: pendulul bifilar, un stativ cu suport și un cronometru.

Deviați pendulul din poziția verticală de echilibru astfel încât să nu aibă amplitudine unghiulară mai mare de $10-15^\circ$. Din punct de vedere strict matematic ar trebui să ne limităm la 5° pentru a fi valabilă aproximația unghiurilor mici, dar extinderea propusă până la 15° nu afectează considerabil rezultatul obținut și ușurează numărarea oscilațiilor complete ale pendulului.

Cronometrați de fiecare dată un număr de 10-20 de oscilații complete. Introduceți datele într-un tabel de forma indicată în continuare, calculați valoarea medie a perioadei pendulului, erorile absolută și relativă înregistrate. Calculați apoi valoarea accelerației gravitaționale a locului unde a oscilat pendulul.

$l(m)$	$\Delta t (s)$	N	$T(s)$	$T_{med}(s)$	$g(m/s^2)$	$g_{med}(m/s^2)$

Reluați experimentul pentru diferite lungimi ale firului și calculați valorile obținute pentru perioadele de oscilație. Reprezentați grafic perioada T ca funcție de $\sqrt{l}$ și calculați panta dreptei obținute ($p = \tan \alpha$). Calculați apoi valoarea accelerației gravitaționale din relația:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{p^2}$$

Comparați rezultatele obținute!

Dacă aveți posibilitatea, utilizați o foaie de calcul tabelar (Excel) pentru a realiza tabelul de date experimentale.

Pendulul elastic



● Fig. 1.1.4.5 – Montaj experimental – pendul elastic

Veți determina constanta elastică a unui resort prin metoda dinamică, apoi veți verifica experimental formula de calcul a constantei elastice a resorturilor cuplate serie sau paralel. Pendulul elastic oscilează în plan vertical (figura 1.1.4.5) cu o perioadă:

$$T = \frac{\Delta t}{N} \quad (1)$$

unde Δt este timpul necesar efectuării unui număr N de oscilații complete.

Perioada se poate calcula și din relația:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

unde m este masa corpului și k constanta elastică a resortului.

Determinând perioada pendulului cu prima relație veți putea calcula constanta elastică a resortului din relația:

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} \quad (3)$$

Pentru cuplaje de resorturi identice veți calcula perioadele de oscilație cu relațiile (1) și (2). În relația (2) se va utiliza pentru cuplaj serie constanta:

$$k_s = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}; \quad k_s = \frac{k}{2}, \text{ pentru resorturi identice}$$

$$k_p = k_1 + k_2; \quad k_p = 2 \cdot k, \text{ pentru resorturi identice} \quad (4)$$

Materialele necesare sunt: un postament cu tijă și mufe, două resorturi identice, un corp metalic cu cârlig, un cronometru și o bară metalică etalonată (pârghie din trusă). Realizați montajele experimentale din figurile 1.1.4.5.-1.1.4.7, scoateți corpul de masă m din poziția de echilibru și cronometrați un anumit număr de oscilații.

Înregistrați datele în tabel și calculați perioada de oscilație în cele trei cazuri cu formula (1).

Aplicați formula (3) pentru calculul constantei elastice în versiunea experimentală k_{exp} .

Aplicați relațiile (4) pentru calculul teoretic al acelorași constante elastice k_{teor} și comparați rezultatele obținute.

Efectuați 10-12 măsurători pentru fiecare caz.

Cuplajul	N	$\Delta t(\text{s})$	$T(\text{s})$	$k_{\text{exp}}(\text{N/m})$	$k_{\text{teor}}(\text{N/m})$

Identificați sursele de erori și propuneți soluții pentru micșorarea lor.

Dacă aveți posibilitatea, utilizați o foaie de calcul tabelar (Excel) pentru a realiza tabelul de date experimentale.

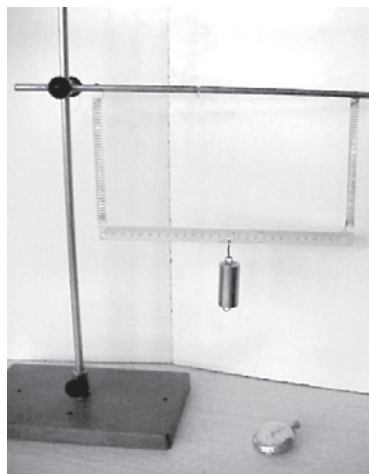
Ecuatiile mișcării oscilatorului liniar armonic

Considerăm din nou punctul material P în mișcare circulară uniformă, cu viteza unghiulară ω , pe un cerc de rază A , sub acțiunea forței centripete:

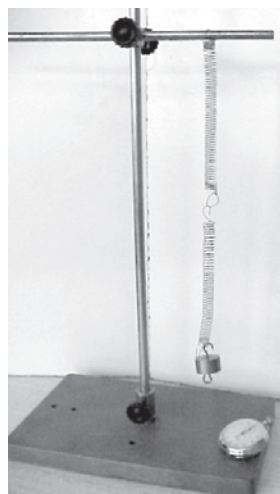
$$\vec{F}_{cp} = -m \cdot \omega^2 \cdot \vec{A}.$$

Presupunem că la momentul inițial punctul material se află în poziția P_0 (figura 1.1.4.8), vectorul său de poziție față de centrul cercului traiectorie făcând unghiul φ_0 cu axa Ox . La momentul t punctul se află în poziția P , vectorul său de poziție făcând unghiul $\omega \cdot t + \varphi_0$ cu axa Ox . Corespunzător, proiecția sa pe axa Oy este dată de relația:

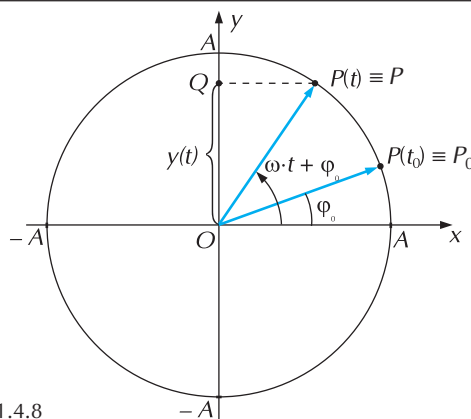
$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0),$$



● Fig. 1.1.4.6 – Montaj experimental – pendul elastic cu resorturi cuplate în paralel



● Fig. 1.1.4.7 – Montaj experimental – pendul elastic cu resorturi cuplate în serie



● Fig. 1.1.4.8

unde:

- $y(t)$ este elongația mișcării oscilatorii a proiecției Q la momentul t , $[y]_{SI} = 1 \text{ m}$;
- A este amplitudinea mișcării oscilatorii, $[A]_{SI} = 1 \text{ m}$;
- $\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$ este **faza** mișcării oscilatorii (la momentul t), $[\varphi]_{SI} = 1 \text{ rad}$;
- ω este **pulsăția** mișcării oscilatorii; ea reprezintă viteza de variație a fazei, $[\omega]_{SI} = 1 \text{ rad/s}$;
- φ_0 este faza inițială a mișcării oscilatorii, $\varphi_0 = \varphi(t=0)$.

Aceasta este **legea de mișcare** a oscilatorului liniar armonic.

1

Observație: Această asociere a mișcării oscilatorii armonice a punctului Q cu mișcarea circulară uniformă a punctului P a permis fizicianului francez Augustin Fresnel să introducă **reprezentarea fazorială** a mărimilor care variază după o lege sinusoidală ca cea de mai sus. **Fazorul** este un vector care are modulul egal cu amplitudinea A a oscilației și care se rotește în jurul originii sistemului de coordonate cu o viteză unghiulară egală cu pulsăția ω a mișcării oscilatorii. Este vectorul $\overrightarrow{OP}$ din figura 1.1.4.8.

Din **legea de mișcare** a oscilatorului liniar armonic, folosind relația $a = -\omega^2 \cdot y$, se deduce ușor **legea accelerației**:

$$a(t) = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

unde:

- $a(t)$ este accelerația mișcării oscilatorii la momentul t , $[a]_{SI} = 1 \text{ m/s}^2$;
- $a_M = A \cdot \omega^2$ este accelerația maximă a mișcării oscilatorii.

Folosind **legea de mișcare** în relația de definiție a vitezei:

$$v = \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t}, \text{ pentru } \Delta t \text{ foarte mic,}$$

se poate obține și **legea vitezei** oscilatorului liniar armonic:

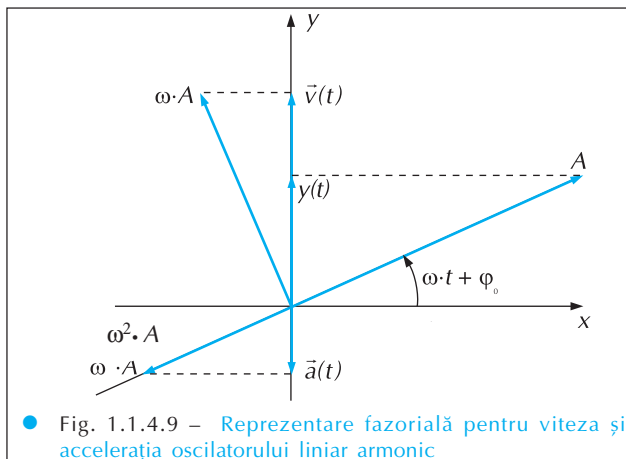
$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

unde:

- $v(t)$ este viteza mișcării oscilatorii la momentul t , $[v]_{SI} = \text{m/s}$;
- $v_M = A \cdot \omega$ este viteza maximă a mișcării oscilatorii.



Exercițiul 1.1.4.1. Deduceți **legea vitezei** oscilatorului liniar armonic utilizând metoda prezentată anterior.



Puteți observa că **legea vitezei** și cea a **accelerației** pot fi scrise și în forma:

$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$a(t) = A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0 + \pi).$$

Din figura 1.1.4.9 puteți observa că viteza este defazată *înainte* cu $\pi/2$ față de elongație, iar accelerația este și ea defazată *înainte* cu π față de elongație.

În figura 1.1.4.10 sunt reprezentate grafic dependențele de timp ale elongației $y(t)$, vitezei $v(t)$ și accelerației $a(t)$ pentru mișcarea oscilatorie a unui punct material având faza inițială $\varphi_0 = 0$.

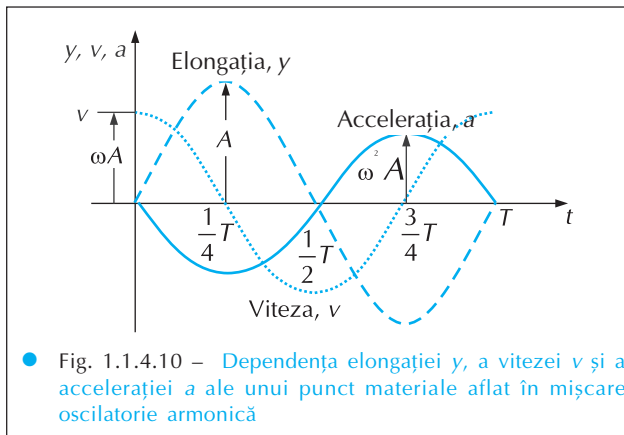


Exercițiul 1.1.4.2. Un corp având masa de 0,5 kg, legat de un perete vertical printr-un resort elastic de constantă de elasticitate $k = 8 \text{ N/m}$, se poate deplasa fără frecare pe un plan orizontal. La momentul inițial, $t_0 = 0$, corpul se află la o distanță $y_0 = 10 \text{ cm}$ de poziția de echilibru și este lăsat liber. Aflați: a) ecuația mișcării oscilatorii a corpului; b) viteza maximă v_M .

Soluție: Scriem legea de mișcare și legea vitezei

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi).$$



Conform enunțului problemei, condițiile inițiale ale mișcării sunt

$$y(0) = y_0, \quad v(0) = 0.$$

Folosind cele două ecuații în aceste condiții rezultă că $A \cdot \sin \varphi_0 = y_0$, $\cos \varphi_0 = 0$.

De aici se găsește că $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$, $A = y_0$.

Ecuția mișcării ia atunci forma $y(t) = y_0 \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) = y_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = y_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right)$.

Folosind aici valorile numerice se obține în final expresia $y(t) = 0,1 \text{ m} \cdot \cos(4 \cdot t)$.

Pentru viteza maximă se găsește că $v_M = A \cdot \omega = y_0 \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = 0,4 \text{ m/s}$.



Exercițiul 1.1.4.3. Reprezentați grafic ecuația mișcării oscilatorii obținută la exercițiul 1.1.4.2. Scrieți ecuația unei mișcări oscilatorii defazate cu $\pi/3$ în urma oscilației precedente. Reprezentați grafic ecuația obținută.



Exercițiul 1.1.4.4. Un corp oscilează vertical fiind suspendat de două resorturi ideale identice, având fiecare constanta de elasticitate k , legate mai întâi în serie și, apoi, în paralel. Aflați raportul r al lungimilor celor două pendule matematice care oscilează sincron cu corpul în cele două situații.

Soluție: Când resorturile sunt legate în serie, constanta de elasticitate echivalentă k_s este dată de relația:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{2}{k}$$

deci $k_s = k/2$, iar când sunt legate în paralel, constanta de elasticitate echivalentă k_p este: $k_p = k_1 + k_2 = 2 \cdot k$.

În primul caz, perioada oscilațiilor este: $T_s = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_s}}$,

Perioada pendulului matematic care oscilează sincron cu corpul este: $T_s = 2\pi \sqrt{\frac{L_s}{g}}$.

Din aceste două relații rezultă că: $L_s = \frac{m \cdot g}{k_s}$.

În mod analog, pentru cazul în care resorturile sunt legate în paralel, se obține: $L_p = \frac{m \cdot g}{k_p}$.

Raportul r cerut este atunci dat de relația: $r \equiv \frac{L_s}{L_p} = \frac{k_p}{k_s} = \frac{2k}{\frac{k}{2}} = 4$.

Energia oscilatorului armonic

Energia mecanică a oscilatorului armonic linear se poate calcula pornind de la relația

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2.$$

Folosind aici ecuația vitezei și legea de mișcare rezultă că

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \varphi_0) + \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t + \varphi_0).$$

De aici, folosind relația $k = m \cdot \omega^2$, rezultă în final că energia oscilatorului armonic linear este dată de relația

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \cos^2 \omega t + \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2 = 2\pi^2 \cdot v^2 \cdot A^2 \cdot m.$$

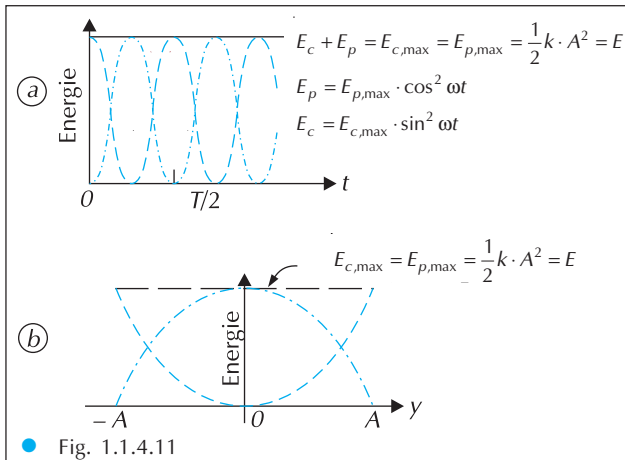


Fig. 1.1.4.11

Această expresie arată că **energia oscilatorului armonic linear este constantă în timp** deși energiile – cinetică și potențială – variază ca în figura 1.1.4.11-a.

În figura 1.1.4.11-b sunt reprezentate energia cinetică, energia potențială și energia totală în funcție de elongația y . Din acest al doilea grafic se desprind două concluzii importante.

Mai întâi, se vede explicit că mișcarea este limitată la segmentul $(-A, +A)$: în caz contrar energia potențială ar depăși valoarea energiei totale, ceea ce este imposibil. De aceea se spune că mișcarea oscilatorului are loc într-o **groapă de energie potențială**, cu referință la forma curbei care reprezintă grafic E_p .

În al doilea rând, se constată că în timpul mișcării oscilatorii are loc un schimb permanent de energie.

Considerând modelul corp de masă m plus resort (figura 1.1.4.1) vedem că energia cinetică a corpului de masă m se transformă în energie potențială a resortului elastic atunci când corpul se mișcă de la poziția de echilibru spre poziția de maximă deformare a resortului. Când corpul se mișcă în sens invers are loc transferul invers de energie: energia potențială elastică a resortului scade și se transformă în energie cinetică a corpului de masă m . Un astfel de sistem este numit **sistem mecanic oscilant**: energia „oscilează” între cei doi acumulatori de energie, resortul și respectiv, corpul de masă m .



Exercițiul 1.1.4.5. Un corp de masă $m = 200$ g execută oscilații armonice. Valoarea extremă a forței elastice care acționează asupra corpului este $F = 200$ N. Energia totală a oscilatorului este $E = 40$ J. Considerați ca origine a timpului momentul în care corpul trece prin poziția de echilibru în sensul pozitiv al axei alese. Scrieți ecuația de mișcare a corpului.

Soluție: Conform enunțului problemei $\varphi_0 = 0$, deci ecuația de mișcare este de forma $y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$.

Deoarece $F = k \cdot A$ și $E = k \cdot A^2 / 2$ rezultă că $A = \frac{2 \cdot E}{F}$.

Pe de altă parte, $k = \frac{F}{A} = \frac{F^2}{2 \cdot E}$, deci $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{F^2}{2 \cdot m \cdot E}} = \frac{F}{\sqrt{2 \cdot m \cdot E}}$.

Atunci se obține:

$$y(t) = \frac{2 \cdot E}{F} \cdot \sin\left(\frac{F \cdot t}{\sqrt{2 \cdot m \cdot E}}\right) = 0,4 \text{ m} \cdot \sin(50 \cdot t) \quad (\text{m}).$$



Exercițiul 1.1.4.6. Să se afle elongația y a unui oscilator armonic în momentul în care energia sa cinetică este egală cu cea potențială. Amplitudinea oscilațiilor este $A = 14,14 \text{ cm}$.

Soluție: Energia totală a oscilatorului este $E = E_c + E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$.

Condiția din problemă este $E_c = E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2$. Înlocuind aceste expresii în relația precedență rezultă că $2 \cdot \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \Rightarrow y = \pm \frac{A}{\sqrt{2}}$. Corespunzător, numeric se obține $y = \pm 10 \text{ cm}$.



Experiment virtual: la adresa: http://www.walter-fendt.de/ph14ro/resonance_ro.htm puteți investiga mișcarea oscilatorie a unui pendul elastic virtual. Modificați valorile parametrilor și vizualizați dependențele de timp ale elongației, ale vitezei, ale accelerației, ale forței de revenire a pendulului în poziția de echilibru și respectiv a energiei acestuia!

1.1.5. Compunerea oscilațiilor paralele

Considerăm cazul în care punctul material execută simultan două mișcări oscilatorii pe aceeași direcție și cu aceeași pulsație ω , dar având amplitudini și faze inițiale diferite

$$y_1(t) = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{01}), \quad y_2(t) = A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{02}).$$

Reprezentăm aceste oscilații cu ajutorul fazorilor $\vec{A}_1$ și $\vec{A}_2$ (figura 1.1.5.1). Acești vectori se află inițial în pozițiile din figura 1.1.5.1, fazele inițiale fiind unghiurile pe care ei le fac cu axa Ox . Modulele acestor vectori sunt amplitudinile de oscilație ale celor două

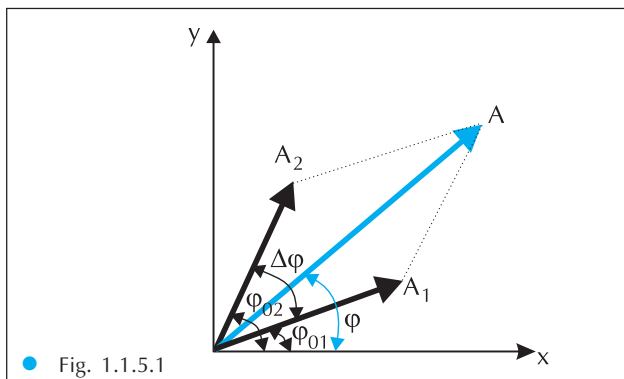


Fig. 1.1.5.1

mișcări oscilatorii. La momentul inițial cei doi fazori încep să se rotească în sens trigonometric cu viteză unghiulară ω . Proiecțiile lor pe axa Oy depind de timp conform celor două relații de mai sus.

Mișcarea rezultantă va fi dată de relația: $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$.

Așa cum se vede din figură $y(t)$ este proiecția pe axa Oy a fazorului:

$$\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2.$$

Acest fazor se rotește odată cu fazorii componenți cu aceeași viteză unghiulară ω , și reprezintă mișcarea oscilatorie rezultantă:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi).$$

Conform regulii paralelogramului, modulul fazorului rezultat, care dă amplitudinea mișcării de oscilație rezultantă, este dat de relația:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})}.$$

Faza inițială a mișcării rezultante este dată de unghiul φ_0 pe care îl face inițial fazorul rezultat $\vec{A}$ cu axa Ox . Așa cum se vede din figură:

$$\tan \varphi = \frac{y}{x} = \frac{y_1 + y_2}{x_1 + x_2} = \frac{A_1 \cdot \sin \varphi_{01} + A_2 \cdot \sin \varphi_{02}}{A_1 \cdot \cos \varphi_{01} + A_2 \cdot \cos \varphi_{02}}.$$

1.2. Oscilatori mecanici cuplați

1.2.1. Oscilații mecanice întreținute. Oscilații mecanice forțate

1



Fig. 1.2.1.1

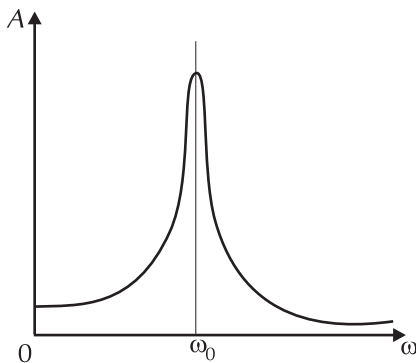


Fig. 1.2.1.2

Forțele externe pot micșora amplitudinea mișcării unui oscilator. Este cazul forței de frecare și al forțelor de rezistență la înaintare care încetinesc mișcarea leagănului (figura 1.2.1.1). În alte situații, forțele externe ar putea duce la menținerea constantă a amplitudinii de oscilație sau chiar la creșterea ei, acționând contrar forțelor de rezistență.

Exemplu: În cazul copilului aflat în leagăn, forțele de frecare din lagăre și forța de rezistență la înaintare produc amortizarea mișcării, iar forța aplicată de o persoană care împinge leagănul, în sensul de mișcare, va duce la creșterea amplitudinii acestuia. În această ultimă situație afirmăm că leagănul execută **oscilații forțate**.

Frecvența proprie (naturală) a unui sistem este frecvența pentru care el oscilează liber în absența forței externe. Valoarea frecvenței proprii (naturale) depinde de caracteristicile structurii sistemului.

Cu cât frecvența de oscilație (*damping*) este mai apropiată ca valoare de frecvența proprie, transferul energetic din exterior către oscilator este mai eficient, iar amplitudinea are valori mai mari. Fenomenul prin care transferul de energie de la forța excitatoare la sistemul excitat este maxim se numește **rezonanță**. Dependența amplitudinii oscilatorului de pulsația excitatoare este reprezentată în figura 1.2.1.2.

Fie un sistem care oscilează cu pulsația proprie ω_0 , în absența amortizării, asupra căruia se exercită două forțe externe: una periodică care mărește amplitudinea de forma $F = F_0 \cos \Omega t$ și cealaltă care îl amortizează. Experiența arată că după trecerea unui regim tranzitoriu sistemul va efectua **oscilații întreținute** de amplitudine constantă, având frecvența egală cu frecvența forței externe, periodice, numite oscilații forțate.



Experiment virtual: la adresa http://www.walter-fendt.de/ph14ro/resonance_ro.htm puteți investiga oscilațiile forțate ale unui pendul elastic. Puteți vizualiza dependența de timp a elongației sale, dependența amplitudinii sale și a defazajului în funcție de pulsație.

LUCRARE DE LABORATOR

Studiul a doi oscilatori mecanici cuplați

Fig. 1.2.1.3 – Montaj experimental – cuplaj slab de pendule gravitaționale



Cuplajul slab de pendule gravitaționale

Veți studia oscilațiile unor pendule gravitaționale cu mase identice, cuplate ca în figura 1.2.1.3, pe un fir de ață întins între două trepiede. Unul dintre pendule va fi excitator pentru celelalte trei, el fiind pus inițial în mișcare de oscilație. Pentru a vă asigura că unul dintre pendulele excitate are aceeași lungime cu primul, legați un fir orizontal între firele de suspensie ca în figura 1.2.1.3. Firul are totodată rolul de a asigura cuplajul

slab al pendulelor. Puneți în mișcare de oscilație pendulul din stânga și urmăriți ce se întâmplă cu celelalte trei. Veți constata următoarele:

- Numai pendulul cu aceeași lungime ca și primul va oscila cu amplitudine din ce în ce mai mare, restul efectuând numai oscilații parazitare.
- Treptat amplitudinea excitatorului scade, iar a celui care a intrat în rezonanță cu el crește în aceeași măsură.
- Când toată energia de oscilație a primului pendul s-a transmis celui de-al doilea, excitatorul va rămâne un moment în repaus.
- După acest moment al doilea pendul va deveni excitator pentru primul și fenomenul se va repeta în sens invers, până la amortizarea completă a oscilațiilor.

Cuplajul strâns de pendule elastice

Utilizați două resorturi identice de care suspendați doi magneți bară ca în figura 1.2.1.4.

În timpul oscilațiilor magneții se vor deplasa vertical în interiorul unor bobine identice. Bobinele sunt cuplate prin fire conductoare. Când unul dintre pendule începe să oscileze, mișcarea magnetului va produce variația câmpului magnetic din interiorul bobinei sale, generând curent indus. Acesta, la rândul său, va da naștere unui câmp magnetic variabil în cea de-a doua bobină și va pune astfel în mișcare de oscilație al doilea pendul.

Modurile normale de oscilație pot fi vizualizate în funcție de modul de suspendare a magneților.

Dacă polii Nord ai magneților sunt legați de capătul liber al resorturilor, atunci oscilațiile vor fi în fază. Dacă unul este legat cu polul Nord, iar celălalt cu polul Sud, oscilațiile vor fi în opoziție de fază.

Cuplajul strâns de pendule fizice

Veți utiliza două pendule fizice cuplate prin intermediul unui resort ușor pentru a vizualiza modurile normale de oscilație.

Oscilația normală simetrică se poate realiza deviind ambele pendule cu același unghi, în același sens și lăsându-le să oscileze liber (figura 1.2.1.5).

Oscilația normală antisimetrică se poate realiza deviind ambele pendule cu același unghi, în sensuri opuse și lăsându-le să oscileze liber (figura 1.2.1.6). Acum resortul este solicitat la maxim.

Pentru a vizualiza fenomenul bătăilor țineți unul dintre pendule în poziție verticală, iar pe celălalt deviați-l spre primul, apoi lăsați sistemul liber să oscileze (figura 1.2.1.7).

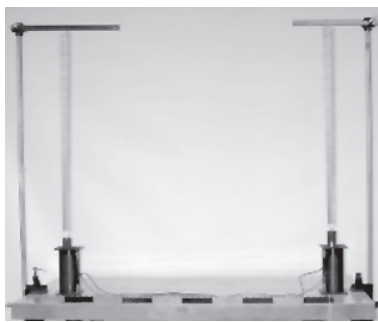


Fig. 1.2.1.4

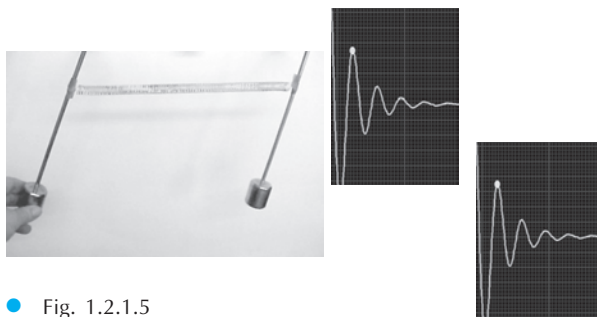


Fig. 1.2.1.5

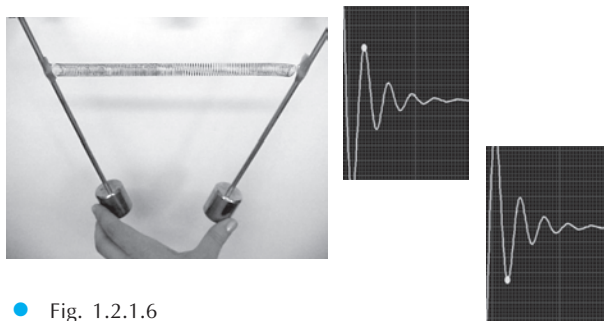


Fig. 1.2.1.6

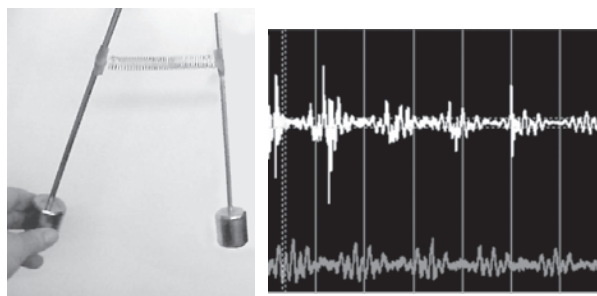


Fig. 1.2.1.7



Experiment virtual: la adresa http://www.walter-fendt.de/ph14ro/cpendula_ro.htm puteți investiga mișcarea oscilatorie în cazul a două pendule cuplate prin intermediul unui resort elastic. Modificați valorile inițiale ale amplitudinilor celor două pendule și observați dependența de timp a elongației pentru fiecare dintre ele. Încercați să ilustrați cazurile prezentate în lecție!

1.2.2. (*) Rezonanța

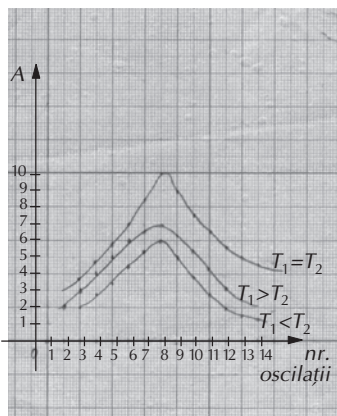
ACTIVITATE EXPERIMENTALĂ

1

Realizați dispozitivul experimental din figura 1.2.2.1. Fixați perioadele celor două pendule gravitaționale prin deplasarea discului în lungul tijei. Deplasați pendulul excitator din poziția verticală de echilibru până în dreptul diviziunii 10, apoi lăsați-l să oscileze, pentru a antrena pendulul excitat în mișcare de oscilație. Notați într-un tabel de date experimentale diviziunea corespunzătoare fiecărei amplitudini a pendulului excitat în timpul oscilației sale. Reprezentați grafic amplitudinea pendulului excitat în funcție de numărul oscilației. Veți obține curbe asemănătoare celor din figura 1.2.2.2 realizate în laboratorul școlar de alți elevi. Ce constatați?



● Fig. 1.2.2.1 – Montaj experimental – rezonanța mecanică



● Fig. 1.2.2.2 – Curbe de rezonanță

În figura 1.2.2.2 este prezentată amplitudinea A a oscilațiilor forțate ale rezonatorului în funcție de pulsația Ω a excitatorului. Când pulsația Ω a excitatorului este apropiată de pulsația ω a rezonatorului, amplitudinea oscilațiilor rezonatorului este maximă. Pentru pulsații Ω din ce în ce mai mari amplitudinea rezonatorului scade treptat până la a deveni egală cu amplitudinea a oscilațiilor excitatorului. Din figură puteți observa că transferul de energie de la excitator la rezonator este un **proces selectiv**.

Concluzie: Transferul energetic de la pendulul excitator la cel excitat este maxim atunci când perioadele lor au valori identice, $T_1 = T_2$.

În cazul oscilatorului real, datorită acțiunii forțelor de frecare, energia acestuia scade și, în consecință, scade și amplitudinea oscilațiilor: oscilațiile sunt amortizate. Pentru a întreține oscilațiile trebuie să se acționeze din exterior asupra sistemului oscilant pentru a compensa pierderile de energie datorate frecării.

Cazul de maxim interes practic este cel în care din exterior acționează asupra oscilatorului o forță **periodică**

$$F(t) = F_0 \cdot \sin(\Omega \cdot t).$$

Experimental se constată că, în acest caz, oscilatorul execută oscilații de amplitudine constantă, cu pulsația forței periodice externe, numite **oscilații forțate**.

Sistemul mecanic E , care acționează asupra oscilatorului cu forța periodică F , este numit **excitator**. Oscilatorul R , având pulsația proprie ω , asupra căreia se exercită acțiunea sistemului excitator E , este numit **rezonator**. Acțiunea mecanică exercitată de excitator asupra rezonatorului se numește **cuplaj**.

Experimental se constată că:

1) transferul energiei de la excitator la rezonator se face pentru orice pulsație Ω a excitatorului;

2) transferul de energie, de la excitatorul E la oscilatorul R , este **maxim** când pulsația Ω a excitatorului este egală cu pulsația proprie de oscilație ω a sistemului excitat (rezonatorul). În acest caz și amplitudinea oscilațiilor este maximă.

Definiție: Se numește **rezonanță** procesul selectiv de transfer **maxim** de energie între două sisteme fizice.

1.2.3. Consecințele rezonanței

Este binecunoscut efectul distructiv al vocii sopranei care rezonază cu paharul de cristal din vitrină reușind să-l spargă! Este un proces simplu: transfer maxim de energie de la sursă, corzile vocale, la rezonator, paharul, atunci când frecvența de oscilație a excitatorului este apropiată ca valoare de cea a sistemului excitat (figura 1.2.3.2). Rezultatul este creșterea amplitudinii de oscilație până la spargerea paharului (figura 1.2.3.1). Acest mecanism se va regăsi în toate situațiile următoare:

- În proiectarea mașinilor, a utilajelor și a construcțiilor, trebuie avut în vedere faptul că, elemente precum grinzile, planșeele, podurile, carcasele, au frecvențe proprii de oscilație pe care pot oscila forțat datorită unor excitații exterioare. Dacă se ajunge la rezonanță, amplitudinea mare a oscilațiilor sistemului poate produce deformări permanente, fisuri, crăpături sau chiar distrugeri ale acestora. Un motor ar putea fi smuls de pe soclul său dacă turația sa coincide cu frecvența proprie a soclului pe care este fixat.
- Clădirile sunt puternic afectate în timpul mișcărilor seismice, al furtunilor cu vânt puternic, motiv pentru care în zonele cu risc seismic crescut, ele se echipează cu amortizoare cu role care să absoarbă vibrațiile solului. De multe ori geamurile clădirilor încep să vibreze atunci când trece pe lângă ele un camion greu.

În funcție de înălțime, frecvența proprie a unei clădiri variază de la 0,2 s pentru 2 etaje, la 1 s pentru clădiri cu 10 etaje, respectiv 3 s pentru clădiri cu 30 de etaje. „Răspunsul” unei clădiri la mișcarea temeliei sale cu o frecvență seismică depinde de elasticitatea și evident, de înălțimea sa (figura 1.2.3.3). Dacă ea rezonază cu mișcarea solului, efectul poate fi catastrofal, ducând la distrugerea clădirii.

- Solicitarea ritmică a unui pod de către rafale puternice de vânt sau de către marșul cadențat al unei trupe de soldați care îl traversează, poate duce la prăbușirea podului. Sunt cunoscute în istoria construcțiilor două cazuri celebre!

Podul Tacoma Narrows din Tacoma, Washington, a fost distrus în noiembrie 1940, de un efect complicat de rezonanță, în timpul unei furtuni în care vântul a atins 40 de mile pe oră. Forma lui de aripă de avion a generat apariția unei instabilități, soldate cu deformarea sa analoagă unei unde transversale care l-a distrus (figura 1.2.3.4).

Al doilea pod celebru este Millenium Bridge din Londra, care a fost închis la două zile după



Fig. 1.2.3.1

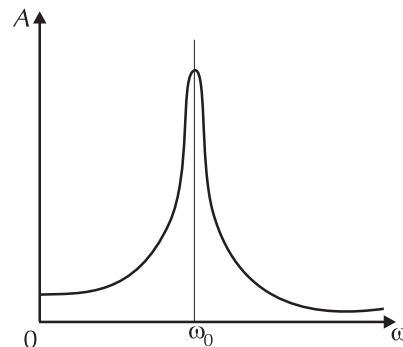


Fig. 1.2.3.2 – La rezonanță, transferul de energie este maxim

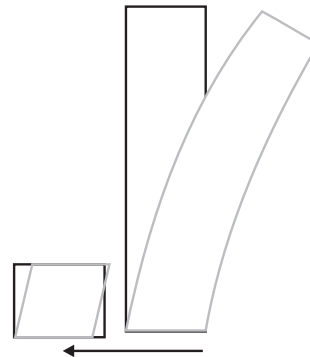


Fig. 1.2.3.3 – Solicitarea clădirilor în timpul mișcărilor seismice



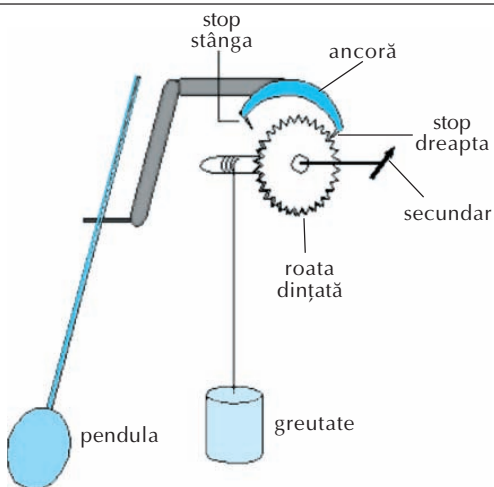
Fig. 1.2.3.4 – Prăbușirea podului Tacoma Narrows



● Fig. 1.2.3.5 – Podul Millenium Bridge din Londra



● Fig. 1.2.3.6 – Ceasul cu pendulă



● Fig. 1.2.3.7 – Schema mecanismului simplificat al ceasului cu pendulă



● Fig. 1.2.3.8 – Model de laborator al mecanismului simplificat al ceasului cu pendulă

inaugurarea sa din iunie 2000, datorită faptului că se legăna alarmant cu cei circa 2000 de pietoni aflați în traversarea lui. Este primul pod construit din oțel, pentru traversarea pietonală a Tamisei (figura 1.2.3.5) Se știe că în timpul mersului unui om de 75 de kilograme (750 N) apare o fluctuație a forței verticale de apăsare de circa 250 N la fiecare trecere a greutății de pe un picior pe celălalt în timp ce pășește. Deși proiectanții luaseră în calcul bine-cunoscutul efect de rezonanță periculoasă cu mersul cadențat al oamenilor, a apărut un efect de excitație laterală sincronă generată de sincronizarea involuntară a pașilor câtorva dintre pietoni. În timpul mersului apare și o forță orizontală orientată spre stânga atunci când piciorul de sprijin este stângul, respectiv spre dreapta la pasul următor. Această forță este responsabilă pentru apariția excitației laterale a podului. Odată începută legănarea pietonii și-au sincronizat instinctiv pașii cu balansul podului, agravându-i instabilitatea. Mulți dintre cei 80000 de oameni care l-au traversat au raportat că au avut senzații asemănătoare răului de mare. A fost necesară închiderea podului pentru un an de zile, timp în care i s-au montat amortizoare hidraulice care să absoarbă vibrațiile.

- Oamenii pot fi afectați de vibrațiile rezonante cu cavitățile abdominale, cu capul, cu ochii, etc., motiv pentru care proiectanții mașinilor grele, ai autovehiculelor (în special mașini de curse), iau măsuri speciale pentru amortizarea vibrațiilor în scopul limitării disconfortului produs.
- Microfonia este un efect care apare atunci când microfonul este plasat în fața boxelor la o anumită distanță și constă în amplificarea distorsionată a sunetelor. Se poate evita prin amplasarea corespunzătoare a boxelor și a microfonului.
- Instalațiile tehnico-sanitare scot câteodată sunete stranie ca rezultat al rezonanței vibrațiilor cu componentele acestora: țevi, calorifere, conducte, etc., manifestate prin șuierături, fluierături, pocnituri.
- În Golful Fundy din Noua Scoție se înregistrează marea cu amplitudini de până la 16 m, deoarece perioada naturală a golfului, adică timpul necesar undei pentru a ajunge de la un capăt la altul al acestuia (circa 12,5 ore) este aproximativ egală cu perioada fluxului.

Aplicațiile rezonanței mecanice

Ceasul cu pendulă

În 1580, Galileo Galilei observa mișcarea unui candelabru din Catedrala din Pisa și constata că perioada lui de oscilație nu depinde de amplitudine atunci când

proprie a pendulei: o roată dințată de balans cuplată cu un resort spiralat. Acest ceas avea o eroare mai mică decât un minut la 24 de ore.

Ceasurile cu pendulă nu au evoluat prea mult de atunci până azi.

Acele indicatoare sunt puse în mișcare prin intermediul unui mecanism cu roți dințate de către un pendul având perioada de oscilație de 2 secunde. În varianta simplificată apare o singură roată, cu dinții de construcție specială, montată pe un arbore (figura 1.2.3.7) pe care se înfășoară un fir care are suspendat la celălalt capăt un corp greu. Acesta din urmă are rolul de a asigura întreținerea oscilațiilor prin furnizarea periodică a unor porții de energie, suficiente pentru a acoperi amortizarea din timpul unei semioscilații. Porțiile respective sunt comandate de ancora care limitează mișcarea continuă a roții la o mișcare sacadată, împiedicând astfel căderea continuă a greutateii legate de fir. Deci pendulul antrenează ancora, iar corpul greu legat de fir se mișcă simultan cu roata de balans. În figura 1.2.3.8 este prezentat un model de laborator, simplificat, al mecanismului ceasului cu pendulă. *Observați imaginea și recunoașteți componentele prezentate!*

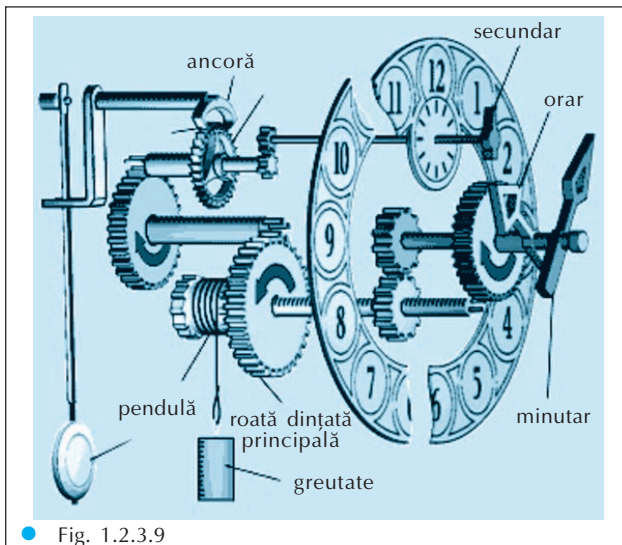


Fig. 1.2.3.9

unghiurile de deviație nu depășesc o anumită limită. Deși primele încercări de a construi un ceas capabil să indice secunda îi aparțin lui Galilei, ele s-au concretizat abia de către Cristiaan Huygens în anul 1656. El a utilizat un mecanism pentru a întreține mișcarea oscilatorie, mecanism care să aibă aceeași perioadă cu perioada



Construiți singuri: Model de ceas cu pendulă.

Dacă dispuneți de o roată dințată cu 60 de dinți și o montați pe un arbore pe care să puteți înfășura firul cu greutate la celălalt capăt, puteți încerca să vă construiți singuri un ceas. Vă mai trebuie un pendul cu perioada de oscilație de 1 s și un ac indicator antrenat de roata dințată care va efectua în acest caz o rotație completă în timp de un minut. Va fi secundar! Prin ajustarea corespunzătoare a lungimii pendulului utilizat se poate obține o precizie destul de mare în măsurarea timpului cu acest ceas. Rămâne de rezolvat problema celorlalte ace indicatoare, minutarul și orarul, care au perioade diferite de rotație. Din acest motiv, s-au utilizat mai multe

roți dințate, cuplate corespunzător (figura 1.2.3.9) și care să poată oferi posibilitatea de a monta acele indicatoare pe axe diferite, pentru a se roti cu viteze diferite.

Un alt neajuns al acestui ceas ar fi nevoia lui de a fi înfășurat firul peste arbore de câteva ori într-o oră. Practic, ar trebui ca roata de balans să aibă un număr cât mai mare de dinți și să fie cuplată cu un număr suplimentar de roți dințate. Astfel, alimentarea cu energie potențială gravitațională s-ar face numai o dată pe zi. O altă soluție constructivă ar fi înmagazinarea energiei potențiale într-un arc spiralat comprimat prin răsucirea cu ajutorul unei chei.

Amortizorul auto

Pentru a împiedica șocul suferit atunci când autovehiculele întâlnesc obstacole în drumul lor, acestea sunt echipate cu amortizoare de vibrații. Ele sunt constituite dintr-un resort aflat într-un cilindru cu piston (figura 1.2.3.10), în compartimentele căruia se află de regulă ulei.

În cazul bicicletelor pentru teren accidentat amortizorul se montează între cadru și furca care susține axul roții. Când roata întâlnește o neregularitate sau

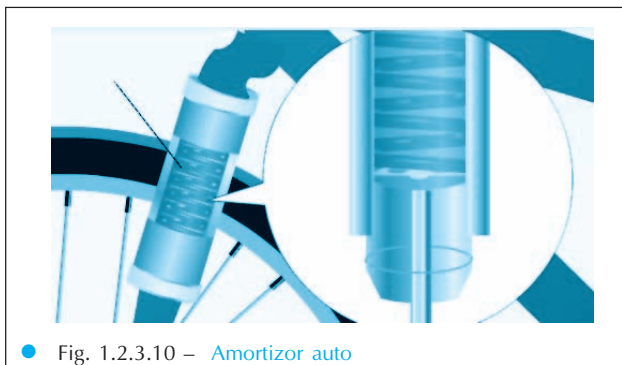
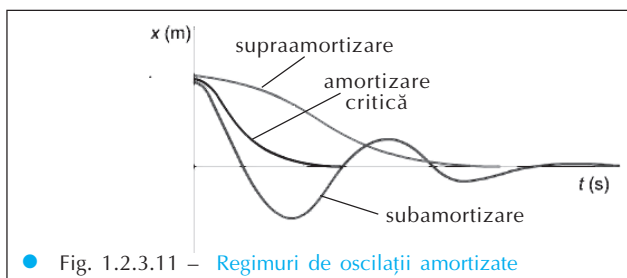
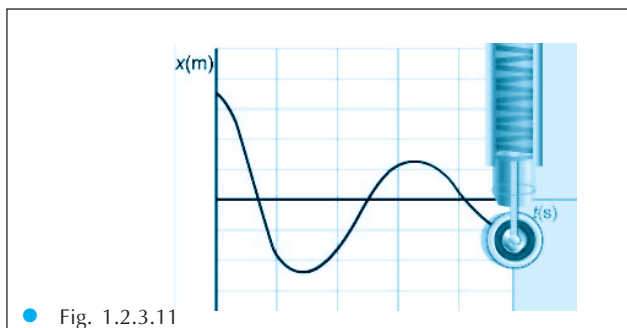


Fig. 1.2.3.10 – Amortizor auto



lovește un obstacol, axa ei începe să oscileze față de caroserie, iar resortul este comprimat înmagazinând energia primită în timpul ciocnirii spre a atenua șocul. Forța elastică care apare în resortul comprimat va împinge treptat pistonul (figura 1.2.3.11) și va oscila amortizat din cauza rezistenței la înaintare întâmpinate în lichid. Astfel bicicleta și biciclistul vor oscila ușor până la restabilirea poziției de echilibru a resortului.

Resortul poate fi dimensionat pentru a oferi diverse tipuri de amortizare. (figura 1.2.3.12). Dacă forța de amortizare din resort este adecvată stingerii rapide a oscilațiilor, în timp minim, avem de a face cu regimul de amortizare critică. Dacă valoarea forței este mai mare decât valoarea minimă necesară în cazul anterior, atunci echilibrarea se face fără oscilații, dar într-un timp mai lung (regim de supraamortizare). Pentru valori ale forței de amortizare sub valoarea minimă necesară se intră în regimul de subamortizare, unde se execută câteva oscilații până la echilibrare.

1.3. Unde mecanice

1.3.1. Propagarea unei perturbații într-un mediu elastic. Transferul de energie



Ați privit, cu siguranță, suprafața unei ape liniștite în care s-a aruncat o pietricică! Ceea ce ați observat reprezintă un exemplu de propagare a unei mișcări oscilatorii într-un mediu (unde particulele vecine interacționează). Un obiect care plutește pe suprafața apei este perceput ca mișcându-se vertical în sus și în jos, pe „valurile” create, la intervale de timp regulate.

Este ceea ce numim **undă mecanică**.

Un alt exemplu este sunetul. Propagarea oscilațiilor emise de corzile vocale are loc datorită existenței aerului atmosferic. Acest fenomen se numește **fonație**.

O mică deformare a spiralei elastice a unui resort metalic se transmite prin tot resortul, din aproape în aproape, ca în figura 1.3.1.1.

Mișcările seismice reprezintă propagarea oscilațiilor care apar atunci când în straturile interne ale litosferei apar rupturi sau explozii. Practic, energia rezultată se transmite din aproape în aproape pe întinderi mari din suprafața pământului, fără a antrena și transferul de substanță.

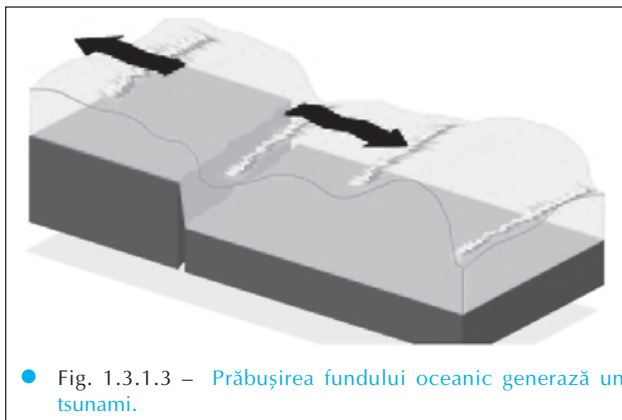
Funcționarea instrumentelor muzicale (figura 1.3.1.2), se bazează pe apariția unor astfel de unde, pe care le vom numi **unde staționare**, în corzile sau în tuburile sonore care intră în construcția lor.



Pe stadioane, suporturii înfocați ai echipelor de fotbal creează adevărate „valuri vii”, produse prin ridicarea succesivă în picioare, fie de-a lungul unui rând de scaune, fie prin ridicarea simultană a unui rând întreg, apoi a rândului vecin.

Tsunami-ul, cunoscut pentru efectele sale devastatoare reprezintă propagarea unei oscilații produse de o mișcare bruscă, verticală, de prăbușire a fundului oceanului, într-o cantitate foarte mare de apă. El apare în timpul cutremurelor cu magnitudine foarte mare, al alunecării faliilor, al erupțiilor vulcanice (figura 1.3.1.3).

SONAR-ul (acronim de la Sound Navigation Ranging) este utilizat în navigație, și meteorologie. Se bazează pe emisia de unde sonore care se reflectă de obiectele întâlnite (pentru care se intenționează poziționarea). Urmează recepția semnalului reflectat și înregistrarea ecoului (figura 1.3.1.4). Ca și în cazul multor dispozitive tehnice, ideea de funcționare a sonarului a fost copiată din natură. Delfinii și liliecii se orientează și comunică folosind un principiu similar – **ecolocația**.



● Fig. 1.3.1.3 – Prăbușirea fundului oceanic generază un tsunami.



● Fig. 1.3.1.4 – Sonar

ACTIVITATE EXPERIMENTALĂ

1) Umpleți parțial cu apă, cada de baie. Dați drumul unei pietre mici în apa din cadă (figura 1.3.1.5). Ce constatați?

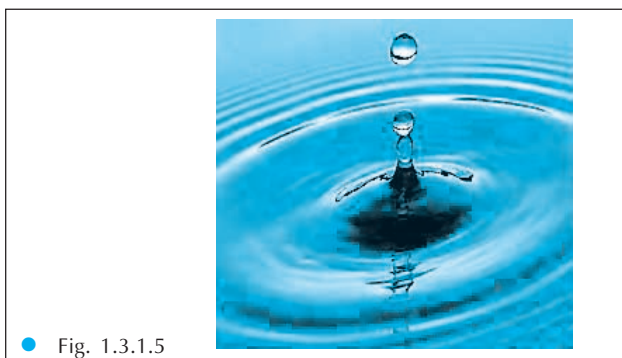
2) Puneți un dop de plută pe apa din cadă și repetați experimentul precedent. Ce constatați?

3) Introduceți în apa din cadă, la capătul acesteia, palma întinsă, perpendiculară pe suprafața apei și împingeți apa, cu o mișcare scurtă și rapidă, spre celălalt capăt al cadei. Ce constatați?

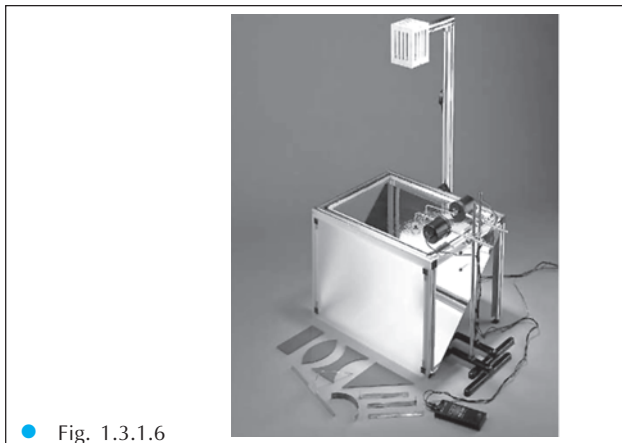
4) Utilizați un retroproiector, pe care așezați un vas transparent cu apă. Lasați să cadă câteva picături de apă în vas și vizualizați pe ecran efectul pe care îl produc la suprafața apei. Cu ajutorul acestui sistem am realizat mai multe fenomene ondulatorii ale căror fotografii le vom utiliza în lecțiile următoare.

Experimental se constată că atunci când o particulă a unui mediu este pusă în mișcare, ea antrenează în mișcare și particulele vecine. Această situație este datorată faptului că între particulele vecine din mediu se exercită interacțiuni. Forțând, din exterior, o particulă din mediu să se deplaseze, forțele exercitate între particulele mediului vor determina deplasarea particulelor vecine.

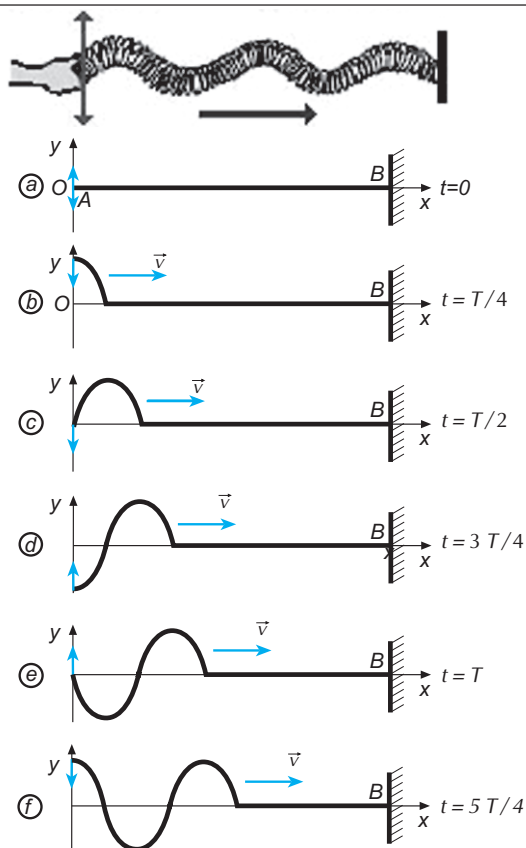
Pentru simplitatea ilustrării vom considera acum două exemple unidimensionale.



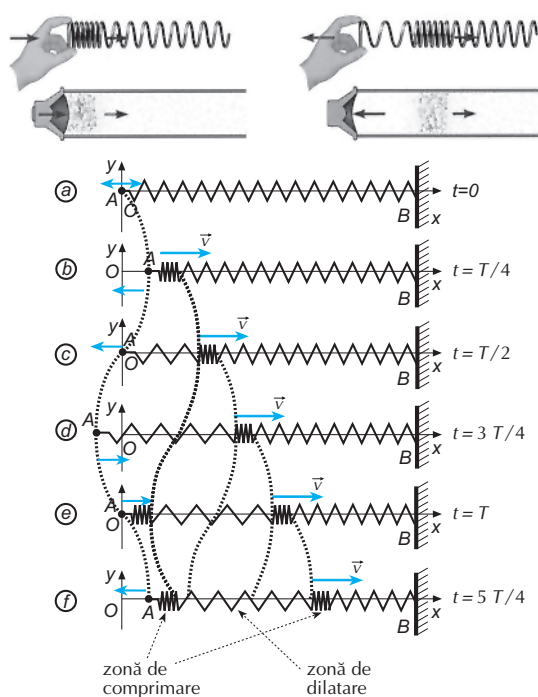
● Fig. 1.3.1.5



● Fig. 1.3.1.6



● Fig. 1.3.1.7 – Unde transversale



● Fig. 1.3.1.8 – Unde longitudinale

Considerăm un fir elastic lung, întins, fixat la un capăt (figura 1.3.1.7-a). Capătului liber, A, i se imprimă o mișcare oscilatorie pe direcția axei Oy pornind din poziția de echilibru, O . Se constată că, în timp, firul ia formele din figura 1.3.1.7. Deci *mișcarea oscilatorie a punctului A se transmite cu o anumită viteză, din aproape în aproape, și celorlalte puncte ale firului.*

Considerăm apoi un resort elastic, nedeformat, fixat la un capăt (figura 1.3.1.8-a). Capătului liber, A, i se imprimă o mișcare oscilatorie pe direcția axei Ox pornind din poziția de echilibru, O . Se constată că, în timp, resortul ia formele din figura 1.3.1.8. Deci *mișcare oscilatorie a punctului A se transmite, cu o anumită viteză, din aproape în aproape, și celorlalte puncte ale resortului.*

Definiție: Fenomenul de propagare, din aproape în aproape, a unui fenomen variabil în timp se numește **undă**.

Observații:

- 1) În cele două exemple ilustrate, fenomenul variabil în timp care se propagă este mișcarea oscilatorie armonică a sursei. Astfel de unde sunt numite **unde mecanice**.
- 2) Dacă în mediul material perturbat se manifestă numai forțe elastice se spune că unda este o **undă elastică**.
- 3) „Punctul” în care se aplică perturbația externă se numește **sursă** sau **centru de oscilație**.
- 4) Propagarea oscilațiilor de la sursă nu se face instantaneu, ci treptat, cu o viteză finită.

Pentru propagarea undelor mecanice este necesară prezența unui mediu. *Experimental se constată că sunetul (o undă mecanică) nu se propagă în vid. Undele electromagnetice nu au însă nevoie de existența unui astfel de mediu material: lumina se propagă prin vid, de exemplu, de la Soare la Pământ.*

În tot acest capitol *presupunem că mediul de propagare este nedisipativ*. Aceasta înseamnă că la propagarea undei nu se pierde energie.

Propagarea undei nu înseamnă și un transport de substanță: particulele mediului oscilează cu o anumită amplitudine în jurul pozițiilor lor de echilibru, dar aceste poziții de echilibru rămân fixe. Ceea ce se propagă este numai starea de mișcare oscilatorie. Energia unei unde este energia cinetică și potențială a particulelor din mediul care oscilează. **Transmiterea energiei se face însă prin trecerea ei de la o porțiune din mediu la alta vecină și nu prin deplasarea mediului ca întreg.**

Concluzie: *unda transportă energie prin spațiu;* transportul de energie realizat de undă are loc fără transport de substanță.

Definiție: Se numește *undă transversală* acea undă la care direcția de oscilație a particulelor din mediu este perpendiculară pe direcția de propagare a undei.

Definiție: Se numește *undă longitudinală* acea undă la care direcția de oscilație a particulelor din mediu este paralelă cu direcția de propagare a undei.

Observații:

1) În cazul ilustrat de figura 1.3.1.7 unda este transversală, iar în cel ilustrat de figura 1.3.1.8 unda este longitudinală.

2) În fluide, datorită fenomenului de curgere, se pot propaga numai unde longitudinale. În mediile solide undele pot fi atât longitudinale cât și transversale.

Există și situații mai complicate. De exemplu în cazul undelor de la suprafața apei particulele din stratul superficial parcurg traiectorii circulare având centrul cercurilor traiectorie în poziția de repaus (figurile 1.3.1.9 și 1.3.1.10). Particulele din mediu, din vecinătatea suprafeței, parcurg traiectorii eliptice.



Fig. 1.3.1.9

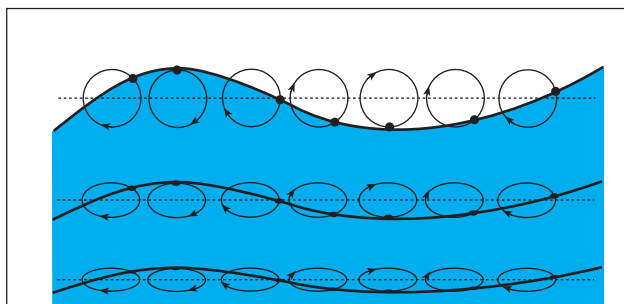


Fig. 1.3.1.10

1.3.2. (*) Modelul „undă plană”. Periodicitatea spațială și temporală

Fie un punct din mediul în care se propagă unda. Considerăm un vector având originea în poziția de repaus a punctului considerat și extremitatea în poziția în care se află punctul la un moment dat de timp, t . Acest vector se numește *vector de oscilație*, la momentul t , al punctului din mediu considerat (figura 1.3.2.1).

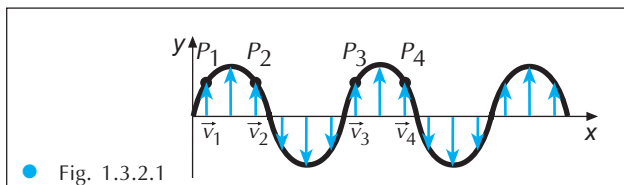


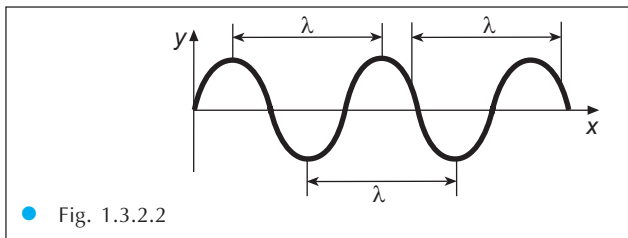
Fig. 1.3.2.1

Definiție: Se numesc *puncte de fază egală* punctele din mediul de propagare a undei care oscilează în fază (au permanent vectorii de oscilație egali în mărime și cu aceeași tendință de variație – creștere sau scădere).

Observație: În figura 1.3.2.1 vectorii de oscilație $\vec{v}_1$ și $\vec{v}_2$ au aceeași mărime, dar au tendințe de variație diferite: $\vec{v}_1$ este în creștere, iar $\vec{v}_2$ este în scădere. Punctele corespunzătoare din mediu, P_1 și P_2 , nu au fazele de oscilație egale. P_1 este în fază cu punctul P_3 , iar P_2 este în fază cu P_4 .

Definiție: Distanța dintre două puncte de fază egală vecine, succesive pe direcția de propagare, se numește *lungime de undă* și se notează cu λ .

În figura 1.3.2.2 este arătată lungimea de undă ca distanța dintre două creste de undă succesive, sau ca distanța dintre două depresiuni de undă succesive sau, în general, ca distanța dintre două puncte de fază egală oarecare, succesive.



Definiție: Se numesc **suprafețe de undă** sau **suprafețe de fază egală** suprafețele închise, în jurul centrului de oscilație, pe care se dispun punctele de fază egală.

Forma suprafeței de undă depinde atât de proprietățile mediului de propagare cât și de forma sursei.

Considerând un mediu omogen și izotrop:

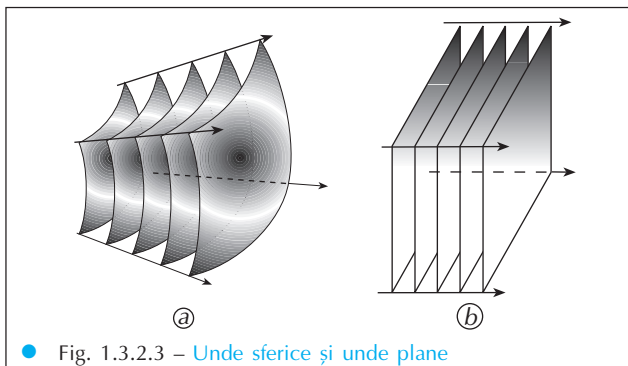
– dacă sursa este punctuală sau sferică suprafețele de undă sunt sfere concentrice (figura 1.3.2.3-a), iar unda este numită **undă sferică**;

– dacă sursa de oscilație este o suprafață plană atunci suprafețele de undă sunt suprafețe plane paralele cu planul sursei (figura 1.3.2.3-b), iar unda este numită **undă plană**.

Observații:

1) Liniile perpendiculare pe suprafețele de undă (figura 1.3.2.3), numite **raze**, indică direcția de propagare a undei.

2) Suprafața de undă situată, la un moment dat, la cea mai mare depărtare de sursa de oscilații este numită **frontul undei**.



Punctele din mediu oscilează armonic, toate, cu aceeași perioadă T . În timp de o perioadă unda parcurge distanța dintre două puncte de fază egală, situate succesiv pe direcția de propagare, adică parcurge distanța λ .

Definiție: Se numește **viteză de fază** și se notează cu v_f , mărimea fizică definită de relația:

$$v_f = \frac{\lambda}{T},$$

unde:

- λ este lungimea de undă, $[\lambda]_{SI} = 1 \text{ m}$;
- T este perioada de oscilație a punctelor materiale din mediul în care se propagă unda, $[T]_{SI} = 1 \text{ s}$.

Observații:

1) Viteza de fază este viteza de propagare a frontului de undă, adică a fazei.

2) Din relația precedentă rezultă că lungimea de undă este determinată de doi factori: unul depinde de sursă (perioada T), iar celălalt depinde de proprietățile mediului de propagare (viteza de fază v_f).

3) Din relația de definiție a vitezei de fază rezultă că:

$$v_f = \lambda \cdot \nu,$$

unde ν este frecvența oscilațiilor punctelor din mediul de propagare a undei, $\nu = 1/T$.

Se poate demonstra că viteza de propagare, v_t , a unei unde transversale într-o coardă este dată de relația:

$$v_t = \sqrt{\frac{T_m}{\mu}},$$

unde:

- T_m este tensiunea la care este solicitată coarda, $[T_m]_{SI} = 1 \text{ N}$;
- μ este masa unității de lungime a corzii, $\mu = m/L$, $[\mu]_{SI} = 1 \text{ kg/m}$.

În cazul undelor longitudinale se poate demonstra că viteza de propagare este dată de relația:

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

unde:

- E este modulul de elasticitate longitudinal (modulul lui Young), $[E]_{SI} = 1 \text{ N/m}^2$;
- ρ este densitatea mediului de propagare a undei, $[\rho]_{SI} = 1 \text{ kg/m}^3$.



Construiți singuri un model al propagării sunetului.

Veți construi un model al propagării unei sonore prin diferite medii (solid, lichid, gaz), utilizând piese de domino aliniate ca în figura 1.3.2.4, o ruletă și un cronometru. Piesele de domino vor juca rolul moleculelor, iar propagarea sunetului va însemna căderea pieselor din aproape în aproape pe suprafața orizontală. Unda sonoră presupune transfer de energie de la o moleculă la alta. În acest model transferul energetic se soldează cu căderea pieselor pe masă.

Aliniați întâi piesele la distanța de 1,5 cm una față de alta, pe o distanță de aproximativ 1m. Cronotrați timpul scurs între căderea primei și, respectiv, a ultimei piese. Aliniați apoi din nou piesele la distanța de 2,5 cm una față de alta și repetați experimentul. În final aliniați piesele pe două șiruri paralele la distanțele de 1,5 cm și respectiv 2,5 cm. Loviți ușor, simultan, primele piese din ambele rânduri. Ce constatați?

Timpul scurs în primul caz este mai mic decât în al doilea, când moleculele sunt mai depărtate. Deci primul șir de piese ar putea modela propagarea undei în solid, moleculele fiind aici mai apropiate, iar al doilea, propagarea în lichid.

La ce distanță ar trebui să așezați piesele într-un nou șir pentru a modela propagarea undei în gaz?

De ce credeți că lipind urechea de șina de cale ferată se poate afla cu câteva minute mai devreme, decât anunța propria sirenă, când sosește trenul?

Ecuția undei plane

În cazul unei unde sferice frontul de undă este o sferă a cărei suprafață crește în timpul propagării. Corespunzător, numărul de oscilatori de pe frontul de undă crește în timp. De aceea energia care revine fiecărui oscilator, deci și amplitudinea de oscilație, scade pe măsură ce unda se propagă.

În cazul undei plane numărul de oscilatori de pe o regiune oarecare a frontului de undă rămâne același în timpul propagării undei. De aceea, energia transmisă fiecărui oscilator este aceeași, deci și amplitudinea de oscilație este aceeași pentru toate punctele la care ajunge frontul de undă.

Considerăm un plan din mediu și presupunem că tuturor oscilatorilor din acest plan li se imprimă o mișcare oscilatorie armonică de amplitudine A și pulsație ω , descrisă de ecuația:

$$y(t) = A \cdot \sin \omega t.$$

Unda se propagă perpendicular pe direcția planului surselor de oscilație (figura 1.3.2.3-b). Alegem axa Ox pe această direcție și originea în punctul în care axa

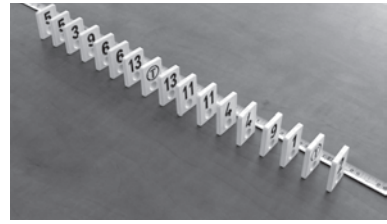


Fig. 1.3.2.4

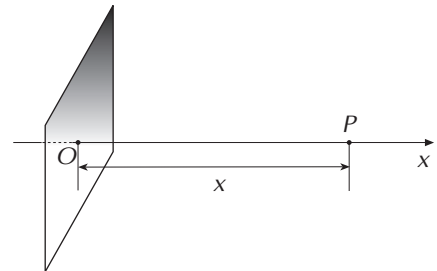


Fig. 1.3.2.5

intersectează planul surselor de oscilație (figura 1.3.2.5). Considerăm un punct oarecare P , situat pe axa Ox , având coordonata x . Unda se propagă cu viteza de fază v_f , deci frontul de undă ajunge la punctul P după trecerea

$$\text{timpului } \tau = \frac{x}{v_f}.$$

Acesta este momentul inițial pentru mișcarea oscilatorie armonică a punctului P . Ecuația mișcării armonice a punctului P se scrie atunci în forma $y(x, t) = A \cdot \sin \omega(t - \tau)$.

Folosind aici expresia lui τ obținem:

$$y(x, t) = A \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{v_f} \right).$$

Această ecuație descrie mișcarea de oscilație a tuturor punctelor din mediu până la care a ajuns frontul de undă. Ea este **ecuția undei plane**. Folosind relațiile:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \lambda = v_f \cdot T,$$

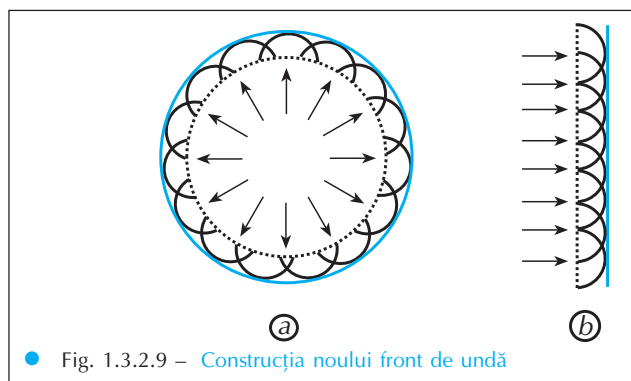
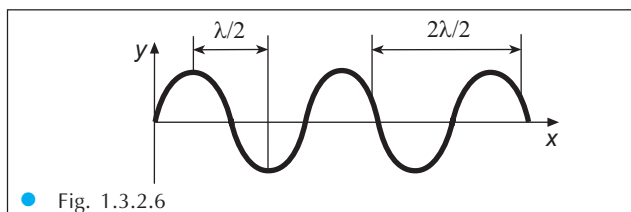
ecuția undei plane poate fi rescrisă în forma:

$$y(x, t) = A \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Ecuația undei plane arată că elongația unui punct aflat pe direcția de propagare depinde simultan de două variabile: timpul t și distanța x față de sursă.

Folosind această ultimă formă a ecuației de undă se poate arăta că: $y(x + \lambda, t) = y(x, t)$, $y(x, t + T) = y(x, t)$.

Aceste relații arată că **unda plană este un fenomen cu dublă periodicitate**. Funcția $y(x, t)$ este periodică în timp cu perioada de oscilație T și în spațiu, cu o „perioadă” egală cu lungimea de undă λ .



Exercițiul 1.3.2.1. Deduceți cele două relații precedente.

Considerăm doi oscilatori aflați pe axa Ox la distanțele x_1 și, respectiv, x_2 de sursa de oscilații din O . Conform ecuației unei plane fazele celor doi oscilatori sunt date de relațiile:

$$\varphi_1(x_1, t) = 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right); \quad \varphi_2(x_2, t) = 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right).$$

Diferența de fază (defazajul) între cei doi oscilatori este atunci dată de relația:

$$\Delta\varphi \equiv \varphi_2(x_2, t) - \varphi_1(x_1, t) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x,$$

unde $\Delta x = x_2 - x_1$ este diferența de drum. De aici rezultă următoarea situație:

$$\Delta x = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \Delta\varphi = 2k\pi,$$

$$\Delta x = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \Delta\varphi = (2k+1)\pi.$$

Dacă diferența de drum dintre doi oscilatori este un număr par de semiperioade, atunci oscilatorii sunt în fază, deoarece $\sin(\alpha + 2k\pi) = \sin\alpha$.

Dacă diferența de drum dintre doi oscilatori este un număr impar de semiperioade, atunci oscilatorii sunt în opoziție de fază, deoarece $\sin[\alpha + (2k+1)\pi] = -\sin\alpha$.

Principiul lui Huygens

Christian Huygens (1629 - 1695) a publicat în anul 1690 lucrarea „Tratat despre lumină” în care formulează ipoteza privind natura ondulatorie a luminii. *Principiul enunțat de el furnizează o metodă de a construi frontul de undă la un moment dat, dacă se cunoaște frontul de undă la un moment anterior.* Să considerăm următoarea experiență. La suprafața apei din vasul așezat pe retroproiector se propagă o undă având frontul de undă ca în figura 1.3.2.7. În calea undei este așezat un obstacol în care este practică o deschidere de lărgime $d \ll \lambda$.

Experimental se constată că, **dincolo de obstacol**, se propagă o undă având suprafețele de undă circulare (figura 1.3.2.8), indiferent care a fost forma frontului de undă al undei inițiale. Această situație sugerează ideea că orice punct al mediului până la care ajunge o undă poate fi considerat ca sursă a unor unde secundare, sferice în cazul tridimensional, numite **unde elementare**.

Enunț: Orice punct de pe frontul de undă poate fi considerat ca sursa unor unde sferice secundare (elementare). Înfășurătoarea tuturor undelor elementare constituie noul front de undă.

Construirea frontului de undă, pornind de la frontul de undă la un moment anterior, folosind principiul lui Huygens, este ilustrată în figura 1.3.2.9-a pentru undele sferice și în figura 1.3.2.9-b pentru undele plane.

1.3.3. Reflexia și refracția undelor

Experimental se constată că la suprafața de separare dintre două medii diferite o undă suferă un dublu fenomen: o parte din ea se întoarce în mediul în care se află sursa de oscilații, iar cealaltă parte traversează suprafața de separație și trece în celălalt mediu.

Definiție: Se numește **reflexie** fenomenul de întoarcere a unei unde în mediul din care provine atunci când întâlnește suprafața de separație cu un alt mediu.

Definiție: Se numește **refracție** fenomenul de schimbare a direcției de propagare a unei unde când traversează suprafața de separație a două medii diferite.

Considerăm două medii diferite, 1 și 2, separate printr-o suprafață plană PQ (figura 1.3.3.1). Presupunem că cele două medii sunt omogene și izotrope. Presupunem că în mediul 1 se află o sursă de oscilații care se propagă sub forma unei unde plane, numită **undă incidentă**. Fie AB frontul de undă al unei incidente la un moment dat, oarecare. Frontul de undă se propagă spre suprafața de separație dintre cele două medii, pe direcția indicată de razele de undă AA' și BB' . Unghiul format de o rază incidentă cu normala la suprafața de separație este numit **unghi de incidență** și este notat cu i (unghiurile $AA'N$ și $BB'N'$ în figura 1.3.3.1). La un moment dat frontul de undă ajunge în poziția $A'B_1$. Punctul A' se află pe suprafața de separație a celor două medii. Conform principiului lui Huygens, punctul A' devine sursă de unde elementare (semisferice) care se propagă în cele două medii. Vom considera acum numai fenomenele care au loc în mediul 1. În timpul în care punctul B_1 , de pe frontul de undă, ajunge în poziția B' , frontul unei elementare generate de sursa A' se deplasează, cu aceeași viteză, pe o distanță egală: $A'A_1 = B_1B'$. Punctele de pe suprafața de separație situate între A' și B' devin și ele, pe rând, surse de oscilație și generează unde secundare elementare care se propagă în mediul 1. Tangenta $B'A_1$ la aceste fronturi de undă secundare reprezintă frontul **undei reflectate** (unda care se întoarce în mediul în care se află sursa unde incidente). Unghiul format de razele unde reflectate cu normala la suprafața de separație se numește **unghi de reflexie** și este notat cu r (unghiurile $NA'A''$ și $N'B'B''$ în figura 1.3.3.1). În timpul Δt în care punctul B_1 , de pe frontul de undă, ajunge în poziția B' , frontul unei elementare generate de sursa A' se deplasează, cu aceeași viteză, pe o distanță egală: $A'A_1 = B_1B'$. Fie v_1 viteza undelor în mediul 1.

Atunci $B_1B' = v_1 \cdot \Delta t = A'A_1 \cdot \sin i$, $A'A_1 = v_1 \cdot \Delta t = A'B' \cdot \sin r$, și deci $i = r$. Această egalitate constituie **legea reflexiei undelor**.

Enunț: Unghiul de reflexie, r , este egal cu unghiul de incidență, i : $r = i$.

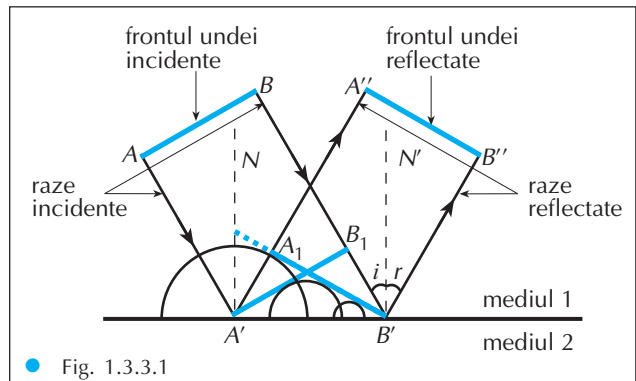


Fig. 1.3.3.1

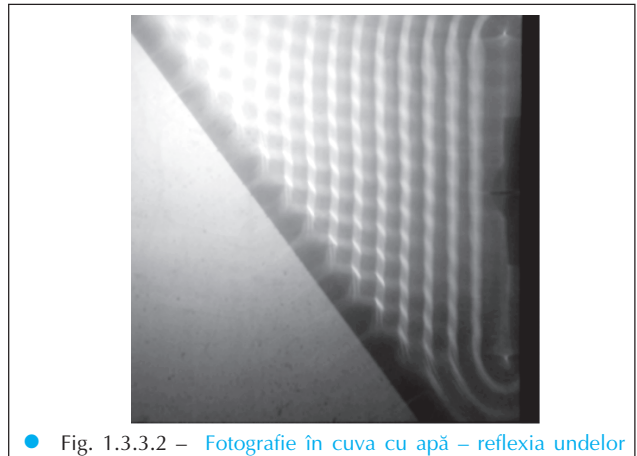


Fig. 1.3.3.2 – Fotografie în cuva cu apă – reflexia undelor

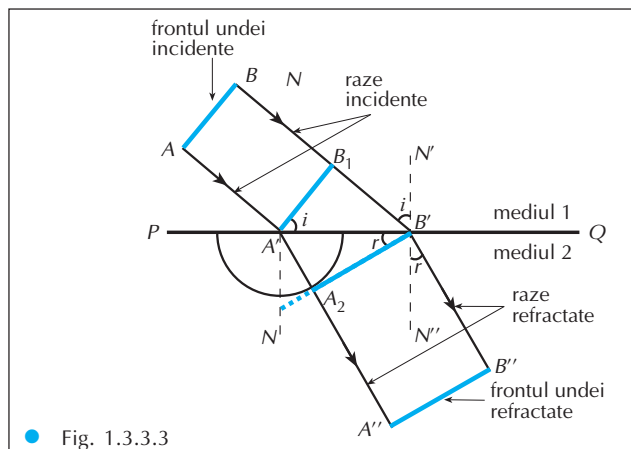


Fig. 1.3.3.3

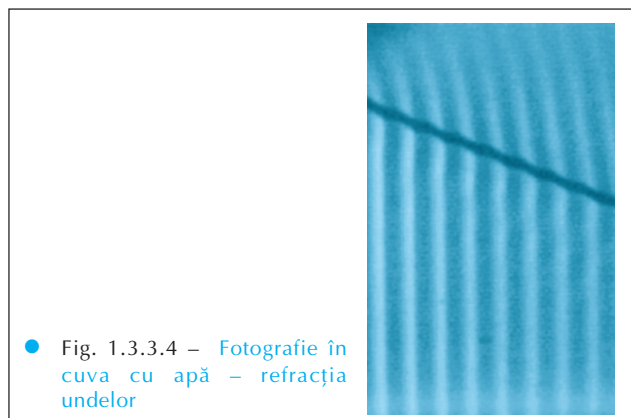


Fig. 1.3.3.4 – Fotografie în cuva cu apă – refracția undelor

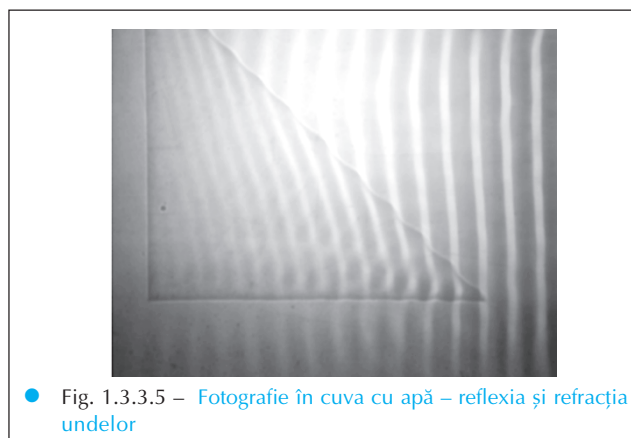


Fig. 1.3.3.5 – Fotografie în cuva cu apă – reflexia și refracția undelor

Considerăm acum aceeași situație, dar studiem fenomenele care au loc în mediul 2 (figura 1.3.3.3). În momentul în care frontul undei incidente ajunge în poziția $A'B_1$ punctul A' de pe suprafața de separație devine sursa unor unde secundare elementare care se propagă în mediul 2. Presupunem că viteza unde este v_1 în mediul 1 și $v_2 (< v_1)$ în mediul 2. În timpul Δt în care punctul B de pe frontul de undă ajunge în poziția B' , $BB' = v_1 \cdot \Delta t$, unda elementară generată de punctul A' se propagă pe distanța $A'A_2 = v_2 \cdot \Delta t < B_1B' = v_1 \cdot \Delta t$. Punctele de pe suprafața de separație situate între A' și B' devin, pe rând, și ele, surse de oscilație și generează unde secundare elementare care se propagă în mediul 2. Tangenta $B'A_2$ la aceste fronturi de undă secundare reprezintă frontul **unde refractate**. Unghiul format de razele unde refractate cu normala la suprafața de separație se numește **unghi de refracție** și este notat cu r (unghiurile $NA'A''$ și $N''B'B''$ în figura 1.3.3.3). Presupunem că viteza unde este v_1 în mediul 1 și $v_2 (< v_1)$ în mediul 2. În timpul Δt în care punctul B de pe frontul de undă ajunge în poziția B' , $BB' = v_1 \cdot \Delta t$, unda elementară generată de punctul A' se propagă pe distanța $A'A_2 = v_2 \cdot \Delta t < BB' = v_1 \cdot \Delta t$. Avem:

$$B_1B' = v_1 \cdot \Delta t = A'B' \cdot \sin i, \quad A'A_2 = v_2 \cdot \Delta t = A'B' \cdot \sin r.$$

Împărțind aceste două relații membru cu membru se obține: $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$.

Această relație exprimă **legea refracției** undelor.

Enunț: Raportul dintre sinusul unghiului de incidență, i , și sinusul unghiului de refracție, r , este egal cu raportul vitezelor de propagare a unde în cele două medii.

Observații:

- 1) Raportul $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$ este numit **indice de refracție** al mediului 2 față de mediul 1.
- 2) Așa cum am arătat mai devreme, viteza unei unde într-un mediu elastic este o caracteristică a mediului respectiv. Aceasta înseamnă că pentru orice pereche de medii elastice date indicele de refracție este o constantă specifică.



Exercițiul 1.3.3.1. Raționamentul din text și figura 1.3.3.3 au fost realizate pentru cazul $v_2 < v_1$. Reconstruiți figura și raționamentul de mai sus în cazul $v_2 > v_1$. Analizați ce se întâmplă în acest caz atunci când se consideră unghiuri de incidență din ce în ce mai mari.



Experiment virtual: la adresa <http://www.walter-fendt.de/ph11e/huygenspr.htm> veți găsi o ilustrare virtuală a modului în care se formează noul front de undă potrivit principiului lui Huygens, în cazul reflexiei și al refracției undelor.

1.3.4. Unde seismice

Seismologia este știința care studiază undele elastice seismice. Aceasta înseamnă că seismologia se ocupă cu:

- a) studierea surselor undelor seismice (cutremure, explozii, etc.);
- b) propagarea undelor seismice prin interiorul pământului (figura 1.3.4.1);
- c) înregistrarea undelor seismice și interpretarea înregistrărilor realizate (figura 1.3.4.2).

Observații:

- 1) Cuvântul seismologie este format din cuvintele grecești *seismos* (cutremur) și *logos* (știință).
- 2) Problemele menționate mai sus constituie obiectul cercetării de bază în seismologie. S-a dezvoltat însă și o seismologie aplicată. Aceasta vizează, de exemplu, localizarea unor zăcămintele minerale importante din punct de vedere economic prin tehnici de prospectare seismică.

Undele seismice pot fi clasificate în două categorii principale:

- **unde interne**, care se propagă prin interiorul pământului;
- **unde de suprafață**, care se propagă de-a lungul unor anumite suprafețe.

Undele interne sunt de două tipuri:

- **unde longitudinale** numite și unde *P* (figura 1.3.4.4);
- **unde transversale** numite și unde *S* (figura 1.3.4.5).

Undele de suprafață sunt de mai multe tipuri:

- **unde de tip Love (L)** sau **de tip Rayleigh (R)** care se propagă la suprafața Pământului (figura 1.3.4.3);
- **unde Stoneley** (legate de undele de tip *R*), care se propagă la o suprafață de discontinuitate din interiorul Pământului;
- **unde canal**, care se propagă de-a lungul unui strat din interiorul Pământului.

Observație: Undele interne sunt considerate „unde libere”, în sensul că ele se pot propaga practic în orice direcție prin interiorul Pământului. Undele de suprafață sunt considerate „unde legate”, în sensul că ele sunt legate de o anumită suprafață sau de un anumit strat în timpul propagării lor.

Pe lângă modul diferit de propagare, diversele tipuri de unde seismice se deosebesc și prin modul de oscilație a particulelor mediului și prin vitezele de propagare. Undele *P* sunt unde longitudinale, deci particulele din mediu oscilează pe o direcție paralelă cu direcția de propagare (figura 1.3.4.4). Undele *S* sunt unde

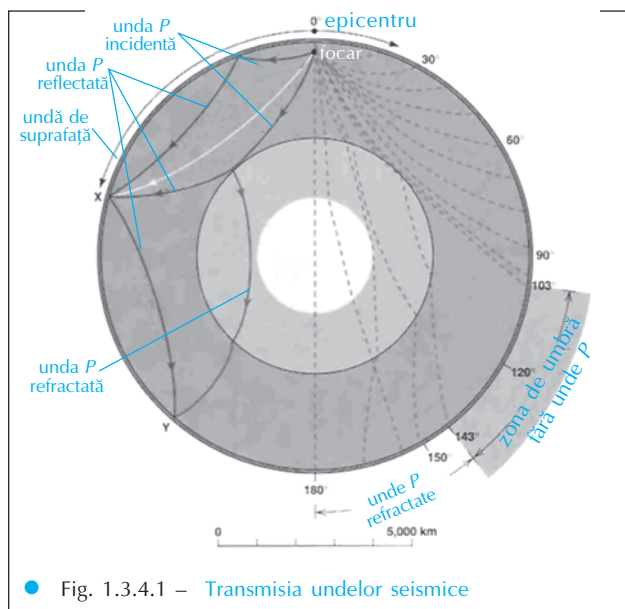


Fig. 1.3.4.1 – Transmisia undelor seismice

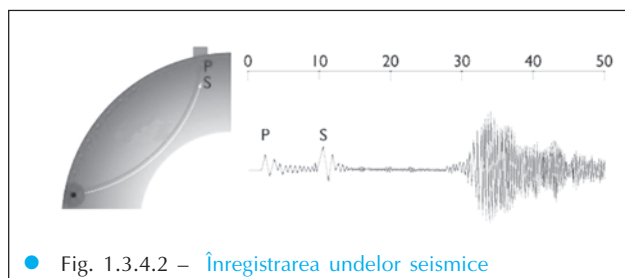


Fig. 1.3.4.2 – Înregistrarea undelor seismice

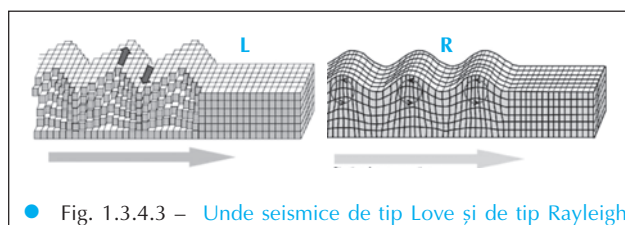


Fig. 1.3.4.3 – Unde seismice de tip Love și de tip Rayleigh

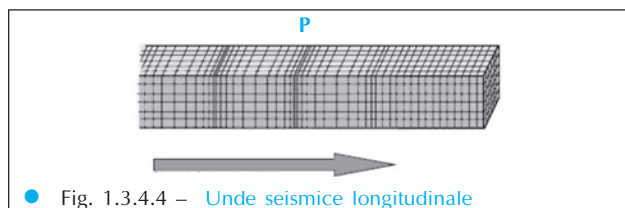


Fig. 1.3.4.4 – Unde seismice longitudinale

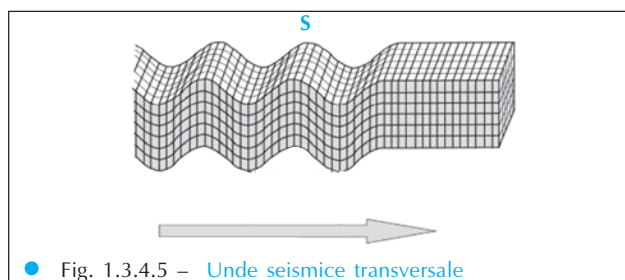


Fig. 1.3.4.5 – Unde seismice transversale

transversale, deci particulele din mediu oscilează pe o direcție perpendiculară pe direcția de propagare. Pentru simplitate descompunem mișcarea unei particule de mediu, în cazul unei unde S într-o componentă orizontală (SO) și o componentă verticală (SV). Într-o undă de tip Love (L) particulele din mediu au o mișcare de oscilație de tip SO , adică o mișcare transversală orizontală. Într-o undă Rayleigh (R) particulele din mediu descriu o traiectorie eliptică (figura 1.3.4.3), planul elipsei fiind vertical și situat în planul de propagare. Parcurgerea traiectoriei eliptice se face în mod retrograd (în sensul acelor de ceasornic în figură). În ce privește vitezele de propagare, avem

$$V_P > V_S > V_L > V_R.$$

Aceasta înseamnă că, la o anumită distanță de sursă, sunt înregistrate mai întâi undele de tip P , apoi cele de tip S , L și, ultimele, cele de tip R .

Undele seismice sunt produse de surse cum sunt cutremurele și exploziile. O sursă de unde seismice este caracterizată de următorii parametri:

1. Longitudinea și latitudinea epicentrului (adică punctul de pe suprafața Pământului aflat pe aceeași verticală cu sursa).

2. Adâncimea la care se află sursa (sursa este numită hypocentru).

3. Momentul inițial al undei seismice.

4. Magnitudinea evenimentului (energia undei seismice).

Pentru determinarea parametrilor 1-3 sunt necesare determinări de timp (timpii de sosire a undelor seismice la diferite seismografe). Pentru determinarea parametrului 4 sunt necesare măsurători de amplitudine și perioadă.

Deși nu este un parametru al sursei o importanță deosebită are și noțiunea de **intensitate** a cutremurului. Ea depinde de punctul de observație fiind maximă în zona epicentrului. Intensitatea este estimată pe baza unei scale stabilite în mod convențional, în funcție de efectele pe care le are evenimentul. În mod uzual se folosește o scală cu 12 grade numită "scala MERCALLI, CANCANI, SIEBERG". Această scală a fost modificată de mai multe ori, ultima modificare conducând la scala MSK (după numele seismologilor Medvedev, Sponheuer și Kárník). Ea este prezentată sumar în continuare.

Scala MKS

I. *Neperceptibil*: intensitatea vibrației este sub limita de sensibilitate umană; poate fi înregistrat de seismografe.

II. *Foarte slab*: vibrațiile sunt simțite de oameni aflați acasă, în repaus, în special la etajele superioare ale unei clădiri.

III. *Slab*: este observat numai de unele persoane; vibrațiile sunt asemănătoare celor datorate trecerii unui camion.

IV. *General observabil*: este observat de multe persoane; vibrațiile sunt asemănătoare cu cele datorate trecerii unui camion greu, încărcat.

V. *Trezește din somn*: mulți oameni adormiți sunt treziți din somn; în clădiri este simțit de toți oamenii, în exterior de foarte mulți; clădirile vibrează, obiectele suspendate oscilează sensibil.

VI. *Înspăimântător*: este simțit de cei mai mulți oameni; oamenii aflați în clădiri sunt înspăimântați și aleargă afară; obiectele aflate pe rafturi cad pe jos.

VII. *Pagube clădirilor*: cei mai mulți oameni sunt înspăimântați și aleargă afară; vibrațiile sunt simțite și de persoane aflate în automobile în mers; se produc pagube minore clădirilor; se formează unde pe suprafața unui lac.

VIII. *Distrugerea clădirilor*: produce panică; se rup unele ramuri din copaci; clădirile suferă pagube moderate sau majore în funcție de soliditatea lor.

IX. *Pagube generale aduse clădirilor*: panică generală; clădirile solide suferă pagube majore, cele mai puțin solide sunt distruse; monumentele se prăbușesc.

X. *Distrugerea generală a clădirilor*: clădirile solide suferă pagube majore, celelalte sunt complet distruse, apar fisuri în sol.

XI. *Catastrofă*: distrugerea majorității clădirilor, podurilor, căilor ferate; șoselele devin nepracticabile; apar fisuri largi și adânci în sol.

XII. *Modificări ale reliefului*: practic toate structurile aflate pe sol și sub sol sunt distruse; suprafața solului este modificată radical.

MĂSURI DE PROTECȚIE ÎN RAPORT CU POSIBILELE EFECTE ALE SEISMELOR

În eventualitatea producerii unui seism trebuie să cunoașteți și să încercați să țineți cont de următoarele reguli care vă vor proteja și vor limita efectele nedorite la care ați putea fi supuși!

- *Păstrați-vă calmul, nu intrați în panică și nu vă speriați de zgomotele din jur.*
- *Dominați-vă tendința de a părăsi sala de clasă, de curs, laboratorul, locuința etc., deoarece durata redusă a fazei seismice inițiale, ar putea face ca faza puternică a mișcării să vă surprindă pe scări, în aglomerație și panică, conducând la accidente nedorite.*

- Dacă vă aflați în fața unei clădiri, rămâneți departe de aceasta, feriți-vă de tencuieli, cărămizi, coșuri, parapete, cornișe, geamuri, care de obicei se pot prăbuși în stradă.
- Dacă vă aflați înăuntru rămâneți acolo, departe de ferestre care se pot sparge. Protejați-vă stând așezați în poziție fetală pe jos lângă birou, masă, pat sau lângă băncile din clasă. În eventualitatea prăbușirii tavanelor și a planșelor aceste obiecte nu vor fi total strivite și lângă ele va rămâne un spațiu vital care ar putea asigura supraviețuirea. Sprijiniți-vă cu palmele pe podea sau tineți-vă cu mâinile de piciorul mesei, spre a vă asigura stabilitatea.
- Închideți sursele de foc cât puteți de repede, iar dacă a luat foc ceva, interveniți imediat după ce a trecut șocul puternic.
- Nu fugiți pe ușă, nu săriți pe fereastră, nu utilizați liftul, dar dacă puteți, deschideți ușa spre exterior, spre a preveni blocarea acesteia, în vederea eventualei evacuări după terminarea mișcării seismice și verificarea stării scărilor și a zonei de la ieșire.
- Nu alergați spre scări, ele oscilează cu frecvență diferită și se leagă separat de partea principală a clădirii, se lovesc reciproc încontinuu, până când are loc prăbușirea scărilor.
- Evitați aglomerația. Nu alergați în stradă sau pe stradă, deplasați-vă calm spre un loc deschis și sigur, feriți-vă de versanții de unde pot cădea roci sau de unde pot avea loc alunecări de teren.
- Dacă seismul vă surprinde în autoturism, opriți-vă cât puteți de repede într-un loc deschis, evitând clădirile prea apropiate de stradă, dincolo de poduri, pasaje, linii electrice aeriene și stați înăuntru.
- Feriți-vă de firele de curent electric căzute!
- Dacă sunteți într-un mijloc de transport în comun sau în tren, stați pe locul vostru până se termină mișcarea seismică. Conducătorul trebuie să oprească și să deschidă ușile, dar nu este indicat să vă îmbulziți la coborâre sau să spargeți ferestrele.
- În metrou păstrați-vă calmul și ascultați recomandările personalului trenului, dacă acesta s-a oprit între stații în tunel, fără a părăsi vagoanele.
- Dacă vă aflați într-un loc public cu aglomerări de persoane (teatru, cinematograful, biserică, stadion, sală de ședințe) nu alergați către ieșire; îmbulzeala produce mai multe victime decât cutremurul.

1.3.5. Interferența undelor

Într-un mediu elastic oarecare se pot propaga, în același timp, unde mecanice provenind de la două sau mai multe surse distincte. Situația este ilustrată în fotografia în cuvă cu apă din figura 1.3.5.1.

Experimental se constată că:

1) dacă două unde diferite, provenind de la două surse distincte, se suprapun într-o regiune oarecare, iar apoi se despart din nou, fiecare undă se propagă mai departe independent de prezența celeilalte unde;

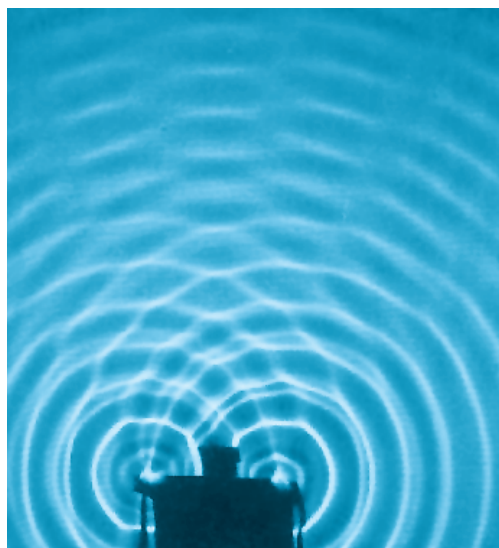
2) în regiunea în care undele se suprapun punctelor mediului li se imprimă simultan două mișcări de oscilație, elongația oscilației rezultante fiind suma algebrică a elongațiilor celor două mișcări oscilatorii independente.

Observații:

1) Această constatare a fost făcută încă de Leonardo da Vinci în legătură cu undele circulare care apar pe suprafața netedă a unei ape când se lasă să cadă în apă două pietricele, în locuri diferite.

2) Aceste constatări experimentale formează conținutul **principiului superpoziției** undelor.

Un caz particular de interes deosebit este cel al superpoziției a două unde coerente.

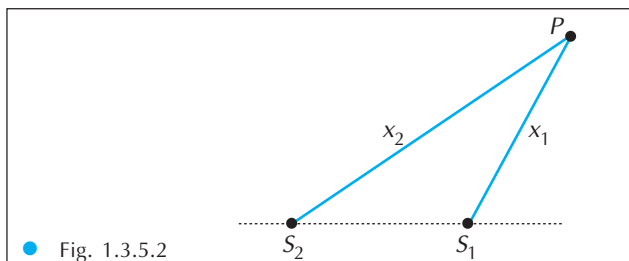


● Fig. 1.3.5.1 – Fotografie în cuvă cu apă – interferența undelor sferice

Definiție: Se numesc **unde coerente** două sau mai multe unde care au aceeași pulsație și diferență de fază constantă.

Definiție: Se numește **interferență** fenomenul de superpoziție a două sau mai multe unde coerente.

Definiție: Se numește **câmp de interferență** regiunea din mediu în care are loc interferența undelor.



Considerăm un mediu perfect elastic în care se propagă două unde coerente provenind de la două surse distincte, S_1 și S_2 (fig 1.3.5.2). Presupunem că direcțiile de oscilație imprimare unui punct, P , oarecare din mediu de către cele două unde sunt paralele. Punctul P va executa simultan două mișcări de oscilație:

$$y_1(t) = A_1 \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right), \quad y_2(t) = A_2 \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right).$$

Aceste două oscilații se compun așa cum am văzut în secțiunea 3.4. Rezultatul este o oscilație armonică de amplitudine

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \cos \Delta\varphi},$$

unde $\Delta\varphi$ este diferența de fază a celor două oscilații imprimate simultan punctului P ,

$$\Delta\varphi \equiv \varphi_2(t) - \varphi_1(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_2 - x_1) \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x.$$

Din aceste două relații rezultă în final

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x \right)}.$$

Această relație arată că **amplitudinea oscilației rezultante, a unui punct oarecare din câmpul de interferență, depinde nu numai de amplitudinile undelor care interferă, ci și de diferența de drum $\Delta x = x_2 - x_1$.**

Observație: Dacă diferența de drum este constantă în timp și amplitudinea rezultantă, A , este constantă în timp. Dacă aceasta este situația pentru toate punctele din câmpul de interferență, interferența este numită **staționară**.

Amplitudinea rezultantă este maximă atunci când $\cos \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_2 - x_1) = 1$, adică atunci când $|x_2 - x_1| = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$.

Amplitudinea rezultantă A este minimă atunci când $\cos \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_2 - x_1) = -1$, adică atunci când $|x_2 - x_1| = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$.

Concluzii:

- 1) toate punctele din câmpul de interferență pentru care diferența de drum este un număr *par* de $\lambda/2$ oscilează cu amplitudine maximă ($A = A_1 + A_2$);
- 2) toate punctele din câmpul de interferență pentru care diferența de drum este un număr *impar* de $\lambda/2$ oscilează cu amplitudine minimă ($A = |A_1 - A_2|$).



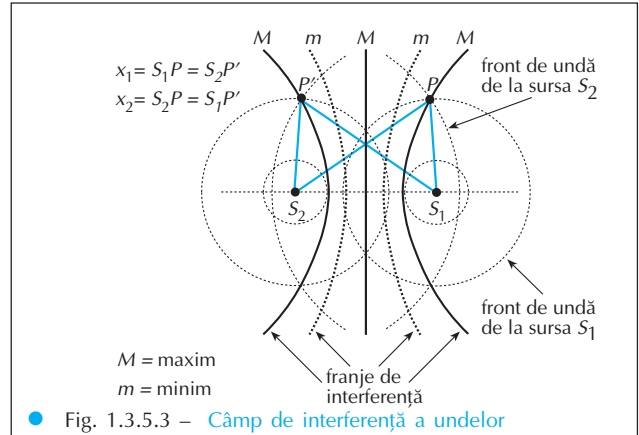
Experiment virtual: la adresa <http://www.walter-fendt.de/ph11e/interference.htm> veți găsi o ilustrare virtuală a interferenței a două unde sferice. Investigați efectul lungimii de undă și al distanței dintre sursele de oscilație!

Definiție: Se numesc **franje de interferență** curbele care unesc între ele punctele de maximă amplitudine, respectiv, minimă amplitudine.

Dacă cele două surse sunt punctiforme, se poate arăta că, pentru o valoare dată a diferenței de drum:

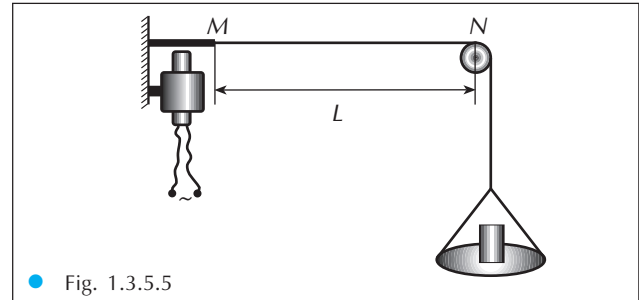
a) există două franje de interferență simetrice față de mediatoarea segmentului care unește cele două surse, deoarece funcția cosinus este funcție pară (figura 1.3.5.3);

b) franjele de interferență sunt hiperbole.



Unde staționare

Un caz particular de interferență staționară, cu multe aplicații, este cel în care interferează două unde plane cu pulsații și amplitudini egale care se propagă în același mediu, pe aceeași direcție, dar în sensuri contrarii. Un mod experimental de a realiza o astfel de interferență este ilustrat în figura 1.3.5.5. O coardă elastică (de exemplu un furtun de cauciuc), fixat la capătul M (este prins de lamela elastică a unui vibrator electromagnetic), este trecută peste un scripete, ca în figură, iar de capătul liber este atârnat un taler pe care se așează o greutate.



Porțiunea de coardă MN poate fi considerată ca un fir fixat la capătul N . Vibratorul imprimă capătului M o mișcare oscilatorie armonică pe o direcție perpendiculară pe MN . În coardă se va propaga o undă transversală de la M spre N . Această undă se reflectă în N . Unda reflectată în N se propagă spre M și interferează cu unda incidentă. Cele două unde au aceeași pulsație și aceeași amplitudine.

Pentru a scrie ecuațiile celor două unde și pentru a studia interferența lor este necesar să studiem mai întâi modul în care se reflectă unda transversală din coardă la suprafața de separație cu un alt mediu. Unda incidentă îi imprimă punctului N de pe suprafața de separație o mișcare de oscilație descrisă de ecuația:

$$y_i = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda} \right),$$

iar unda reflectată îi imprimă o mișcare de oscilație descrisă de ecuația:

$$y_r = a \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda} \right) + \Delta\phi \right],$$

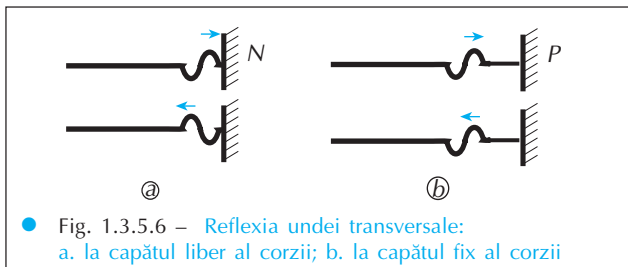
unde $\Delta\phi$ este defazajul introdus de reflexie. Amplitudinea oscilației rezultante este dată atunci de relația:

$$A = \sqrt{a^2 + a^2 + 2a^2 \cdot \cos \Delta\phi} = a\sqrt{2(1 + \cos \Delta\phi)},$$

deci:

$$A = 2a \cdot \left| \cos \frac{\Delta\phi}{2} \right|.$$

În cazul în care reflexia are loc pe suprafața de separație cu un mediu mai puțin rigid decât primul mediu (figura 1.3.5.6-a), punctul N poate să oscileze mai ușor decât punctele din primul mediu, deci va avea amplitudine



● Fig. 1.3.5.6 – Reflexia unei transversale:
a. la capătul liber al corzii; b. la capătul fix al corzii

maximă. În cazul în care reflexia are loc pe suprafața de separație cu un mediu mai rigid decât primul mediu (fig 1.3.5.6-b), punctul P poate să oscileze mai greu decât punctele din primul mediu, deci va avea amplitudine minimă.

Conform relației precedente, în primul caz: $\Delta\varphi = 0$, iar în al doilea caz: $\Delta\varphi = \pi$.

1

Observație: Capătul corzii situat la suprafața de separație este numit în primul caz **capăt liber** (A este maxim), iar în al doilea caz **capăt fix** ($A = 0$).

Concluzii:

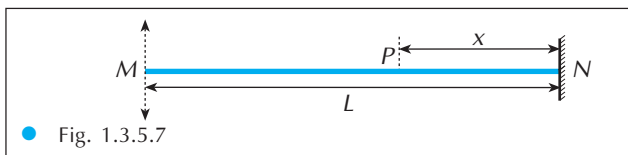
- 1) Reflexia unei transversale la capătul liber al corzii nu introduce defazaj ($\Delta\varphi = 0$, elongația nu își schimbă sensul).
- 2) Reflexia unei transversale la capătul fix al corzii introduce un defazaj $\Delta\varphi = \pi$, iar elongația își schimbă sensul).

Deoarece diferența de drum Δx este legată de defazajul $\Delta\varphi$ prin relația:

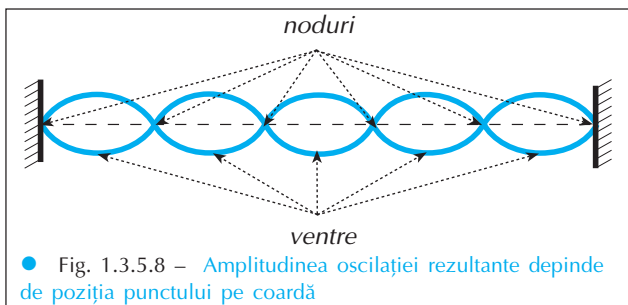
$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\varphi,$$

concluziile precedente pot fi reformulate astfel:

- 1) Reflexia unei transversale la capătul liber al corzii ($\Delta\varphi = 0$) nu introduce nici o diferență de drum.
- 2) Reflexia unei transversale la capătul fix al corzii ($\Delta\varphi = \pi$) introduce o diferență de drum de $\lambda/2$.



● Fig. 1.3.5.7



● Fig. 1.3.5.8 – Amplitudinea oscilației rezultante depinde de poziția punctului pe coardă

Considerăm acum o coardă care are capătul M liber, dar este fixată la capătul N (fig 1.3.5.7). Se imprimă capătului M o mișcare oscilatorie armonică pe o direcție perpendiculară pe MN . În coardă se propagă o undă transversală de la M la N , care se reflectă în N . Unui punct P , situat la la distanța x de N , unda incidentă îi imprimă o mișcare oscilatorie armonică descrisă de ecuația:

$$y_i = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{L-x}{\lambda} \right),$$

unde L este lungimea corzii, $L = MN$, iar unda reflectată îi imprimă o mișcare oscilatorie armonică descrisă de ecuația:

$$y_r = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{L+x+\frac{\lambda}{2}}{\lambda} \right).$$

Corespunzător, defazajul $\Delta\varphi$ este dat de relația: $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(2x + \frac{\lambda}{2} \right)$.

Atunci, pentru amplitudinea oscilației rezultante, $A = 2a \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$, se obține expresia:

$$A(x) = 2a \cos \left[\frac{\pi}{\lambda} \cdot \left(2x + \frac{\lambda}{2} \right) \right].$$

Din această relație se vede că amplitudinea oscilației rezultante este independentă de timp, dar este funcție periodică de poziția punctului pe coardă (figura 1.3.5.8).

Punctele pentru care: $2x + \frac{\lambda}{2} = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$, numite **noduri**, au amplitudine zero (nu oscilează), iar cele pentru care: $2x + \frac{\lambda}{2} = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$, numite **ventre**, oscilează cu amplitudine maximă.

Din aceste două relații rezultă că, *față de punctul de reflexie*, nodurile și ventrelor sunt situate la distanțe date, respectiv, de relațiile

$$x_n = 2k \cdot \frac{\lambda}{4}, \quad x_v = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{4}.$$

Observații:

1) Distanța dintre două noduri (sau două ventre) consecutive este $\lambda/2$, iar distanța dintre un nod și un ventru vecin este $\lambda/4$.

2) Deoarece pozițiile nodurilor și ventrelor nu se schimbă în timp unda rezultantă este numită **undă staționară**. Considerăm acum o coardă cu ambele capete fixe. Deoarece la capetele *fixe* ale corzii pot fi situate numai noduri, rezultă că în coardă se pot forma numai unde staționare având lungimea de undă λ astfel încât: $n \cdot \frac{\lambda}{2} = L$.

Folosind expresia vitezei unei transversale v_t , condiția precedentă poate fi scrisă în forma:

$$n \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \cdot \frac{1}{2v} = L.$$

Aceasta înseamnă că o coardă fixată la ambele capete poate oscila (staționară) numai cu anumite frecvențe, numite **frecvențe proprii**, date de relația:

$$v_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

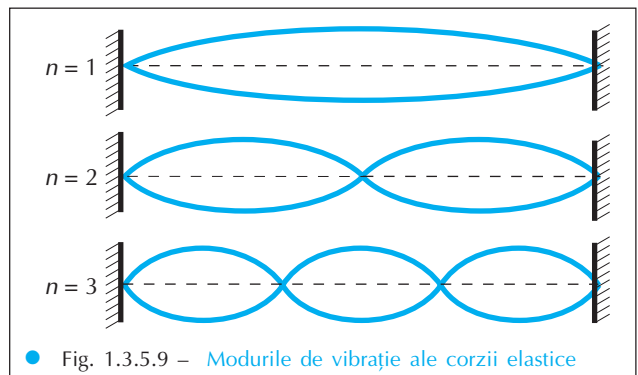
Observații:

1) Frecvența proprie cea mai coborâtă, numită **frecvență fundamentală** sau **armonică de ordinul 1** corespunde la $n = 1$. Unda staționară care se formează în acest caz este ilustrată în figura 1.3.5.9. Frecvențele corespunzând la $n = 2, 3, \dots$ sunt numite **armonici superioare**.

2) Ordinul n al unei armonici este numeric egal cu numărul de ventre care se formează în coardă (figura 1.3.5.9).

3) Variind tensiunea T din coardă, de exemplu prin modificarea greutății de pe platanul din figura 1.3.5.9, se constată experimental că amplitudinea unei staționare este maximă numai pentru anumite valori „compatibile” cu lungimea L a corzii, așa cum am văzut mai sus. Aceasta înseamnă că transferul de energie de la sursă la coardă este un proces *selectiv*, care este maxim în condițiile studiate, când prezintă caracteristicile unui *fenomen de rezonanță*.

4) Pentru **frecvența fundamentală**, v_1 , căreia îi corespunde modul fundamental de vibrație (armonica fundamentală), veți observa un ventru (figura 1.3.5.9), iar pentru celelalte valori ale lui n se obțin armonicile superioare. Frecvențele pentru care coarda vibrează în regim staționar alcătuiesc un spectru discret de valori proprii de vibrație al corzii. Acestea, împreună, formează modurile de vibrație ale corzii și sunt ilustrate în figura 1.3.5.9.



LUCRARE DE LABORATOR

Studiul interferenței undelor mecanice în corzi elastice

Veți utiliza un fir elastic, eventual de cupru, pentru a vizualiza undele staționare produse de către lama elastică a unui vibrator electromagnetic din laboratorul de fizică. Firul (coarda elastică), va avea un capăt legat de lamă (figura 1.3.5.10), iar celălalt va fi trecut peste un scripete fix și va avea agățată o tijă cu cârlig și discuri crestate. În funcție de numărul de discuri agățate se va modifica tensiunea în fir.

Pentru realizarea acestui experiment mai este necesară o sursă de curent alternativ cu tensiunea de 6 -10V.

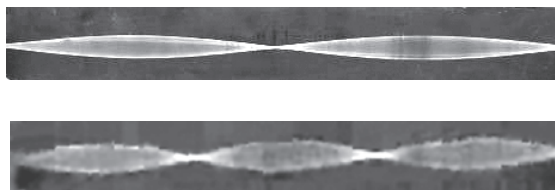
Adăugați discuri, unul câte unul, pentru a tensiona coarda, până când veți constata apariția unor ventre de amplitudine la mijlocul firului și a nodurilor la capetele sale (figura 1.3.5.11).

Tensiunea din coardă este egală cu greutatea tijei și a discurilor crestate adăugate.

$$G = m \cdot g = T$$



● Fig. 1.3.5.10 – Montaj experimental – coarda vibrantă



● Fig. 1.3.5.11 – Aspectul corzii la interferența staționară

Măsurati lungimea corzii, L și diametrul său, d , folosind o ruleta și un șubler.

Calculați viteza de propagare a undelor transversale prin coardă folosind relația:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \frac{2}{d} \cdot \sqrt{\frac{mg}{\pi \rho}}$$

Determinați lungimile de undă corespunzătoare diferitelor moduri de vibrație cu ajutorul relației:

$$\lambda_n = 2 \cdot L/n$$

și viteza de propagare a unei transversale cu relația :

$$v_{\text{exp}} = \lambda_n \cdot v_n$$

unde v_n este frecvența corespunzătoare modului de vibrație n .

Introduceți datele în tabelul de mai jos.

Dacă aveți posibilitatea, utilizați o foaie de calcul tabelar (Excel) pentru a realiza tabelul de date experimentale și pentru a realiza reprezentarea grafică.

m (kg)	L (m)	d (m)	ρ (kg/m ³)	v_t (m/s)	n	λ_n (m)	v_n (Hz)	v_{exp} (m/s)



Experiment virtual: la adresa: <http://www.walter-fendt.de/ph14e/stwaverefl.htm> puteți studia undele staționare transversale produse într-o coardă care poate avea capătul liber sau fixat.



Experiment virtual: la adresa: <http://www.walter-fendt.de/ph14e/stlwaves.htm> puteți studia undele staționare longitudinale produse într-un tub care conține o coloană de aer și care poate avea un capăt liber sau ambele capete libere.

LUCRARE DE LABORATOR

(*) Studiul funcționării unor instrumente muzicale cu corzi și de suflat



● Fig. 1.3.5.12

Orchestra- lumea fascinantă a muzicii, reunește sub bagheta dirijorului o mulțime de instrumente muzicale. Acestea emit sunete muzicale utilizând surse primare de vibrație. Sunete au înălțime constantă, bine determinată și identificabilă, cu intensitate modulabilă după necesitate sau după dorință, în limitele permise de sursa emitentă. Sunete au timbru caracteristic, personal, bine definit și inconfundabil și cu durată convenabilă, suficientă cerinței muzicale, durată care poate fi mică (corzi lovite, ciupite etc.), sau mare (corzi solicitate cu arcușul, tuburi sonore). Dacă în acustica generală se lucrează cu sunete ideale, izolate, de durată indefinită, continue în timp și stabile ca frecvență,

intensitate și timbru, fără personalitate și neinteresante din punct de vedere estetic, sunetele care compun o piesă muzicală au individualitate proprie, conferită de variația continuă a înălțimii, intensității, timbrului și duratei emisiei sonore pe parcursul executării unei piese muzicale.

Observând instrumentele muzicale folosite în mod curent identificăm două tipuri importante de surse sonore: a) *corzile sonore* (vioară, violă, violoncel, etc.) și, b) *tuburile sonore* (trompetă, flaut, orgă etc.).

O altă componentă importantă este elementul rezonator constituit din volumul de aer din cutia viorii, din tubul sonor sau din vasul tobei, a cărui serie de frecvențe proprii este excitată de vibrațiile sursei sonore. Astfel, sunetul slab și fără muzicalitate al vibratorului este amplificat și îmbogățit cu frecvențele de rezonanță, al căror spectru creează timbrul. În final ia naștere și se propagă o undă sonoră care, datorită reflexiilor la extremitățile vibratorului sau rezonatorului, creează un sistem de unde staționare. Frecvențele fundamentale sunt determinate de caracteristicile geometrice ale sursei de la care se propagă unda, iar ansamblul armonicilor (timbrul) este determinat de rezonatorul care amplifică sunetul inițial, adăugându-i seria propriilor frecvențe.

Instrumente muzicale cu corzi

Corzile sonore au fost, de fapt, studiate în secțiunea precedentă. Undele sonore emise de o coardă sonoră au frecvențe identice cu frecvențele proprii ale corzii, determinate de relația:

$$v_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad n=1, 2, 3, \dots$$

În mișcarea *reală* a unei corzi sonore sunt generate *simultan*, atât sunetul fundamental cât și armonicile lui. Prin apăsarea corzilor pe tastiera viorii se modifică lungimea L a corzii care vibrează ceea ce conduce, conform relației precedente la modificarea frecvenței sunetelor emise.

La instrumentele cu corzi, unele corzi sunt înfășurate cu sârmă, ceea ce mărește masa pe unitatea de lungime, μ , astfel încât se obține o frecvență joasă fără a se folosi o coardă de lungime incomod de mare.

În trecut, corzile muzicale se confecționau din intestine de oaie. Acum se utilizează fire de oțel, aliaje de aluminiu, argint, nailon și mătase. Pe coarda sol a viorii sau mi a chitarei se înfășoară un fir de argint. Pe corzile lungi ale pianului se înfășoară un fir de cupru. Prin această îngroșare și îngreunare se obțin sunetele joase dorite, evitându-se folosirea fibrelor omogene groase, greu de fixat și de întins.

Corzile vibrează și produc sunete dacă sunt scoase din poziția lor de echilibru. Aceasta se poate întâmpla prin ciupire la harpă și chitară, prin frecare cu un arcuș care furnizează continuu energie corzii, pentru a-i întreține oscilația la vioară, violă, violoncel și contrabas sau prin lovire la pian și la țambal.

Coarda poate vibra pe întreaga ei lungime emițând sunetul fundamental. Dacă vibrează în două segmente egale, fiecare dintre ele va avea frecvența dublă față de sunetul fundamental, coarda emițând armonica a doua.



Fig. 1.3.5.13 – Harpă



Fig. 1.3.5.14 – Violă



Fig. 1.3.5.15 – Chitară

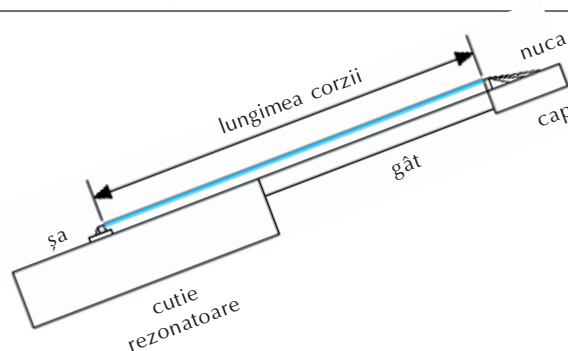


Fig. 1.3.5.16

Punctele inițiale de fixare ale corzii sunt nodurile de amplitudine ale vibrației, iar punctele unde amplitudinea este maximă, ventrele de amplitudine. Când coarda vibrează pe toată lungimea ei, se constată existența unui ventru în centru și a două noduri la extremități. Dacă se creează un al treilea punct fix (nod) la mijlocul corzii, introducând acolo un prag, se constată că jumătățile corzii vibrează cu o aceeași frecvență, care este dublul frecvenței fundamentale. Acest sunet seamănă cu cel fundamental, însă este mai înalt, la octava primului: este a doua armonică. Divizând coarda în trei părți, o porțiune de această lungime dă o frecvență de trei ori mai mare decât cea fundamentală. Aceasta este cea de a treia armonică sau cvinta sunetului precedent. În continuare, făcând să vibreze porțiuni de coardă cu lungimea de 4, 5, 6, ori mai mică decât cea inițială, se vor auzi sunete tot mai înalte, cu frecvențe care sunt multipli întregi ai frecvenței fundamentale. Armonicele se aud practic simultan, dar întâi se produc cele mai înalte și treptat cele mai joase. Coarda intră în vibrație pe porțiuni din ce în ce mai lungi și numai la urmă pe toată lungimea ei.

Atunci când o coardă este făcută să vibreze, spre exemplu, la un sfert din lungimea ei, creând acolo un nod, celălalte sferturi ale corzii vibrează și ele ca și când s-ar fi creat noduri și în celelalte puncte. Mișcarea oscilatorie a corzii are loc în așa fel încât ea vibrează simultan în toate modurile prezentate anterior, fără a fi nevoie să se creeze puncte fixe artificiale. Mai precis, ea vibrează simultan și întreagă, dar în porțiunile $1/2$, $1/3$ etc., până chiar la $1/20$ și mai mult, fără a fi nevoie de pragurile citate. De aceea o coardă emite nu numai sunetul ei fundamental, dar în general și seria armonicilor consecutive, de pildă până la cea de-a 20-a, de fapt un acord, din care se impune cu tărie sunetul fundamental.

La instrumentele muzicale cu corzi, sursa sonoră face corp comun cu elementul rezonator, receptor și reproducător de vibrații. Acesta din urmă este indispensabil. O coardă desprinsă dintr-un violoncel, întinsă și solicitată cu arcușul, emite un sunet slab, șters, cu totul deosebit de cel amplu și plin de căldură care îi este caracteristic în funcționarea normală.

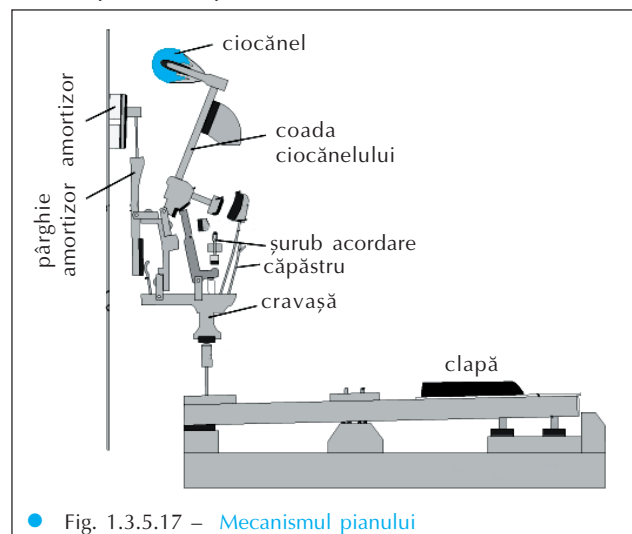
Condiția de bază a cutiilor de rezonanță a instrumentelor muzicale este aceea de a nu fi selective, de a nu privilegia anumite sunete, motiv pentru care au forme variate. În cazul cutiei viorii sau chitarei, cutia de rezonanță se poate descompune (imaginar) într-un număr de volume mici, având fiecare o formă simplă, geometrică, și deci o frecvență proprie de rezonanță. Aceste volume, considerate izolat și cuplate în combinații, vor oferi condițiile necesare pentru ca toate sunetele emise de corzi să poată fi amplificate în mod egal. Aparatul auditiv este organizat și obișnuit să perceapă simultan, în sinteză, componentele unui sunet fundamental, iar nu analitic, pe fiecare separate. Cu alte cuvinte, componentele unui sunet complex se contopesc într-un ansamblu din care numai componenta fundamentală se reliefează și reține atenția.

La pian, coarda intră în vibrație fiind lovită de un ciocănel de lemn, al cărui cap este acoperit cu un strat gros de pâslă întărită (fetu special), pentru îndulcirea sunetelor. Lovirea cu corpuri dure favorizează apariția armonicilor înalte intense, care dau sunetului stridență. Există trei tipuri principale de mecanisme de pian pentru producerea și amortizarea sunetelor (german, francez și englez).

Sub acțiunea ciocănelului, regiunea lovită a corzii se deformează elastic, deformația propagându-se în ambele sensuri până la capetele corzii unde se reflectă dând naștere unui sistem de unde staționare. Când unda reflectată

ajunge în dreptul ciocănelului, coarda este din nou deformată, iar ciocănelul este împins în același sens. Deci cauza care face ca ciocănelul să sară înapoi este împingerea produsă de sosirea primei unde reflectate de punctele de fixare ale corzii. De aceea, contactul coardă-ciocănel are o durată extrem de scurtă, corespunzătoare timpului în care se propagă mișcarea de dus-întors de-a lungul corzii. Ciocănelul bate coarda la $1/7$ din lungimea ei, astfel că aici ia naștere un ventru de amplitudine.

Sunetul se poate obține chiar la apăsarea numai pe jumătate a clapei, ceea ce permite executarea pasajelor rapide și obținerea unor efecte expresive. De la sunetul cel mai slab la cel mai tare, de la cea mai mică la cea mai mare viteză de atac, de la legato-ul cel mai strâns la cel mai sec staccato, interpretul are la îndemână o



vastă gamă de posibilități materiale, capabile să permită redarea oricăror nuanțe expresive. N-a existat vreun virtuos a cărui tehnică să atingă posibilitățile pe care le pune la dispoziție mecanismul pianului, mai ales în ceea ce privește viteza de execuție.

Instrumente muzicale de suflat

Tuburile sonore sunt componente ale instrumentelor de suflat. Sursa sonoră este muștiucul (numit și *ancie*). Acesta este sursa care produce, la rezonanță, unde staționare în tubul sonor. În figura 1.3.5.18 sunt reprezentate unde staționare în tuburi sonore deschise (figura 1.3.5.18-a) și, respectiv, închise (figura 1.3.5.18-b).

La ancie (muștiuc) se formează întotdeauna un ventru de oscilație.

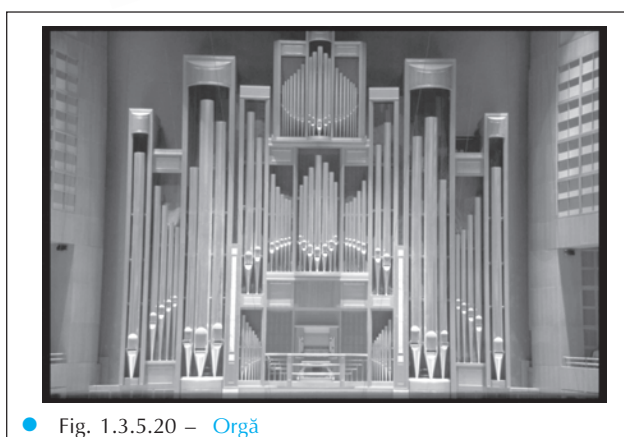
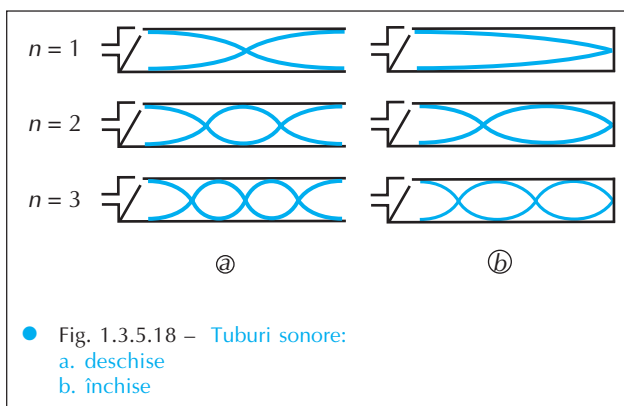
Tubul nu joacă în producerea sunetului decât rolul de a delimita un anumit volum de aer, o coloană a cărei formă este definibilă geometric (cilindru, con, etc.). Materialul din care este făcut tubul nu are vreo influență asupra sunetului, deoarece el nu trebuie să ia parte la fenomenul vibratoriu, rezervat exclusiv coloanei de aer conținute. Se cere doar ca acest material să fie nedeformabil, destul de rigid, pentru ca să nu intre el însuși în vibrație, ceea ce ar schimba caracteristicile oscilației ale coloanei de aer și sunetul produs. Vibrând longitudinal, deplasarea maximă a moleculelor de aer nu depășește 2-3 mm, la cele mai mari amplitudini de vibrație. Într-un tub sonor, aerul, suflat oricât de puternic, nu se deplasează în formă de curent în lungul instrumentului. Perturbația stratului de aer se transmite prin unde longitudinale, din moleculă în moleculă, până la capătul celălalt al tubului și puțin dincolo de el.

Tuburile sonore pot fi rectilinii sau curbate, iar secțiunea lor poate fi constantă (tuburi cilindrice și prismatice) sau regulat variabilă (tuburi conice). Flautul și clarinetul au tubul cilindric-rectiliniu; oboiul îl are conic-rectiliniu; saxofonul, conic-curbat; instrumentele de alamă au tubul cilindric-conic curbat, terminat cu o pâlnie numită pavilion; la orgă se întrebuințează tuburi rectilinii cilindrice și prismatice.

Tuburile sonore pot fi deschise la ambele capete sau închise la un capăt. Tubul flautului și al fluierului sunt de tipul deschis; cel al clarinetului, saxofonului, cornului, trompetei sunt de tipul închis (deoarece la capătul ținut în gură nu există comunicație cu atmosfera).

Tuburi cilindrice deschise

În timpul vibrațiilor coloanei de aer din tuburi se stabilește un sistem de unde staționare, adică o serie de noduri și ventre de amplitudine cu poziție fixă în spațiu. Într-un punct nodal, aerul nu vibrează, nu se mișcă, și deci are viteza și amplitudinea zero. El suferă însă variații periodice de presiune și deci de densitate; acolo există un ventru de presiune. Invers, într-un punct ventral de amplitudine, vibrația aerului are viteza și amplitudinea maxime; presiunea (densitatea) este constantă, nu variază, și are valoare mică (nu există suprapresiune, deci există un nod de presiune).



La capătul deschis al unui tub deschis, deoarece coloana de aer din tub este în contact cu atmosfera, presiunea aerului nu poate varia (nod de presiune), astfel că la un capăt deschis nu se poate stabili decât un ventru de amplitudine.

Cea mai simplă formă în care poate vibra aerul dintr-un tub cilindric deschis la ambele capete nu poate fi decât în succesiunea ventru-nod-ventru, unde între cele două ventre de capăt este inserat un singur nod (nu există vibrații cu mai puțin de un nod). În acest caz, tubul dă sunetul său fundamental, cel mai grav (armonica 1), care are cea mai mică frecvență de vibrație. Aceasta poate fi calculată, iar formula generală ține seama de viteza sunetului, lungimea coloanei de aer în vibrație, și un coeficient a cărui valoare este egală cu numărul de ordine al armonicelor consecutive.

În cazul unui tub sonor deschis lungimea L a tubului corespunde unui număr întreg de $\lambda/2$:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} = n \cdot \frac{v}{2 \cdot \nu}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Corespunzător, frecvențele sunetelor dintr-un tub sonor deschis sunt date de relația:

$$\nu_n = n \cdot \frac{v}{2L}.$$

Într-un tub sonor deschis, frecvența fundamentală este $v/2L$ și sunt prezente toate armonicile.

Cea mai acută notă a orgii mari este $do_{10}=8.372\text{Hz}$ și de aceea tubul deschis care o produce are o lungime minusculă, circa 20 mm. Nota cea mai joasă, în schimb ($do_1=16,35\text{Hz}$), duce la o lungime de tub (deschis) uriașă: 10,4m. În realitate, lungimea acestui tub poate fi redusă la jumătate.

Tuburi cilindrice închise

Unda de vibrație a coloanei de aer dintr-un tub sonor închis la un capăt are, în forma cea mai simplă, configurația ventru-nod, adică un nod la capătul închis, unde există un obstacol rezistent. La celălalt capăt trebuie să existe un ventru, deoarece coloana de aer comunică cu atmosfera. Deci sunetul fundamental al acestui tub va corespunde unui sfert de lungime de undă (în loc de două sferturi, ca în cazul tubului deschis la ambele capete).

Dacă tuburile sunt de lungime egală, rezultă că unda fundamentală a tubului închis este de două ori mai lungă decât aceea a tubului deschis, ceea ce înseamnă că frecvența fundamentalei acestui tub este de două ori mai mică. Prin urmare, astupând cu un dop unul din capetele unui tub deschis (de exemplu un fluier), se aude octava inferioară. La lungime egală, tuburile cilindrice închise dau sunete căror frecvență este jumătate din aceea a tuburilor deschise, sau altfel spus, la aceeași frecvență, tuburile cilindrice închise sunt de două ori mai scurte decât cele cilindrice deschise. De aceea, tuburile lungi de orgă se fac deschise la singur capăt.

Astfel, tuburile sonore cilindrice închise dau armonice consecutive cu frecvența de 3,5,7... ori mai mare decât a sunetului fundamental, adică produc numai armonicile de ordin impar din seria totală a sunetelor armonice.



● Fig. 1.3.5.21 – Saxofon



● Fig. 1.3.5.22 – Trompetă

În cazul unui tub sonor închis, așa cum se vede din figura 1.3.5.18-b,

$$L = (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{4} = (2n-1) \cdot \frac{v}{4 \cdot \nu}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Corespunzător, pentru frecvențe se obține relația: $\nu_n = (2n-1) \cdot \frac{v}{4 \cdot L}$.

Într-un tub sonor închis, frecvența fundamentală este $v/4L$ și sunt prezente numai armonicele impare.

Din punctul de vedere al producerii armonicele consecutive (1,2,3,etc.) corzile se comportă ca tuburile deschise, din sunetele seriei armonice consecutive. Tuburile cilindrice dau însă numai armonicele fără soț din această serie (1,3,5,etc.).

Există vreo echivalență între tuburile închise și corzi? Teoria arată și experiența confirmă că dacă se ciupește o coardă la mijlocul ei, în sunetul complex produs se întâlnesc ca sunete pure numai armonicele impare, ca și la tuburile cilindrice închise. Explicația este aceea că prin însăși modul de punere în vibrație, în locul de excitație nu se pot forma noduri, ci numai ventre.



Construiți singuri modele de instrumente muzicale!

Model de chitară!

Veți construi un monocord utilizând un castron, folie transparentă (cea utilizată pentru acoperirea alimentelor), o bucată de elastic și puțină bandă adezivă. Pentru aceasta acoperiți castronul cu folia transparentă bine întinsă (va semăna inițial cu o tobă artizanală), apoi lipiți cu atenție elasticul în centrul foliei utilizând banda adezivă (figura 1.3.5.2.3).

Pentru a verifica experimental rolul cutiei de rezonanță al instrumentelor cu corzi (în cazul nostru al castronului) fixați o bucată identică de elastic pe masă, utilizând aceeași bandă adezivă. Puneți coarda astfel construită în mișcare oscilatorie prin ciupire: exact ca la coarda din figura 1.3.5.23.

Urmăriți aspectul unei staționare formate (figura 1.3.5.23).

Modificați lungimea corzii și formați altă undă staționară. *Ascultați sunetul emis!*

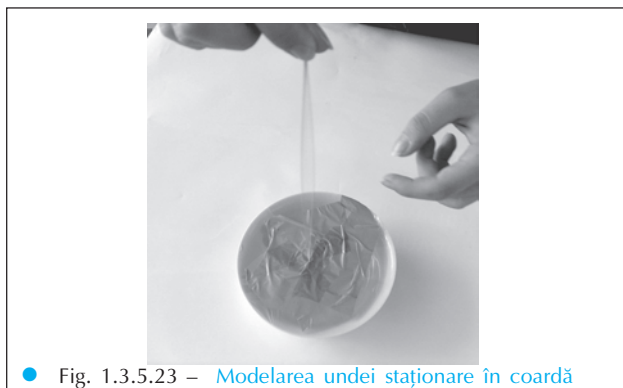
Acum vom testa rolul cutiei de rezonanță! Repetați operațiile anterioare pentru coarda fixată pe folia castronului. Sunetele emise sunt mult mai puternice, din cauza membranei de plastic care mărește practic aria suprafeței care vibrează.

Dacă dispuneți de o chitară puteți verifica rolul cutiei ei de rezonanță utilizând un diapazon. Ascultați sunetul emis de lovirea sa cu un ciocănel, apoi apropiați-l de partea chitarei. Sunetul va fi mult amplificat!

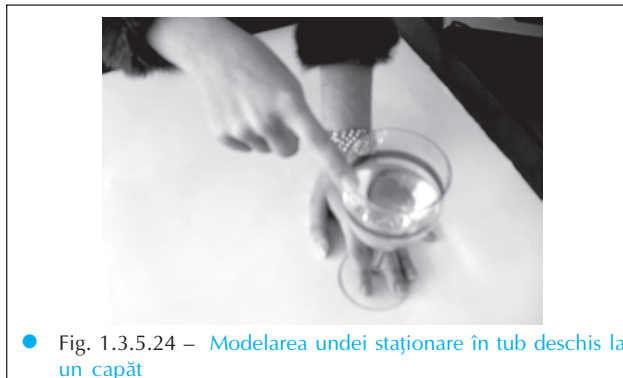
Modele de instrumente muzicale cu tuburi!

Veți utiliza mai multe pahare înalte care conțin cantități diferite de apă. Pentru a emite sunete încercați să frecați gura paharelor cu mâna umedă (ca în figura 1.3.5.24) sau loviți-le ușor cu o linguriță. Ascultați sunetele produse și formulați concluzii privind dependența dintre înălțimea coloanei de apă din pahare și înălțimea sunetelor produse.

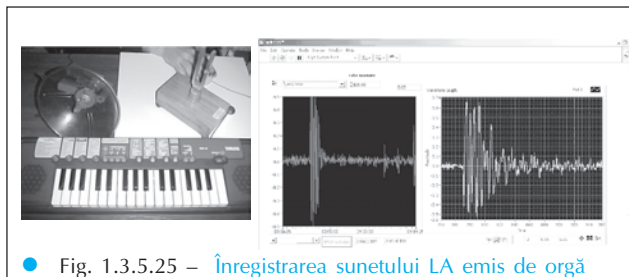
O altă metodă ar fi să utilizați un cilindru de carton (pe care s-au aflat prosoape de hârtie), căruia să-i acoperiți un capăt cu hârtie cerată. Practicați apoi un rând de orificii pe generatoarea cilindrului, folosindu-vă de penița unui stilou. Instrumentul modelează un fluiet. *Încercați să scoateți sunete cu ajutorul lui, astupând pe rând orificiile!*



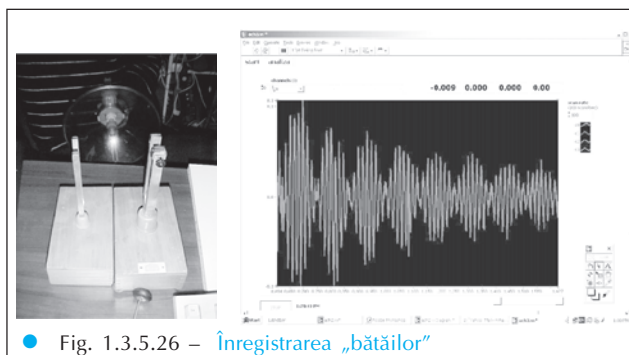
● Fig. 1.3.5.23 – Modelarea unei staționare în coardă



● Fig. 1.3.5.24 – Modelarea unei staționare în tub deschis la un capăt



● Fig. 1.3.5.25 – Înregistrarea sunetului LA emis de orgă



● Fig. 1.3.5.26 – Înregistrarea „bătăilor”



● Fig. 1.3.5.27 – Înregistrarea sunetelor unei țestoase



Înregistrări acustice

Pentru a vizualiza oscilațiile care dau naștere undelor sonore am utilizat ca senzor de sunet cuplat cu placa de achiziție din computer, un explorator acustic achiziționat de magazinul de jucării (figura 1.3.5.25).

Același sunet LA emis de orgă electronică din figura 1.3.5.25 arată ca în diagrama din figură.

Observați gradul de amortizare al oscilațiilor sonore emise de orgă!

În figura 1.3.5.26 puteți observa apariția bătăilor rezultate la interferența undelor sonore emise de două diapazoane având frecvențe puțin diferite și așezate ca în imagine.

Observați gradul de amortizare al oscilațiilor sonore emise de diapazoane!

În figura 1.3.5.27 puteți observa înregistrarea sunetelor scoase de o broscuță țestoasă speriată.

1.3.6. Acustică

Acustica este știința care studiază producerea, propagarea și recepționarea sunetelor, inclusiv efectele asupra organismului uman.

Într-un mediu elastic se pot propaga unde mecanice de diferite frecvențe. Pentru un anumit domeniu de valori ale frecvențelor aceste unde produc senzații auditive și sunt numite **unde sonore** sau **sunete**.

Experimental se constată că organul auditiv uman percepe sub formă de sunet oscilațiile mecanice având frecvența ν cuprinsă în intervalul (16 Hz – 20 kHz). Oscilațiile cu frecvențe mai mari de 20 kHz sunt numite **ultrasunete**, iar cele cu frecvențe mai mici de 16 Hz sunt numite **infrasunete**. Prin extensie, acustica se ocupă și de studiul infrasunetelor și ultrasunetelor.

Definiție: Se numește **sunet fundamental** sau **sunet pur** sunetul care are frecvența egală cu frecvența fundamentală.

Definiție: Se numește **armonică** sunetul care are frecvența egală cu un multiplu întreg al frecvenței fundamentale.

Definiție: Se numește **sunet compus** sunetul format din suprapunerea sunetului fundamental și a armonicilor emise de un izvor sonor.

Observație: În cazul în care în sursa sonoră se formează unde staționare, sunetele emise sunt periodice și sunt numite **sunete muzicale**. Dacă în sursa sonoră nu se formează unde staționare sunetele emise sunt aperiodice și sunt numite **zgomote**.

Din punct de vedere anatomo-fiziologic, sunetele se deosebesc unele de altele printr-o serie de caracteristici numite **calitățile sunetului**. Acestea sunt: intensitatea, înălțimea, timbrul și durata sunetului.

Sursa unei unde transferă, în mod continuu, energie mediului în care se propagă unda.

Definiție: Se numește **intensitate** I a unei mărimi fizice scalare definită de relația:

$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S},$$

unde E este energia transferată în timpul Δt printr-o suprafață de arie S perpendiculară pe direcția de propagare a unei.

Din relația de definiție rezultă că $[I]_{SI} = W/m^2$. Se poate arăta că intensitatea unei este dată de expresia:

$$I = 2\pi^2 \cdot A^2 \cdot v^2 \cdot \rho \cdot v,$$

unde:

- A este amplitudinea unei sonore, $[A]_{SI} = m$;
- v este frecvența oscilațiilor sonore, $[v]_{SI} = Hz$;
- ρ este densitatea mediului elastic prin care se propagă unda sonoră, $[\rho]_{SI} = kg/m^3$;
- v este viteza de fază a unei sonore, $[v]_{SI} = m/s$.

Din relația precedentă se constată că *intensitatea sunetului depinde atât de caracteristicile sunetului (A , v) cât și de cele ale mediului de propagare (ρ , v).*

Definiție: Se numește **nivel de intensitate sonoră** mărimea fizică adimensională L definită de relația:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0},$$

unde:

- I este intensitatea sunetului, $[I]_{SI} = W/m^2$;
- $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ este o intensitatea de referință aleasă în mod arbitrar.

Nivelul de intensitate sonoră se exprimă în decibeli, prescurtat dB, denumire dată în onoarea lui Alexander Graham Bell. De exemplu, când șoptim, sunetul emis are o intensitate $I = 10^{-10} W/m^2$. Aceasta înseamnă că o șoptă are nivelul de intensitate sonoră $L = 20$ dB. Alte valori tipice de nivele de intensitate sonoră sunt următoarele: foșnetul frunzelor – 10 dB, conversația obișnuită – 60 dB, motor de avion la câțiva metri distanță – 120 dB.

Nivelul de intensitate sonoră al celui mai slab sunet pur de o frecvență dată, care mai poate fi auzit, este numit **prag de audibilitate**. *Experimental se constată că pragul de audibilitate depinde de frecvența sunetului.* Sensibilitatea auzului uman este maximă pentru frecvențe cuprinse între 2 kHz și 3 kHz. În acest interval pragul de audibilitate al auzului normal este de circa 5 dB. Pentru nivele de intensitate sonoră mari senzația auditivă se transformă în senzație de durere. Nivelul de intensitate sonoră la care are loc această transformare este numit **prag tactil** sau **pragul senzației de durere** și are o valoare de aproximativ 130 dB.

Nivelul de intensitate sonoră nu poate fi utilizat pentru descrierea senzației auditive, deoarece două sunete de aceeași intensitate, dar de frecvențe diferite nu produc senzații auditive identice. Pentru a lua în considerație senzația auditivă se ia ca *referință* un sunet fundamental cu frecvența de 1 kHz. **Nivelul de intensitate auditivă** al unui sunet de o frecvență oarecare este definit ca fiind egal cu cel al unui sunet cu frecvența de 1 kHz care este apreciat de un auz normal ca având aceeași tărie cu sunetul considerat. Nivelul de intensitate auditivă este, conform definiției sale, o noțiune subiectivă.

Termenul de **înălțime** a sunetului se referă la caracterul senzației fiziologice care permite deosebirea sunetelor „înalte” (acute, ascuțite) de cele „joase” (grave, profunde). Înălțimea sunetului este legată strict de frecvența sunetului, dar este, ca și nivelul de intensitate auditivă, o mărime subiectivă care nu poate fi determinată cu un instrument de măsură. Pentru un sunet pur (numai frecvența fundamentală, fără armonici) de intensitate constantă, înălțimea crește când crește frecvența.

Sunetele reale sunt, de obicei, sunete compuse: alături de sunetul fundamental sursa sonoră emite și unele dintre armonice. Să presupunem că două surse sonore emit același sunet fundamental și aceleași armonice. Nivelul de intensitate sonoră al componentelor celor două sunete îl presupunem diferit. Atunci cele două sunete vor da senzații auditive diferite. Se spune că ele diferă prin **timbru**. Timbrul este deci o calitate *subiectivă* a unui sunet compus, legată de componentele acestuia (armonicele) care sunt emise odată cu sunetul fundamental și de nivelul de intensitate sonoră a acestor componente.

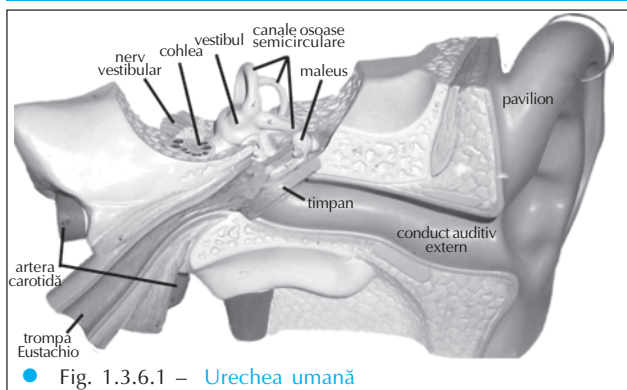
Sunetele fiind unde mecanice care se propagă într-un mediu elastic, ele prezintă toate fenomenele caracteristice undelor: reflexie, refracție, interferență etc.

Un fenomen natural, consecință a reflexiei sunetului este **ecoul**. El constă în faptul că, atunci când se produce un sunet la o anumită distanță de un perete, se aude atât sunetul direct cât și, după un anumit timp, sunetul reflectat. În cazul în care sunetul este produs între doi pereți paraleli, sunetul se reflectă succesiv pe aceștia și se poate realiza fenomenul de **ecou multiplu**.

Fenomenul de ecou are aplicații importante. De exemplu, pe un vapor care plutește pe apa unei mări, se produce un sunet și se măsoară timpul după care se întoarce la vas sub formă de ecou datorită reflexiei pe fundul mării. Cunoscând acest timp și viteza sunetului în apă se poate determina adâncimea mării în acel loc.

Fenomenele de reflexie sunt luate în considerație și de acustica arhitecturală în proiectarea și construirea sălilor de concert, de teatru și altele, unde fenomenele nedorite, cum este cel de ecou, trebuie eliminate.

MĂSURI DE PROTECȚIE A PROPRIEI PERSOANE ȘI A MEDIULUI AVÂND ÎN VEDERE POSSIBILELE EFECTE ALE SUNETELOR



● Fig. 1.3.6.1 – Urechea umană

Expunerea excesivă la zgomote este una dintre cauzele *aparității pierderilor* de auz.

Urechea are trei componente:

- urechea externă – care se deschide în canalul urechii
- urechea medie – este separată de urechea externă prin timpan
- urechea internă.

Sunetele se propagă prin aer, sunt captate de către pavilionul urechii, pătrund în canalul urechii, produc vibrația timpanului care este apoi preluată de către lanțul celor trei oscioare (ciocănelul, nicovala și scărița).

Oasele mici din *urechea medie* transferă sunetul către *urechea internă*.

Urechea medie conține terminațiile *nervului auditiv* care conduce impulsul nervos către creier.

Ele vor transmite semnalul către nervul auditiv din urechea internă unde se vor transforma în impulsuri nervoase care o dată ajunse la creier vor fi „interpretate” ca sunete.

Dacă sunetele sunt prea puternice, ele distrug treptat terminațiile nervoase auditive. De asemenea, durata prelungită a unor sunete puternice produce leziuni nervoase ireversibile.

Ca regulă generală, un sunet este periculos pentru auzul tău dacă trebuie să „răcnești” pentru a-ți auzi vocea peste zgomotul respectiv, dacă apar dureri de urechi în urma expunerii, dacă urechile „țiuie” sau dacă percepi cu dificultate unele sunete, timp de câteva ore după expunerea la zgomot.

Copiii percep sunetele având frecvența cuprinsă între 20-20.000 Hz. 20 Hz reprezintă sunetul cel mai grav al unei orgi, iar 20.000 Hz, sunetul fluierului pentru câini. Vocea umană are domeniul de frecvență cuprins între

300-4000 Hz. Când apar probleme de auz sunt afectate întâi sunetele de frecvență mare (emise în special de copii și fluieri). Apoi apar distorsiuni, dificultăți în distingerea consoanelor: S, F, H, C etc.

În ceea ce privește intensitatea sonoră, specialiștii consideră că sunetele având peste 85 de decibeli sunt periculoase pentru auz.

Exemplu: o sală de lectură dintr-o bibliotecă are intensitatea sonoră de cca 30 dB, o conversație normală cam 60 dB, zgomotul emis în timpul funcționării unui ciocan pneumatic are cam 100 dB, iar în timpul decolării unui avion cu reacție, peste 140 dB.

Persoanele care lucrează în zone cu nivel ridicat al intensității sonore trebuie să utilizeze căști de protecție ca în figura 1.3.6.2-a și b.

Expunerea zilnică fără protecție a auzului este limitată la 8 ore pentru 90 dB și 2 ore la 100 dB. Nivelul maxim de expunere pentru urechi neprotejate este de 115 dB pentru 15 min/zi. Zgomote peste 140 dB nu sunt permise.

Căștile corect utilizate reduc intensitatea sonoră cu 15-30 dB. Combinarea celor două tipuri de căști duce la reducerea nivelului sonor cu încă 10-15 dB.

Utilizarea unor tampoane din vată sau hârtie nu reduce intensitatea sonoră decât cu 7 dB, ele nefiind indicate.

Atunci când o persoană care poartă protecție auditivă își aude propria voce mai puternic și mai ascuțită, înseamnă că protectoarele sunt bine poziționate și cu efect maxim.

Alte efecte produse de expunerea prelungită la zgomote puternice citate în literatura de specialitate ar fi:

- accelerarea ritmului cardiac;
- creșterea presiunii arteriale;
- oboseala cardiacă;
- secreții hormonale anormale;
- accentuarea nervozității, a stresului.

Studii recente confirmă creșterea alarmantă a problemelor auditive ale tinerilor datorate ascultării muzicii rock la volum foarte mare, participării la concerte rock și a utilizării mp3 player-elor cu căști de ureche.



● Fig. 1.3.6.2 – Căști de protecție:
a. earplugs
b. earmuffs

1.3.7. Ultrasunete și infrasunete. Aplicații în medicină, industrie, tehnică militară

În 1879 John Lubbock afirma gândindu-se la limitele spectrului audibil: „... Universul este plin de muzică pe care noi nu o putem percepe...”

Ultrasunete

Am văzut că sunetele cu frecvențe mai mari de 20 kHz sunt numite *ultrasunete*. Datorită frecvenței lor mari, ultrasunetele prezintă unele proprietăți specifice:

- ultrasunetele pot transporta cantități mari de energie, deoarece $I \sim v^2$;
- pot fi realizate fascicule înguste de ultrasunete, care pot fi direcționate cu precizie;
- ultrasunetele sunt foarte puțin absorbite de lichide și solide;
- ultrasunetele produc în lichide fenomenul de **cavitație**.

Observație: Fenomenul de cavitație constă în apariția unor goluri (cavități) în masa unui lichid în care se propagă ultrasunetul. Datorită variațiilor mari și dese de presiune în lichid se formează mici goluri (bule) în care pătrund gazele dizolvate în lichid și vaporii acestuia. Bulele mici se contopesc în bule mai mari care încep să vibreze și apoi se sparg. Spargerea acestor cavități dă naștere unor presiuni locale foarte mari care produc în lichid șocuri hidraulice de scurtă durată. Fenomenul de cavitație este responsabil pentru deteriorarea paletelor turbinelor sau a elicelor vapoarelor.

Ultrasunetele pot fi produse prin metode mecanice, termice și electromecanice. În mod uzual se folosesc două tipuri de generatori: *piezoelectrice* și *magnetostrictivi*.

Unele cristale (cuarțul, de exemplu) au proprietatea de a se încălca electric sub acțiunea unei deformări mecanice (**efect piezoelectric direct**) sau de a se deforma sub acțiunea unui câmp electric extern (**efect piezoelectric invers**). Pentru producerea ultrasunetelor se folosește o lamelă piezoelectrică pe fețele căreia se aplică doi electrozi (straturi metalice subțiri). Se leagă electrozii la bornele unei surse de tensiune alternativă. Sub acțiunea câmpului electric alternativ, lama începe să vibreze cu o frecvență egală cu cea a tensiunii aplicate. Aceste vibrații generează în mediul înconjurător unde ultrasunore. Cu un astfel de generator se pot obține ultrasunete având frecvențe până la aproximativ 150 MHz și intensități până la 10 MW/m².

Generatorii magnetostrictivi folosesc fenomenul de **magnetostricțiune** care constă în deformarea unui corp feromagnetic sub acțiunea unui câmp magnetic exterior. Dacă se introduce o bară feromagnetică în interiorul unei bobine alimentată de la o sursă de tensiune alternativă bara se deformează periodic cu o frecvență egală cu cea a tensiunii alternative, generând astfel în mediul înconjurător unde ultrasunore.

Datorită proprietăților lor specifice ultrasunetele au multiple aplicații tehnice. **Aplicațiile active** sunt cele în care ultrasunetele intervin activ asupra mediului

înconjurător prin efectele pe care le produc. Dintre aplicațiile active ale ultrasunetelor menționăm:

- prelucrarea materialelor dure (șlefuire, tăiere, perforare) folosind fenomenul de cavitație produs de ultrasunete;
- sudarea, lipirea și cositorirea unor piese metalice, cum sunt cele din aluminiu care permit efectuarea acestor operații numai în câmpuri ultrasonore;
- realizarea unor depuneri metalice cu calități fizice superioare prin electroliză în câmp ultrasonor;
- obținerea de emulsii, prin ultrasunarea lichidelor nemiscibile, utile în prepararea medicamentelor;
- mărirea vitezei unor reacții chimice, cum sunt cele de polimerizare;
- pasteurizarea alimentelor (lapte, iaurt etc) prin distrugerea microorganismelor.

Aplicațiile pasive sunt cele în care ultrasunetele sunt utilizate la investigarea caracteristicilor mediului de propagare. Dintre aplicațiile pasive ale ultrasunetelor menționăm:

- determinarea defecțiunilor interioare ale materialelor (**defectoscopie cu ultrasunete**);
- **microscopie cu ultrasunete**;
- determinarea poziției unui obiect cu ajutorul ultrasunetelor (**locație ultrasonoră**); de exemplu: detectarea bancurilor de pești, detectarea aisbergurilor, determinarea reliefului submarin, etc.

Ultrasunete sunt folosite și în medicină. O aplicație medicală **pasivă** a ultrasunetelor este **ecografia**. Ecografia este o metodă de a obține imagini ale organelor umane interne folosind ultrasunete cu frecvențe, de obicei, mai mari de 1 MHz. Sonda de scanare ecografică are în componență un generator de ultrasunete și un detector care detectează undele reflectate (ecoul) la interfețele dintre organele umane. Detectorul transformă semnalul ultrasonor în semnal electric care poate fi afișat pe un monitor TV. Repetând procedura într-un număr suficient de mare de puncte se obține o imagine a organului respectiv. În figura 1.3.8.4 este prezentată o imagine ecografică a inimii umane.

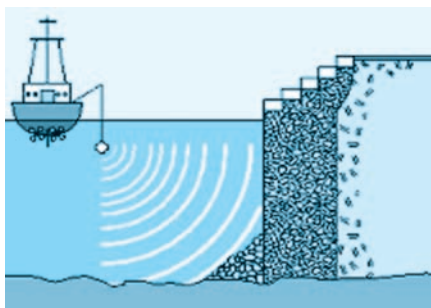
Ca aplicație medicală **activă** menționăm utilizarea ultrasunetelor pentru îndepărtarea tartrului dentar sau pentru pulverizarea calculilor renali.

Infrasunete

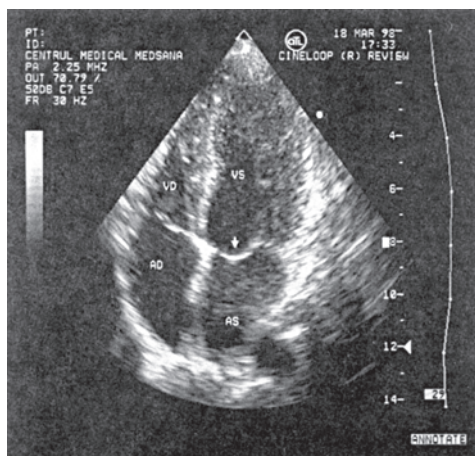
Infrasunetele sunt sunete cu frecvențe mai mici decât 16 Hz. Ca și ultrasunetele, ele apar concomitent cu sunetele audibile, sursele lor fiind în general comune.

Infrasunetele pot fi generate în timpul furtunilor și al erupțiilor vulcanice. Vânturile, valurile oceanice, marea, căderile de apă ale cascadelor, reprezintă la rândul lor surse naturale de unde cu frecvență subsonică.

Pot să apară în timpul decolării avioanelor cu reacție, al lansării rachetelor, al vibrațiilor podurilor când bate vântul puternic, în timpul funcționării motoarelor de pe vapoare, de pe aparatele de climatizare. Procese



● Fig. 1.3.8.2 – Explorări ultrasonore



● Fig. 1.3.8.4 – Ecografie

industriale, precum vopsirea, curățarea, găurirea, amestecul și emulsionarea substanțelor pot genera la rândul lor infrasunete.

Au efecte stresante asupra organismelor vii.

Se pare că animalele sunt sensibile la ultrasunetele care preced mișcările seismice, fiind emise înainte să apară ruptura finală a plăcilor tectonice, în timpul tensionării lor. Sunt de fapt pulsuri ultrasonice simțite în special de către bancurile de pești care se grăbesc să evadeze din zonele care emit aceste unde. Întrucât animalele (ex.: caii) nu pot localiza sursa de infrasunete în acest caz, sunt cuprinse de panică și devin hiperkinetice.

Cercetătorii au descoperit că balenele utilizează emisii de tunuri de ultrasunete pentru a "paraliza" peștii pe care să-l prindă mai ușor. În literatura de specialitate este citat cazul veteranilor care au avut probleme în a se apropia de balene care se "apărau" emițând astfel de semnale.

În timpul exploziilor se emit infrasunete care au o forță distructivă puternică. S-a crezut că spargerea geamurilor se datorează suflului exploziilor, dar s-a demonstrat că unda infrasonică este vinovată de aceasta prin faptul că ea rezonază în toate cavitățile pe care se întâlnește.

În ceea ce privește efectele infrasunetelor asupra organismului uman, s-a crezut inițial că expunerea afectează performanțele umane inducând de la stări de rău, până la stări asemănătoare beției. Medicina militară a efectuat cercetări amănunțite în acest domeniu dat

fiind faptul că piloții avioanelor cu reacție și rachetelor militare sunt expuși continuu unor cantități mari de infrasunete. Rezultatele obținute au demonstrat diminuarea reflexelor, scăderea acuității vizuale, a orientării și a echilibrului, acuratețea de a discerne și a lua decizii rezonabile. Din aceste motive s-a procedat la reducerea timpului de zbor pentru a micșora riscul producerii erorilor.

O altă sursă de infrasunete o reprezintă valurile oceanice care produc vibrații ale aerului atmosferic de deasupra oceanului cu frecvența de circa 16 Hz. Ele stau la baza cunoscutului fenomen al exploziei din golf care constă într-o colecție de sunete ciudate ce se aud în zonele de golf și care au o mare încărcătură infrasonică. Aceasta din urmă are efecte asupra organismelor vii din zonă producându-le stări de spaimă, anxietate. Oamenii au raportat stări de amețeală și oboseală nejustificată.

Cascadele și torențele sunt generatoare puternice de infrasunete. Vizitatorii lor pot suferi stări de greață și amețeală asociată cu frica de înălțime.

Furtunile și vântul puternic sunt purtătoare și generează infrasunete cu frecvențe între 30-40 Hz. Persoanele sensibile pot manifesta oboseală și probleme stomacale. Atunci când bate mistralul pe malul Mării Mediterane sau Fohn-ul în Alpi, locuitorii zonelor devin ușor iritabili, crește tensiunea emoțională și incidența stărilor depresive, crește numărul accidentelor de circulație.

MĂSURI DE PROTECȚIE A MEDIULUI ȘI A PROPRIEI PERSOANE LA UTILIZAREA ULTRASUNETELOR, RESPECTIV A INFRASUNETELOR ÎN PRACTICĂ

Studiile de specialitate arată că ultrasunetele au în general efecte slabe asupra organismului uman. Expunerile prelungite pot cauza stări de greață și dureri de cap, țiuiri în urechi, oboseală etc.

Întrucât sursele de ultrasunete sunt comune cu cele de sunete audibile, se poate spune că o persoană rezistă expunerii de 8 ore la sunete cu frecvența de 20 Hz și la un nivel sonor de 94 dB, fără a-și pune în pericol auzul.

Protecția împotriva expunerii excesive la ultrasunete se poate realiza utilizând materiale absorbante acustic precum vata de sticlă și spumele poliuretamice. Având lungimea de undă mică, ultrasunetele „călătoresc” puțin în mediu, astfel încât protecția contra lor se realizează relativ ușor.

Exemplu: Lungimea de undă a unui sunet de 16 KHz este de circa 2 cm, astfel încât o barieră de 3-4 cm înălțime față de generatorul de infrasunete este suficientă pentru a proteja o persoană din vecinătate.

Protecția auzului persoanelor care activează lângă surse puternice în ultrasonic se realizează utilizând același tip de căști indicate pentru domeniul audibil. Ele vor asigura o protecție relativ bună pentru ultrasunete. Pentru frecvențele mici, efectul căștilor poate fi contrar, ele amplificând sunetul în loc de atenuare.

În ceea ce privește expunerea la infrasunete și efectele sale asupra organismului uman, la frecvențe de la 1-20 Hz, pentru un nivel de peste 144 dB și un interval de circa 8 minute, subiecții au remarcat doar creșterea nedureroasă a presiunii în urechea medie, modulația vocii și cupidația corpului, ceea ce a dus la concluzia că aceste nivele nu pun în pericol sănătatea persoanelor expuse.



Experiment virtual: la adresa <http://www.acoustics.salford.ac.uk/feschools/waves/shm.htm> puteți verifica experimental în mediu virtual multe dintre fenomenele descrise în acest capitol!

ACTIVITĂȚI DE EVALUARE

Formulați răspunsuri pentru următoarele întrebări:

1

1. Ce înțelegeți prin *mișcare oscilatorie*?
2. Cum definiți *frecvența* mișcării oscilatorii?
3. Ce este *oscilatorul armonic liniar*?
4. Care este *expresia perioadei* oscilatorului armonic liniar?
5. Care este *legea de mișcare* a oscilatorului armonic liniar?
6. Ce *expresii ale energiei* oscilatorului armonic liniar cunoașteți?
7. Ce este *rezonanța*?
8. Care este *expresia perioadei pendulului gravitațional*?
9. Ce este *unda transversală*?
10. Ce este *lungimea de undă*?
11. Cum se definește *viteza de fază*?
12. Care este *ecuația undei plane*?
13. Cum se enunță *legea refracției undelor*?
14. Ce înțelegeți prin *unde coerente*?
15. Ce sunt *franșele de interferență*?
16. Ce sunt *unde staționare*?
17. Ce *armonice* sunt generate într-un tub sonor închis?
18. Care sunt *calitățile sunetului*?
19. Ce efecte se folosesc pentru *generarea ultrasunetelor*?
20. Ce *tipuri de unde seismice* există?

Apreciați cu adevărat sau fals:

1. Amplitudinea oscilațiilor mici nu depinde de condițiile inițiale ale mișcării.
2. Lungimea de undă nu depinde de viteza de propagare a undei în mediul respectiv.
3. Frecvența fundamentală a unui tub sonor deschis este de două ori mai mare decât frecvența fundamentală a unui tub sonor închis.
4. Perioada unui pendul gravitațional nu depinde de masa lui.
5. La reflexia undei mecanice pe un mediu mai puțin dens faza undei se modifică cu $\pi/2$ rad.
6. Lungimea unui tub sonor deschis reprezintă un număr impar de sferturi de lungimi de undă.

Explicați utilizând legile fizicii pe care le-ați studiat în acest capitol:

1. De ce zăpada scârțâie sub pașii noștri numai în zilele foarte geroase?
2. Un cosmonaut care ajunge pe Lună, ar putea auzi zgometul produs de plecarea rachetei, la fel ca și pe Pământ?
3. Ce ar auzi un observator care s-ar deplasa cu o viteză egală cu viteza de propagare a sunetului îndepărtându-se de sursă?
4. De ce o coardă de chitară întinsă mai tare poate produce un sunet mai ascuțit decât aceeași coardă întinsă slab?
5. De ce în pădure este greu de definit direcția din care vine sunetul?
6. De ce se preferă radiolocația cu ultrasunete sub apă, în loc de radiolocația sonoră?
7. De ce dacă se sare într-un anumit ritm pe o scândură destul de lungă sprijinită la capete, aceasta se poate rupe cu ușurință?
8. De ce auzim o muscă sau un țânțar în timp ce zboară, dar nu putem auzi un fluture care zboară?

Probleme

Problema 1.1. Un punct material de masă m efectuează oscilații armonice cu amplitudinea A și frecvența ν . Faza inițială a oscilațiilor este nulă. Calculați: a) ecuația mișcării oscilatorii; b) energia totală E a oscilatorului.

Aplicație: $m = 5$ g; $A = 5$ cm; $\nu = 1$ Hz.

R: $x(t) = 5 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(2\pi t)$ m; $E = 0,246$ mJ.

Problema 1.2. Sub acțiunea unei forțe F un corp de masă m , atârnat de capătul liber al unui resort ideal, se deplasează pe distanța x . Calculați: a) pulsația, ω , perioada, T , și frecvența, ν , ale oscilațiilor libere ale corpului; b) raportul n dintre energia cinetică și cea potențială ale corpului la o distanță de origine egală cu o fracțiune f din amplitudine (a-1978).

Aplicație: $F = 10$ N; $m = 100$ g; $x = 2$ cm; $f = 0,5$.

R: $\omega = 70,7$ rad/s; $T = 88,8$ ms; $\nu = 11,26$ Hz; $n = 3$.

Problema 1.3. Un corp de masă m , așezat pe un plan orizontal fără frecări, este legat de un resort ideal orizontal și, sub acțiunea unei forțe orizontale F , este deplasat la distanța x_0 față de poziția de echilibru. Lăsat liber, corpul începe să oscileze armonic. Calculați: a) constanta de elasticitate k a resortului; b) frecvența ν a oscilațiilor; c) viteza maximă v_M atinsă de corp; d) ecuația de mișcare dacă la momentul inițial corpul este în poziția de echilibru.

Aplicație: $m = 250 \text{ g}$; $F = 100 \text{ N}$; $x_0 = 10 \text{ mm}$.

R: $k = 400 \text{ N/m}$; $\nu = 31,85 \text{ Hz}$; $v_M = 2 \text{ m/s}$; $x(t) = 0,01 \cdot \sin(200t) \text{ m}$.

Problema 1.4. Un corp de masă m , legat de un resort ideal, oscilează armonic cu amplitudinea A , energia totală a oscilatorului fiind E . Calculați: a) pulsația ω a mișcării oscilatorii; b) elongația x și viteza v ale corpului în momentele în care energia sa cinetică este egală cu cea potențială; c) forța elastică F datorată resortului în condițiile de la punctul (b).

Aplicație: $m = 1 \text{ kg}$; $A = \sqrt{2}/4 \text{ m}$; $E = 4 \text{ J}$.

R: $\omega = 8 \text{ rad/s}$; $x = 0,25 \text{ m}$; $v = 2 \text{ m/s}$; $F = 16 \text{ N}$.

Problema 1.5. Un corp de masă m execută oscilații armonice de amplitudine A . Corpul trece prin poziția de echilibru cu viteza v_0 . Calculați: a) ecuația de mișcare; b) elongațiile y_1 la momentul $t_1 = 7T/6$ și y_2 la momentul în care viteza oscilatorului este un sfert din v_0 ; c) perioada T a oscilațiilor; d) valoarea maximă F_M a forței elastice.

Aplicație: $m = 25 \text{ g}$; $A = 0,12 \text{ m}$; $v = 9,6 \text{ m/s}$. **R:** $y(t) = 0,12 \cdot \sin(80t) \text{ m}$; $y_1 = 0,104 \text{ m}$; $y_2 = 0,116 \text{ m}$; $T = 0,08 \text{ s}$; $F_M = 19,2 \text{ N}$.

Problema 1.6. De capătul liber al unui resort ideal de constantă de elasticitate k , suspendat vertical, se atârna un corp de masă m și se lasă sistemul liber. Calculați: a) lungimea L a pendulului matematic care are perioada egală cu cea a oscilatorului cu resort; b) ecuația de mișcare a oscilatorului; c) ecuația vitezei oscilatorului; d) ecuația accelerației oscilatorului.

Aplicație: $k = 100 \text{ N/m}$; $m = 1 \text{ kg}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$. **R:** $L = 0,1 \text{ m}$; $x(t) = 0,1 \cdot \sin(10t) \text{ m}$; $v(t) = \cos(10t) \text{ m/s}$; $a(t) = -10 \cdot \sin(10t) \text{ m/s}^2$.

Problema 1.7. Un mobil efectuează o mișcare oscilatorie armonică. Atunci când valoarea elongației este $x_1 = 2 \text{ cm}$, valoarea

vitezei este $v_1 = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, iar când $x_2 = 3 \text{ cm}$, viteza devine $v_2 = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Calculați: a) amplitudinea oscilației; b) perioada de oscilație; c) frecvența oscilației.

R: $4,08 \text{ cm}$; $0,46 \text{ s}$; 37 cm .

Problema 1.8. Un corp suspendat de un resort ideal oscilează pe verticală cu perioada T_1 . Același corp suspendat de un alt resort ideal oscilează pe verticală cu perioada T_2 . Calculați cu ce perioadă T va oscila corpul dacă este suspendat de cele două resorturi legate în serie.

Aplicație: $T_1 = 0,3 \text{ s}$; $T_2 = 0,4 \text{ s}$.

R: $T = 0,5 \text{ s}$.

Problema 1.9. Un pendul gravitațional de lungime L se fixează pe un cadru atașat de un cărucior. Calculați perioada T a pendulului când căruciorul se mișcă: a) orizontal, cu accelerația a ; b) vertical, cu accelerația a ; c) cu viteza constantă v , pe un cerc orizontal de rază R . Amplitudinea unghiulară inițială este $\leq 5^\circ$.

Aplicație: $L = 56 \text{ cm}$; $a = 10 \text{ m/s}^2$; $v = 10 \text{ m/s}$; $R = 10 \text{ m}$.

R: $T_a = 1,256 \text{ s}$; $T_{b1} = 1,055 \text{ s}$; $T_{b2} = 10,51 \text{ s}$; $T_c = 1,256 \text{ s}$.

Problema 1.10. Într-un mediu elastic de modul de elasticitate E și densitate ρ se propagă oscilații longitudinale cu frecvența ν . Calculați: a) viteza v de propagare în acest mediu; b) lungimea de undă λ ; c) distanța Δx între două puncte între care diferența de fază este $\Delta\varphi$.

Aplicație: $E = 4,32 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$; $\nu = 500 \text{ Hz}$; $\Delta\varphi = \pi \text{ rad}$.

R: $v = 4 \text{ km/s}$; $\lambda = 8 \text{ m}$; $\Delta x = 4 \text{ m}$.

Problema 1.11. Într-un mediu elastic de modul de elasticitate E se propagă o undă longitudinală a cărei ecuație la distanța d de sursă este $y = A \cdot \sin(\omega t - \varphi)$. Calculați: a) frecvența ν și lungimea de undă λ ; b) densitatea ρ a mediului; c) distanța d_1 față de sursă la care ecuația undei este $y = A \cdot \sin(\omega t - \varphi_1)$.

Aplicație: $E = 6,75 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; $d = 5 \text{ m}$; $A = 2 \text{ mm}$; $\omega = 10^3 \pi \text{ rad/s}$; $\varphi = \pi \text{ rad}$; $\varphi_1 = \pi/5 \text{ rad}$.

R: $\nu = 500 \text{ Hz}$; $\lambda = 10 \text{ m}$; $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$; $d_1 = 1 \text{ m}$.

Problema 1.12. O coardă orizontală SB de lungime L este fixată la capătul B . Capătul S oscilează transversal, cu amplitudinea a și cu frecvența ν . Viteza de propagare a undei în lungul corzii este c . Calculați: a) lungimea de undă λ a undei care se propagă în lungul corzii; b) ecuația de oscilație a unui punct P , $PB = d$.

Aplicație: $L = 9 \text{ m}$; $a = 5 \text{ cm}$; $\nu = 10 \text{ Hz}$; $c = 4,5 \text{ m/s}$; $d = 93,75 \text{ cm}$.

R: $\lambda = 0,45 \text{ m}$; $y_P = 5 \cdot 10^{-2} \cdot \cos 20\pi(t - 2) \text{ m}$.

Test de evaluare

1

1. Care este condiția ca o mișcare oscilatorie să fie armonică?
a) corpul să se miște periodic de o parte și de alta a poziției de echilibru; **b)** $F = \text{constant}$; **c)** perioada mișcării să fie constantă; **d)** forța să fie de tip elastic; **e)** nici un răspuns nu este corect.

2. Un corp efectuează o mișcare oscilatorie armonică cu amplitudinea de 0,15 m, executând 120 de oscilații pe minut. La momentul inițial viteza corpului este $0,3\pi$ m/s. Faza inițială este:

a) $\varphi = 0$; **b)** $\varphi = \pi/4$; **c)** $\varphi = \pi/3$; **d)** $\varphi = \pi/2$; **e)** $\varphi = \pi$.

3. Perioada oscilatorului armonic liniar este dată de relația:

a) $T = 2\pi\sqrt{\frac{k}{m}}$; **b)** $4\sqrt{2}$; **c)** $T = 2\pi\sqrt{k \cdot m}$;

d) $T = \pi\sqrt{\frac{k}{m}}$; **e)** $T = \pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

4. Ecuația mișcării oscilatorii a unui punct material este $y = 2 \cdot \sin(4t + \pi/2)$ (m). Viteza lui maximă are valoarea:

a) 2 m/s; **b)** 8 m/s; **c)** 4 m/s; **d)** 6 m/s; **e)** 10 m/s.

5. Un punct material efectuează o mișcare oscilatorie, astfel încât, la $t_0 = 0$, trece prin poziția de echilibru $x = 0$. Frațiunea din perioada T a mișcării oscilatorii după care viteza corpului este jumătate din viteza maximă este:

a) $T/8$; **b)** $T/6$; **c)** $T/4$; **d)** $T/3$; **e)** $T/2$.

6. Referitor la mișcarea oscilatorie armonică una dintre afirmații este falsă:

a) amplitudinea mișcării rămâne constantă; **b)** energia totală a oscilatorului liniar armonic este constantă în timp; **c)** perioada de oscilație depinde numai de masa corpului și de constanta elastică; **d)** energia cinetică depinde de timp; **e)** relația poziție-viteză este dată de $v = \pm \omega \cdot \sqrt{A^2 - y^2}$.

7. Un punct material efectuează o mișcare oscilatorie armonică. Cunoscând valoarea vitezei maxime $v_{\max} = m$ și a accelerației maxime $a_{\max} = n$, amplitudinea mișcării este:

a) m/n^2 ; **b)** $m \cdot n$; **c)** m^2/n ; **d)** m^2/n^2 ; **e)** m/n .

8. Un corp de masă $m = 2$ kg, legat de un resort elastic, efectuează o mișcare oscilatorie armonică, a cărei amplitudine este $A = 25$ cm. Dacă energia totală a oscilatorului este 4 J, atunci pulsația mișcării va fi:

a) 4 rad/s; **b)** 6 rad/s; **c)** 8 rad/s;

d) $4\sqrt{2}$ rad/s; **e)** 4π rad/s.

9. Un oscilator armonic liniar având masa 0,1 kg are în cursul mișcării viteza maximă 0,1 m/s și accelerația maximă 2 m/s². Constanta forțelor elastice este:

a) 0,1 N/m; **b)** 0,4 N/m; **c)** 20 N/m;

d) 40 N/m; **e)** 100 N/m.

10. Un punct material oscilează armonic, liniar, având amplitudinea A . Elongația mișcării punctului material în momentul în care energia sa cinetică este egală cu cea potențială, este:

a) $y = A\sqrt{2}$; **b)** $y = A/2$; **c)** $y = A\sqrt{2}/4$;

d) $y = A\sqrt{2}/2$; **e)** $y = 0$.

11. Un corp execută o mișcare oscilatorie armonică. Pentru a îndepărta corpul din poziția de repaus până la elongația maximă se cheltuiește un lucru mecanic $L = 0,5$ J. Forța elastică care acționează asupra corpului în acest punct este $F = 2,5$ N. Amplitudinea mișcării oscilatorii este:

a) 0,25 m; **b)** 0,30 m; **c)** 0,35 m;

d) 0,40 m; **e)** 0,50 m.

12. Perioada de oscilație a unui pendul gravitațional are expresia:

a) $T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{l}{g}}$; **b)** $T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{g}}$; **c)** $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$;

d) $T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{l}{mg}}$; **e)** $T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$.

13. Ecuația unei plane este:

a) $y = A^2 \sin(\omega t + \varphi)$; **b)** $y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$;

c) $y = A \sin \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$; **d)** $y = A^2 \cos \left(\omega t + \frac{x}{\lambda} \right)$;

e) $y = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

14. Între diferența de fază $\Delta\varphi$ și diferența de drum Δx există relația:

a) $\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \Delta x$; **b)** $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x$; **c)** $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2\lambda} \cdot \Delta x$;

d) $\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta x$; **e)** $\Delta\varphi = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \Delta x$.

15. Frecvențele proprii de oscilație pentru o coardă fixată la ambele capete sunt date de relația:

a) $v_n = \frac{n}{L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$; **b)** $v_n = \frac{2n}{L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$; **c)** $v_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$;

$$d) v_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}; \quad e) v_n = \frac{2n}{L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

16. Valoarea pulsației unui pendul elastic care efectuează 20 de oscilații complete în 5 secunde este:

a. 2π rad/s; b. 8π rad/s; c. 8 rad/s; d. 0,25 rad/s.

17. Ecuația de mișcare a unui oscilator elastic este:

$$y = 10 \sin\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{m}). \text{ Valoarea frecvenței de oscilație}$$

este: a. $\frac{1}{8}$ Hz; b. 8 Hz; c. $\frac{1}{4}$ Hz; d. 2 Hz.

18. Faza inițială a oscilatorului este:

a. $\frac{\pi}{2}$ rad; b. $-\frac{\pi}{2}$ rad; c. $\frac{1}{2}$ rad; d. -2 rad.

19. Viteza maximă a oscilatorului valorează:

a. $2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; b. $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; c. $2,5\pi \frac{\text{m}}{\text{s}}$; d. $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

20. Accelerația maximă a oscilatorului valorează:

a. $0,625 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; b. $61,25 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; c. $6,25 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; d. $6,125 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

21. Dacă masa oscilatorului este de 1 kg, energia lui totală

valorează:

a. 6,125 J; b. 61,25 J; c. 625 J; d. 62,25 J.

22. Ecuația de mișcare a unui oscilator defazat cu 2 s înaintea oscilatorului care are ecuația din problema 17 este:

$$a. y = 10 \sin\left(\frac{\pi}{4}t + \pi\right) \quad (\text{m});$$

$$b. y = 10 \sin\frac{\pi}{4}t \quad (\text{m});$$

$$c. y = 10 \sin\left(\frac{\pi}{4}t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{m});$$

$$d. y = 10 \sin\left(\frac{\pi}{4}t - 2\pi\right) \quad (\text{m});$$

23. O locomotivă produce un sunet cu frecvența de 680 Hz. Dacă viteza de propagare a sunetului în aer este 340 m/s, atunci lungimea de undă a acestui sunet este de:

a. 0,5 m; b. 1 m; c. 2 m; d. 5 m.

24. Pendulul gravitațional care bate secunda se află într-un lift care urcă cu accelerația $a = g$, apoi coboară tot cu accelerația $a = g$. Raportul perioadelor lui de oscilație este:

a. ∞ ; b. 2; c. 0; d. 1.

25. O coardă vibrantă cu secțiunea de 2 mm^2 și modulul de elasticitate 10^{11} N/m^2 , poate oscila sub acțiunea unei tensiuni în fir de 80 N. În aceeași coardă s-ar putea propaga unde longitudinale. Raportul vitezelor de propagare ale undelor transversale, respectiv longitudinale, în această coardă, au valoarea de:

a. 0,2; b. 0,1; c. 0,01; d. 0,02.

Sinteză capitolul 1

Se numește **mișcare oscilatorie** acea mișcare periodică a unui sistem fizic care se efectuează pe aceeași traiectorie, de o parte și de alta a poziției sale de echilibru.

Se numește **perioadă** a mișcării oscilatorii mărimea fizică notată T definită de relația:

$$T = \frac{\Delta t}{N}, \quad [T]_{\text{SI}} = 1 \text{ s},$$

și care măsoară timpul necesar efectuării unei oscilații complete.

Se numește **frecvență** a mișcării oscilatorii mărimea fizică scalară ν definită de relația:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t}, \quad [\nu]_{\text{SI}} = \text{s}^{-1} = 1 \text{ Hz},$$

și care măsoară numărul de oscilații efectuate în unitatea de timp.

Se numește **mișcare oscilatorie neamortizată** acea mișcare oscilatorie în care amplitudinea *nu se schimbă* de la o oscilație la alta.

Se numește **oscilator liniar armonic** un punct material care se mișcă rectiliniu sub acțiunea unei forțe de forma $F = -k \cdot y$ (sau $F = -k \cdot x$).

Perioada oscilatorului armonic liniar este dată de relația:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Perioada de oscilație a pendulului gravitațional expresia

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}},$$

Legea de mișcare a oscilatorului liniar armonic este:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Legea vitezei oscilatorului liniar armonic este:

$$v(t) = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Legea accelerației este:

$$a(t) = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Energia oscilatorului armonic liniar este dată de relația:

$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \cos^2 \omega t + \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \sin^2 \omega t$$

Se numește **rezonanță** procesul selectiv de transfer *maxim* de energie între două sisteme fizice.

Fenomenul de propagare, din aproape în aproape, a unui fenomen variabil în timp se numește **undă**.

Se numește **undă transversală** acea undă la care direcția de oscilație a particulelor din mediu este perpendiculară pe direcția de propagare a undei.

Se numește **undă longitudinală** acea undă la care direcția de oscilație a particulelor din mediu este paralelă cu direcția de propagare a undei.

Se numesc **puncte de fază egală** punctele din mediul de propagare a undei care oscilează în fază (au permanent vectorii de oscilație egali în mărime și cu aceeași tendință de variație – creștere sau scădere).

Distanța dintre două puncte de fază egală vecine, succesive pe direcția de propagare, se numește **lungime de undă** și se notează cu λ .

Viteza de propagare, v_t , a unei unde transversale într-o coardă este dată de relația:

$$v_t = \sqrt{\frac{T_m}{\mu}}$$

În cazul undelor longitudinale viteza de propagare este dată de relația:

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Ecuația unei plane este dată de relația:

$$y(x, t) = A \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{v_f} \right).$$

Principiul lui Huygens: Orice punct de pe frontul de undă poate fi considerat ca sursa unor unde sferice secundare (elementare). Înfășurătoarea tuturor undelor elementare constituie noul front de undă.

Se numește **reflexie** fenomenul de întoarcere a undei în mediul din care provine atunci când întâlnește suprafața de separație cu un alt mediu.

Se numește **refracție** fenomenul de schimbare a direcției de propagare a unei unde când traversează suprafața de separație a două medii diferite.

Se numesc **unde coerente** două sau mai multe unde care au aceeași pulsație și diferență de fază constantă.

Se numește **interferență** fenomenul de superpoziție a două sau mai multe unde coerente.

Se numesc **franje de interferență** curbele care unesc între ele punctele de maximă amplitudine, respectiv, minimă amplitudine.

Frecvențe proprii ale unei coarde fixate la ambele capete sunt date de relația:

$$v_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Se numește **intensitate** I a undei mărimea fizică scalară definită de relația:

$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S}$$

Se numește **nivel de intensitate sonoră** mărimea fizică adimensională L definită de relația:

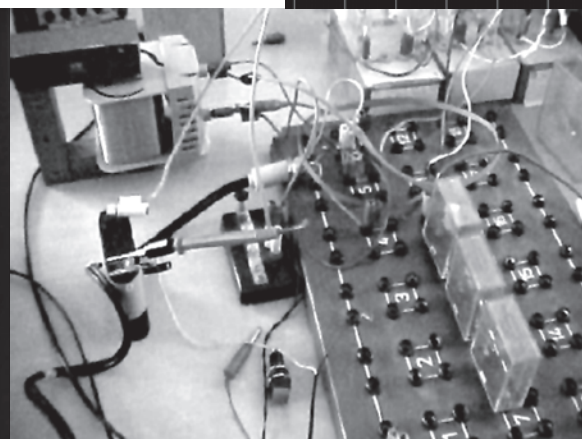
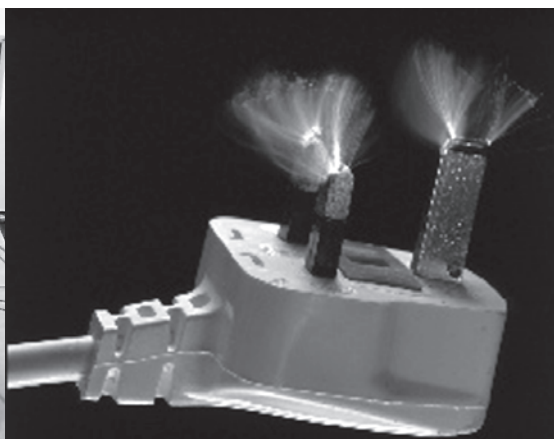
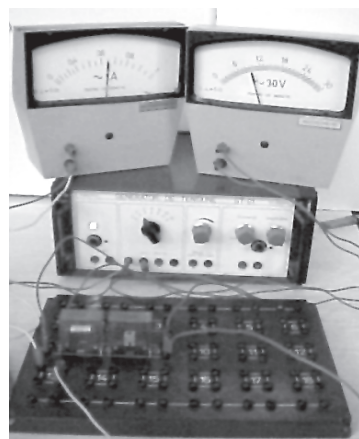
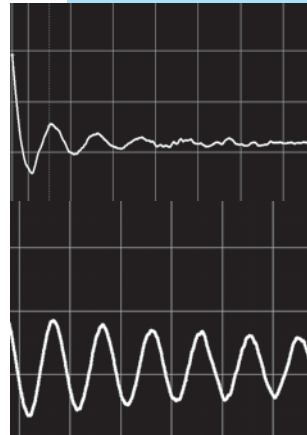
$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}$$

Capitolul 2

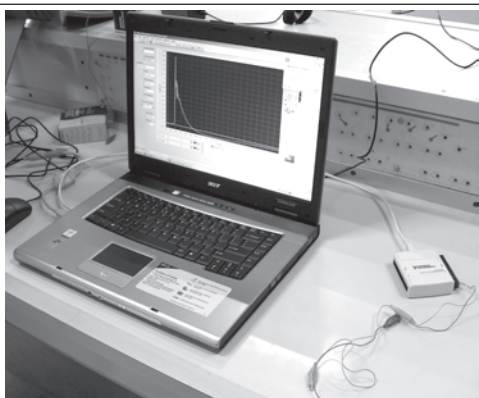
Oscilații și unde electromagnetice

În acest capitol veți studia:

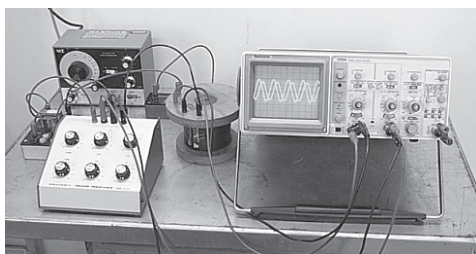
- 2.1. Circuitul RLC în curent alternativ
- 2.2. Oscilații electromagnetice libere. Circuitul oscilant
- 2.3. Câmpul electromagnetic. Unda electromagnetică
- 2.4. Clasificarea undelor electromagnetice
- 2.5. Aplicații



2.1. Circuitul RLC în curent alternativ



● Fig. 2.1.1 – Sistem computerizat pentru achiziție de semnale



● Fig. 2.1.2 – Sistem cu osciloscop pentru vizualizare de semnale

După cum anticipează titlul, circuitele de tipul RLC conțin rezistor, bobina și condensator, conectate în serie sau în paralel și alimentate de la un generator de curent alternativ. De regulă, orice conductor este caracterizat de o rezistență electrică, o inductanță și o capacitate, mărimi influențate de temperatura la care ele funcționează.

Pentru a studia comportamentul acestor elemente de circuit, în curent alternativ, vom utiliza inițial sistemul computerizat de achiziție de semnale reale, din figura 2.1.1, pe care l-am descris în capitolul 1. De data aceasta nu mai sunt necesari senzori, placa de achiziție primind direct tensiunile aplicate elementelor de circuit. Sistemul permite achiziția simultană pe mai multe canale, motiv pentru care veți vizualiza în continuare curentul și tensiunea pe diferite elemente de circuit.

Dacă în laboratorul școlii voastre există un osciloscop cu dublu spot (figura 2.1.2) îl puteți utiliza în locul computerului echipat cu placa de achiziție. Dacă nu, interpretați imaginile prezentate în manual!

În considerațiile ulterioare asupra circuitelor RLC în curent alternativ, vom utiliza elemente ideale: rezistorul va avea numai rezistență electrică R , condensatorul va avea doar capacitatea electrică C , iar bobina va fi caracterizată doar de inductanța L .

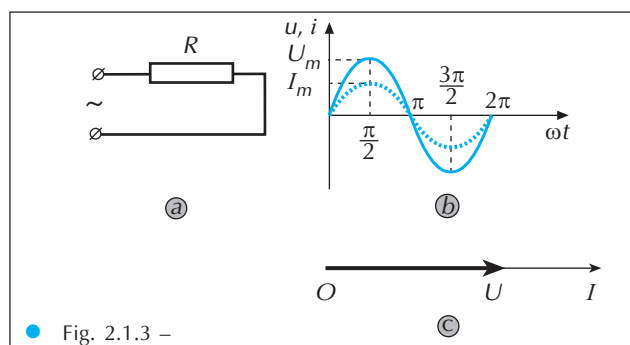
Definiție: Se numesc **circuite de curent alternativ** circuitele electrice alimentate cu tensiuni electromotoare alternative.

Circuitele care nu conțin bobine sau condensatoare opun curenților alternativi (de frecvență joasă) practic aceeași rezistență ca și curentului continuu.

Rezistorul în curent alternativ

Considerăm un circuit de curent alternativ cu un rezistor de rezistență R (figura 2.1.3-a) la bornele căruia se aplică tensiunea alternativă $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$.

Căderea de tensiune pe circuit va fi: $u = R \cdot i$.



● Fig. 2.1.3 –

Pentru valori efective, legea lui Ohm se scrie în forma $U = R \cdot I$.

La bornele rezistenței tensiunea și intensitatea curentului alternativ trec simultan prin valorile nule și maxime, și deci sunt în fază (fig 2.1.3-b). În figura 2.1.3-c este dată reprezentarea fazorială.

Observație: Faptul că în figura 2.1.3-b curba care reprezintă tensiunea are o amplitudine mai mare nu are nici o semnificație, deoarece scala verticală pentru u și i este aleasă în mod arbitrar.



Investigarea experimentală a comportamentului rezistorului în curent alternativ

Pentru investigarea modului în care se comportă rezistorul în curent alternativ, din punctul de vedere al defazării curentului față de tensiunea aplicată s-a utilizat un rezistor cu valoarea rezistenței electrice $R=200\Omega$, care a fost alimentat de la o sursă de curent alternativ cu tensiunea de 8V. Utilizând placa de achiziție de semnal pentru a culege și vizualiza tensiunea aplicată rezistorului u și curentul stabilit prin el, i , s-au obținut reprezentările grafice din figura 2.1.4.

Observați semnalele înregistrate!

Concluzie: Rezistorul nu produce defazaj între curentul stabilit prin el și tensiunea aplicată.

Condensatorul în curent alternativ

Considerăm apoi un circuit care conține un condensator ideal (având R și L neglijabile), de capacitate C (figura 2.1.5-a).

Observație: Dacă la bornele circuitului se aplică o tensiune continuă curentul nu circulă, circuitul fiind întrerupt de dielectricul dintre armăturile condensatorului. În acest caz se afirmă: *condensatorul deschide circuitul de curent continuu*.

Când se aplică la bornele circuitului o tensiune alternativă curentul circulă prin circuit. În acest caz se afirmă: *condensatorul închide circuitul de curent alternativ*.

Explicația acestei situații este următoarea: când tensiunea aplicată la bornele circuitului crește spre valoarea maximă, condensatorul se încarcă (pe armăturile sale se acumulează sarcini electrice), iar când tensiunea scade condensatorul se descarcă și contribuie astfel la întreținerea curentului în circuit.

Să considerăm că la bornele circuitului se aplică tensiunea alternativă:

$$u(t) = U_m \cdot \sin \omega t.$$

Observație: În continuare, acolo unde va fi necesar, vom utiliza o regulă pentru calculul mărimilor de interes.

Intensitatea curentului electric este definită de relația $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, pentru Δt foarte mic, adică I este limita spre

care tinde valoarea raportului $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ atunci când intervalul de timp tinde la zero fără să atingă valoarea zero. Această regulă se bazează pe operația matematică denumită derivarea funcțiilor.

Aceasta înseamnă, de fapt, că intensitatea curentului este egală cu derivata sarcinii în raport cu timpul:

$$I = Q'(t).$$

Dacă $q(t) = C \cdot u(t) = C U_m \sin \omega t$, atunci regulile de derivare a funcțiilor (pe care le veți demonstra la matematică) permit calculul lui $i(t)$ cu relația: $i(t) = q'(t) = C \cdot u'(t) = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos \omega t$,

unde s-a folosit relația de definiție a capacității unui condensator: $q = C \cdot u$. Expresia obținută poate fi rescrisă în forma:

$$i(t) = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

unde intensitatea maximă I_m este dată de relația:

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_m.$$

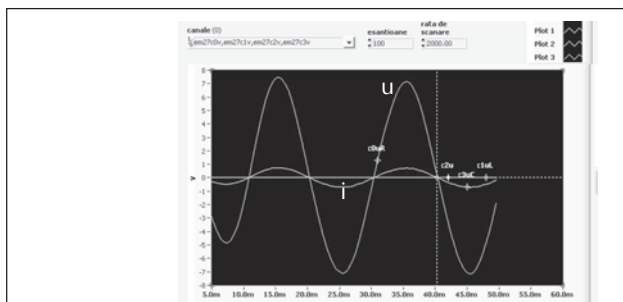


Fig. 2.1.4 – Rezistorul nu defazează curentul față de tensiunea aplicată

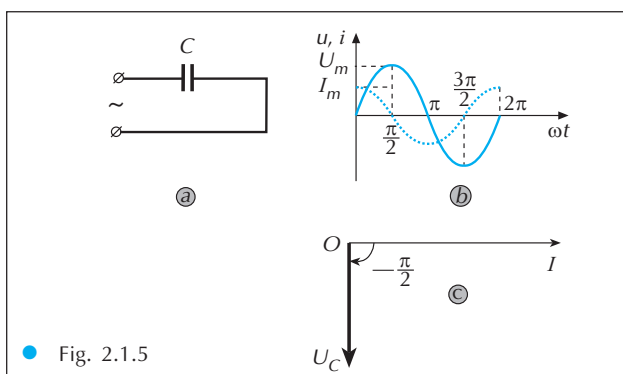


Fig. 2.1.5

Comparând expresia obținută pentru $i(t)$ cu expresia tensiunii aplicate $u(t)$ se constată că într-un circuit de curent alternativ în care este prezent un condensator ideal, intensitatea este în avans de fază cu $\pi/2$ față de tensiune (figura 2.1.5-b,c), sau, echivalent, faza tensiunii este în urmă cu $\pi/2$ față de faza intensității.

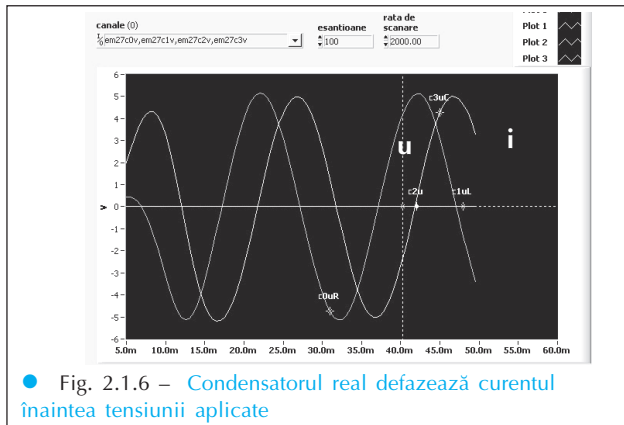
Comparând apoi relația precedentă cu legea lui Ohm, $I_m = U_m/R$, se constată că prezența condensatorului în circuitul de curent alternativ introduce o rezistență aparentă, notată X_C , numită **reactanță capacitivă**, dată de relația

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad [X_C]_{SI} = 1 \, \Omega$$



Investigarea experimentală a comportamentului condensatorului în curent alternativ

2



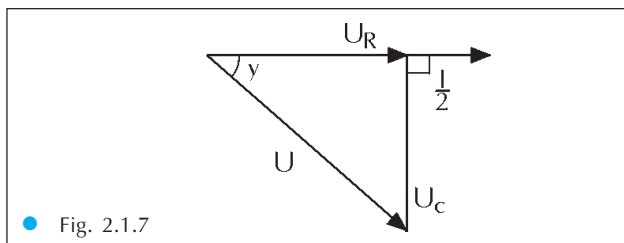
Pentru investigarea modului în care condensatorul real defazează curentul față de tensiunea aplicată s-au utilizat un rezistor cu valoarea rezistenței electrice $R=200\Omega$ și un condensator cu capacitatea $C=122\mu F$, au fost înseriate și alimentate de la o sursă de curent alternativ cu tensiunea de 8 V. Semnalul care reprezintă intensitatea se va obține culegând tensiunea la bornele rezistorului înseriat cu condensatorul și efectuând raportul dintre aceste tensiune și valoarea rezistenței electrice. Semnalele înregistrate de placa de achiziție pentru tensiunea aplicată, u și curentul stabilit prin circuit, i , arată ca în imaginea din figura 2.1.6.

Observații:

- 1) Din relația $X_C = U_m/I_m$ rezultă că $[X_C]_{SI} = \Omega$.
- 2) Condensatorul preia energie din circuit (când tensiunea la bornele lui crește), o transformă în energie a câmpului electric dintre armăturile condensatorului și, la descărcarea sa (când tensiunea la bornele lui scade), o cedează înapoi circuitului electric. În condensator nu se degajă căldură prin efect Joule, deci nu se pierde energie.

Concluzii:

- 1) condensatorul încheie circuitul de curent alternativ;
- 2) într-un circuit de curent alternativ în care este prezent un condensator ideal, intensitatea este în avans de fază cu $\pi/2$ față de tensiune;
- 3) prezența condensatorului în circuitul de curent alternativ introduce o rezistență aparentă, $X_C = 1/\omega \cdot C$, numită **reactanță capacitivă**.



4) Atunci când în circuitul de curent alternativ care conține un condensator, valoarea rezistenței electrice înserate este diferită de 0 (cazul întâlnit în situațiile practice), intensitatea curentului stabilit este în avans de fază față de tensiunea aplicată circuitului cu un

$$\text{unghi } \phi < \frac{\pi}{2}$$

5) În acest caz diagrama fazorială arată ca în figura 2.1.7.

Bobina în curent alternativ

Considerăm, în final, un circuit care conține o bobină ideală (având R și C neglijabile), de inductanță L (figura 2.1.8).

Când se aplică la bornele circuitului o tensiune alternativă circuitul este parcurs de un curent:

$$i(t) = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Acest curent generează un câmp magnetic variabil și deci în bobină se generează, prin autoinducție, o

tensiune electromotoare: $e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Aplicând regula de derivare pentru calculul raportului $\Delta I/\Delta t$ când intervalul de timp tinde la zero fără să atingă valoarea zero, se obține: $e(t) = -L \cdot i'(t) = -\omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos \omega t$.

Deoarece bobina este ideală ($R = 0$), în bobină nu se produce nici o cădere de tensiune și deci tensiunea electromotoare indusă este egală și opusă tensiunii $u(t)$ aplicate la bornele circuitului, $u(t) = -e(t)$, adică:

$$u(t) = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos \omega t.$$

Expresia obținută poate fi rescrisă în forma: $u(t) = U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$,

unde tensiunea maximă U_m este dată de relația: $U_m = \omega \cdot L \cdot I_m$.

Comparând expresia obținută pentru $u(t)$ cu expresia intensității $i(t)$ se constată că într-un circuit de curent alternativ în care este prezentă o bobină ideală, tensiunea este în avans de fază cu $\pi/2$ față de intensitate (figura 2.1.8-b, c).

Comparând apoi relația precedentă cu legea lui Ohm, $U_m = R \cdot I_m$, se constată că prezența bobinei în circuitul de curent alternativ introduce o rezistență aparentă, notată X_L , numită **reactanță inductivă**, dată de relația: $X_L = \omega \cdot L$.

Observații.

- 1) Din relația $X_L = U_m/I_m$ rezultă că $[X_L]_{SI} = \Omega$.
- 2) Bobina preia energie din circuit (când intensitatea curentului crește), o transformă în energie a câmpului magnetic din interiorul său și, o cedează înapoi circuitului electric când intensitatea curentului prin ea scade. În bobina ideală nu se degajă energie prin efect Joule, deci nu se pierde energie.



Investigarea experimentală a comportamentului bobinei în curent alternativ

Pentru investigarea modului în care bobina reală defazează curentul față de tensiunea aplicată s-au utilizat un rezistor cu valoarea rezistenței electrice $R=200\Omega$ și o bobină cu inductanța $L=35\text{mH}$, au fost înseriate și alimentate de la o sursă de curent alternativ cu tensiunea de 8V. Utilizând placa de achiziție de semnal pentru a culege și vizualiza tensiunea aplicată bobinei, u și curentul stabilit prin circuit, i , s-au obținut reprezentările grafice din figura 2.1.9.

Concluzii:

- 1) într-un circuit de curent alternativ în care este prezentă o bobină ideală, tensiunea este în avans de fază cu $\pi/2$ față de intensitate;
- 2) prezența bobinei în circuitul de curent alternativ introduce o rezistență aparentă, $X_L = \omega \cdot L$, numită **reactanță inductivă**.

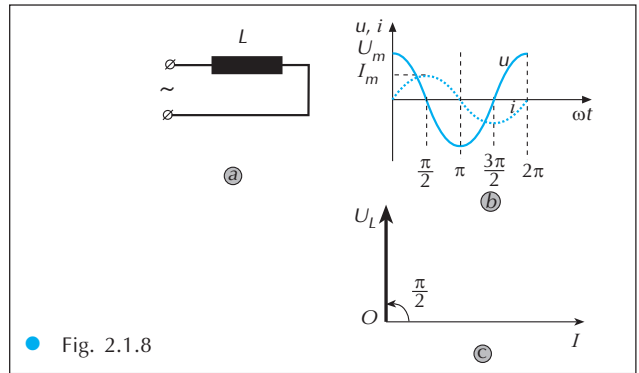


Fig. 2.1.8

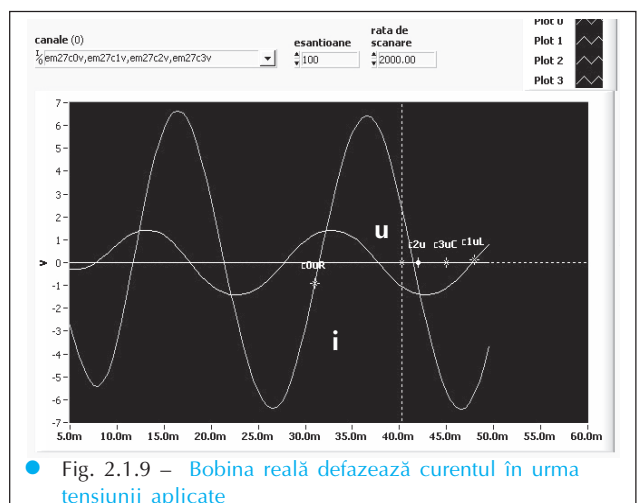


Fig. 2.1.9 – Bobina reală defazează curentul în urma tensiunii aplicate

3) Atunci când în circuitul de curent alternativ care conține o bobină, valoarea rezistenței electrice este diferită de 0 (orice bobină reală are rezistență electrică nenulă), intensitatea curentului stabilit este defazată în urma

tensiunii aplicate bobinei cu un unghi $\phi < \frac{\pi}{2}$

4) În acest caz diagrama fazorială arată ca în figura 2.1.10.

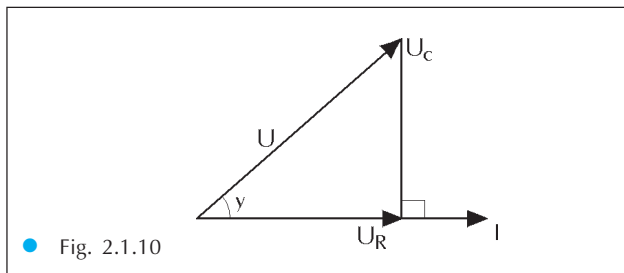


Fig. 2.1.10

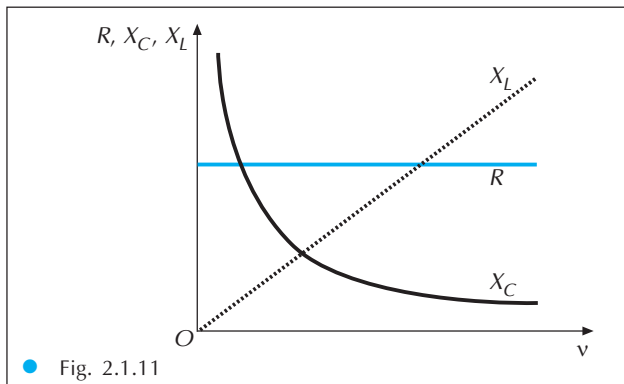


Fig. 2.1.11

În figura 2.1.11 s-a reprezentat grafic dependența de frecvență a rezistenței și, respectiv, a reactanțelor capacitive și inductive. Se observă că:

a) atunci când frecvența crește, reactanța capacitivă tinde la zero, iar cea inductivă tinde la infinit;

b) atunci când frecvența tinde la zero (caz limită: curentul continuu) reactanța inductivă tinde la zero, iar cea capacitivă tinde la infinit (condensatorul tinde să deschidă circuitul).

Observații.

1) Dintre cele 3 elemente de circuit considerate, rezistorul ideal, condensatorul ideal, bobina ideală, singurul care disipă energie prin efect Joule este rezistorul ideal. De aceea rezistența sa este numită **rezistență activă**. Ea este singurul element disipativ de energie.

2



Experiment virtual: la adresa: http://www.walter-fendt.de/ph14ro/accircuit_ro.htm puteți investiga în mediu virtual comportamentul rezistorului, al bobinei și al condensatorului în curent alternativ.

Circuitul RLC serie

Considerăm un circuit format dintr-un rezistor de rezistență R , o bobină ideală de inductanță L și un condensator ideal de capacitate C , legate în serie. La bornele circuitului se aplică o tensiune alternativă (fig 2.1.12-a).

În circuit se stabilește un curent de intensitate efectivă I . Conform celor studiate în secțiunea precedentă,

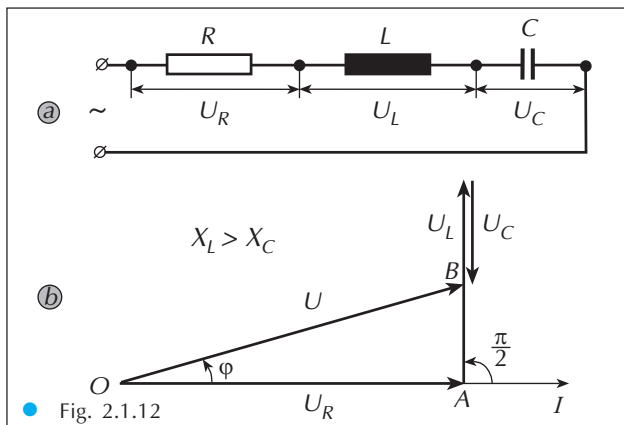


Fig. 2.1.12

a) la bornele rezistorului apare o cădere de tensiune $U_R = I \cdot R$ în fază cu intensitatea I ,

b) la bornele bobinei apare o cădere de tensiune $U_L = I \cdot X_L$ defazată cu $\pi/2$ înaintea intensității I ,

c) la bornele condensatorului apare o cădere de tensiune $U_C = I \cdot X_C$ defazată cu $\pi/2$ în urma intensității I .

(*) Modelarea circuitului RLC serie de curent alternativ utilizând formalismul fazorial

După cum se poate observa în diagrama fazorială din figura 2.1.12-b tensiunea U la bornele circuitului este suma vectorială a căderilor de tensiune pe rezistor, pe bobină și pe condensator. Din triunghiul dreptunghic

OAB, numit **triunghiul tensiunilor**, folosind teorema lui Pitagora obținem:

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2,$$

de unde, folosind expresiile tensiunilor la bornele rezistorului, condensatorului și bobinei, vom defini o mărime caracteristică circuitelor de curent alternativ.

Definiție: Se numește **impedanță** unui circuit, mărimea fizică definită prin relația:

$$Z = \frac{U}{I}$$

Observații:

- 1) Din structura relației de definiție rezultă că $[Z]_{SI} = 1 \, \Omega$.
- 2) Comparând relațiile anterioare, pentru circuitul RLC serie, se obține expresia impedanței:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

- 3) Tot din ultimele două relații rezultă că:

$$U = I \cdot Z, \quad U = I \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

relație care exprimă legea lui Ohm pentru circuitele de curent alternativ.

Tot din triunghiul tensiunilor se poate calcula defazajul φ al tensiunii U la borne față de intensitatea I :

$$\operatorname{tg} \varphi \equiv \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

În cazul reprezentat în figura 2.1.12-b, $U_L > U_C$ și deci $X_L > X_C$. Efectul inductiv este predominant în comparație cu cel capacitiv și, conform relației precedente, $\operatorname{tg} \varphi > 0$, deci defazajul φ este pozitiv.

Deci: *dacă intensitatea curentului prin circuit este $i(t) = I_m \cdot \sin \omega t$ atunci tensiunea la bornele circuitului este:*

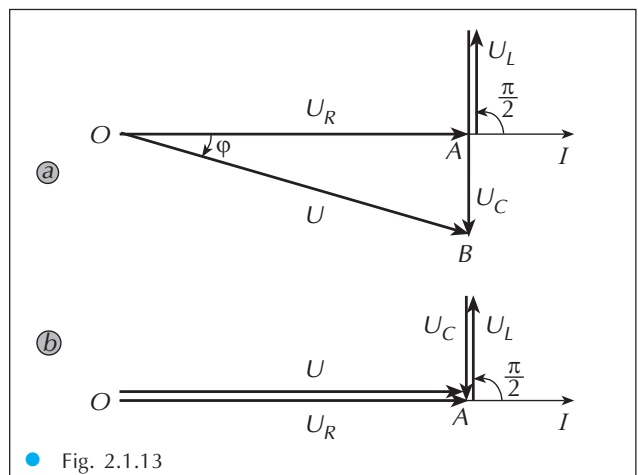
$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

În figura 2.1.12-b s-a construit triunghiul tensiunilor pentru cazul $U_L > U_C$. Este posibil însă ca $U_L < U_C$ sau, ca $U_L = U_C$. În aceste două cazuri construcția fazorială a triunghiului tensiunilor este ilustrată în figura 2.1.13-a și, respectiv, 2.1.13-b.

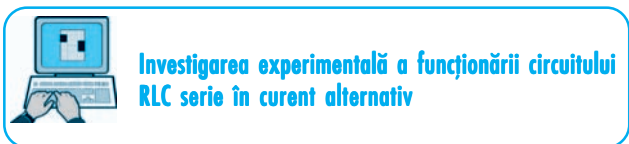
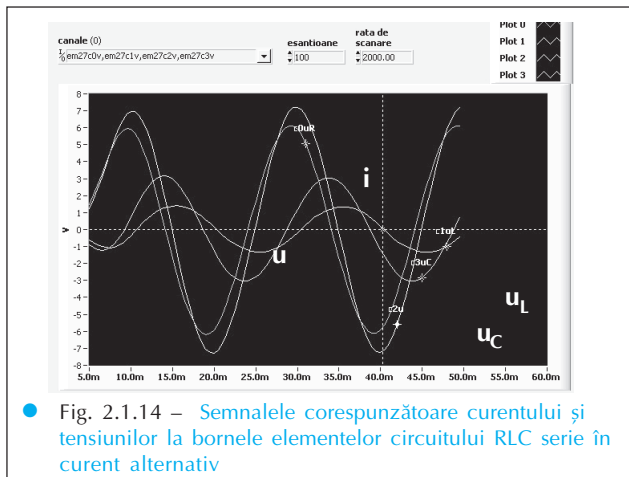
În primul caz (figura 2.1.13-a), $U_L < U_C$ și deci $X_L < X_C$. Efectul capacitiv este predominant în comparație cu cel inductiv, $\operatorname{tg} \varphi < 0$, deci defazajul φ este *negativ*.

În cazul al doilea (figura 2.1.13-b), $U_L = U_C$ și deci $X_L = X_C$. Efectul capacitiv se compensează cu cel inductiv, $\operatorname{tg} \varphi = 0$, deci defazajul φ este *nul*. Acest caz este numit **rezonanța tensiunilor** în circuitul serie și va fi studiat în secțiunea următoare.

Elementele de circuit *reale* au un comportament electric complex. De exemplu, o bobină reală are și inductanță, și rezistență.



● Fig. 2.1.13



Un rezistor cu valoarea rezistenței electrice $R=200\ \Omega$, o bobină cu inductanța $L=35\text{ mH}$ și un condensator cu capacitatea $C=122\ \mu\text{F}$ au fost inserate și alimentate de la o sursă de curent alternativ cu tensiunea de 8 V . Utilizând placa de achiziție de semnal pentru a culege și vizualiza tensiunea la bornele bobinei, u_L , tensiunea la bornele condensatorului, u_C și curentul stabilit prin circuit, i , s-au obținut reprezentările grafice din figura 2.1.14.



Exercițiul 2.1.1. Un circuit este format dintr-un condensator de capacitate $C = 10/(7\pi)\text{ mF}$, legat în serie cu o bobină cu rezistența activă $r = 4\ \Omega$ și inductanța $L = 40/\pi\text{ mH}$. Circuitul este alimentat cu o tensiune alternativă $u(t) = 20\sqrt{2} \cdot \sin(100\pi \cdot t)$. Aflați a) frecvența curentului alternativ, b) intensitatea maximă și intensitatea efectivă ale curentului din circuit, c) valoarea tensiunii efective la bornele bobinei, d) defazajul dintre curent și tensiunea la bornele bobinei.

Soluție: Pentru frecvență se obține imediat valoarea: $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 50\text{ Hz}$.

Pentru a afla valoarea intensității maxime se folosește legea lui Ohm:

$$I = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} = 4\sqrt{2}\text{ A}.$$

Corespunzător, pentru valoarea efectivă se obține $I = 4\text{ A}$. Bobina are și inductanță și rezistență și deci

$$U_L = I \cdot \sqrt{r^2 + \omega^2 \cdot L^2} = 22,63\text{ V}.$$

În final pentru defazaj se obține: $\text{tg}\varphi = \frac{\omega \cdot L}{R} \Rightarrow \varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L}{R} = \frac{\pi}{4}$.



Exercițiul 2.1.2. Un circuit de curent alternativ, alimentat de un generator cu frecvența $\nu = 5\text{ kHz}$ și tensiunea efectivă $U = 100\text{ V}$, conține un rezistor cu rezistența $R = 200\ \Omega$ și un condensator cu capacitatea $C = 200/\pi\text{ nF}$. Aflați a) reactanța capacitivă, b) valoarea maximă a tensiunii generatorului, c) valoarea efectivă a intensității curentului, d) inductanța care, înlocuind rezistența, nu modifică intensitatea curentului din circuit.

Soluție: Pentru reactanța capacitivă și valoarea maximă a tensiunii generatorului se obțin imediat valorile

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot \nu \cdot C} = 500\ \Omega, \quad U_m = U \cdot \sqrt{2} = 141\text{ V}.$$

Pentru a obține valoarea efectivă a curentului folosim legea lui Ohm: $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = 186\text{ mA}$.

Pentru ca înlocuind rezistorul cu o bobină să nu fie afectată valoarea intensității curentului este suficient ca impedanța să nu se modifice

$$\sqrt{R^2 + X_C^2} = |X_L - X_C|.$$

De aici rezultă că

$$\sqrt{R^2 + X_C^2} = |X_L - X_C| \Rightarrow L = \frac{1}{\omega} (X_C \pm \sqrt{R^2 + X_C^2}) = \begin{cases} 9,25\text{ H} \\ 9,21\text{ H} \end{cases}.$$

Rezonanța tensiunilor

În secțiunea precedentă am arătat că în situația (figura 2.1.13-b), în care $U_L = U_C$ și deci $X_L = X_C$, efectul capacitiv se compensează cu cel inductiv, $\tan \varphi = 0$, deci defazajul φ este *nul*. Acest caz este numit **rezonanța tensiunilor** în circuitul serie. Se spune că *circuitul serie este în regim de rezonanță*.

Observație: φ este defazajul dintre tensiunea aplicată la bornele circuitului și intensitatea curentului stabilit în circuit. Defazajul dintre tensiunile U_L și U_C este π .

Din egalitatea reactanțelor inductivă și capacitivă rezultă următoarele concluzii.

1) La rezonanța impedanța circuitului serie este minimă, $Z = R$ și deci intensitatea curentului stabilit în circuit este maximă: $I_{rez} = \frac{U}{R}$.

2) Rezonanța tensiunilor se realizează numai pentru o anumită valoare a frecvenței, numită **frecvență de rezonanță**:

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} \Rightarrow \omega_0 = 1 / \sqrt{L \cdot C} \Rightarrow$$

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

care depinde numai de valorile inductanței bobinei și capacității condensatorului. Corespunzător, la rezonanță perioada tensiunii alternative este dată de relația:

$$T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C},$$

numită **formula lui Thomson**. Să considerăm, pentru un circuit serie expresia intensității I :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}.$$

Dacă se menține fixă valoarea inductanței și se folosește un condensator de capacitate variabilă se pot determina valorile intensității I în funcție de C . Lucrându-se cu rezistențe diferite, se obțin curbe ca cele din figura 2.1.15, numite **curbe de rezonanță**. Maximul curbelor corespunde, conform relației de mai sus, lui $C = 1/(\omega^2 \cdot L)$ și este cu atât mai accentuat cu cât rezistența R este mai mică.

La rezonanță intensitatea curentului stabilit în circuit este maximă; tensiunile efective la bornele bobinei și, respectiv, condensatorului iau valorile:

$$U_L = I_{rez} \cdot X_L = \frac{U \cdot \omega_0 \cdot L}{R}, \quad U_C = I_{rez} \cdot X_C = \frac{U}{R \cdot \omega_0 \cdot C}.$$

Definiție: Se numește **factor de calitate al circuitului** raportul Q definit de relația

$$Q = \left(\frac{U_L}{U} \right)_{\omega=\omega_0} = \left(\frac{U_C}{U} \right)_{\omega=\omega_0}.$$

Observație: Factorul de calitate arată de câte ori este mai mare, la rezonanță, tensiunea la bornele bobinei sau condensatorului față de tensiunea la bornele circuitului. De aceea raportul Q mai este numit și **factor de supratensiune**.

Folosind expresiile la rezonanță ale tensiunilor U_L și U_C în relația de definiție a lui Q și înlocuind apoi expresia pulsației de rezonanță ω_0 , rezultă

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Această relație arată că, dacă

$$\sqrt{\frac{L}{C}} \gg R \Rightarrow Q \gg 1,$$

atunci la rezonanță, tensiunile la bornele bobinei, respectiv, condensatorului sunt mult mai mari decât tensiunea la bornele circuitului.

Observație: Mărima $Z_0 = \sqrt{L/C}$ este numită **impedanță caracteristică** a circuitului.

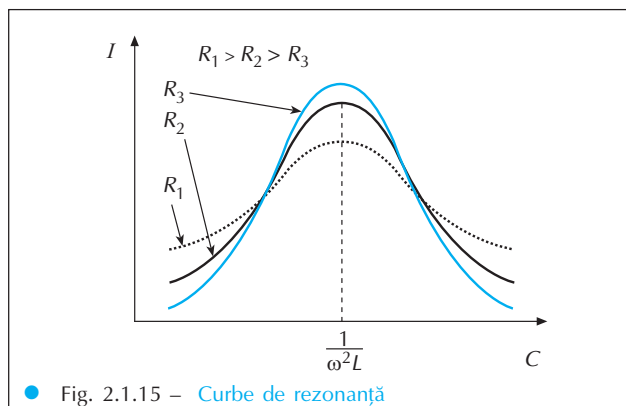
Folosind expresiile la rezonanță ale tensiunilor U_L și U_C în relația de definiție a lui Q și înlocuind apoi

expresia pulsației de rezonanță ω_0 , rezultă: $Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Această relație arată că, dacă:

$$\sqrt{\frac{L}{C}} \gg R \Rightarrow Q \gg 1,$$

atunci la rezonanță, tensiunile la bornele bobinei, respectiv, condensatorului sunt mult mai mari decât tensiunea la bornele circuitului.



● Fig. 2.1.15 – Curbe de rezonanță

(*) **Circuitul paralel cu rezistor, bobină și condensator în curent alternativ.**

(*) **Rezonanța curenților**

Considerăm un circuit format dintr-un rezistor de rezistență R , o bobină de inductanță L și un condensator de capacitate C , legate în paralel. La bornele circuitului se aplică o tensiune alternativă (figura 2.1.19-a)

$$u(t) = U_m \cdot \sin \omega t .$$

Cele 3 elemente de circuit au, fiecare, la borne tensiunea efectivă U . Corespunzător, conform celor studiate anterior:

a) în rezistor se stabilește un curent

$$I_R = \frac{U}{R}, \text{ în fază cu tensiunea } U,$$

b) în bobină se stabilește un curent

$$I_L = \frac{U}{X_L}, \text{ defazată cu } \pi/2 \text{ în urma tensiunii,}$$

c) în condensator se stabilește un curent $I_C = \frac{U}{X_C}$, defazată cu $\pi/2$ înaintea tensiunii.

În reprezentarea fazorială intensitatea totală I a curentului din circuit este suma vectorială a acestor 3 curenți (figura 2.1.19-b). Din triunghiul dreptunghic OAB , numit **triunghiul intensităților**, folosind teorema lui Pitagora, obținem $I^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2$, de unde, folosind expresiile de mai sus ale intensităților, rezultă că:

$$I = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)^2} .$$

Această relație exprimă legea lui Ohm $U = I \cdot Z$ pentru circuitul paralel. Impedanța circuitului RLC paralel este dată de expresia:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)^2}}$$

este numită **impedanță** a circuitului paralel RLC.

Observație:

1) Din structura relației de definiție rezultă că $[Z]_{SI} = 1 \, \Omega$.

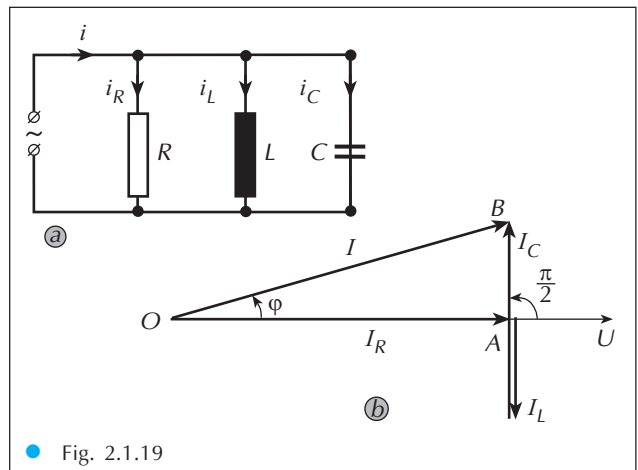
Tot din triunghiul intensităților se poate calcula defazajul φ al intensității I a curentului total din circuit față de tensiunea U la borne:

$$\operatorname{tg} \varphi \equiv \frac{I_L - I_C}{I_R} = R \cdot \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) .$$

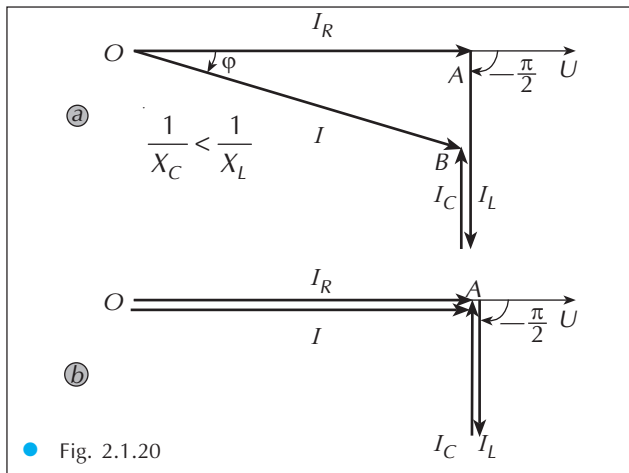
Observație: În cazul reprezentat în figura 2.1.19-b, $I_C > I_L$ și deci $1/X_C > 1/X_L$. Conform relației precedente, $\operatorname{tg} \varphi < 0$, deci defazajul φ este negativ și predomină efectul capacitiv.

Deci: dacă la bornele circuitului se aplică tensiunea $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$, atunci intensitatea curentului total prin circuit este $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$.

În figura 2.1.19-b s-a construit triunghiul intensităților pentru cazul $I_C > I_L$. Este posibil însă ca $I_C < I_L$ sau, ca $I_C = I_L$. În aceste două cazuri construcția fazorială a triunghiului tensiunilor este ilustrată în figura 2.1.20-a și, respectiv, 2.1.20-b.



• Fig. 2.1.19



În primul caz (figura 2.1.20-a), $I_C < I_L$ și deci $1/X_C < 1/X_L$. Rezultă că $\tan \varphi > 0$, deci defazajul φ este *pozitiv*.
În cazul al doilea (fig. 2.1.20-b), $I_C = I_L$ și deci $X_L = X_C$. Rezultă că $\tan \varphi = 0$, deci defazajul φ este *nul*. Acest caz este numit **rezonanță intensităților** în circuitul paralel.

Din relația $X_L = X_C$ se obține pentru frecvența de rezonanță aceeași expresie ca și în cazul circuitului serie:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}.$$

Din relația:

$$I = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)^2}$$

rezultă că, **la rezonanța intensităților, curentul total prin circuit este minim** și are valoarea efectivă: $I_{\text{rez}} = \frac{U}{R}$.

Această situație se explică prin faptul că, la rezonanță, intensitățile I_C și I_L , care sunt permanent defazate unul față de altul cu π , sunt și egale în mărime.

2



Exercițiul 2.1.4. Când circuitul din figura 2.1.21 este alimentat la tensiunea efectivă $U = 220 \text{ V}$, cu frecvența $\nu = 50 \text{ Hz}$, reactanța bobinei este $X_L = 30 \Omega$. Aflați a) valorile R și C pentru care, atunci când se închide comutatorul k pe poziția 1, intensitatea curentului debitat de sursă este de două ori mai mare decât în cazul în care k este deschis, iar pentru k pe poziția 2 intensitatea curentului debitat de sursă este $4/9$ din intensitatea curentului pentru k deschis; b) frecvența de rezonanță a circuitului cu k pe poziția 2.

Soluție: Vom nota cu I intensitatea curentului când comutatorul k este deschis, cu I_1 intensitatea curentului când comutatorul k este în poziția 1 și cu I_2 intensitatea curentului când comutatorul k este în poziția 2.

Când comutatorul k este deschis $I = \frac{U}{X_L}$.

Când comutatorul k este în poziția 1, $I_1 = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$.

Condiția din problemă este $I_1 = 2 \cdot I$. Folosind în această relație cele două expresii precedente se obține

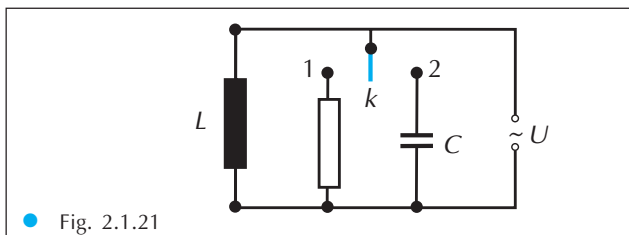
$$\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2} = \frac{4}{X_L^2} \Rightarrow R = \frac{X_L}{\sqrt{3}} = 17,32 \text{ V}.$$

Când comutatorul k este în poziția 2, $I_2 = U \cdot |X_L - X_C|$.

Condiția din problemă este $I_2 = 4 \cdot I/9$. Folosind în această relație expresiile lui I și I_2 se obține

$$C_1 = \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{\omega \cdot X_L} = 58,9 \mu\text{F} \quad (X_L > \omega \cdot C),$$

$$C_2 = \frac{13}{9} \cdot \frac{1}{\omega \cdot X_L} = 153,14 \mu\text{F} \quad (\text{pt. } X_L < \omega \cdot C).$$



La rezonanță $\nu_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{X_L \cdot \frac{C}{\omega}}}$, și

deci, corespunzător celor două valori ale capacității C , se obțin valorile $\nu_{01} = 67,1 \text{ Hz}$, $\nu_{02} = 41,6 \text{ Hz}$.

LUCRARE DE LABORATOR

Studiul circuitului RLC în curent alternativ

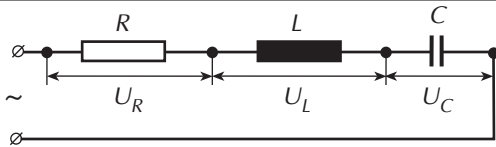


Fig. 2.1.22

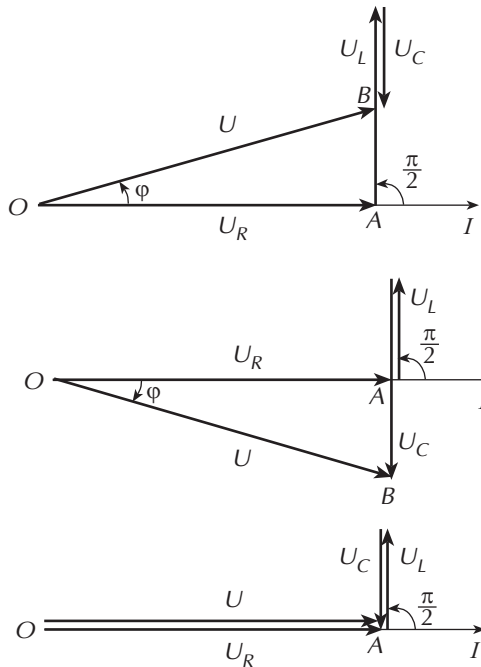


Fig. 2.1.23

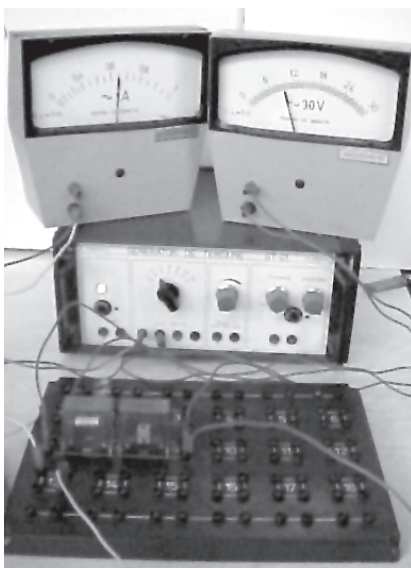


Fig. 2.1.24 – Montaj experimental – circuitul RLC serie

Circuitul RLC serie

Veți studia comportamentul circuitului RLC serie în c.a. Veți conecta în circuit aparate pentru a măsura tensiuni și intensități în c.a. Veți calcula reactanțele elementelor și impedanța circuitului, atât din considerente teoretice, cât și prin utilizarea valorilor măsurate de voi.

Circuitul RLC serie din figura 2.1.22 poate funcționa în următoarele regimuri:

1. Dacă circuitul are caracter inductiv $X_L > X_C$, $L\omega > 1 / (C\omega)$, atunci impedanța circuitului este:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

deci curentul este defazat în urma tensiunii aplicate ca în figura 2.1.23-a.

2. Dacă circuitul are caracter capacitiv $X_L < X_C$, $L\omega < 1 / (C\omega)$, atunci:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{-\frac{1}{C\omega} + L\omega}{R},$$

deci curentul este defazat înaintea tensiunii aplicate ca în figura 2.1.23-b.

3. Dacă circuitul are caracter rezistiv: $L\omega = 1 / (C\omega)$ atunci:

$$Z = R; \operatorname{tg} \varphi = 0,$$

deci tensiunea și curentul sunt în fază, circuitul se află la rezonanță, ca în figura 2.1.23-c.

Materialele necesare pentru realizarea circuitului sunt: sursă de tensiune stabilizată, multiampermetru 0-1 A c.a., multivoltmetru 0-10 V c.a., bobină 2mH, condensatoare cu valori ale capacității electrice de 1μF și de 10 μF, rezistori de 10 Ω, 20 Ω, 1k Ω, 5,1k Ω, conductori de legătură, panou de lucru și întrerupător.

După cuplarea componentelor circuitului RLC serie potrivit schemei electrice din figura 2.1.22, conectați

instrumentele de măsură în circuit și citiți indicațiile lor.Înregistrați valorile obținute în tabelul alăturat:

$R (\Omega)$	$C (\mu F)$	$L (mH)$	$X_L (\Omega)$	$X_C (\Omega)$	$Z_{calc} (\Omega)$	$U (V)$	$I (mA)$	$Z_{exp} (\Omega)$

Eliminați din circuit bobina și reluați aceleași operații pentru studiul circuitului RC serie:

$R (\Omega)$	$C (\mu F)$	$X_C (\Omega)$	$Z_{calc} (\Omega)$	$U (V)$	$I (mA)$	$Z_{exp} (\Omega)$

Eliminați din circuitul RLC condensatorul și reluați aceleași operații pentru studiul circuitului RL serie:

$R (\Omega)$	$C (\mu F)$	$X_L (\Omega)$	$Z_{calc} (\Omega)$	$U (V)$	$I (mA)$	$Z_{exp} (\Omega)$

Calculați valorile reactanțelor bobinei, respectiv condensatorului. Calculați impedanța după formula

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \text{ și comparați cu valoarea experimentală } Z_{exp} = \frac{U}{I}, \text{ în toate cazurile studiate.}$$

(*) Circuitul RLC paralel

Veți studia comportamentul circuitului RLC paralel în c.a. Veți conecta în circuit aparate pentru a măsura tensiuni și intensități în c.a. Veți calcula reactanțele elementelor și impedanța circuitului atât din considerente teoretice cât și prin utilizarea valorilor măsurate de voi. Utilizați aceleași materiale din secțiunea precedentă. Realizați circuitul paralel după schema din figura 2,1,25. Conectați instrumentele de măsură în circuit și citiți indicațiile lor.Înregistrați valorile obținute în tabelul alăturat:

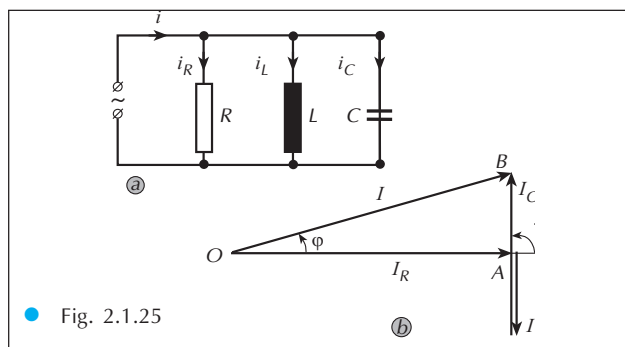


Fig. 2.1.25

$R (\Omega)$	$C (\mu F)$	$L (mH)$	$X_L (\Omega)$	$X_C (\Omega)$	$Z_{calc} (\Omega)$	$U (V)$	$I (mA)$	$Z_{exp} (\Omega)$

Eliminați din circuit bobina și reluați aceleași operații pentru studiul circuitului RC paralel:

$R (\Omega)$	$C (\mu F)$	$X_C (\Omega)$	$Z_{calc} (\Omega)$	$U (V)$	$I (mA)$	$Z_{exp} (\Omega)$

Eliminați din circuit condensatorul și reluați aceleași operații pentru studiul circuitului RL paralel:

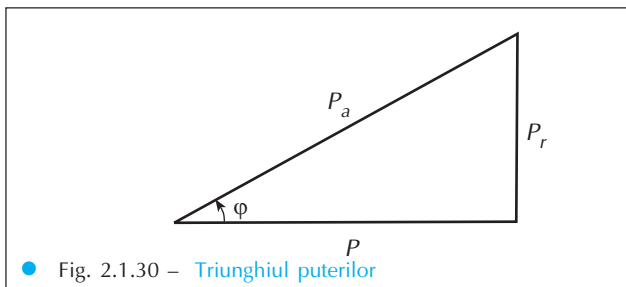
$R (\Omega)$	$C (\mu F)$	$X_L (\Omega)$	$Z_{calc} (\Omega)$	$U (V)$	$I (mA)$	$Z_{exp} (\Omega)$

Calculați impedanța după formula :

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)^2}}$$

și comparați cu valoarea experimentală $Z_{exp} = \frac{U}{I}$, în toate cazurile studiate.

Formulați concluzii!



Considerăm din nou triunghiul OAB al tensiunilor (figura 2.1.12-b) în cazul circuitului serie. Înmulțind valorile laturilor triunghiului cu intensitatea efectivă I obținem un nou triunghi având lungimile laturilor egale cu valorile puterilor (figura 2.1.30).

În triunghiul puterilor, ipotenuza reprezintă **puterea aparentă**

$$P_a = U \cdot I,$$

numită astfel deoarece este puterea care se obține

făcând produsul dintre valoarea tensiunii efective U , indicată de un voltmetru montat la bornele circuitului și intensitatea efectivă I , indicată de un ampermetru înseriat în circuit. *Puterea aparentă reprezintă energia furnizată circuitului, în fiecare secundă, de generatorul de tensiune alternativă.* Unitatea de măsură a puterii aparente este numită **volt-amper** și se notează VA.

Cateta orizontală $P = U_R \cdot I$ reprezintă puterea disipată pe rezistorul de rezistență R și, de aceea, este numită **putere activă**. Din figura 2.1.30 rezultă că:

$$P = P_a \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

2

Unitatea de măsură pentru puterea activă este wattul.

Factorul:

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_a}$$

este numit **factor de putere**. Valoarea sa arată ce fracțiune din puterea furnizată de generator circuitului este reprezentată de puterea activă, adică puterea pe care o poate utiliza un consumator.

Cateta verticală $P_r = (U_L - U_C) \cdot I = I^2 (X_L - X_C)$ reprezintă puterea concentrată în câmpul magnetic al bobinei și în câmpul electric dintre armăturile condensatorului. Ea este numită **putere reactivă** și, conform figurii 2.1.30, are expresia:

$$P_r = P_a \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \sin \varphi.$$

Unitatea de măsură pentru puterea reactivă este numită **volt-amper-reactiv**, prescurtat VAR.

Observație: Această unitate de măsură a fost adoptată de Comisia Electrotehnică Internațională, în 1930, la propunerea academicianului Constantin Budeanu (1886 - 1959).

Din triunghiul puterilor se obțin ușor și alte relații între cele 3 puteri:

$$P_a^2 = P^2 + P_r^2, \quad P_r = P \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$



Exercițiul 2.1.6. La bornele unui circuit serie de curent alternativ, alcătuit dintr-un rezistor cu rezistența $R = 350 \, \Omega$, o bobină de inductanță $L = 4/\pi \, \text{H}$ și un condensator cu capacitatea $C = 0,2/\pi \, \text{mF}$ se aplică tensiunea $u(t) = 240 \cdot \sin(100\pi \cdot t) \, (\text{V})$. Aflați: a) expresia intensității instantanee a curentului din circuit; b) puterile activă, reactivă și aparentă; c) frecvența curentului alternativ pentru care are loc rezonanță; d) intensitatea curentului la rezonanță.

Soluție: Din expresia tensiunii instantanee $u(t) = 240 \cdot \sin(100\pi \cdot t) \, (\text{V})$ rezultă $\omega = 100\pi \, \text{rad/s}$. Atunci se obțin pentru reactanțe valorile

$$X_L = \omega \cdot L = 400 \, \Omega, \quad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = 50 \, \Omega.$$

Corespunzător, impedanța circuitului are valoarea

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 350 \cdot \sqrt{2} \, \Omega.$$

Pentru defazajul dintre tensiunea la bornele circuitului și intensitatea curentului care îl străbate se obține

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = 1 \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{4}.$$

Cu aceste rezultate se poate scrie expresia intensității instantanee a curentului

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \cdot \sin(100\pi \cdot t - \varphi) = \frac{12\sqrt{2}}{35} \cdot \sin\left(100\pi \cdot t - \frac{\pi}{4}\right).$$

Din această relație se vede că valoarea efectivă a intensității este $I = 12/35$ A, iar din expresia tensiunii instantanee la bornele circuitului rezultă că valoarea efectivă a tensiunii este $U = 120\sqrt{2}$ V. Pentru puterile cerute de problemă se obțin valorile

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \approx 41,14 \text{ W},$$

$$P_r = U \cdot I \cdot \sin \varphi \approx 41,14 \text{ VAR}, \quad P_a = U \cdot I \approx 58,18 \text{ VA}.$$

La rezonanță se obține

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \approx 17,7 \text{ Hz}, \quad I = \frac{U}{R} \approx 0,485 \text{ A}.$$



Exercițiul 2.1.7. Un circuit RLC paralel de curent alternativ este alimentat de o tensiune alternativă cu valoarea efectivă $U = 60$ V și frecvența $\nu = 50$ Hz. Știind că inductanța bobinei este $L = 1$ H, puterea activă în circuit este $P = 10$ W, iar defazajul dintre curentul total și tensiune este $\varphi = \pi/6$, aflați: a) valoarea rezistenței R și a capacității C ; b) valoarea instantanee a curentului prin bobină; c) inductanța bobinei pentru care curentul total devine minim și valoarea minimă a curentului, frecvența și capacitatea rămânând constante.

Soluție: În circuitul de curent alternativ, puterea activă poate fi exprimată prin relația

$$P = \frac{U^2}{R},$$

de unde se găsește că

$$R = \frac{U^2}{P} = 360 \, \Omega.$$

Din formula defazajului

$$\operatorname{tg} \varphi = R \cdot \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) = R \cdot \left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L} \right),$$

se obține

$$C = \frac{1}{\omega} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{R} + \frac{1}{\omega \cdot L} \right) = 15,2 \, \mu\text{F}.$$

Intensitatea instantanee a curentului prin bobină este dată de relația

$$i_L(t) = \frac{U_m}{X_L} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 0,27 \cdot \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Intensitatea curentului devine minimă la rezonanță, deci

$$X_L = X_C \Rightarrow L' = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} = 0,667 \text{ H}.$$

Corespunzător, intensitatea curentului la rezonanță este

$$I_{\min} = \frac{U}{R} = \frac{P}{U} = 0,167 \text{ A}.$$

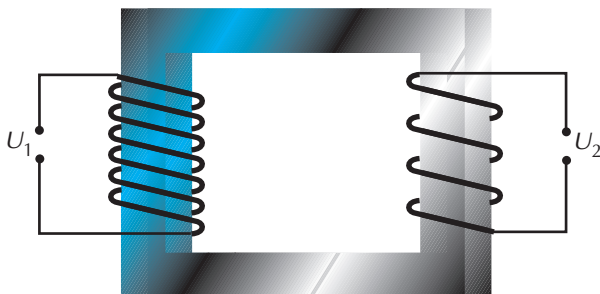


Fig. 2.1.31

2

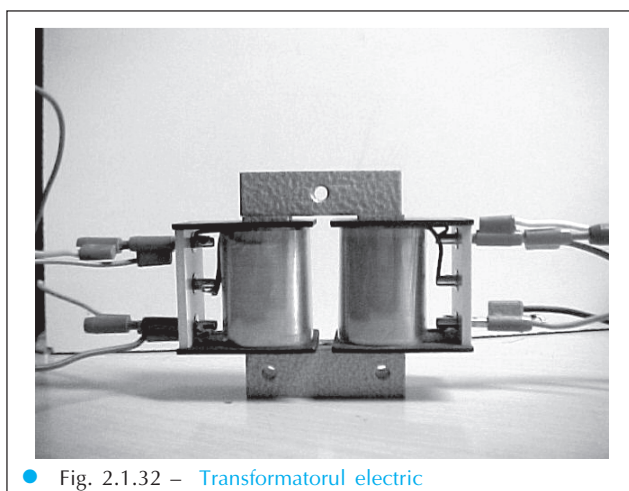


Fig. 2.1.32 – Transformatorul electric

Transportul eficient al energiei electrice la distanțe mari necesită utilizarea tensiunilor înalte. În adevăr, în acest caz ($P = U \cdot I$) se pot folosi curenți de intensitate mică, ceea ce are ca urmare micșorarea pierderilor ($I^2 \cdot R$) prin efect Joule pe linia de transport.

Pe de altă parte, la locul de utilizare energia electrică trebuie să aibă o tensiune joasă pentru ca folosirea ei să nu fie periculoasă, de exemplu, în aparatele casnice.

Transformatorul este un aparat electric folosit pentru modificarea tensiunii și a intensității unui curent electric alternativ.

În principiu, un transformator este constituit din două bobine, izolate electric una de alta, înfășurate amândouă pe același miez de fier (figura 2.1.31). Un curent alternativ care străbate una din bobine produce în miez un flux magnetic variabil (alternativ) care, la rândul lui, determină apariția în cea de-a doua bobină a unei tensiuni electromotoare induse (alternative). În acest fel energia electrică este transferată de la prima bobină la cea de-a doua. Bobina căreia i se furnizează puterea electrică este numită **primar, bobină primară** sau **înfășurare primară** a transformatorului, iar cea care debitează apoi puterea este numită **secundar** sau **înfășurare secundară**.

Observație: Transferul de energie de la primar la secundar este însoțit de unele pierderi, cum sunt, de exemplu, pierderile prin efect Joule în cele două bobine. Totuși pierderile sunt mici și randamentul transformatoarelor depășește în mod uzual 95%.

Pentru simplitatea raționamentului presupunem, în continuare, că în transformator nu există pierderi. Presupunem că înfășurarea primară are N_p spire, iar cea secundară N_s spire. Sursa de curent alternativ de tensiune U_p este conectată la primar. Presupunem că circuitul secundarului este deschis, astfel încât prin secundar nu trece nici un curent electric. În acest caz se spune că transformatorul funcționează în gol.

Deoarece același flux magnetic străbate atât primarul cât și secundarul, tensiunea electromotoare indusă într-o spiră este aceeași și în primar și în secundar. Atunci, tensiunile electromotoare induse în primar și, respectiv, în secundar sunt date de relațiile:

$$e_p = -N_p \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad , \quad e_s = -N_s \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad .$$

De aici, prin împărțire, rezultă că

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad .$$

Înfășurările transformatorului au fost presupuse ideale (pierderile prin efect Joule egale cu zero). De aceea, tensiunile la borne U_p și U_s au aceeași valoare efectivă ca și tensiunile electromotoare induse e_p și, respectiv, e_s . Relația precedentă poate fi atunci rescrisă în forma

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad .$$

Concluzie: La funcționarea în gol a transformatorului (circuitul secundar deschis) *tensiunile sunt direct proporționale cu numărul de spire al înfășurărilor respective*.

Din această relație se vede că, realizând o înfășurare secundară cu mai multe spire decât cea primară ($N_s > N_p$), se obține în secundar o tensiune mai mare decât cea din primar ($U_s > U_p$). Transformatorul este, în acest caz, *ridicător de tensiune*. Dacă $N_p > N_s$ se obține în secundar o tensiune mai mică decât cea din primar ($U_p > U_s$). Transformatorul este, în acest caz, *coborâtor de tensiune*.

Atunci când circuitul din secundar este închis printr-un consumator de rezistență R , în secundar circulă un curent de intensitate $I_s = U_s / R$. Atunci, deoarece pierderile au fost presupuse neglijabile, din conservarea energiei rezultă că puterea preluată de secundar este egală cu cea furnizată primarului. Deci

$$U_s \cdot I_s = U_p \cdot I_p$$

și, folosind și relația de la funcționarea în gol, obținem

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}.$$

Transformatoarele au o multitudine de aplicații legate de capacitatea lor de a ridica sau coborî tensiunea curentului alternativ. În centralele electrice energia electrică este produsă la o tensiune de circa 6 kV; transformatoarele ridică tensiunea la sute de kilovolți, convenabilă pentru transport (pierderi mici pe linia de transport), pentru ca în final tot transformatoarele să coboare tensiunea, în trepte, de exemplu, până la 220 V pentru consumul casnic.

Transformatoarele sunt folosite în multe aparate de uz casnic: radio, televizor, magnetofon, telefon etc., pentru coborârea tensiunii la nivelul necesar funcționării anumitor circuite. O altă aplicație importantă a transformatoarelor este bobina de inducție utilizată la obținerea tensiunii necesare realizării aprinderii la motoarele (auto) cu aprindere prin scânteie.

Motoare electrice

Sunt dispozitive care transformă energia electrică în energie mecanică. Motoarele electrice au în principiu aceeași construcție cu generatoarele electrice. Dacă generatoarele au rotorul pus în mișcare de către un curent de aer sau de apă pentru a induce curent electric, motoarele primesc curent electric în înfășurările statorului, pentru a căpăta astfel mișcarea rotorului care poate antrena la rândul său o elice sau un mecanism cu roți dințate (figura 2.1.34).

Mărimile nominale înscrise pe plăcuța de identificare a unui motor electric sunt:

- Puterea nominală-puterea mecanică utilă la arborele motorului
[P_n]=1W
- Tensiunea nominală- tensiunea de alimentare
[U]=1V
- Curentul nominal – curentul absorbit de la rețea potrivit puterii și tensiunii nominale
[I]=1A
- Turația nominală- turația arborelui motorului
[v]=1rot/min
- Randamentul motorului- raportul dintre puterea nominală a motorului și puterea electrică absorbită de la rețea

$$\eta < 1.$$

Aparatele electrocasnice întâlnite în orice locuință funcționează fiind alimentate în curent alternativ. Mașina de spălat, aspiratorul de praf, uscătorul de păr, plita electrică, fierul de călcat sunt utilizate zilnic. Despre aparatele pentru transmisia, înregistrarea și redarea sunetelor, precum microfonul, difuzorul, casetofonul, telefonul, radioul ați învățat în clasa a X-a. În schema lor constructivă se întâlnesc circuite de curent alternativ.

2



Fig. 2.1.33 – Aparate electrocasnice

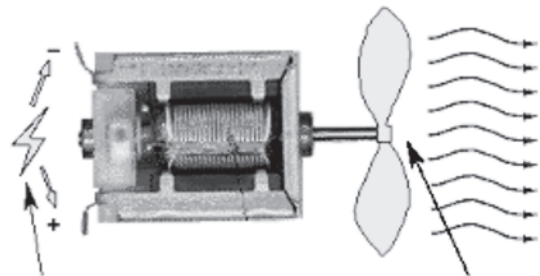


Fig. 2.1.34 – Schema unui motor electric

MĂSURI DE PROTECȚIE A MEDIULUI ȘI A PROPRIEI PERSOANE ÎN PRODUCEREA ȘI UTILIZAREA CURENTULUI ALTERNATIV

Efectele curentului electric asupra organismului uman

Trecerea curentului electric prin organismul uman are efecte care depind de valorile intensității, ale tensiunii aplicate, de impedanța pielii umane care diferă de la o persoană la alta. În general, curentul alternativ cu frecvența cuprinsă între 40-50 Hz este foarte periculos. Un curent cu intensitatea de până la 10 mA nu are efecte fiziologice de remarcă asupra majorității persoanelor. Mărind intensitatea curentului electric încep să apară contracturi musculare, dificultăți respiratorii, tulburări de ritm cardiac, dificultăți de exprimare, etc. La valori de 70-110 mA în curent alternativ și 200-250 mA în curent continuu survine stopul cardio-respirator și apoi moartea. Intensitatea curentului electric se calculează ca raport între tensiunea aplicată și valoarea impedanței corpului uman.

Măsurați impedanța corpului vostru utilizând ohmmetrul! Cuplați bornele sale între mână și picior, apoi între ambele mâini.

	Impedanța (Ω) / procentaj din populație		
Tensiunea (V)	5%	45%	50%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
Valoare asimptotică	600	750	850

În această variantă am măsurat valoarea de 500 k Ω impedanța mână-mână și 1500 k Ω impedanța mână-picior. Statistic vorbind valorile impedanței se încadrează în tabelul alăturat.

Impedanța corpului uman între ambele mâini are valori între 600-6000 Ω , depinzând de umiditatea pielii. Astfel, tensiuni sub 20 V nu creează curenți mai mari decât 10 mA, ceea ce nu prezintă pericol. Dacă pielea este uscată, tensiunile de 80 V nu produc curenți mai mari de 30 mA. Se observă că valoarea minimă a impedanței corpului uman este de 600 Ω , ceea ce corespunde unei tensiuni nepericuloase de 24 V. Evident că, potrivit legii lui Joule,

efectele înregistrate depind de durata trecerii curentului prin organism.

Există impresia falsă că un curent continuu este mai periculos decât unul alternativ cu aceeași tensiune deoarece ar putea produce contracturi musculare. În realitate curentul alternativ este mai periculos, deoarece poate determina tulburări de ritm cardiac.

În ceea ce privește rețelele electrice casnice, ele se alimentează în curent alternativ, cu valorile tensiunii de 230V +10/-6% (50Hz), între fază și nul.

În nici un caz nu atingeți simultan bornele sau firele de fază și nul pentru că riscați să vă electrocuțați!

Nu utilizați instalații electrice fără împământare pentru că riscați să vă electrocuțați!

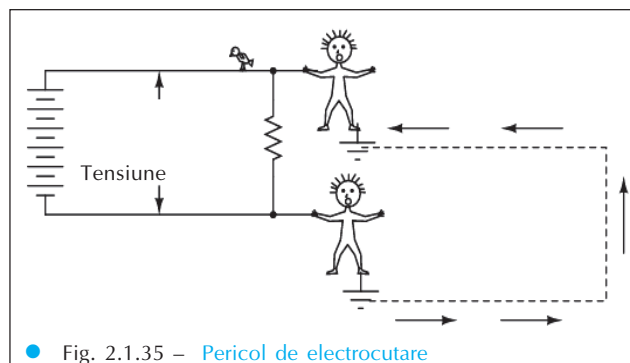
În imaginea din figura 2.1.35 observați persoane care se electrocutează datorită diferenței de potențial dintre punctele din circuit pe care le ating și pământ. Vrabia nu este electrocutată, nici pe liniile de înaltă tensiune, întrucât diferența de potențial dintre piciorușe este practic nulă, datorită dimensiunilor sale.

Prima manevră care trebuie făcută în cazul electrocutării unei persoane este deconectarea sa de la sursă fără a fi atinsă decât cu obiecte izolatoare!

Unele efecte se pot produce cu întârziere, motiv pentru care persoanele care suferă șocuri electrice trebuie monitorizate o vreme de către personal medical.

Valorile intensităților curenților electrici alternativi (50 Hz) care produc senzații dureroase sunt de 6-10 mA. În jurul valorii de 100 mA pentru curentul alternativ apar tulburările de ritm cardiac.

Valoarea intensității curentului alternativ pentru care apare spasmul muscular care împiedică îndepărtarea mâinii de sursa electrică este de circa 15 mA (depinde de masa musculară).



● Fig. 2.1.35 – Pericol de electrocutare

Efectele producerii curentului electric asupra mediului

Cel mai mare procent din energia electrică consumată este produs prin arderea combustibililor fosili. Aceasta are ca efect emisia de CO_2 care este eliberat în atmosferă. El contribuie la intensificarea efectului de seră și a încălzirii globale. Totodată, se emit dioxid de sulf, dioxid de azot și fum.

În ceea ce privește hidrocentralele, emisiile nocive în atmosferă sunt limitate, însă ele produc dezechilibre ecologice. În momentul în care se construiesc lacurile de acumulare prin inundarea unor terenuri dispar flora și fauna specifică locului. Pentru lacurile de acumulare mari s-au constatat emisii semnificative de metan datorate descompunerii anaerobe a plantelor rămase sub ape, în urma inundării terenului pentru a crea lacul.

Centralele maremotrice pun și ele probleme ecologice prin restricționarea mișcării bancurilor de pești și a scoicilor.

Centralele nucleare-electrice necesită depozitarea reziduurilor care rămân radioactive pentru încă câteva zeci de ani. Se încearcă varianta îngropării lor la adâncimi mari sub pământ și chiar a eliberării în spațiul extraterestru.

În ceea ce privește efectul asupra mediului, el este neglijabil până în momentul apariției unei catastrofe, precum cea de la Cernobâl.

Metodele care afectează cel mai puțin mediul au în general eficiență mică. Este cazul panourilor solare și al morilor de vânt.

În ultima vreme se impune tot mai mult metoda numită Negawatt Power. Ea constă în eficientizarea consumatorilor electrici în loc de a mări producția de electricitate. Este metoda care nu are nici un efect negativ asupra mediului.

Alte efecte ale curentului electric alternativ

Arcul electric duce la încălzirea puternică a conductoarelor până la temperaturi la care componentele lor se topesc și se vaporizează. Se produce totodată încălzirea rapidă a aerului înconjurător crescând potențialul exploziv. Exploziile electrice pot fi fatale pentru cei aflați pe o rază de 3 m și pot cauza arsuri puternice persoanelor aflate pe o rază de 12 m în jurul incidentului.

În instalațiile și circuitele electrice își pot face apariția supracurenți, supratensiuni sau subțensiuni care pot duce la defectarea unor componente și chiar la electrocutarea persoanelor care ajung în contact cu ele.

Regimul normal de funcționare al unui circuit constă în asigurarea unor curenți cu intensități la valori mai mici sau egale cu valoarea nominală a curentului, I_n și a unor tensiuni care variază relativ puțin în jurul valorii nominale, U_n . Atunci când valoarea curentului depășește valoarea nominală, apar supracurenți.

Scurtcircuitul apare, de obicei, din cauza unor defecte de izolație care favorizează realizarea unor contacte nedorite și care se soldează cu micșorarea puternică a rezistenței electrice și cu creșterea semnificativă a valorii intensității curentului- **supracurent**. Aceasta duce la supraîncălzirea conductoarelor și la deteriorarea izolației



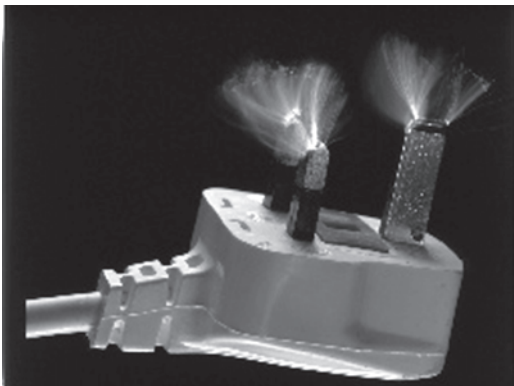
Fig. 2.1.36 – Hidrocentrală



Fig. 2.1.37 – Termocentrală



Fig. 2.1.38 – Panouri solare



● Fig. 2.1.39 – Apariția arcului electric duce la încălzirea puternică a conductoarelor

lor, ceea ce favorizează apariția incendiilor. Apare și pericolul de electrocutare în cazul persoanelor care ar putea atinge o suprafață metalică (ex: carcasă) aflată întâmplător în contact cu un conductor cu izolația deteriorată.

Prin proiectarea lor, circuitele și instalațiile sunt protejate împotriva scurtcircuitelor. Ele sunt prevăzute cu dispozitive care au rolul de a întrerupe automat alimentarea în caz de suprasarcină (ex: utilizarea mai multor consumatori decât prevede proiectul instalației) sau de scurtcircuit. Întreruperea alimentării trebuie să aibă loc în timp util, înainte de apariția unei supraîncălziri. Astfel de dispozitive sunt: **siguranțele fuzibile** (fire sau lamele conductoare care se topesc când curentul depășește valoarea maximă pentru care au fost

proiectate, întrerupând circuitul și **relele termice** sau **magnetice** care asigură protecția la suprasarcină.

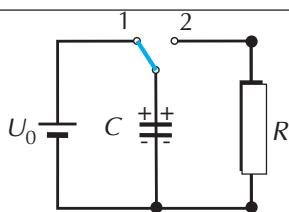
În afară de protejarea circuitelor și a instalațiilor electrice din laboratoarele școlare și din locuințele noastre trebuie respectate **reguli de protecție** a propriei persoane în timpul utilizării dispozitivelor și a circuitelor electrice.

- Nu umblăți la tabloul electric pentru a face legături. El nu trebuie atins după ce a fost pus sub tensiune!
- Orice modificare în circuitul electric pe care îl studiați trebuie făcută numai după ce ați deconectat sursa de alimentare!
- Evitați atingerea părților metalice ale montajelor aflate sub tensiune pentru a vă feri de electrocutare datorată scurtcircuitelor provocate de conductori cu izolația defectă!
- La cel mai mic semn de funcționare defectuoasă a circuitului electric cu care lucrați (zgomot nespecific, miros, încălzire nejustificată, etc.,) întrerupeți alimentarea prin deconectarea de la sursă!
- Nu alimentați circuitele electrice decât după ce au fost verificate și ați primit acordul cadrelor didactice!
- În caz de electrocutare aplicați instrucțiunile de prim-ajutor!
- În caz de incendiu, întrerupeți alimentarea și aplicați normele de stingerea incendiilor afișate în orice laborator!

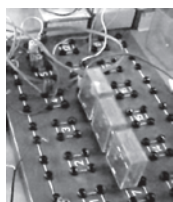
2

LUCRARE DE LABORATOR

Circuitul oscilant

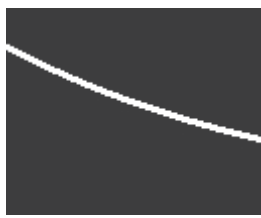


● Fig. 2.1.40 – Montaj experimental pentru investigarea comportamentului condensatorului în curent continuu



Investigarea comportamentului condensatorului în curent continuu

Vom utiliza un circuit alcătuit dintr-un condensator cu capacitatea de $47 \mu\text{F}$, o sursă de tensiune continuă - o baterie de buzunar de 4,5 V și un întrerupător. Întrucât în momentul conectării sale la sursă condensatorul funcționează ca un scurt-circuit - intensitatea curentului are valoare maximă, este obligatorie prezența unui rezistor în circuit. O valoare a rezistenței electrice de $4,4 \text{ k}\Omega$ este potrivită. Tensiunea la bornele condensatorului în timpul încărcării sale variază în funcție de timp ca în figura 2.1.41-a. La comutarea întrerupătorului pe poziția 2, se poate înregistra dependența de timp a tensiunii la bornele condensatorului din figura 2.1.41-b. Vizualizarea acestor semnale se poate face utilizând un osciloscop sau un sistem computerizat de achiziție de semnal.



● Fig. 2.1.41

După încărcare condensatorul întrerupe circuitul- intensitatea curentului are valoare nulă.

Investigarea comportamentului bobinei în curent continuu

Vom utiliza un circuit alcătuit dintr-o bobină cu inductanța de 1,4 H și o sursă de tensiune continuă - o baterie de buzunar de 4,5 V și un întrerupător. Intensitatea curentului din bobină imediat după conectarea sa la sursă variază în funcție de timp ca în figura 2.1.43-a. La deconectarea sursei se poate înregistra dependența de timp a intensității curentului din bobină ca în figura 2.1.43-b. Vizualizarea acestor semnale se poate face utilizând un osciloscop sau un sistem computerizat de achiziție de semnal.

După regimul tranzitoriu, valoarea tensiunii la bornele bobinei rămâne constantă. Dacă se măsoară valoarea intensității curentului electric se poate determina valoarea rezistenței electrice a bobinei. În cazul nostru ea a fost de 20Ω .

Investigarea comportamentului circuitului oscilant

Vom utiliza un circuit alcătuit din condensatorul cu capacitatea de 47 μF , bobina cu inductanța de 1,4 H și o sursă de tensiune continuă - o baterie de buzunar de 4,5 V. Întrerupătorul basculant va conecta inițial sursa cu condensatorul înseriat cu rezistorul de 4,4 k Ω pentru încărcarea acestuia. Când întrerupătorul va trece în poziția 2, începe descărcarea condensatorului pe bobină înseriată cu un reostat. În funcție de valoarea rezistenței variabile a reostatului se obțin următoarele variații ale tensiunii la bornele condensatorului ca în figura 2.1.45.

O bobină *reală* are nu numai inductanță ci și rezistență. De aceea, în cazul unui circuit oscilant real amplitudinea oscilațiilor scade în timp (datorită pierderilor prin efect Joule). *Oscilațiile dintr-un circuit oscilant real sunt oscilații amortizate*. O dată cu creșterea rezistenței electrice din circuit se vor obține oscilații din ce în ce mai amortizate (figura 2.1.45). Dacă se transmite circuitului, printr-o metodă oarecare, periodic, o energie egală cu cea pierdută prin efect Joule, se poate compensa amortizarea și în circuit se vor realiza oscilații (întreținute) neamortizate.

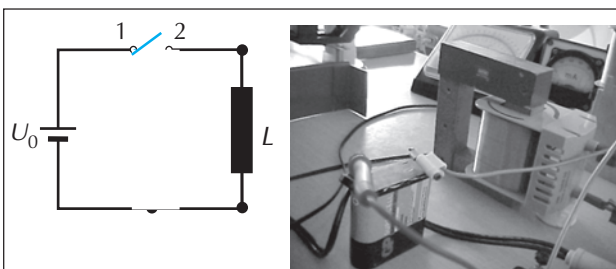


Fig. 2.1.42 – Montaj experimental pentru investigarea comportamentului bobinei în curent continuu

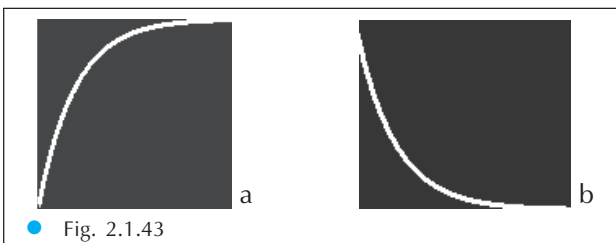


Fig. 2.1.43

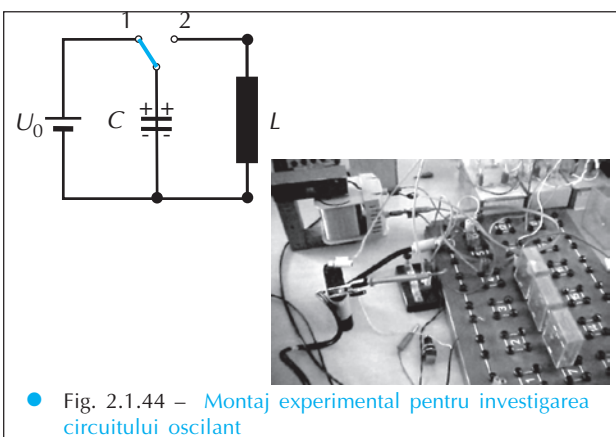


Fig. 2.1.44 – Montaj experimental pentru investigarea circuitului oscilant

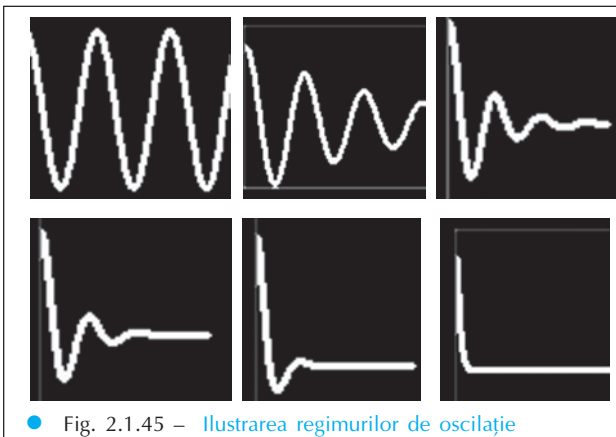
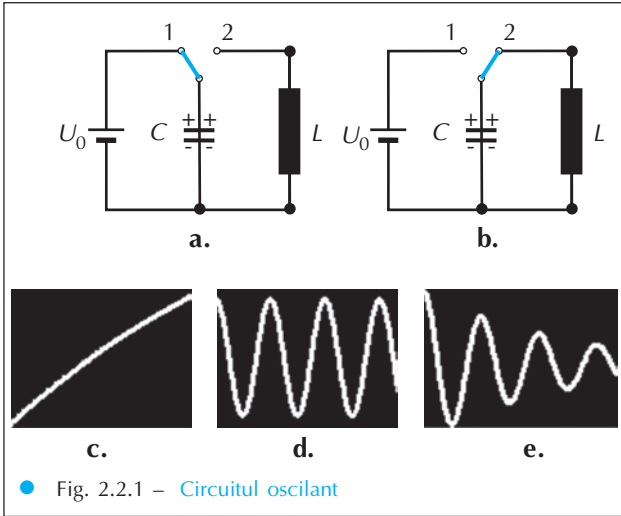


Fig. 2.1.45 – Ilustrarea regimurilor de oscilație



Experiment virtual: la adresa http://www.walter-fendt.de/ph14ro/oscirc_ro.htm poți investiga în mediu virtual comportamentul circuitului oscilant. Este o simulare care permite modificarea valorilor capacității, ale inductanței și respectiv ale rezistenței electrice. Încearcăți ilustrarea regimurilor de oscilație ca în figura 2.1.45.

2.2. Oscilații electromagnetice libere. Circuitul oscilant



Considerăm circuitul din figura 2.2.1-a, în care se presupune că bobina este ideală. Se aduce întrerupătorul în poziția 1 (figura 2.2.1-a). Circuitul din stânga se închide și condensatorul se încarcă electric. Pe armăturile sale se acumulează sarcinile $\pm C \cdot U_0$. În timpul încărcării condensatorului, dependența de timp a tensiunii la bornele sale este ilustrată în figura 2.2.1-c. Apoi, se aduce întrerupătorul K în poziția 2 (figura 2.2.1-b). Vom analiza în continuare fenomenele care se derulează începând din acest moment (figura 2.2.2). Ele vor fi comparate cu cele care au loc într-un oscilator mecanic.

La momentul inițial $t = 0$ (figura 2.2.2-a):

a) condensatorul este încărcat la tensiunea maximă U_0 ; energia sistemului constă exclusiv în energia câmpului electric din condensator, este $E_{el} = CU_0^2/2$;

b) sfera este deviată la elongație maximă A ; energia sistemului constă exclusiv în energia potențială elastică a resortului $E_p = kA^2/2$.

La momentul $t = T/8$ (figura 2.2.2-b):

a) condensatorul se descarcă prin bobină, tensiunea la bornele sale scade, intensitatea câmpului electric dintre armăturile sale scade; prin bobină trece un curent electric cu o intensitate I din ce în ce mai mare, care generează un câmp magnetic; energia sistemului este suma dintre energia câmpului electric din condensator și energia câmpului magnetic din bobină:

$$E = E_{el} + E_{mag} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 + \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad \left(= \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2 \right);$$

b) sfera se îndreaptă spre poziția de repaus cu o viteză v din ce în ce mai mare, energia sa cinetică fiind în creștere; resortul este din ce în ce mai puțin alungit, energia sa potențială elastică fiind în scădere; energia sistemului este suma dintre energia potențială elastică a resortului și energia cinetică a bilei:

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \left(= \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \right).$$

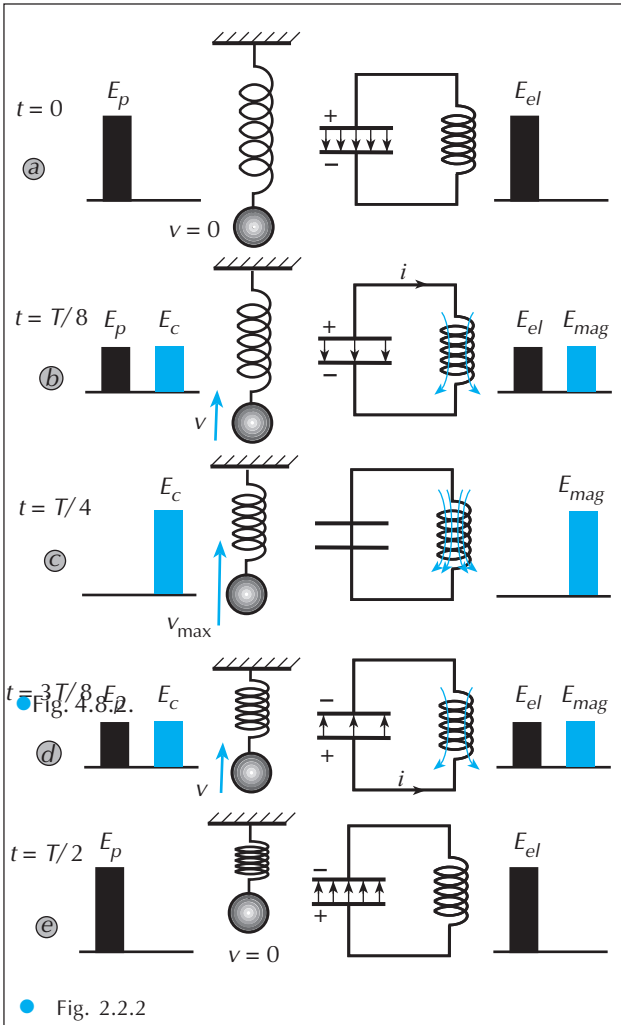
La momentul $t = T/4$ (fig. 4.8.2-c):

a) condensatorul este complet descărcat, intensitatea curentului atinge valoarea maximă I_m ; energia sistemului este concentrată în câmpul magnetic din bobină:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_m^2 \quad \left(= \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2 \right);$$

b) sfera trece prin poziția de echilibru cu viteza maximă v_0 ; energia cinetică este maximă, iar resortul este nedeformat; energia sistemului este dată exclusiv de energia cinetică a sferei:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \quad \left(= \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \right).$$



La momentul $t = 3T/8$ (figura 2.2.2-d):

a) intensitatea curentului din bobină începe să scadă fiind menținut de fenomenul de autoinducție, iar energia câmpului magnetic din bobină scade și ea; pe condensator încep să se acumuleze sarcini electrice (polaritatea armăturilor fiind inversă polarității inițiale), tensiunea la bornele condensatorului crește, iar energia câmpului electric dintre armăturile condensatorului crește și ea; energia sistemului este suma dintre energia câmpului electric din condensator și energia câmpului magnetic din bobină

$$E = E_{el} + E_{mag} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 + \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad \left(= \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2 \right);$$

b) sfera se îndepărtează de poziția de repaus cu o viteză v din ce în ce mai mică, energia sa cinetică fiind în scădere; resortul este din ce în ce mai comprimat, energia sa potențială elastică fiind în creștere; energia sistemului este suma dintre energia potențială elastică a resortului și energia cinetică a bilei

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \left(= \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \right).$$

La momentul $t = T/2$ (figura 2.2.2-e):

a) condensatorul este complet încărcat (cu polaritate inversă), tensiunea la bornele sale atinge valoarea maximă U_0 , energia câmpului electric dintre armăturile condensatorului este maximă; intensitatea curentului este nulă, în bobină nu există câmp magnetic; energia sistemului constă exclusiv în energia câmpului electric din condensator

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2;$$

b) resortul atinge comprimarea maximă, sfera este deviată cu elongația maximă A , viteza sa este nulă; energia sistemului constă exclusiv în energia potențială elastică a resortului

$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2.$$

În continuare procesul se repetă în sens invers.

Concluzie: Într-un circuit compus dintr-un condensator și o bobină ideală are loc, periodic, o transformare a energiei electrice în energie magnetică și invers. În circuit au loc oscilații ale câmpului electric din condensator și ale câmpului magnetic din bobină. Aceste oscilații sunt în strânsă corelație și, de aceea, se spune că în circuit au loc oscilații electromagnetice numite **oscilații proprii** ale circuitului, iar circuitul este numit **circuit oscilant**. În timpul descărcării condensatorului pe bobina ideală, dependența de timp a tensiunii la bornele sale este ilustrată în figura 2.2.2-d.

În figura 2.2.3 sunt prezentate graficele tensiunii și intensității ca funcții de timp pe parcursul unei perioade. Fenomenele care au loc în primul și în al treilea sfert de perioadă sunt generate de *descărcarea condensatorului*. Fenomenele care au loc în al doilea și în al patrulea sfert de perioadă sunt generate de *fenomenul de autoinducție din bobină*.

Deoarece tensiunea la bornele condensatorului este egală cu tensiunea la bornele bobinei și deoarece condensatorul și bobina sunt străbătute de același curent electric, rezultă că impedanțele condensatorului și bobinei sunt egale:

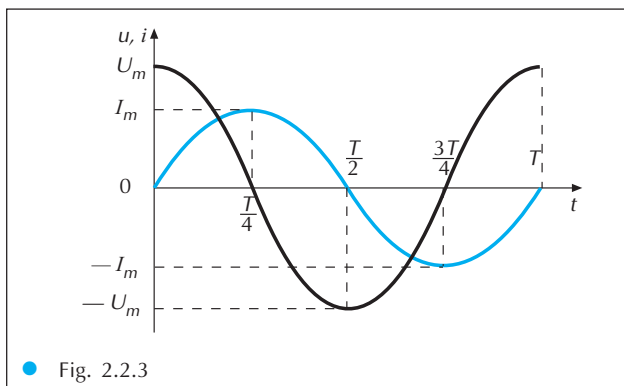
$$\frac{1}{C \cdot \omega} = L \cdot \omega.$$

De aici se obține pentru perioada oscilațiilor proprii expresia:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

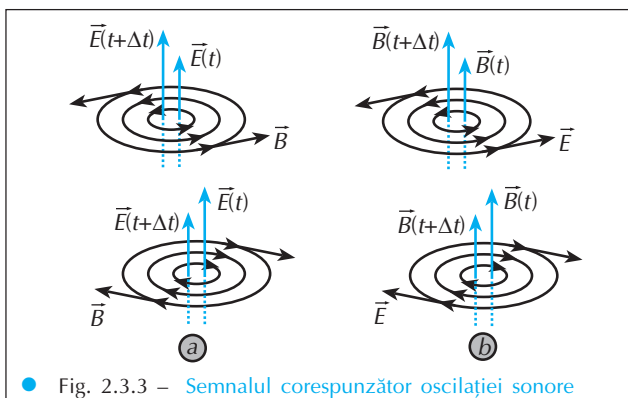
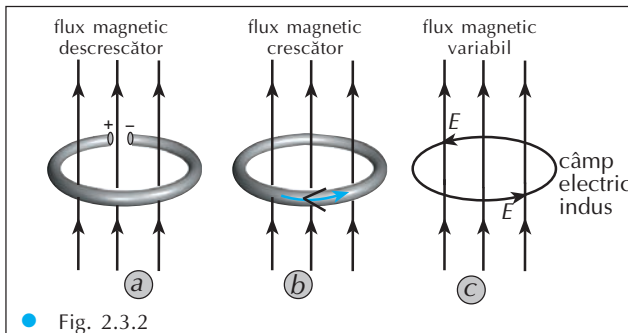
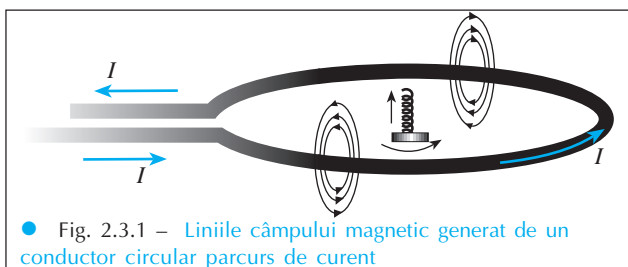
Această relație, numită **formula lui Thomson**, arată că perioada oscilațiilor proprii, numită **perioadă proprie**, depinde de valorile inductanței și capacității, dar *nu depinde de amplitudinea oscilațiilor*.

Aplicații: Bobinele primar și secundar ale transformatorului reprezintă două circuite oscilante cuplate magnetic. L_1 și L_2 sunt inductanțele celor două bobine, iar C_1 și C_2 sunt capacitățile electrice ale celor două înfășurări. Între cele două circuite se produce transfer de energie electromagnetică de la primar la secundar.



● Fig. 2.2.3

2.3. Câmpul electromagnetic. Unda electromagnetică



Ați învățat în clasa a 10-a că, un curent electric care parcurge o spiră conductoare generează un câmp magnetic având liniile de câmp circulare, ca în figura 2.3.1.

Observație: Sensul liniilor de câmp magnetic generat de un curent circular poate fi stabilit cu regula burghiului.

Tot în clasa a 10-a, la studiul fenomenului de inducție electromagnetică, ați învățat că, într-un circuit deschis străbătut de un flux magnetic variabil, se induce o tensiune electromotoare numită **tensiune indusă** (figura 2.3.2-a). Dacă circuitul străbătut de fluxul magnetic variabil este închis, în el se induce un curent electric numit **curent indus** (figura 2.3.2-b). Generarea curentului indus demonstrează existența unui câmp electric indus (pentru care nu este obligatorie prezența circuitului).

J.C. Maxwell a demonstrat teoretic și experimental că în jurul unui câmp magnetic variabil în timp apare un **câmp electric cu linii de câmp închise** (figura 2.3.2-c). Din acest motiv fenomenul de inducție electromagnetică se poate defini mai general ca generare a unui câmp electric cu linii de câmp închise în regiunea în care există un flux magnetic variabil în timp.

Aceste fapte arată că între câmpul electric și cel magnetic există o legătură profundă care se manifestă prin generarea unuia dintre ele atunci când celălalt variază (figura 2.3.3):

– un câmp electric variabil în timp generează un câmp magnetic cu linii de câmp închise în jurul liniilor de câmp electric (figura 2.3.3-a);

– un câmp magnetic variabil în timp generează un câmp electric cu linii de câmp închise în jurul liniilor de câmp magnetic (figura 2.3.3-b).

Se poate demonstra teoretic că inducția magnetică $\vec{B}$, a câmpului generat de un câmp electric variabil, este perpendiculară pe intensitatea $\vec{E}$ a câmpului electric generator (figura 2.3.3-a). În mod analog, intensitatea $\vec{E}$, a câmpului generat de un câmp magnetic variabil, este perpendiculară pe inducția $\vec{B}$ a câmpului magnetic generator (figura 2.3.3-b).

Definiție: Se numește **câmp electromagnetic** ansamblul câmpurilor electric și magnetic, care variază în timp și se generează reciproc.

Teoria câmpului electromagnetic a fost dezvoltată de James Clerk Maxwell (1831-1879), care a generalizat legile experimentale ale fenomenelor electrice și magnetice, formulând (1864) un sistem de ecuații, numite în prezent **ecuațiile lui Maxwell**.



Experiment virtual: la adresa http://www.walter-fendt.de/ph14ro/emwave_ro.htm puteți vizualiza o undă electromagnetică plană, liniar polarizată.

Unde electromagnetice

Pe baza sistemului său de ecuații Maxwell a prezis existența undelor electromagnetice, descoperite ulterior experimental de Heinrich Hertz (1857-1894).

Definiție: Se numește **undă electromagnetică** fenomenul de propagare a câmpului electromagnetic.

Pe baza celor studiate în secțiunea precedentă se poate înțelege calitativ mecanismul de propagare a câmpului electromagnetic. Un câmp electric variabil, E_1 , generează în vecinătatea sa un câmp magnetic variabil, B_1 . Câmpul magnetic variabil, B_1 , generează în vecinătatea sa un câmp electric variabil, E_2 , care generează un câmp magnetic variabil, B_2 etc.

Se poate demonstra teoretic că **într-o undă electromagnetică vectorii intensitate a câmpului electric, $\vec{E}$, și inducție a câmpului magnetic, $\vec{B}$, oscilează în plane perpendiculare între ele**. Mai mult, **vectorii $\vec{E}$ și $\vec{B}$, perpendiculari unul pe altul, sunt, amândoi, perpendiculari pe viteza $\vec{v}$ a unde** (figura 2.3.4).

Se poate arăta că între amplitudinile intensității câmpului electric, $\vec{E}_m$, și, respectiv, inducției magnetice, $\vec{B}_m$, există relația: $\vec{E}_m = \vec{B}_m \times \vec{v}$.

Se demonstrează că **oscilațiile câmpurilor electric și magnetic sunt în fază** (figura 2.3.5).

În clasa a 10-a ați învățat despre condensatoare. În spațiul dintre armăturile unui condensator încărcat există un câmp electric uniform. Energia câmpului electric dintre armăturile unui condensator este mărimea fizică exprimată prin expresia $W = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot V \cdot E^2$, unde ϵ este permitivitatea mediului dintre armături, iar $V = S \cdot d$ este volumul spațiului dintre armături.

Definiție: Se numește **densitate** energiei câmpului electric dintr-un condensator mărimea fizică definită prin relația:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot E^2.$$

Maxwell a demonstrat că în cazul unei unde electromagnetice, densitatea volumică medie de energie se poate scrie în forma $\bar{w} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot E_m^2 = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot B_m^2$.

Din aceste două relații și din relația $E_m = B_m \cdot v$ rezultă că viteza unei unde electromagnetice într-un mediu oarecare este dată de relația $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$.

În particular, viteza unei unde electromagnetice în vid, notată c , este $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Din aceste două relații rezultă că $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$.

Undele electromagnetice au aplicații multiple în telecomunicații, radiolocație, radioastronomie, medicină etc.

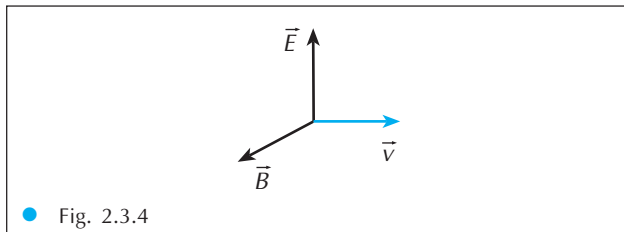


Fig. 2.3.4

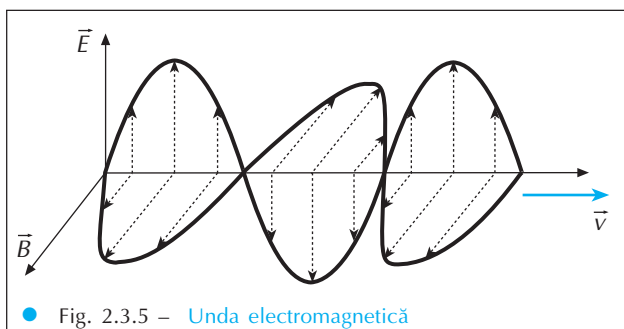


Fig. 2.3.5 – Unda electromagnetică

2.4. Clasificarea undelor electromagnetice

Dacă utilizăm drept criteriu frecvența, undele electromagnetice se pot clasifica în:

1. *Unde radio* – au domeniul de frecvență între câteva zeci de Hz și 1 GHz, respectiv lungimea de undă de la câțiva km la 30 cm. Sunt utilizate în transmisii radio și TV unde se grupează în:

- unde lungi: $600 \text{ m} < \lambda < 2 \text{ km}$
- unde medii: $100 \text{ m} < \lambda < 600 \text{ m}$
- unde scurte: $10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$
- unde ultracurte: $1 \text{ cm} < \lambda < 10 \text{ m}$

2. *Microunde* – au domeniul de frecvență între 1 GHz și $3 \cdot 10^{11}$ Hz, respectiv lungimea de undă între 30 cm și 1 mm. Sunt generate în circuite electronice și se utilizează în telecomunicații, radare etc.

3. *Radiație infraroșie* – are domeniul de frecvență între $3 \cdot 10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$ Hz, respectiv, lungimi de undă între $10^{-3} - 7,8 \cdot 10^{-7}$ m. Apare în timpul încălzirii corpurilor.

4. *Radiație vizibilă* – are domeniul de frecvență între $7,6 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{16}$ Hz. Ea poate impresiona retina ochiului uman normal producând la nivelul cortexului senzația de lumină.

5. *Radiație ultravioletă* – are domeniul de frecvență cuprins între $10^{15} - 10^{16}$ Hz iar lungimea de undă între $3,8 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-10}$ m. Apare în timpul descărcărilor electrice în gaze. Soarele este cea mai puternică sursă de ultraviolete.

6. *Radiația X (Röntgen)* – are domeniul de frecvență cuprins între $3 \cdot 10^{16} - 10^{20}$ Hz, iar lungimea de undă între $10^{-10} - 5 \cdot 10^{-12}$ m. Apare în tuburi speciale în care un fascicul de electroni accelerați la zeci de mii de volți bombardează un electrod.

7. *Radiația γ* – are domeniul de frecvență între $3 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{22}$ Hz, iar lungimea de undă $5 \cdot 10^{-12} - 10^{-16}$ m. Este emisă de către nucleeele atomilor.

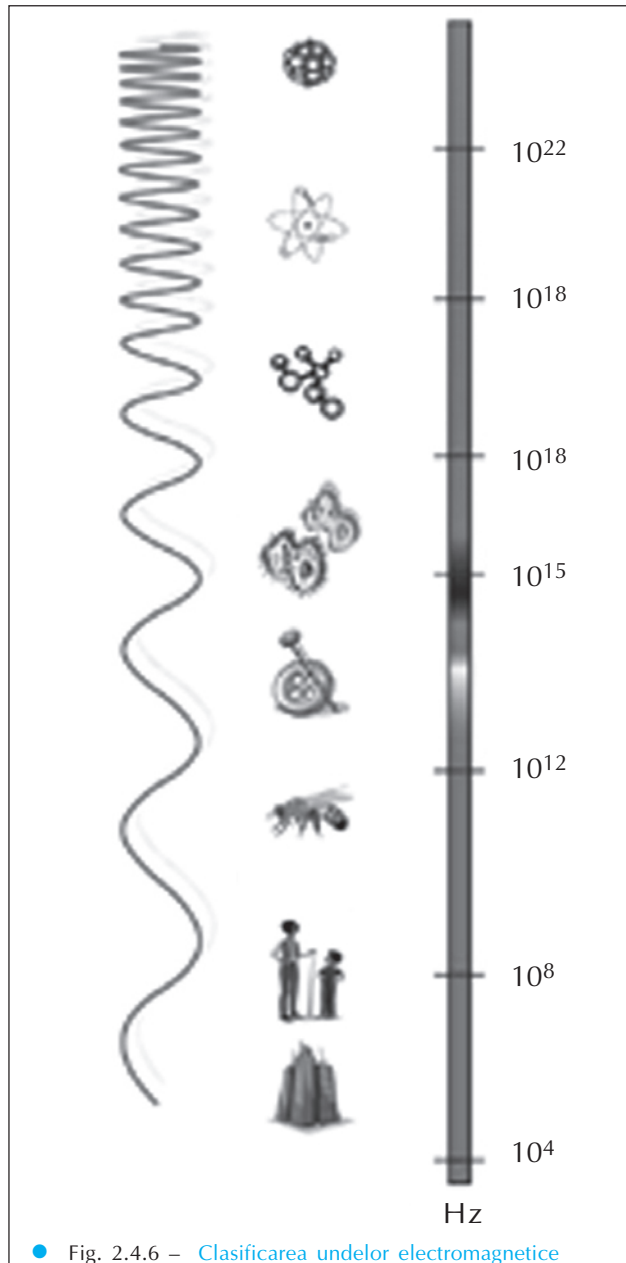
Dacă utilizăm drept criteriu modul de emisie există:

1. *Unde hertziene* – apar prin oscilația electronilor în circuite oscilante LC sau în circuite cu „cavități rezonante”.

2. *Radiația termică* – apare la transformarea energiei interne a corpurilor în energie electromagnetică.

3. *Radiația de frânare* – apare la frânarea bruscă a electronilor în câmpul electric al nucleului atomic.

4. *Radiația sincrotronică* – apare în timpul mișcării electronilor în câmpuri magnetice.



● Fig. 2.4.6 – Clasificarea undelor electromagnetice

Surse de unde electromagnetice

Undele electromagnetice sunt unde transversale care călătoresc cu viteza luminii. Sunt des întâlnite și sunt produse de către diferite dispozitive: de la încălzitoarele banale până la tot felul de circuite electronice, de la becurile cu incandescență până la reacțiile nucleare. Ele pot fi detectate de către ochi, filmul fotografic, medii pentru stocare digitală a imaginii – în cazul radiațiilor din vizibil; pielea – în cazul radiațiilor infraroșii; receptoare radio și TV – pentru undele radio; filme speciale – pentru radiația X.

Undele lungi: microunde, radio și TV sunt emise de către dispozitive electronice pe care le vom descrie în lecția următoare. Curentul alternativ poate crea și el vibrații de aceeași frecvență cu frecvența proprie.

Radiația din domeniul vizibil poate fi emisă de surpurile încălzite la temperaturi mai mari decât 700 °C, corpuri care devin incandescente. Soarele, flacăra, filamentul becurilor generează radiație luminoasă.

Radiația din domeniul infraroșu apare în aceleași condiții de încălzire a corpurilor, chiar și la temperaturi sub 700 °C.

Radiația X apare la interacțiunea electronilor de viteză foarte mare cu atomi (de metal, de exemplu), în tuburi de construcție specială.

Radiațiile γ sunt generate în reacțiile nucleare care pot avea loc în bombe atomice, în exploziile solare etc.

Interacțiunea radiațiilor electromagnetice cu sistemele biologice

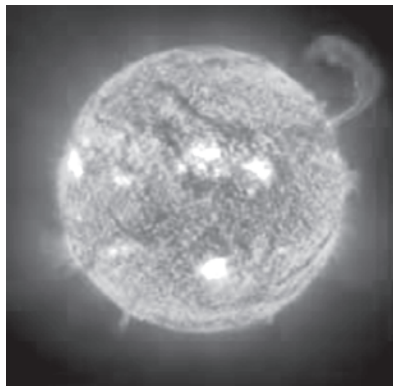
Prin sisteme biologice vom înțelege celule vii, plante, animale sau oameni. Interacțiunea radiațiilor cu organismele vii depinde de intensitatea lor și de cantitatea de energie pe care o poartă. Ca regulă de clasificare, undele electromagnetice cu frecvență mică sunt numite *câmpuri electromagnetice*, iar cele cu frecvență mare sunt numite *radiații electromagnetice*.

Potrivit frecvenței și energiei lor, radiațiile pot fi:

- **radiații ionizante** – radiații X și γ –, care la trecerea prin mediu „smulg” electroni de la atomi producând ionizări care au potențial mutagen puternic.
- **radiații neionizante** – au energia prea mică pentru a putea produce smulgerea electronilor din atomi. Este cazul radiațiilor ultraviolete, vizibile, infraroșii, radio și al microundelor. Ele pot provoca încălzirea sistemelor, stimularea unor reacții chimice de alterare sau inducerea de curenți electrici la nivel de țesuturi și celule.

Expunerea organismelor vii la radiații electromagnetice nu le afectează întotdeauna sănătatea. De multe ori este chiar indicată. Spre exemplu încălzirea organismelor la radiația solară în zilele reci, sinteza vitaminei D în piele sub acțiunea radiației solare etc.

Există însă situații de expunere la radiații electromagnetice care pot să afecteze sănătatea. Exemplu: insolația provocată de expunerea prelungită la radiația solară sau chiar creșterea riscului de apariție a cancerului de piele.



● Fig. 2.4.7 – Soarele, cea mai cunoscută sursă de radiații electromagnetice



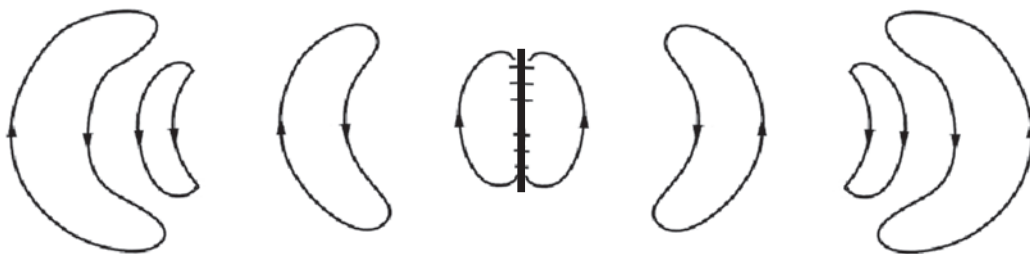
● Fig. 2.4.8 – Sursă de unde radio-TV



● Fig. 2.4.9 – Tub Roentgen – sursă de radiații X

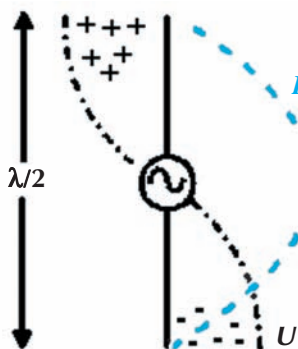
2.5. Aplicații

Antena



● Fig. 2.5.1 – Propagarea undelor electromagnetice de la un dipol semiundă

2



● Fig. 2.5.2 – Distribuția tensiunii și a curentului la dipolul semiundă

Emisia și recepția semnalului radio-TV sub formă de unde electromagnetice necesită existența unor antene. Telefoanele mobile recepționează semnale emise tot prin intermediul antenei. Antenele pot avea forme și mărimi diferite, de la un fir metalic (ca la autovehicule), la castroanele uriașe ale antenelor de satelit. Cel mai cunoscut circuit utilizat pentru emisia de unde electromagnetice în spațiu este un circuit oscilant deschis, alimentat de un generator de oscilații electromagnetice. El poartă denumirea de **dipol**. La mijlocul conductorului liniar se intercalează o bobină. În zona spațială din vecinătatea dipolului există un câmp electromagnetic care oscilează periodic, cu frecvența curentului alternativ din dipol. Sarcinile electrice de pe dipol dau naștere unui câmp electric care se va suprapune cu câmpul generat de variația câmpului magnetic produs de curentul din dipol. Atunci când intensitatea curentului din conductor are valoarea zero, apare un câmp electric cu linii închise

care se desprinde dipol și începe să se propage. În jumătatea următoare a perioadei de oscilație se va repeta procesul, dar câmpurile vor avea sensurile inversate (figura 2.5.1).

În ceea ce privește valorile mărimilor caracteristice antenei, inductanța unui metru de conductor are circa $2 \mu\text{H}$, iar capacitatea 5 pF . Frecvența proprie de oscilație a antenei este invers proporțională cu lungimea firului. Dacă antena este constituită dintr-un fir cu lungimea egală cu jumătate din lungimea de undă proprie, ea se numește **dipol semiundă**. În dipolul semiundă apar unde staționare cu noduri de curent la capete și cu un ventru la mijloc (figura 2.5.2). În prima jumătate de perioadă curentul prin fir are un sens, iar în a doua are sens contrar. Potențialul antenei este distribuit și el neuniform de-a lungul antenei. Tensiunea reprezintă, în cazul dipolului semiundă, diferența de potențial dintre un punct dat și simetricul lui față de jumătatea firului. Astfel, la mijloc, în dreptul bobinei de cuplaj cu generatorul, există un nod de tensiune, iar la capete ventre. Curentul și tensiunea din antenă sunt defazate cu $\pi/2$ radiani.

Procesul de acordare a antenei pe diferite lungimi de undă constă în modificarea lungimii firului, deci a propriei lungimi de undă. În practică, mărirea lungimii firului echivalează cu introducerea în circuit a unei bobine, iar micșorarea lungimii cu introducerea unui condensator. Dispozitivele electronice pe care le vom descrie în continuare sunt echipate cu antene care conțin condensatoare variabile. Prin modificarea ariei suprafeței comune a armăturilor se modifică în mod corespunzător lungimea de undă proprie a antenei, deci se produce rezonanța cu emițătorul dorit.

Radioul

Semnalul electric obținut din conversia sunetului emis în fața microfonului poate fi transmis la distanțe foarte mari fără a utiliza fire conductoare. Pentru aceasta este necesar un emițător-stația postului de radio, și un receptor-aparatul de radio. Dacă valoarea frecvenței este de ordinul MHz (10^6 Hz), atunci ne aflăm în domeniul undelor radio. Unda sinusoidală poate fi emisă de un circuit care conține un condensator și o bobină, numit circuit oscilant. El va fi conectat cu antena stației radio. Semnalul electric astfel obținut, determină apariția unui curent electric variabil în antena de emisie care va genera o undă electromagnetică cu variații identice în timp. Dacă valoarea frecvenței este de ordinul MHz, atunci ne aflăm în domeniul undelor radio. Unda sinusoidală din figura 2.5.3 poate fi emisă de un circuit oscilant conectat cu antena stației radio.



Fig. 2.5.3



Fig. 2.5.4



Fig. 2.5.5

2

Ce se întâmplă cu sunetele în stația radio?

Ele sunt preluate de microfonul care generează un curent electric variabil. Acest semnal electric poate fi suprapus („înfășurat”) peste semnalul sinusoidal descris anterior și va rezulta ceea ce se observă în figurile 2.5.4 și 2.5.5. Procedul se numește **modulație** și se poate face modulație de amplitudine (figura 2.5.4) sau de frecvență (figura 2.5.5). Aceasta necesită circuite electrice specializate.

Semnalele rezultate în urma modulației călătoresc prin spațiu cu viteza luminii și pot fi recepționate cu un aparat de radio (figura 2.5.6) acordat pe frecvența postului dorit.

Aparatul de radio conține o antenă care recepționează semnalul modulat prin acordarea pe frecvența dorită cu ajutorul circuitului oscilant format dintr-o bobină și condensator de capacitate variabilă. Semnalul este supus procesului invers se separare a unei purtătoare de semnalul care va genera sunetul, proces numit **demodulare**. Schema simplificată a unui receptor radio se află în figura 2.5.7.

Semnalul electric separat de unda purtătoare este apoi amplificat și trimis către difuzor (figura 2.5.7) unde ați învățat ce se va întâmpla cu el pentru a fi transformat în sunet.

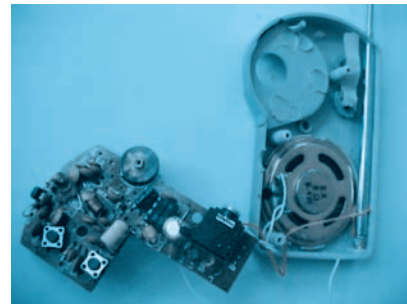


Fig. 2.5.6

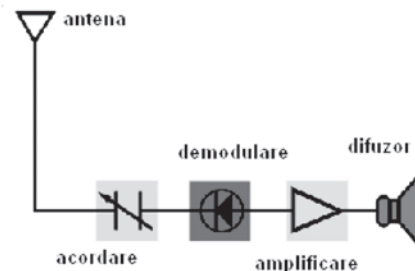
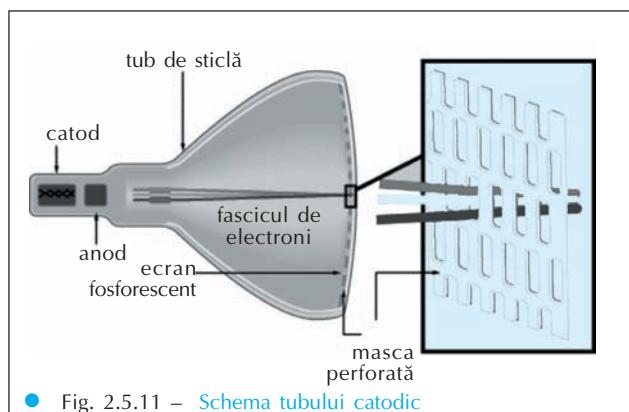
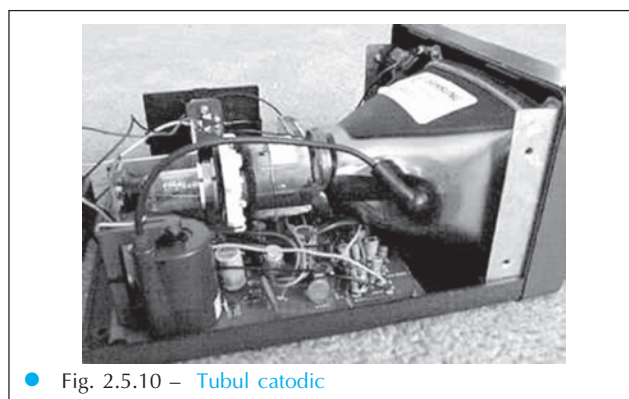
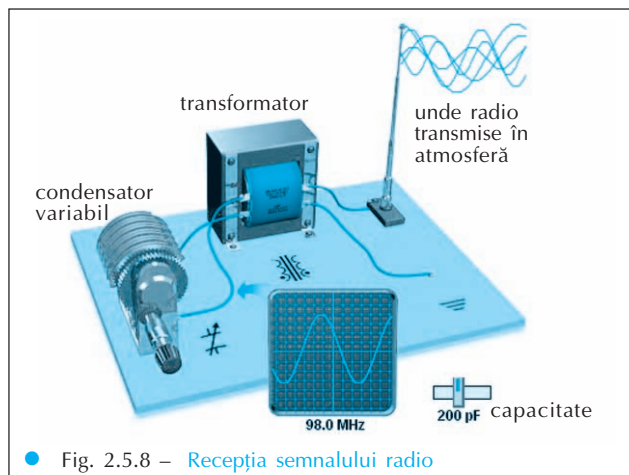


Fig. 2.5.7 – Aparat de radio – schema simplificată

Acordarea radioului pe frecvența unui post – funcționarea în regim de rezonanță a circuitelor de curent alternativ

Această operație de „izolare” a unei electromagnetice cu o anumită frecvență pe care se face emisia postului preferat de radio sau TV, se face cu ajutorul unei antene cuplate cu un circuit LC. Condensatorul acestui circuit are capacitatea variabilă. Acordarea pe frecvența dorită presupune rotirea unui buton care modifică de fapt aria suprafeței comune a armăturilor. Efectul obținut este variația capacității electrice din circuitul oscilant, deci modificarea frecvenței sale proprii până când coincide cu frecvența postului dorit. Unda emisă de antena



postului de radio „călătorește” prin aer și este preluată de antena cuplată între bobina primară și pământ, sub formă de curent variabil. Prin inducție electromagnetică, în bobina secundară apare un curent electric cu sens opus. Recepția în condiții optime a postului de radio se face atunci când se atinge rezonanța în acest circuit format din bobina secundară și condensatorul variabil (figura 2.5.8).

Televiziunea

Pentru a înțelege modul în care funcționează televizorul, modul în care primește informația și cum o transpune sub formă de imagine pe ecran ar trebui să aflați mai întâi cum percepe creierul nostru imaginile statice: le assemblează din pătrate cu dimensiuni foarte mici pe care le numim **pixeli**. Rezoluția unui monitor se poate seta la 800 x 600 pixeli sau la 1024 x 768 pixeli. În ceea ce privește imaginile dinamice (animațiile sau filmele), creierul nostru are capacitatea de a percepe imaginile statice derulate cu o anumită viteză ca pe un film continuu. Sunt suficiente 24 de cadre pe secundă, ceea ce creează creierului senzația de mișcare.

Ochiul are nevoie de 0,15 secunde pentru a primi o imagine și a transmite impulsul la creier.

Acțiunile care au loc în studioul unei televiziuni sunt preluate de către camerele de luat vederi și transformate în semnale electrice, apoi cu o metodă asemănătoare cu cea folosită de radio este emis semnalul modulat pe o anumită frecvență, prin intermediul unei antene. Semnalele vor călători până vor ajunge la receptor, la televizor, unde sunt recepționate prin acordarea pe frecvența postului dorit, demodularea semnalului și crearea imaginii și a sunetului transmise.

Piesa de bază a televizorului este tubul catodic (figura 2.5.10) în care se află:

- **catodul** care emite electroni prin încălzire;
- **anodul** prevăzut cu un mic orificiu central prin care trec electroni accelerați de câmpul electric dintre catod și anod;
- **ecranul fosforescent** pe care vor apărea puncte luminoase atunci când va fi atins de fasciculele de electroni;
- **bobinele de deflexie**, care creează câmpul magnetic ce va produce deviația fasciculelor de electroni atât pe verticală cât și pe orizontală;
- **masca perforată** care asigură buna rezoluție a imaginii și se întâlnește în cazul televizoarelor color.

Transmisia și reconstituirea imaginii în cazul televiziunii color este posibilă datorită faptului că prin combinarea celor trei culori fundamentale: roșu, verde și albastru va rezulta lumina albă.

În cazul televiziunii alb-negru, o cameră video captează doar nivelul mediu de strălucire al luminii prezente, fiindu-i necesar un singur tub analizator de imagini. Pentru televiziunea în culori sunt necesare trei astfel de tuburi, care să capteze cantitatea din fiecare dintre culorile menționate, conținute în scena din fața camerei de luat vederi. De multe ori, este prezent și al patrulea analizor care funcționează la fel ca la televiziunea monocromă.

Pentru reconstituirea imaginii pe ecranul televizorului, acesta este scanat de 60 de ori în fiecare secundă de către fasciculele de electroni care pictează întâi numerele impare de linii orizontale, apoi pe cele pare. Practic, cele 525 de linii sunt „pictate” de 30 de ori în fiecare secundă, astfel încât fasciculele electronice baleiază în total 15750 de linii pe secundă. Din acest motiv atunci când televizorul funcționează, unele persoane pot percepe un sunet de frecvență 15750 Hz, asemănător cu un țuit.

Semnalele transmise de televiziuni conțin informații despre intensitatea fascicului electronic, precum și despre modul în care acesta va baleia stânga-dreapta, respectiv sus-jos, liniile de pe ecran pentru a reconstitui imaginea. Ele se numesc **semnale video compozite**.

Dacă camerele de luat vederi color au trei tuburi analizoare pentru roșu, albastru și verde, atunci și receptoarele TV vor avea câte un fascicul electronic pentru fiecare culoare fundamentală. Ele se vor mișca simultan pe ecran. Ecranul va avea trei straturi fosforescente, pentru fiecare culoare câte unul.

Detectorul de metale

Funcționarea lui se bazează pe fenomenul de inducție electromagnetică. Componenta principală este o bobină căreia i se aplică pulsuri de curent. Acestea vor genera un câmp magnetic (figura 2.5.13) care va interacționa cu obiectele metalice ce trebuie detectate: moneda din figură. Urmarea acestei interacțiuni este apariția curenților turbionari (ciclici) în obiectul detectat. Ei vor genera la rândul lor propriul câmp magnetic (ilustrat în figura 2.5.13), ale cărui variații vor produce alte pulsuri de curent în bobină. Aceste pulsuri de curent vor fi transformate în semnale sonore care să indice utilizatorului prezența metaului.

Detecția în infraroșu

Tehnologia mileniului al treilea permite vizualizarea unei persoane aflate până la circa 180 m, chiar în condiții de întuneric beznă. Este necesară utilizarea unor echipamente adecvate. Unele dintre ele se bazează pe

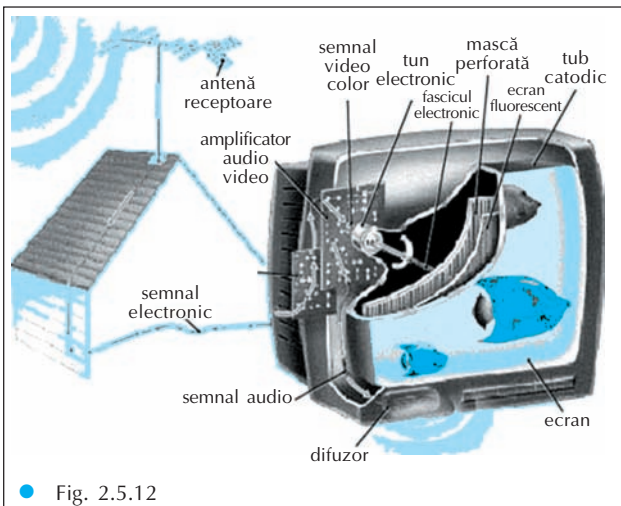


Fig. 2.5.12

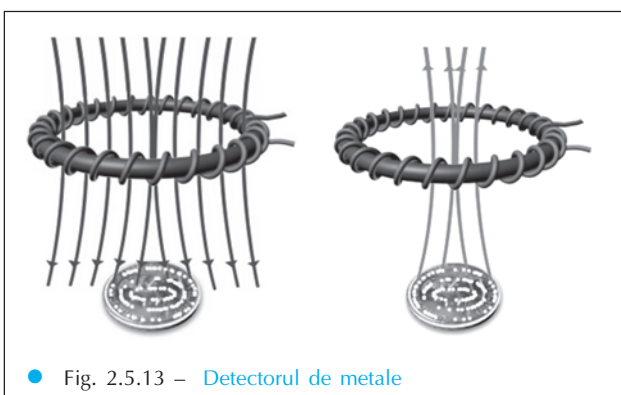


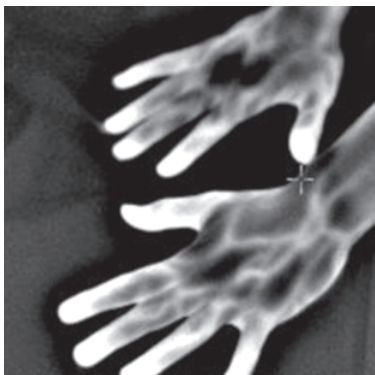
Fig. 2.5.13 – Detectorul de metale



Fig. 2.5.14 – Harta termică a organismului uman



Fig. 2.5.15 – Sistem de înregistrare a imaginilor termice



● Fig. 2.5.16 – Sistemul vascular al mâinilor văzut în IR



● Fig. 2.5.17 – Imagine IR a unei clădiri



● Fig. 2.5.18 – Imagine IR pentru supraveghere zonală



● Fig. 2.5.19 – Imaginea șoselei în vizibil (stânga) și în IR (dreapta)

colectarea și amplificarea radiației slabe, chiar și din zona infraroșie a spectrului. Altele captează energia emisă în zona de infraroșu a spectrului, de către corpurile vii sau de către corpuri încălzite. Pot capta chiar și radiația infraroșie reflectată de către obiecte.

Radiația infraroșie se poate clasifica în:

- **IR apropiat** cu lungimea de undă între 0,7-1,3 micrometri;
- **IR mijlociu**, cu lungimea de undă între 1,3-3 micrometri. Este utilizată de regulă la telecomenzi;
- **IR îndepărtat**, cu lungimea de undă între 3-30 micrometri. Este radiația emisă de obiectele încălzite.

Aceasta din urmă poate produce „imagini termice” numite și termograme.

Ele sunt de fapt rezultatele scanării rapide a unui domeniu și ale măsurării temperaturii câtorva mii de puncte din câmpul vizual al dispozitivului. Acesta este de fapt un mănunchi de elemente detectoare de IR. Ele primesc informații prin intermediul unei lentile speciale. Termograma creată este transformată în impulsuri electrice care sunt trimise unui procesor de semnal. El va prelucra impulsurile și va afișa pe un monitor o imagine colorată în funcție de intensitatea radiației infraroșii captate inițial.

În figura 2.5.14 este prezentat un dispozitiv care monitorizează temperatura corpului uman împreună cu imaginea pe care o creează.

În figura 2.5.15 puteți vedea unul dintre cele mai populare sisteme de înregistrare a imaginilor termice, împreună cu imagini realizate de acesta.

În afara vederii pe întuneric aceste dispozitive pot servi pentru realizarea de imagini medicale (ex.: sistemul vascular al mâinilor). O altă aplicație ar fi detectarea unor nereguli care afectează funcționarea unor circuite integrate, cum ar fi scurt-circuitarea unui pin.

Tot prin analiza imaginilor termice ale clădirilor se pot detecta eventualele zone în care se produc infiltrații de apă. Acestea sunt mai reci, deci mult mai închise la culoare (figura 2.5.17).

În figura 2.5.18 sunt prezentate câteva imagini realizate în întuneric total pentru supravegherea unor anumite zone.

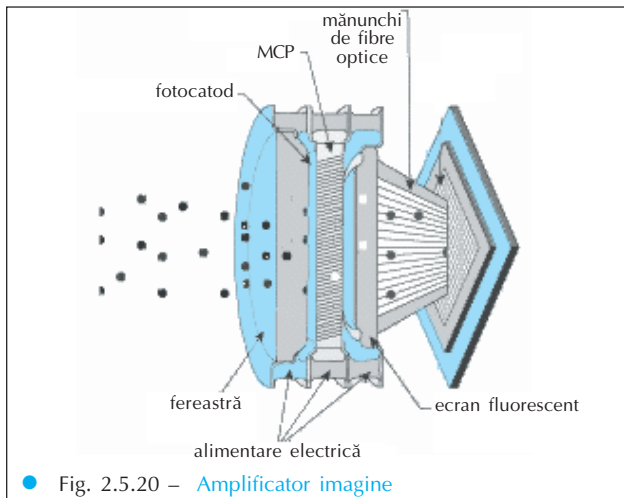
Aplicație deosebită a acestor aparate de înregistrare în infraroșu a imaginilor o constituie utilizarea lor în timpul conducerii autovehiculelor pe timp de noapte, când vizibilitatea redusă provoacă multe accidente. Mărește zona de vizibilitate a șoselei de până la 5 ori față de faza scurtă a farurilor automobilului. În figura 2.5.19 este

prezentată o fotografie în vizibil a străzii făcută de la volanul automobilului pe timpul nopții și alături aceeași zonă văzută în IR.

Cealaltă metodă a colectării și a amplificării radiațiilor utilizează un dispozitiv de amplificare a imaginilor compus din:

- fotocatodul care emite electroni sub acțiunea radiației primite;
- un disc subțire de sticlă prevăzut cu multe canale subțiri și cu câte un electrod pe fiecare față a sa. El are rol de multiplicare a numărului de electroni prin emisie secundară în cascadă;
- ecran fosforescent pe care se va forma imaginea cu tentă verzuie atunci când electronii vor ajunge la el.

Acest dispozitiv este utilizat împreună cu o lentilă obiectiv și una ocular.



● Fig. 2.5.20 – Amplificator imagine

2

Cuptorul cu microunde

La baza funcționării cuptorului cu microunde stă mecanismul descris în continuare.

Microundele au proprietatea de a fi rapid absorbite de către moleculele de apă și de către alte molecule polare care se întâlnesc în alimente. Urmare a absorbției microundelor moleculele vor începe o mișcare rapidă de vibrație în timpul căreia vor întâmpina forțe de frecare cu moleculele vecine.

Efectul produs de către aceste forțe va consta în încălzirea produsului, respectiv fierberea sau coacerea sa.

Ce se întâmplă cu un aliment în interiorul cuptorului cu microunde?

Coacerea sa va începe de la exterior către straturile interne, întrucât microundele au parcursul scurt în mediu, de ordinul milimetrilor. El depinde de densitatea materialului întâmpinat și de conductivitatea lui termică.

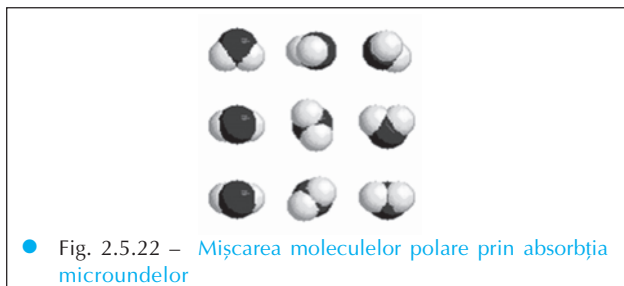
Ce intră în componența cuptorului cu microunde?

Problema principală este controlul energiei microundelor. Pentru aceasta el este echipat cu un timer care va regla timpul iradierii, un sistem pentru controlul fluxului de radiație și câteva siguranțe și dispozitive de protecție.

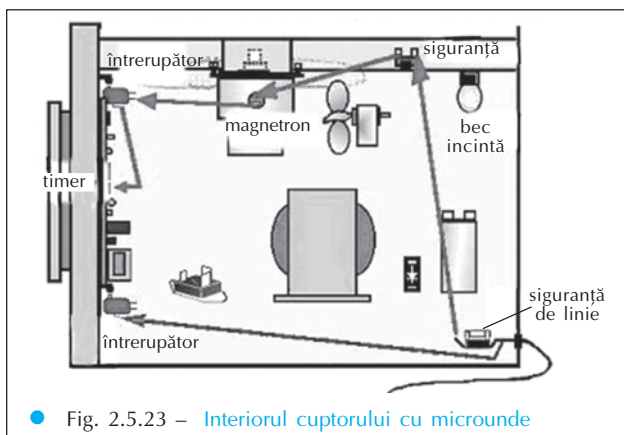
Microundele sunt produse prin conversia energiei electrice cu tensiune înaltă. Aici este necesar un transformator care să ridice valoarea tensiunii de la 220 V la circa 3 000 V. Dispozitivul care preia energia electrică pentru a genera microunde se numește **magnetron**. Este asemănător cu diodele de tip tub care existau în anii 60-70. Între anod și catod (filament) se aplică un câmp magnetic. Altă componentă a magnetronului o reprezintă antena: o buclă conectată cu anodul și cuplată cu ghidul de undă în care ea transmite energia microundelor către preparatul din



● Fig. 2.5.21 – Cuptor cu microunde



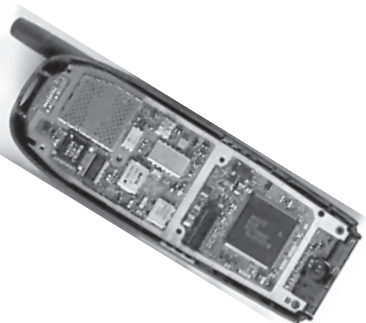
● Fig. 2.5.22 – Mișcarea moleculelor polare prin absorbția microundelor



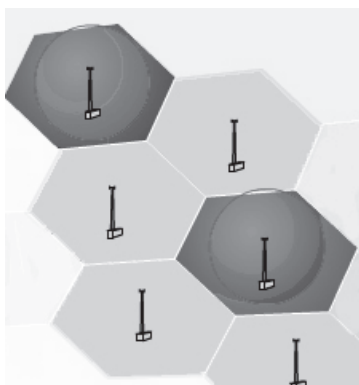
● Fig. 2.5.23 – Interiorul cuptorului cu microunde



● Fig. 2.5.24 – Magnetronul



● Fig. 2.5.25 – Telefonul mobil



● Fig. 2.5.26 – Celule de transmisie în telefonia mobilă



● Fig. 2.5.27 – Sistem pentru monitorizarea bebelușilor

cuptor. Electronii emiși de catodul încălzit prin aplicarea unei tensiuni de 3-4 V ca se vor mișca spre anod fiind dirijați de câmpul electric. Sub acțiunea câmpului magnetic aplicat simultan ei nu vor parcurge distanța dintre catod și anod în linie dreaptă, ci vor efectua și mișcări de vibrație. În acest timp se vor emite microunde cu frecvența de 2450 Hz.

Ce efecte are utilizarea microundelor pentru prepararea alimentelor?

Potrivit literaturii de specialitate utilizarea frecvență a microundelor poate avea efecte nocive asupra sănătății. Sunt citate favorizarea apariției tulburărilor digestive și ale aparatului excretor.

Statistic s-a observat incidența crescută a cancerelor stomacale și intestinale la consumatorii de hrană preparată la microunde.

Acest mod de preparare duce la distrugerea vitaminelor din complexul B, C și E, la scăderea valorii nutriționale a alimentelor. Se pare că nu este unul dintre cele mai potrivite modalități de preparare a rădăcinoaselor deoarece favorizează apariția radicalilor liberi din moleculele care intră în compoziția lor. Nici pentru carne nu este indicată utilizarea cuptorului cu microunde.

Telefonul mobil

Conține atât o antenă pentru transmisia semnalului, cât și un receptor. Ele lucrează simultan pe frecvențe diferite și pot fi acordate pe un domeniu larg de frecvențe. Caracteristicile fundamentale ale celulelor sunt: modulația de frecvență, 1664 de frecvențe / 2 furnizori pe aria de acoperire, puterea transmisă de 3 W.

Aria de acoperire conține turnuri amplificatoare cu raza de acțiune între 3-5 km, în funcție de relief. Zona deservită de un turn se numește celulă.

Părțile componente ale unui telefon celular sunt: placa de bază, antena, display-ul cu cristale lichide, tastatura, microfonul, boxa și bateria de alimentare.

Sistemul pentru monitorizarea bebelușilor

Constă dintr-un transmițător care însoțește bebelușul și un receptor care va însoți părintele. Transmițătorul este o ministație radio, iar receptorul un aparat radio. Raza de acțiune se întinde până la 60 m. El poate lucra pe două frecvențe, are modulație de amplitudine, iar puterea transmisă atinge 0,25 W.

Cea mai banală telecomandă, pentru televizor, pentru închiderea centralizată a unor uși, telefonul fără fir, jucăriile telecomandate, radarele, comunicațiile prin satelit, accesul wireless la internet, toate se bazează pe emisia și pe recepția de unde din domeniul radio.

Radiolocație

Se desfășoară după un principiu asemănător cu sonarul, diferența constând în utilizarea undelor electromagnetice pentru identificarea prezenței și pentru localizarea unor obiecte.

Un **radiolocator** este compus dintr-un emițător, un receptor și un sistem de antene. Emițătorul emite trenuri de unde, funcționând în impulsuri. În pauzele de emisie, antena se cuplează cu receptorul și captează undele reflectate. Antena se află în focarul unei oglinzi metalice concave și unidirecționale, deoarece fasciculele de unde radio emise trebuie să fie cât mai subțiri. Se înregistrează intervalul de timp scurs între emisia semnalului de explorare și recepția semnalului reflectat. Acesta este intervalul dintre apariția pe ecranul osciloscopului receptorului a două pulsuri ale spotului luminos. Știindu-se viteza de propagare a undelor radio, 300 000 km/s, se poate determina distanța până la obiectul detectat. Radiolocatoarele se găsesc la bordul avioanelor și al vapoarelor, pentru a le facilita orientarea în perioadele cu vizibilitate redusă. Decolarea și aterizarea avioanelor este monitorizată în aeroporturi tot cu radiolocatoare.

Sunt utilizate și în meteorologie pentru a studia dinamica norilor, în scopul emiterii prognozelor meteorologice.

Radioastronomia

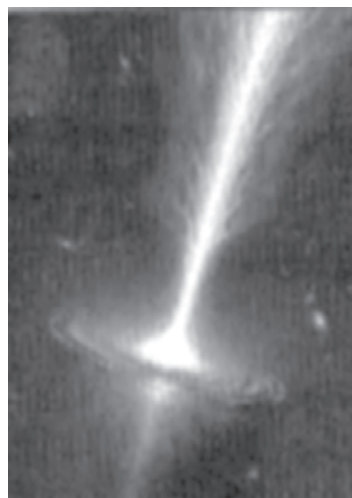
Este ramura astronomiei care studiază Universul pe baza undelor electromagnetice din domeniul radio, emise de către corpurile cerești. A apărut o dată cu descoperirea radiației radio a Căii Lactee, în anul 1931. Cele mai multe radiații electromagnetice de origine extraterestră ajung la noi de la Soare. El emite atât în domeniul vizibil, cât și în infraroșu, radiații X și ultraviolete.

Radiotelescoapele sunt instrumente capabile să recepționeze și să măsoare radiounde având lungimi de undă de la 1 mm la 20 m. Au ca părți componente: o antenă alimentată de un sistem reflector, un sistem radioreceptor și un echipament pentru înregistrare.

Cu ajutorul radiotelescoapelor s-au descoperit formațiuni cerești precum **quasarii** și **pulsarii**. Ele emit radiounde. Natura quasarelor nu a fost deocamdată lămurită. Pulsarii reprezintă stadii finale ale evoluției stelelor. Se caracterizează prin densități foarte mari și emisii de pulsuri de unde radio.



● Fig. 2.5.28 – Radiolocator

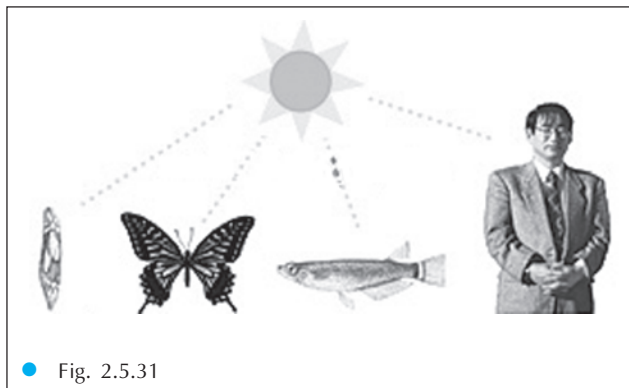


● Fig. 2.5.29 – Pulsar

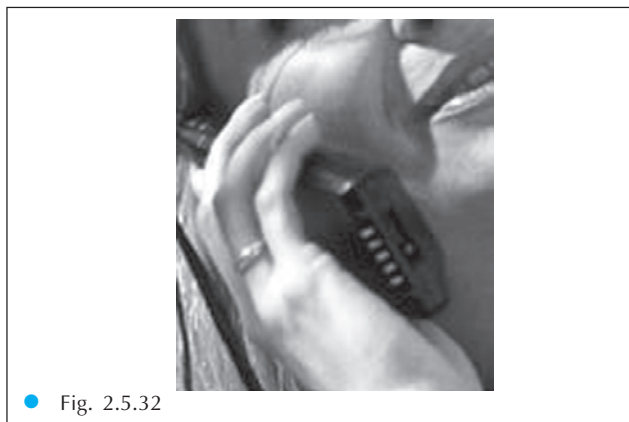


● Fig. 2.5.30 – Radiotelescoape

MĂSURI DE PROTECȚIE A MEDIULUI ȘI A PROPRIEI PERSOANE ÎN PRODUCEREA ȘI UTILIZAREA ÎN PRACTICĂ A UNOR APARATE ȘI DISPOZITIVE CARE FUNCȚIONEAZĂ CU UNDE ELECTROMAGNETICE



● Fig. 2.5.31



● Fig. 2.5.32

Tabelul 2.2

Părți ale corpului iradiate	Rata specifică de absorbție admisă
întregul corp	0,08 W/kg
cap și trunchi	2 W/kg
membre	4 W/kg

Tabelul 2.3

Frecvență	Densitatea de energie	Intensitatea câmpului electric
900 MHz	4,5 W/m ²	41 V/m
1800 MHz	9 W/m ²	58 V/m
2100 MHz	10 W/m ²	61 V/m

Efectele determinate de undele electromagnetice asupra organismelor vii, depind de intensitatea radiațiilor utilizate și de timpul de expunere. Există ceea ce se cheamă efecte biologice, soldate cu modificări fiziologice detectabile în sistemele biologice și efecte adverse care apar atunci când efectele biologice depășesc limitele admise și prezintă riscuri pentru sănătate. Printre efectele biologice care apar în timpul expunerii la radiații electromagnetice, se numără creșterea presiunii sângelui în piele în mod asemănător înroșirii pielii după expunerea solară, sintetizarea vitaminei D, etc. Există situații în care pot să apară dureri care urmează insolației sau crește riscul apariției cancerelor de piele.

Interacțiunea dintre câmpul electromagnetic și țesuturile vii constă în apariția câmpurilor electrice induse și a curenților electrici induși. Potrivit estimărilor, valorile intensităților curenților induși în timpul expunerii la radiațiile electromagnetice din mediul înconjurător se află sub valorile curenților care apar în mod natural în organisme. Expuneri la câmpuri electrice cu intensitatea de până la 100 kV/m, la animale nu au relevat efecte nocive asupra dezvoltării lor ulterioare. În ceea ce privește expunerea voluntarilor la câmpuri magnetice cu valori de peste 5 mT, s-au înregistrat modificări ale ritmului cardiac, ale presiunii sângelui și a temperaturii corpului lor. Se pare că există o legătură între secreția de melatonină, un hormon responsabil de stabilirea ritmului zi-noapte și valoarea inducției câmpului magnetic. Acest hormon are rol protector împotriva cancerului mamar, motiv care a generat legătura între expunerea la radiații electromagnetice și creșterea incidenței acestui tip de cancer. Studiile efectuate pe voluntari nu au confirmat însă legătura. Nu există deocamdată indicii clare nici asupra legăturii între expunerea la radiații electromagnetice și creșterea incidenței altor tipuri de cancer. Se pare că doar în cazul leucemiei s-a înregistrat oarece creștere a riscului de apariție, la subiecții expuși.

Ratele specifice de absorbție a microundelor (10 MHz – 10 GHz), admise în cazul utilizării telefoanelor mobile, sunt prezentate în tabelul 2.2

În funcție de benzile de frecvență utilizate în telefonie mobilă, nivelele de referință pentru densitatea de energie și intensitatea câmpului electric sunt prezentate în tabelul 2.3

ACTIVITĂȚI DE EVALUARE

Formulați răspunsuri pentru următoarele întrebări:

1. Cum defazează condensatorul curentul față de tensiunea alternativă aplicată?
2. Cum defazează bobina curentul față de tensiunea alternativă aplicată?
3. Care sunt *expresiile reactanțelor* – capacitivă și inductivă ?
4. Care este *expresia impedanței* circuitului RLC serie?
5. Care este expresia *frecvenței de rezonanță*?
6. Ce înțelegeți prin *factor de calitate* al circuitului RLC?
7. Care este *expresia defazajului* pentru circuitul RLC?
8. Ce este *puterea aparentă*?
9. Ce este *factorul de putere*?
10. Ce este *câmpul electromagnetic*?
11. Ce este *unda electromagnetică*?
12. Ce este *perioada proprie a unui circuit oscilant*?

Apreciați cu adevărat sau fals:

1. În curent alternativ, condensatorul nu introduce defazaj între tensiunea aplicată și curentul stabilit prin el.
2. Bobinele au, practic, o rezistență electrică neglijabilă.
3. Un circuit RLC paralel aflat la rezonanță absoarbe de la sursă un curent minim.
4. Într-un circuit oscilant are loc o transformare permanentă a energiei electrice în energie magnetică și invers.
5. Oscilațiile dintr-un circuit oscilant real nu sunt amortizate.
6. Unda electromagnetică este fenomenul de propagare a câmpului electromagnetic.
7. Radiațiile ultraviolete sunt ionizante.
8. Acordarea radioului pe postul preferat se face, în practică, prin modificarea inductanței antenei sale.

2

Explicați utilizând legile fizicii pe care le-ați studiat în acest capitol:

1. De ce nu există pericol de electrocutare atunci când se ating ambele șine ale unei linii de tramvai, deși prin ele trec curenți de intensitate foarte mare?
2. De ce vrăbiile nu sunt electrocutate atunci când se așează pe liniile de înaltă tensiune, iar berzele se electrocutează?
3. De ce există pericol de curentare la atingerea numai a uneia dintre bornele prizei monofazice de curent alternativ?
4. Ce se întâmplă dacă se alimentează un transformator cu o tensiune de valoare cerută, dar nu în curent alternativ, ci în curent continuu?
5. De ce contorul electric obișnuit nu înregistrează consumul unui transformator de sonerie atât timp cât nu se sună la sonerie?
6. De ce zbârnâie un transformator atunci când prin înfășurarea primară trece curent?
7. De ce dacă punem mâinile pe bornele electromagnetului unei sonerii alimentate de la o baterie, simțim scuturături puternice?
8. Cum deviază acul unei busole plasate în vecinătatea unui conductor alimentat în curent alternativ de la rețea?
9. De ce se utilizează cabluri coaxiale pentru transmisiile TV?

Probleme

Problema 2.1. O bobină, conectată la o sursă de c.c. de tensiune U_c , este parcursă de curentul I_c . Când este conectată la o sursă de c.a. de tensiune la borne U și frecvență ν , curentul în circuit este I . Aflați inductanța bobinei, L .
Aplicație: $U_c = 24 \text{ V}$; $I_c = 4 \text{ A}$; $U = 120 \text{ V}$; $\nu = 50 \text{ Hz}$; $I = 12 \text{ A}$. R: $L = 25,5 \text{ mH}$.

Problema 2.2. La un generator de c.a. cu tensiunea la borne U se conectează un circuit serie format dintr-un condensator de capacitate C și o bobină cu inductanța L și rezistența R . Aflați: a) intensitatea curentului din circuit, I , dacă frecvența sa este ν ; b) frecvența ν_0 la care are loc rezonanța; c) intensitatea curentului în circuit, I_0 , la rezonanță; d) factorul de calitate al circuitului.
Aplicație: $U = 10 \text{ V}$; $C = 5 \cdot 10^{-5} / \pi \text{ F}$; $L = 2 / \pi \text{ H}$; $R = 40 \Omega$; $\nu = 100 \text{ Hz}$.

R: $I = 33 \text{ mA}$; $\nu_0 = 50 \text{ Hz}$; $I_0 = 0,25 \text{ A}$; $Q = 5$.

Problema 2.3. Un circuit serie de c.a. este format dintr-o bobină cu inductanța L , un rezistor de rezistență R și un condensator de capacitate C . Aflați: a) pulsația de rezonanță, ω_0 ; b) reactanța capacitivă la rezonanță, X_{C0} ; c) defazajul, φ , dintre curent și tensiunea la bornele circuitului pentru frecvența ν .
Aplicație: $L = 0,1 \text{ mH}$; $R = 15 \Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$; $\nu = (100/\pi) \text{ kHz}$.

R: $\omega_0 = 10^5 \text{ rad/s}$; $X_{C0} = 10 \Omega$; $\varphi = 45^\circ$.

1. Expresia t.e.m. alternative maxime este:

- a) $\omega \cdot E \cdot \sqrt{2}$; b) $\frac{B \cdot S}{\omega}$; c) $\frac{\omega}{\theta m}$;
d) $\omega \cdot B \cdot S$; e) $\frac{\omega}{B \cdot S} \cdot \cos \alpha$.

2. Prezența unei bobine ideale într-un circuit de curent alternativ determină: **a)** mișcarea de ansamblu oscilatorie a electronilor de conducție; **b)** apariția fenomenului de autoinducție; **c)** defazarea curentului înaintea tensiunii; **d)** apariția unei impedențe capacitive; **e)** creșterea rezistenței chimice a circuitului.

3. Care dintre următoarele expresii reprezintă tensiunea instantanee de la bornele unei bobine ideale, aflate într-un circuit serie RLC ?

- a) $-L \frac{\Delta I}{\Delta t}$; b) $2^{1/2} \omega LI \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$;
c) $\omega LI \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$; d) $i \cdot \omega L \sin(\omega t - \varphi)$;
e) $\omega LI_m \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$.

4. Expresia valorii instantanee a intensității unui curent ce variază sinusoidal în timp, cu amplitudinea de 15 A, perioada 0,02 s decalată în urmă față de origine cu $t = 0,00125$ s este:

- a) $i = 15 \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{8}\right)$; b) $i = 15\sqrt{2} \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$;
c) $i = 15\sqrt{2} \sin\left(50\pi t - \frac{\pi}{3}\right)$; d) $i = 15 \sin\left(50\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$;
e) $i = 15 \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{6}\right)$.

5. Impedanța circuitului serie RLC alimentat la o tensiune alternativă este:

- a) $Z = R + (X_L - X_C)^2$; b) $Z^2 = R^2 - (X_L - X_C)^2$;
c) $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$; d) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{(X_L - X_C)^2}}$;
e) $\frac{1}{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

6. Un circuit de c.a. alimentat la o tensiune de 220 V, cu frecvența de 50 Hz este compus dintr-un rezistor $R = 30 \Omega$

legat în serie cu o bobină de rezistență nulă și un condensator. La frecvența specificată bobina are reactanța inductivă $X_L = 160 \Omega$, iar condensatorul are o reactanță capacitivă $X_C = 120 \Omega$. Care este intensitatea curentului?

- a) 4,4 A; b) 5,2 A; c) 3,8 A;
d) 5,8 A; e) 1,6 A.

7. Factorul de calitate al unui circuit de curent alternativ RLC serie, este dat de relația:

- a) $Q = \frac{U_C}{U}$; b) $Q = \frac{1}{\sqrt{RC}}$; c) $Q = \frac{1}{\sqrt{LC}}$;
d) $Q = \frac{1}{L\sqrt{RC}}$; e) $Q = \left(\frac{U_C}{U}\right)_{\omega=\omega_0}$.

8. Un circuit serie de curent alternativ cu frecvența $\nu = 50$ Hz conține o bobină cu inductanța $L = 0,1$ H și un rezistor cu rezistența R . Defazarea între tensiunea și intensitatea curentului la bornele circuitului este $\varphi = 30^\circ$. Să se calculeze valoarea rezistenței R a rezistorului:

- a) $R = 27,2 \Omega$; b) $R = 17,3 \Omega$; c) $R = 0,055 \Omega$;
d) $R = 108,5 \Omega$; e) $R = 54,3 \Omega$;

9. Un circuit serie format dintr-un rezistor R și un condensator C are factorul de putere 0,8. Să se calculeze factorul de putere al circuitului format din aceleași elemente RC montate în paralel pentru aceeași frecvență a tensiunii de alimentare.

- a) 0,5; b) 0,3; c) 0,6;
d) 0,9; e) 1.

10. Impedanța unui circuit RLC serie în curent alternativ la rezonanță are valoarea:

- a) 0; b) ∞ ; c) R ;
d) $1/R$; e) R^2 .

11. Dacă în bobina ideală a unui circuit RL , serie în c.a. introducem un miez de fier, atunci:

- a) impedanța scade; b) intensitatea curentului crește; c) căderea de tensiune pe bobină scade; d) defazajul crește; e) factorul de putere crește.

12. Printr-o bobină alimentată la o tensiune electrică alternativă sinusoidală, cu pulsație ω , trece un curent electric cu intensitatea I . Legând în serie cu bobina un condensator de capacitate C , intensitatea curentului electric prin circuit rămâne nemodificată. Se cere inductanța bobinei.

- a) $\frac{1}{4\omega^2 C}$; b) $\frac{1}{2\omega^2 C}$; c) $\frac{1}{\omega^2 C}$;
d) $\frac{2}{\omega^2 C}$; e) $\frac{4}{\omega^2 C}$.

13. Pentru un circuit de curent alternativ RLC serie aflat la rezonanță defazajul dintre intensitatea curentului și tensiunea la bornele circuitului este:

- a) funcție de valorile: R , C și L ; b) zero;
c) $\pi/2$; d) π ; e) $\pi/6$.

14. Un circuit serie RLC conține elementele $R = 4 \Omega$, $X_L = 4 \Omega$, $X_C = 1 \Omega$. El este alimentat cu o tensiune sinusoidală de valoare efectivă $U = 120$ V. Intensitatea curentului prin circuit este:

- a) 240 A; b) 245 A; c) 42 A;
d) 4,2 A; e) 24 A.

15. Care dintre următoarele expresii reprezintă tensiunea instantanee de pe o bobină reală alimentată în curent alternativ?

a) $u = 2^{1/2} \cdot I \cdot \left[R \cdot \sin(\omega t - \varphi) + \omega L \cdot \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right];$

b) $u = I \cdot 2^{-1/2} \left[R \cdot \sin(\omega t - \varphi) + \omega L \cdot \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right];$

c) $u = I \cdot [\omega L \cdot \sin(\omega t + \varphi) + R \cdot \sin(\omega t)];$

d) $u = I \cdot (\omega L + R);$

e) $u = I_{\max} \cdot \left[\omega L \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + R \cdot \sin(\omega t) \right].$

16. Impedanța unui circuit paralel RLC în curent alternativ este dată de relația:

a) $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$ b) $Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2};$

c) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} + \frac{1}{X_C}\right)^2};$ d) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} + \frac{1}{X_L}\right)^2};$

e) $Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}}.$

17. Într-un circuit RLC paralel:

- a) în bucla LC , intensitatea curentului electric este minimă la rezonanță; b) impedanța are valoarea $Z = 1/\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$; c) puterea aparentă este maximă la rezonanță; d) puterea reactivă este maximă la rezonanță; e) nici unul dintre răspunsuri.

18. O instalație de curent alternativ funcționează sub tensiunea $U = 220$ V și absoarbe un curent $I = 11$ A sub un factor de putere $\cos \varphi = 0,8$ inductiv. Să se calculeze rezistența instalației.

- a) 20 Ω ; b) 40 Ω ; c) 10 Ω ;
d) 50 Ω ; e) 16 Ω .

19. Pentru un circuit RLC paralel raportul dintre puterea activă și puterea reactivă a circuitului este $P/P_r = 3/4$, iar $X_C = 2X_L$. Raportul R/X_L va fi:

- a) 8/3; b) 4/3; c) 3/4;
d) 3/8; e) 3/2.

20. O bobină cu rezistența de 6 Ω și inductanța de 8/314 H este alimentată la tensiunea de 10 V și 50 Hz. Ce curent se va stabili prin bobină?

- a) $I = 0,6$ A; b) $I = 0,8$ A; c) $I = 1,2$ A;
d) $I = 1$ A; e) $I = 0,7$ A.

21. Puterea activă are expresia:

- a) $IU \sin \alpha$; b) IU ; c) $IU \operatorname{tg} \alpha$;
d) $R I^2$; e) $P_a \sin \alpha$.

22. Puterea activă se măsoară în:

- a) Ws; b) W; c) MJ/s;
d) VA; e) VAR.

23. Un circuit paralel format din rezistența $R = 30$ ohmi, un condensator cu capacitatea $C = 300 \mu\text{F}$ și o bobină având inductanța $L = 0,08$ H funcționează la frecvența de 50 Hz. Care este factorul de putere al circuitului?

- a) 0,923; b) 0,823; c) 0,723;
d) 0,623; e) 0,523.

24. Rezistorul de rezistență $R = 40 \Omega$, conectat la tensiunea $u(t) = 120 \sin \omega t$ (V), se află într-un vas de volum $V = 144 \text{ dm}^3$, care conține un gaz ideal având exponentul adiabatic $\gamma = 1,4$. Presiunea gazului din vas crește cu $\Delta p = 3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ după o durată egală cu:

- a) 20 min; b) 5 min; c) 15 min;
d) 12 min; e) 10 min.

25. Factorul de calitate al unui circuit RLC serie de curent alternativ este dat de relația:

- a) U/U_L ; b) $1/\sqrt{LC}$; c) $1/L \cdot \sqrt{RC}$;
d) $(U/U_C)_{\omega=\omega_0}$.

26. Rezonanța unui circuit serie RLC are loc dacă se îndeplinește condiția:

- a) $LC = 1/\omega^2$; b) $LC = 1/\omega$; c) $LC = 2\pi/\omega$;
d) $LC = 2\pi/\omega^2$.

27. Unitatea de măsură SI pentru reactanța inductivă este:

- a) H; b) Hs; c) ω ;
d) ω^{-1} .

28. Unitatea de măsură pentru puterea aparentă pentru curent alternativ, în SI este:

- a) W; b) Js; c) VA;
d) VAR.

29. Un circuit serie RLC este alimentat de la un generator care asigură o tensiune efectivă constantă pentru diferite frecvențe. Pentru frecvențele $v_1 = 60 \text{ Hz}$ și $v_2 = 240 \text{ Hz}$, intensitatea curentului este aceeași. Frecvența de rezonanță are valoarea:

- a) 90 Hz; b) 120 Hz; c) 135 Hz;
d) 150 Hz.

30. O bobină cu rezistența de $2\pi\sqrt{3} \Omega$ este alimentată la o rețea electrică cu frecvența de 50 Hz. Dacă tensiunea electrică la bornele bobinei este în avans față de curentul electric cu $\pi/6$, atunci inductanța bobinei valorează:

- a) 36 mH; b) 20 mH; c) 0,5 mH;
d) 18 mH.

31. Un circuit serie de curent alternativ conține un bec cu rezistența $R_b = 20 \Omega$ și o bobină având rezistența R și inductanța L . Dacă se aplică circuitului tensiunea alternativă cu valoarea efectivă $U = 100 \text{ V}$ și frecvența $v = 50 \text{ Hz}$, tensiunea la bornele becului este $U_b = 50 \text{ V}$ iar la bornele bobinei este $U_L = 70 \text{ V}$. Rezistența bobinei este:

- a) 5 Ω ; b) 10 Ω ;
c) 12,5 Ω ; d) 15 Ω .

Sinteză capitolul 2

În curent alternativ rezistorul nu produce defazaj între curentul care trece prin el și tensiunea aplicată. Condensatorul introduce o rezistență aparentă $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ în curent alternativ și defazează intensitatea curentului înaintea tensiunii aplicate. Bobina introduce o rezistență aparentă $X_L = \omega \cdot L$ în curent alternativ și defazează intensitatea curentului în urma tensiunii aplicate.

Impedanța circuitului RLC serie este: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

Circuitele RLC sunt în **regim de rezonanță** atunci când $X_L = X_C$, efectul capacitiv este compensat de cel inductiv, iar defazajul este nul. Frecvența de rezonanță este dată de formula lui Thomson: $v_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$

Se numește **factor de calitate** al circuitului $Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Mărima $Z_0 = \sqrt{L/C}$ este numită **impedanță caracteristică** a circuitului.

Impedanța circuitului RLC paralel este:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}}$$

Puterea activă, P , este puterea disipată pe rezistorul R:

$$P = P_a \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Puterea reactivă, P_r , este puterea concentrată în câmpul magnetic al bobinei și în câmpul electric dintre armăturile condensatorului.

$$P_r = P_a \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Puterea aparentă, P_a , măsoară energia furnizată circuitului în fiecare secundă, de către generatorul de tensiune alternativă.

$$P_a = U \cdot I,$$

Transformatorul este un dispozitiv folosit pentru modificarea tensiunii și a intensității curentului alternativ și este util în transportul energiei electrice la distanță.

Raportul de transformare al transformatorului, k , este definit de raportul numerelor de spire ale primarului și respectiv ale secundarului.

Motoarele electrice sunt dispozitive care transformă energia electrică în energie mecanică. *Motorul asincron* este un motor de curent alternativ la care câmpul magnetic produs de înfășurarea fixă a statorului produce învârtirea rotorului prin interacțiunea cu curentul indus în spirele sale.

Circuitul oscilant este un circuit compus dintr-un condensator și o bobină, în care au loc oscilații electromagnetice.

Perioada oscilațiilor proprii are expresia:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

Se numește **undă electromagnetică** fenomenul de propagare a câmpului electromagnetic.

Se numește **densitatea** energiei câmpului electric dintr-un condensator mărimea fizică definită prin relația:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot E^2.$$

Cel mai cunoscut circuit utilizat pentru emisia de unde electromagnetice în spațiu este un circuit oscilant deschis, alimentat de un generator de oscilații electromagnetice. El poartă denumirea de **dipol**.

Procesul de acordare a antenei pe diferite lungimi de undă constă în modificarea lungimii firului, deci a propriei lungimi de undă.

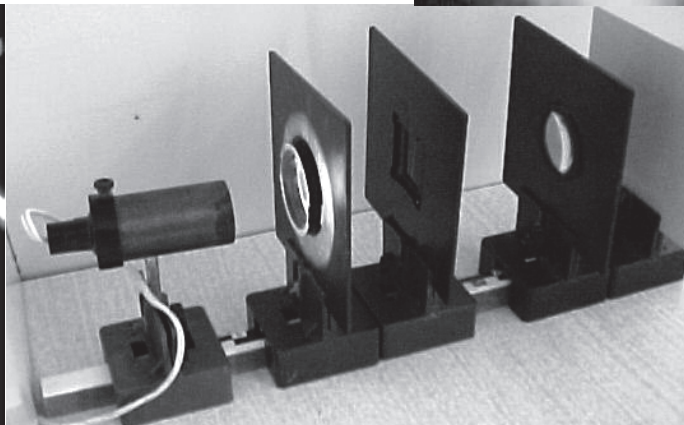
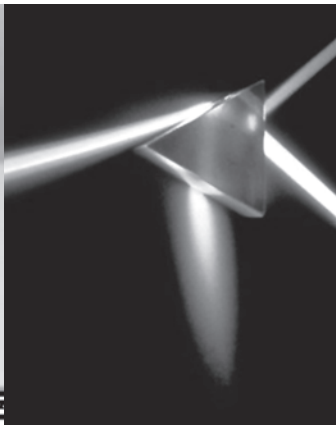
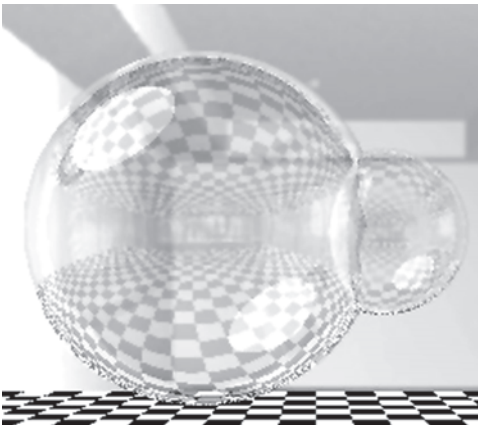
Capitolul 3

Optica ondulatorie

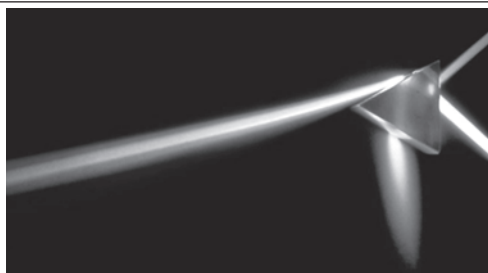
În acest capitol veți studia:

- 3.1. Dispersia luminii
- 3.2. Interferența
 - 3.2.1. (*) *Dispozitivul Young*
 - 3.2.2. Interferența localizată. Aplicații

* Subcapitole cu caracter opțional



3.1. Dispersia luminii



● Fig. 3.1.1 – Dispersia luminii în prisma optică

La trecerea dintr-un mediu în altul, lumina își schimbă viteza de propagare în funcție de frecvența ei și implicit, de lungimea de undă. Ați învățat în clasa a 9-a că indicele de refracție absolut al unui mediu, n este definit prin relația:

$$n = \frac{c}{v}$$

unde c este viteza luminii în vid, iar v este viteza luminii în mediul respectiv. În timp ce studia fenomenele electromagnetice, Maxwell a demonstrat că, într-un mediu oarecare, lumina se propagă cu viteza:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}; \quad \text{în vid: } c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}},$$

unde ϵ este permitivitatea electrică a mediului, iar μ este permeabilitatea sa magnetică. De aici rezultă că:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}},$$

3 unde ϵ_r și μ_r sunt permitivitatea electrică relativă și, respectiv, permeabilitatea magnetică relativă ale mediului respectiv. Pentru orice mediu $\epsilon_r > 1$ și $\mu_r > 1$, deci $v < c$. De exemplu, viteza luminii în sticlă este de 200 000 km/s, iar în apă de 225 000 km/s.

Indicele de refracție *relativ* al mediului 2 față de mediul 1 se notează cu n_{21} . Dacă mediul 1 (în care se află raza incidentă) este vidul, atunci indicele de refracție al mediului 2 este numit **indice de refracție absolut** și este dat de expresia:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}.$$

Pentru fiecare dintre cele două medii 1 și 2 se poate scrie relația:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

Folosind aceste relații și expresia lui n_{21} se găsește că:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Observație: Din relația precedentă se constată că valoarea indicelui de refracție al vidului a fost luată, prin convenție, egală cu 1.

Experimental se constată că indicele de refracție al unui mediu depinde de lungimea de undă a radiației luminoase și de temperatura mediului. De aceea, valorile indicilor de refracție se dau în condițiile următoarei convenții.

Convenție: Valorile indicilor de refracție se dau pentru radiația cu lungimea de undă $\lambda_D = 5,896 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ (emisă de o lampă cu vapori de sodiu la temperatura de 20 °C).

În tabelul 3.1 sunt date câteva valori ale indicilor de refracție pentru unele medii.

Tabelul 3.1

Mediul	n	Mediul	n
hidrogen	1,0001	glicerină	1,473
aer	1,003	sticlă	1,5-1,62
apă	1,333	sulfură de carbon	1,6277
acetonă	1,362	diamant	2,4173

Definiție: *dispersia* este fenomenul de variație a indicelui de refracție al unui mediu în funcție de lungimea de undă a radiației electromagnetice care îl traversează.

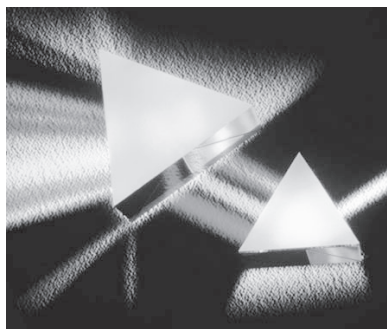
PROPOZIȚIA I. TEOREMA 1

Razele de lumină care diferă prin culoare diferă și prin gradele de refrangibilitate.

I. Newton, „Optica”

În 1672 Newton arăta că lumina albă se poate obține prin compunerea radiațiilor de diferite culori. Recompunerea luminii albe din radiațiile monocromatice în care a fost descompusă se poate face utilizând o lentilă în focarul căreia focalizează toate componentele. O altă metodă ar fi utilizarea unei a doua prisme identice cu cea care a realizat descompunerea, dar cu muchia întoarsă față de prima ca în figura 3.1.2.

Două radiații monocromatice prin a căror compunere rezultă lumină albă se numesc **culori complementare**.



● Fig. 3.1.2 – Recompunerea luminii albe

LUCRARE DE LABORATOR

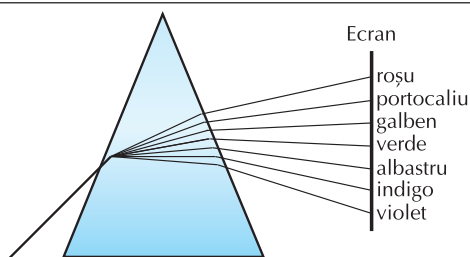
Evidențierea dispersiei luminii

Veți observa fenomenul de dispersie a luminii naturale în prisma optică. Prisma optică, despre care ați învățat în clasa a 9-a, este un element optic transparent caracterizat de indicele de refracție absolut n și de unghiul format de cei doi dioptri plani care o delimitează de mediu.

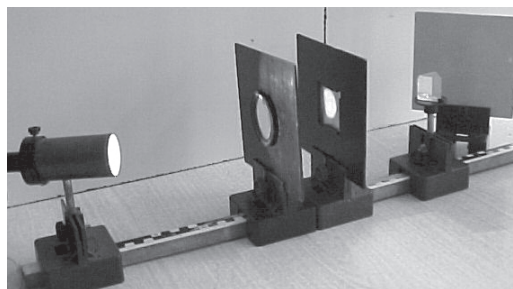
Trimițând spre o prismă un fascicul îngust de lumină alb, provenind de la un bec, se constată că, în punctul de incidență, după intrarea în prismă, fasciculul începe să se descompună într-un fascicul colorat, din ce în ce mai larg (figura 3.1.3). Pe ecran va apărea o bandă multiplu colorată, culoarea trecând, treptat și continuu, de la roșu la violet prin toate culorile curcubeului. Deoarece trecerea de la o culoare la alta se face în mod continuu, imaginea obținută pe ecran este numită **spectrul continuu** al luminii albe. Acest fenomen de descompunere a luminii albe în culorile componente este numit **dispersia** luminii.

Pentru observarea lui în laboratorul de fizică, utilizați un banc optic pe care așezați în ordine o prisma optică echilateră pe suport, o fanta simplă cu suport și o lampă optică alimentată de la un generator de tensiune. După realizarea montajului experimental, alimentați lampa optică la 6 V și deplasați fanta până când fasciculul luminos cade pe una dintre fețele transparente ale prisme. Rotiți prisma în suport până când fasciculul emerge prin cealaltă față. Imaginea obținută pe ecranul poziționat lateral față de bancul optic reprezintă spectrul luminii albe.

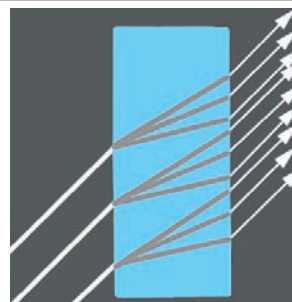
Din figura 3.1.3 se vede că lumina portocalie este refractată mai puternic decât cea roșie, cea galbenă este refractată mai puternic decât cea portocalie, etc.



● Fig. 3.1.3



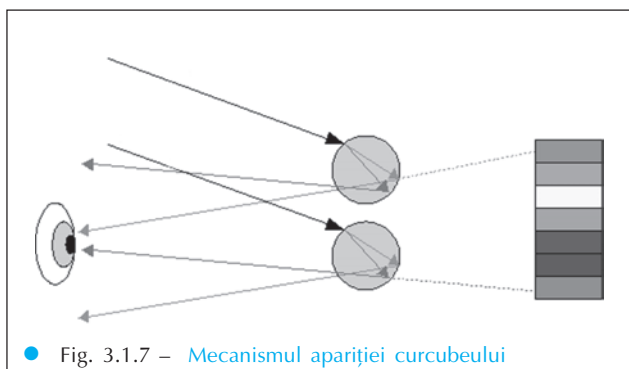
● Fig. 3.1.4 – Montaj experimental – dispersia luminii



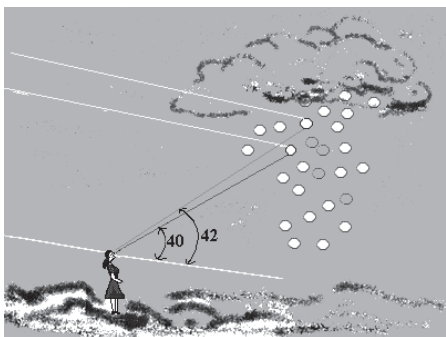
● Fig. 3.1.5 – Dispersia și recombinația luminii în lama cu fețe plane și paralele



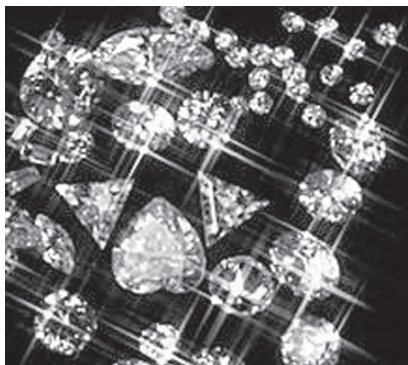
● Fig. 3.1.6 – Curcubeul



● Fig. 3.1.7 – Mecanismul apariției curcubeului



● Fig. 3.1.8



● Fig. 3.1.9 – Diamante

Deoarece toate radiațiile monocromatice au intrat în prismă, în fasciculul alb, sub același unghi de incidență, suntem obligați să acceptăm faptul că indicele de refracție al mediului transparent din care este construită prisma, depinde de culoarea luminii. Lumina este un fenomen de natură ondulatorie. Ceea ce deosebește luminile de culori diferite este lungimea de undă.

Lumina cu o lungime de undă dată, este numită **monocromatică** tocmai pentru a se indica faptul că are o singură culoare. Aceasta înseamnă că fenomenul dispersiei luminii este datorat faptului că indicele de refracție al mediului transparent din care este confecționată prisma depinde de lungimea de undă. Se constată că *indicele de refracție crește când lungimea de undă scade*. Aceasta este situația pentru mediile transparente uzuale.

De aceea fenomenul este numit **dispersie normală**. Există situații speciale în care indicele de refracție scade când scade lungimea de undă. Acesta este, de exemplu, cazul unei prisme umplute cu vapori de iod. Acest fenomen este numit **dispersie anormală**.

Dacă în locul prisme se utilizează o lamă cu fețe plane și paralele, la prima față va apare dispersia, iar la cea de a doua se va produce recombinarea radiațiilor monocromatice, astfel încât fasciculul emergent este tot alb (figura 3.1.5).

Fenomene de dispersie în natură și în tehnică

Dispersia este întâlnită destul de frecvent în natură. Un exemplu este apariția curcubeului (figura 3.1.6). În acest caz, fenomenul de dispersie se combină cu refracția și cu reflexia luminii. Rolul prisme este preluat de picăturile de apă existente în atmosferă, după ce a plouat. Când apare soarele, milioanele de picături vor descompune lumina albă, formând pe cer arcul colorat în: roșu, orange, galben, verde, albastru, indigo și violet. O rază solară incidentă pe suprafața unei picături, suferă inițial o refracție, iar când atinge din nou suprafața de separație, apă – aer, suferă o reflexie totală, înregistrând un unghi de deviație. Pentru lumina roșie, unghiul maxim de deviație este de 138 grade, ceea ce duce la valoarea de 42 grade pentru unghiul sub care este privit arcul curcubeului. Pentru violet unghiul este de 40 grade (figura 3.1.8).

Când razele de lumină suferă două reflexii interne în locul uneia singure se formează și al doilea curcubeu, cu intensitate mai slabă și cu ordine inversă a culorilor.

Fenomenul de dispersie are aplicații în industria sticlei, unde prin dispersie se conferă culoare unor obiecte decorative cu forme specifice. Diamantele sunt șlefuite astfel încât să strălucească cât mai puternic. În cazurile prezentate, fenomenului de dispersie a luminii i se alătură reflexia, refracția și reflexia totală.

3.2. Interferența luminii

Ca și în cazul undelor mecanice, interferența undelor electromagnetice din domeniul vizibil presupune tot suprapunerea a două unde într-o zonă spațială. În cazul luminii, producerea acestui fenomen necesită îndeplinirea unor condiții pe care le vom descrie în continuare. Pentru înțelegerea fenomenului de interferență a luminii este necesar să se ia în considerație natura ei ondulatorie. Unda luminoasă este o undă electromagnetică în care vectorii intensitate a câmpului electric și inducție a câmpului magnetic oscilează, într-un plan perpendicular pe direcția de propagare a luminii, pe direcții perpendiculare. Pentru explicarea acestui fenomen sunt suficiente numai legile generale ale undelor.

În cazul unei surse obișnuite de lumină, un bec de exemplu, atomii primesc energie prin efect Joule, trec în stări energetice excitate și se dezexcită complet aleator emițând radiație în mod nesincronizat. Radiațiile emise de puncte diferite din filament au o fază inițială care variază foarte rapid, în mod cu totul aleator. Astfel de surse sunt numite **surse necoerente**, iar undele emise de ele sunt unde necoerente. În cazul lor fenomenul de interferență nu poate fi observat.

Definiție: Se numesc **unde coerente** două sau mai multe unde care au aceeași pulsație și diferențe de fază constante.

Definiție: Se numește **interferență** fenomenul de superpoziție a două sau mai multe unde coerente.

Definiție: Se numește câmp de interferență regiunea din spațiu în care are loc interferența undelor.

Efectele fiziologice luminoase sunt datorate componentei electrice a unei electromagnetice. Considerăm două surse coerente de lumină, S_1 și S_2 , care emit unde de aceeași frecvență, având amplitudinile paralele și egale fiecare cu E_0 , cu o fază inițială pe care, pentru simplitate, o presupunem nulă, $\phi_0 = 0$. Aceasta înseamnă că în cele două puncte intensitatea câmpului electric variază în timp, conform legii:

$$E_1(t) = E_0 \cdot \sin(\omega t), \quad E_2(t) = E_0 \cdot \sin(\omega t).$$

Cele două unde se propagă și ajung amândouă în punctul P situat la distanțele r_1 și, respectiv, r_2 de cele două surse (figura 3.2.1). În acest punct au loc simultan două oscilații paralele descrise de ecuațiile

$$E_1(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_1\right),$$

$$E_2(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_2\right).$$

Dar lungimea de undă λ poate fi exprimată astfel

$$\lambda = v \cdot T = \frac{c}{n} \cdot T = \frac{\lambda_0}{n},$$

unde λ_0 este lungimea de undă în vid. Corespunzător, ecuațiile celor două oscilații iau forma

$$E_1(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \delta_1\right), \quad E_2(t) = E_0 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \delta_2\right),$$

unde $\delta_1 = n \cdot r_1$ și $\delta_2 = n \cdot r_2$ sunt drumurile optice asociate distanțelor geometrice r_1 și r_2 .

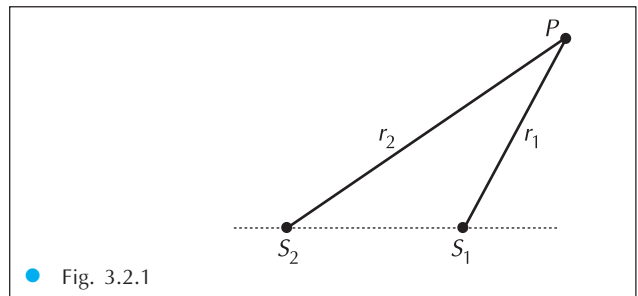


Fig. 3.2.1

Definiție: Se numește **drum optic** δ corespunzător unui drum geometric d , produsul $n \cdot d$, unde n este indicele de refracție al mediului prin care se propagă lumina: $\delta = n \cdot d$.

Observație: În mod curent, pentru desemnarea drumului optic asociat unui drum geometric d , se folosește și notația (d) .

Fenomenele care au loc în orice punct în care ajung două sau mai multe unde sunt descrise de **principiul superpoziției liniare**.

Enunț: Atunci când două sau mai multe unde se suprapun într-o regiune din spațiu, elongația rezultantă în orice punct din acea regiune și la orice moment de timp este egală cu suma algebrică a elongațiilor pe care le-ar produce în acel punct fiecare undă, dacă ar fi numai ea prezentă.

Observații:

- 1) Acest enunț al principiului este valabil în cazul particular în care oscilațiile se fac pe aceeași direcție.
- 2) Prin elongație se înțelege o deplasare spațială a punctului din mediu în cazul unei unde mecanice, un exces sau un deficit de presiune în cazul unei unde sonore. În cazul undelor electromagnetice prin elongație se înțelege mărimea intensității câmpului electric sau a inducției câmpului magnetic.

Atunci, conform principiului superpoziției liniare, cele două oscilații din P , având aceeași direcție, se compun algebric

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t)$$

și rezultă așa cum ați învățat în lecția „Compunerea oscilațiilor”, o oscilație de aceeași frecvență. Amplitudinea A a oscilației rezultante este dată, în general, de relația

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 \cdot A_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \delta\right),$$

unde $\delta = \delta_2 - \delta_1$ este diferența de drum optic. În cazul particular studiat aici relația precedentă se reduce la forma

$$A = 2E_0 \cdot \cos\left[\frac{\pi}{\lambda_0} \cdot (\delta_2 - \delta_1)\right].$$

3

Observații:

- 1) Expresia obținută arată că **amplitudinea oscilației rezultante în orice punct din câmpul de interferență depinde nu numai de amplitudinile undelor care interferează, ci și de diferența de drum optic $\delta = \delta_2 - \delta_1$.**
- 2) Dacă diferența de drum este constantă în timp și amplitudinea rezultantă, A , este constantă în timp. Dacă aceasta este situația pentru toate punctele din câmpul de interferență, interferența este numită **staționară**.

Intensitatea luminoasă este proporțională cu fluxul luminos, $I \sim \Phi$, iar acesta este proporțional cu fluxul energetic, $\Phi \sim \Phi_e$; fluxul energetic este proporțional cu energia W (pag. 34), $\Phi_e \sim W$, iar aceasta este proporțională cu pătratul amplitudinii de oscilație, $W \sim A^2$. Din această succesiune rezultă că intensitatea luminoasă, I , este proporțională cu pătratul amplitudinii de oscilație, $I \sim A^2$. În cazul particular studiat aici

$$I \sim 4E_0^2 \cdot \cos^2\left[\frac{\pi}{\lambda_0} \cdot (\delta_2 - \delta_1)\right].$$

Intensitatea luminoasă este deci maximă atunci când diferența de drum optic este egală cu un număr par de $\lambda_0/2$, $\delta = 2k \cdot \lambda_0/2$, și este minimă atunci când diferența de drum optic este egală cu un număr impar de $\lambda_0/2$, $\delta = (2k + 1) \cdot \lambda_0/2$.

Concluzii:

1) toate punctele din câmpul de interferență pentru care diferența de drum optic este un număr par de $\lambda_0/2$ oscilează cu amplitudine maximă $A = 2E_0$; intensitatea luminoasă este proporțională cu $4E_0^2$ și este independentă de ordinul k al maximului de interferență: *toate maximele figurii de interferență au aceeași intensitate luminoasă.*

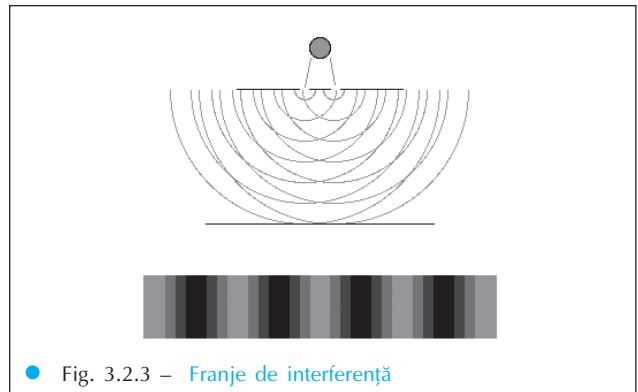
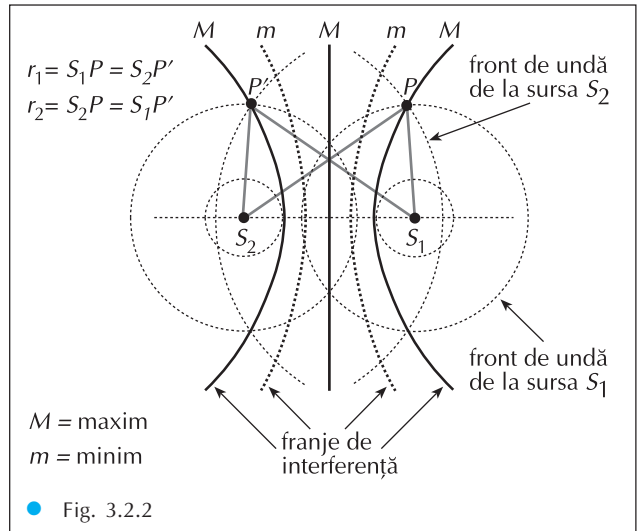
2) toate punctele din câmpul de interferență pentru care diferența de drum optic este un număr impar de $\lambda_0/2$ oscilează cu amplitudine minimă 0.

Definiție: Se numesc **franje de interferență** curbele care unesc între ele punctele de maximă amplitudine, respectiv, punctele de minimă amplitudine.

Dacă cele două surse sunt punctiforme, se poate arăta că:

- pentru o valoare dată a diferenței de drum, există două franje de interferență, simetrice față de mediatoarea segmentului care unește cele două surse (figura 3.2.2);
- franjele de interferență sunt hiperbole.

În figura 3.2.3. puteți observa aspectul franjelor de interferență. Ele sunt echidistante. Franjele luminoase au aceeași intensitate indiferent de poziția lor.

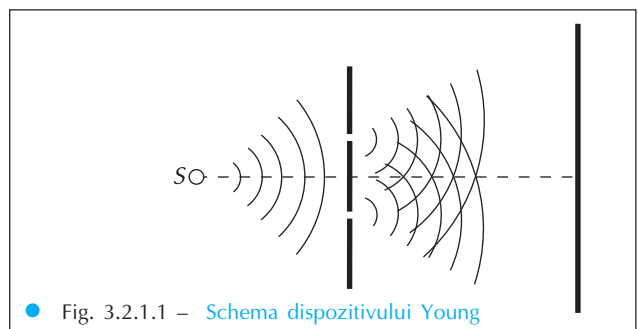


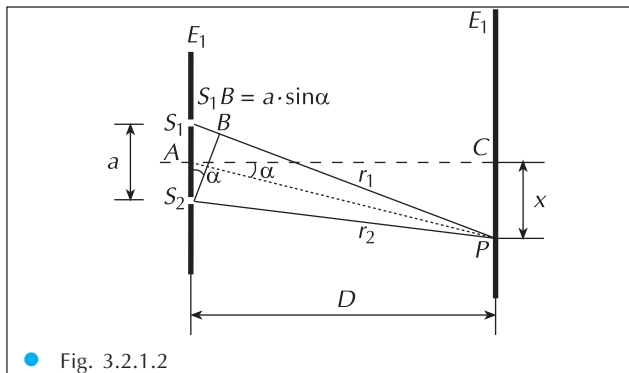
3.2.1. Dispozitivul Young

Pentru realizarea interferenței luminii prima problemă importantă este cea a realizării a două surse coerente.

O soluție practică a acestei probleme a găsit-o în 1802 Thomas Young (1773–1829). Schița de principiu a dispozitivului utilizat de Young pentru realizarea interferenței luminii este prezentată în figura 3.2.1.1. Sursa de lumină, S , este un filament incandescent în fața căruia se află un filtru; acesta lasă să treacă numai radiațiile care au o anumită lungime de undă, fie ea λ_0 în vid (și în aer). Lumina monocromatică ajunge la un ecran prevăzut cu două fante dreptunghiulare situate foarte aproape una de alta. Distanța de la sursă la ecran este de ordinul zecilor de centimetri. Fantele sunt foarte înguste (0,1 – 0,2 mm), iar distanța dintre ele este mai mică de 1 mm.

Conform principiului lui Huygens cele două fante devin surse secundare de la care pleacă două unde spre un al doilea ecran situat la câțiva metri de primul ecran și paralel cu acesta. Aceste două unde provin de la aceeași sursă,





deci sunt coerente. Chiar dacă are loc o variație a fazei inițiale a luminii emise, diferența de fază dintre undele emise de sursele secundare se păstrează aceeași. Pe al doilea ecran se formează franje de interferență în forma unor benzi paralele luminoase și întunecate, dispuse alternativ.

Șchița experimentului lui Young este prezentată în figura 3.2.1.2. Considerăm un punct oarecare P de pe ecranul E_2 . Pe segmentul S_1P se coboară o perpendiculară din S_2 . Rezultă atunci că undele provenind de la cele două surse secundare ajung într-un punct oarecare de pe

ecranul E_2 cu o diferență de drum $d = S_1B = a \cdot \sin \alpha$. Din triunghiul ACP rezultă că $x = d \cdot \tan \alpha$. Deoarece distanța D este foarte mare, unghiul α este foarte mic și se pot folosi aproximațiile $\sin \alpha = \alpha$; $\tan \alpha = \alpha$. Atunci din cele două relații precedente rezultă că diferența de drum *geometric* este dată de expresia

$$d = \frac{a \cdot x}{D}.$$

Condiția ca în P să existe un maxim de interferență este ca diferența de drum *optic* să fie un multiplu întreg al lungimii de undă:

$$\delta = n \cdot d = n \cdot \frac{a \cdot x}{D} = k \cdot \lambda_0,$$

unde n este indicele de refracție al mediului în care este plasat dispozitivul Young. De aici se obține poziția franjei luminoase de ordin k , adică distanța de la ea la punctul central C ca fiind:

$$x_k = k \cdot \frac{D}{a} \cdot \lambda, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

unde $\lambda = \lambda_0/n$ este lungimea de undă a luminii monocromatice utilizate în mediul în care este cufundat dispozitivul Young. Din această relație rezultă că pentru $k = 0$ se obține $x_0 = 0$. Această franjă luminoasă al cărui centru este în punctul C este numită **franjă centrală**.

Conform relației precedente, distanța dintre două franje vecine, numită **interfranjă**, este dată de relația:

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{D}{a} \cdot \lambda.$$

Din această relație se vede că interfranja nu depinde de k , deci **franjele luminoase vecine sunt egal distanțate**. Relația precedentă permite determinarea lungimii de undă. Se măsoară interfranja i și, cunoscându-se distanța a dintre fantele ecranului E_1 și distanța D dintre ecrane se poate calcula lungimea de undă cu relația:

$$\lambda = \frac{a \cdot i}{D}.$$

Dacă se efectuează experiența lui Young cu lumină albă pe ecran se obține o franjă centrală albă însoțită de ambele părți de franje colorate începând cu violet și terminând cu roșu (spectrul luminii albe incidente). Acest rezultat se explică dacă se observă că radiațiile cu lungimi de undă diferite nu interferă între ele: pentru un ordin k dat, x_k depinde de lungimea de undă. Aceasta înseamnă că pozițiile franjelor luminoase de ordin k vor fi ușor diferite în funcție de λ . Fiecare radiație monocromatică determină apariția unui sistem propriu de franje, interfranjele depinzând de lungimea de undă. Deoarece franjele centrale au toate aceeași poziție, în zona respectivă se suprapun toate franjele care recompun lumina albă.



Exercițiul 3.2.1. Un dispozitiv Young, având distanța între fante egală cu 0,5 mm și distanța între planul fantelor și ecranul pe care se observă interferența de 1,2 m, este iluminat cu o sursă de lumină monocromatică având lungimea de undă de 500 nm. Aflați: a) interfranja i observată pe ecran; b) distanța a' dintre fante pentru care interfranja se dublează; c) interfranja i'' dacă întregul dispozitiv se cufundă într-un lichid având indicele de refracție 1,5.

Soluție: a) Interfranja i este dată de relația:

$$i = \frac{D}{a} \cdot \lambda_0 = \frac{1,2 \text{ m}}{5 \cdot 10^{-4} \text{ m}} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 1,2 \text{ mm}.$$

b) Dacă interfranja se dublează, $i' = 2i$. Folosind aici expresiile celor două interfranje rezultă că

$$a' = \frac{a}{2} = 0,25 \text{ mm}.$$

c) Dacă întreg dispozitivul Young este cufundat în lichid, drumurile optice diferă de cele geometrice și interfranja este dată de expresia

$$i'' = \frac{D}{a} \cdot \lambda = \frac{D}{a} \cdot \frac{\lambda_0}{n} = \frac{i}{n} = 0,8 \text{ mm}.$$

Până aici am considerat că lumina se propagă printr-un mediu omogen optic. Să considerăm că în dreptul fantei S_1 s-a așezat o lamă cu fețe plan-paralele, paralelă cu ecranul E_1 (figura 3.2.1.3). Se constată că realizând experimentul lui Young, în această situație franja centrală nu mai apare în punctul central C , ci într-un punct deplasat lateral C_1 . Așa cum am văzut deja, condițiile de maxim și de minim trebuie impuse asupra drumului optic. Amplitudinea rezultantă este maximă atunci când $n \cdot \delta = 2k \cdot (\lambda/2)$ și este minimă atunci când $n \cdot \delta = (2k + 1) \cdot (\lambda/2)$. În situația discutată lumina de la sursa S_1 ar parcurge distanța $S_1 C + (n - 1) \cdot d > S_2 C$. Franja centrală este deplasată până în poziția în care drumurile optice parcurse de cele două unde sunt egale.

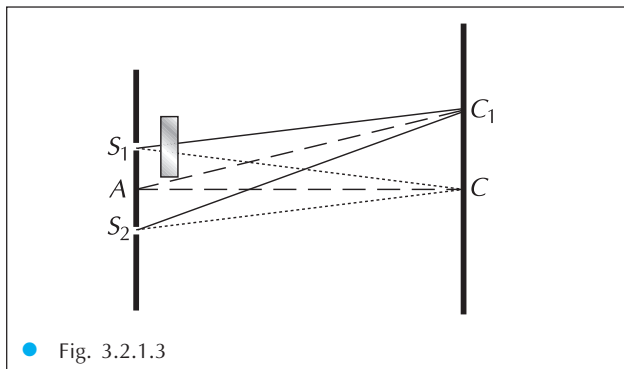


Fig. 3.2.1.3



Exercițiul 3.2.2. Un dispozitiv Young plasat în aer are distanța dintre fante de a , iar distanța de la planul fantelor la ecranul pe care se observă interferența este D . Dispozitivul Young este iluminat de o sursă de lumină monocromatică. Pe traseul luminii provenind de la fanta S_2 (figura 3.2.1.2) se plasează, paralel cu planul fantelor, o lamă cu fețe plan-paralele de grosime e , având indicele de refracție n . Aflați deplasarea Δ_k a maximului de ordin k determinată de introducerea lamei.

Soluție: Deoarece dispozitivul este plasat în aer, înainte de introducerea lamei, $x_k = k \cdot \lambda_0 \cdot D/a$. După introducerea lamei, diferența de drum optic devine

$$\delta = S_1 P - (S_2 P - e + n \cdot e) = (S_1 P - S_2 P) - (n - 1) \cdot e = \frac{a}{D} \cdot x - (n - 1) \cdot e.$$

Corespunzător, condiția de maxim de ordin k ,

$$\delta_k = \frac{a}{D} \cdot x'_k - (n - 1) \cdot e = k \cdot \lambda_0 \equiv \frac{a}{D} \cdot x'_k,$$

conduce la relația

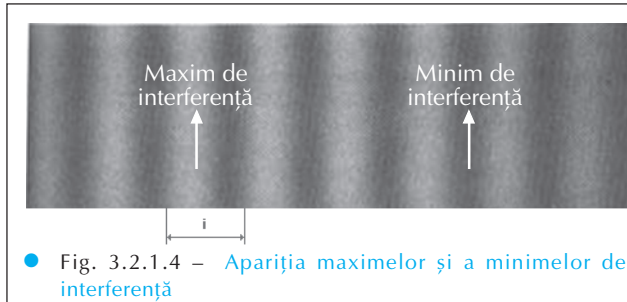
$$\Delta_k = (n - 1) \cdot e \cdot \frac{D}{a}.$$

Se constată că: a) deplasarea poziției unui maxim nu depinde de ordinul său k ; figura de interferență se deplasează ca un tot; b) deplasarea figurii de interferență nu depinde de lungimea de undă a luminii incidente.

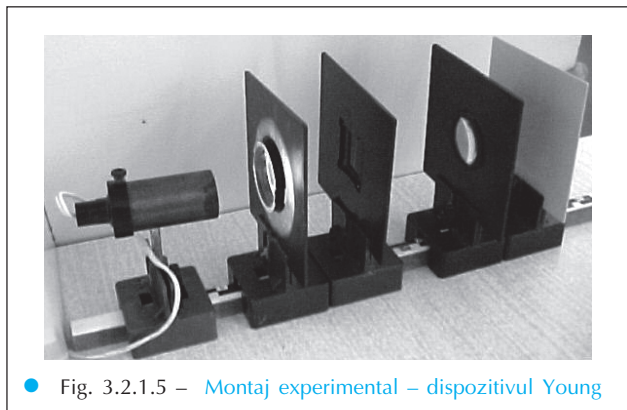
LUCRARE DE LABORATOR

Studiul interferenței luminii

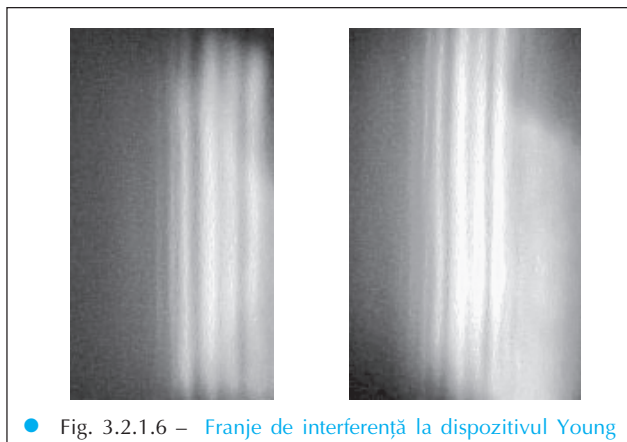
Veți observa formarea franjelor de interferență cu ajutorul dispozitivului Young. Acesta permite obținerea de unde coerente prin separarea fasciculului emis de sursă în alte două fascicule care se vor reîntâlni după ce parcurg drumuri diferite.



● Fig. 3.2.1.4 – Apariția maximelor și a minimelor de interferență



● Fig. 3.2.1.5 – Montaj experimental – dispozitivul Young



● Fig. 3.2.1.6 – Franje de interferență la dispozitivul Young

În punctele unde diferența de drum dintre fascicule este de multiplu par de semilungimi de undă se formează **maxime de interferență** (figura 3.2.1.4):

$$\delta = 2k \cdot \lambda_0 / 2$$

Dacă diferența de drum este multiplu impar de semilungimi de undă se formează **minime de interferență** (figura 3.2.1.4):

$$\delta = (2k + 1) \cdot \lambda_0 / 2.$$

Materiale necesare realizării montajului experimental din figura 3.2.1.5 sunt: un banc optic, o lampă alimentată de o sursă de tensiune stabilizată, o fantă simplă, un filtru roșu, un dispozitiv Young din trusa de fizică, acestea din urmă fiind montate în plăci suport pe suportii culsanți.

Pentru a îmbunătăți vizibilitatea franjelor începeți cu adaptarea dispozitivului Young din trusa de fizică: trasați cu un vârf ascuțit, două zgârieturi paralele foarte fine și cât se poate de apropiate una de alta lângă fantele originale. Interfranja este invers proporțională cu distanța dintre fantele dispozitivului, deci pentru formarea și observarea franjelor trebuie practicate fante apropiate la distanțe cât mai mici. Pentru fantele utilizate, distanța dintre ele a fost 0,5 mm, față de 1mm cât avea originalul.

Așezați pe bancul optic lampa optică, fanta și filtrul roșu, apoi dispozitivul Young la aproximativ 20 cm de fantă.

Așezați becul astfel încât filamentul său să fie în poziție verticală; la fel și fantele.

Pentru a observa franjele priviți spre sursa de lumină din imediata apropiere a dispozitivului Young. Puteți încerca observarea prin lentila cu distanța focală de 8,4 cm. Fotografiiile din figura 3.2.1.6 reprezintă franje formate cu dispozitivul descris anterior. Ele au fost fotografiate cu un zoom optic de 10X. La observarea cu ochiul liber dimensiunile lor sunt mult mai mici.

3



Experiment virtual: la adresa http://www.walter-fendt.de/ph14ro/doubleslit_ro.htm puteți observa franjele de interferență obținute pe un dispozitiv Young virtual. Puteți modifica dimensiunea fantelor, distanța dintre planul fantelor și ecran, precum și lungimea de undă a luminii utilizate.

3.2.2. Interferența localizată. Aplicații

Un alt sistem de a realiza două surse coerente dintr-o singură sursă de lumină este furnizat de oglinzile lui Fresnel (figura 3.2.2.1).

În acest caz cele două surse coerente S_1 și S_2 se obțin ca imagini virtuale ale unei surse S (sub formă de fantă perpendiculară pe planul figurii, cu două oglinzi plane OA și OB , care fac între ele un unghi foarte apropiat de 180°). În mod obișnuit se spune că cele două oglinzi fac între ele un unghi foarte mic (unghiul α în figura 3.2.2.1). Muchia comună a celor două oglinzi este paralelă cu fanta S folosită ca sursă, precum și cu cele două surse coerente. Imaginile virtuale S_1 și S_2 , împreună cu sursa S se află pe un cerc de rază r , cu centrul în punctul O , unde se află intersecția mediatoarelor segmentelor SS_1 și SS_2 .

Fenomenul de interferență se observă pe ecranul E_2 , paralel cu muchia comună. El constă din franje sub formă de dungi luminoase și întunecoase paralele cu muchia și practic echidistante. Franja centrală din punctul P este un maxim, deoarece toate undele care se suprapun în acest punct sunt în fază ($\varphi = 0$). Ecranul E_1 servește la ecranarea sursei S .

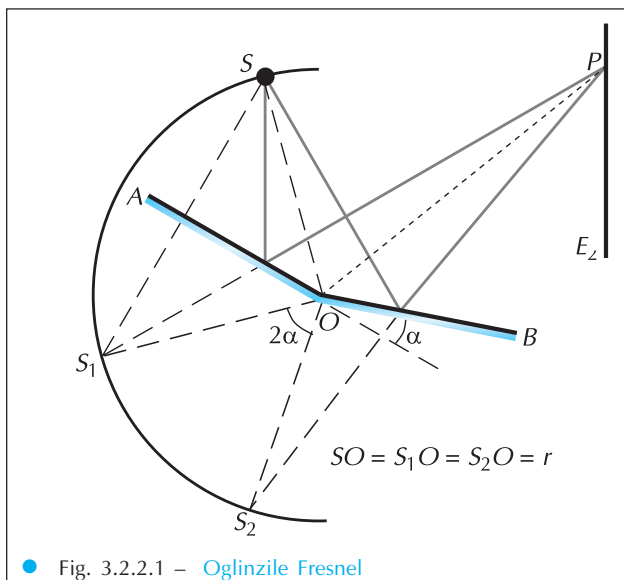


Fig. 3.2.2.1 – Oglinzile Fresnel

ACTIVITATE EXPERIMENTALĂ

1. Priviți aspectul unui balon de soluție glicerică sau al unei pelicule din aceeași soluție, „depusă” pe o ramă circulară.

2. Priviți aspectul unei pelicule de ulei sau benzină formate prin picurarea unor cantități mici din aceste substanțe pe suprafața apei dintr-un vas.

Observație: irizațiile colorate pe care le-ați observat alcătuiesc spectre de interferență localizată a luminii naturale. În aceste cazuri franjele se formează la infinit. Ele pot fi privite cu ochiul liber, acomodat pentru vederea la distanță mare. Fenomenul poartă numele de **colorile lamelor subțiri** (figura 3.2.2.2). El este prezent în natură. Penele păunilor au coloritul sidefat, scoicile sidefate prezintă culori diferite atunci când sunt privite sub unghiuri diferite.

Vom studia în continuare interferența luminii pe două tipuri de lame subțiri: lama cu fețe plane și paralele și pana optică.

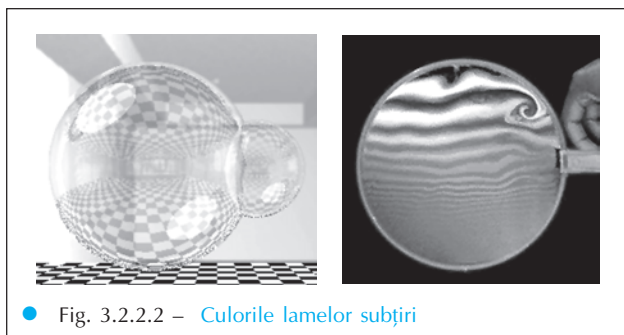


Fig. 3.2.2.2 – Colorile lamelor subțiri

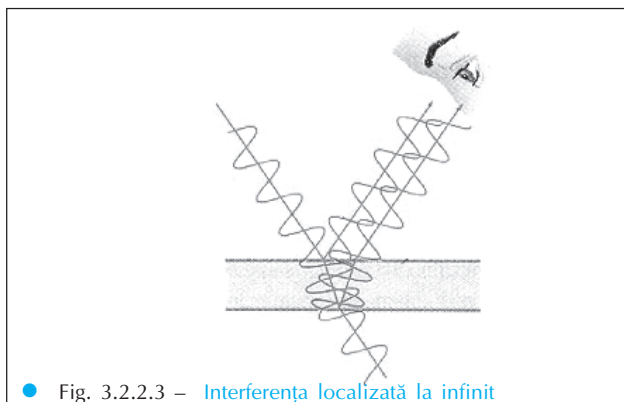


Fig. 3.2.2.3 – Interferența localizată la infinit

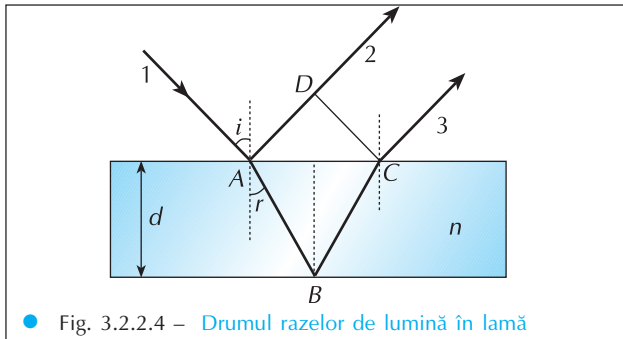


Fig. 3.2.2.4 – Drumul razelor de lumină în lamă

Lame cu fețe plane și paralele:

Un alt dispozitiv interferențial pe care-l vom studia este lama cu fețe plane și paralele.

Divizarea unui fascicul de lumină se poate face utilizând mai multe suprafețe reflectătoare de pe care o parte din fascicul se reflectă, iar cealaltă se transmite. În cazul lamei din figura 3.2.2.4, razele 1 și 2 sunt coerente, provenind din aceeași undă incidentă. Diferența de drum dintre razele 2 și 3 determină starea de interferență. Considerăm că lama, confecționată dintr-un material de indice de refracție n , are o grosime d . Când raza incidentă 1 ajunge la

fața lamei, ea este divizată: o parte se reflectă în punctul A , iar cealaltă parte pătrunde în lamă unde este refractată și apoi se reflectă pe a doua față a lamei ieșind din aceasta prin punctul C . Diferența de drum optic dintre razele 2 și 3 este dată de relația:

$$\delta = (d_3) - (d_2) = n \cdot (AB + BC) - \left(AD - \frac{\lambda}{2} \right).$$

Pierderea semiunde $\lambda/2$, apare datorită reflexiei luminii pe un suprafață de separație cu un mediu optic mai dens. Vom exprima segmentele AB , BC și AD în funcție de grosimea d a lamei, de indicele de refracție n și de unghiurile de incidență i și de refracție r .

Relațiile: $AB = BC = d/\cos r$ și $AD = AC \cdot \sin i$ se obțin din triunghiurile dreptunghice ABM și ACD .

În triunghiul dreptunghic ABM : $AC = 2d \cdot \tan r = 2d (\sin r / \cos r)$.

Din legea refracției luminii pe care ați învățat-o în clasa a 9-a se obține:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Rezultă:
$$\delta = n \cdot \frac{2d}{\cos r} - \left(\frac{2d \cdot \sin r}{\cos r} \cdot \sin i - \frac{\lambda}{2} \right).$$

de unde diferența de drum este:

$$\delta = 2d \cdot n \cdot \cos r + \frac{\lambda}{2}.$$

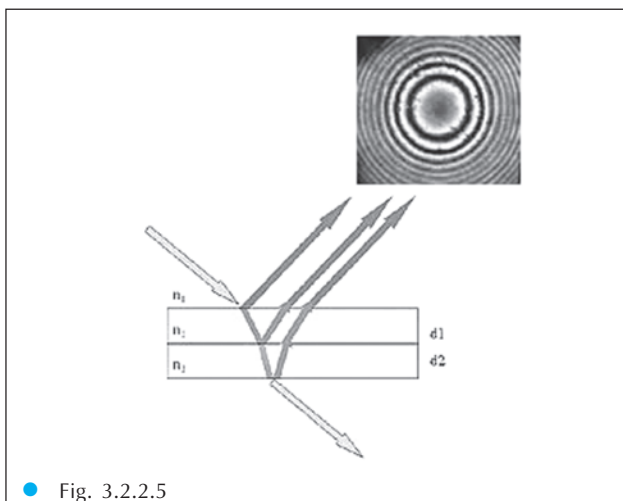


Fig. 3.2.2.5

În cazul incidenței normale, $i = 0$, unghiul de refracție $r = 0$ deci relația anterioară devine:

$$\delta = 2d \cdot n + \frac{\lambda}{2}.$$

Din toate razele incidente rezultă câte o astfel de pereche de raze paralele care părăsesc lama. Punând în calea lor, perpendicular pe direcția de propagare, o lentilă convergentă, ele se vor aduna în focarul imagine al lentilei, unde interferă.

Astfel, toate razele incidente sub unghiul i , vor genera raze reflectate paralele cu razele 2 și 3 care vor interfera. Rezultatul interferenței depinde de diferența de drum δ . Franjele se pot observa cu ochiul liber, acomodat pentru infinit.

Pana optică

Constă din două suprafețe plane care fac un unghi mic între ele. Atunci când fasciculul incident atinge suprafața superioară a penei, se produce divizarea lui într-un mod asemănător cu cel de la lama cu fețe plane și paralele. Deosebirea constă în faptul că franjele de interferență sunt acum localizate într-un plan aflat în vecinătatea suprafeței inferioare a penei. Practic, se poate spune că franjele sunt localizate pe pană.

Starea de interferență într-un punct de pe pană este determinată de grosimea penei din aceeași zonă. Din acest motiv, franjele se numesc franje de egală grosime. Ele sunt drepte, paralele între ele și cu muchia penei și echidistante.

Condiția de maxim sau de minim de interferență devine în acest caz:

$$2d_k \cdot n + \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda$$

unde d_k este grosimea penei în zona respectivă.

Pentru maximum de ordinul $k+1$ obținem:

$$2d_{k+1} \cdot n + \frac{\lambda}{2} = (k+1) \cdot \lambda$$

Prin scăderea ultimelor două relații rezultă:

$$d_{k+1} - d_k = \frac{\lambda}{2n} = \alpha \cdot i$$

Interfranja se poate calcula cu relația:

$$i = \frac{\lambda}{2\alpha n}$$

Inelele lui Newton

Dispozitivul constă dintr-o lentilă plan – convexă și o lamă cu fețe plane și paralele, așezate ca în figura 3.2.3.8. Stratul de aer dintre lentilă și lamă are grosime din ce în ce mai mică, pornind de la margine spre centru. Diferența de drum dintre razele 2 și 1 este:

$$\delta = 2d_k \cdot n_1 + \frac{\lambda}{2}$$

Din triunghiul OCP rezultă că:

$$R^2 = (R - d_k)^2 + r_k^2$$

Dacă d_k are valoarea mult mai mică decât raza R a suprafeței lentilei, va rezulta că:

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R} \text{ și } \delta = n_1 \cdot \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

Atunci când $\delta = 2k \cdot \lambda / 2$ se obțin maxime de interferență, iar când $\delta = (2k + 1) \cdot \lambda / 2$ se obțin minime ca în figura 3.2.2.9.

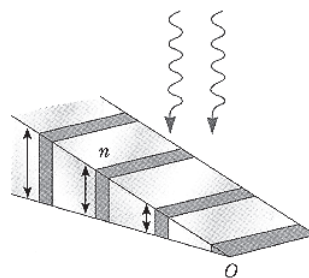


Fig. 3.2.3.6

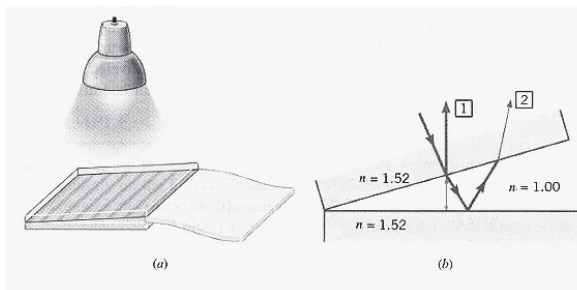


Fig. 3.2.3.7 – Interferența luminii pe pana optică

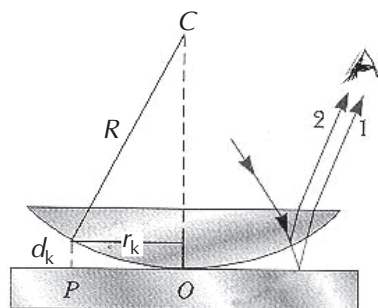


Fig. 3.2.3.8 – Montaj pentru obținerea inelelor lui Newton

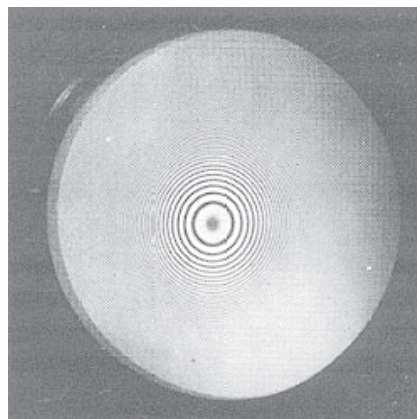


Fig. 3.2.3.9 – Franje de interferență – inelele lui Newton

ACTIVITĂȚI DE EVALUARE

Formulați răspunsuri pentru următoarele întrebări:

1. Ce este *dispersia luminii*?
2. Ce este *radiația monocromatică*?
3. Cum se formează *curcubeul*?
4. Ce sunt *sursele coerente* de lumină?
5. Cum se enunță *principiul superpoziției liniare*?
6. Ce este un *dipozitiv Young*?
7. Ce înseamnă *interferența localizată*?
8. Ce înțelegeți prin *culorile lamelor subțiri*?

Apreciați cu adevărat sau fals:

1. Franjele de interferență formate de pana optică sunt localizate la infinit.
2. Franjele de interferență formate de pana optică sunt paralele cu muchia penei.
3. Franjele de interferență formate de lama cu fețe plane și paralele sunt localizate la infinit.
4. Atunci când se lucrează cu lumină albă pe un dispozitiv Young, se obțin maxime de culoare roșie mai îndepărtate de axul optic decât cele violete.
5. Sursele obișnuite de lumină nu sunt coerente.

Probleme

Problema 3.1. Aflați interfranja i pentru un dispozitiv Young, cunoscând distanța, D , dintre ecranul de observație și planul celor două fante, distanța dintre fante, a , și lungimea de undă, λ , a luminii monocromatice folosite.

Aplicație: $D = 100 \text{ cm}$; $a = 1 \text{ mm}$; $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$.

R: $i = 0,5 \text{ mm}$.

Problema 3.2. Un dispozitiv Young, care are distanța a între fante și distanța D de la planul fantelor la ecran, este iluminat cu o sursă de lumină monocromatică de lungime de undă λ . Aflați: a) interfranja i ; b) distanța dintre fante, a' , pentru care interfranja se dublează; c) valoarea i' a interfranței dacă întreg sistemul este scufundat într-un lichid având indicele de refracție n , în condițiile de la punctul a.

Aplicație: $a = 0,5 \text{ mm}$; $D = 1,2 \text{ m}$; $\lambda = 500 \text{ nm}$; $n = 1,5$.

R: $i = 1,2 \text{ mm}$; $a' = 0,25 \text{ mm}$; $i' = 0,8 \text{ mm}$.

Problema 3.3. O undă monocromatică având lungimea de undă λ cade pe un ecran E în care sunt practicate două fante, F_1 și F_2 , așezate la distanța a una de alta. Franjele de interferență sunt observate pe un paravan P , așezat la distanța D (necunoscută) de ecranul E . Aflați: a) distanța D , astfel încât pe paravanul P primul maxim de interferență să fie la distanța x_1 de franja centrală; b) deplasarea Δx_1 a primei franje luminoase, atunci când paravanul P este îndepărtat față de ecranul E cu distanța suplimentară d ; c) grosimea e a unei lame de indice de refracție n care, așezată în calea fasciculului care iese din fanta F_1 , să provoace apariția primei franje luminoase în locul franjei centrale; d) interfranja i dacă, în condițiile de la punctul a), lumina străbate drumul de la ecranul E la paravanul P prin apă, cu viteza $c' = \frac{c}{n}$.

Aplicație: $\lambda = 680 \text{ nm}$; $a = 2 \text{ mm}$; $x_1 = 0,34 \text{ mm}$; $d = 0,5 \text{ m}$; $n = 1,56$; $f = \frac{3}{4}$.

R: $D = 1 \text{ m}$; $\Delta x_1 = 0,17 \text{ mm}$; $e = 1,2 \mu\text{m}$; $i = 0,25 \text{ mm}$.

Problema 3.4. O peliculă de soluție glicerică cu indicele de refracție 1,73 este luminată cu radiație având lungimea de undă de 500 nm, sub un unghi de incidență de 60° . Ce grosime minimă ar trebui să aibă pelicula pentru ca să apară întunecată?

R: $0,17 \mu\text{m}$

Problema 3.5. Un fascicul de lumină monocromatică cu lungimea de undă de 630 nm cade pe suprafața unei pene optice cu indicele de refracție 1,5, sub incidență normală. Se formează 10 franje luminoase și 9 franje întunecoase. Calculați cu cât variază grosimea penei optice în acest caz.

R: $1,9 \mu\text{m}$

Test de evaluare

1. Utilizând notațiile din manual, expresia corectă a interfranței la dispozitivul Young este:

a) $i = \frac{\lambda l}{2D}$; b) $i = \frac{\lambda D}{2l}$; c) $i = \frac{\lambda D 2l}{n}$; d) $i = \frac{2l}{\lambda D}$.

2. Pentru a obține interferența constructivă între două unde luminoase, diferența de drum optic δ trebuie să îndeplinească condiția:

a) $\delta = k \cdot \lambda / 2$; b) $\delta = (2k + 1) \cdot \lambda$; c) $\delta = 2k \cdot \lambda / 2$; d) $\delta = 2k \cdot \lambda / 4$. ($k \in \mathbb{N}$)

3. Într-un dispozitiv Young cele două fante S_1 și S_2 sunt situate la distanța $2l = 1$ mm. Pe un ecran situat la distanța $D = 2$ m se observă franjele de interferență. Lumina monocromatică folosită are lungimea de undă $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ m. Interfranța observată pe ecran valorează:

a) 0,5 mm; b) 1 mm; c) 2 mm; d) 5 mm.

4. Un dispozitiv Young are fantele distanțate cu $2l = 2$ mm. Pe ecranul pe care se observă figura de interferență se măsoară distanța dintre două franje luminoase succesive $i_1 = 0,34$ mm. Depărtându-se ecranul cu $D' = 0,5$ m se găsește noua interfranță $i_2 = 0,51$ mm. Distanța inițială la care era situat ecranul este:

a) 0,5 m; b) 0,75 m; c) 1 m; d) 2 m.

5. Un dispozitiv Young este iluminat cu o lumină cu $\lambda = 500$ nm. Distanța dintre fante este $a = 5$ mm, iar distanța fantă-ecran este $D = 2$ m.

5.1. Interfranța i în aer are valoarea:

a) $4 \cdot 10^{-4}$ m; b) 10^{-4} m; c) $2 \cdot 10^{-4}$ m; d) 0,3 mm.

5.2. Interfranța i' , dacă distanța dintre fante se micșorează de 2 ori devine:

a) 10^{-4} mm; b) 0,4 mm; c) $2 \cdot 10^{-4}$ m; d) $6 \cdot 10^{-4}$ m.

5.3. Interfranța i'' , dacă întreg sistemul se introduce într-un mediu cu indicele de refracție $n = 1,6$ are valoarea:

a) $2,8 \cdot 10^{-4}$ m; b) 12,5 mm; c) 0,125 mm; d) 10^{-4} m.

6. Culoarea maximului central, în cazul dispozitivului lui Young, iluminat cu lumină albă este:

- a) irizat cu roșu pe margini;
b) irizat cu violet pe margini;
c) albă;
d) în acest caz nu se obține maxim central.

7. La interferența pe o lamă plan paralelă, diferența de drum optic:

- a) scade cu unghiul de incidență;
b) nu depinde de unghiul de incidență ci numai de grosimea lamei;
c) crește cu unghiul de incidență;
d) nu depinde de unghiul de incidență ci numai de indicele de refracție.

8. Drumul optic este:

- a) mai mic decât drumul geometric;
b) mai mic sau egal cu drumul geometric;
c) mai mare decât drumul geometric;
d) mai mare sau egal cu drumul geometric

Sinteză capitolul 3

Dispersia este fenomenul de variație a indicelui de refracție al unui mediu în funcție de lungimea de undă a radiației electromagnetice care îl traversează.

Se numesc **unde coerente** două sau mai multe unde care au aceeași pulsație și diferențe de fază constante.

Se numește **interferență** fenomenul de superpoziție a două sau mai multe unde coerente.

Se numește câmp de interferență regiunea din spațiu în care are loc interferența undelor.

Se numește **drum optic** δ corespunzător unui drum geometric d , produsul $n \cdot d$, unde n este indicele de refracție al mediului prin care se propagă lumina:

$$\delta = n \cdot d.$$

Principiul superpoziției liniare: atunci când două sau mai multe unde se suprapun într-o regiune din spațiu, elongația rezultantă în orice punct din acea regiune și la orice moment

de timp este egală cu suma algebrică a elongațiilor pe care le-ar produce în acel punct fiecare undă, dacă ar fi numai ea prezentă.

Poziția franjei luminoase de ordinul k , la dispozitivul Young este:

$$x_k = k \cdot \frac{D}{a} \cdot \lambda, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

Interfranța la dispozitivul Young este:

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{D}{a} \cdot \lambda.$$

Diferența de drum la lama cu fețe plane și paralele este:

$$\delta = 2d \cdot n \cdot \cos r + \frac{\lambda}{2}.$$

Interfranța la pana optică se poate calcula cu relația:

$$i = \frac{\lambda}{2\alpha n}$$

CUPRINS

CAPITOLUL 1

Oscilații și unde mecanice

1.1.	Oscilatorul mecanic	4
1.1.1.	Fenomene periodice. Procese oscilatorii în natură și în tehnică	4
1.1.2.	Mărimi caracteristice mișcării oscilatorii	5
1.1.3.	Oscilații mecanice amortizate	6
1.1.4.	(*) <i>Modelul oscilatorului liniar armonic</i>	9
1.1.5.	Compunerea oscilațiilor paralele	17
1.2.	Oscilatori mecanici cuplați	18
1.2.1.	Oscilații mecanice întreținute. Oscilații mecanice forțate	18
1.2.2.	(*) <i>Rezonanța</i>	20
1.2.3.	Consecințele rezonanței	21
1.3.	Unde mecanice	24
1.3.1.	Propagarea unei perturbații într-un mediu elastic. Transferul de energie	24
1.3.2.	(*) <i>Modelul „undă plană”. Periodicitatea spațială și temporală</i>	27
1.3.3.	Reflexia și refracția undelor mecanice	31
1.3.4.	Unde seismice	33
1.3.5.	Interferența undelor	35
1.3.6.	Acustică	46
1.3.7.	Ultrasunete și infrasunete. Aplicații în medicină, industrie, tehnică militară	49
	Activități de evaluare	52

CAPITOLUL 2

Oscilații și unde electromagnetice

2.1.	Circuitul RLC în curent alternativ	58
2.2.	Oscilații electromagnetice libere. Circuitul oscilant	78
2.3.	Câmpul electromagnetic. Unda electromagnetică	80
2.4.	Clasificarea undelor electromagnetice	82
2.5.	Aplicații	84
	Activități de evaluare	93

3

CAPITOLUL 3

Optica ondulatorie

3.1.	Dispersia luminii	98
3.2.	Interferența	101
3.2.1.	(*) <i>Dispozitivul Young</i>	103
3.2.2.	Interferența localizată. Aplicații	107
	Activități de evaluare	110

* Subcapitole cu caracter opțional

Bibliografie

1. F.W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young – *Fizică*
2. C. Ciubotaru, Gh.Zet, A. Vasiliu – *Fizica*
3. H. Schaim – *Fizică – PSSC*
4. P.S. Crawford Jr., *Cursul de fizică Berkeley*
5. M. Ailincăi, L. Rădulescu – Probleme – întrebări de fizică
6. M. Garabet, L. Strasser, M. Fronescu – *Fizică – probleme grilă și teste recapitulative pentru bacalaureat și admitere*
7. M. Garabet, I. Neacșu – *Lecții experimentale în laboratorul de fizică*