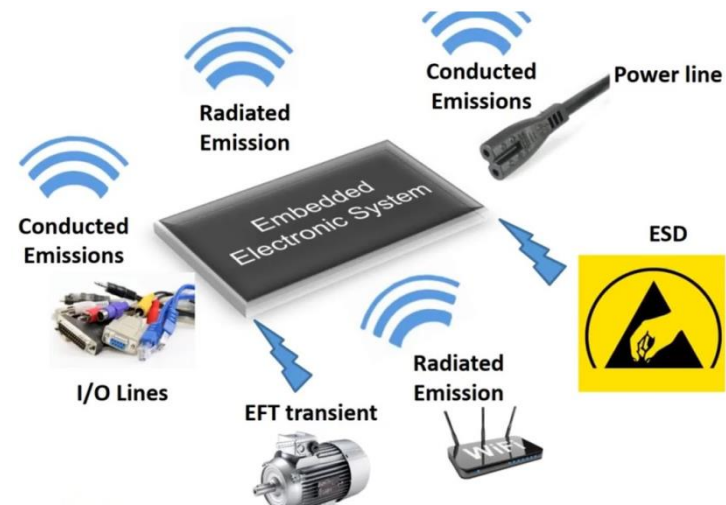


# COMPATIBILITATE ELECTROMAGNETICĂ

## Tema 2.

### CUPLAJE ELECTROMAGNETICE

Tipuri de cuplaje electromagnetice. Cuplajul prin impedanță comună. Cuplajul capacitiv placă-șasiu. Cuplajul prin diafonie inductivă. Cuplajul prin diafonie capacitivă.



# Tipuri de cuplaje electromagnetice

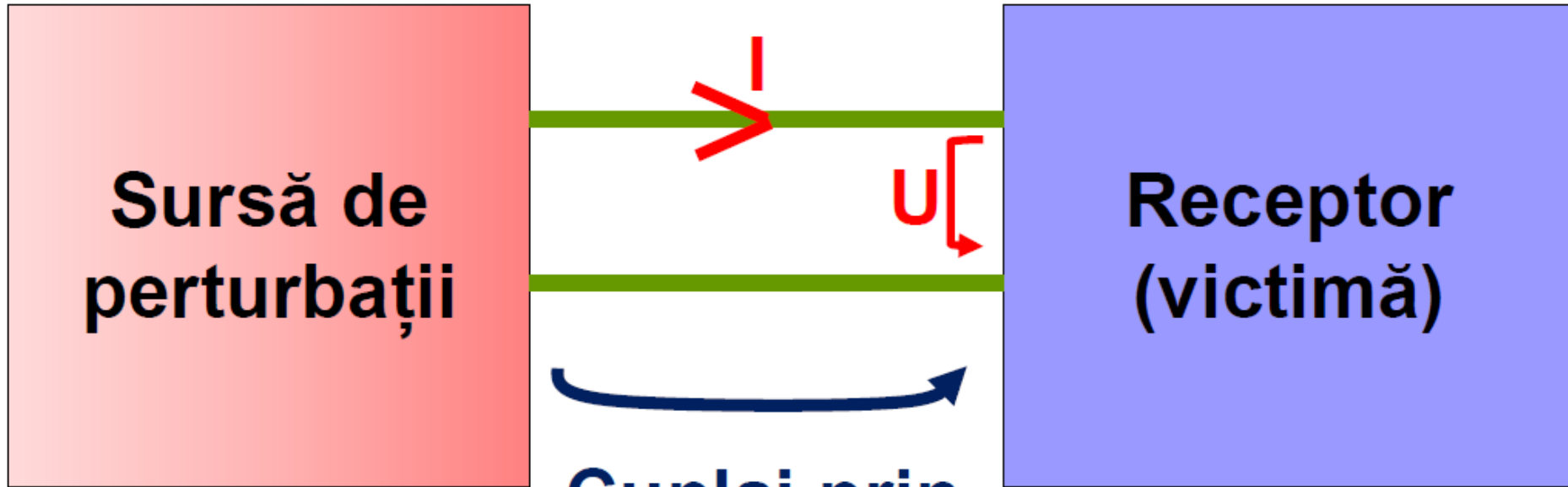
Interacțiunea dintre echipamentele electrice, electronice și de radio se produce prin intermediul unor cuplaje electromagnetice.

Există **4 tipuri** de cuplaje electromagnetice:

- *Cuplajul prin conducție (galvanic);*
- *Cuplajul capacitiv (electric);*
- *Cuplajul inductiv (magnetic);*
- *Cuplajul prin radiație electromagnetică.*

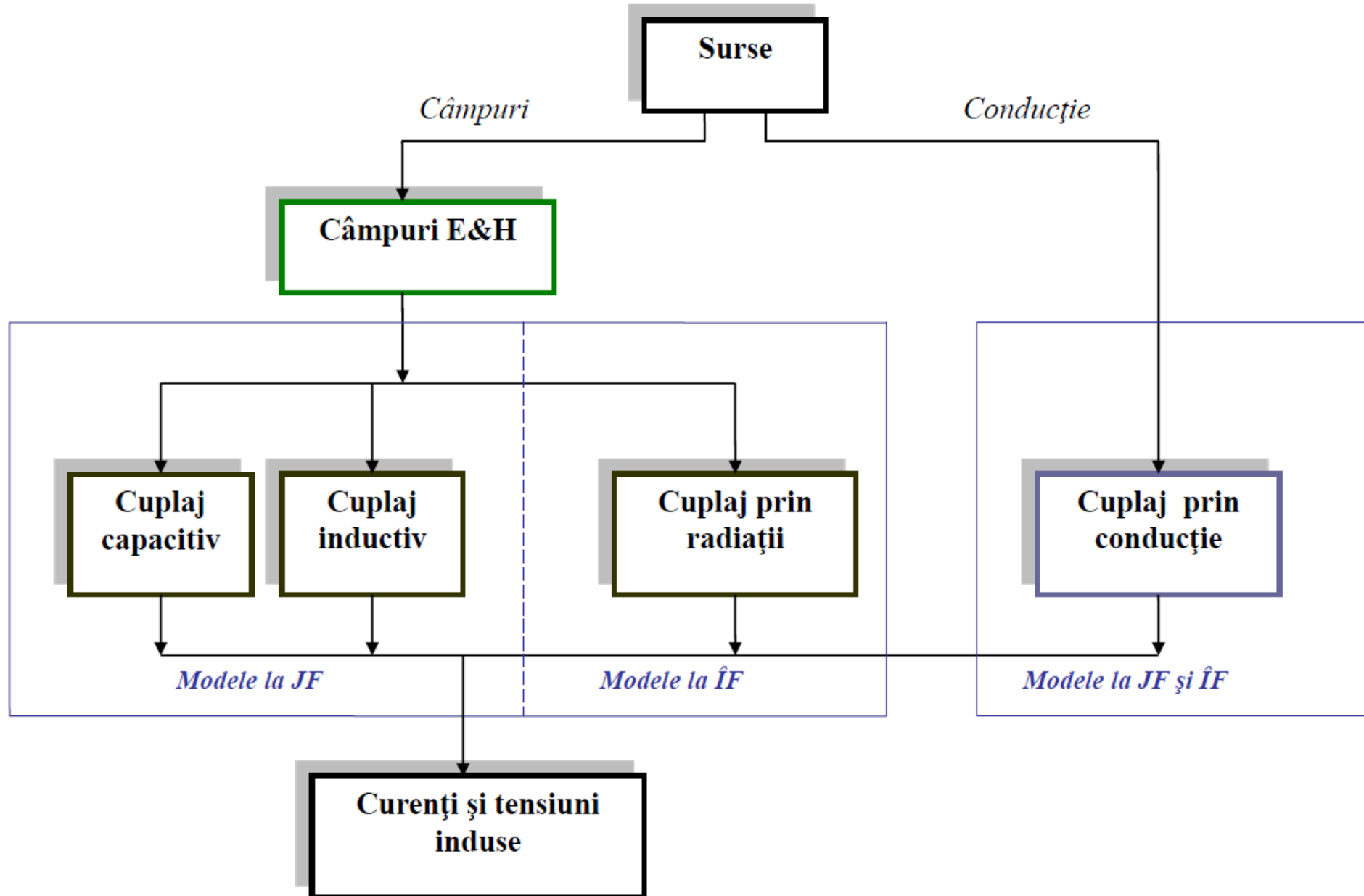
# Clasificarea generală a tipurilor de cuplaje

## Cuplaj prin câmp electromagnetic



**Cuplaj prin  
conducție**

# Clasificarea generală a tipurilor de cuplaje



# Cuplajul prin conducție (galvanic)

Apare întotdeauna între două circuite care au o impedanță comună:

- o porțiune comună de circuit conductor;
- o impedanță de transfer;
- un anumit tip de dipol.

➤ **CUPLAJ GALVANIC ÎNTRE CIRCUITE FUNCȚIONALE**

➤ **CUPLAJ GALVANIC DATORITĂ LEGĂRII LA PAMÂNT AL ECHIPAMENTULUI**

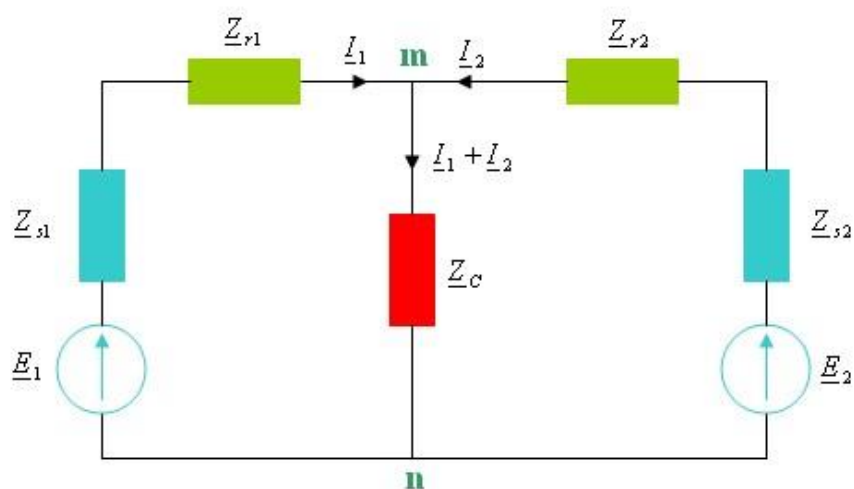
(cuplaj prin buclă de pământare)

# Cuplajul prin conducție între circuite funcționale

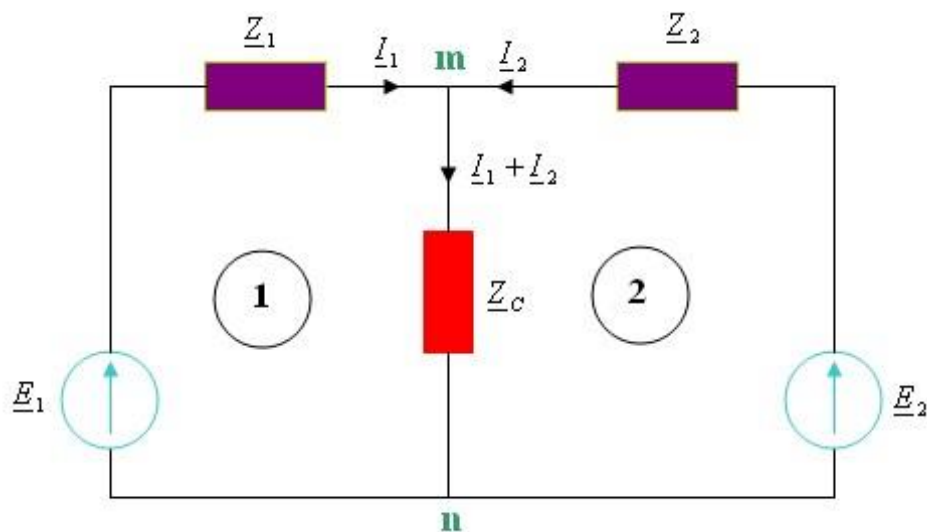
Daca două sau mai multe circuite au o impedanță comună, atunci trecerea curentului prin impedanța comună este de natură să distorsioneze curenții din toate circuitele cuplate galvanic.

- Reacția asupra rețelei de alimentare creată de sursele în comutație și de convertoarele statice;
- Variațiile de curent la comutarea circuitelor integrate numerice;
- Variațiile de curent la acționarea bobinelor releelor;
- Curenții în circuitele de alimentare ale motoarelor cu colector etc.

# Cuplajul prin conducție între circuite funcționale



circuitul complet



circuitul simplificat

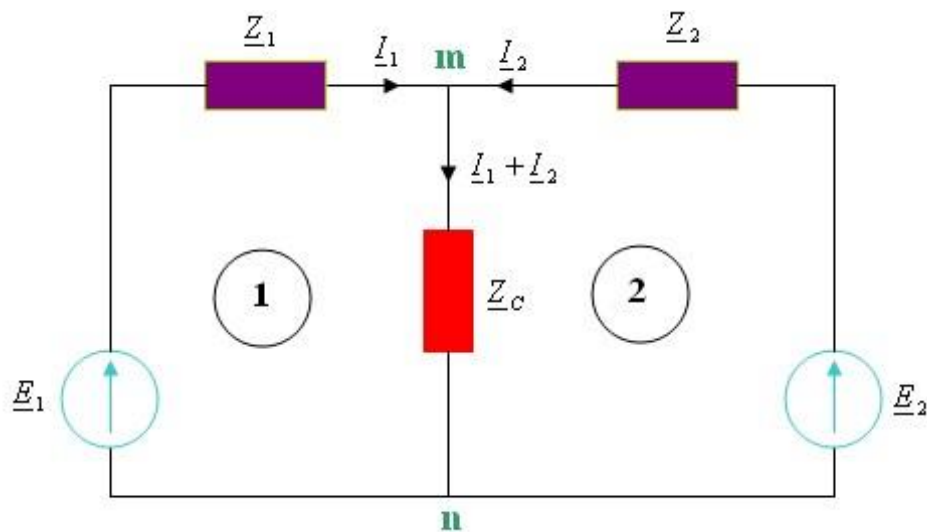
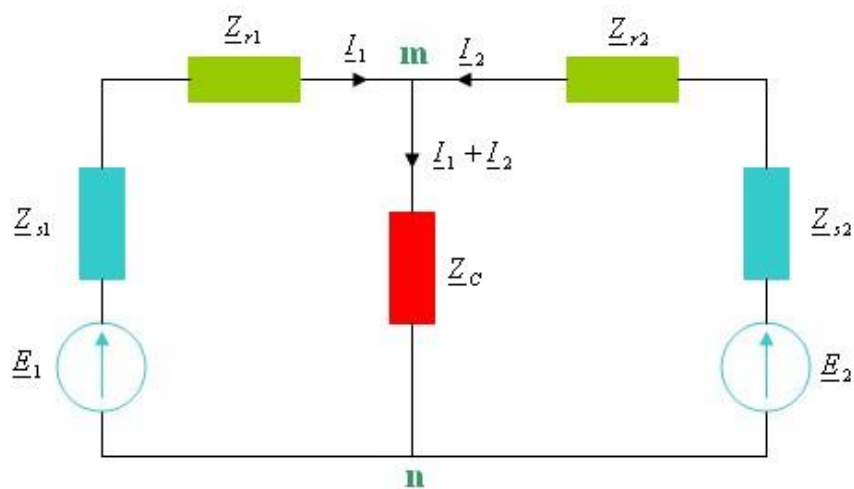
$$\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_{r1} = \underline{Z}_1 \text{ și } \underline{Z}_{s2} + \underline{Z}_{r2} = \underline{Z}_2$$

Circuitele funcționează pe baza următoarelor ecuații:

$$\underline{E}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_c (\underline{I}_1 + \underline{I}_2)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{Z}_c (\underline{I}_1 + \underline{I}_2)$$

# Cuplajul prin conducție între circuite funcționale



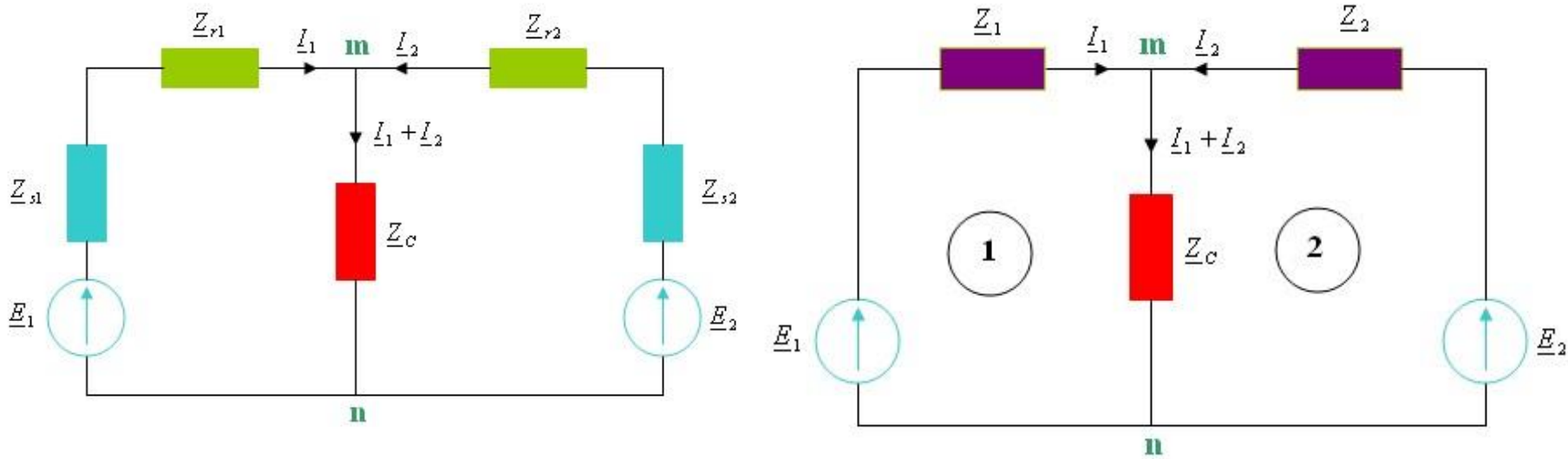
Ecuțiile din care se obțin curenții:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1 \underline{Z}_2 + (\underline{E}_1 - \underline{E}_2) \underline{Z}_c}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_c (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2 \underline{Z}_1 + (\underline{E}_2 - \underline{E}_1) \underline{Z}_c}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_c (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}$$



# Cuplajul prin conducție între circuite funcționale



Presupunând că  $Z_c = 0$ , atunci curenții ar avea următoarea formulă de calcul:

$$\underline{I}_{01} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1}$$

$$\underline{I}_{02} = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2}$$

Prin intermediul impedanței comune  $Z_c$ , este generată de curentul fiecărui circuit, o cădere de tensiune ce este văzută ca o tensiune perturbatoare pentru celălalt circuit.

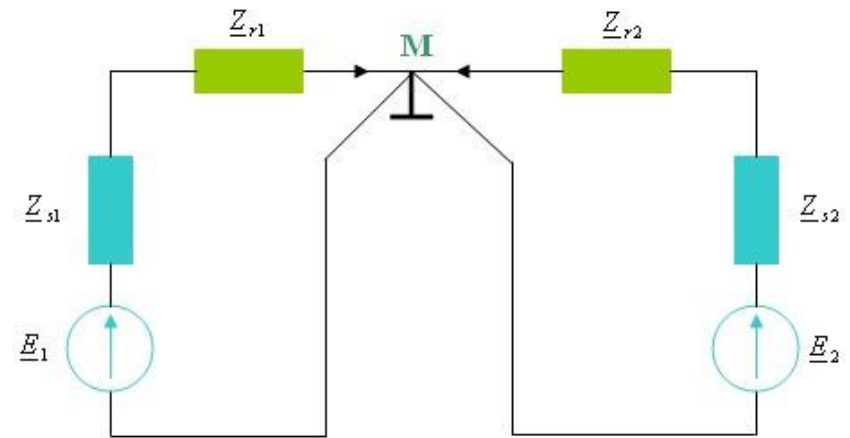
Dacă cuplajul conductiv nu ar exista, aceste tensiuni ar fi:  $Z_{r1} \cdot I_{01}$ ,  $Z_{r2} \cdot I_{02}$ .

# Neutralizarea cuplajului galvanic: masa într-un singur punct

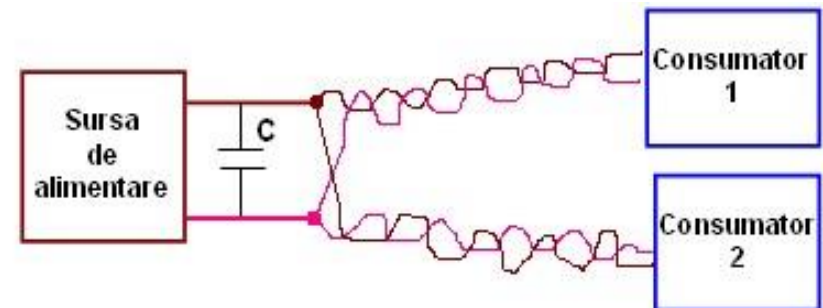
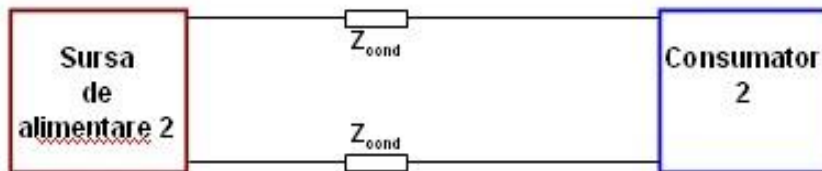
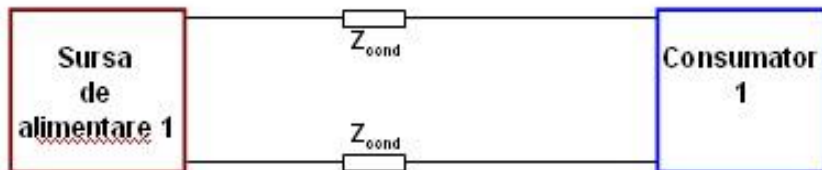
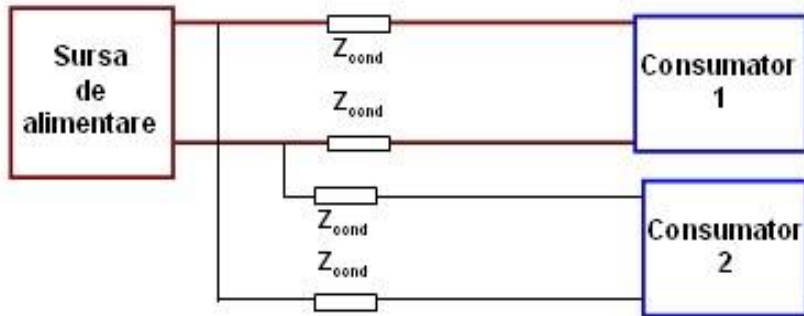
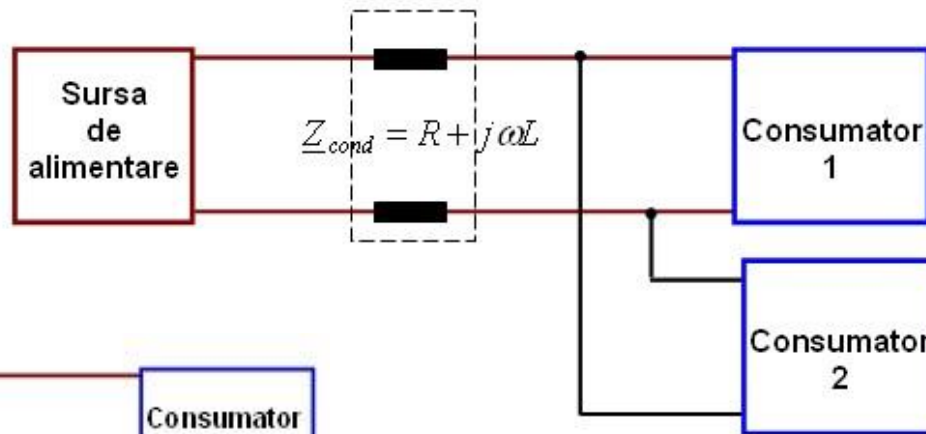
Neutralizarea cuplajului galvanic are loc dacă conexiunea la masă a celor două circuite se realizează într-un singur punct comun M.

Măsuri de neutralizare :

- Reducerea lungimii liniilor de alimentare;
- Separarea liniilor de alimentare pentru fiecare sistem funcțional;
- Când este nevoie de puteri diferite, ideal ar fi să se folosească surse de alimentare separate.



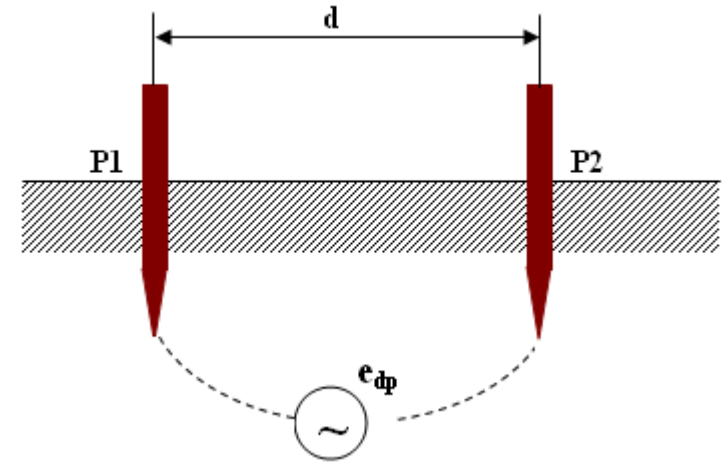
# Metode de reducere a perturbațiilor conductive între circuite de alimentare



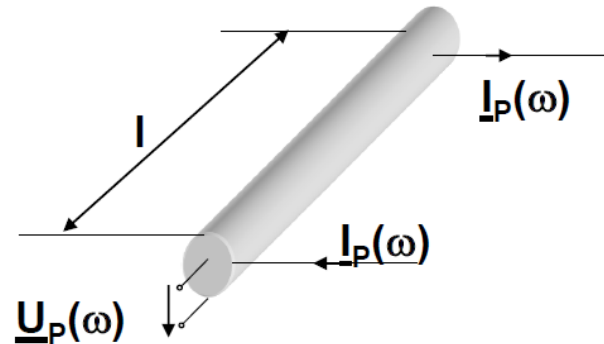
# Cuplajul galvanic datorat legării la pământ (realizat prin buclele de pământare)

Pentru a înțelege cum se formează acest tip de cuplaj, avem nevoie de următoarele noțiuni:

- tensiune electromotoare echivalentă între două prize de pământ;



- impedanța de cuplaj a cablului coaxial.



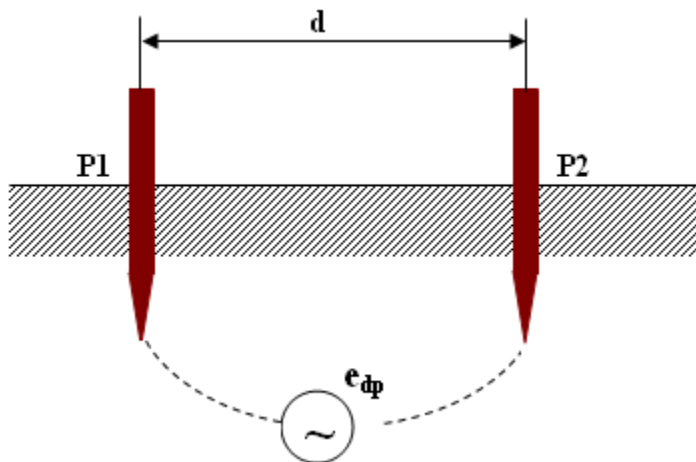
$$\underline{Z}_t = \frac{\underline{U}_P(\omega)}{\underline{I}_P(\omega) \cdot l}$$

# Tensiune electromotoare echivalentă între două prize de pământ

În figură sunt reprezentate 2 puncte de împământare aflate la distanța  $d$ . Tensiunea electromotoare echivalentă dintre cele 2 puncte se poate determina prin măsurarea cu un voltmetru. Poate lua valori între 0,1 [V] și 2,5 [V].

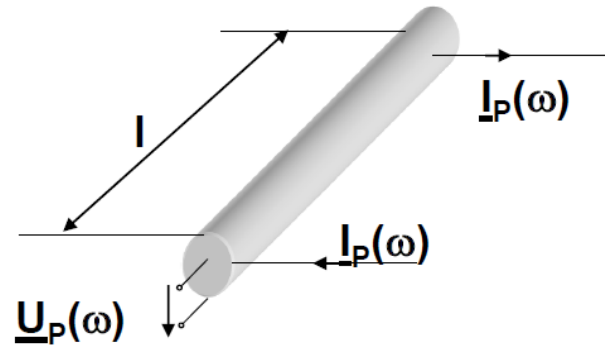
Valorile tensiunii electromotoare pot varia în funcție de localizarea geografică a terenului, tipul solului și de vecinătatea cu diverse instalații industriale.

Diferența de potențial este produsă de circulația **curenților vagabonzi** din pământ. Din punctul de vedere al compatibilității electromagnetice putem spune că există tensiunea electromotoare de influențare  $e_{dp}$ .



# Impedanța de cuplaj a cablului coaxial

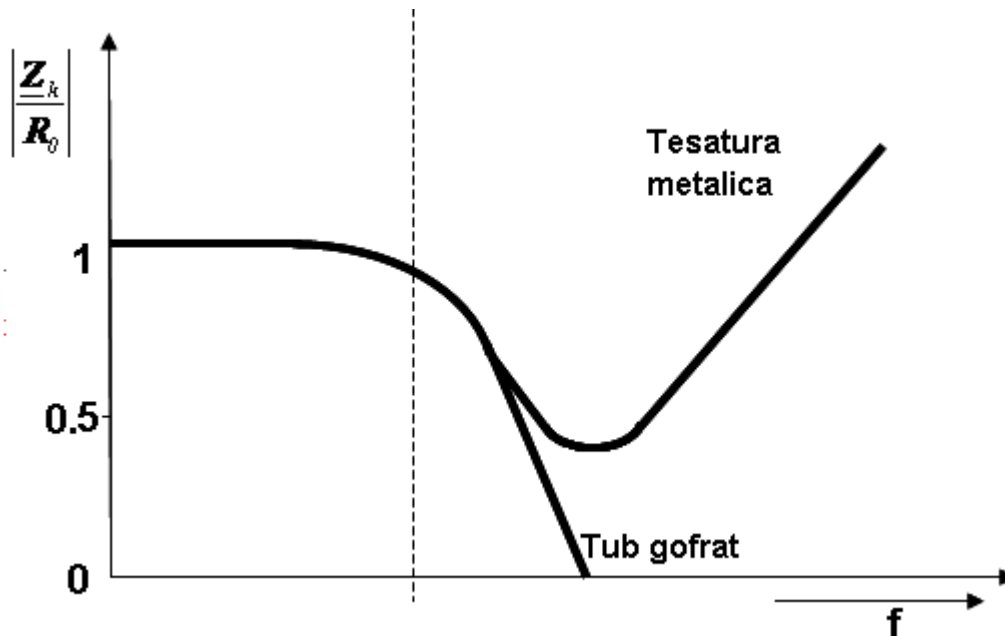
Cablul coaxial se poate folosi pentru conexiunea dintre un osciloscop și un senzor, având o rezistență între 50-75 [ $\Omega$ ].



$$\underline{Z}_t = \frac{\underline{U}_P(\omega)}{\underline{I}_P(\omega) \cdot l}$$

# Caracteristici ale impedanței de transfer

- Descrie cazul cel mai defavorabil al unei bucle de pamântare cu o linie de semnal coaxială.
- La frecvențe înalte, datorită refulării curentului prin efect pelicular, curentul perturbator circulă practic numai pe partea exterioară a ecranului.
- Cu cât impedanța de transfer a unui cablu coaxial este mai mică, cu atât este mai mică tensiunea perturbatoare produsă și cu atât este mai bună calitatea ecranării.



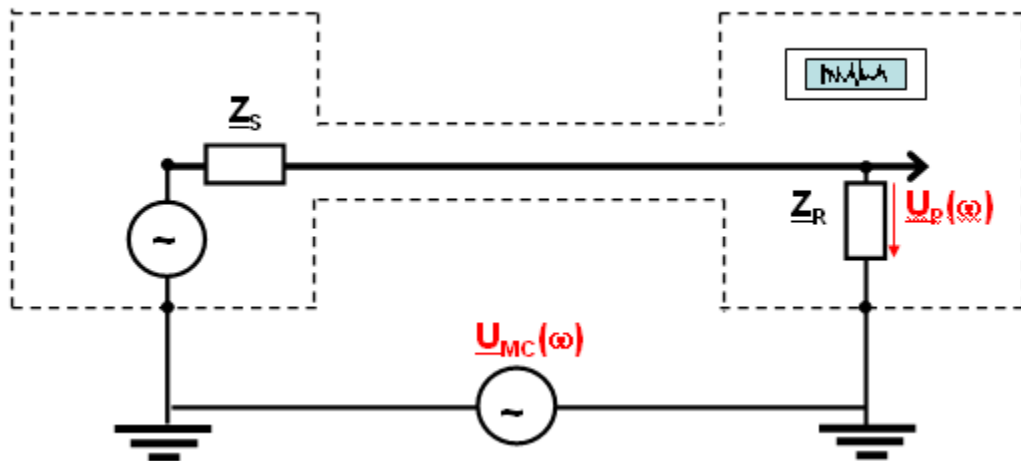
# Caracteristici ale impedanței de transfer

$$\underline{Z}_R \gg \underline{Z}_S$$

- Perturbația de MC se regăsește în întregime ca perturbație de mod normal la receptor

$$\underline{Z}_R = \underline{Z}_S$$

- Perturbația de MC se regăsește ca perturbație de mod normal la receptor, numai jumătate din această valoare

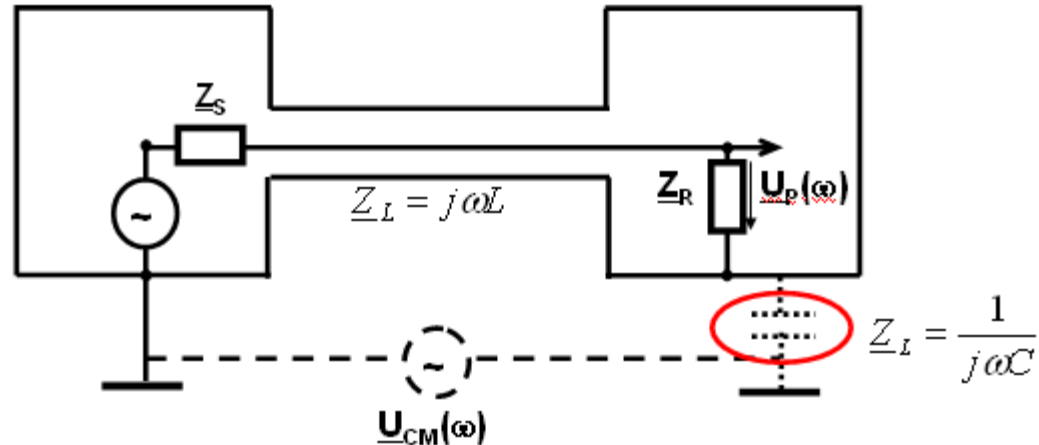


$$FCCN = \frac{|\underline{U}_p(\omega)|}{|\underline{U}_{CM}(\omega)|} = \frac{|Z_R|}{|Z_R + Z_S|}$$

Curentul perturbator circulă numai prin partea exterioară a ecranului; tensiunea culeasă de conductorul central reprezintă căderea de tensiune longitudinală pe partea interioară a ecranului, care poate să prezinte o dependență de frecvență specifică.



# Caracteristici ale impedanței de transfer



$$\frac{\underline{U}_{CM}(\omega)}{\underline{U}'_{CM}(\omega)} = \frac{\underline{Z}_P + \underline{Z}_L}{\underline{Z}_L}$$

$$\frac{\underline{U}_{CM}(\omega)}{\underline{U}_P(\omega)} = \frac{\underline{Z}_S + \underline{Z}_R}{\underline{Z}_R} \cdot \frac{\underline{Z}_P + \underline{Z}_L}{\underline{Z}_L}$$

# Caracteristici ale impedanței de transfer

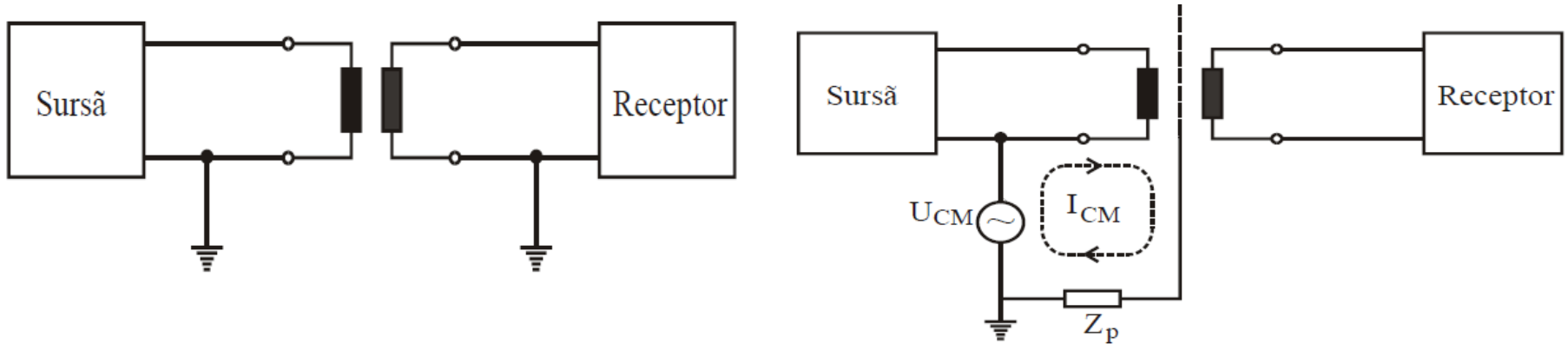
- Pentru  $\omega L=1/\omega C$  circuitul oscilant serie format din inductivitatea L și capacitatea parazită ajunge la rezonanță și în funcție de amortizare, apar curenți mari (rezonanța de curenți)
- Pentru linii de semnal lungi și frecvențe înalte trebuie să se țină cont de impedanțele liniei de ducere și de întoarcere care sunt în serie cu impedanța sursei și a receptorului
- Pentru frecvențe la care lungimea de undă este de același ordin de mărime cu lungimea cablului de semnal sau mai mică, trebuie aplicată teoria liniilor electrice lungi
- Pentru linii de semnal coaxiale și la frecvențe mari, datorită efectului pelicular, curentul perturbator circulă numai la suprafața exterioară a ecranului cablului; conversia mod comun/mod normal are loc atunci prin impedanța de transfer a liniei

# Măsuri antiperturbative în cazul cuplajului prin conducție

- Decuplare cu transformator (*izolare galvanică*)
  - Transformatoare de separare pentru semnalul util
  - Transformatoare de neutralizare (simetrizare)
  - Transformatoare de rețea
- Optocuploare și linii din fibre optice (*izolare galvanică*)
- Amplificatoare diferențiale și sisteme simetrice
- Tehnica ecranului de protecție (gardare)

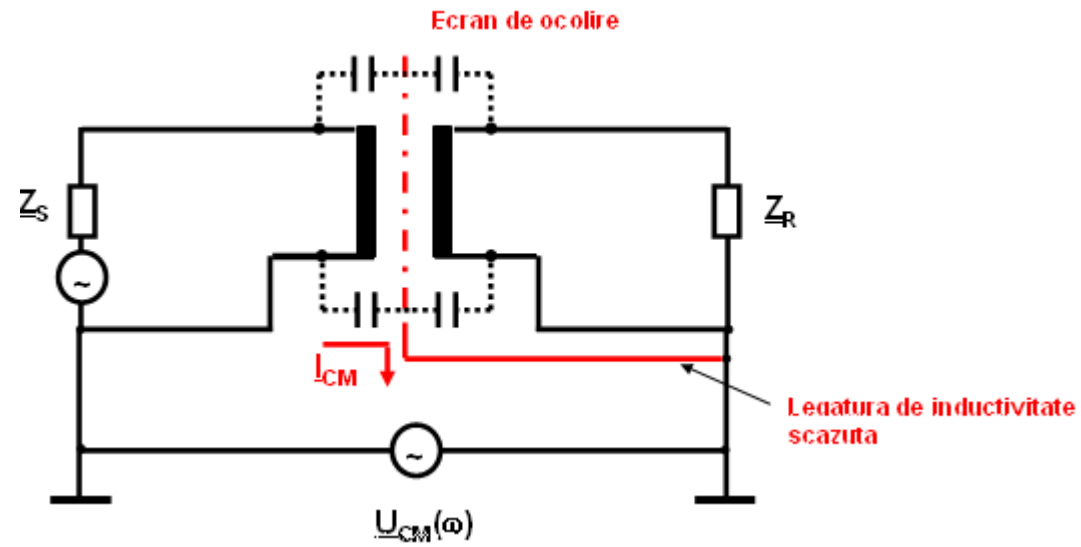
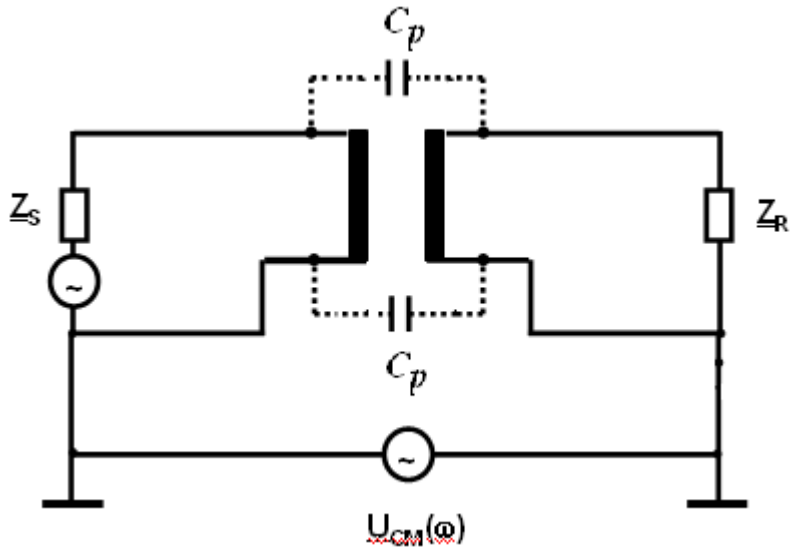
# Decuplare cu transformator (izolare galvanică)

A. Transformatoare de separare pentru semnalul util (permit separarea galvanică a circuitelor de curent alternativ)



- Asigură întreruperea buclelor de pământare realizând o foarte bună rejecție de mod comun.
- Rejecția de MC este mai redusă din cauza capacităților parazite dintre înfășurările primară și secundară ale transformatorului.
- Îmbunătățirea rejecției în acest caz se poate obține prin introducerea între cele două înfășurări a unui ecran pus la pământ.

# Decuplare cu transformator (izolare galvanică)

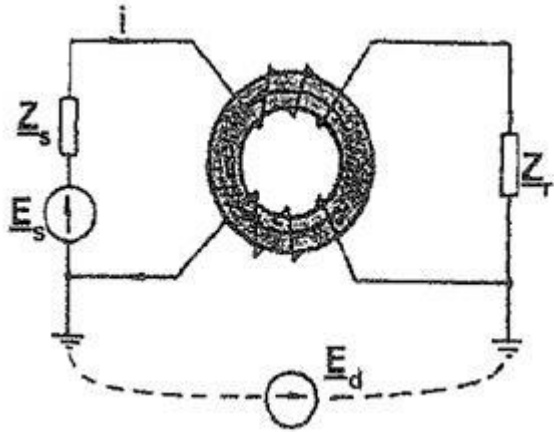


- Raportul de transformare trebuie să fie constant pentru toată lățimea de bandă a semnalului.
- Transformatorul de separare nu transferă o eventuală componentă de c.c. A semnalului util.



# Decuplare cu transformator (izolare galvanică)

## B. Transformatoare de neutralizare



Transformatorul de neutralizare: două înfășurări bobinate pe miez de ferită. Sensul de bobinaj al înfășurărilor determină semnalul:

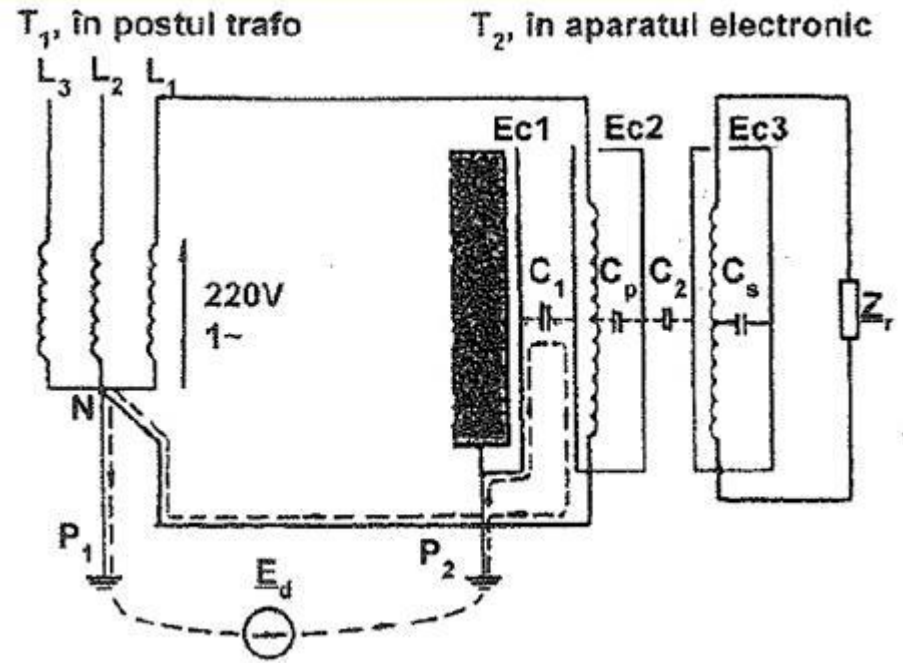
- **Contratact:** flux magnetic practic nul în miezul de fierită (pentru semnalul util nu oferă reactanță semnificativă);
- **În același tact:** provenit fie dintr-o TEM  $E_d$ , fie din cauza unui cuplaj inductiv; bobinele funcționează ca reactanțe sumatoare.

# Decuplare cu transformator (izolare galvanică)

## C. Transformatoare de rețea

Conexiunile oferă următoarele efecte benefice:

- Neutralizarea efectului TEM  $E_d$  (curentul se închide pe traseul punctat fără a influența înfășurările transformatorului T2). Valoarea curentului este limitată de reactanța capacitivă a capacității  $C_1=500...1000\text{pF}$ .
- Capacitatea minimă între înfășurările primare și secundare.

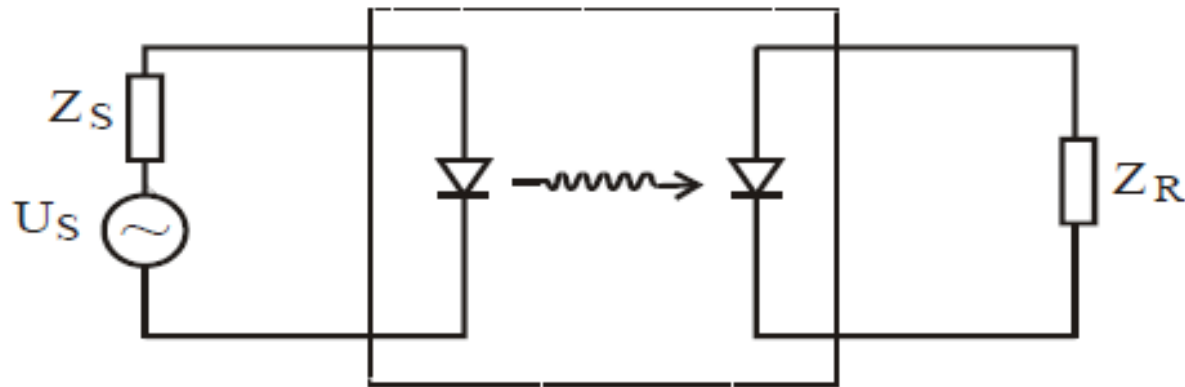


# Optocuploare și cabluri din fibră optică

Oferă o înaltă rejecție de MC → sunt utilizate pentru întreruperea buclelor de pământare, în special la intrările și ieșirile automatelor programabile, respectiv la interfețele sistemelor de conducere a proceselor

O diodă luminiscentă sau o diodă laser transformă semnalul electric în semnal luminos, care se transmite printr-un mediu electroizolant transparent optic și este transformat din nou în semnal electric printr-o fotodiodă sau un fototranzistor.

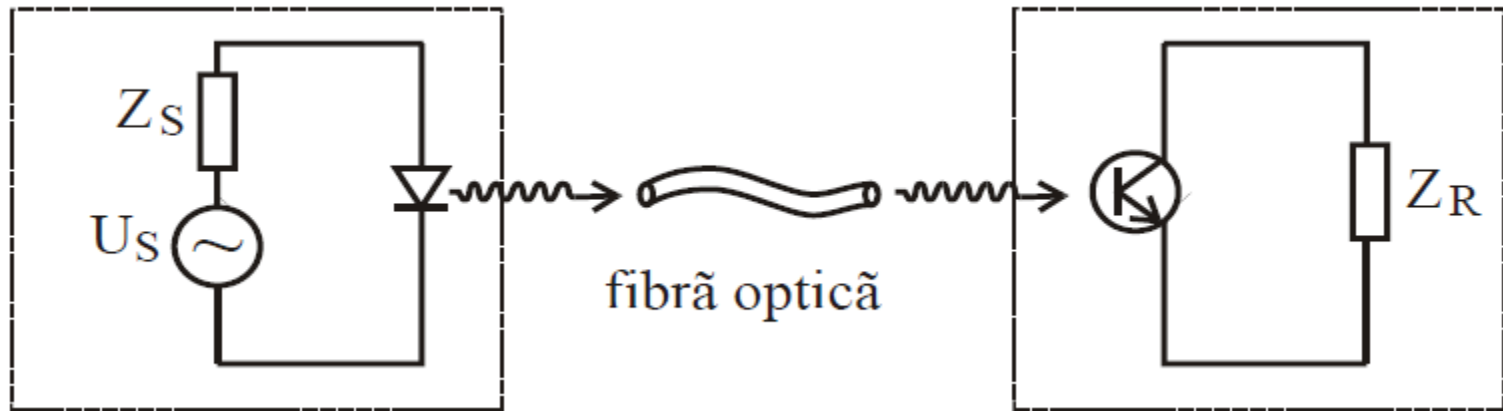
Nivelele de izolație obișnuite ale optocuploarelor sunt între 500 V și 10 kV.





# Optocuploare și cabluri din fibră optică

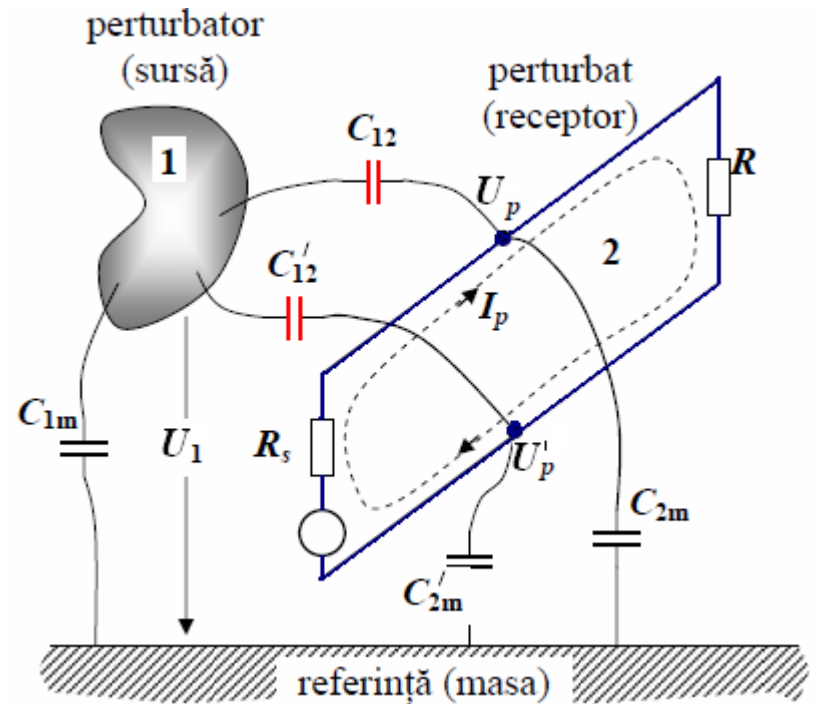
- Optocuploarele sunt folosite mai ales în tehnica numerică, unde asigură o transmitere foarte bună a semnalelor numerice. (Pentru transmiterea semnalelor analogice, ele asigură, numai o precizie satisfăcătoare).
- Pentru semnalele de MC, rejectia de MC oferită de optocuploare scade foarte mult din cauza capacităților parazitare dintre intrare și ieșire.
- O rejectie de mod comun oricât de mare, chiar și la cele mai înalte frecvențe se poate obține folosind o transmisie prin fibre optice.
- Cu cabluri din fibre optice pot fi asigurate orice diferență de potențial până în domeniul MV.



# Cuplajul capacitiv (electric)

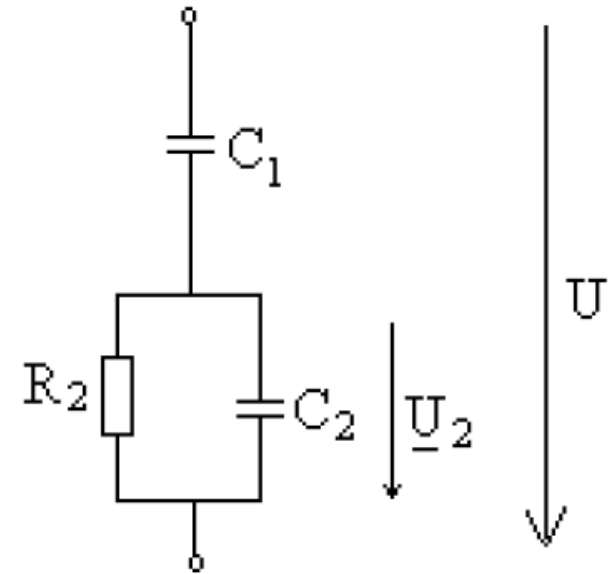
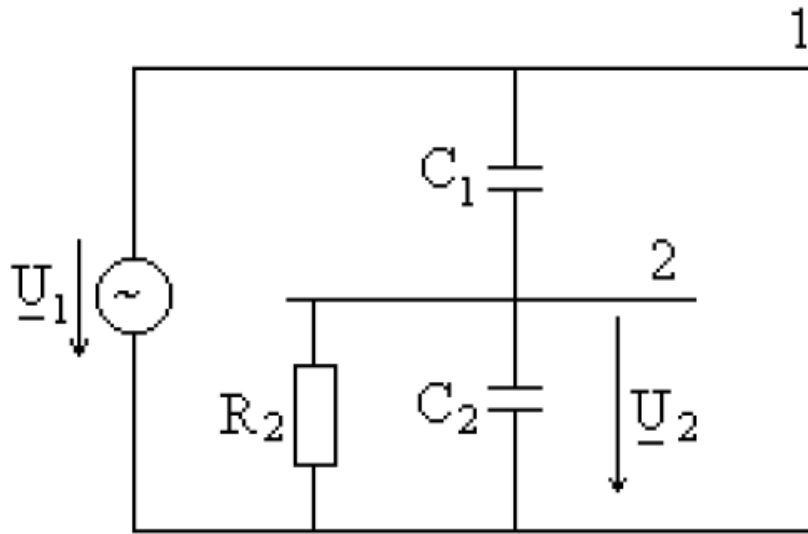
Se manifestă între conductoare, circuite aflate la potențiale diferite și între care există căi de închidere a curenților produși de către diferența de potențial.

$C_{12}, C'_{12}$  – capacitati de cuplaj parazit  
 $I_p$  – curent perturbator → produce tensiuni efective perturbatoare la bornele rezistentelor receptorului



# Cuplajul capacitiv (electric)

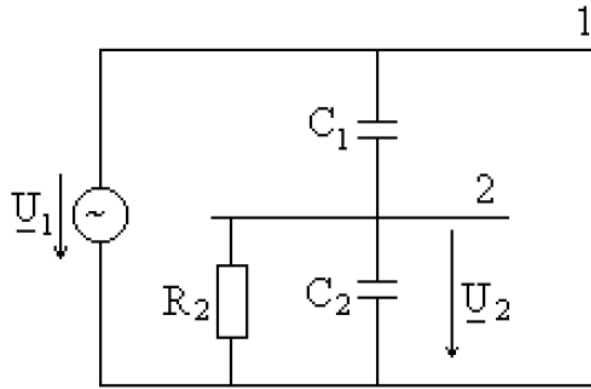
Cuplajul se datorează existenței capacităților parazite. Acest tip de cuplaj apare între conductoarele ce au potențiale electrice diferite. Acest tip de cuplaj poate avea un efect intenționat sau accidental.



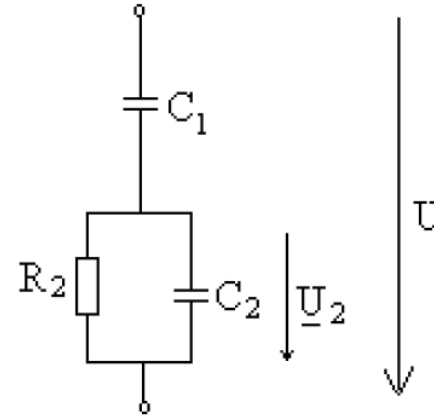
$$\underline{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C_1}, \quad \underline{Z}_2 = \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_2}$$

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = \frac{1+j\omega R_2 (C_1+C_2)}{j\omega R_1 (1+j\omega R_2 C_2)}$$

# Cuplajul capacitiv (electric)



$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$$



$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \frac{j\omega R_2 C_1}{1 + j\omega R_2 (C_1 + C_2)}$$

Cazuri limită:

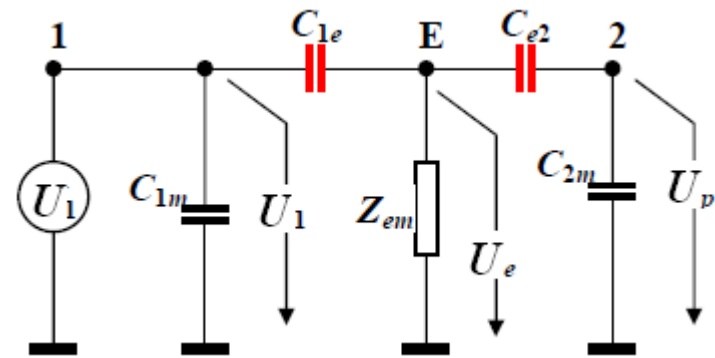
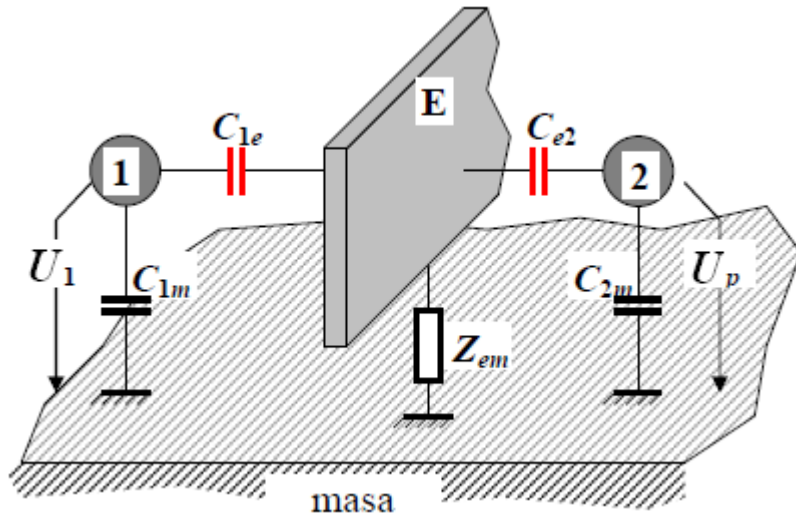
- Dacă rezistența corespunzătoare pierderilor  $R_2$  este foarte mare putem deduce relația divizorului capacitiv: 
$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Dacă capacitatea  $C_2$  este foarte mică: 
$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \frac{j\omega R_2 C_1}{1 + j\omega R_2 C_1}$$

Cuplajul capacitiv îl întâlnim în procesul de încărcare al vehiculului electric, fiind un cuplaj intenționat în această situație.

# Efectul ecranului electric asupra cuplajului capacitiv

**Ecran electric** = incintă din material bun conductor în care este plasat circuitul perturbat

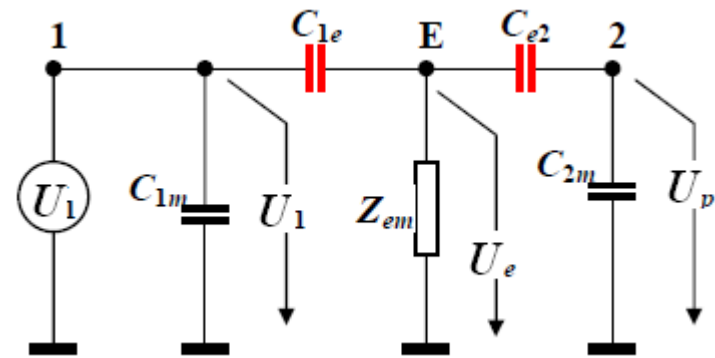
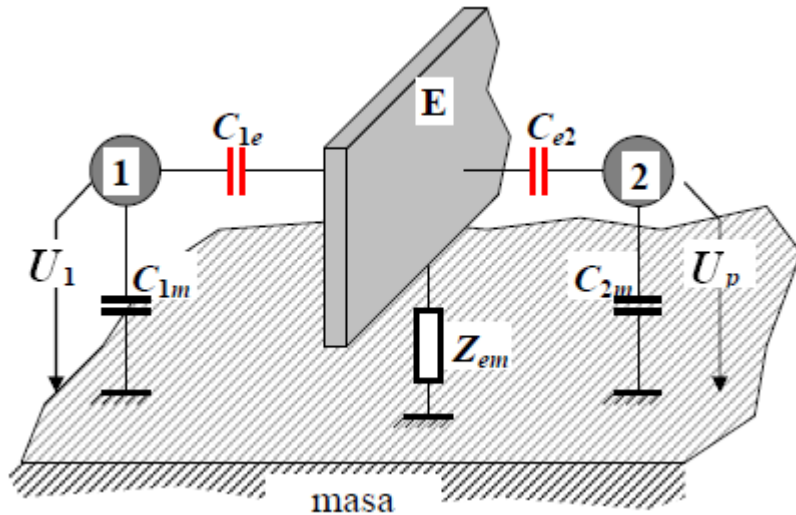


$$|Z_{em}| \ll 1/\omega C_{2m}$$

$$\underline{U}_p = \frac{C_{e2}}{C_{e2} + C_{2m}} \cdot \frac{\underline{Z}_{em}}{\underline{Z}_{em} + 1/j\omega C_{1e}} \underline{U}_1$$

# Efectul ecranului electric asupra cuplajului capacitiv

*Ecranul nu este conectat la masă:*

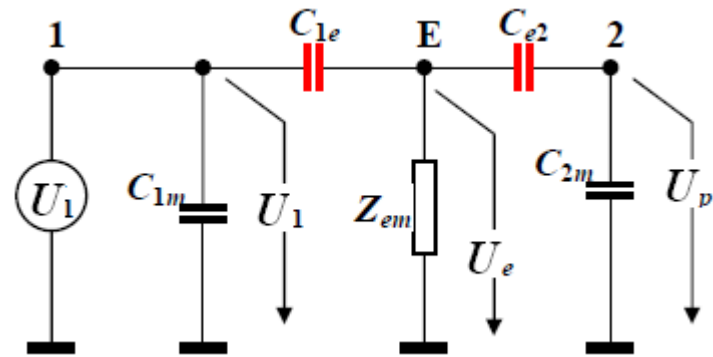
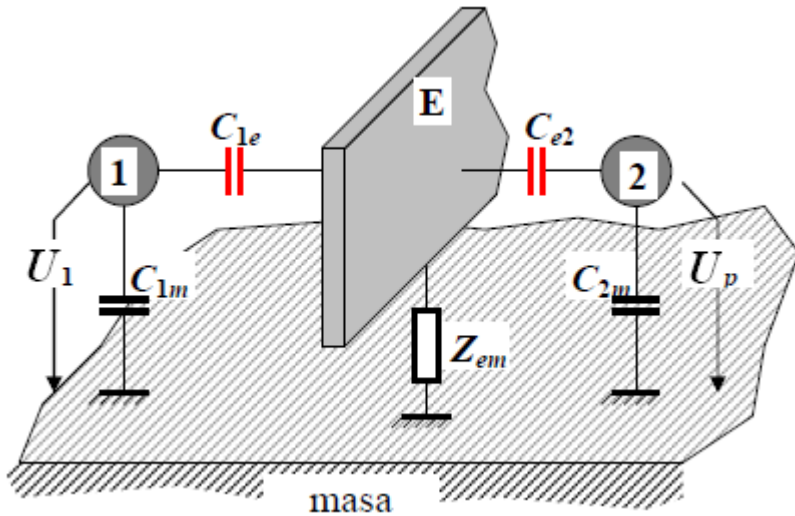


$$\underline{Z}_{em} = 1/j\omega C_{em}$$

$$\underline{U}_p = \frac{C_{e2}}{C_{e2} + C_{2m}} \cdot \frac{C_{1e}}{C_{em} + C_{1e}} \underline{U}_1 \quad \Rightarrow \quad \underline{U}_{p(\text{fara ecran})} = \frac{C_{12(\text{fara ecran})}}{C_{12(\text{fara ecran})} + C_{2m}} \underline{U}_1$$

# Efectul ecranului electric asupra cuplajului capacitiv

*Ecranul este conectat la masă prin inductanță:*



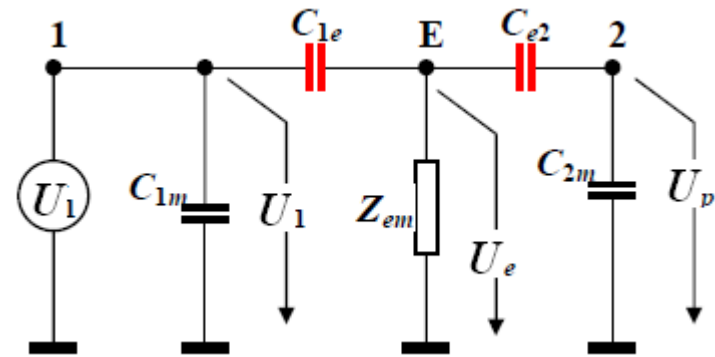
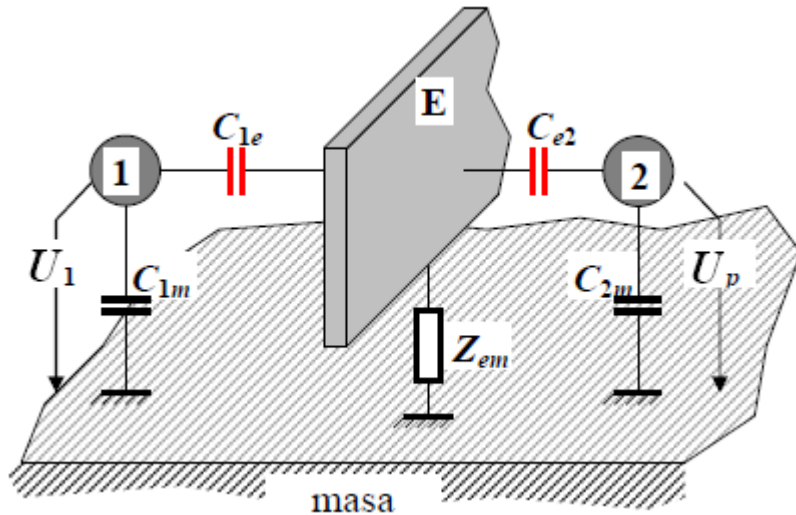
$$\underline{Z}_{em} = j\omega L_{em} + R_{em}$$

$$\underline{U}_p \approx \frac{C_{e2}}{C_{e2} + C_{2m}} \cdot \frac{1}{1 - 1/\omega^2 C_{1e} L_{em}} \underline{U}_1$$

$$f_r = 1/2\pi \sqrt{C_{1e} L_{em}}$$

# Efectul ecranului electric asupra cuplajului capacitiv

*Ecranul este conectat la masă prin impedanța nulă:*



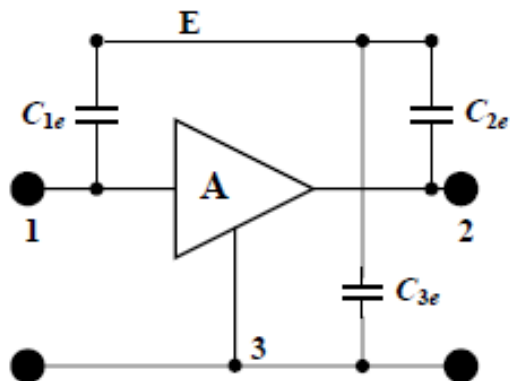
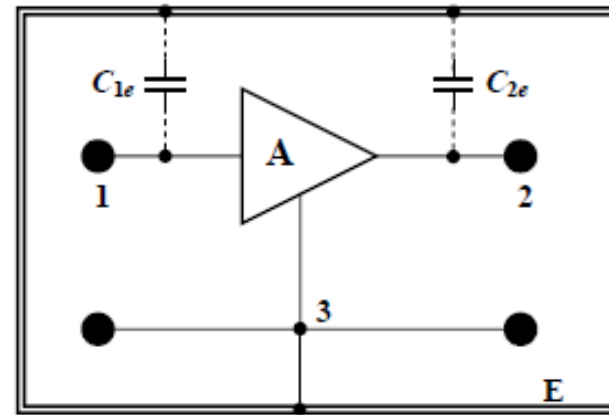
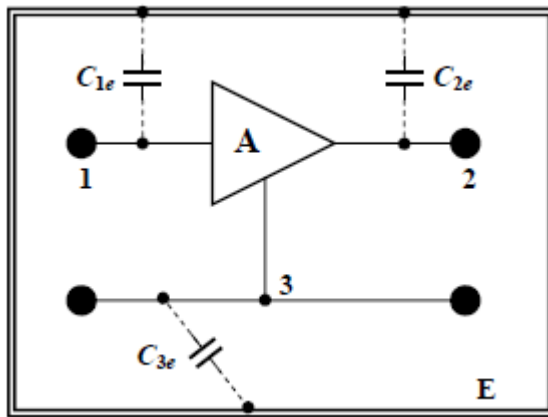
$$\underline{U}_e = 0 \text{ și } \underline{U}_p = 0$$

**!!! Pentru ca ecranul electric să fie activ, este esențial să fie conectat la masă prin impedanța nulă.**



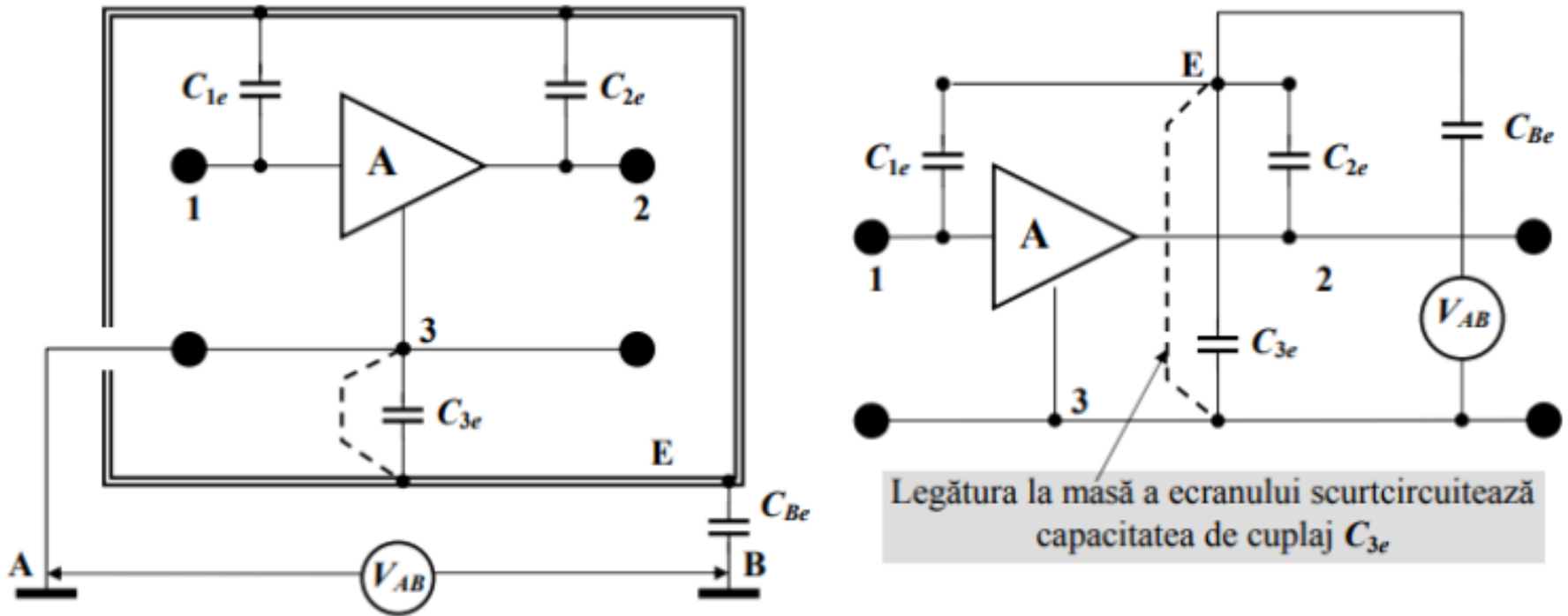
# Principii de ecranare la masă a ecranelor electrice

1. *Ecranul electric trebuie conectat la punctul cu potențial de referință zero (masă) a circuitului protejat, plasat în interiorul ecranului;*



**Capacitățile parazite ale circuitului față de ecranul legat la masă**

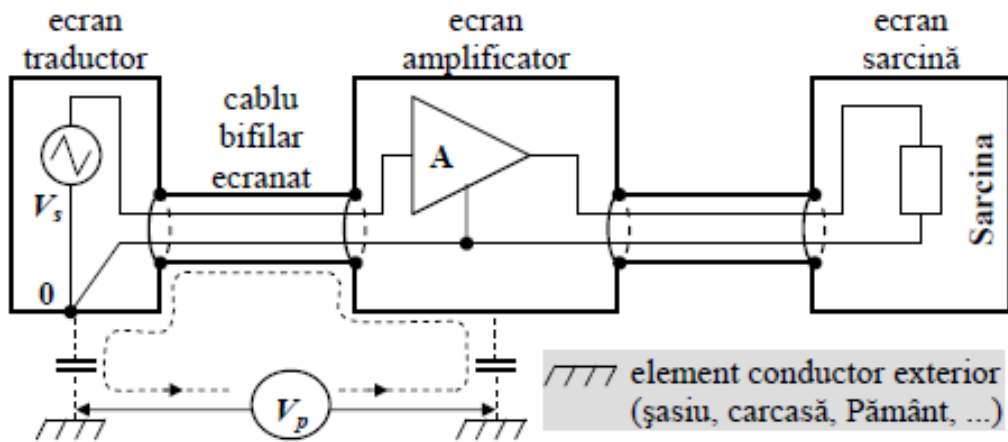
# Principii de ecranare la masă a ecranelor electrice



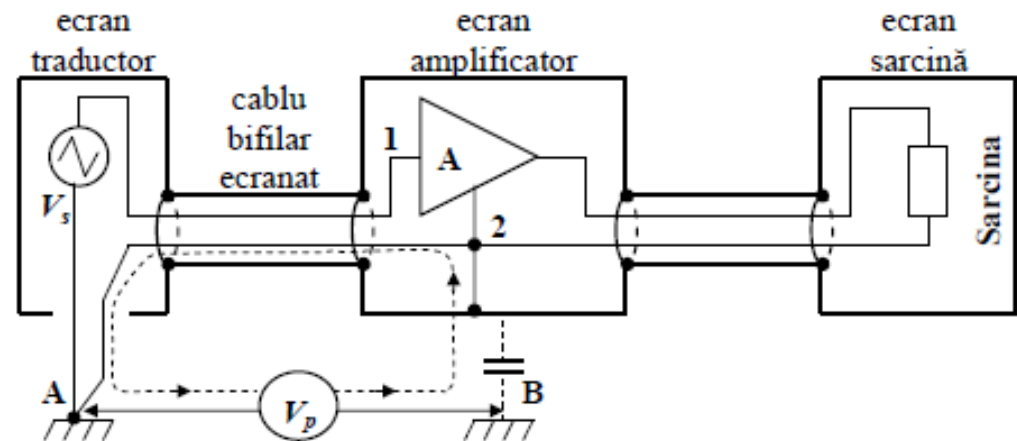
Efectul diferenței de potențial între puncte de masă diferite și schema echivalentă la ecranarea electrică

# Principii de ecranare la masă a ecranelor electrice

2. *Ecranul electric trebuie conectat la punctul cu potențial de referință zero al semnalului la care este conectată sursa de semnal (masa sursei de semnal) astfel încât să se asigure circulația curenților perturbatori prin ecran spre punctul de masă al sursei;*



Ecranarea corectă a unui ansamblu



Ecranarea incorectă a unui ansamblu

# Cuplaj magnetic (inductiv)

Cuplajul inductiv se referă la fenomenul care există atunci când un câmp magnetic produs de un curent electric într-un circuit induce un efect asupra unui flux magnetic produs de alt circuit. Când acest lucru se întâmplă, cele două fluxuri devin reactive reciproc sau cuplate prin efectele inductive ale câmpurilor magnetice variabile în timp.

Inductanța proprie unei porțiuni de circuit :

$$\Phi = LI$$

Cuplaj magnetic (inductanța mutuală):

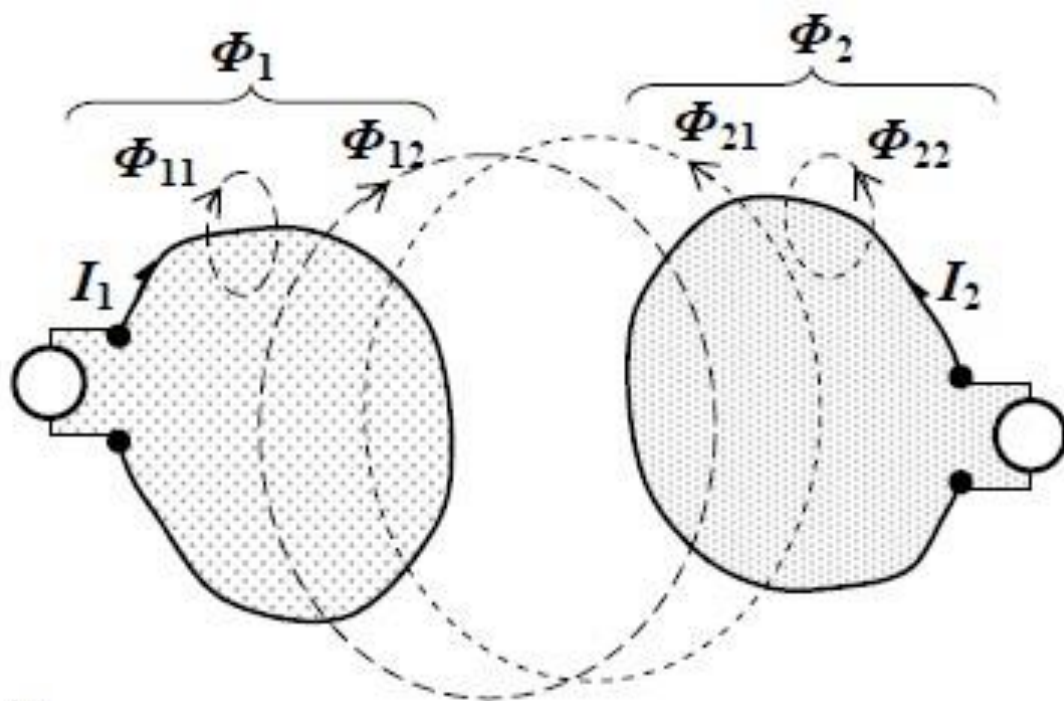
$$M_{12} = \Phi_{12}/I_1 = \Phi_{21}/I_2 = M_{21} = M$$

Flux total:

$$(\Phi_1, \Phi_2)$$

Flux de dispersie (de scăpări) →  
inductanța de scăpări:

$$L_{d1} = \Phi_{11}/I_1 \quad L_{d2} = \Phi_{22}/I_2$$



# Cuplaj magnetic (inductiv)

Cele 2 circuite cuplate inductiv funcționează pe baza următoarelor ecuații:

$$\underline{E}_1 = (R_1 + R_{s1} + R_{r1})\underline{I}_1 + j\omega_1(L_1 + L_{s1} + L_{r1})\underline{I}_1 + j\omega_2 M_2 \underline{I}_2$$

$$\underline{E}_2 = (R_2 + R_{s2} + R_{r2})\underline{I}_2 + j\omega_2(L_2 + L_{s2} + L_{r2})\underline{I}_2 + j\omega_1 M_1 \underline{I}_1$$

Expresiile curenților influențați :

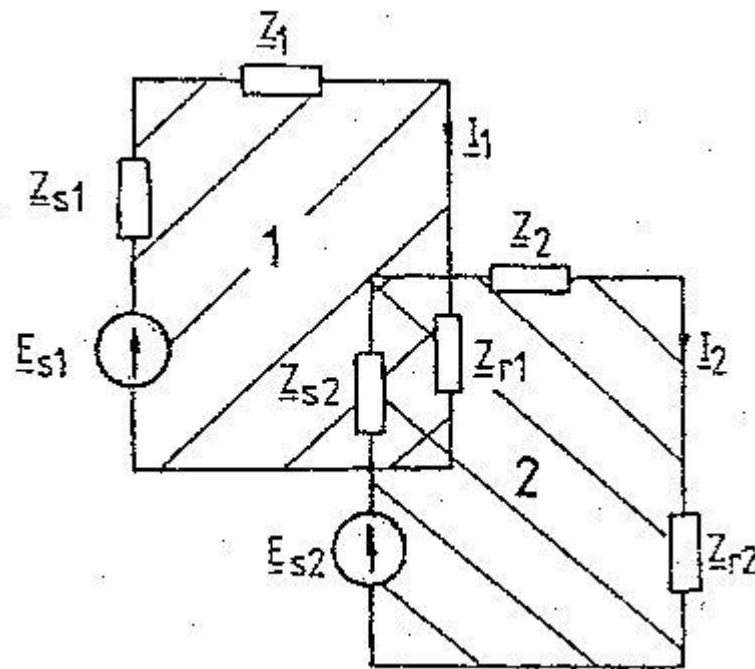
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1 - j\omega_2 M_2 \underline{I}_2}{(R_1 + R_{s1} + R_{r1}) + j\omega_1(L_1 + L_{s1} + L_{r1})}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2 - j\omega_1 M_1 \underline{I}_1}{(R_2 + R_{s2} + R_{r2}) + j\omega_2(L_2 + L_{s2} + L_{r2})}$$

Curenții neinflențați sunt :

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{(R_1 + R_{s1} + R_{r1}) + j\omega_1(L_1 + L_{s1} + L_{r1})}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2}{(R_2 + R_{s2} + R_{r2}) + j\omega_2(L_2 + L_{s2} + L_{r2})}$$



**Următoarele tensiuni electromotoare se produc în cele două circuite:**

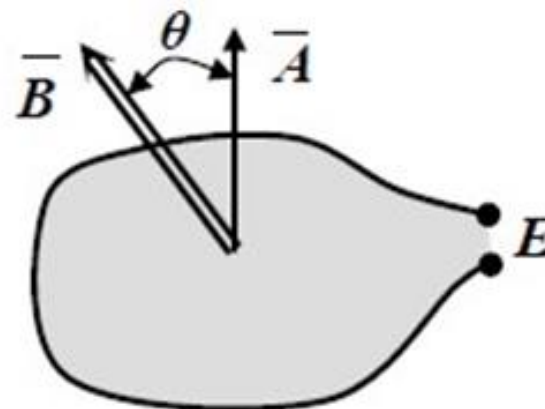
$-j\omega_2 M_2 \underline{I}_2$ , respectiv  $-j\omega_1 M_1 \underline{I}_1$

În acest mecanism de cuplaj, circuitele se influențează reciproc, din cauza dispunerii lor, fără a avea o legătură galvanică.

# Cuplaj magnetic (inductiv)

Într-un circuit cu aria  $A$ , intersectat de fluxul variabil în timp  $\Phi$ , se induce o T.E.M.

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$



Dacă inducția prezintă o variație armonică,  $A = \text{const}$        $b(t) = B \cos \omega t$ ,  $\underline{B} = B e^{j\omega t}$

$$\longrightarrow \underline{E} = -j\omega \underline{B} A \cos \theta = (\omega \underline{B} A \cos \theta) e^{-j\pi/2}$$

Dacă bucla este cuplată prin  $M$  cu un circuit parcurs de curentul  $I_1$

$$\longrightarrow \underline{E} = -M d\underline{I}_1 / dt = -j\omega M \underline{I}_1 = \omega M \underline{I}_1 e^{-j\pi/2}$$

# Cuplaj magnetic (inductiv)

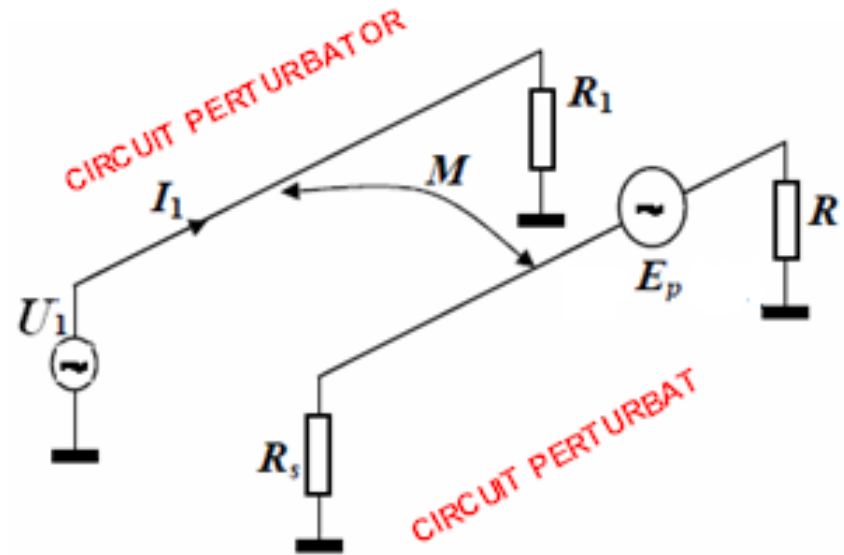
- Cuplajul inductiv este de mod diferențial
- Tensiunile perturbatoare nu se reduc prin reducerea rezistenței totale a circuitului perturbat
- Tensiunile pe R și  $R_s$  sunt în antifază

$$\underline{E}_p = j\omega M \underline{I}_1 = \omega M \underline{I}_1 e^{j\pi/2}$$

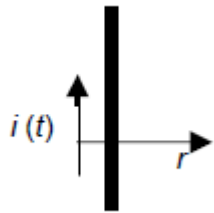
$$\underline{I}_p = \underline{E}_p / \underline{R}_{total}$$

$$\Delta U_{ps} = \underline{I}_p R_s$$

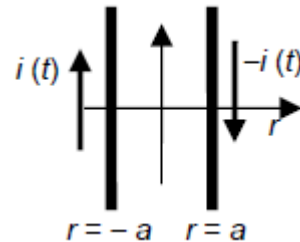
$$\Delta U_p = \underline{I}_p R$$



# Dependența geometrică a cuplajului inductiv



$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{i(t)}{r}$$



$$B_2(r) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot a \cdot i(t)}{(r - a) \cdot (r + a)}$$

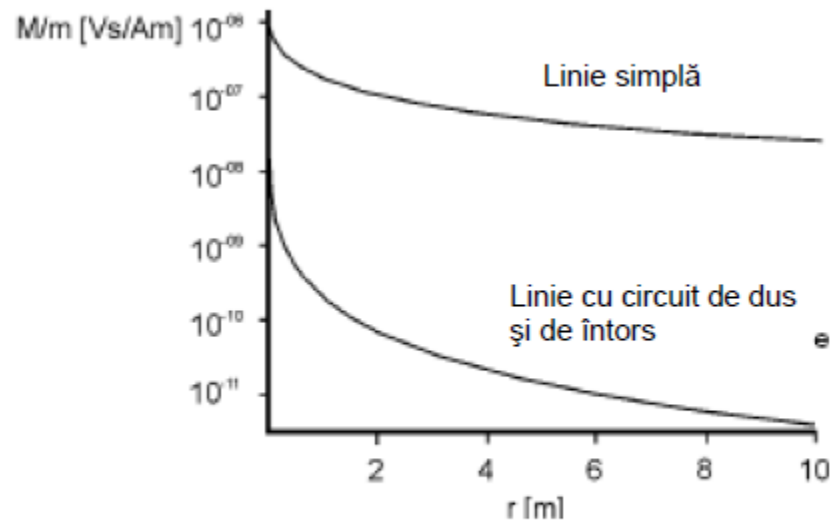
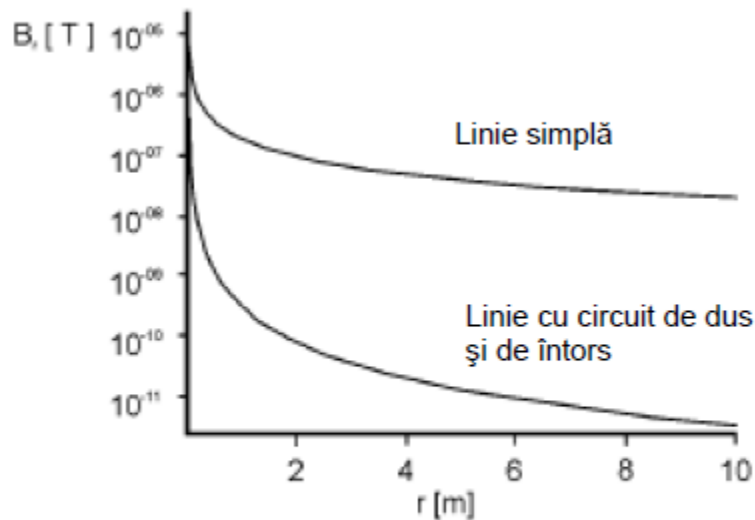
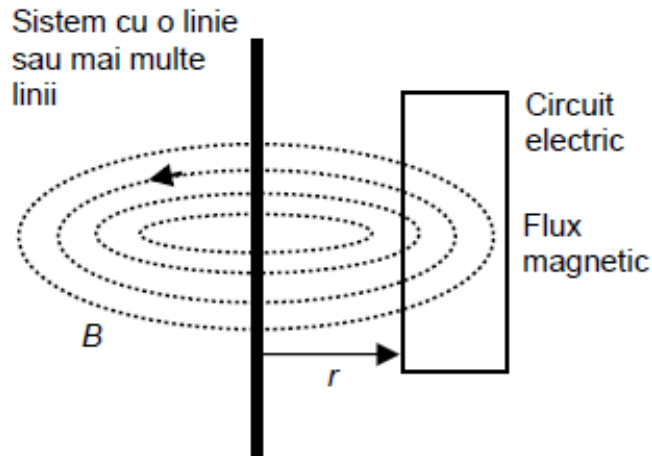
$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{Vs}{Am} \right]$$

Inducția câmpului magnetic al unui circuit egal încărcat pe liniile de ducere și întoarcere este cu două ordine de mărime mai mic și reducerea este mai rapidă față de linia simplă.

Același lucru este adevărat și pentru inductivitatea de cuplaj.



# Dependența geometrică a cuplajului inductiv



- a) Inducția câmpului magnetic pentru o linie simplă și pentru un circuit cu conductoare de dus și de întors
- b) inductivitatea de cuplaj, pe unitatea de lungime, a buclei dintre linia simplă și circuitul cu linie de ducere și întoarcere.

# „Reguli de aur” pentru conformitatea CEM a instalațiilor electrice

- **mențineți aria unei instalații electrice pe cât posibil mai redusă;**
- **maximizați distanța față de o linie cu curent mare;**
- **separați circuitele de putere de cele de date; ♦ utilizați numai circuite de tipul TN-S.**

**T - masele instalației legate direct la pământ, independent de eventuala legare la pământ a unui punct al alimentării**

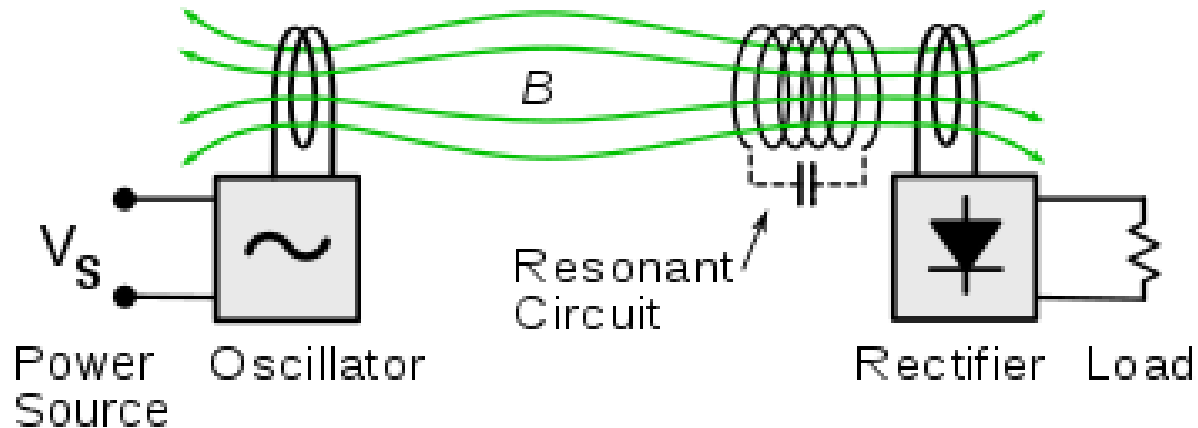
**N - legătura directă a maselor la nulul de lucru al rețelei**

**S - nulul de lucru și cel de protecție sunt separați unul de celălalt**

# Cuplaj magnetic (inductiv)

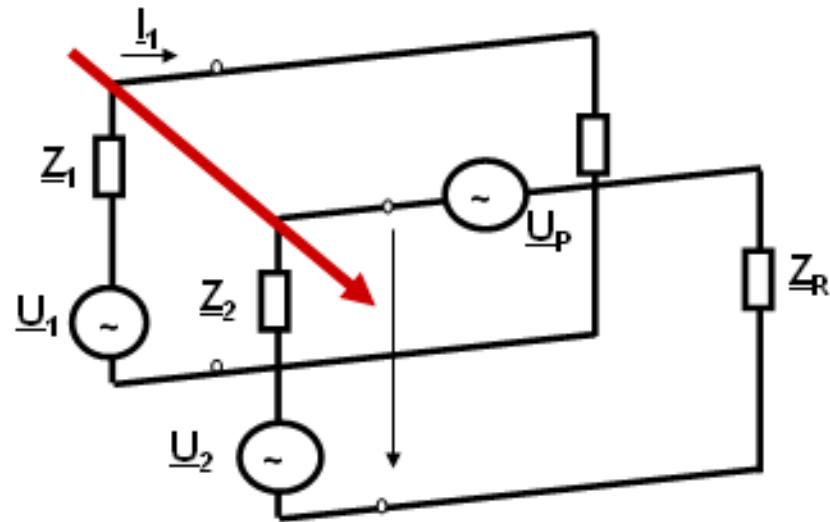
Modalități de neutralizare:

- Folosirea unor conexiuni cât mai scurte sau dus-întors răsucite;
- Folosirea cablurilor coaxiale pentru conexiuni;
- Așezare geometrică potrivită pentru transfer minimal de flux magnetic.



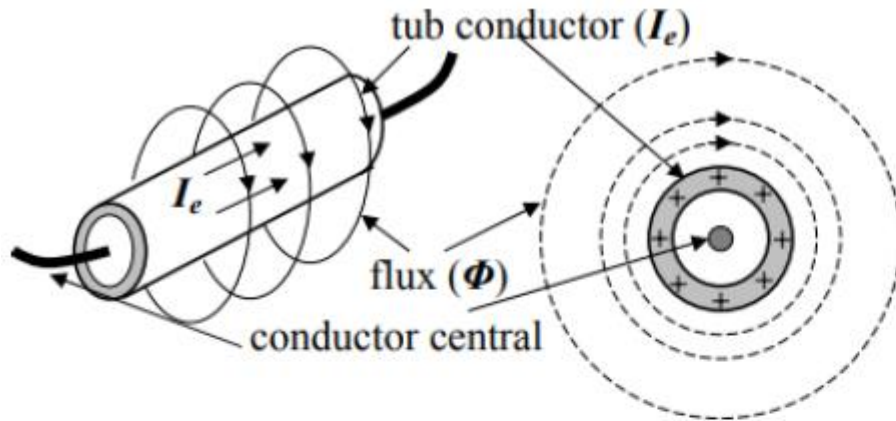
# Măsurile antiperturbative în cazul cuplajului inductiv (magnetic)

- Micșorarea lui  $M$  prin porțiuni paralele ale conductoarelor, cât mai scurte
- Dispunerea perpendiculară a circuitelor
- Mărirea distanței între circuite
- Utilizarea unui conductor de reducere a cuplajului
- Micsorarea ariei circuitelor
  - apropierea conductoarelor
  - prin torsadare
  - utilizand cabluri coaxiale
- Ecranarea sistemului perturbat



Conductorul de reducere formează o buclă în scurtcircuit al cărei câmp magnetic poate compensa parțial câmpul magnetic perturbator.

# Măsurile antiperturbative în cazul cuplajului inductiv (magnetic)



$$L_e = \Phi / I_e$$

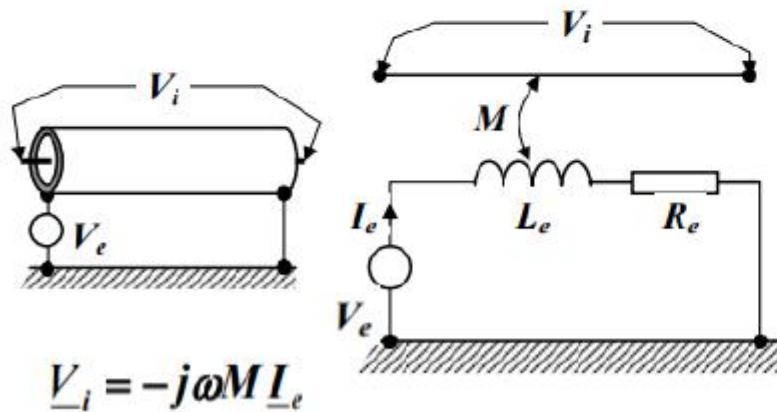
$$M = \Phi / I_e = L_e$$

$$\underline{I}_e = \frac{V_e}{R_e + j\omega L_e} = \frac{V_e}{L_e} \cdot \frac{1}{\frac{R_e}{L_e} + j\omega}$$

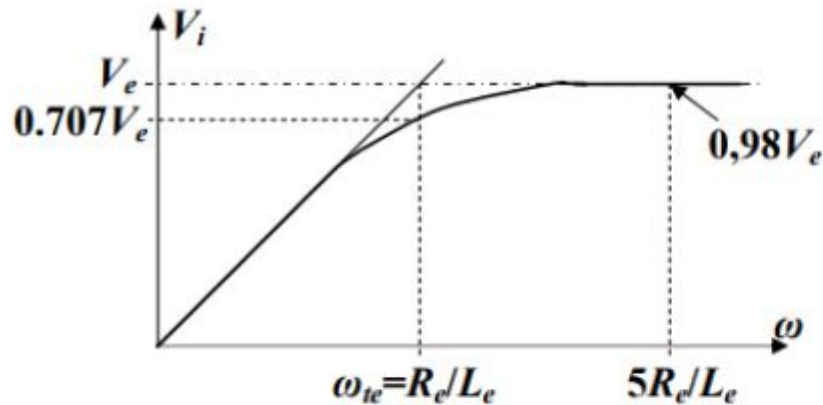
$$\underline{V}_i = V_e \frac{j\omega M}{L_e} \cdot \frac{1}{\frac{R_e}{L_e} + j\omega} \text{ și cu } M = L_e$$

$$\underline{V}_i = V_e \cdot \frac{j\omega}{\frac{R_e}{L_e} + j\omega}$$

$$|\underline{V}_i| = V_e \cdot \frac{\omega}{\sqrt{(R_e/L_e)^2 + \omega^2}}$$



# Măsurile antiperturbative în cazul cuplajului inductiv (magnetic)



$$\omega \geq 5R_e/L_e, V_i \approx V_e.$$

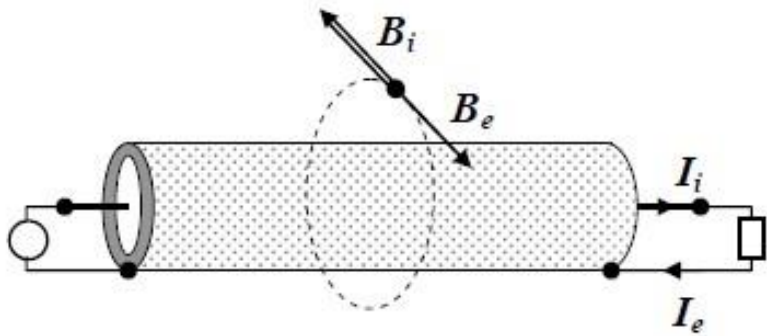
Frecvența la care  $V_i = V_e/\sqrt{2}$  se numește *frecvență de tăiere a ecranului*  $\omega_{te}$ :

$$\omega_{te} = R_e/L_e; f_{te} = R_e/2\pi L_e$$

Majoritatea cablurilor ecranate cu tresă sau folie din cupru au  $f_{te} = 5 \dots 15\text{kHz}$ ; cele cu ecran din folie de aluminiu au  $f_{te} \geq 35\text{kHz}$  din cauza rezistivității mai mari a aluminiului.

# Ecranarea cablurilor și a cuplajului parazit magnetic

## 1. Reducerea perturbațiilor prin cuplaj inductiv folosind ecranarea

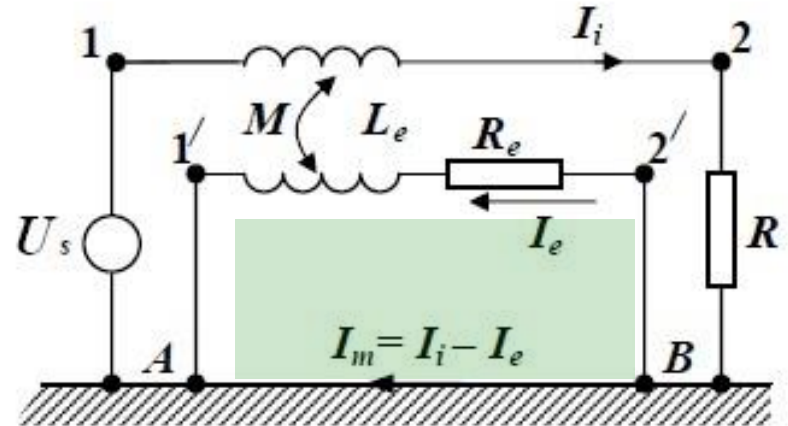
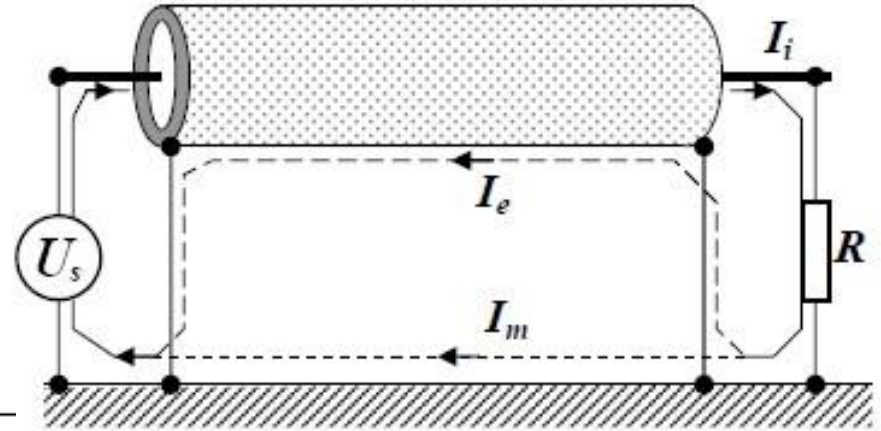


$$(j\omega L_e + R_e)I_e + j\omega M(-I_i) = 0$$

$$I_e = I_i \frac{j\omega}{j\omega + R_e/L_e} = I_i \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{te}}$$

$$f \geq 5f_{et}$$

Pe măsura creșterii frecvenței, curentul prin ecran se apropie de cel din conductorul interior; pentru  $f \geq 5f_{et}$ , întregul curent se închide prin ecran. Acest efect este important la frecvențe mai mari. La frecvențe joase, sub  $f_{et}$ , efectul este redus și legarea la masă a ecranului la ambele capete nu este utilă, poate fi chiar dăunătoare prin formarea unei bucle de masă.

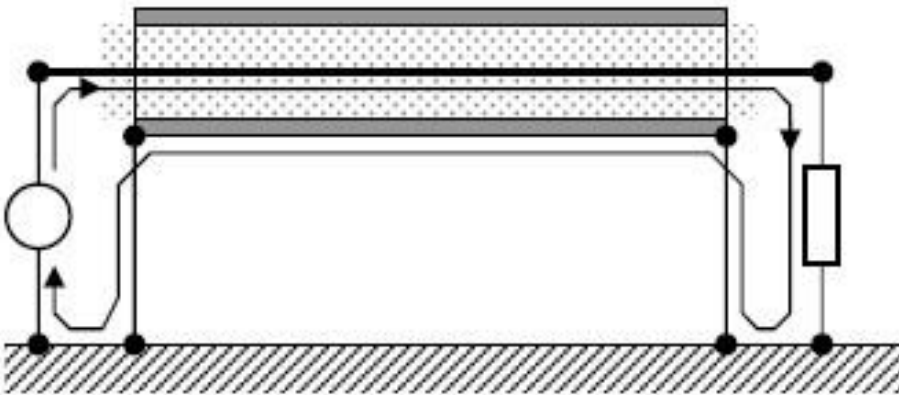


# Ecranarea cablurilor și a cuplajului parazit magnetic

## 2. Protecția cablurilor la perturbații prin cuplaj magnetic, prin ecranare



Frecvența de semnal este sub frecvența de tăiere  $\rightarrow$  curentul se închide prin masă iar aria intersectată de câmpul perturbator este maximă



Frecvența de semnal este peste frecvența de tăiere ( $\approx 5f_{et}$ )  $\rightarrow$  curenții prin ecran și conductorul interior sunt egali (aria circuitului este mult mai mică, deci perturbația indusă este mai redusă)



# Ecranarea cablurilor și a cuplajului parazit magnetic

## Cabluri echipamente



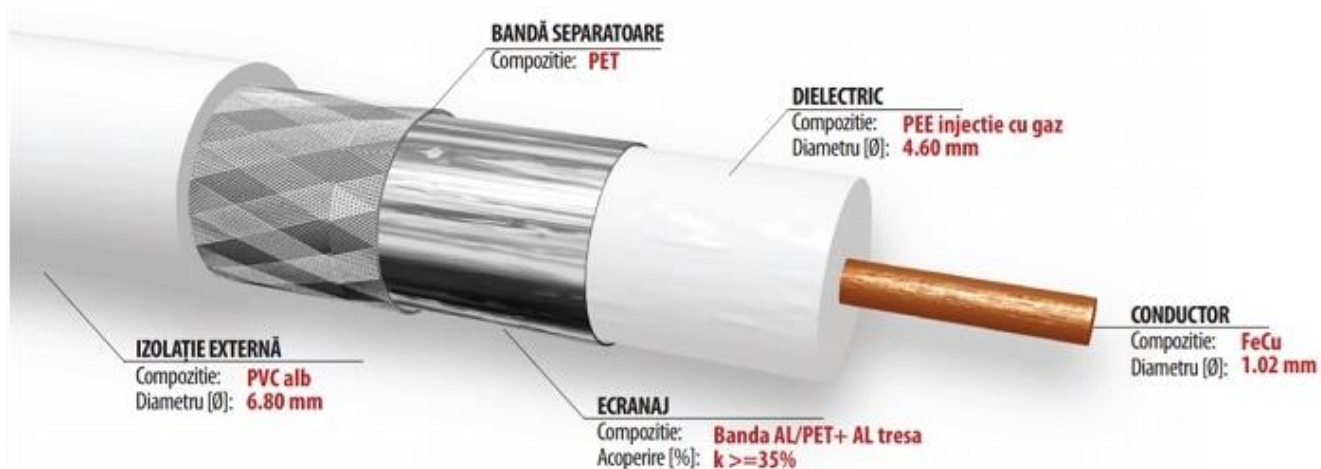
## Cabluri control



## Cabluri putere



## Cabluri comunicații



# Cuplaj prin radiație electromagnetică

Reprezintă interferența provocată de câmpurile electromagnetice variabile în timp.

Când vorbim despre cuplajul prin radiație electromagnetică trebuie să luăm în considerare interacțiunea dintre câmpul magnetic și cel electric. Pentru aceasta trebuie să ne raportăm la relațiile de legătură descrise de ecuațiile Maxwell:

$$\text{rot } \underline{\underline{H}} = \frac{\partial \underline{\underline{D}}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \underline{\underline{H}} = j\omega\varepsilon_0 \underline{\underline{E}}$$

$$\text{rot } \underline{\underline{E}} = -\frac{\partial \underline{\underline{B}}}{\partial t}$$

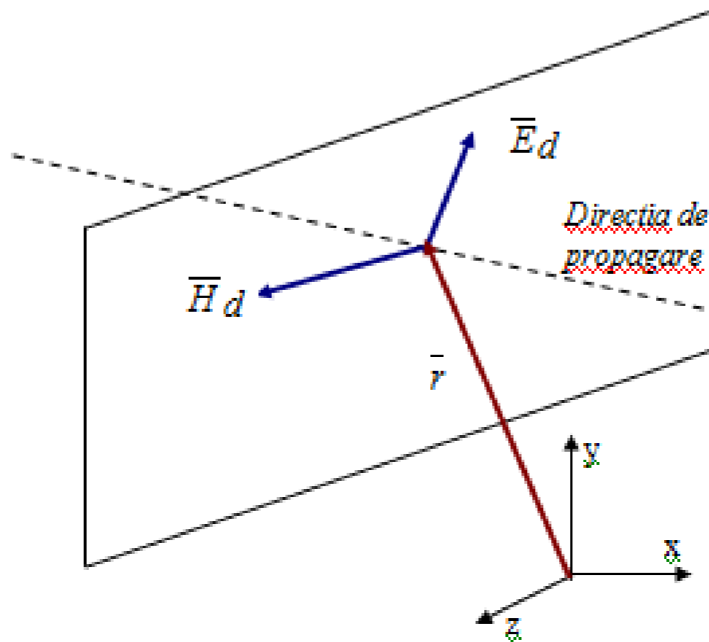
$$\text{rot } \underline{\underline{E}} = -j\omega\mu_0 \underline{\underline{H}}$$

Cuplajul prin radiație electromagnetică apare atunci când energia electromagnetică emisă de o sursă se propagă și induce tensiuni și curenți într-un alt circuit din apropiere sau depărtare, câmpul electromagnetic propagându-se cu viteza luminii.

# Cuplaj prin radiație electromagnetică

La mare distanță, câmpurile E și H apar întotdeauna împreună și sunt legate prin legea inducției electromagnetice:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \longrightarrow \text{Unda electromagnetică}$$



$$E(r, t) = E_d(n \cdot r - v \cdot t)$$

$$H(r, t) = \frac{1}{Z_0} n \times E_d(n \cdot r - v \cdot t)$$

Dispozitiv  
perturbat

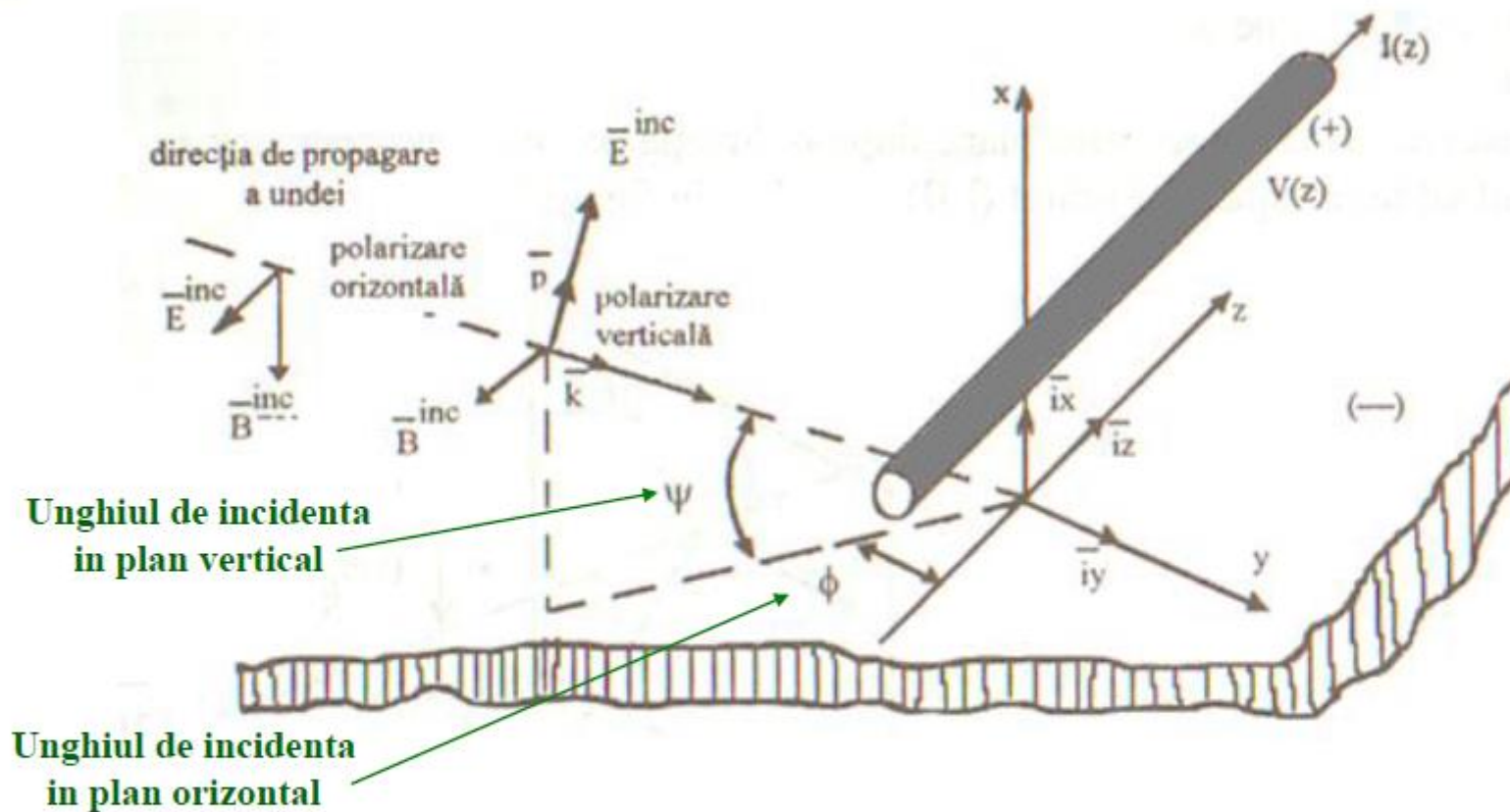
*r* - vectorul de poziție al undei în spațiul liber

*N* - versorul direcției de propagare  
(perpendicular pe planul E,H)

*V* - viteza undei

$Z_0 \approx 377 \Omega$  impedanța caracteristică a undei

# Cuplaj prin radiație electromagnetică



**Polarizare verticală** = vectorul  $E_i$  este conținut în planul de incidență, vectorul  $H_i$  este paralel cu interfața

**Polarizare orizontală** = vectorul  $H_i$  este în planul de incidență, vectorul  $E_i$  este paralel cu interfața

# Măsuri antiperturbative în cazul cuplajului prin radiație

se realizeaza cu ajutorul:

- Filtrelor
- Ecranelor
- A spațiilor (cabine) ecranate