

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Curentul electric

Mișcarea ordonată a sarcinilor electrice se numește **curent electric**. În mod convențional se atribuie curentului electric un sens, cel în care se mișcă sarcinile pozitive (contrar celui în care se mișcă electronii) în câmpul aplicat. Se numește **intensitate a curentului electric** sau **curent mărimea**:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

dq este sarcina electrică ce străbate în timpul dt o secțiune normală a conductorului.
În cazul unui curent continuu :

$$I = \frac{q}{t}$$

Distribuția curentului electric printr-o secțiune a unui conductor este caracterizată prin **vectorul densitate de curent** :

$$\vec{j} \quad j = \frac{dI}{dS_n} \quad I = \int \vec{j} d\vec{S}$$

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Curentul electric

În SI, curentul se măsoară în **amper**, A, densitatea de curent se măsoară în A/m².

Legea lui Ohm: Pentru conductorii metalici, aflați la temperatură constantă, experiența arată că raportul dintre diferența de potențial aplicată la capetele unui conductor și intensitatea curentului care îl străbate este constant, egal cu rezistența conductorului:

$$\frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{U}{I} = R$$

Rezistența conductorului depinde de natura materialului și de dimensiunile conductorului. Astfel, pentru un conductor cilindric de lungime l , și arie a secțiunii transversale S *rezistența este:*

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$[R]_{\text{SI}} = 1\Omega$$

În SI rezistența electrică se măsoară în *ohm*, $1\Omega = 1\text{V}/1\text{A}$

ρ - **rezistivitatea** materialului conductorului

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Curentul electric

Rezistivitatea electrică a metalelor variază cu temperatura dar pentru un domeniu de temperatură nu prea extins (0-100 °C) variația este liniară:

$$\rho = \rho_o [1 + \alpha (T - T_o)]$$

În SI rezistivitatea se măsoară în Ωm .

Formularea locală a legii lui Ohm: *pentru materialele cu rezistivitate constantă densitatea de curent într-un punct este proporțională cu intensitatea câmpului electric din acel punct:*

Conductivitatea materialului:

$$\sigma = 1 / \rho$$

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$$

Mărimea fizică egală cu lucrul mecanic efectuat de forțele imprimare pentru deplasarea unității de sarcină pozitivă prin circuit (sau porțiune de circuit) se numește **tensiune electromotoare** (t.e.m.):

$$\mathcal{E} = \frac{L}{q}$$

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Curentul electric

Unitatea de măsură în SI pentru t.e.m. este voltul, 1V.

Mărimea fizică egală cu raportul dintre lucrul mecanic efectuat de toate forțele (imprimare și electrice) pentru deplasarea unei sarcini pe o porțiune de circuit și acea sarcină se numește (cădere de) tensiune :

$$U_{AB} = \frac{L_{AB}}{q} = \mathcal{E}_{AB} + V_A - V_B$$

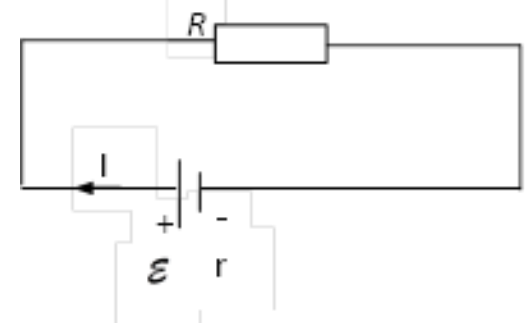
De-a lungul unui circuit închis caracterizat prin rezistența R a circuitului exterior și rezistența r a circuitului interior (a sursei) se obține **legea lui Ohm** pentru întreg circuitul:

$$RI + rI = \mathcal{E}$$

$$W = Uq = UI t$$

Energia curentului electric:

În cazul când consumatorul este un rezistor: $W = RI^2 t = \frac{U^2}{R} t$



CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Câmpul magnetic se manifestă prin acțiunea pe care o exercită asupra:

- *sarcinilor electrice în mișcare*
- *conductorilor parcurși de curent*
- *magneților permanenți.*

*Câmpului magnetic se caracterizează printr-o mărime vectorială numită **inducție magnetică**, \vec{B}*

În SI, inducția magnetică se măsoară în tesla, T: 1T este inducția magnetică a unui câmp magnetic uniform care acționează cu o forță de 1N asupra fiecărui m de lungime a unui conductor liniar parcurs de un curent de 1A, situat perpendicular pe liniile de câmp.

*Dacă o particulă cu sarcina electrică q se mișcă cu viteza \vec{v} într-un câmp magnetic de inducție \vec{B} asupra ei acționează **forța Lorentz**:*

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

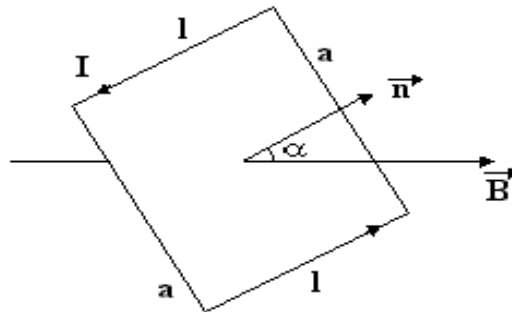
■ Câmpul magnetic

*Intr-un conductor parcurs de curent electric, sarcinile electrice au o mișcare ordonată, astfel că asupra fiecăreia acționează o forță de tip Lorentz, iar asupra conductorului în ansamblul său rezultă **forța electromagnetice**:*

$$\vec{F}_m = I\vec{l} \times \vec{B}$$

\vec{l} este un vector de mărime egală cu lungimea conductorului aflat în câmp magnetic, orientat în sensul curentului electric.

Să considerăm un cadru dreptunghiular, parcurs de un curent I , aflat într-un câmp magnetic uniform cu inducția \vec{B} care face unghiul α cu normala la cadru.



CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

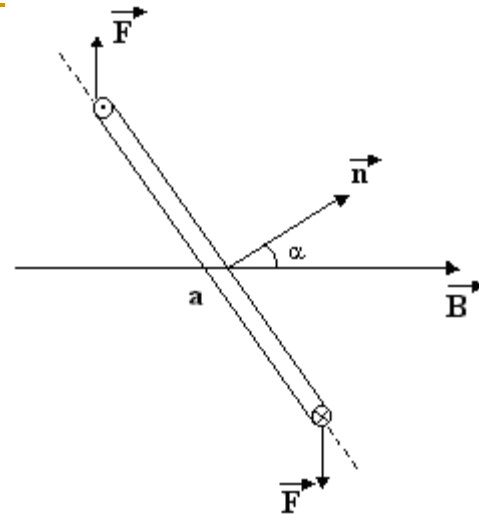
Asupra cadrului acționează un cuplu de forțe al cărui moment este:

$$\vec{\mathcal{M}} = IS\vec{n} \times \vec{B} = I\vec{S} \times \vec{B} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

$\vec{p}_m = I\vec{S}$ reprezintă *momentul magnetic* al cadrului.

$$\mathcal{M} = ISB \sin \alpha$$

Sensul vectorului moment magnetic se obține cu regula burghiului: rotind burghiul, așezat perpendicular pe cadru, în sensul curentului el înaintează în sensul momentului magnetic.



CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Sursele câmpului magnetic. Câmpul magnetic este creat de sarcini electrice în mișcare, respectiv de curenți electrice (cum s-a arătat mai sus, tocmai asupra acestora acționează cu forțe), câmpul creat de magneții permanenți având aceeași origine dacă se ține seama de structura lor microscopică.

Experiențele de până acum nu au putut pune în evidență sarcini magnetice, care să fie surse ale câmpului magnetic!

Teorema lui Gauss : *fluxul inducției magnetice prin orice suprafață închisă este zero:* $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$

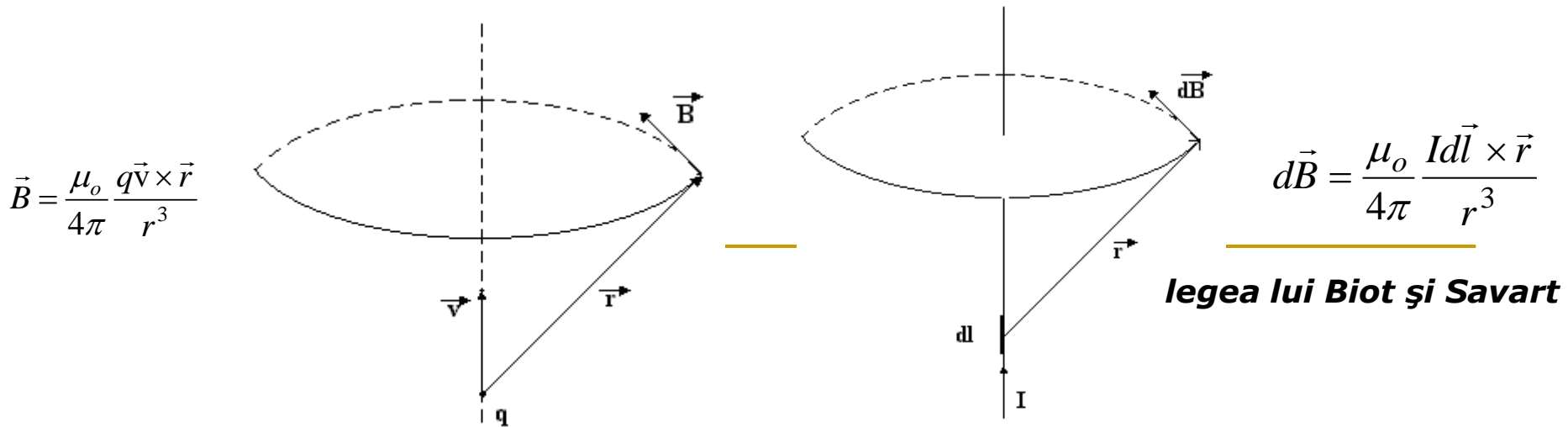
În SI fluxul magnetic, $\Phi_m = \int \vec{B} d\vec{S}$ $[\Phi]_{SI} = 1\text{Wb}$

Câmpul magnetic creat de o sarcină electrică punctiformă q :

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^3}$$

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic



$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A este permeabilitatea magnetică a vidului.

Liniile câmpului magnetic sunt cercuri în plane perpendiculare pe direcția de mișcare a sarcinii, cu centrul pe această direcție, având sensul dat de regula burghiului.

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Aplicarea **legii lui Biot și Savart** pentru câteva cazuri particulare:

- inducția creată de un conductor rectiliniu, infinit de lung, parcurs de curentul I la distanța r de conductor:

$$B = \mu_o \frac{I}{2\pi r}$$

- inducția magnetică creată în centrul unei spire circulare de rază r parcurs de curentul I :

$$B = \mu_o \frac{I}{2r}$$

- inducția magnetică creată pe axa unui solenoid cu N spire de lungime l mare în comparație cu diametrul spirelor, parcurs de curentul I :

$$B = \mu_o \frac{NI}{l}$$

În interiorul solenoidului câmpul magnetic este uniform (aceleași valori în toate punctele), iar liniile de câmp sunt paralele cu axa solenoidului.

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

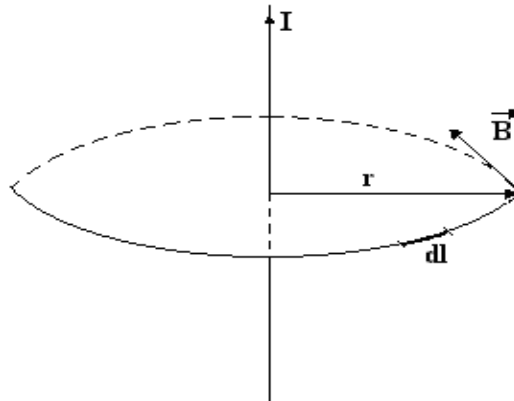
Legea lui Ampere. Curentul de deplasare.

Să considerăm câmpul magnetic produs de un conductor rectiliniu, infinit de lung, parcurs de un curent electric.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_o I$$

Enunț: integrala de-a lungul unei curbe închise a produsului $\vec{B} d\vec{l}$

este egală cu permeabilitatea magnetică a vidului înmulțită cu intensitatea curentului ce trece prin suprafața delimitată de conturul închis.



CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Inducția electromagnetică: apariția unei tensiuni electromotoare într-un circuit străbătut de un flux magnetic variabil în timp.

Legea inducției electromagnetice (Faraday): tensiunea electromotoare indusă într-un circuit este egală cu viteza de variație a fluxului magnetic prin suprafața aceluia circuit, luată cu semn schimbat:

$$E = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Regula lui Lenz: tensiunea electromotoare indusă și curentul indus au un astfel de sens, încât fluxul magnetic produs de curentul indus să se opună variației fluxului magnetic inductor.

În cazul mișcării unui conductor într-un câmp magnetic, perpendicular pe liniile câmpului magnetic, putem explica apariția t.e.m. induse prin acțiunea forței magnetice Lorentz :

$$E = Blv$$

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Curentul electric dintr-un circuit crează un câmp magnetic proporțional cu intensitatea curentului , care produce prin suprafața circuitului un flux magnetic, de asemenea proporțional cu curentul: $\Phi_m = LI$

L-inductanța circuitului

Pentru un solenoid inductanța are expresia: $L = \mu \frac{N^2 S}{l}$

Unitatea de inductanță în SI se numește *henry*, H: 1H=1Wb/1m2.

Autoinducția: *Tensiunea autoindusă într-un circuit este direct proporțională cu viteza de variație a curentului din acel circuit:*

$$E = -L \frac{dI}{dt}$$

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Energia câmpului magnetic

$$dW = Uid t = L \frac{di}{dt} i dt = L i di$$

$$W = L \int_0^I i di = \frac{1}{2} L I^2$$

Densitatea de energie a câmpului magnetic : $w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$

Magnetizație a unui material este mărimea fizică egală cu momentul magnetic al unității de volum : $\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m}{V}$

În SI magnetizația se măsoară în A/m.

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Dacă un material este plasat într-un câmp magnetic (extern) cu inducția \vec{B}_o atunci în interiorul materialului inducția va fi: $\vec{B} = \vec{B}_o + \mu_o \vec{M}$

Intensitatea câmpului magnetic:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_o}{\mu_o} = \frac{\vec{B} - \mu_o \vec{M}}{\mu_o}$$

În SI intensitatea câmpului magnetic se măsoară în A/m.

Pentru o mare clasă de substanțe magnetizația este proporțională cu intensitatea câmpului magnetic: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

χ_m **susceptivitate magnetică** este o caracteristică de material

$\mu_r = 1 + \chi_m$ -permeabilitatea magnetică relativă

$\mu = \mu_o \mu_r$ -permeabilitatea magnetică absolută

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

■ Câmpul magnetic

Substanțele **paramagnetice** au susceptivitatea magnetică pozitivă; au permeabilitatea magnetică relativă mai mare ca unitatea ("întăresc" câmpul).

Substanțele **diamagnetice** au susceptivitatea negativă; permeabilitatea relativă este subunitară ("slăbesc câmpul").

Substanțele **feromagnetice** au susceptivitatea mult mai mare ca zero dependentă de câmpul aplicat.

Teorema lui Ampere poate fi scrisă cu ajutorul intensității câmpului magnetic:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = i$$

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

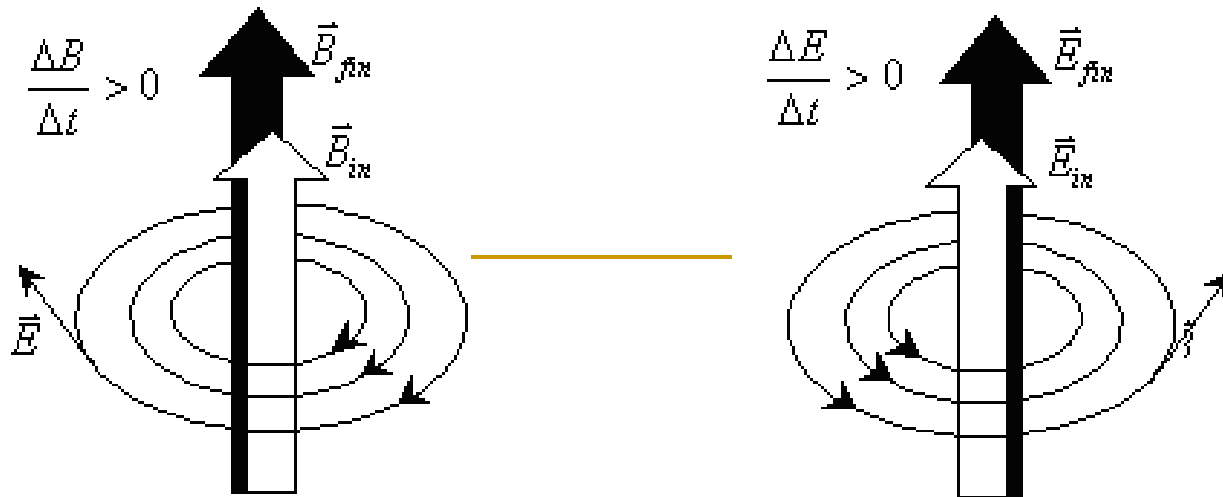
Generalizarea legilor experimentale ale fenomenelor electrice și magnetice, au evidențiat faptul că:

-în jurul unui câmp magnetic variabil în timp ia naștere un câmp electric ale cărui linii sunt închise;

- în jurul unui câmp electric variabil în timp ia naștere un câmp magnetic ale cărui linii sunt închise.

Ansamblul câmpurilor electric și magnetic, variabile în timp, care se generează reciproc, constituie un câmp electromagnetic.

CÂMPUL ELECTROMAGNETIC



Câmpul electromagnetic este un proces oscilatoriu care se propagă din aproape în aproape, având o variație spațio-temporală.

Câmpul electromagnetic se propagă în spațiu sub forma undelor electromagnetice.

Unde electromagnetice

O perturbație a câmpului electromagnetic (adică, în ultimă instanță, modificarea în timp a vectorilor de câmp) se propagă în mediul ambient cu o viteză finită v , sub formă de *unde electromagnetice*.

Pentru a deduce proprietățile specifice ale undelor electromagnetice, din punct de vedere practic, ne interesează să studiem (să măsurăm) câmpul electromagnetic într-un spațiu lipsit de surse de câmp, adică de densități de sarcini $\rho = 0$ și densități de curent $\vec{j} = 0$

precum și în medii omogene și izotrope, deci unde vectorii inducție sunt coliniari cu vectorii intensitate.

În aceste condiții, ecuațiile lui Maxwell se simplifică în felul următor :

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \qquad \nabla \times \vec{H} = -\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \vec{H} = 0 \qquad \nabla \vec{E} = 0$$

VI Unde electromagnetice

Se obțin două ecuații matematic identice pentru vectorii intensitate a câmpului electromagnetic:

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \qquad \Delta \vec{H} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

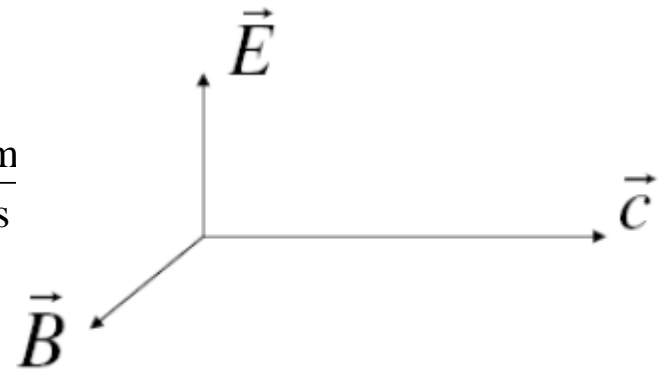
unde v este viteza de propagare a undelor electromagnetice într-un mediu oarecare cu permitivitatea dielectrică $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ și permeabilitatea magnetică $\mu = \mu_r \mu_0$ este:

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

respectiv :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c este viteza luminii în vid.



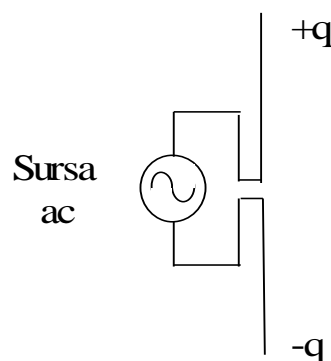
Producerea undelor electromagnetice

■ Antena

Pentru a obține un câmp electromagnetic care se propagă (unde electromagnetice), trebuie realizat un *circuit oscilant deschis* numit și *dipol electric oscilant* sau *antena*.

O antenă dipol oscilant poate fi construită în diferite moduri în funcție de frecvența de lucru.

Un model care funcționează bine în domeniul radiofrecvențelor este constituit din doi conductori rectilinii coliniari conectați la bornele unei surse de tensiune alternativă ca în figura:



Producerea undelor electromagnetice

■ Antena

Sarcinile din dipol, $q \sin \omega t$ și $-q \sin \omega t$, produc un câmp electric peste care se suprapune câmpul generat de variația în timp a câmpului magnetic produs de curentul din dipol. Prin suprapunerea acestor două câmpuri rezultă, în momentul când curentul în conductor este zero, un câmp electric cu linii de câmp închise. Acest câmp electric se “desprinde” de dipol și începe să se propage. În semiperioada următoare, procesul se repetă, dar sensul câmpurilor electric și magnetic este inversat.

Distribuția câmpurilor radiației emise de un **dipol electric oscilant** este destul de complexă, dar la distanțe mari de dipol vectori \vec{E} și \vec{B} sunt perpendiculari unul pe celălalt și amândoi sunt perpendiculari pe direcția de propagare a unde, unda electromagnetică este astfel o **undă transversală**.

Dipolul magnetic oscilant funcționează de asemenea ca o sursă de radiație; un exemplu este o buclă circulară parcursă de un curent sinusoidal. În ceea ce privește energia radiată, la frecvențe suficient de înalte, antena dipol magnetic este mai eficientă decât cea dipol electric de dimensiuni comparabile.