

23. Eficiența motorușului

Determină randamentul cu care un motor electric miniatură (de la o jucărie) transformă energia electrică în energie mecanică. Prezintă metoda pe care ai folosit-o și rezultatele pe care le-ai obținut.

24. Motor și generator deodată?

Mașinile electrice sunt reversibile: dacă sunt alimentate cu energie electrică furnizează energie mecanică (funcționează ca motoare), iar dacă sunt alimentate cu energie mecanică furnizează energie electrică (funcționează ca generatoare electrice). Oare *în timpul* funcționării unui motor acesta este și generator?

Răspuns: Da! Se generează energie electrică atunci când rotorul se învâрте, indiferent care este cauza învârtirii acestuia.

25. Frânare... electrică!

Ar putea fi oare folosite motoarele locomotivelor electrice pentru frânarea acestora?

Răspuns: Da! Motoarele electrice pot funcționa ca generatoare, preluând energie mecanică de la locomotiva în mișcare.

26. Așezarea frigiderului

În manualul cu instrucțiuni de folosire al unui frigider este făcută următoarea recomandare:

„Când așezați frigiderul, respectați distanțele minime din figură”. (fig. 2.72)

Fig. 2.72. Distanțe minime care trebuie respectate la așezarea unui anumit model de frigider.

a) De ce oare este făcută această recomandare?

b) Ce reprezintă oare săgețile care trec pe sub frigider, prin spatele și pe deasupra acestuia?

Răspuns parțial: a) Frigiderul extrage căldura pătrunsă în interiorul său și trebuie să o elibereze în aerul din încăperea prin curenți de convecție.

27. Consumul de energie electrică al unui frigider

În cartea tehnică a unui frigider este indicată puterea nominală a frigiderului (210 W) și consumul de energie electrică (1,00 kWh în 24 h).

a) Cât este puterea medie absorbită de frigider?

b) Câte minute te aștepti să funcționeze (în medie) motorul frigiderului pe durata unei ore?

c) Cât te aștepti să fie consumul mediu *anual* de energie electrică al frigiderului?

d) În care perioadă a anului te aștepti să fie depășit consumul zilnic mediu?

B. Oscilații electromagnetice libere

Un condensator electric care are la bornele lui o tensiune electrică U va putea să-și mențină această tensiune atât timp cât sarcina q de pe armături nu poate să le părăsească. Pentru ca să aducem sarcini electrice de semn opus pe armături trebuie să se efectueze un lucru mecanic necesar separării sarcinilor pozitive de cele

negative. Acest lucru mecanic depinde de geometria celor două armături, iar geometria definește mărimea caracteristică a condensatorului și anume *capacitatea* C a lui. Să analizăm puțin acest proces de aducere sau de îndepărtare a sarcinilor de pe armăturile unui condensator.

B.1. *Încărcarea și descărcarea unui condensator

Putem investiga experimental încărcarea sau descărcarea unui condensator realizând o schemă simplă.



10. În acest scop, avem nevoie de un condensator, un rezistor, o baterie și un instrument de măsură. Rezistorul și condensatorul pot fi procurate de la un magazin de piese radio. Rezistența rezistorului

ar trebui să fie în jurul a $0,5 - 1\text{ M}\Omega$ iar capacitatea să fie destul de mare pentru ca efectele să poată fi observate (1 și $100\text{ }\mu\text{F}$). Condensatoarele pentru aceste valori se realizează printr-o tehnologie mai deosebită și se numesc *condensatoare electrolitice*. Ceea ce este important este că un condensator electrolitic, pe

lângă *capacitatea* lui, mai are și alte două caracteristici de care trebuie să ținem seama. Are o *polaritate* care este scrisă pe condensator, ceea ce înseamnă că el se va lega în circuit întotdeauna astfel încât borna lui pozitivă să fie legată (prin circuit) la borna pozitivă a sursei, și la fel pentru borna negativă. O altă caracteristică este aceea că are o *tensiune maximă* scrisă pe el. Un condensator electrolitic nu se va lega la o sursă de tensiune mai mare decât cea care este permisă. În fine, din aceste motive, un condensator electrolitic nu se introduce într-un circuit de curent alternativ. Încercați să argumentați această ultimă condiție. În circuitele de curent alternativ se folosesc condensatoare obișnuite care se pot recunoaște prin faptul că sunt mai mici ca volum și capacitate electrică, și nu au o polaritate scrisă la bornele lor. Bateria utilizată poate fi una de 4,5 V sau de 9V, care poate fi procurată din comerț. Ca instrument de măsură putem folosi fie un aparat de măsură universal (analogic sau digital), fie un osciloscop. În lipsă, se poate utiliza un ansamblu de două diode LED (la fel ca în *Activitatea experimentală 10*) care vor fi montate între condensator și rezistor. Schema electrică a montajului este dată în figura 2.73.

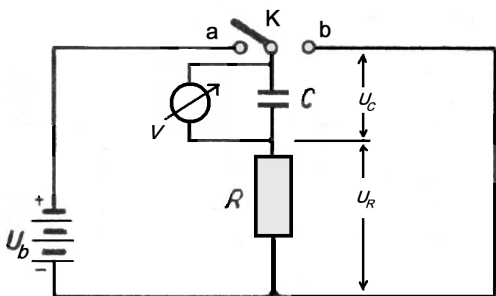


Fig. 2.73. Circuit pentru studiul încărcării și descărcării unui condensator pe o rezistență.

În lipsa unui osciloscop, studiul se va face calitativ, observând ce se întâmplă la bornele instrumentului de măsură sau ce se întâmplă cu iluminarea LED-urilor. Comutatorul (K) de la borna superioară a condensatorului poate fi pus în poziția **a** sau **b**. În poziția **a**, bateria va fi conectată la bornele condensatorului. Dacă punem instrumentul (V – voltmetru) ca în figură, adică să măsoare tensiunea pe condensator (U_c), vom constata că la momentul conectării condensatorului la baterie, tensiunea indicată de instrument crește în

timp până atinge o valoare maximă care nu se va mai modifica (egală cu tensiunea bateriei).

Să analizăm puțin fenomenele fizice din acest experiment. Deoarece inițial condensatorul este neîncărcat, între bornele lui și ale bateriei există o diferență de potențial, ceea ce va face să circule un curent electric (purtații de sarcină se vor mișca) dinspre baterie spre condensator. Această mișcare va genera un curent electric care va duce sarcini pe armăturile condensatorului. Din cauza relației dintre tensiunea de la bornele condensatorului și sarcina de pe armături ($q = C \cdot U$), creșterea sarcinii pe condensator va duce automat la creșterea tensiunii la bornele condensatorului. Atât timp cât la armăturile condensatorului diferența de potențial este mai mică decât cea de la bornele bateriei, sarcinile vor circula spre condensator, acumulându-se pe armăturile lui. Când acestea vor fi egale, deplasare sarcinilor se va opri. Este deci important să înțelegem că acest proces de încărcare are o durată finită. Notând cu Δ , variația unei mărimi, vom putea scrie

$$\Delta q = C \Delta U, \text{ sau } q_2 - q_1 = C(U_2 - U_1),$$

unde prin indicii 1 și 2 am notat valorile la momentele $t_1 < t_2$.

Dar sarcina care se scurge spre condensator în acest interval de timp va putea fi măsurată prin *intensitatea curentului*, definită prin:

$$i = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1)$$

și va fi observabilă pe instrument. Intensitatea va scădea rapid. Spunem că avem un *efect tranzitoriu* care indică trecerea spre echilibru (curentul zero și tensiunea constantă maximă). Spunem că *am încărcat condensatorul*.

Să vedem ce se întâmplă dacă acum trecem comutatorul din poziția **a** în poziția **b**. De data aceasta, condensatorul este încărcat, având la borne o tensiune U_b și va funcționa temporar ca o sursă. Prin rezistorul R va circula un curent electric până ce întreaga sarcină acumulată inițial pe armăturile condensatorului se va anula. Tensiunea pe condensator va scădea. Spunem că am descărcat condensatorul. Încărcarea și descărcarea condensatorului produce efecte contrare. În figura 2.74 se pot vedea cele două curbe: de încărcare și de descărcare.

Să judecăm fenomenele de mai sus și sub aspect energetic. Pentru a încărca condensatorul, bateria face un lucru mecanic necesar pentru deplasarea sarcinilor,

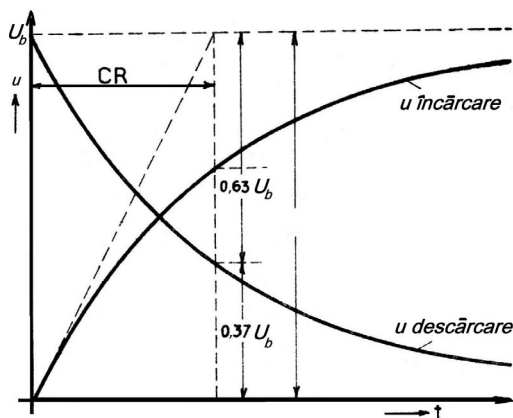


Fig. 2.74. Graficul procesului de încărcare și de descărcare a unui condensator.

așa cum am văzut la A.9. Acest lucru mecanic se regăsește sub formă de energie a câmpului electric care există între armăturile condensatorului. La descărcare, energia înmagazinată în câmp se transferă curentului electric care trece prin rezistorul R . Întreaga energie se va pierde (disipa) prin efect Joule pe încălzirea rezistorului. Indiferent de valoarea rezistorului, această energie se va disipa mai repede (în timp) pe o rezistență de valoare mică sau mai încet pe o rezistență mai mare. În figura 2.74 sunt prezentate o serie de date numerice interesante. Intervalul de timp în care tensiunea crește de la zero la valoarea $0,63 U_b$ sau scade, la descărcare, la valoarea $0,37 U_b$, se face într-un interval de timp egal ca valoare cu produsul $\tau = RC$. Acest produs se numește *constantă de timp* a circuitului format din rezistor și capacitate, numit *circuit RC*.

Dacă scriem relațiile din ochiul de circuit de la descărcare, vom avea pe rând:

$$u_C + u_R = 0 \quad (2)$$

$$u_C = \frac{q}{C} \text{ și } u_R = iR = R \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Variația în timp a sarcinii electrice q va fi dată astfel de ecuația:

$$R \frac{\Delta q}{\Delta t} + \frac{q}{C} = 0 \text{ sau } \frac{\Delta q}{\Delta t} + \frac{q}{RC} = 0. \quad (3)$$

În ecuația de mai sus valoarea sarcinii q este cea la momentul 1, iar Δq indică variația acestei sarcini, așa cum rezultă ea din ecuația (1). Dacă rescriem ecuația (3) luând în considerare relația (1) vom avea:

$$\frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} = -\frac{q_1}{RC} \quad (4)$$

Sau rearanjând termenii obținem:

$$q_2 = q_1 - \frac{q_1}{RC} (t_2 - t_1), \text{ sau}$$

$$q_2 = q_1 - q_1 \frac{\Delta t}{RC}. \quad (5)$$

Să vedem ce ne spune această ultimă relație.

Dacă alegem pentru simplificare intervale de timp Δt constante, și analizăm ce se întâmplă pas cu pas, vedem că la fiecare interval Δt sarcina scade cu valoarea

constantă $q_1 \frac{\Delta t}{RC}$. Dacă repetăm această operație pas

cu pas, putem obține exact ce se va întâmpla cu sarcina de pe condensator.



44. Calculați folosind relația (5) variația în timp a sarcinii pentru următoarele condiții, $\Delta t = 0,01$, $RC = 1$ și q inițial 1000. La fiecare etapă de calcul considerați ca sarcină inițială cea care va rezulta din sarcina finală a operației anterioare. Primele valori vor fi: 1000; 990; 980,1; 970,3; 960,6; 950,0; ș.a.m.d. Faceți calculele utilizând un calculator de buzunar, și apoi reprezentați grafic valorile obținute în funcție de timp (unitatea de măsură va fi $\Delta t = 0,01$, deci momentele vor fi la Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, $4\Delta t$, ..., etc.). Calculați ce sarcină a mai rămas pe condensator după un interval de timp egal cu $RC = 1$.

Vom observa că scăderea în timp a sarcinii nu este liniară. Viteza de scădere se micșorează, curba tinzând să devină orizontală atunci când timpul tinde spre infinit. O astfel de curbă se numește *exponențială* și descrie nenumărate fenomene naturale. Amintim aici scăderea intensității radiației luminoase (sau radio, sau X) cu distanța, dezintegrarea radioactivă a unor substanțe etc. Această curbă are forma analitică:

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

unde e este *baza logaritmilor naturali* (2,7182...). Denumirea de *natural* provine din faptul că multe fenomene naturale pot fi descrise prin această funcție.



45. Calculați constanta de timp a unui circuit RC care are valorile indicate la începutul capitolului: $R = 1\text{MW}$ și $C = 50\text{mF}$. Puteți să urmăriți pe un instrument fenomenul de încărcare sau descărcare?

B.2. Oscilații libere într-un circuit RLC

Dacă în circuitul din figura 2.75 se introduce și o bobină de inductanță L , fenomenul de descărcare sau încărcare prezentat în figura 2.75 va fi totalmente schimbat. Prin adăugarea unei bobine am obținut un circuit serie RLC asemănător cu cel studiat anterior.

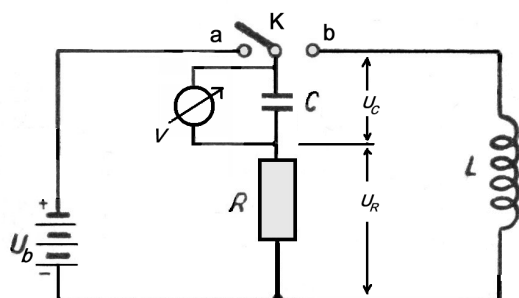


Fig. 2.75. Descărcarea unui condensator printr-o bobină.

În figura 2.76 este prezentat ceea ce se poate vedea, de exemplu, pe un osciloscop (sau pe un calculator prevăzut cu interfață de achiziție de date). Pe ecranul osciloscopului se văd oscilații care au o perioadă T , astfel încât în momentele notate cu a, c, e , intensitatea curentului prin circuit va avea maximele notate cu b, d, f , etc. Linia punctată care trece prin maxime se numește *înfășurătoare*, iar forma ei analitică este cea dată în formula (6).

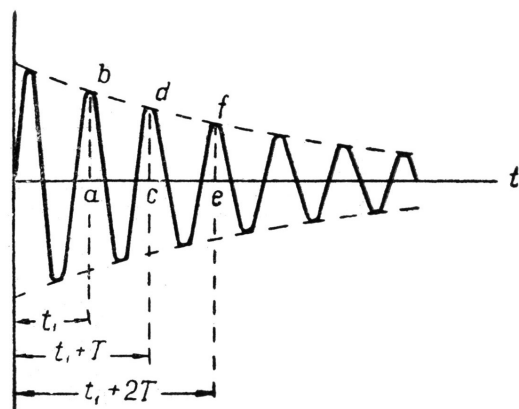


Fig. 2.76. Oscilațiile curentului în circuitul din figura 2.75, dacă condensatorul (încărcat) se va descărca prin rezistor și bobină.

În figura 2.77 sunt prezentate schematic fenomenele care se petrec atunci când un condensator încărcat se descarcă printr-o bobină. Pentru simplificarea discuției vom considera că circuitul nu are rezistență ($R=0$). Vom

vedea că această idealizare nu poate fi îndeplinită practic, niciodată.

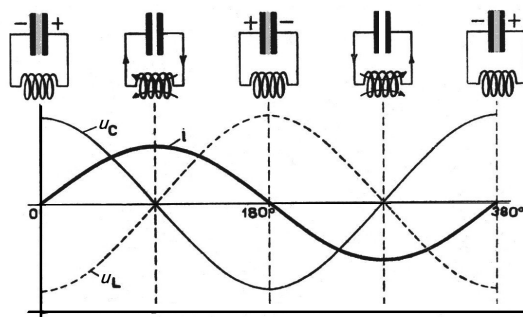


Fig. 2.77. Oscilații electrice în circuitul LC.

Cele cinci secvențe ale variației curentilor și a tensiunilor în circuitul LC începe cu situația în care condensatorul este încărcat. Zona din mijlocul plăcilor este gri pentru a scoate în evidență că există un câmp electric maxim între armături. Tensiunea la bornele condensatorului este maximă iar intensitatea curentului în primul moment este zero, după cum se vede din graficul de mai sus. Descărcarea condensatorului conduce la scăderea tensiunii pe condensator și creșterea intensității curentului. La maxim al intensității curentului, câmpul magnetic din bobină este maxim (reprezentat prin liniile de câmp desenate în bobină). Procesul va continua deoarece curentul prin bobină nu poate să dispară brusc astfel încât condensatorul se va reîncărca. Curentul va circula în sens invers față de cel de la descărcare deoarece el a fost produs de reacția bobinei la variația câmpului magnetic. Autoinducția din bobină va genera acest curent în sens contrar. Așa cum se vede din figura 2.77, procesul de alternare a tensiunilor și a curentilor va continua.

Ca și în cazul anterior, vom face o mică analiză sub aspect energetic. De la plecare energia stocată va fi stocată în câmpul electric al condensatorului. Pentru ca oscilațiile să fie amortizate cât mai puțin trebuie ca întreaga energie să fie preluată de către câmpul magnetic din bobină, altfel o parte din aceasta se va pierde. Prin analogie, putem raționa în felul următor. Avem două recipiente unul plin cu apă iar altul gol. Analogul oscilațiilor ar fi operația de a turna periodic apa dintr-un vas în celălalt. Dacă vasul al doilea are capacitatea mai mică decât primul, prin turnare, o parte din apă se va pierde. La fel și aici. Condiția ca prin oscilație energia să se transfere cu minim

de pierdere (nu ne referim la pierderea prin efect Joule) este cea determinată anterior, la studiul circuitului serie (sau paralel) RLC și anume, condiția de rezonanță, $XC = XL$. Cu alte cuvinte, un circuit RLC va putea să oscileze cu pierderi minime doar la frecvența de rezonanță:

$$f_{\text{rez}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Din cauză că nu putem în nici un fel reduce la zero rezistența circuitului, vor exista întotdeauna pierderi și deci energia se va disipa termic. Se spune că oscilațiile care au loc într-un circuit RLC , ca urmare a descărcării condensatorului, sunt *oscilații libere*. Oscilațiile libere sunt singurele pe care le poate avea un sistem RLC dacă este scos din echilibru (de exemplu, dacă este încărcat condensatorul și

lăsat să se descarce prin bobină) și este lăsat liber.

Indiferent dacă avem oscilații libere (amortizate) sau nu, un sistem fizic oarecare va putea să prezinte fenomene oscilatorii dacă sistemul posedă cel puțin două „rezervoare” independente de energie. Acest lucru se petrece și la oscilația pendulului (energie cinetică, energie potențială gravitațională) și la oscilatorul elastic (energie cinetică, energie potențială de deformare) și la oscilațiile unui lichid într-un sistem de vase comunicante, precum și la alte sisteme, indiferent care este originea energiei. Dar aceasta nu este singura condiție ca într-un sistem să apară oscilații. Am putea spune că aceasta este *condiția necesară* dar *nu și suficientă*. Oscilații apar și se pot întreține dacă sistemul oscilant este cuplat cu un alt sistem care *întreține oscilațiile*.

B.3. Circuitul oscilant

Dacă nu există disipare (pierderi, adică $R = 0$), oscilațiile sinusoidale într-un circuit RLC vor continua indefinit. Dacă însă există pierderi, atunci o parte din energia pusă în joc se va disipa, iar amplitudinea oscilațiilor (de curent și de tensiune) va scădea continuu. În figura 2.78 este prezentată această scădere denumită *amortizare*.

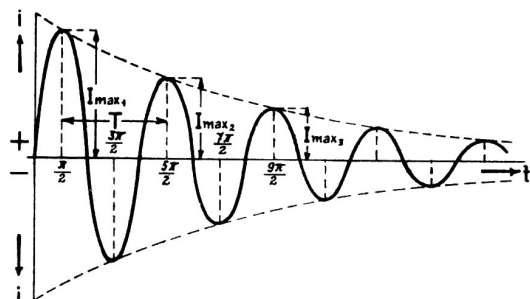


Fig. 2.78. Amortizarea oscilațiilor în circuitul RLC .

La fiecare oscilație amplitudinea va fi mai mică decât la cea anterioară, iar pe desen au fost prezentate maximele succesive de curent în acest caz. Pentru a întreține oscilațiile va trebui ca pierderea de energie (la fiecare perioadă) să fie compensată din exterior. Este nevoie astfel de un sistem ajutător care să permită menținerea oscilațiilor.

Acest sistem va trebui să fie el însuși capabil să genereze oscilații. Să presupunem că sistemul poate produce oscilații de o frecvență f care poate fi modificată la dorință. Sistemul oscilant RLC va avea o frecvență proprie de oscilație (oscilațiile libere) pe frecvența, să

spunem f_0 . Dacă f diferă de f_0 , atunci sistemul oscilant oscilează cu amplitudine mică, iar oscilațiile sunt denumite *oscilații forțate*. Dacă frecvența oscilațiilor sistemului care trebuie să întrețină oscilațiile circuitului RLC are chiar frecvența $f = f_0$, atunci oscilațiile vor fi întreținute, și sistemul va oscila *la rezonanță*.

Un ansamblu format dintr-un circuit oscilant RLC și un sistem de întreținere a oscilațiilor acestuia pe frecvența proprie de oscilație se numește *oscilator*.

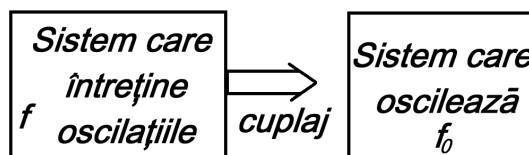


Fig. 2.79. Întreținerea oscilațiilor.

Sistemul care întreține oscilațiile va trebui deci să îndeplinească două condiții: a) să aibă aceeași frecvență cu cea a sistemului oscilant și b) să fie în fază cu sistemul oscilant. Ultima condiție o cunoaștem din copilărie: cel care ne ajută să ne dăm în leagăn trebuie să acționeze cu aceeași frecvență ca și oscilațiile libere ale leagănului dar să fie și în fază cu aceste oscilații, altfel oscilațiile se reduc ca amplitudine.

Un caz frecvent de utilizare a circuitului oscilant este întâlnit la un receptor radio (figura 2.79). Putem depista pe schema celui mai simplu receptor radio, existența unui circuit oscilant paralel $L_1 C_2$. Ne vom ocupa puțin de acesta; mai multe amănunte cu privire la acest receptor se vor

da mai târziu (*Alte provocări*, de la capitolul 2C). În acest caz, circuitul oscilant este sub influența unor oscilații electromagnetice captate de către antenă. Aceste oscilații sunt acelea care vor întreține oscilațiile din circuitul oscilant, cu condiția ca frecvența proprie să fie egală cu cea a undelor pe care dorim să le recepționăm (postul de radio). Cum în antenă se produc oscilații de toate frecvențele, provenite de la toate undele captate de antenă, vor fi selectate doar acelea care au frecvența egală cu frecvența proprie a circuitului oscilant. În acest scop, circuitul este prevăzut cu un condensator variabil (C_2) a cărui valoare poate fi modificată. Prin rotirea butonului atașat acestui condensator, noi putem *selecta* postul dorit. Fenomenul a fost denumit *sintonie*.

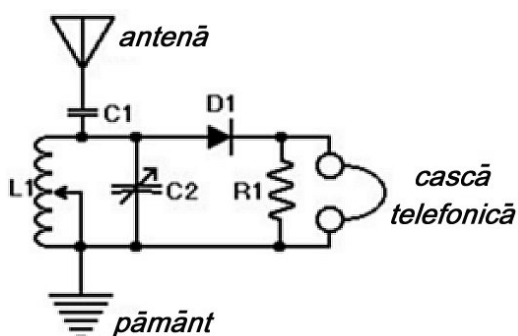


Fig. 2.78. Circuitul oscilant dintr-un receptor simplu de radio.

Oscilațiile circuitului oscilant din figură (circuit derivație sau paralel) vor determina, conform celor discutate anterior, o tensiune maximă la bornele capacității. Un circuit paralel RLC absoarbe cea mai mică valoare efectivă a intensității curentului când circuitul este la rezonanță:

Alte provocări

Rețelele electrice complexe formate din rezistoare, condensatoare și bobine, pot fi inserate în alte sisteme mai complexe. Inserarea presupune existența a două borne de intrare și a două borne de ieșire. Ansamblul se mai numește în electronică un *cuadripol*.

Analizați circuitele electrice de mai jos prin prisma transmisiei tensiunii alternative de o frecvență dată, de la intrare (u_1) la ieșire (u_2) (figura 2.80a). Faceți o analiză calitativă asupra dependenței tensiunii de ieșire (u_2) în funcție de tensiunea de intrare (u_1) pentru diferite frecvențe. Din cauza modului specific în care tensiunea de la intrare (u_1) este modificată la ieșire (u_2) în funcție de frecvență, circuitele de acest tip se numesc *filtre electrice*.

$$I_{\text{rez}} = \frac{U}{Z_{\text{rez}}} = \frac{U}{R}.$$

Această dependență poate fi văzută în graficul din figura 2.79. Impedanța maximă și deci și tensiunea maximă la borne va fi pentru frecvența de rezonanță f_0 . Cele două curbe corespund la valori diferite ale rezistenței circuitului, (a) rezistență mare și (b) rezistență mică. Graficul este astfel normat ca rezonanța să fie pe centru iar amplitudinile să fie egale cu 1. Această curbă este denumită *curbă universală*. Lărgimea acestei curbe de rezonanță descrie amortizarea din circuit (cu cât este mai mare, cu atât curba de rezonanță este mai largă) cât și capacitatea de a separa două frecvențe apropiate. Aceasta seamănă, în mare măsură, cu „puterea de separare” a unor instrumente optice. Pentru aparatele de radio se numește *selectivitate*.

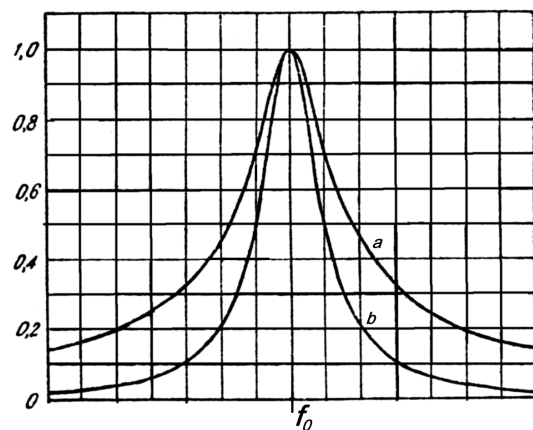


Fig. 2.79. Curba de rezonanță pentru două circuite diferite RLC .

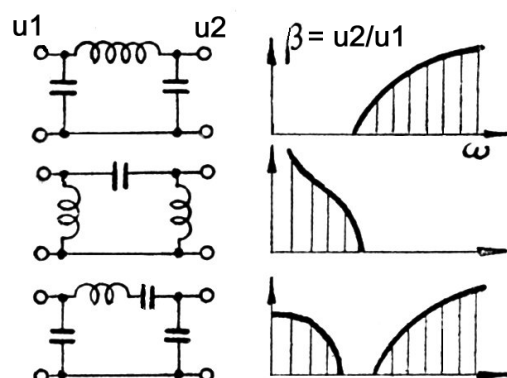


Fig. 2.80. (a) Trei cuadripoli, (b) graficul calitativ al transmisiei celor trei cuadripoli în funcție de frecvență.

Încercați să explicați fizic graficele de transmisie prezentate în figura 2.80b bazându-vă doar pe semnificația fizică a noțiunilor de reactanță și impedanță.

În fotografia din figura 2.81 se vede un circuit oscilant *RLC* dintr-unul dintre primele aparate de radio (1936). Se distinge bobina care are mai multe prize intermediare (*L*) și condensatorul variabil (*C*), pentru „acord”.

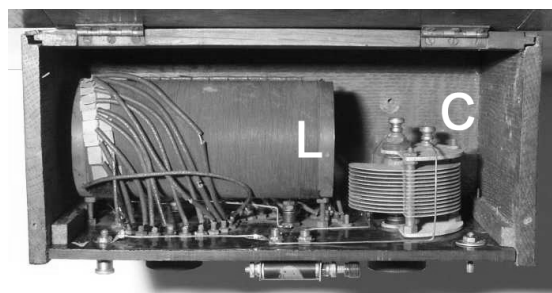


Fig. 2.81. Circuitul de acord al unui receptor radio vechi.

C. Unde electromagnetice

C.1. Câmpul electromagnetic

Încercând să înțelegem și să explicăm fenomenele electrice și magnetice, am fost nevoiți să introducem noțiunile de *câmp electric* și de *câmp magnetic*. Să vedem mai în detaliu unele aspecte.

Conceptul de câmp

După cum se știe, interacția electrică dintre două particule punctiforme (în vid) încărcate electric se manifestă printr-o forță care este dată de *legea lui Coulomb*:

$$\vec{F} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (1)$$

unde q_1 și q_2 sunt sarcinile electrice ale particulelor, ϵ_0 este permitivitatea vidului, iar r este distanța dintre ele.

Evident, influența este reciprocă, fiecare acționând asupra celeilalte. Pentru „detectarea” stării de electrizare se folosește un *corp de probă*, care joacă doar un rol auxiliar, de culegere de date (spre exemplu, particula cu sarcina q_2). Corpul de probă poate să fie, de exemplu, un *pendul electric*, adică un fir subțire, izolant care are la capăt o mică bobită care poate fi electrizată. Dacă deplasăm pendulul în jurul unor corpuri, din modul în care el va fi atras, respins sau nu va suferi nici o influență, vom trage concluzii în legătură cu starea de electrizare a acestor corpuri (figura 2.82a). Corpul de probă folosit pentru a studia starea de magnetizare este *acul de busolă* (figura 2.82b)

Putem astfel să construim o „hartă” a forțelor care se vor exercita asupra unei particule, în orice punct din jurul sarcinii q_1 . Cu alte cuvinte, putem descrie cantitativ zona de influență electrică a sarcinii q_1 . Numim această regiune spațială *câmp electric*, prin analogie cu expresiile similare: câmp acustic, câmp luminos, câmp de „influență”. Sensul

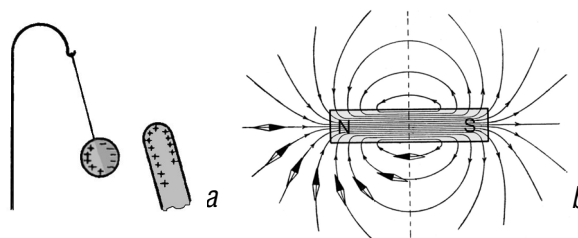


Fig. 2.82. Pendul electric (a) și acul de busolă (b) utilizate pentru a studia starea electrică respectiv magnetică a corpurilor.

larg al acestei denumiri fiind deci de zonă de acțiune a unei particule încărcate electric asupra altor particule încărcate. Intensitatea interacțiunii este descrisă de *intensitatea câmpului electric* (notată cu \vec{E}). În același mod, pentru descrierea fenomenelor magnetice s-a introdus o mărime care să caracterizeze intensitatea câmpului magnetic, denumită (din motive istorice) *inducție magnetică*, \vec{B} . Cu ajutorul noțiunii de intensitate a câmpului putem măsura intensitatea interacției, care este dată de relația:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_2} \quad (2)$$

Intensitatea câmpului va fi astfel o măsură a stării de electrizare a particulei (corpului) care produce câmpul, dar în același timp a dependenței influenței sarcinii care produce câmpul de distanță. Sarcina care produce câmpul se numește *sursa câmpului*.

Putem însuma cunoștințele de până acum prin următoarele:

a) câmpul este un mod de a exprima interacția;

- b) câmpul este produs de purtători de sarcină;
- c) intensitatea câmpului (electric sau magnetic) se exprimă printr-o mărime vectorială;
- d) intensitățile câmpurilor, produse într-un punct din spațiu, de diverse particule încărcate electric se adună vectorial, fiecare câmp fiind independent de celălalt (principiul suprapunerii).

Proprietățile enumerate mai sus pot fi generalizate într-un mod specific și pentru cazul câmpului gravitațional.

Cel care a introdus conceptul de câmp a fost fizicianul englez Michael Faraday (figura 2.83).

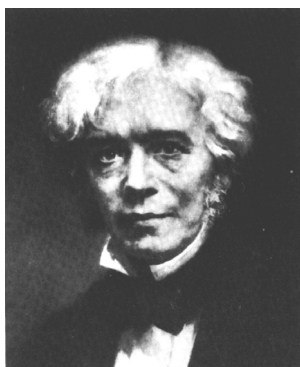


Fig. 2.83. Michael Faraday (1791-1867).

Imagina lui Faraday asupra câmpului era extrem de „palpabilă”. Pentru Faraday, câmpul putea fi exprimat printr-un sistem de „fire elastice” care leagă particulele, denumite *linii de câmp* și care se modifică în spațiu ca formă și ca tărie în funcție de valoarea sarcinii particulelor, dar și de distribuția lor spațială. Imagini ale acestei hărți a câmpului se pot obține experimental simplu, atât pentru câmpul electric cât și pentru cel magnetic, și poartă numele de „spectru al liniilor de câmp” (figura 2.84 și 2.85). Puteți realiza și voi astfel de spectre în felul următor. Spectrul liniilor de câmp

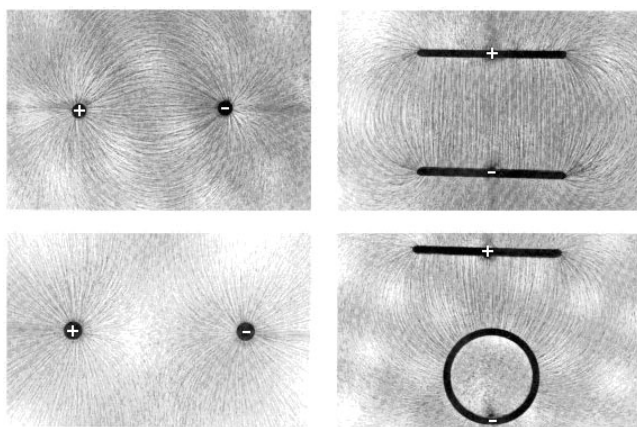


Fig. 2.84. Spectru „electric” (vizualizarea liniilor de câmp).

electric se poate obține dacă pe suprafața unui vas cu ulei se pun firicele subțiri și scurte de ață. Electrozii încărcăți electric vor produce orientarea acestor firicele așa cum se vede în figura 2.84. Dacă se plasează peste un magnet de o formă oarecare un carton alb iar peste el se împrăștie pilitură de fier, ea se va aranja ca în figura 2.85 (la nevoie se bate ușor cu degetul în carton pentru a uniformiza pilitura). Puteți descoperi, în acest fel, structura câmpului magnetic pentru diverse obiecte magnetice casnice.

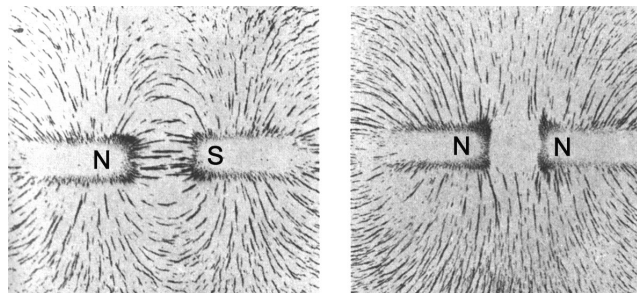


Fig. 2.85. Spectru „magnetic” (vizualizarea liniilor de câmp).

Pe parcurs, vom descoperi și o serie de alte aspecte importante ale acestei noțiuni, câmpul având o semnificație mult mai profundă.

Câmpul electromagnetic

Pentru a putea descrie fenomenele electrice sau magnetice produse de mai multe particule cu sarcină electrică, trebuie să cunoaștem intensitățile câmpurilor în *fiecare punct* al spațiului. Astfel, spre exemplu, spunem că la suprafața Pământului, accelerația gravitației, g , este practic constantă. Afirmatia aceasta nu spune altceva decât că intensitatea câmpului gravitațional este aceeași în toate punctele de la suprafața Pământului. Câmpul (oricare ar fi el: gravitațional, electric sau magnetic) poate fi descris matematic prin intermediul unor expresii care dau intensitatea câmpului în fiecare punct din spațiu. Câmpul electrostatic produs de o particulă punctiformă încărcată cu sarcina q are o expresie care poate fi obținută combinând expresiile (1) și (2):

$$\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \frac{\vec{r}}{r} \quad (3)$$

q fiind sarcina care produce câmpul (sursa de câmp). Să analizăm un experiment desenat în figura 2.86. O sarcină electrică q poate fi deplasată pe linia AB iar un corp de probă (pendul electric) va măsura intensitatea câmpului din punctul C. Prin r_1 și r_2 au fost notate distanțele AC și BC. Dreapta AB se află la distanța d de la punctul C.

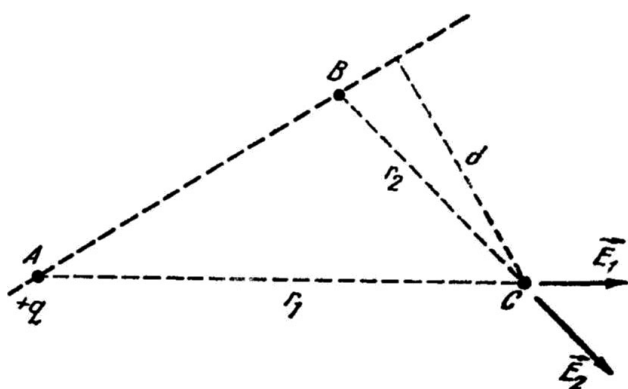


Fig. 2.86. Schița experimentului.

În punctul C , intensitatea câmpului produs de sarcina $+q$ din A va fi \vec{E}_1 (figura 2.86). Dacă deplasăm sarcina $+q$

în punctul B , intensitatea câmpului în punctul C se va schimba și va fi \vec{E}_2 . În cazul în care sarcina este în mișcare, intensitatea câmpului electric într-un punct se modifică ca mărime și direcție. Spunem că în punctul C avem un *câmp electric variabil*. Variația lui în timp va fi ușor de descris dacă vom exprima modul în care depinde \vec{r} de viteza particulei.

Pe de altă parte, știm că dacă particula încărcată se mișcă, atunci ea va produce și un câmp magnetic. În general deci, în fiecare punct din jurul particulei în mișcare avem concomitent un câmp electric și unul magnetic. Acest câmp poartă denumirea de *câmp electromagnetic*. Astfel, câmpul electromagnetic trebuie descris prin ambii vectori:

\vec{E} și \vec{B} (în fiecare punct al spațiului din jurul sarcinii).

C.2. Perturbația electromagnetică. Unda electromagnetică

Să ne imaginăm, în continuare, că particula stă în repaus în punctul A și că un dispozitiv ne indică intensitatea câmpului electric în punctul C . Să presupunem, acum, că deplasăm particula din punctul A în punctul B . Dispozitivul din C va indica o variație a lui \vec{E} . Dacă în C ar fi și un indicator de câmp magnetic, s-ar sesiza și o variație a lui \vec{B} . Spunem că în C s-a produs o *perturbație* a câmpurilor. Studiul teoretic (J. C. Maxwell) și experimental (H. Hertz) (fig. 2.87) al proprietăților câmpului electromagnetic a condus la concluzia că perturbațiile electromagnetice se propagă în spațiu. *Propagarea în spațiu a perturbației electromagnetice este determinată de generarea reciprocă de câmpuri electrice și magnetice variabile care se „desprind” de regiunea în care au fost produse.* Pentru ca propagarea să aibă loc trebuie ca ambele câmpuri să varieze în timp. Câmpul electromagnetic care

se propagă în spațiu reprezintă *unda electromagnetică*. Undele electromagnetice sunt unde transversale, și anume, intensitățile câmpurilor electric \vec{E} și magnetic \vec{B} sunt reciproc perpendiculare, și în același timp, perpendiculare pe direcția de propagare.

Undele electromagnetice pot fi clasificate după frecvența lor în: unde radio, microunde, infraroșii, vizibile (lumina), ultraviolete, Roentgen (X) și gama (γ).

Viteza de propagare a perturbației electromagnetice

Viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid, prevăzută de teoria lui Maxwell, este foarte mare: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Acesta este și motivul pentru care determinarea ei nu a fost posibilă multă vreme. În 1849, Fizeau a utilizat o metodă de determinare a vitezei luminii, care este și azi folosită în determinarea vitezelor: *metoda timpului de zbor* (fig. 2.88). Lumina, produsă de o sursă S , cade pe o oglindă semitransparentă O_1 și trece în continuare printre dinții unei roți dințate R . După un drum de câțiva kilometri se reflectă pe oglinda O_2 și revine la roata dințată. Apoi, ajungând pe oglinda O_1 se reflectă, din nou, pe direcția $O_1 D$ (Deste un detector, de exemplu, ochiul omenesc sau o celulă fotoelectrică). Dacă roata dințată este rotită cu o viteză care crește treptat, detectorul D va recepționa radiația reflectată în B numai până în clipa în care intervalul de timp cât lumina străbate drumul ABA devine egal cu intervalul de timp necesar ca roata dințată să se miște cu $1/2$ dintr-un dinte. În acest moment,

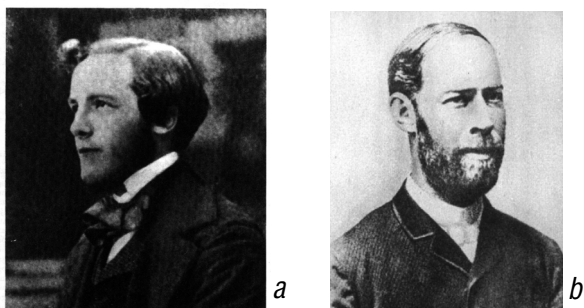


Fig. 2.87. (a) James Clerk Maxwell (1831 - 1879) și (b) Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1897).

imaginea va fi obturată de dinte și detectorul D nu va mai recepționa lumina. Dacă viteza luminii este v , atunci intervalul de timp necesar pentru a străbate $AB + BA$, va fi:

$$t = \frac{2 \cdot \overline{AB}}{v} \quad (4)$$

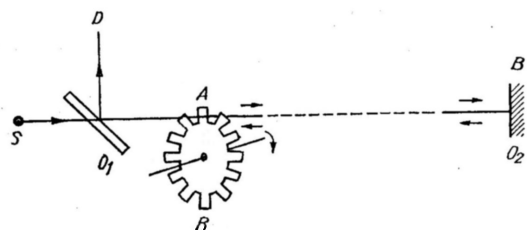


Fig. 2.88. Schema experimentului lui Fizeau.

Dacă roata dințată are n dinți și se rotește cu turația N , atunci, intervalul de timp în care se rotește cu 1/2 dintr-un dinte va fi:

$$t' = \frac{1}{2nN}$$

Reglând turația motorului, putem face ca $t = t'$, adică, privind din D , imaginea să nu mai fie văzută. În acest caz:

$$\frac{1}{2nN} = \frac{2 \cdot \overline{AB}}{v}$$

de unde :

$$v = 4 \cdot \overline{AB} \cdot N \cdot n$$

Într-unul dintre experimente, în care $AB = 23$ km, $n = 150$ dinți, roata având un diametru de 5 cm, s-a obținut obturarea luminii pentru $N = 22$ s⁻¹. Atunci:

$$v = 4 \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 150 \cdot 22 = 3,036 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

Roata dințată are aici două roluri: acela de a produce pulsuri de lumină prin „tăierea” fasciculului de lumină, și acela de a măsura intervale de timp foarte scurte (în

experimentul descris $t' = \frac{1}{2nN} = 1,51 \cdot 10^{-4}$ s).

Mijloacele moderne permit măsurarea intervalelor de timp mult mai scurte, de ordinul a $10^{-8} - 10^{-10}$ s, ceea ce face ca „baza de zbor” a luminii să poată fi redusă în aceeași

proporție (de $10^4 - 10^6$ ori), adică la $\frac{23 \cdot 10^3}{10^4} = 2,3$ m sau mai puțin.

Egalitatea dintre viteza luminii și cea a undelor radio a fost principalul element care a făcut să se considere că și lumina este de natură electromagnetică.

Câmpul electromagnetic ca sistem fizic. Interacția din aproape în aproape

Unda electromagnetică poate fi descrisă ca fiind un proces de generare reciprocă a câmpurilor electric și magnetic care se desprind de sursă. Ce consecințe rezultă de aici?

Să revenim la experimentul din figura 2.86. Pendulul electric din punctul C se află la distanța r de un purtător de sarcină electrică aflat în A . Pendulul se va găsi în repaus, și va indica intensitatea câmpului în acel punct. Dacă la momentul t_1 , începem să deplasăm purtătorul de sarcină, câmpul va suferi o modificare, o perturbăție, care se va propaga cu viteza c și va fi „simțită” de pendul după o întârziere: $t_2 - t_1 = r/c$, necesară ca perturbăția să se propage pe distanța r .

Din această observație rezultă trei **concluzii** mai importante:

– În primul rând, relația care dă forța coulombiană

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

este, într-un fel, incorectă, deoarece nu exprimă această întârziere a efectului mișcării purtătorului de sarcină asupra sarcinii de probă. Cu alte cuvinte, relația care dă forța coulombiană exprimă interacția ca și cum s-ar produce *instantaneu*;

– În al doilea rând, *interacția întârziată*, determinată de propagarea cu viteză finită a perturbăției electromagnetice ne permite să considerăm câmpul ca o *entitate independentă de sursa* care l-a produs. Înțelegem prin aceasta că acest câmp electromagnetic (și în general, orice câmp fizic) are pe lângă proprietățile enumerate anterior și pe aceea a *existenței sale reale ca o entitate „de-sine stătătoare”*, *Câmpul* trebuie conceput ca o *stare deosebită de aceea de substanță*, dar tot atât de reală și de fizică ca și substanța.

Câmpul și perturbăția corespunzătoare, propagându-se cu viteză finită, „mijlocesc” interacția dintre corpuri. Dacă între sarcini nu ar exista o interacție „transportată” de un câmp, atunci ea ar putea fi, eventual, transmisă cu viteză infinită. Între momentul începutului deplasării sarcinii din r și acțiunea ei asupra pendulului s-ar scurge un interval de timp nul, $\Delta t = 0$. Dar cum știm că viteza este c , rezultă că $\Delta t \neq 0$ și că, această „mijlocire” este reală. Astfel, câmpul nu este doar *un alt mod* de a descrie interacția (exprimabilă și prin noțiunea de *forță*) ci are și calitățile unei entități fizice distincte. Interacția în care mediul care separă obiectele joacă un rol esențial poartă denumirea de

interacție din aproape în aproape. Opusul ei este *interacția la distanță*. Un exemplu ilustrativ este acela al *interacției gravitaționale* propus de către I. Newton, pentru a explica influența Pământului asupra Lunii și, în general, interacția dintre corpurile cerești. La acea vreme, nu putea fi concepută existența unei interacții la distanță. Se presupunea că interacția se realizează doar prin contactul dintre corpuri.

– În al treilea rând, *propagarea cu viteză finită a interacției* ne permite să ordonăm evenimentele petrecute astfel încât să putem separa *cauza* de *efect*. Altfel spus, cauza este anterioară efectului pe care l-a produs. În acest fel, putem spune că în univers se stabilesc relații cauzale și deci putem căuta întotdeauna cauza unui fenomen (efect) dat. Acest aspect este important și din punct de vedere filozofic, deoarece exprimă existența și necesitatea căutării cauzelor fenomenelor printre alte fenomene naturale anterioare efectului. Cunoașterea relațiilor cauză-efect înseamnă cunoașterea legilor naturii, și deci posibilitatea principală de a cunoaște, din datele recente, evoluția viitoare a fenomenelor, cu alte cuvinte, aceasta înseamnă *știință*.

Câmpul ca sistem fizic

Am văzut caracterul de sine stătător al câmpului. Să analizăm, mai în amănunt, **proprietățile** lui.

Două caracteristici sunt importante: **a)** perturbațiile câmpului se propagă cu viteza finită, c , **b)** câmpul este extins în tot spațiul, spre deosebire de un obiect (substanță) care poate fi localizat foarte precis. Un câmp electric, de exemplu, *se întinde peste tot în spațiul din jurul particulei cu sarcină electrică*.

Pentru a defini *câmpul* ca un *sistem fizic* oarecare (la fel cum am definit, de exemplu, un gaz închis într-o incintă) va trebui să cunoaștem valoarea intensității câmpului în toate punctele și la toate momentele, ceea ce formează o mulțime infinită de valori. Câmpul este o entitate continuă, pe când un corp sau un gaz, au un caracter discontinuu: întotdeauna ele pot fi desfăcute spațial în părți componente. În acest sens, *câmpul* este *contrariul substanței*, el fiind prototipul unui mediu distribuit în mod continuu în spațiu, neputând fi desfăcut în „părți componente”. Din această cauză, unele mărimi fizice care descriu câmpul se vor exprima doar ca *densitate*, adică valoare pe unitate de volum.

Unda electromagnetică este exemplul unui *câmp desprins de sursă*. În realitate, câmpul ca sistem fizic este întotdeauna cuplat (în interacție) cu particulele care produc acel câmp.

Din această cauză, descrierea câmpului ca sistem fizic presupune cunoașterea modului în care se modifică (sau rămân constante) valorile acelor mărimi care descriu câmpul. Până acum, am văzut că *intensitatea câmpului* este o astfel de mărime; uneori, dependența de coordonatele spațiale și temporale ale mărimilor care descriu câmpul se numește *funcție de undă*.

Principalele *legi* care descriu *fenomenele electromagnetice* au fost generalizate și strânse la un loc în așa-numitele *ecuații ale lui Maxwell*. Aceste ecuații permit o descriere unitară a tuturor fenomenelor electromagnetice discutate până acum.

Din ecuațiile lui Maxwell rezultă, de exemplu, că unda electromagnetică *transportă energie*, că are un *impuls* bine determinat și că *se propagă cu viteza c* . Ecuațiile lui Maxwell conduc la o expresie a *densității energiei câmpului electromagnetic*, expresie care conține și partea de energie a câmpului electric și a câmpului magnetic:

$$w_{em} = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad (5)$$

Unda electromagnetică nu este o undă elastică (nu are nevoie de un mediu de propagare), ci este doar o undă în care variația periodică a intensității câmpurilor \vec{E} și \vec{B} se propagă în spațiu pe o direcție perpendiculară pe cei doi vectori (fig. 2.89). Pentru a exprima acest fapt vom nota elongația cu \vec{u} . Prin \vec{u} vom înțelege, așadar, fie componenta electrică, fie cea magnetică a unei electromagnetice:

$$\vec{u}(x, t) = \vec{u}_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (6)$$

unde $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$, ν – frecvența undei, iar c este viteza de propagare a undei electromagnetice. Amplitudinea undei, \vec{u}_0 (adică \vec{E}_0 sau \vec{B}_0) va indica valoarea maximă pe care o pot lua intensitatea câmpului electric sau inducția magnetică a undei. Putem scrie, de exemplu:

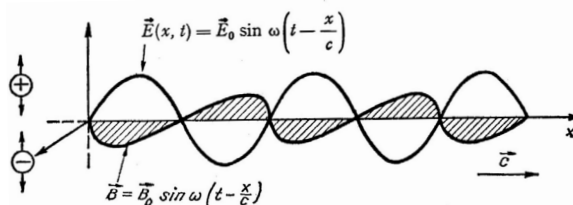


Fig. 2.89. Undă electromagnetică.

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

Într-un punct oarecare (x_p) de pe direcția de propagare a undei, intensitatea câmpului electric, se va exprima prin:

$$\vec{E}(x_p,t) = \vec{E}_0 \sin \omega \left(t - \frac{x_p}{c} \right) \quad (3.3)$$

Dacă în punctul P se află o particulă încărcată electric, sub influența acestui câmp electric variabil, ea va fi pusă în mișcare și va oscila cu frecvența f (a undei), fenomenul reprezentând o oscilație forțată. Un astfel de caz se realizează cu electronii care se găsesc în antena unui radioreceptor. Oscilațiile electronilor cu frecvență egală cu cea a undei incidente vor determina un curent alternativ care va fi apoi amplificat în radioreceptor.

Să ne amintim că acest proces este *reversibil*, în sensul că, dacă în antenă provocăm o mișcare oscilatorie a sarcinilor (de exemplu, cu ajutorul unui generator de curent alternativ) atunci, în spațiul din jurul antenei se va emite o undă electromagnetică. Antena este, în acest caz, un *dipol oscilant*, iar electronii formează sistemul oscilant emițător.

Efectul undei asupra aparatului receptor va fi determinat de energia transportată de undă.

Energia transportată de unda electromagnetică este proporțională cu pătratul amplitudinii undei: E_o^2 . Pentru a arăta acest lucru să ne amintim de expresia energiei electrice înmagazinate într-un condensator, E_c :

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

unde q este sarcina electrică de pe o armătură a condensatorului, iar C este capacitatea lui. Această energie poate fi interpretată ca energie potențială a purtătorilor de sarcină electrică de pe armături.

Putem transcrie această relație dacă ținem cont de definiția capacității $C = q/U$ (unde U – diferența de potențial dintre armături), astfel:

$$E_c = \frac{1}{2} C U^2$$

Dacă ne fixăm atenția asupra unui condensator plan, atunci:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

unde ϵ este permitivitatea mediului dintre armăturile de arie A , aflate la distanța d una de alta. În vid $\epsilon = \epsilon_0$ deci:

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d} U^2$$

Cum intensitatea câmpului electric în spațiul dintre armături este:

$$E = \frac{U}{d}$$

obținem:

$$E_c = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 A d = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V$$

unde $V = A d$ este volumul spațiului limitat de armături.

Deoarece câmpul electric este omogen, introducem o mărime independentă fizic de structura geometrică a condensatorului, și anume:

$$w_{el} = \frac{E_c}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (3.4)$$

pe care o numim *densitate de energie* a câmpului electric.

Ultima relație ne permite să facem o afirmație deosebit de interesantă: energia unui condensator încărcat este proporțională cu pătratul intensității câmpului electric dintre armături. Putem spune deci că energia este „înmagazinată” în câmpul electric care se stabilește între armături.

Acest rezultat poate fi transpus pentru unda electromagnetică, cu condiția să efectuăm media în timp a pătratului intensității câmpului electric al undei (3.3). Deoarece $\sin^2 \alpha$

$= \frac{1}{2} (1 - \cos 2\alpha)$, atunci când α variază de 0 la 2π , media lui $\cos 2\alpha$ este nulă. În acest fel,

$$\overline{E^2} = \frac{1}{2} \cdot E_o^2$$

Energia transportată de unda electromagnetică este proporțională cu E_o^2 .

O undă plană care se propagă în vid (deci care nu este atenuată) va avea o densitate medie de energie constantă, în orice regiune a undei, deoarece E_o este constant.

Pentru a descrie cantitativ energia transportată de un fascicul de radiație* în unitatea de timp printr-o arie dată se utilizează mărimea denumită *flux energetic* Φ_e (măsurat în wați)

$$\Phi_e = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

unde Δt este intervalul de timp în care se transportă energia ΔW prin aria corespunzătoare. Fluxul energetic raportat la aria prin care se transportă energia se numește *intensitate*. În virtutea celor discutate, vom putea scrie:

$$\Phi_e \sim E_o^2 \quad (3.4')$$

Pentru radiația electromagnetică din domeniul vizibil (lumina) receptorul este ochiul. S-a arătat experimental că senzația luminoasă este produsă doar de componenta electrică a undei. Componenta magnetică nu determină senzații optice. Din această cauză, în cele ce urmează vom lua în considerare doar câmpul electric al undei.

Dacă unda electromagnetică se propagă într-un mediu cu indice de refracție n (față de vid) atunci, prin definiție, viteza de propagare a undei va fi $v = c/n$. Faza undei se va scrie atunci

$$\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = \omega\left(t - \frac{x}{c} \cdot n\right)$$

Astfel, se poate spune că propagarea printr-un mediu se efectuează ca și cum distanța parcursă de undă în același interval de timp este mai mare: $x \cdot n$. Această mărime poartă numele de *drum optic*, $l = x \cdot n$. Dar la trecerea undei printr-

un mediu cu indice de refracție $n \neq 1$, se modifică lungimea de undă dar *frecvența ei rămâne neschimbată*:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{1}{n} \lambda_{\text{vid}}$$

Pentru a încheia descrierea propagării undelor electromagnetice, trebuie să precizăm că, în general, este dificil să obținem unde *monocromatice* (de o singură frecvență). În toate cazurile practice, undele electromagnetice sunt suprapuneri de unde de diverse frecvențe (*unde policromatice*) și, în același timp, sunt emise pe o perioadă determinată de timp, formând astfel „pachete de unde”.

Fără ca aceasta să reducă generalitatea fenomenelor, în cele ce urmează ne vom referi cu precădere la undele electromagnetice din domeniul radio. Undele electromagnetice din domeniul vizibil (lumina) le vom studia în capitolul de optică (capitolul 3).

C.1. Câmpul electromagnetic

Experimente cu perturbații electromagnetice

După experimentul crucial al lui Hertz, tot mai mulți fizicieni au început să experimenteze. O serie de observații au arătat că unele efecte ale perturbațiilor electromagnetice pot fi sesizate. Să reamintim câteva dintre ele.

În 1831, Michael Faraday descoperă *efectul inducției electromagnetice*. În 1842, Joseph Henry descoperă faptul că o *scânteie electrică* poate să *inducă magnetizarea* unei vergele de fier, chiar până la o distanță de 30m de ea. După ce J.C.Maxwell a dezvoltat teoria electromagnetismului (1867) și H.Hertz (1887) a verificat existența reală a acestei perturbații care se propagă, cercetarea în domeniu ia amploare. Se descoperă, spre exemplu, că pilitura de fier dintr-un tub de sticlă devine conductoare dacă este în apropierea unei scântei electrice. Acest efect va fi folosit de către E. Branly (denumit de el „coheror”, fig. 2.90) pentru a semnaliza prezența unor scântei la o distanță de câteva sute de metri. Ceva mai târziu, (1892-1984) au putut fi recepționate cu coherorul perturbații electromagnetice produse cu ajutorul unei bobine de inducție peste Canalul Mânecii. În 1895, fizicianul rus A.S. Popov descoperă că această distanță poate fi crescută mult cu ajutorul unei sârme lungi. Descoperă astfel *antena*. El realizează cu acest dispozitiv un „receptor de furtună”, fulgerele și trăsnetele putând fi detectate de la distanță.

În fine, între 1896 și 1901 Guglielmo Marconi pune la punct un *sistem perfecționat de comunicații la distanță*,



Fig. 2.90. Coherorul lui E. Branly.

care este recunoscut astăzi ca fiind momentul de naștere a radiocomunicațiilor moderne. Putem aminti că vestitul transatlantic „Titanic” avea deja la bord un emițător și un receptor de telegrafie fără fir (TFF) prin care, cu ajutorul semnalelor în codul Morse, se puteau transmite mesaje la distanță. Telegrafistii de la bordul Titanicului au transmis până în ultima clipă semnalele de ajutor S.O.S. (**S**ave **O**ur **S**ouls).

Experimentul lui H. Hertz

Experimentul fundamental al lui H. Hertz a constatat în *emiterea și recepționarea unor perturbații electromagnetice la distanță, fără fir*. În figura 2.91 se prezintă schema dispozitivului lui Hertz. Scânteia se producea cu ajutorul unei bobine de inducție care genera impulsuri de câteva zeci de mii de volți, care se vedeau între doi electrozi prevăzuți cu bile metalice („eclatori”). Hertz a constatat că într-o buclă din sârmă de cupru, prevăzută cu eclatori la capete (receptor), apar scântei doar atunci când ele se produc la bobina de inducție. Alegând distanțe potrivite între eclatori, legând eclatorii de la bobină cu niște plăci

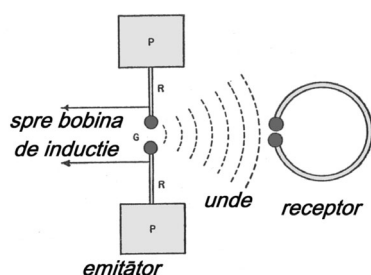


Fig. 2.91. Schema dispozitivului lui Hertz.

metalice, a putut să crească mult distanța la care putea vedea scânteile la receptor. A putut astfel să demonstreze realitatea rezultatului teoretic al lui Maxwell. Experimentul poate fi ușor repetat în laborator.

Undele electromagnetice se întind pe un domeniu extraordinar de mare de frecvențe. Din această cauză, ele sunt prezente în aproape toate fenomenele întâlnite în jurul nostru. Domeniul (spectrul) acestor unde este prezentat schematic în figura 2.92.

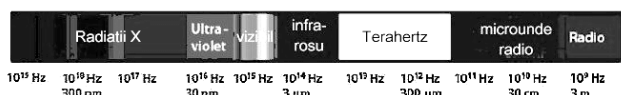


Fig. 2.92. Spectrul undelor electromagnetice.

Comunicațiile la distanță, telegrafia fără fir, radio-ul, televiziunea, telefonul celular, sunt doar câteva dintre aplicațiile curente ale undelor electromagnetice. În tehnică și medicină se întâlnesc nenumărate aplicații, de la radar la metode de diagnostic. Dar principala aplicație rămâne totuși în telecomunicații. De aceea, ne vom ocupa puțin mai mult de acest domeniu.

Experimentul lui G. Marconi

Primele experimente au fost efectuate de către G. Marconi în 1895 (figura 2.93), atunci când a reușit să transmită semnale pe distanțe de sute de metri. Îmbunătățind sistemul, el a realizat o transmisie între Franța și



Figura 2.93. Guglielmo Marconi (1874 - 1937) (premiul Nobel pentru fizică în 1909)



Fig. 2.94. Plic filatelic „prima zi a emisiunii” în onoarea pionierilor comunicațiilor, care au utilizat undele electromagnetice.

Anglia în 1899, și apoi, în 1901, între Anglia și Statele Unite (peste 3000 km).

De atunci, telecomunicațiile au avut un mers ascendent (figura 2.95).

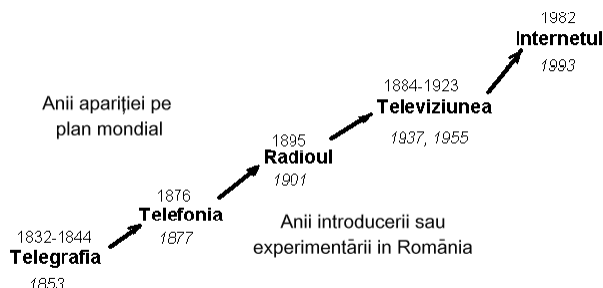


Fig. 2.95. Evoluția radiocomunicațiilor în lume și în România.

Ideile principale ale comunicațiilor radio pe care le cunoaștem acum sunt legate de următoarele operații:

- emisie apoi recepția care se realizează cu un dispozitiv denumit antena;
- alegerea postului (sintonia) care se realizează cu ajutorul unui circuit oscilant,
- amplificarea și creșterea calității recepției (care utilizează tuburi electronice și dispozitive semiconductoare) și în fine
- sistemele acustice de înregistrare și redare a sunetului – microfonul și difuzorul. Alte amănunte le puteți găsi la finele acestui capitol.

În România, prima emisiune radio oficială din 1928 a debutat prin cuvântul unui mare fizician român, profesorul Dragomir Hurmuzescu, care, ulterior, a devenit președinte al Consiliului de Administrație al Societății de Difuziune Radiotelefonice. Partea tehnică a fost susținută de către ing. Emil Petrașcu unul dintre fondatorii radiofoniei la noi (fig. 2.96)..

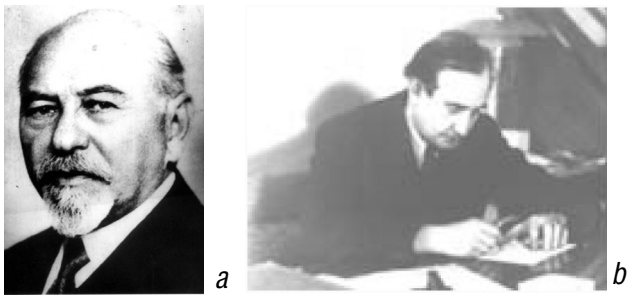


Figura 2.96. La 1 noiembrie 1928, primul semnal radiofonic lansat în eter. (a) Antena postului de la Bod (Brașov), (b) coperta revistei Radio din aceea vreme.

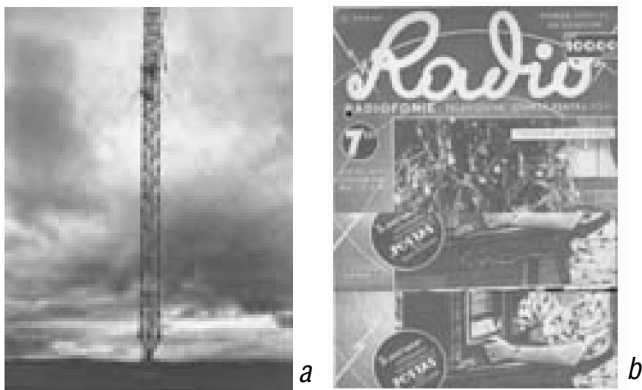


Fig. 2.97. (a) Aparat de radio din 1929 și (b) unul modern.

Aparatele de radio au cucerit lumea. În figura 2.16 se prezintă imagini ale unui aparat din etapa de pionierat și unul modern.

Aplicațiile undelor electromagnetice au crescut în număr, vertiginos. De exemplu, s-a dezvoltat sistemul RADAR (de care vom mai vorbi) în timpul celui de al Doilea Război Mondial dar și sistemele de televiziune. Ambele sisteme fac apel la antene de recepție sau emisie (figura

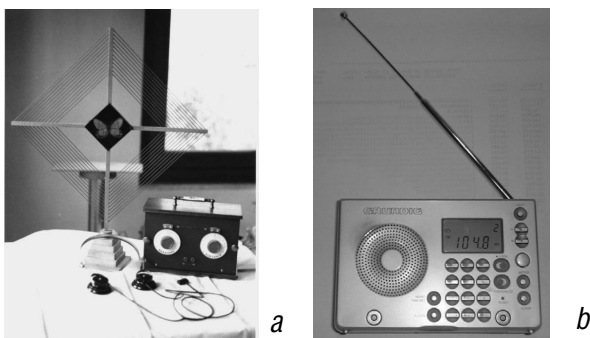


Fig. 2.98. De la antena radar, așa cum apărea ea pe prima pagină a unui ziar al științelor din 1946 (a), până la antenele actuale de televiziune (b).

2.98a, antena radar și figura 2.98b antena de televiziune). Prezența pretutindeni a antenelor, este o „emblemă” a universului electromagnetic în care trăim.

Telefonia celulară este una dintre cele mai noi cuceriri ale domeniului de comunicații prin unde electromagnetice. Ea este răspândită astăzi peste tot. În figura 2.99 se prezintă un astfel de telefon celular.

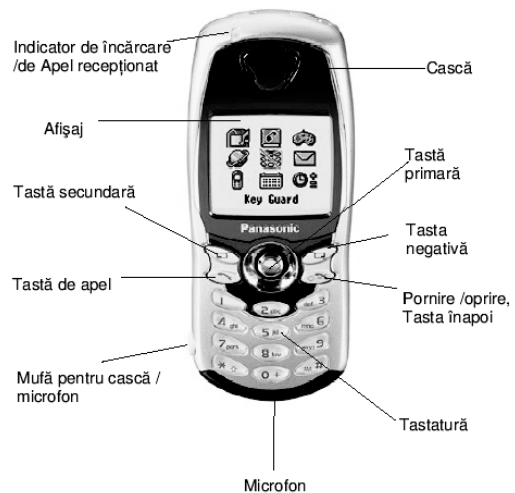


Fig. 2.99. Un telefon celular și funcții ale tastelor.

Dar nu ne vom opri aici cu enumerarea.

Aplicațiile curente sunt multe iar unele dintre ele sunt prezentate în figurile 2.100a, b, c, și d.

Alte aspecte ale fizicii și aplicațiilor undelor electromagnetice vor fi discutate la capitolul de optică.

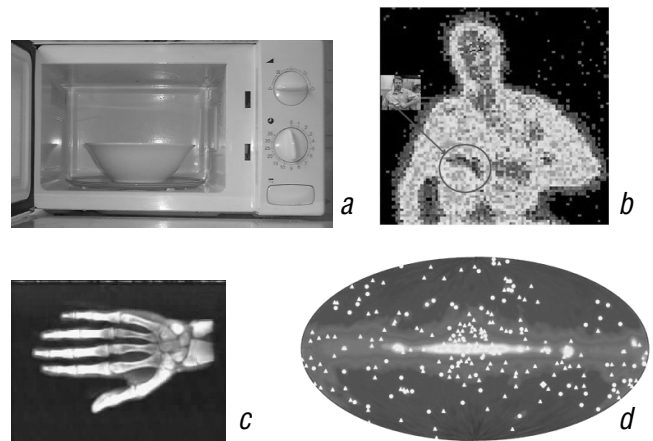


Fig. 2.100. De la undele foarte lungi utilizate în gospodărie (a – cuptorul cu microunde) până la termografie (b – imagini în infraroșu), utilizarea radiațiilor X în medicină (c), până la Universul văzut în radiații gama, toate fac parte din „lumea” undelor electromagnetice.

Fenomene de propagare a radiației electromagnetice

Propagarea rectilinie

Oricât ar fi de curios, propagarea rectilinie a undelor este „o problemă”. La determinarea vitezei luminii am utilizat proprietatea ei de a se propaga în linie dreaptă. Această proprietate ne este sugerată de nenumărate fenomene observate în natură: razele soarelui proiectate pe cerul înnoat, razele de soare care pătrund într-o cameră întunecoasă printr-o fantă mică, imposibilitatea de a vedea obiectele ascunse în spatele altora etc. Aceste constatări cotidiene sunt sintetizate în conceptul de *rază de lumină*.

Conceptul de rază de lumină constituie un model pentru propagarea luminii. Experimental, o rază de lumină se poate obține delimitând un fascicul de lumină cu ajutorul unui paravan P_1 prevăzut cu o fantă. Cu cât fasciculul este mai îngust, cu atât suntem mai aproape de modelul razei de lumină (figura 2.101).

Ajungem însă la un rezultat experimental care contrazice așteptările noastre. Încercând să realizăm condițiile de obținere a unei raze de lumină cât mai „fine”, vom constata că apar probleme. Amănunte vom discuta la capitolul „Difracția luminii”. Putem spune doar că experimentul imaginat în figura 3.3, de verificare a mersului rectiliniu al razelor de lumină, este *neconcludent*.

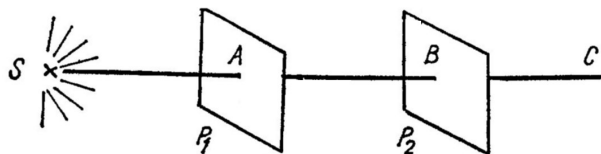


Fig. 2.101. Experiment pentru evidențierea propagării rectilinii a undelor electromagnetice (raza de lumină).

Vom vedea că modelul razei de lumină este doar un mod aproximativ de a descrie propagarea luminii.

În cele ce urmează, vom căuta să descriem mai exact unele fenomene legate de propagarea luminii pornind de la faptul că ea este o undă.

Descrierea propagării undelor electromagnetice

Cunoaștem deja cu câteva tipuri de unde: undele sonore, undele de pe suprafața lichidelor, undele seismice; ca și unde electromagnetice. Să utilizăm aceste cunoștințe pentru a descrie unele fenomene legate de propagarea undelor electromagnetice.

Din punct de vedere al desfășurării lor în timp, undele se pot împărți astfel:

| Tipul: | Exemplu: |
|----------------|------------------------|
| a) neperiodice | – unde de șoc |
| b) periodice | – unde monocromatice * |

O perturbație (electromagnetică, de exemplu) care se produce într-un punct și se propagă apoi mai departe, în punctele vecine, fără să aibă o periodicitate, este un exemplu de undă neperiodică.

Dacă însă perturbația (electromagnetică) este de așa natură încât se repetă periodic, fără încetare, atunci ea se numește undă periodică. O undă periodică trebuie deci să fie descrisă printr-o funcție care să revină la aceeași valoare după trecerea unui interval de timp dat T denumit perioadă:

$$f(t) = f(t + T) = \dots = f(t + nT),$$

unde n este un număr întreg.

În același timp, această funcție trebuie să descrie și *periodicitatea în spațiu a unde*, în sensul că, unda fiind periodică și propagându-se cu viteză constantă, va avea aceeași valoare (la un moment dat) în diverse puncte din spațiu, pe direcția de propagare, puncte separate prin distanța λ , denumită *lungime de undă*:

$$f(t, x) = f(t, x + \lambda) = \dots = f(t, x + n\lambda)$$

Aici, prin $f(t, x)$ am simbolizat faptul că unda trebuie să fie descrisă prin intermediul a două mărimi variabile: t și x (x – măsurat pe direcția de propagare); n este un număr întreg.

Un exemplu de astfel de funcție ați întâlnit la studiul ecuației unei plane. Abaterea, la un moment dat, de la poziția de echilibru a unui punct material aflat sub acțiunea unei unde (elastice) se descrie prin elongația y :

$$y_p = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

unde A este amplitudinea (= elongația maximă), $\omega = \frac{2\pi}{T}$

– pulsația, T – perioada, λ – lungimea de undă, v – viteza de propagare, x și t – variabilele de care depinde funcția y , adică distanța de la originea aleasă până la locul în care se calculează elongația (\overline{OP}) și respectiv intervalul de timp între momentul inițial și momentul în care unda ajunge în

punctul P . Argumentul funcției sinus, $\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$ se numește faza unde. Observăm că, dacă deplasăm originea spațiului sau a timpului, faza va cuprinde un termen suplimentar

$$y_P = A \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi\right] \quad (3.2)$$

unde φ se numește *faza inițială, constantă de fază sau diferență de fază*. Funcția y_P satisface condiția de periodicitate spațială și temporară și deci poate descrie unda elastică.

Viteza luminii în vid – constantă universală

Să ne reîntoarcem la problema vitezei luminii. Am văzut că ea are o valoare foarte mare. Am văzut, de asemenea, cum poate fi măsurată. Ne punem acum problema dacă putem modifica viteza de propagare a luminii și în ce mod?

Un prim procedeu ne este sugerat de fenomenul de refracție a luminii:

$$n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Trecerea luminii dintr-un mediu în altul se produce cu schimbarea vitezei luminii, conform acestei relații. Dacă mediul (1) este vidul, atunci indicele de refracție se referă la mediul (2) față de vid:

$$n_{21} = \frac{c}{v}$$

Cum $n_{21} > 1$, rezultă că $v < c$. Cu alte cuvinte, lumina intrând într-un mediu material cu indice de refracție diferit de 1, se va propaga cu o viteză mai mică decât în vid.

Dacă vrem să știm *de ce* într-un mediu oarecare lumina se propagă mai încet decât în vid, trebuie să căutăm răspunsul în teoria generală a undelor electromagnetice.

Viteza de propagare a undelor electromagnetice a fost dedusă de către Maxwell:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o\epsilon_r\mu_o\mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$$

unde: $\epsilon = \epsilon_o\epsilon_r$ și $\mu = \mu_o\mu_r$ sunt permitivitatea și respectiv permeabilitatea mediului de propagare, ϵ_o și μ_o sunt mărimile corespunzătoare pentru vid, iar ϵ_r și μ_r sunt mărimile relative respective. Valorile lor pentru vid sunt:

$$\epsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}; \quad \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}.$$

De curiozitate, putem calcula viteza luminii în vid:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o\mu_o}} = 2,99796 \cdot 10^8 \text{ m/s}.$$

Din cele discutate mai sus rezultă că:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$$

și deci putem *calcula* atât viteza de propagare într-un mediu cât și indicele lui de refracție dacă îi știm pe ϵ_r și μ_r . Pentru toate materialele nemagnetice $\epsilon_r \cong 1$ și deci:

$$n^2 = \epsilon_r$$

Cunoscând aceste lucruri, tragem concluzia că într-adevăr pentru orice situație posibilă $v \leq c$ deoarece $\epsilon_r \geq 1$: Deci, în nici un mediu material viteza undelor electromagnetice nu poate depăși valoarea ei în vid, egală cu c .

Să încercăm să găsim alte procedee de modificare a vitezei luminii, care să ne permită creșterea ei. În acest scop, să ne amintim că am putea folosi o metodă mecanică, făcând uz de compunerea vitezelor. Notând cu \vec{v}_1 viteza unui mobil în sistemul de referință S , în sistemul S' care se deplasează uniform cu viteza, \vec{V} față de primul, viteza lui va fi:

$$\vec{v}'_1 = \vec{v}_1 - \vec{V}$$

Dacă acum $v_1 = c$, atunci:

$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{V}$$

Se pare că în acest fel vom reuși să creștem sau să scădem după voie viteza luminii. Pentru a fi siguri de reușită putem controla, de exemplu, viteza acestei unde prin metoda lui Fizeau, a roții dințate (figura 2.xx). Deoarece c este foarte mare, pentru a putea observa o variație a vitezei, va trebui ca \vec{V} să fie, la rândul ei, foarte mare. În acest scop, putem utiliza, de exemplu, unele luminoase provenite de la stele despre care știm că se mișcă față de noi cu o viteză care este, de obicei, foarte mare. Astfel de măsurători au fost făcute utilizând radiația provenită de la unele stele. Rezultatul a fost însă surprinzător:

$$c' = c,$$

indiferent de viteza relativă pe care o avea sursa de lumină. Faptul că viteza luminii rămâne nemodificată, indiferent de viteza de antrenare a sursei de lumină, pare a fi un rezultat paradoxal. Această afirmație este astăzi foarte bine verificată experimental*.

Ne aflăm astfel între două rezultate experimentale care sunt contradictorii: pentru toate experimentele obișnuite se obține (bine verificat experimental) o aditivitate a vitezelor de forma $\vec{v}'_1 = \vec{v}_1 + \vec{V}$, iar pentru toate experimentele cu lumină se obține $c' = c$. Care este cauza lor și cum pot fi ele explicate?

Să analizăm care dintre cele două categorii de experimente este mai demn de crezare, primul sau al doilea? Cu toate că primul este un experiment pe care-l cunoaștem din viața de toate zilele și care pare a fi foarte corect, cel de-al doilea experiment este mai demn de crezare deoarece s-a realizat pe o gamă extrem de mare de viteze ($V = 0, \dots, 0,99 c$). Singura posibilitate pe care o avem este aceea de a acorda credit experimentului al doilea.

În orice caz, se pare că în domeniul vitezelor foarte mari (neuzuale în viața de toate zilele) lucrurile sunt ceva mai complicate. Trebuie deci să reținem că:

viteza luminii în vid nu poate fi modificată în nici un fel; ea rămâne egală cu c .

Se dovedește că viteza luminii nu este o mărime relativă, ci o mărime absolută! De aceea, mărimea *vitezei luminii este o constantă universală*.

Principiul lui Fermat

Vă propunem următorul experiment grafic. Să presupunem că avem două puncte P_1 și P_2 aflate deasupra unei suprafețe reflectătoare (figura 2.107). Cu toate că știm că raza de lumină va pleca din P_1 și P_2 astfel încât unghiul de incidență cu normala să fie egal cu unghiul de reflexie, ne putem pune întrebarea care este motivul acestei comportări a luminii?

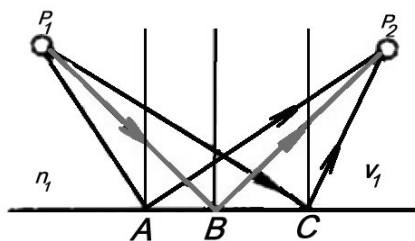


Fig. 2.107. Mersul luminii la reflexie.

Să ne gândim că acum nu mai judecăm în termeni de „rază luminoasă” ci în termeni de „undă luminoasă”. Punând problema în acest fel ne putem întreba cum „alege” lumina drumul ei de la un punct la altul? Punctul P_1 este o sursă (punctiformă) și deci de la ea pleacă unde (sferice) care sigur vor întâlni suprafața reflectătoare în toate punctele ei, cum ar fi de exemplu în A , în B și în C (sau oricare alt punct). Experiența ne arată că acel punct va fi B . Vom înțelege mai profund ce înseamnă acest lucru dacă veți face desenul de mai sus pe o hârtie milimetrică mare, veți alege două puncte oarecari deasupra unei linii orizontale care să corespundă oglinzii și zece puncte ($A, B, C, D, E,$

...) „pe oglindă”, relativ egal depărtate unul de altul (de la stânga spre dreapta) și măsurați lungimea drumurilor $P_1AP_2, P_1BP_2, P_1CP_2, P_1DP_2, \dots$ etc.

Faceți un tabel al lungimii drumurilor și veți vedea un lucru curios. La început, lungimea drumului va scădea până la o valoare minimă, după care va crește din nou!

Veți putea observa un lucru și mai curios: acel punct de lungime minimă corespunde exact punctului B , pentru care legea reflexiei cunoscută este adevărată. Putem spune că lumina alege acel punct de reflexie pe oglindă care să ducă la un *drum minim*, dacă judecăm în termeni de rază de lumină. Orice alt drum parcurs de raza de lumină conduce la o lungime mai mare! Ca și cum raza de lumină *este grăbită*.

Să facem un experiment grafic asemănător, pentru refracție (figura 2.108).

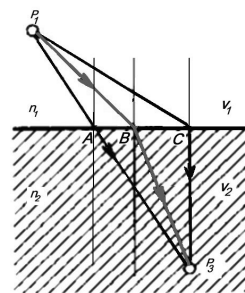


Fig. 2.108. Mersul luminii la refracție.

Putem măsura (sau calcula) lungimea drumului unde pe diferite traiectorii ale razelor și putem să le comparăm ca și în cazul reflexiei. Vom vedea că nu mai obținem rezultatul corect. Drumul cel mai scurt va fi P_1AP_2 . Acest rezultat nu corespunde realității căci el nu este dependent de proprietățile substanței din regiunea a doua, așa cum ne arată experiența (adică depinde de indicii de refracție relativ). Dar se dovedește că principiul „razei grăbite” se regăsește dacă calculăm timpul parcurs de lumină și nu distanța parcursă. Durata necesară luminii să ajungă din P_1 în P_2 pe diferite căi se dovedește a fi *minimă* dacă se face în conformitate cu legea de refracție a luminii. Dacă dorim să ne convingem, facem același experiment de calcul ca și la reflexie, de data aceasta calculând pentru diferite traiectorii durata necesară ajungerii din P_1 în P_2 pe diferite drumuri. Verificarea arată că legea refracției este o consecință a alegerii drumului de durată minimă între două puncte. Această observație poartă numele de *principiul lui Fermat*. Dacă ne aducem aminte de observația legată de faptul că o lentilă acționează astfel încât în focar să fie un maxim de interferență, putem să gândim și aici la fel.

Undele vor merge astfel încât vor produce interferență constructivă, iar aceasta se obține dacă se respectă legea de reflexie sau de refracție. În fond, drumul minim înseamnă, până la urmă, păstrarea unei faze constante pentru unde, adică suprapunerea lor constructivă. Se observă o comportare extrem de interesantă. Unda care pornește dintr-o sursă, merge pe toate direcțiile, perpendicular pe frontul de undă. Deci ea *nu* „alege” drumul pe care trebuie să-l facă ca să ajungă din P_1 în P_2 sau P_3 . Ansamblul tuturor undelor care pleacă din P_1 va determina ca în P_2 sau în P_3 să ajungă acele unde care determină un maxim de interferență (sunt în fază). Unda „nu știe dinainte” pe unde să meargă, ci se realizează acea traiectorie (exprimată prin raza de lumină) care corespunde unui maxim de interferență. Am putea spune metaforic că unda „încearcă toate traiectoriile” și o alege pe cea de timp minim. Această idee stă la bază unei gândiri care se regăsește în toată fizica modernă (mai ales în mecanica cuantică). Pare straniu, dar acest mod de comportare este specific undelor.

Atenuarea

Printre fenomenele care au loc la propagarea undelor electromagnetice trebuie să amintim și fenomenul de absorbție a radiației. Acest fenomen este specific atât mediului prin care trece unda cât și lungimii de undă a radiației. Un exemplu este cel al trecerii radiației electromagnetice prin aer, pereți, pământ etc. Poate ați observat că intensitatea unui post de radio ascultat cu un parat scade chiar până la zero dacă treceți printr-un tunel sau vă aflați în subteran. La fel și în apă, motiv pentru care submarinele au sisteme extrem de complicate de comunicație cu exteriorul, deoarece apa absoarbe practic total undele electromagnetice. Uneori o ploaie puternică poate să producă astfel de efecte.

Dacă ne referim la undele luminoase, atunci trebuie să știm că, de exemplu, prin sticla de la geam nu trec radiațiile ultraviolete astfel încât nu ne putem bronză în spatele unui geam. La fel se întâmplă cu radiațiile infraroșii. Din cauza acestei absorbții se produce efectul de seră.

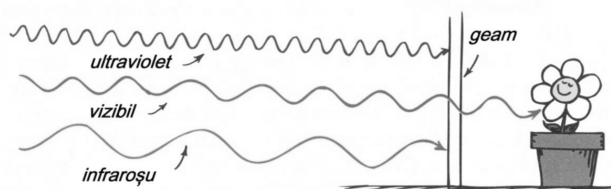


Fig. 2.108. Geamul absoarbe undele ultraviolete și infraroșii.

Prin atmosfera terestră ne sosesc radiații electromagnetice din spațiul cosmic doar în două benzi: în domeniul vizibil și în domeniul radio. Din această cauză, studiul corpurilor cerești se face cu telescoapele optice și cu radiotelescoapele.

Construiți cel mai simplu receptor radio

Înainte de a construi un aparat de radio simplu, să încercăm să înțelegem în ce constă principiul emisie și recepției radio. La baza procedurii de transmitere a informației pe cale radio se află un fenomen foarte simplu, pe care-l folosim curent și care se numește *modulație*. Să presupunem că vreți să intrați într-o cameră; bateți la ușă: „cioc”, „cioc”, „cioc” și vi se spune „intră”. Deci semnalul a fost recepționat de cel din cameră. Cum? Cele trei bătăi ar putea fi reprezentate grafic ca o succesiune de trei sunete care pot să aibă o formă a variației în timp ca cea din figura 2.109.

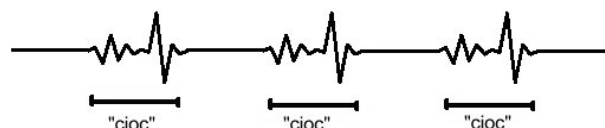


Fig. 2.109. Trei bătăi la ușă.

Cele trei bătăi sunt un semnal format din trei impulsuri. Partea sonoră (adică cea auzibilă) este formată din vibrația plăcii de lemn a ușii, ca urmare a loviturilor. În figură sunt reprezentate formele celor trei vibrații. Ceea ce noi auzim este, de fapt, repetarea de trei ori a vibrațiilor ușii. Asta este tot! Să analizăm mai atent acest procedeu. Spunem că semnalul este o repetare a trei bătăi iar ceea ce auzim este sunetul vibrației ușii. Deci, cele trei semnale nu le auzim direct ci prin intermediul undelor provocate de vibrațiile ușii. Se spune că unda sonoră provocată de vibrația ușii este *purtătoarea* care a fost *modulată* de către cele trei lovituri. La fel și în radiofonie: există o „purtătoare” care este o undă electromagnetică de frecvență ridicată (1 MHz – 1 GHz) care este modulată (are amplitudine variabilă) cu o frecvență mai joasă, care se află în domeniul sonor (16 Hz – 16kHz) și provine de la un microfon sau altă sursă de sunet. La recepție, procesul se petrece invers: unda purtătoare este „prinsă” de către antenă și este apoi *demodulată*, (adică i se elimină unda purtătoare prin procedul *deteției* realizat cu o diodă), iar ceea ce rămâne se poate asculta în difuzor sau cască telefonică.

Principalele componente ale unui sistem de recepție care realizează aceste operații sunt prezentate în figura

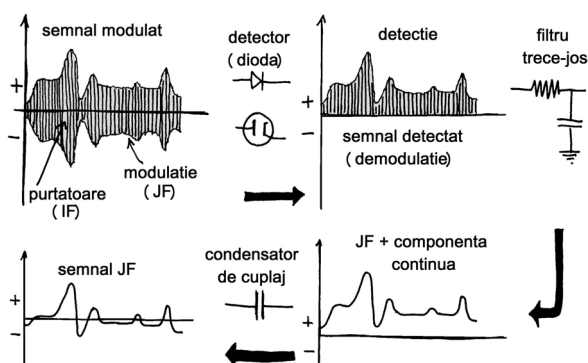


Fig. 2.210. Principiul transmisiei și recepției prin modularea și demodularea unei purtătoare.

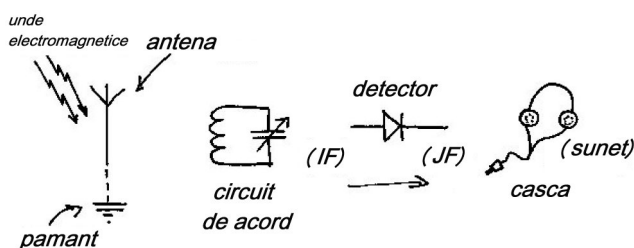


Fig. 2.211. Componentele unui sistem de recepție..

2.211. Antena captează toate undele electromagnetice din spațiu iar cu ajutorul unui circuit oscilant se selectează una din frecvențele dorite (ale postului de emisie). Prin intermediul unui detector, acest semnal va putea fi ascultat într-un sistem acustic, în cazul de față o cască telefonică de impedanță mare.

Cea mai simplă schemă electrică de aparat de recepție radio, pe care se pot vedea elementele de bază ale unui receptor este redată în figura 2.212.

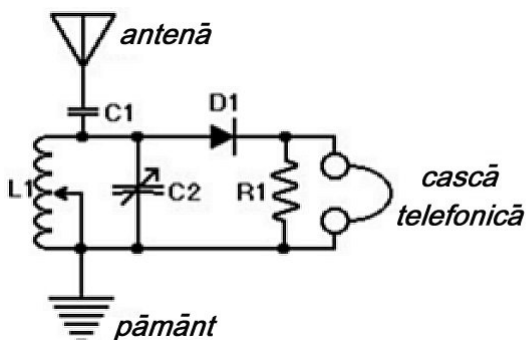


Fig. 2.212. Schema unui receptor simplu de radio.

Antena este cuplată cu circuitul oscilant ($L1 - C2$) prin intermediul unui condensator electric $C1$. Dioda ($D1$) produce un curent variabil corespunzător sunetului care a fost

transmis și care va produce o tensiune la bornele unui rezistor $R1$. De la bornele acestui rezistor se ia tensiunea care alimentează o cască telefonică. Componentele pot fi cumpărate dar pot fi și construite de către voi, așa cum se poate vedea în succesiunea de imagini care urmează (figurile 2.212 – 2.213). Să le luăm pe scurt. Antena va fi un fir lung de 10 – 20m izolat și pe cât posibil scos în afara camerei. Bobina ($L1$) se face dintr-un tub de carton sau de plastic cu diametrul de 4cm și lung de aproximativ 12cm pe care se bobinează (spira lângă spira cam 20- 23m de sârmă izolată cu email, de diametru 0,3 – 0,5mm. Bobina poate să aibă un cursor, așa cum este prezentat în imaginea din figura 2. ...

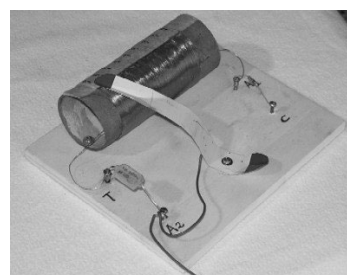


Fig. 2.212. Construirea bobinei.

Condensatorul $C1$ poate să aibă o valoare între 200 – 300 pF. Condensatorul $C2$ se improvizează din două pahare de plastic care se acoperă (ca în figura 2.29) jumătate cu foiță de staniol sau de aluminiu (care se lipește de pahar).

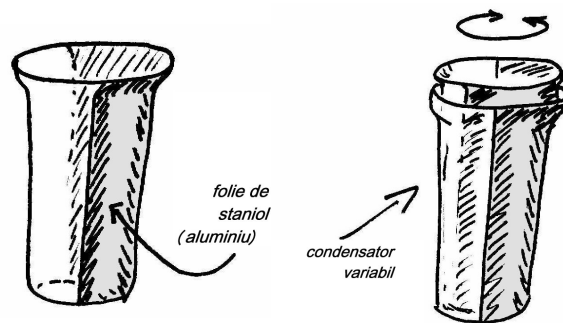


Fig. 2.213. Construirea condensatorului.

Introducând cele două pahare unul în altul vom forma un condensator, cu doi electrozi, a cărui capacitate poate fi variată prin simpla rotire a paharului din centru. În calitate de detector ($D1$) vom folosi un detector cu germaniu de tipul OA90, sau 1N34, sau echivalent, care poate fi cumpărat de la un magazin de piese radio. La fel, se poate cumpăra și un condensator variabil comercial care trebuie să aibă o capacitate variabilă, între aproximativ 30 și 200 pF. Rezistorul ($R1$) este de aproximativ 100kOhmi, iar casca

telefonică trebuie să aibă o rezistență destul de mare (2000 – 4000 ohmi). Acest aparat poate să prindă posturi care se găsesc în banda de frecvență de 500 – 1600 kHz, denumită „unde medii”. Prin varierea capacității C_2 se „caută” un post de radio, pe principiul circuitului oscilant (L_1C_2). Circuitul oscilant va avea o impedanță mare la borne doar dacă frecvența lui proprie de oscilație (fenomenul de rezonanță) este egală cu cea a undei incidente. Astfel că din toate undele care ajung în antenă doar cele corespunzătoare acestei egalități vor produce o tensiune suficient de mare pentru ca să poată fi auzite în cască. Acest aparat nu amplifică semnalul, deci este puțin sensibil. Dar când veți auzi primul post de radio cu receptorul făcut de voi veți putea fi mândri. Auditiție plăcută!

Teste