

15. UNDE ELECTROMAGNETICE

CUPRINS

Nr. crt.	TEMA	Pagina
1.	Obiective	419
2.	Organizarea sarcinilor de lucru	419
3.	<i>Topicul 1</i> Câmpul electromagnetic. Unde electromagnetice.	420
4.	Exemplu ilustrativ 1	421
5.	<i>Topicul 2</i> Producerea undelor electromagnetice. Circuitul oscilant deschis.	423
6.	Exemplu ilustrativ 2	424
7.	<i>Topicul 3</i> Energia câmpului electric. Energia câmpului magnetic.	430
8.	Exemplu ilustrativ 3	433
9.	TEST DE AUTOEVALUARE	436
10.	REZUMAT	437
11.	Rezultate așteptate	439
12.	Termeni esențiali	439
13.	Recomandări bibliografice suplimentare	440
14.	TEST DE EVALUARE	441

OBIECTIVE

Obiectivele acestui curs sunt:

- Să definească câmpul electromagnetic.
- Să definească undele electromagnetice.
- Să înțeleagă fenomenul de producere a undelor electromagnetice.
- Să-și însușească ecuația undelor plane sinusoidale.
- Să-și însușească ecuația de propagare a undelor electromagnetice.
- Să definească viteza de propagare a undelor.
- Să înțeleagă noțiunea de energie a câmpului electric, magnetic și electromagnetic.
- Să cunoască și să clasifice undele electromagnetice.

Organizarea sarcinilor de lucru

- ✓ Parcurgeți cele trei topice ale cursului.
- ✓ La fiecare topic urmăriți exemplele ilustrative.
- ✓ Fixați principalele idei ale cursului, prezentate în rezumat.
- ✓ Completați testul de autoevaluare.
- ✓ Timpul de lucru pentru parcurgerea testului de evaluare este de 15 minute.

TOPICUL 1

Câmpul electromagnetic. Unde electromagnetice.



Din studiul fenomenelor de inducție electromagnetică și de inducție magnetoelectrică rezultă că, câmpul electric și câmpul magnetic coexistă simultan în spațiu și se regenerează reciproc [9].

Definiție: *Ansamblul câmpurilor electric și magnetic, care oscilează și se regenerează reciproc, se numește câmp electromagnetic.*

Câmpurile electrice și magnetice din apropierea dipolului oscilant se numesc **câmpuri electrice și magnetice primare** și au ca surse sarcinile electrice aflate în mișcare accelerată, sau cu alte cuvinte, curenții electrice variabili în timp. Câmpurile electrice și magnetice în punctele depărtate de dipolul oscilant se numesc **câmpuri electrice și magnetice secundare** și nu mai au ca surse sarcinile electrice accelerate sau curenții electrice variabili în timp, ci se generează reciproc și se propagă în spațiu din aproape în aproape [6,23].

Definiție: *Perturbația electromagnetică care se propagă în spațiu constituie o undă electromagnetică.*

Spre deosebire de câmpurile electrice și magnetice primare care sunt defazate cu $T/4$ în timp și $\lambda/4$ în spațiu câmpurile electrice și magnetice care constituie unda electromagnetică oscilează în fază în orice

punct din spațiul în care se propagă. Mai mult, față de undele elastice care se propagă numai în medii elastice, undele electromagnetice se propagă și în vid.

CONCLUZIE

Ansamblul câmpurilor electric și magnetic, care oscilează și se regenerează reciproc, se numește câmp electromagnetic.

Câmpul electromagnetic care se propagă în spațiu constituie o undă electromagnetică.

EXEMPLU ILUSTRATIV 1:



CONCLUZIE

Clasificarea undelor electromagnetice

Se poate face după lungimea de undă în vid (sau după frecarea lor). Denumirile pe care le poartă undele din diferite domenii de frecvențe le-au fost date după fenomenul care stă la baza producerii lor:

- **Undele hertziene** → se produc în urma excitării oscilațiilor (curenților) în circuite LC sau în cavități rezonante.
- **Radiațiile termice** → apar în urma oscilației sarcinilor electrice atomice din corpuri, datorate mișcării de agitație termică.
- **Radiațiile de sincroton** → apar în urma mișcării accelerate a sarcinilor electrice în câmp magnetic transversal.
- **Radiațiile de frânare** → apar la frânarea bruscă a electronilor în câmpul nucleului atomic.

Domeniul de utilizare, după proprietățile fizice:

- Undele radio:
 - Lungi → ($\lambda = 30 \text{ km} - 750 \text{ m}$)
 - Medii → ($\lambda = 750 \text{ m} - 50 \text{ m}$)
 - Scurte → ($\lambda = 50 \text{ m} - 10 \text{ m}$)
 - Ultracurte → ($\lambda = 10 \text{ m} - 30 \text{ cm}$)

- Microundele $\rightarrow (\lambda = 30 \text{ cm} - 1 \text{ mm})$
- Radiațiile infraroșii $\rightarrow \lambda = 10^{-3} \text{ m} - 7,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
- Radiațiile vizibile $\rightarrow \lambda = 7,8 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
- Radiațiile ultraviolete $\rightarrow \lambda = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- Radiațiile X (Röntgen) $\rightarrow \lambda = 10^{-10} \text{ m} - 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$
- Radiațiile γ $\rightarrow \lambda = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m} - 10^{-13} \text{ m}$



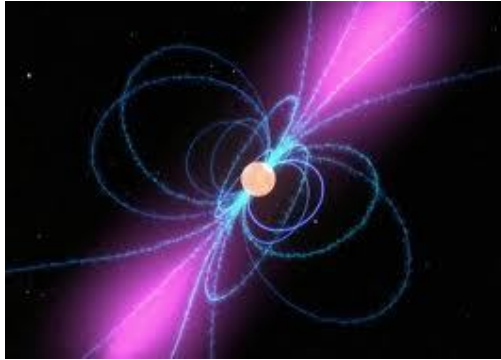
<http://epiccollection.freeoda.com/images/image026.jpg>



<http://epiccollection.freeoda.com/images/image031.jpg>
<http://epiccollection.freeoda.com/images/image029.jpg>



<http://epiccollection.freeoda.com/images/image035.jpg>
<http://epiccollection.freeoda.com/images/image033.jpg>



<http://epiccollection.freeoda.com/images/image036.jpg>

TOPICUL 2

Producerea undelor electromagnetice. Circuitul oscilant deschis.



Oscilațiile electromagnetice din circuitul prezentat în figura 15.1 sunt localizate în circuit. Un astfel de circuit oscilant nu pierde energia sa în mediul înconjurător. Pentru a da posibilitatea ca energia electromagnetică din circuit să părăsească circuitul și să se propage în spațiu înconjurător este necesar să deschidem circuitul oscilant așa cum se vede în figura 15.1.

*Energia oscilațiilor electromagnetice produse în circuitul oscilant deschis se propagă sub forma de **perturbații electromagnetice** în mediul înconjurător.*

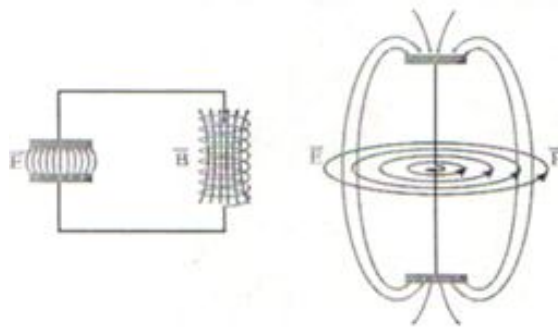


Fig. 15.1. Circuitul oscilant închis și circuitul oscilant deschis.

În fiecare punct din spațiul ce înconjoară un circuit oscilant deschis se poate detecta un câmp electric și un câmp magnetic variabil în timp. Între cele două câmpuri există un defazaj de un sfert de perioadă, $T/4$ în timp și un defazaj de o jumătate de lungime de undă, $\lambda/4$ în spațiu. Din aceste constatări putem trage următoarele concluzii: i) La distanțe mici de dipole liniile câmpului electric pleacă de pe sarcina pozitivă a dipolului și se termină pe sarcina negativă.

La distanțe mari de dipol liniile câmpului electric sunt închise și s-au detașat de dipol; ii) Câmpurile \vec{E} și \vec{B} sunt perpendiculare unul pe celălalt și amândouă sunt perpendiculare pe direcția de propagare a câmpului electromagnetic; iii) Fronturile de undă ale perturbației electromagnetice sunt aproximativ suprafețe sferice centrate pe dipolul oscilant, iar la distanțe foarte mari de dipol devin plane; iv) Perturbația electromagnetică este simetrică față de axa dipolului și nu se propagă în direcția axei dipolului; v) Câmpul electric și magnetic generat de dipol oscilant sunt câmpuri variabile în timp [20,39].

EXEMPLU ILUSTRATIV 2



A. Ecuația undei plane sinusoidale

Să considerăm o undă electromagnetică care se propagă în direcția Ox care își are sursa în punctul O. Câmpurile electric și magnetic într-un punct A de pe axa Ox sunt, $E(x,0,0,t)$ și respectiv $B(x,0,0,t)$ Dacă t' este

timpul necesar pentru unda electromagnetică să se propage de la sursa (O) până în punctul A atunci:

$$x = c \cdot t' \quad (15.1)$$

Perturbația care ajunge în punctul A la momentul de timp, t este aceea care a plecat de la sursă la momentul de timp $t - t'$. Atunci valorile instantanee ale câmpurilor electric și magnetic în punctul A la momentul de timp t sunt:

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, t) &= \vec{E}_m \cdot \sin[\omega(t - t')] \\ \vec{B}(x, t) &= \vec{B}_m \cdot \sin[\omega(t - t')] \end{aligned} \quad (15.2)$$

sau înlocuind timpul de propagare a undei:

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, t) &= \vec{E}_m \cdot \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] \\ \vec{B}(x, t) &= \vec{B}_m \cdot \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] \end{aligned} \quad (15.3)$$

pentru distanțe relativ mari de sursa de oscilație. Folosindu-ne de binecunoscutele relații:

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \\ \lambda &= \frac{c}{\nu} = cT \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \end{aligned} \quad (15.4)$$

ecuațiile (15.3) se pot rescrie ca:

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, t) &= \vec{E}_m \cdot \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] \\ \vec{B}(x, t) &= \vec{B}_m \cdot \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] \end{aligned} \quad (15.5)$$

sau

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, t) &= \vec{E}_m \cdot \sin[\omega t - kx] \\ \vec{B}(x, t) &= \vec{B}_m \cdot \sin[\omega t - kx] \end{aligned} \quad (15.6)$$

$$k = k \cdot \vec{n}$$

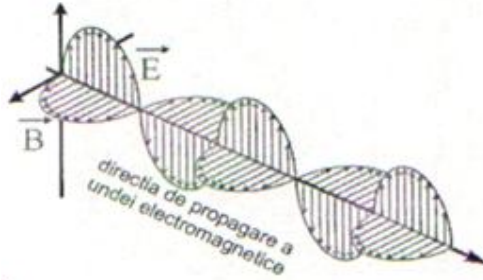


Fig. 15.2. Orientarea relativă a câmpului electric și magnetic într-o undă electromagnetică.

sau pentru o direcție arbitrară de propagare descrisă de vectorul de undă și care se află la distanța \vec{r} de sursă, avem:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, t) &= \vec{E}_m \cdot \sin[\omega t - k\vec{r}] \\ \vec{B}(x, t) &= \vec{B}_m \cdot \sin[\omega t - k\vec{r}]\end{aligned}\quad (15.7)$$

B. Ecuația de propagare a undelor electromagnetice

Ecuațiile (15.7) sunt soluțiile unei ecuații diferențiale de ordin doi care poartă numele de ecuația de propagare a undelor electromagnetice și care are aceeași formă generală cu oricare undă mecanică. Pentru a stabili această ecuație vom calcula derivata de ordin doi a câmpului electric în raport cu timpul și în raport cu spațiul:

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial t} = \omega E_m \cos(\omega t - kx) \frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial t^2} = -\omega^2 E_m \sin(\omega t - kx) \quad (15.8)$$

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial t} = -k E_m \cos(\omega t - kx) \frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial x^2} = -k^2 E_m \sin(\omega t - kx) \quad (15.9)$$

dar din ecuațiile (15.4) că $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$ se obține:

$$\frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial t^2} \quad (15.10)$$

care împreună cu ecuația pentru câmpul magnetic:

$$\frac{\partial^2 B(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B(x,t)}{\partial t^2} \quad (15.11)$$

formează ecuațiile de propagare a câmpului electromagnetic.

C. Viteza de propagare a undelor

Scopul nostru este să determinăm relația dintre vectorii \vec{E} și \vec{B} din undele

Electromagnetice și viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid pentru a satisface ecuațiile lui Maxwell. Fără a pierde din generalitate putem considera că $\vec{B}(0,0,B_z)$ Legea lui Ampère forma diferențială este:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (15.12)$$

Dacă suntem departe de sursa de oscilație atunci putem considera că câmpul electromagnetic se generează deja din aproape în aproape și deci sursele pot să fie neglijate:

$$I = 0 \Rightarrow j = 0 \quad (15.13)$$

Legea lui Ampère forma diferențială fără surse este:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (15.14)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (15.15)$$

aplicând rotorul asupra ecuației (15.15) obținem:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \nabla \times \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{(\nabla \times \nabla \times \vec{E})}{\nabla t} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (15.16)$$

Rotorul câmpului magnetic \vec{B} este:

$$\nabla \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & B_z \end{vmatrix} = \frac{\partial B_z}{\partial y} \cdot \vec{i} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial B_z}{\partial x} \cdot \vec{j} \quad (15.17)$$

Prin aplicarea a doua oară a rotorului obținem:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & -\frac{\partial B_z}{\partial x} & 0 \end{vmatrix} = \frac{\partial^2 B_z}{\partial x \partial z} \cdot \vec{i} - \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \cdot \vec{k} = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \cdot \vec{k} \quad (15.18)$$

de unde se poate scrie că:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = -\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \cdot \vec{k} = -\nabla^2 \vec{B} \quad (15.19)$$

Prin combinarea ecuațiilor (15.16) și (15.19) se obține:

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (15.20)$$

care combină cu ecuația (15.11) observăm că:

$$\mu_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{c^2} \quad (15.21)$$

sau:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 2.9979246 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (15.22)$$

care este viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid.

Definiție: Undele electromagnetice se propagă în vid cu viteza cu care se propagă lumina în vid.

Lumina este de natură electromagnetică, și poate fi considerată ca o suprapunere de unde electromagnetice cu lungimi de undă cuprinse într-un interval determinat.

Ținând cont de ecuațiile (15.7) și (15.17) se obține:

$$\nabla \times \vec{B} = -\frac{\partial B_z}{\partial x} \cdot \vec{j} = \frac{\omega}{c} B_{z,m} \cos(\omega t - kx) \cdot \vec{j} \quad (15.23)$$

și

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial t} = \omega \vec{E}_m \cos(\omega t - kx) \quad (15.24)$$

și considerând legea lui Ampere:

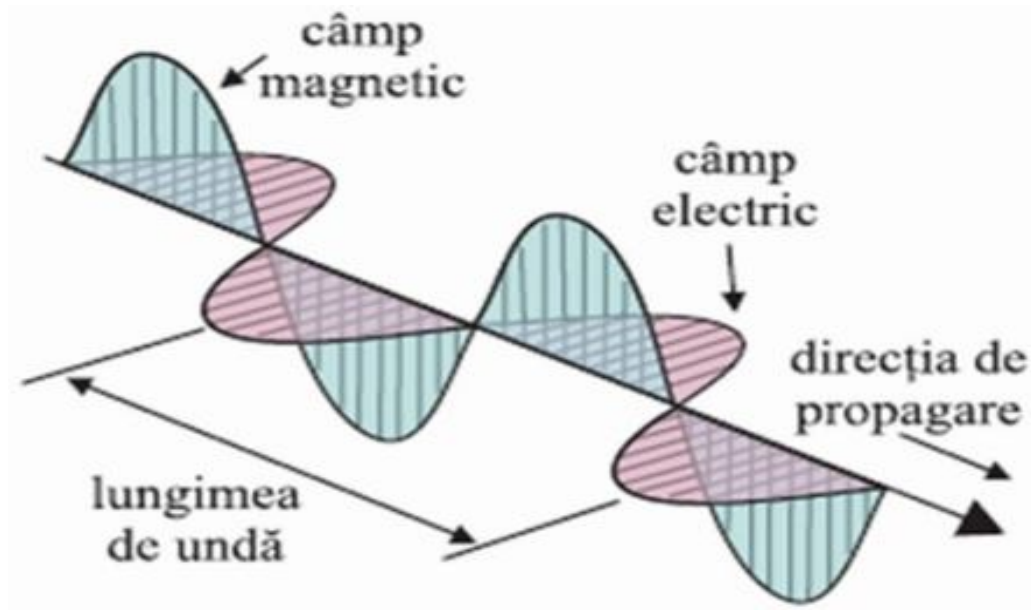
$$\frac{\omega}{c} B_{z,m} \vec{j} = \frac{1}{c^2} \vec{E}_m \quad (15.25)$$

de unde se pot trage două concluzii. Prima dintre ele este aceea că dacă unda electromagnetică se propagă în direcția x iar câmpul magnetic

oscilează în direcția z atunci câmpul electric este orientat în direcția y .

Deci câmpurile \vec{E} și \vec{B} sunt perpendiculare unul pe celălalt și amândouă sunt perpendiculare pe direcția de propagare a câmpului electromagnetic. Această concluzie este legată de valorile maxime ale câmpurilor electrice și magnetice:

$$E_m = c \cdot B_m \quad (15.26)$$



<http://epiccollection.freeoda.com/images/image124.jpg>

TOPICUL 3

1. Energia câmpului electric.
2. Energia câmpului magnetic.



1. Energia câmpului electric

Pentru a încărca un conductor care are capacitatea C cu sarcina electrică, Q trebuie cheltuită o anumită energie electrică, W , sub formă de lucru mecanic necesar pentru a aduce o sarcină electrică de la infinit pe conductor:

$$dL = dq \cdot (V - V_\infty) \quad (15.27)$$

Dacă considerăm că potențialul electric la infinit $V_\infty = 0$ atunci lucrul mecanic devine:

$$dL = dq \cdot V \quad (15.28)$$

și ținând cont că sarcina electrică cu care se încărca un corp este dată de produsul dintre potențialul electric și capacitatea acestuia atunci:

$$q = C \cdot V \quad (15.29)$$

lucrul mecanic elementar devine:

$$dL = \frac{q \cdot dq}{C} \quad (15.30)$$

prin integrare se obține:

$$L = \int_0^L dL' = \int_0^Q \frac{q \cdot dq}{C} = \frac{Q^2}{2C} \quad (15.31)$$

Lucrul mecanic se înmagazinează sub formă de energie electrică potențială a conductorului încărcat:

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CV^2}{2} = \frac{QV}{2} \quad (15.32)$$

Se poate pune întrebare unde este localizată această energie?

CONCLUZIE

Energia câmpului electrostatic

Capacitatea condensatorului plan se poate exprima ca fiind:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (15.33)$$

iar diferența de potențial este dată de:

$$U = V_1 - V_2 = E \cdot d \quad (15.34)$$

iar energia conform ecuației (15.32):

$$W = \frac{C(V_1 - V_2)^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d} \cdot E^2 \cdot d^2 = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot Sd \quad (15.35)$$

unde $S \cdot d = V$ este volumul spațiului dintre plăcile condensatorului. Se poate defini mărimea fizică numită densitatea de energie, valabilă pentru orice tip de conductor ca fiind raportul dintre energia înmagazinată în acel conductor și volumul spațiului unde este înmagazinată acea energie:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \quad (15.36)$$

Definiție: Densitatea de energie a câmpului electrostatic, care este energia unui corp încărcat cu sarcină electrică pe unitatea de volum și care se înmagazinează în câmpul generat de sarcina electrică a corpului este proporțională cu pătratul intensității câmpului electric.

2. Energia câmpului magnetic

Câmpul magnetic este legat inseparabil de curentul electric, apare, se modifică și dispare împreună cu acesta [31]. O parte din energia curentului electric se cheltuiește pentru generarea câmpului magnetic.

Enunț: Câmpul magnetic trebuie să posede o energie, egală cu lucrul mecanic cheltuit de curent pentru producerea lui.

Lucrul mecanic efectuat de curentul I pentru a crește fluxul câmpului magnetic este:

$$dL = I \cdot d\Phi = I \cdot L \cdot dl \quad (15.37)$$

pentru a obține întregul lucru mecanic trebuie să integrăm:

$$L = \int_0^L dl' = \int_0^L I \cdot l' \cdot dl' = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (15.38)$$

deci energia este dată de:

$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (15.39)$$

În cazul unui circuit care conține o bobină solenoidală aproape tot câmpul magnetic generat de curentul electric este înmagazinat în volumul din interiorul bobinei. Inducția magnetică a unei astfel de bobine este:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} \cdot I \quad (15.40)$$

de unde:

$$I = \frac{B \cdot l}{\mu_0 N} \quad (15.41)$$

Atunci energia magnetică este:

$$W_m = \frac{l \mu_0 N^2 S}{2} \frac{B^2 I^2}{\mu_0^2 N^2} = \frac{l B^2}{2 \mu_0} S l = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} V \quad (15.42)$$

atunci densitatea de energie magnetică devine:

$$w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (15.43)$$

CONCLUZIE

Definiție: Densitatea de energie înmagazinată în câmpul magnetic este direct proporțională cu pătratul valorii câmpului magnetic B și invers proporțională cu permeabilitatea magnetică a mediului.

EXEMPLU ILUSTRATIV 3:



Energia undelor electromagnetice

Unda electromagnetică reprezintă suprapunerea oscilațiilor câmpului electric cu cele ale câmpului magnetic, care se propagă în spațiu.

Definiție: Energia undei electromagnetice este egală cu suma dintre energia înmagazinată în câmpul electric și energia înmagazinată în câmpul magnetic.

Densitatea de energie înmagazinată în câmpul electromagnetic este:

$$W_{em} = W_e + W_m = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (15.44)$$

unde ținând cont și de relația dintre câmpul electric și cel magnetic dat de ecuația (15.26), obținem:

Definiție: Densitatea de energie înmagazinată în câmpul electromagnetic este direct proporțională cu pătratul câmpului electric (sau cu pătratul câmpului magnetic).

$$W_{em} = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} \quad (15.45)$$

Intensitatea undelor electromagnetice

Definiție: Intensitatea undelor electromagnetice reprezintă energia electromagnetică ce străbate în unitatea de timp unitatea de arie orientată normal pe direcția de propagare a undelor.

$$I = \frac{1}{S} \frac{dW}{dt} = \frac{1}{S} \frac{d(w_{em}V)}{dt} = \frac{1}{S} w_{em} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{S} w_{em} \frac{d(S \cdot ct)}{dt} = c \cdot w_{em} \quad (15.46)$$

de unde:

$$I = c \cdot w_{em} = c \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \quad (15.47)$$

Intensitatea unei undei electromagnetice este direct proporțională cu pătratul câmpului electric (sau cu pătratul câmpului magnetic).

Vectorul Poynting

Definiție: Vectorul Poynting este vectorul orientat în direcția și sensul de propagare a undelor electromagnetice și are modulul egal cu intensitatea undei.

Direcția și sensul de propagare a undei este dat de produsul vectorial $\vec{E} \times \vec{B}$.

Considerând și ecuația (15.26) avem:

$$|\vec{P}| = I = c \cdot \epsilon_0 \cdot E \cdot c \cdot B = c^2 \cdot \epsilon_0 \cdot E \cdot B \quad (15.48)$$

ținând cont și de faptul că cele două câmpuri electric și magnetic sunt perpendiculare $\vec{E} \perp \vec{B}$ se poate exprima vectorul Poynting ca fiind:

$$\vec{P} = c^2 \epsilon_0 \cdot (\vec{E} \times \vec{B}) \quad (15.49)$$

Impulsul undelor electromagnetice

Energia și impulsul materiei în mișcare (substanță sau câmp) sunt mărimi strâns legate între ele [40,44]. Undele electromagnetice se propagă în vid cu viteza luminii, deci, toate mărimile care le caracterizează trebuie să fie exprimate ținând cont de expresiile lor date de teoria relativității:

$$E = m \cdot c^2$$

$$\rho = m \cdot c = \frac{E}{c} \quad (15.50)$$

de unde expresia impulsului undelor electromagnetice din unitatea de volum în funcție de densitatea de energie și de câmpurile \vec{E} și \vec{B} se poate scrie ca:

$$\rho = \frac{W_{em}}{c} = \frac{\epsilon_0 E^2}{c} = \epsilon_0 \cdot |\vec{E} \times \vec{B}| \quad (15.51)$$

sau sub formă vectorială:

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{P}}{c^2} = \epsilon_0 \cdot (\vec{E} \times \vec{B}) \quad (15.52)$$

Datorită faptului că au impuls, undele electromagnetice exercită o presiune asupra suprafețelor pe care cad. De exemplu presiunea luminii a fost pusă în evidență pe cale experimentală.



<http://epiccollection.freeoda.com/images/image200.jpg>
<http://epiccollection.freeoda.com/images/image199.jpg>

TEST DE AUTOEVALUARE



Încercuiți răspunsurile corecte la următoarele întrebări.

ATENȚIE: pot exista unul, niciunul sau mai multe răspunsuri corecte la aceeași întrebare.

Timp de lucru: 10 minute

1. Ansamblul câmpurilor electric și magnetic, care oscilează și se regenerează reciproc, se numește:
 - a) câmp electromagnetic
 - b) câmp electric
 - c) câmp magnetic
2. Ecuația de propagare a undelor electromagnetice reprezintă:
 - a) un circuit oscilant deschis
 - b) energia câmpului electromagnetic
 - c) vectorul Poynting
 - d) impulsul undelor electromagnetice
3. Undele electromagnetice se propagă:
 - a) în vid
 - b) cu viteza cu care se propagă lumina în vid
 - c) ambele, adică a) și b)
4. Câmpurile electric și magnetic sunt:
 - a) perpendiculare unul pe celălalt
 - b) perpendiculare pe direcția de propagare a câmpului electromagnetic

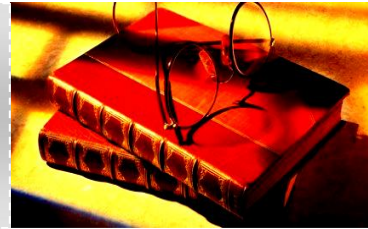
5. Energia câmpului electrostatic este dată de ecuația:

- a) $U = E \cdot d$
- b) $W = 1/2 \cdot \epsilon_0 E^2 Sd$
- c) $C = S/d$
- d) $w = W/V$

Grila de evaluare:

1.-a; 2.-niciunul; 3.-c; 4.-a,b; 5.-b.

REZUMAT



- **În TOPICUL 1** am definit câmpul electromagnetic și undele electromagnetice.

Ansamblul câmpurilor electric și magnetic, care oscilează și se regenerează reciproc, se numește câmp electromagnetic.

Câmpul electromagnetic care se propagă în spațiu constituie o undă electromagnetică.

De asemenea s-a făcut o clasificare a undelor electromagnetice după lungimea de undă.

- **În TOPICUL 2** am prezentat fenomenul de producere a undelor electromagnetice. Am definit circuitul oscilant deschis. Am dedus și stabilit ecuația undei plane sinusoidale, ecuația de propagare a undei electromagnetice. Am definit viteza de propagare a undelor.

Energia oscilațiilor electromagnetice produse în circuitul oscilant deschis se propagă sub forma de perturbații electromagnetice în mediul înconjurător.

Câmpul electric și magnetic generat de dipol oscilant sunt câmpuri variabile în timp.

- În **TOPICUL 3** am definit și prezentat energia câmpului electric, energia câmpului magnetic, energia și impulsul undelor electromagnetice.

Densitatea de energie a câmpului electrostatic, care este energia unui corp încărcat cu sarcină electrică pe unitatea de volum și care se înmagazinează în câmpul generat de sarcina electrică a corpului este proporțională cu pătratul intensității câmpului electric.

Câmpul magnetic trebuie să posede o energie, egală cu lucrul mecanic cheltuit de curent pentru producerea lui.

Densitatea de energie înmagazinată în câmpul magnetic este direct proporțională cu pătratul valorii câmpului magnetic B și invers proporțională cu permeabilitatea magnetică a mediului.

Energia unei electromagnetice este egală cu suma dintre energia înmagazinată în câmpul electric și energia înmagazinată în câmpul magnetic.

Intensitatea undelor electromagnetice reprezintă energia electromagnetică ce străbate în unitatea de timp unitatea de arie orientată normal pe direcția de propagare a undelor.

Vectorul Poynting este vectorul orientat în direcția și sensul de propagare a undelor electromagnetice și are modulul egal cu intensitatea unei.



REZULTATE AȘTEPTATE

După studierea acestui curs ar trebui să conștientizați importanța undelor electromagnetice în domeniul ingineresc, precum și însușirea principalelor fenomene, ecuații și mărimi ce descriu și caracterizează undele electromagnetice.



**TERMENI
ESEȚIALI**

Câmpul electromagnetic este ansamblul câmpului electric și magnetic care oscilează și se regenerează reciproc.

Câmpurile electrice și magnetice din apropierea dipolului oscilant se numesc câmpuri electrice și magnetice primare.

Câmpurile electrice și magnetice în punctele depărtate de dipolul oscilant se numesc câmpuri electrice și magnetice secundare.

Perturbații electromagnetice.

Ecuția undei plane sinusoidale.

Ecuția de propagare a undelor electromagnetice.

Viteza de propagare a undelor.

Energia câmpului electric.

Energia câmpului magnetic.

Energia undelor electromagnetice.

Clasificarea undelor electromagnetice.

RECOMANDĂRI BIBLIOGRAFICE SUPLIMENTARE

- Ardelean I., Fizică pentru ingineri, Editura U.T.PRESS, Cluj-Napoca, 2006;
- Biro D., Prelegeri „Curs de Fizică generală” (format electronic, CD, revizuit), Universitatea „Petru Maior”, Tîrgu-Mureş, 2006;
- Berkeley, Cursul de fizică - Electricitate și Magnetism (Vol. 2), Editura Didactică și pedagogică, Bucureşti, 1982;
- Berkeley, Cursul de fizică - Mecanică (Vol.1), Editura Didactică și Pedagogică, Bucureşti, 1981;
- Fechete R., Elemente de fizică pentru ingineri, Editura U.T.PRESS, Cluj Napoca, 2008;
- Feynmann R.P., Leighton R. B., Sands M., Fizica modernă, Vol. I - III. Editura Tehnică, Bucureşti, 1970;
- Gîju S., Băţagă E., Lucrări de laborator - Fizică. Editura - Universitatea „Petru Maior”, Tîrgu-Mureş, 1991;
- Gîju S., Teorie și Probleme, Editura Universitatea. „Petru Maior”, Tîrgu-Mureş, 2001;
- Gîju S., Curs de Fenomene termice și electromagnetice, Editura Universitatea „Petru Maior”, Tîrgu-Mureş, 2003;
- Halliday D., Resnick R., Fizica, vol. I și II. Editura Didactică și Pedagogică, Bucureşti, 1975;
- Hudson A., Nelson R., University Physics, Second Edition, Saunders College Publishing, New York, 1990;
- Modrea A., Lucrări de laborator” (format electronic), Universitatea „Petru Maior”, Tîrgu-Mureş, 2006;
- Modrea A., Curs de Fizică generală”(format electronic), Universitatea „Petru Maior”, Tîrgu-Mureş, 2006;
- Oros C., Fizică generală-format electronic, Universitatea „Valahia”, Târgoviște, 2008;
- Serway R. A., Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Second Edition, Saunders College Publishing, New York, 1986.

TEST DE EVALUARE



Încercuiți răspunsurile corecte la următoarele întrebări.

ATENȚIE: pot exista unul, niciunul sau mai multe răspunsuri corecte la aceeași întrebare.

Timp de lucru :15 minute

1. Câmpurile electrice și magnetice din apropierea dipolului oscilant se numesc:

- a) câmpuri electrice primare
- b) câmpuri magnetice primare

2. Câmpurile electrice și magnetice în punctele depărtate de dipolul oscilant se numesc:

- a) câmpuri electrice secundare
- b) câmpuri magnetice secundare

3. O undă electromagnetică reprezintă:

- a) un fenomen electric
- b) un fenomen magnetic
- c) un câmp electromagnetic
- d) o ecuație

4. Lumina poate fi considerată ca o:

- a) viteză de propagare
- b) proprietate a câmpului electric
- c) suprapunere de unde electromagnetice

5. Intensitatea undei electromagnetice este direct proporțională:

- a) cu pătratul câmpului electric
- b) cu pătratul câmpului magnetic
- c) ambele

Grila de evaluare:

1.-a,b; 2.-a,b; 3.-niciunul; 4.-c; 5.-c.