

Capitolul 1
Noțiuni introductive
NOȚIUNI INTRODUCATIVE

Subiecte

- 1.1. Generalități**
- 1.2. Unități de măsură specifice**
- 1.3. Cuplajul prin impedanța comună**
- 1.4. Cuplajul capacitiv placă –șasiu**
- 1.5. Cuplajul prin diafonie**
- 1.6. Cuplajul prin radiație**

Evaluare: 1. Răspunsuri la întrebările finale
2. Discuție pe tema: “Necesitatea introducerii normelor de CEM”

1.1. Generalități

Problemele de compatibilitate electromagnetică au apărut o dată cu dezvoltarea aplicațiilor electrotehnicii și în primul rând a electronicii, în cele mai diferite domenii de activitate și au fost impuse, inițial, de extinderea telecomunicațiilor. Dezvoltarea aplicațiilor neliniare și în special, a electronicii, cu precădere în direcția creșterii vitezei de lucru și a reducerii consumului circuitelor, creșterea gradului de interconectare dintre echipamente și respectiv, sisteme, inclusiv extinderea rețelelor de alimentare cu energie electrică, dar și de altă natură, au condus la creșterea gradului de *poluare electromagnetică* cu consecințe imprevizibile asupra funcționării echipamentelor.

Compatibilitatea electromagnetică (CEM) reprezintă capacitatea aparatelor electrice, electronice și de radio de a coexista, în sensul de a nu emite niveluri inacceptabile de perturbații electromagnetice, precum și de a nu reacționa în mod imprevizibil la emisia altor echipamente din mediul ambiant în care lucrează. O problemă suplimentară o reprezintă interacțiunea dintre fenomenele electromagnetice și organismele vii care, de asemenea, introduce limitări în ceea ce privește nivelul radiațiilor din mediul exterior.

Dacă până nu demult *electronica* era rară, mare și scumpă, în prezent este deosebit de răspândită, caracterizată printr-o densitate foarte mare a componentelor, utilizează semnale rapide cu un nivel energetic coborât și, nu în ultimul rând, cu un înalt grad de interconectare. Din considerente economice, legate de gestionarea unei resurse naturale limitate cum este *spectrul de frecvențe*, apare necesitatea adoptării unei soluții de compromis în ceea ce privește nivelul perturbațiilor emise și imunitatea față de acestea, impusă prin norme.

Studierea sistematică a problemelor de compatibilitate electromagnetică a început în perioada anilor 1970; în urma studiilor efectuate, Comisia de Electrotehnică Internațională

Capitolul 1

Noțiuni introductive

(CEI) a emis o serie de norme de compatibilitate electromagnetică. Asigurarea compliancei cu normele CEM, în țările Comunității Economice Europene (CEE) a fost impusă prin *Directiva CEM 89/336/CEE*, intrată în vigoare la 01.01.1992, care cerea ca aproape toate echipamentele electrice și electronice, produse sau folosite, să nu producă interferențe electromagnetice. Această directivă a acordat o perioadă de tranziție în aplicare până la 31 decembrie 1995. În prezent, din anul 2007, a intrat în vigoare *noua Directivă CEM 2004/108*.

Noua directivă CEM cere identificarea perturbațiilor relevante și a fenomenelor CEM pentru aparatele considerate și mediul ambiental în care lucrează, în scopul de a specifica evaluările relevante care trebuie să fie efectuate. Deși în Directiva CEM nu sunt specificate limitele de frecvențe, în practică, se consideră domeniul de la 0 Hz la 400 GHz. Pentru unele aparate, fenomenele electromagnetice și implicit, domeniul de frecvențe, sunt inerent limitate prin principiul constructiv sau funcțional a aparatului. Cu toate acestea, este necesar ca evaluarea conformității CEM să se efectueze într-o gamă relevantă de frecvențe, care să acopere toate combinațiile de fenomene posibile care ar putea să apară în cadrul utilizării. Selecția fenomenelor evaluate depinde, în primul rând, de mediul ambiant în care aparatul urmează a fi utilizat și de următoarele aspecte:

- a) Emisii de joasă frecvență ale rețelei de alimentare (armonici, fluctuații de tensiune), pentru toate aparatele care urmează a fi conectate direct la rețeaua de joasă tensiune.
- b) Emisiile de înaltă frecvență.
- c) Aspectele de imunitate.

Evaluarea conformității se poate realiza: prin controlul intern al producției sau cu ajutorul comisiei/organismului de notificare și presupune evaluarea CEM și/sau prin corecta aplicare a standardelor armonizate relevante.

În vederea asigurării compliancei cu Directiva CEM au fost elaborate o serie de standarde europene (EN), echivalente unor norme ale Comisiei Internaționale de Electrotehnică, care stabilesc condițiile de funcționare pentru aparate și instalații, nivelul emisiei, nivelul perturbațiilor acceptate, metodele de măsurare, testare și evaluare ale performanțelor CEM. Deoarece nivelul efortului depus pentru încadrarea în aceste norme este funcție de efectele și consecințele căderilor, compliancea cu normele CEM nu este garantată în orice condiții, ci ea depinde de o serie de factori.

Principalul obiect de studiu al CEM îl reprezintă perturbarea electromagnetică care reprezintă orice fenomen care poate degrada performanțele unui dispozitiv, echipament sau sistem electric, electronic sau de radio. În relație cauză - efect cu perturbarea electromagnetică se află *interferența electromagnetică*, care constă în degradarea performanțelor

Capitolul 1 Noțiuni introductive

unui dispozitiv, echipament sau sistem, ori canal de transmisiune, cauzată de o perturbație electromagnetică.

Din punctul de vedere al echipamentelor și sistemelor electrice, electronice și de radio, perturbațiile electromagnetice pot fi: *emise* sau *recepționate*, iar calea de vehiculare se realizează prin *conducție* sau prin *radiație* (fig.1.1).

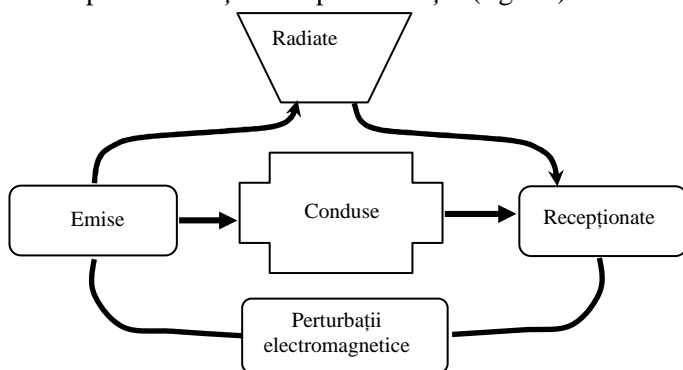


Fig.1.1. Clasificarea perturbațiilor

Sursele de producere a perturbațiilor pot fi *naturale* (fulgerele, descărcările electrostatice etc.) sau *artificiale*, cele mai importante fiind datorate "electronicii" și consumatorilor neliniari. Reducerea nivelului de perturbare se realizează prin limitarea nivelului perturbațiilor emise și diminuarea cuplajelor dintre echipamente, precum și prin creșterea imunității.

Intercomunicarea echipament - mediu exterior, inclusiv rețelele prin care se fac interconectări, se realizează prin intermediul porturilor. Prin *port* se înțelege o interfață particulară a echipamentului cu mediul electromagnetic exterior pentru un echipament specificat (fig.1.2), care reprezintă un loc de acces pentru energie sau unde pot fi observate sau măsurate anumite mărimi variabile; dintre acestea, trebuie evidențiat

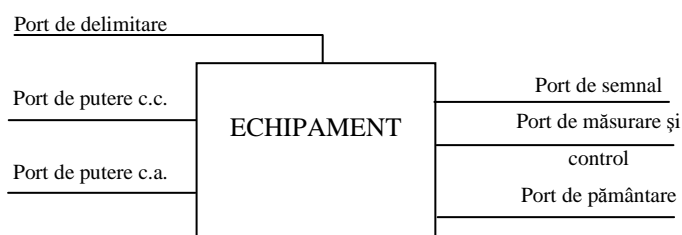


Fig.1.2. Porturi ale echipamentului

portul de delimitare care reprezintă granița fizică a echipamentului prin care câmpul electromagnetic poate fi radiat sau prin care poate veni în contact cu perturbațiile exterioare radiate. O pereche de conductoare reprezintă un caz particular de port, dar și unele conductoare neintenționate, cum sunt coloanele de apă, tubulatura de aer și alte instalații pot acționa ca porturi.

Imunitatea reprezintă capacitatea unui dispozitiv, echipament sau sistem de a lucra fără să se degradeze în prezența unei

Capitolul 1

Noțiuni introductive

perturbații electromagnetice. *Nivelul de imunitate* este nivelul maxim al unei perturbații electromagnetice incidente care acționează asupra unui dispozitiv, echipament sau sistem, acestea rămânând capabile să funcționeze la nivelul de performanțe impus. Lipsa de imunitate reprezintă susceptibilitatea produsului; prin *susceptibilitate* se înțelege incapacitatea unui dispozitiv, echipament sau sistem de a lucra în prezența unei perturbații electromagnetice fără să se degradeze.

Mediul ambiant electromagnetic reprezintă totalitatea fenomenelor electromagnetice ce există într-un loc dat. Nivelurile de severitate impuse testelor pentru un anumit produs depind, în general, de *condițiile ambiante* de natură electromagnetică și de modul de instalare.

Se definește ca *zonă rezidențială, comercială sau de industrie ușoară* o zonă care se caracterizează prin alimentarea directă cu energie electrică de la rețelele publice de joasă tensiune; *zona industrială* se caracterizează prin aceea că este alimentată de la rețelele de înaltă sau de medie tensiune și în cadrul ei se folosesc echipamente industriale, științifice sau medicale, există sarcini inductive sau capacitive mari conectate frecvent, sau echipamente care folosesc curenți și câmpuri magnetice asociate mari.

Pentru a defini un *dispozitiv/componentă* se ține seama de funcția intrinsecă a acestuia de a fi parte a unui echipament și lipsa intenției de a fi folosit independent.

Noua Directivă CEM 2004/108/CE clarifică unele aspecte CEM și introduce unele precizări suplimentare referitoare la domeniul de aplicare a normelor CEM, dintre care se pot cita:

- Prin *echipamente inerent benigne* se înțeleg: cabluri, conectoare, baterii și acumulatori (cu excepția celor „inteligente”), căști radio, difuzoare, comutatoare, siguranțe, becuri, antene, sarcini rezistive (de ex., radiatoare fără termostat), anumite tipuri de echipamente de înaltă tensiune (inductivități și condensatoare folosite în cadrul filtrelor, transformatoare, motoare de inducție, ceasuri cu cuarț fără funcții suplimentare) etc. și sistemele/instalațiile construite din aceste elemente. Ele nu pot să conțină dispozitive semiconductoare.

- Prin *aparat* se înțelege un dispozitiv sau o combinație de dispozitive, realizat astfel încât să fie disponibil pentru utilizarea finală; are o funcție și carcasă/cutie proprie. Se poate numi: produs/bun finit care se poate vinde fără un control al cumpărătorului care, în principiu, nu are competențe CEM. Pot să producă sau să fie afectate de perturbații.

- *Instalațiile fixe* sunt o combinație particulară de diferite aparate și eventual, alte dispozitive, asamblate și instalate împreună și care urmează să fie folosite intenționat și în mod permanent într-un loc predestinat. Definiția acoperă toate instalațiile, începând cu cele casnice și terminând cu cele comerciale, industriale sau de nivel național. Ca exemple de instalații, pot fi citate: întreprinderile industriale, sursele

Capitolul 1
Noțiuni introductive

energetice, rețelele de telecomunicații, de calculatoare, instalațiile electrice de iluminat, sistemele automate, instalațiile de răcire, macaralele, generatoarele eoliene, instalațiile de purificare și pompare a apei, infrastructura feroviară etc. În continuare vor fi definite unele noțiuni folosite frecvent în CEM:

Echipamentul de testat, EUT, (engl. Equipment Under Test), reprezintă produsul (dispozitivul/ echipamentul/sistemul) la care urmează să fie determinate performanțele CEM; el poate fi considerat ca *sursă de perturbații*, dacă este element generator/emisător de perturbații electromagnetice sau *victimă*, dacă este supus acțiunii unei perturbații electromagnetice externe. În realitate, orice echipament, care se află în stare de funcționare, este concomitent și sursă de perturbații și victimă.

Un curent de *mod comun*, MC, circulă în același sens prin toate conductoarele unui cablu; diferența de potențial a unui cablu pentru MC este cea dintre potențialul mediu al conductoarelor și masă. Un curent de *mod diferențial*, MD, circulă în opoziție de fază pe două fire pereche.

Trebuie menționat faptul că din cauza structurii circuitelor (prin elementele parazite), semnalele aparținând unui anumit mod se pot transforma în semnale ce aparțin celuilalt mod, adică, semnalele de MC se pot transforma în semnale de MD și invers (fig. 1.3 a și b).

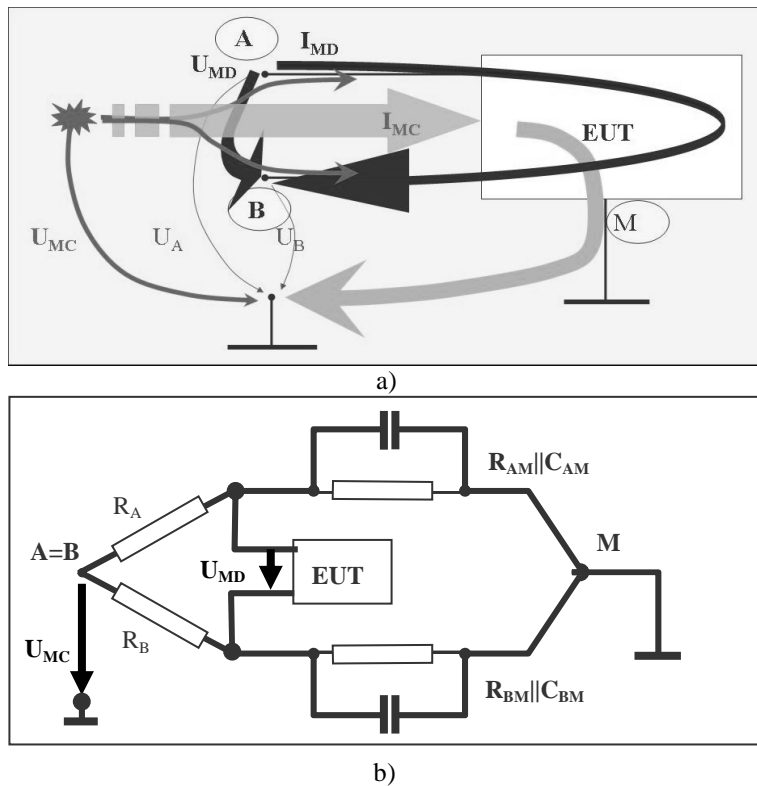


Fig.1.3. Explicativă la transformarea MC în MD

Capitolul 1 Noțiuni introductive

Procesul de evaluare a modului de *asigurare a complianței* cu normele CEM presupune:

1. Identificarea cazului cel mai defavorabil pentru aparat în raport cu caracteristicile CEM.
2. Realizarea evaluării CEM pentru cazul cel mai defavorabil, care să acopere problemele cele mai relevante.
3. Se declară cazul cel mai defavorabil reprezentativ pentru întreaga serie de aparate (inclusiv pentru variante).
4. Documentația de selecție a cazului cel mai defavorabil se va prezenta și în documentația tehnică.

1.2. Unități de măsură specifice

Din cauza dinamicii mari a semnalelor întâlnite în CEM, o caracteristică a măsurărilor este aceea că rezultatele se exprimă în valori relative logaritmice.

Nivelul absolut al unui semnal L_p , se definește ca fiind logaritmul raportului dintre *puterea semnalului* și o *putere de referință* de **1mW**:

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ mW}} \quad (1.1)$$

și are ca unitate de măsură [**dB (mW)**] sau [**dBm**].

Ca mărime de referință se poate considera și o putere de **1pW**, rezultând ca unitate de măsură [**dB (pW)**].

Observație: În CEM se consideră că puterea semnalului este disipată pe un rezistor cu rezistența de 50 Ω .

Pentru tensiuni, raportarea se poate face astfel:

■ la o tensiune de referință, $U_0 = 0,775 \text{ V}$ (1 mW disipat pe o rezistență de 600 Ω), rezultând:

$$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{0,775 \text{ V}}, \quad (1.2)$$

cu unitatea de măsură [**dB (0,775 V)**] sau [**dB**];

■ la o tensiune de referință, $U_0 = 1 \text{ V}$, rezultând:

$$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{1 \text{ V}}, \quad (1.3)$$

cu unitatea de măsură [**dBV**],

■ la o tensiune de referință, $U_0 = 1 \mu\text{V}$, rezultând:

$$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{1 \mu\text{V}}, \quad (1.4)$$

Capitolul 1
Noțiuni introductive

cu unitatea de măsură [dBμV].

Nivelul relativ față de o putere oarecare, P_0 , este:

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0}, \quad (1.5)$$

cu unitatea de măsură [dBm].

Trebuie menționat faptul că raportarea se poate efectua și pentru alte mărimi; de exemplu, în cazul modulației, raportarea se face la purtătoare, rezultând unitatea [dBc] (c – carrier), la antene raportarea câștigului se poate face la antena isotropă rezultând [dBi], sau la antena dipol rezultând [dBd]. În mod similar pot fi definite unități de măsură pentru *current* - [dBμA], *câmp electric* - [dBμV/m], *câmp magnetic* - [dBμA/m].

Aplicație:

Să se stabilească relația de transformare din [dBm] în [dBμV].

S.: Se poate scrie:

$$\begin{aligned} L[\text{dBm}] &= 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ mW}} = 10 \cdot \lg \frac{U^2 / Z}{1 \text{ mW}} = \\ &= 10 \cdot \lg \frac{U_0^2 (U^2 / U_0^2) / Z}{1 \text{ mW}} \end{aligned}$$

Înlocuind $U_0 = 1 \mu\text{V}$ și $Z = 50 \Omega$, se obține:

$$\begin{aligned} L[\text{dBm}] &= 10 \cdot \lg \frac{(10^{-6})^2}{10^{-3}} + 20 \cdot \lg \frac{U^2}{1 \mu\text{V}} - \\ &- 10 \cdot \lg 50 = -107 + L[\text{dB}\mu\text{V}] \end{aligned}$$

de unde rezultă:

$$L[\text{dB}\mu\text{V}] = 107 + L[\text{dBm}].$$

1.3. Cuplajul prin impedanța comună

Calea de vehiculare a perturbațiilor electromagnetice între echipamentele electrice, electronice și de radio se produce prin intermediul unor *cuplaje electromagnetice*.

Cuplajul prin impedanța comună Z, numit și *cuplaj galvanic* a două circuite (fig.1.4), constă în apariția unei tensiuni perturbatoare U într-unul dintre circuite, dacă cel de-al

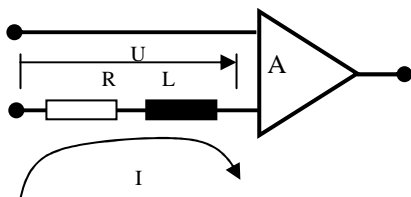


Fig.1.4. Cuplajul prin impedanța comună

Capitolul 1
Noțiuni introductive

doilea circuit este parcurs de curentul I . Acest tip de cuplaj contează la circuitele de semnal mic, începând din curent continuu și până la frecvențe înalte, efectul putând fi redus prin scăderea impedanței comune Z , respectiv, a curentului parazit I .

Se consideră circuitul din fig.1.4 în care, pe unul dintre conductoarele de semnal care reprezintă o latură comună a celor două circuite, cu rezistența R și inductanța L , circulă curentul parazit I . Rezistorul R poate să apară sub forma unei conductor cu lungimea l și secțiunea S , având valoarea rezistenței:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.6)$$

Pentru o placă (fig.1.5), rezistența electrică, dintre două puncte ale sale, este:

$$R = \frac{\rho}{\pi d} \ln \frac{l}{r_0} \quad (1.7)$$

Valorile date de relațiile (1.6) și (17) sunt valabile în curent continuu; în curent alternativ apare efectul pelicular care constă în reducerea secțiunii echivalente a conductorului. *Efectul pelicular* reprezintă fenomenul de creștere a densității

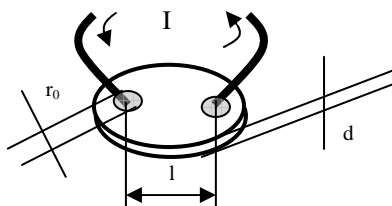


Fig.1.5. Rezistența unei plăci

de curent spre exteriorul conductorului și deci, reducerea secțiunii echivalente a acestuia în cazul în care este parcurs de un curent de înaltă frecvență.

Adâncimea de pătrundere δ (fig.1.6), reprezintă distanța de la marginea conductorului până la punctul de intersecție dintre tangenta la distribuția densității de curent și axa absciselor și se

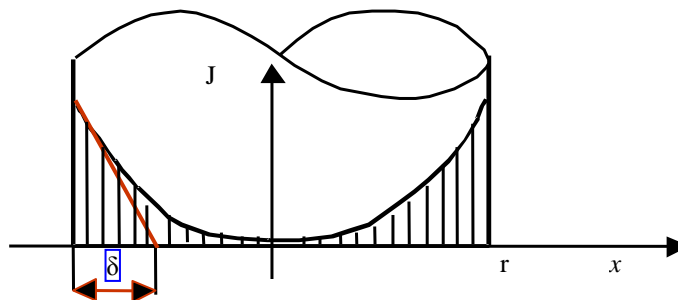


Fig.1.6. Explicativă la efectul pelicular

Capitolul 1 Noțiuni introductive

determină cu relația:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (1.8)$$

unde: μ reprezintă permeabilitatea magnetică, iar ω , pulsația semnalului. Ca urmare a efectului pelicular, o dată cu creșterea frecvenței, are loc și o creștere a rezistenței conductorului.

În ceea ce privește valoarea inductivității L a impedanței comune din fig.1.4, ea depinde de geometria conexiunii și de poziția ei față de alte conductoare. Merită a fi menționat faptul că, la aceeași secțiune a conductorului, conductoarele rotunde au o inductivitate mai mare decât cele cu profil dreptunghiular și de aceea, în practică, pentru anumite cabluri, de exemplu pentru rețelele de pământare, se preferă conductoarele cu profil dreptunghiular. În condiții normale, *inductivitatea lineică* a conductoarelor întâlnite în practică este cuprinsă între 0,5 și 2 $\mu\text{H/m}$; pentru circuitele imprimate inductivitatea lineică pentru conductoarele liniare este de circa 1 $\mu\text{H/m}$, independentă de secțiunea conductorului și aceasta coboară la circa 0,3 $\mu\text{H/m}$ dacă conductorul de retur este foarte aproape (efectul reductor).

La frecvențe ridicate se ține seama de dependența dintre modulul impedanței și lungimea cablului exprimată în lungimi de undă. Dacă lungimea conductorului este mai mare decât $\lambda/30$, acesta devine antenă și nu mai poate asigura echipotențialitatea. Pentru ca un conductor să nu devină antenă, se recomandă ca lungimea lui maximă să fie mai mică decât $\lambda/10$.

Un caz particular de cuplaj prin impedanța comună îl reprezintă cuplajul prin impedanța rețelei de alimentare. Pentru distanțe mai mari de 30 m, rețeaua de alimentare reprezintă o linie de transmisiune cu pierderi, având impedanța caracteristică de aproximativ 100 - 200 Ω până la circa 10MHz. Trebuie avut în vedere faptul că în orice rețea predomină discontinuitățile introduse prin conectarea diferiților consumatori, joncțiunea cablurilor etc., toate acestea având tendința de a crește atenuarea în radiofrecvență.

- **Să se determine impedanța unui conductor realizat din cupru cu diametrul de 4 mm și lungimea de 10 m la frecvența de 1 MHz. De la ce frecvență conductorul devine cu caracter inductiv?**
- **Care este adâncimea de pătrundere în cupru și respectiv, în aluminiu la 100 MHz?**
- **Explicați din ce cauză prin conectarea mai multor consumatori crește atenuarea în radiofrecvență.**

Capitolul 1

Noțiuni introductive

1.4. Cuplajul capacitiv placă –șasiu

Cuplajul capacitiv placă-șasiu (cuplajul dintre un conductor și masa apropiată, fig.1.7), constă în apariția unui curent capacitiv ca urmare a variației unei diferențe de potențial.

Curentul I care ia naștere prin capacitatea parazită C dintre conductor și masă are expresia:

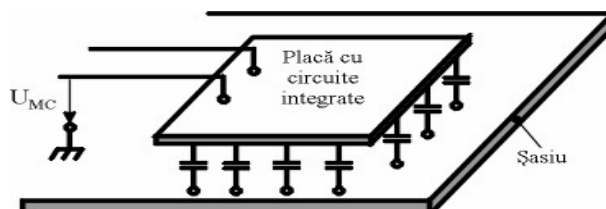


Fig.1.7. Cuplajul capacitiv placă-șasiu

$$i = \frac{\Delta u}{\Delta c} \text{ sau } I = \omega C U \quad (1.9)$$

Acest cuplaj capacitiv se mai numește și *cuplaj prin efect de mână*, deoarece la unele circuite se constată creșterea zgomotului la apropierea mâinii și dispariția efectului la atingerea ecranului (explicația fenomenului constă în modificarea capacității din circuit, mâna fiind legată prin corp la pământ, iar prin atingere, ea devine ecran).

Dacă se consideră o placă cu circuite electronice izolată față de șasiul metalic care reprezintă și planul de masă (fig.1.7), tensiunea de mod comun va produce un curent care se închide prin placă și capacitățile parazite la șasiu. Capacitatea parazită totală dintre placă și șasiu are două componente:

- *capacitatea intrinsecă* a plăcii C_i , echivalentă capacității unui disc cu diametrul D (egal cu diagonala plăcii pentru forme dreptunghiulare), situat la distanță infinită față de pământ:

$$C_i \text{ [pF]} = 0,35D \text{ [cm]} ; \quad (1.10)$$

- *capacitatea echivalentă* condensatorului plan C_p , format între placă și șasiu:

$$C_p = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1.11)$$

În realitate fiecare traseu are numai o fracțiune k din capacitatea totală $C_i + C_p$, proporțională cu suprafața sa, rezultând un curent de MC cu valoarea:

$$i = k(C_i + C_p) \frac{\Delta u}{\Delta t} \text{ sau } I = \omega k(C_i + C_p) \quad (1.12)$$

Capitolul 1 Noțiuni introductive

Reducerea perturbațiilor datorate cuplajului capacitiv placă-șasiu se poate realiza prin depărtarea plăcii de șasiu (scade C_p) sau prin renunțarea la "0V" flotant pentru placă. O altă soluție de reducere a acestor perturbații constă în folosirea ecranelor electrice care vor fi obligatoriu legate la masă (în cazul cutiilor din plastic se recomandă metalizarea pereților).

- **O placă cu circuite electronice având forma pătrată cu latura de 20 cm, situată la 2 mm de șasiu, este testată pe MC cu o tensiune cu amplitudinea de 500 V și frecvența de 1 MHz. Presupunând că pista cea mai sensibilă deține 2% din suprafața plăcii, să se determine curentul parazit care ia naștere; care este amplitudinea curentului parazit dacă pe MC apare un salt de tensiune de 500 V cu un timp de creștere de 10 ns?**

1.5. Cuplajul prin diafonie

Acest tip de cuplaj poate fi prin diafonie inductivă, dacă cuplajul se realizează prin intermediul câmpului magnetic sau prin diafonie capacitivă dacă cuplajul se realizează prin intermediul câmpului electric.

Cuplajul prin diafonie inductivă, în cazul a două circuite, este datorat variației curentului dintr-un circuit și se manifestă (fig.1.8), prin producerea unei tensiuni parazite în cel de-al doilea circuit:

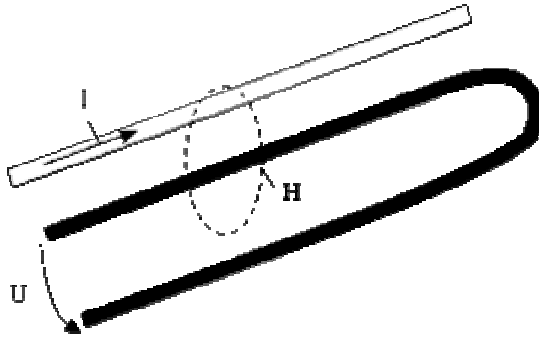


Fig. 1.8. Explicativă la diafonia inductivă

$$u = M \frac{\Delta i}{\Delta t} \text{ sau } U = \omega M I \quad (1.13)$$

unde ω reprezintă pulsația curentului perturbator, iar M inductivitatea de cuplaj mutual. Cuplajul poate fi redus prin micșorarea inductivității mutuale M și prin limitarea variațiilor rapide ale curentului prin firul sursă de perturbații (di/dt).

Din relația (1.13) rezultă că diafonia nu apare în circuitele de c.c. și este slabă la frecvențe joase; ea poate să apară pe MD, cazul cel mai defavorabil fiind atunci când lungimea

Capitolul 1

Noțiuni introductive

conductorului este comparabilă cu lungimea de undă. Pentru reducerea diafoniei inductive se recomandă să se folosească perechi de conductoare tur-retur, asigurând astfel un efect reductor care poate fi destul de important, diafonia, în cel mai rău caz, fiind de maxim 8 % din amplitudinea semnalului.

O altă soluție de reducere a diafoniei inductive constă în *torsadarea* (răsucirea) firelor; datorită reducerii și alternării suprafeței prin care trece câmpul magnetic, se reduce variația fluxului magnetic echivalent. Cel mai eficient mod de reducere a diafoniei se obține atunci când torsadarea firelor din pereche se face cu pas inegal. Pentru cablurile de tip bandă plată se recomandă să se folosească conductoare pereche, adică un conductor activ împreună cu perechea (care poate fi masa) și care servește drept conductor de retur a curentului.

Dacă lungimea conductoarelor este comparabilă cu lungimea de undă, diafonia este legată și de *fenomenele de propagare*. De exemplu, în caz de neadaptare, pentru un cablu de tip bandă plată cu un singur conductor de masă, pentru un semnal perturbator sub formă de impuls dintr-un conductor, în conductorul victimă apare un impuls parazit scurt. Explicația formării impulsului parazit constă în apariția în firul victimă a impulsului direct și a impulsului reflectat, durata impulsului rezultat fiind funcție de timpul de propagare dus/întors în linia de transmisiune echivalentă (timpul de propagare pentru aceste cabluri este de circa 5,5 ns/m, de unde rezultă o durată a impulsului parazit de circa 11 ns/m). În ceea ce privește valoarea maximă a amplitudinii impulsului parazit, acesta poate atinge, în cazul cel mai defavorabil, aproximativ 0,8 din amplitudinea impulsului perturbator.

Diafonia inductivă poate să apară și pe MC; acest tip de diafonie depinde foarte mult de geometria montajului. Și în acest caz pot să apară fenomene de propagare, cu observația că pentru MC timpul de propagare este de aproximativ 7 ns/m (mai mare ca la MD). Limitarea diafoniei de MC se realizează prin îndepărtarea cablului victimă sensibil. O altă posibilitate o prezintă pozarea în unghi drept a cablurilor care se pot perturba. Deoarece în practică aceste cerințe nu se pot realiza întotdeauna, reducerea diafoniei de MC se face cu ajutorul ecranelor, a filtrelor sau prin plasarea unor toruri de ferite absorbante pe cablurile sensibile.

Trebuie reținut că până la 100 kHz numai cablurile cu un nivel mic al semnalelor sunt sensibile la diafonia de MC, legăturile diferențiale echilibrate și legăturile izolate galvanic având o comportare foarte bună la acest fenomen.

Cuplajul prin diafonie capacitivă este asemănător cuplajului prin diafonie inductivă și constă în apariția unui curent parazit în conductorul victimă ca urmare a variației unui câmp electric/tensiuni; curentul parazit care ia naștere se determină cu relațiile:

Capitolul 1
Noțiuni introductive

$$i = C \frac{\Delta u}{\Delta t} \text{ sau } I = \omega C U \quad (1.14)$$

unde: C reprezintă capacitatea de cuplaj între conductorul victimă și conductorul mediului perturbator, iar ω reprezintă pulsația curentului perturbator.

La frecvențe joase, deoarece schema echivalentă a cuplajului conține un generator de curent cu impedanța internă mare, acest efect este important pentru circuitele cu impedanță mare de intrare. Diafonia capacitivă poate fi redusă prin micșorarea capacității parazite și limitarea variațiilor de tensiune (du/dt). Diafonia capacitivă este nulă în c.c., slabă pentru semnalele de joasă frecvență și echivalentă celei inductive la frecvențe ridicate.

Diafonia capacitivă de MD poate fi redusă prin metodele prezentate la diafonia inductivă; rezultate bune se obțin prin ecranarea electrică fie a cablurilor sursă, fie a cablurilor victimă. Referitor la diafonia capacitivă pentru MC trebuie reținut că ea poate fi redusă în cazurile în care impedanța circuitului este mică.

La frecvențe ridicate, diafonia se realizează concomitent prin ambele cuplaje: inductiv și capacitiv. Dacă lungimea conductorului este mai mare decât $\lambda/10$, pot să apară reflexii supărătoare care amplifică efectele perturbatoare. Pentru a evita reflexiile, trebuie acordată o atenție deosebită problemelor de adaptare a sursei, respectiv, a sarcinii la linia de transmisiune.

- **Explicați fizic fenomenul de reducere a diafoniei inductive pentru conductoarele tur-retur și respectiv, prin torsadarea firelor.**
- **Arătați, pe baza unei scheme echivalente, cum depinde diafonia inductivă, respectiv, cea capacitivă, de impedanța totală din circuit (fig.1.9)**

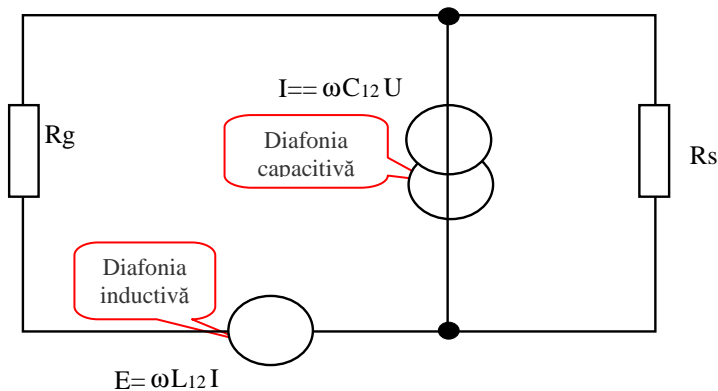


Fig. 1.9. Explicativă la diafonia inductivă și capacitivă

Capitolul 1
Noțiuni introductive

1.6. Cuplajul prin radiație

Studiul propagării și distribuției câmpului electromagnetic are la bază ecuațiile lui Maxwell. Distribuția câmpului magnetic și fenomenele de propagare se pot studia pornind de la dipolul electric și respectiv, de la bucla de curent plată.

Dacă la frecvențe joase este posibil să se calculeze separat contribuția cuplajului inductiv și respectiv, a cuplajului capacitiv (fenomenele de diafonie), la frecvențe înalte nu se mai poate aplica acest principiu deoarece cele două câmpuri: electric și magnetic sunt cuplate (corelate) între ele.

Dipolul electric (Hertz), reprezintă un conductor de lungime $\Delta l < \lambda$, parcurs de un curent de amplitudine I_0 (fig.1.10). Pornind de la ecuațiile lui Maxwell se pot deduce expresiile câmpurilor: electric și magnetic într-un punct, $M(r, \Phi, \theta)$. Deoarece \mathbf{H}_Φ și \mathbf{E}_θ descresc o dată cu creșterea lui r ,

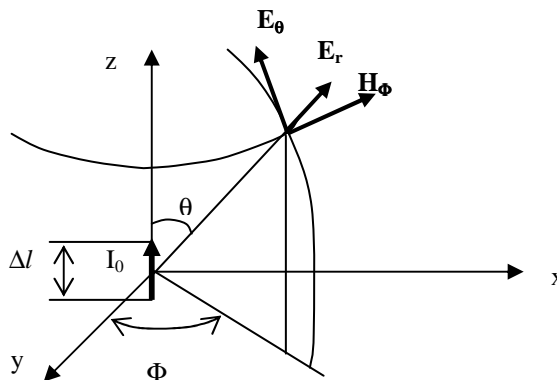


Fig.1.10. Dipolul electric

în timp ce \mathbf{E}_r descresce o dată cu creșterea lui r^2 , devenind neglijabil la distanțe mari și dacă $kr \gg 1$ (termenii $1/kr$ și $1/k^2r^2$ tind la zero), se obține:

$$\begin{aligned} H_\Phi &= jI_0 \frac{k\Delta l}{4\pi} \frac{\exp(-jkr)}{r} \sin \theta \\ E_\theta &= Z_0 H_\Phi \\ E_r &\approx 0 \end{aligned} \tag{1.15}$$

unde: $k = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 2\pi/\lambda$ este numărul de undă, iar $Z_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} = 377 \Omega$ - impedanța caracteristică a spațiului liber.

Deoarece puterea radiată depinde de θ , rezultă că dipolul electric nu radiază energia în mod uniform și deci, are o caracteristică de directivitate.

În cazul în care lungimea conductorului este mare, acesta se divizează în elemente de lungime Δl și se aplică *teorema superpoziției*, adică însumarea efectelor. În realitate, expresiile pentru câmpurile electric și magnetic deduse anterior sunt

Capitolul 1 Noțiuni introductive

valabile numai dacă dipolul nu se găsește în apropierea unor conductoare sau a pământului, în caz contrar, trebuie să se țină seama de efectele produse de acestea asupra câmpului.

Cuplajul dintre un câmp electric variabil și un conductor (fig.1.11), apare ca urmare a reflexiei câmpului electric de către conductor, reflexie care generează un curent de deplasare în acesta. Cuplajul este caracteristic pentru liniile electrice în gol, fiind important pentru circuitele cu impedanță mare de intrare. Acest cuplaj se mai numește și cuplajul câmpului cu firul sau *efect de antenă* și poate fi redus prin ecranarea câmpului electric activ sau a firului.

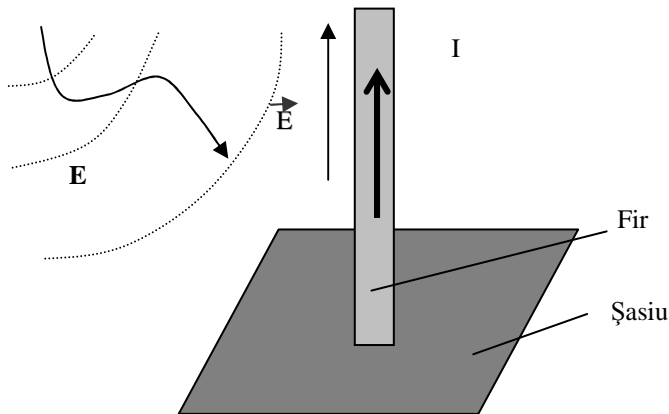


Fig. 1.11. Cuplajul în câmp al firelor

Dacă se consideră un fir legat la șasiu, în prezența unui câmp electric E , se va produce un curent de deplasare de MC, care este maxim dacă câmpul este paralel cu cablul și care se închide la masă prin capacitatea electrică dintre șasiu și conductor. Din cauza reflexiilor multiple din mediul ambiant înconjurător și a unghiului de incidență dintre câmpul incident și conductor, valoarea câmpului electric la nivelul conductorului este cuprinsă între 0 și $2E$. Pentru un câmp electromagnetic de joasă frecvență, astfel încât $l < \lambda/2$, curentul maxim care poate lua naștere în conductor va avea expresia:

$$I \text{ [A]} = E \text{ [V/m]} l^2 \text{ [m]} / 100 \lambda \text{ [m]} \quad (1.16)$$

De exemplu, un câmp electromagnetic având 10 V/m, la o frecvență de 0,1 MHz, va induce într-un cablu lung de 1 m, un curent de circa 0,03mA.

La frecvențe ridicate, unde lungimea conductorului este comparabilă cu lungimea de undă, apar fenomene de rezonanță, iar expresia curentului indus devine:

$$I = E \lambda l / 240 \quad (1.17)$$

Capitolul 1
Noțiuni introductive

De exemplu, pentru cazul anterior, dacă frecvența este 100 MHz, rezultă un curent mult mai mare, de 125 mA, curent care poate avea efecte distrugătoare asupra circuitelor analogice.

Reducerea efectului câmpurilor electromagnetice asupra conductoarelor se face prin ecranare (*cușca Faraday*), folosirea efectelor reductoare (plasarea firelor aproape de masă) sau cu ajutorul unor toruri de ferită plasate pe conductoare, astfel încât să reducă perturbațiile care apar pe MC, protejarea circuitelor prin filtrare. Trebuie reținut că plăcile sunt, de regulă, imune la câmpul electromagnetic, victimele fiind, de obicei, cablurile neecranate. Deosebit de important este faptul că în câmp electric, cuplajul este critic între 30 și 300 MHz, deoarece dimensiunile majorității echipamentelor și ale cablurilor devin comparabile cu lungimea de undă (cuprinsă între 10 m și 1 m), iar energia colectată este maximă când lungimea conductorului este de ordinul $\lambda/4$ sau $\lambda/2$.

Bucula de curent plată reprezintă o buclă conductoare parcursă de curentul de amplitudine I_0 , de rază a , mult mai mică decât distanța până la punctul de observare r (fig.1.12).

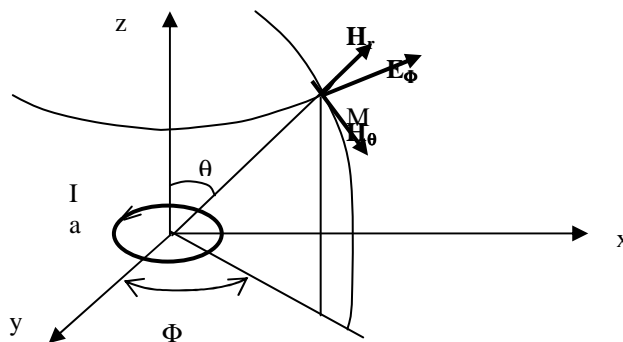


Fig.1.12. Bucula de curent plată

Valorile componentelor câmpului magnetic și respectiv electric, într-un punct $M(r, \Phi, \theta)$, sunt:

$$\begin{aligned}
 H_{\theta} &= -\frac{(ka)^2}{2} I_0 \frac{\exp(-jkr)}{r} \sin \theta \\
 E_{\Phi} &= Z_0 H_{\theta} \\
 H_r &\approx 0
 \end{aligned}
 \tag{1.18}$$

Se constată că față de dipolul Hertz, în cazul buclei de curent plată, câmpul electromagnetic este rotit cu 90° . Bucula de curent are o caracteristică de directivitate asemănătoare cu cea a dipolului, însă este mai puțin eficientă.

Cuplajul în câmp al buclelor constă în apariția unei tensiuni electromotoare într-o buclă conductoare sub acțiunea câmpului electromagnetic exterior. Acest cuplaj apare prin

Capitolul 1

Noțiuni introductive

inducție electromagnetică, tensiunea electromotoare indusă de către fluxul magnetic Φ , creat de câmpul magnetic \mathbf{H} , fiind:

$$u = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.19)$$

Pentru o buclă cu diametrul mai mic decât $\lambda/4$, la un câmp magnetic cu incidență normală, se induce tensiunea:

$$U = 2 \times \pi \times f \times S \times \mu_0 \times H \quad (1.20)$$

Reducerea cuplajului în câmp al buclelor se realizează prin micșorarea suprafeței buclei victimă, respectiv, prin reducerea variației câmpului magnetic activ. De asemenea, se recomandă să se folosească perechi de conductoare, iar conductoarele de retur să fie cât mai apropiate de cele principale, eventual, să se folosească cabluri ecranate sau torsadate.

La frecvențe înalte, când dimensiunea minimă a buclei este mai mare decât $\lambda/4$, tensiunea electromotoare indusă în spira formată de 2 cabluri paralele, situate la distanța d , în situația cea mai defavorabilă, este independentă de frecvența semnalului și de lungimea conductoarelor:

$$U [\text{V}] = 600 \times d [\text{m}] \times H [\text{A/m}] \quad (1.21)$$

La hiperfrecvențe, dimensiunile buclei devin mai mari ca $\lambda/4$; în acest caz valoarea maximă a tensiunii electromotoare induse devine independentă de geometria conductoarelor și descrește liniar la creșterea frecvenței, ea având expresia:

$$U = 150 \times \lambda \times H = 0,4 \times \lambda \times E \quad (1.22)$$

În concluzie, pentru cuplajele parazite ale conductoarelor, în circuitul victimă, dependența tensiunii perturbatoare de frecvența semnalului perturbator, se prezintă astfel: la frecvențe joase, inclusiv în curent continuu, dependența prezintă un palier datorat cuplajului prin impedanța comună, după care apare o creștere cu frecvența, cu o pantă de 20 dB/decadă.

1.7. Câmp apropiat și câmp depărtat

Dacă sursele de radiație ar fi punctiforme ele ar genera în spațiul înconjurător *unde sferice*; la distanțe suficient de mari de sursă, undele sferice pot fi considerate ca *unde plane*. Zona în care undele sferice pot fi considerate ca unde plane reprezintă *zona câmpului depărtat*; în apropierea surselor, structura câmpului electromagnetic este complexă și formează *zona câmpului apropiat*.

Capitolul 1

Noțiuni introductive

În afara celor prezentate anterior, apar și problemele legate de dimensiunea finită a traductorului care măsoară câmpul, aceasta putând influența mult criteriul de aproximare a mărimilor măsurate. Având în vedere aceste aspecte, este greu de stabilit o delimitare precisă între câmpul apropiat și câmpul depărtat; trebuie reținut că trecerea de la câmpul apropiat la câmpul depărtat nu este abruptă, ci presupune o aproximație.

Există două criterii de aproximare: *criteriul Rayleigh* – care ține seama de dimensiunea finită a sensorului cu care se măsoară câmpul electromagnetic și *criteriul Maxwell* – care consideră atât sursa cât și sensorul punctiforme. Astfel, pentru un sensor cu lungimea d , conform criteriului Rayleigh, câmpul depărtat începe de la distanța:

$$r \geq \frac{2d^2}{\lambda} \quad (1.23)$$

În cazul în care sensorul devine punctiform, delimitarea între câmpul apropiat și câmpul depărtat se face pe considerente matematice pe baza expresiilor câmpurilor electric și magnetic; din comparația lui kr cu 1 rezultând condiția de câmp depărtat (criteriul Maxwell):

$$r > \lambda / 2\pi \quad (1.24)$$

Din punct de vedere practic, trebuie reținut că în zona câmpului apropiat cuplajele se realizează prin câmp electric sau prin câmp magnetic, în funcție de structura câmpului, în timp ce în zona câmpului depărtat, se manifestă numai cuplajele de natură electromagnetică. Pentru zona câmpului apropiat componentele câmpului electric și ale câmpului magnetic nu sunt în fază, ele depind de sursă și de mediul de propagare, în timp ce în zona câmpului depărtat, cele două componente ale câmpului electric și magnetic apar în fază, corelația dintre ele stabilindu-se prin impedanța caracteristică a mediului:

$$Z_0 = E / H \quad (1.25)$$

În unele dintre normele CEM se precizează că termenul de intensitate a câmpului (field strength), poate fi folosit numai dacă măsurările se fac în câmp depărtat; în acest caz, măsurările pot fi efectuate fie pentru componenta electrică, fie pentru componenta magnetică a câmpului, ele putând fi exprimate în V/m, A/m sau W/m². Pentru zona de câmp apropiat este obligatoriu să se precizeze: intensitatea câmpului electric și intensitatea câmpului magnetic separat, fără a mai fi posibilă conversia celor două mărimi între ele.

Capitolul 1
Noțiuni introductive

- Explicați *efectul reductor* în cazul conductoarelor tur-retur cu ajutorul dipolului electric.
- Pentru ce tip de cuplaj transmiterea perturbațiilor se realizează și în curent continuu?
- Cum se poate aplica principiul superpoziției în cazul buclilor de curent de dimensiuni mari?
- Care este tensiunea electromotoare indusă într-o spiră cu o suprafață de 1 cm^2 de către o descărcare electrostatică care produce un câmp magnetic de 8 A/m , presupunând că timpul de creștere este de 1 ns .

ÎNTREBĂRI FINALE

1. Arătați din ce cauză, la creșterea frecvenței, reactanța inductivă crește mai repede decât rezistența.
2. Ce măsuri constructive se iau pentru diminuarea efectului cuplajului capacitiv placă - șasiu?
3. Cum se explică faptul că utilizarea conductoarelor tur-retur reduce diafonia inductivă?
4. Explicați din ce cauză torsadarea firelor cu pas inegal este mai eficientă decât torsadarea firelor cu pasul egal.
5. Ce se înțelege prin cablu "murdar"? Dați câteva exemple de asemenea cabluri.
6. Care sunt considerațiile pe baza cărora se alege unul dintre cele două criterii de determinare a zonei de câmp depărtat: criteriile Rayleigh sau Maxwell?
7. Există posibilitatea de extrapolare pentru o anumită zonă a câmpului dacă se fac măsurări de câmp în cealaltă zonă?
8. Prin cablul de coborâre al unui paratrăsnet montat pe un stâlp de la o linie telefonică trece un impuls de curent cu amplitudinea de 25 kA , cu un timp de creștere de $0,5 \mu\text{s}$. Să se determine efectul acestuia asupra liniei telefonice cu lungimea de 50 m , dacă distanța dintre firele telefonice este de 1 m .

Capitolul 1
Noțiuni introductive

REZUMAT

- Calea de transmitere a perturbațiilor de la sursa de perturbații la echipamentul victimă se realizează prin intermediul cuplajelor electromagnetice.
- Cuplajul prin impedanța comună se realizează în întregul spectru de frecvențe, începând cu c.c. Impedanța comună echivalentă acestui cuplaj este formată dintr-o rezistență în serie cu o inductivitate; deși la creșterea frecvenței apare efectul pelicular, predominantă devine reactanța inductivă. La frecvențe mari, dacă lungimea de undă devine comparabilă cu lungimea conductoarelor, acestea se transformă în antene.
- Cuplajul capacitiv placă - șasiu este caracteristic plăcilor cu circuite electronice și se manifestă prin apariția unui curent prin conductorul victimă datorită unei variații a diferenței de potențial care se închide la masă prin capacitatea parazită.
- Diafonia inductivă și cea capacitivă au trăsături comune, cu diferența că în primul caz, energia se transmite prin câmp magnetic, iar în cel de-al doilea, prin câmp electric. În ambele cazuri efectul se accentuează la creșterea frecvenței și se folosesc aceleași măsuri de protecție.
- Cuplajele prin radiație au ca surse primare dipolul electric și bucla de curent și se realizează sub forma de: cuplaj în câmp al firelor, caz în care interacțiunea apare din cauza componentei electrice a câmpului electromagnetic și cuplaj în câmp al buclelor, datorat componentei magnetice a câmpului electromagnetic.
- Deoarece între sursa de câmp și victimă structura câmpului electromagnetic este complexă, se face distincție între zona de câmp apropiat și respectiv, zona de câmp depărtat în care cele două câmpuri sunt corelate între ele, adică admit o relație de proporționalitate.

TEMĂ: Comparatie între cuplajele prin conducție și prin radiație

- Trăsături comune și specifice
- Măsuri de reducere și de protecție
- Exemplificare pentru un echipament cunoscut