

#### 4.7.1. Propagarea câmpului electromagnetic. Undă electromagnetică

O proprietate fundamentală a câmpului electromagnetic este capacitatea lui de a se propaga în spațiu. Dacă prin conductor circulă un curent alternativ de frecvență înaltă, în jurul conductorului apar câmpuri alternative, unul electric și altul magnetic. Interdependența (generarea reciprocă) dintre câmpul electric variabil și câmpul magnetic variabil explică propagarea câmpului electromagnetic în spațiu. Variatiile câmpului electric produc în spațiul înconjurător un câmp magnetic, care nu rămâne constant deoarece variază câmpul electric care l-a generat. Dar variațiile câmpului magnetic produc la rândul lor din nou un câmp electric, care de asemenea variază, generând din nou un câmp magnetic și.m.d. Astfel, câmpul electromagnetic se propagă din aproape în aproape, printr-un proces osculatoriu, cuprinzând mereu porțiuni noi în spațiu. Într-un câmp electromagnetic ce se propagă, ambele câmpuri variază periodic în timp; pe scurt, ambele câmpuri au o variație spațio-temporală.

### D Un câmp electromagnetic care se propagă constituie o undă electromagnetică.

Pentru a descrie (apelând la o construcție grafică), mecanismul propagării undei electromagneticice prin vid, să considerăm un câmp electromagnetic ca acela din figura 4.51, a. Presupunem că numai câmpul magnetic care inducția  $\bar{B}$  variază în timp. După un interval foarte scurt de timp  $\Delta t$  el are forma de variație spațială reprezentată cu linie punctată în figura 4.51,b. Se observă că noua curbă se obține deplasând-o pe cea inițială pe o distanță foarte mică în sensul pozitiv al axei Oy.

Să stabilim efectul produs asupra câmpului electric de această variație a câmpului magnetic.

Heinrich Hertz (1857–1894), fizician german în Hamburg, Germania. În tinerete l-a preocupat limbile străine și științele umanistice. Diverse apărate primite de la bunicul sau fi determinată atracția pentru fizică. După ce studiază fizica și matematica la Universitatea din Berlin, se dedică cercetării experimentale în domeniul electromagnetismului dovedind existența undelor electromagneticice prezise de teoria lui Maxwell. A stabilit (1887) influența luminii ultraviolete asupra descărcarilor electrice, inițiuind studiul efectului fotoelectric. Interpretarea acestui efect a fost dată de Albert Einstein în anul 1905.



În regiunea din stânga, câmpul magnetic a scăzut ca intensitate  $\left( \frac{\Delta B}{\Delta t} < 0 \right)$ . Prin inducție electromagneticică ia naștere un câmp electric a cărui intensitate se adună vectorial cu intensitatea celui existent. Intensitatea câmpului electric induș fiind orientată de-a lungul semiaxei negative  $-Oz$ , intensitatea câmpului electric rezultat din aceasta regiune va scădea în valoare. În regiunea din dreapta inducția magnetică a crescut și vectorul intensitate a câmpului electric induș va fi orientat de-a lungul semiaxei pozitive  $+Oz$ . Câmpul electric din această regiune crește în intensitate. Noua distribuție a intensității câmpului electric se obține deci din cea inițială, dacă

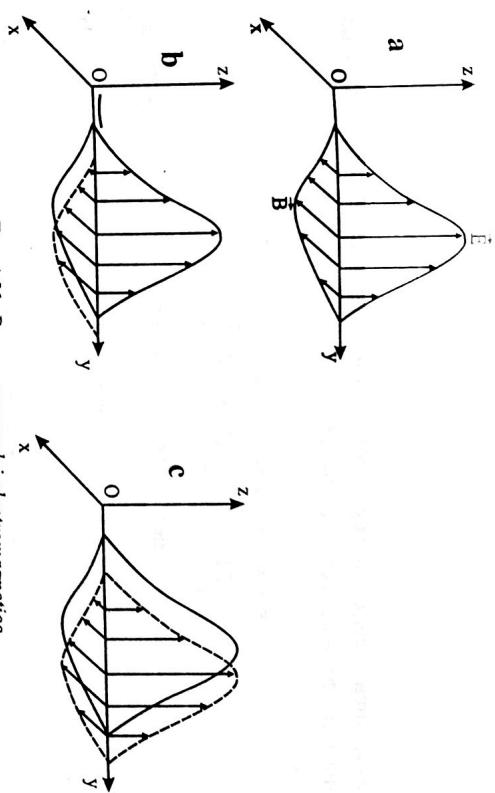


Fig. 4.51. Propagarea undei electromagneticice

o deplasăm puțin spre dreapta cu aceeași distanță cu care se deplasează cea a inducției câmpului magnetic. Pe de altă parte, conform teoriei lui Maxwell, un câmp electric de intensitate variabilă în timp determină apariția unui câmp magnetic. Repetând raionamentul anterior, se observă că noul câmp rezultat este mai puțin intens în regiunea din stânga și mai intens în regiunea din dreapta, având loc de asemenea o deplasarea a întregii distribuții, cu o mică distanță în sensul pozitiv al axei Oy (fig. 4.51, c). Fenomenele se repetă apoi în mod identic. Se formează deci o undă electromagnetică, undă care se propagă de-a lungul direcției Oy în sensul ei pozitiv.

Propagându-se în spațiu, câmpul electromagnetic pierde legătura cu conductorul în vecinătatea căruia a fost produs inițial. Se poate interrupe oscilația curentului în conductor, dar unda electromagnetică își va continua deplasare. Teoria lui Maxwell arată și experiențele lui Hertz confirmă că, într-o undă electromagnetică, vectorii  $\bar{E}$ ,  $\bar{B}$  oscilează în fază în plane perpendiculare între ele și perpendicularare pe direcția de propagare a undei (fig. 4.52). Ansamblul  $\bar{E}$ ,  $\bar{B}$  constituie vectorii care caracterizează o undă electromagnetică transversală care se propagă în vid cu viteza  $c$  a lumini.

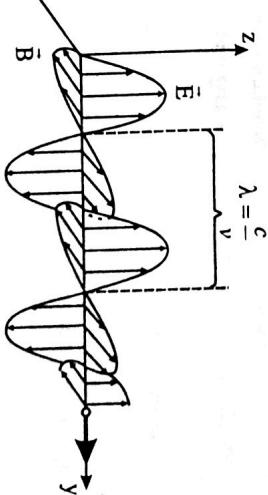


Fig. 4.52. În fiecare punct al spațiului atins cu o undă electromagnetică, vectorii  $\bar{E}$ ,  $\bar{B}$  oscilează în fază, în direcții normale Oy, Oz pe direcția de propagare Oy.

- Viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid a fost stabilită de Maxwell:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}},$$

$\epsilon_0$  și  $\mu_0$  fiind permisivitatea electrică și respectiv permeabilitatea magnetică a vidului. Înlocuind cu valorile numerice corespunzătoare, se obține:

$$c = \frac{1}{\sqrt{8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \cdot 12.56 \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}.$$

Această valoare coincide cu cea a vitezei luminii în vid, valoarea prezisă de teoria lui Maxwell.

Într-un mediu omogen oarecare, viteza  $v$  de propagare a undelor electromagnetice este mai mică decât în vid și are expresia:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}},$$

$\epsilon_r$  și  $\mu_r$  fiind permisivitatea relativă și respectiv permeabilitatea relativă a mediului în care are loc propagarea.

Lungimea de undă a undelor electromagnetice într-un mediu omogen oarecare este dată de relația:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

În experiențele lui Hertz lungimea de undă era  $\lambda = (0.6 \pm 0.01) m$ .

#### 4.7.2. Dependența temporal-spatială a componentelor $\bar{E}$ și $\bar{B}$ din undă electromagnetică

Să presupunem că în originea axelor de coordonate  $Oxyz$  se generează unde electromagnetice (fig. 4.52), forma de variație a mărimilor vectorilor  $\bar{E}$  și  $\bar{B}$  fiind sinusoidală:

$E_z = E_{ox} \sin \omega t$  și  $B_x = B_{ox} \sin \omega t$ , unde  $E_{ox}$  și  $B_{ox}$  reprezintă amplitudinile, iar  $\omega$  – pulsăția componentei electrice, respectiv magnetice, ale undei electromagnetice.

Sensul de propagare a undei este dat de sensul de întărire a unui burghiu care este rotit în sensul suprapunerii vectorului  $\bar{E}$  peste vectorul  $\bar{B}$ , cu un unghi mai mic de  $\pi$ . În cazul analizat, unda se propagă în sensul semiaxei pozitive  $Oy$ . Într-amplitudinile intensității câmpului electric ( $\bar{E}_0$ ) și inducției magnetice ( $\bar{B}_0$ ) corespunzând undei electromagnetice există relația:

$$\bar{E}_0 = \bar{B}_0 \times \bar{v}.$$

Pentru a stabili relația de dependență temporală și spatială dintre vectorii ( $\bar{E}$ ) și magnetic ( $\bar{B}$ ) ai undei electromagnetice sinusoidale, vom aplica ecuația undei plane în cazul undei electromagnetice.

Obținem:  $E = E_0 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right)$  și  $B = B_0 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right)$ , unde  $\lambda = vT$  reprezintă lungimea

de undă pentru una electromagnetică având viteza  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$  și perioada de oscilație  $T$  pentru  $\bar{E}$  și  $\bar{B}$ .

Luând în considerație și relația  $E_0 = vB_0$ , se obține pentru valoarea instantanee a inducției magnetice  $B$  a undei electromagnetice într-un punct având coordonata  $y$  pe direcția de propagare, expresia:

$$B = \frac{E_0}{v} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right).$$

O mărime principală care caracterizează unda electromagnetică este *densiitatea volumică instantanee a energiei undei electromagnetice*, definită în fiecare punct al spațiului prin relația:

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta V},$$

unde  $\Delta W$  este energia unei electromagnetice în elementul de volum (foarte mic)  $\Delta V$  din jurul punctului considerat.

În cazul mediilor omogene și izotrope:

$$w = \epsilon E^2 = \frac{B^2}{\mu}.$$

Se poate defini și o *densiitate volumică medie* (în timp) a energiei electromagnetice  $\bar{w}$ . Pentru mediile omogene și izotrope, aceasta are expresia:

$$\bar{w} = \frac{\epsilon E_0^2}{2} = \frac{B_0^2}{2\mu}.$$

#### Considerații electronice

Într-un conductor conectat la o sursă de t.e.m. alternativă sub acțiunea câmpului electric alternativ întreținut de t.e.m. alternativă, electronii de conductie oscilează. Oscilația lor se propagă din aproape în aproape în conductor, cu viteza luminii în vid, sub formă unei unde electronice longitudinale numită și undă de curent. Pentru un circuit alimentat sub o tensiune cu frecvență industrială  $v = 50$  Hz, lungimea de undă  $\lambda$  a undei electronice este:

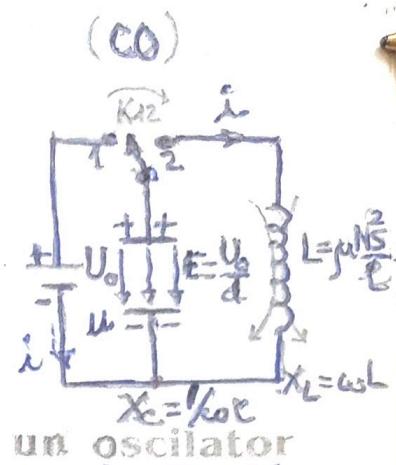
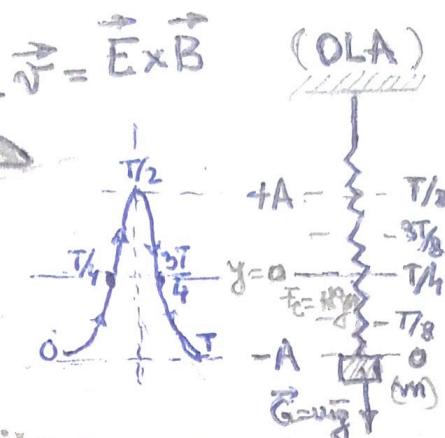
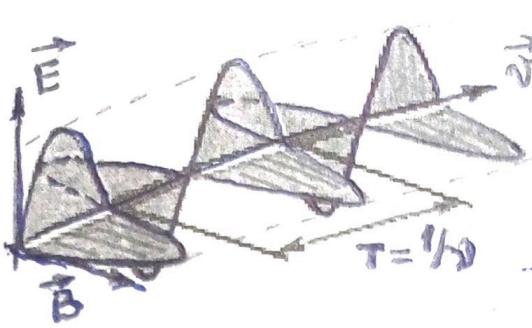
$$\lambda = \frac{c}{v} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{50 \text{ Hz}} = 6000 \text{ km}.$$

Pentru circuitele obișnuite această valoare pentru  $\lambda$  este cu mult mai mare decât lungimea lor. În aceste circuite, dacă nu au derivații, electronii de conductie, care formează gazul electronic, vor oscila în fază în orice punct al circuitului. Intensitatea instantanee a curentului va fi deci aceeași în orice punct al circuitului.

Pentru conductoarele în care se stabilesc curenti de foarte înaltă frecvență starea electrică a conductorului se schimbă. Pentru o frecvență foarte înaltă a tensiunii de alimentare, de exemplu 10<sup>9</sup> Hz, se obține:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{10^9 \text{ Hz}} = 0.3 \text{ m}.$$

# ANALOGIA MECANO-ELECTRICA



Analogie între mărimele ce caracterizează un oscilator armonic și un circuit oscilant (OC)

(OLA) - mărimile mecanice

- Cordonata  $y$

$$- \text{Viteza, } v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

$$- \text{Accelerația, } a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}$$

- Masa  $m$

- Constanta elastică,  $k$ , ( $F = ky$ )

$$- \text{Energia potențială, } \frac{1}{2}ky^2 = E_p$$

$$- \text{Energia cinetică, } \frac{1}{2}mv_y^2 = E_c$$

mărimile electro-magnetic (cerc. Osc.)

- Sarcina  $q$

$$- \text{Intensitatea curentului, } i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

$$- \text{Viteza de variație a intensității curentului, } \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

- Inductanță  $L$

$$- \text{Inversa capacitatii, } \frac{1}{C} \left( u = \frac{1}{C} q \right)$$

$$- \text{Energia câmpului electric, } \frac{q^2}{2C} = E_e$$

$$- \text{Energia câmpului magnetic, } \frac{Li^2}{2} = E_{magn}$$

$$E = E_c + E_p = \frac{KA^2}{2}$$

$$E = \frac{mv_y^2}{2} + \frac{ky^2}{2}$$

$$W = W_e + W_m$$

$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{CU_0^2}{2}$$

$$\epsilon_r = \left( \frac{E}{E_0} \right) \rightarrow E = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\mu_{ur} = \left( \frac{\mu}{\mu_0} \right) \rightarrow \mu = \mu_0 \mu_{ur}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_{ur}}} = \left( \frac{C}{n} \right) = v$$

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon = 8,856 \cdot 10^{12} \text{ F/m} - \text{permittivitatea el.} \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} - \text{permeabilitatea magn.} \end{array} \right.$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \rightarrow \text{viteză luminii în vid.}$$

Rezultă:  $v_1 \equiv 9,17$  kHz și  $v_2 = 10,92$  kHz.

$$d) \frac{v_0}{v_2 - v_1} = \frac{v_0}{\frac{1}{L} \cdot R} = \frac{L \omega_0}{R} = Q; Q \equiv 5,7.$$

- e) Înănd seama de analogiile între oscilațiile elastice și cele electrice, ecuațiile tensiunilor  $u = L \frac{\Delta i}{\Delta t} + \frac{q}{C} + R i$  trece în ecuația analogă  $F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} + k y + R_e v$ .  $R_e$  este coeficientul de rezistență a mediului.

$$f) v_{0e} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 10^{-3} v_0 \text{ de unde } m = 10^6 \frac{k}{4\pi^2 v_0^2} = 1 \text{ kg.}$$

#### 4.7. Câmpul electromagnetic\* (extindere)

- Experiențele lui Oersted, Ampère, Henry și Faraday au condus la stabilirea a două principii de bază ale electromagnetismului:

- 1) un curent electric care trece printr-un conductor produce un câmp magnetic cu linii închise în jurul conductorului;
  - 2) într-un conductor care intersecteză linii de câmp magnetic se induce o tensiune electromotoare, deci și un câmp electric.
- În 1864, James Clerk Maxwell (1831–1879) a generalizat aceste două principii prin sistemul de ecuații care-i poartă numele.



Fig. 1

James Clerk Maxwell (1831–1879), fizician englez. S-a născut în

Edinburg, Scoția, în anul în care Faraday descoperea fenomenul inducției electomagnetiche. Are importante contribuții în domeniul teoriei cîinetei a gazelor și electromagnetismului. Generalizând legile experimentale cîmpului electromagnetic, Maxwell a pus bazele teoriei legile cîmpului electromagnetic. Pe baza acestor ecuații a dedus existența undelor electomagnetiche, descoperite experimental de Heinrich Hertz.

A organizat în 1870 Laboratorul Cavendish de la Universitatea din Cambridge, devenit un centru mondial al cercetării în domeniul fizicii. Este considerat, alături de Isaac Newton și Albert Einstein, drept unul dintre cei mai profuni și productivi fizicieni din toate timpurile.

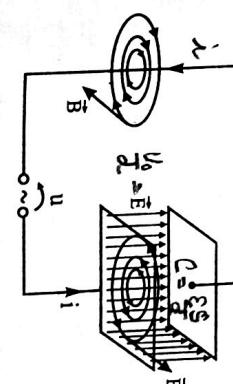


Fig. 4.48. Câmpul electric produs de un câmp magnetic variabil în timp. Sensul linilor închise de câmp este contrar celui dat de regula burghului cînd vectorul  $\vec{B}$  este creșător în timp și același cu cel dat de regula burghului cînd vectorul  $\vec{E}$  scade în burghului cînd vectorul  $\vec{E}$  scade în timp.

**D** Ansamblul câmpurilor electrice și magnetice, care oscilează și se generează reciproc, se numește câmp electromagnetic.

Teoria câmpului electromagnetic elaborată de Maxwell a fost deplin confirmată de experiență. Predicția lui Maxwell, privind propagarea cu viteza finită (cea a luminii) a câmpului electromagnetic, a devenit realitate prin inginerialele experiențe ale lui Heinrich Hertz (1857–1894), în anul 1888.

- La baza teoriei lui Maxwell stau două afirmații:
  - (P1) – în jurul unei căi magnetic variabil în timp ia naștere un câmp electric ale cărui linii sunt închise. Intensitatea câmpului electric este cu atât mai mare cu cat inducția câmpului magnetic variază mai rapid (fig. 4.48, a, b);
  - (P2) – în jurul unei căi electric variabil în timp ia naștere un câmp magnetic ale cărui linii sunt închise. Inducția câmpului magnetic este cu atât mai mare, cu cat intensitatea câmpului electric variază mai rapid (fig. 4.49, a, b).
- Conform teoriei lui Maxwell, porțiunea dintr-un circuit de curent alternativ, întreruptă de un condensator, participă la crearea câmpului magnetic exterior prin câmp electric variabil dintr-

armăturile condensatorului (fig. 4.50). Prin urmare, spațiul ocupat de un câmp electric variabil este simultan ocupat și de un câmp magnetic variabil. Coexistența lor se explică prin generarea unuia din ele datorită variației celuilalt.

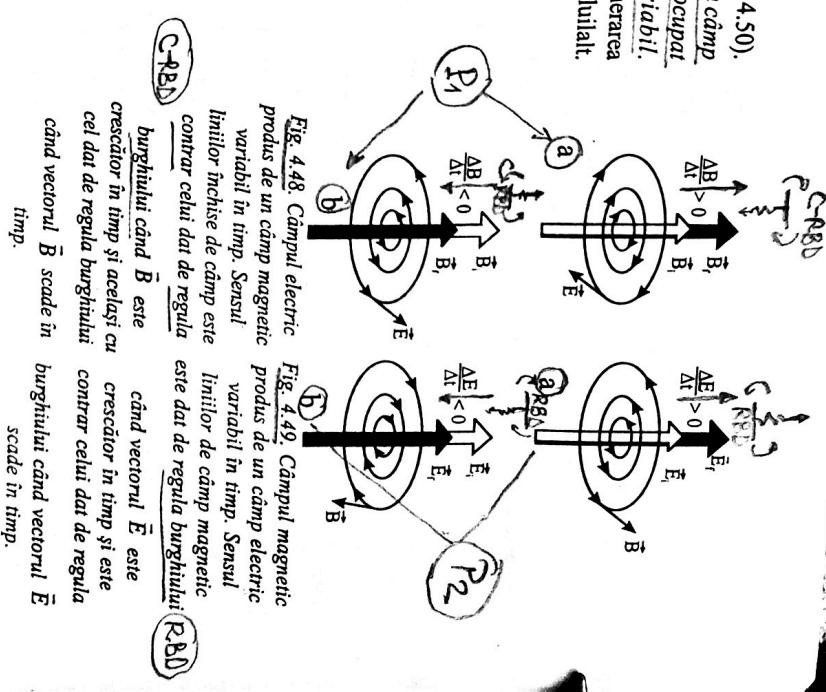


Fig. 4.49. Câmpul magnetic produs de un câmp electric variabil în timp. Sensul linilor de câmp magnetic este dat de regula burghului (R.B.) cînd vectorul  $\vec{E}$  este creșător în timp și același cu cel dat de regula burghului contrar celui dat de regula burghului cînd vectorul  $\vec{E}$  scade în burghului cînd vectorul  $\vec{E}$  scade în timp.

$$\left( \text{cauză } \frac{\Delta E}{\Delta t} > 0 \right)$$

Fig. 4.50. Câmpul electric variabil din condensator generă un câmp magnetic.