

## 4. Câmpuri electromagnetice: surse și interacțiuni

### 4.1 Noțiuni introductive

Compatibilitatea electromagnetică a unui dispozitiv, echipament sau sistem are două componente distincte:

- a) Imunitatea (sau, complementar, susceptibilitatea): să funcționeze neperturbat, la parametri normali, în mediul (electromagnetic) pentru care a fost proiectat.
- b) Emisia (de perturbații): să nu perturbe funcționarea celorlalte aparate care în mod firesc, s-ar putea găsi în mediul pentru care a fost proiectat.

Am subliniat principiul conform căruia evaluarea oricărui echipament din punct de vedere al celor două laturi definitorii ale compatibilității electromagnetice trebuie făcută la intensități și frecvențe ale câmpurilor electromagnetice care în mod normal se pot întâlni în ambientul său firesc de funcționare.

Perturbarea funcționării unui echipament de către câmpurile electromagnetice este o chestiune de interferență. Câmpuri electromagnetice perturbatoare se suprapun, interferă, cu unele semnale electrice utile. Interferența este invers proporțională cu distanța de separare, de aceea în primul rând interesează compatibilitatea dintre echipamentele, aparatele sau dispozitivele care funcționează în același ambient, care sunt relativ apropiate unele de altele.

În esență, compatibilitatea electromagnetică trebuie respectată de toate aparatele electrice. Ce trebuie să înțelegem prin termenul generic, general

acoperitor de „aparat” este precizat în Directiva Uniunii Europene 30/2014: „orice dispozitiv electric sau electronic, inclusiv echipament sau instalație, care conține componente electrice și/sau electronice”. Termenul generic folosit în varianta în limba engleză a Directivei EMC este „appliance”, care se poate traduce în limba română prin: aparat, dispozitiv, instalație sau instrument.

În esență, problematica compatibilității electromagnetice se poate grupa pe trei mari capitole:

- a) Surse de perturbații (interferențe) electromagnetice (emițători);
- b) Aparatură care pot fi afectate de aceste perturbații (victime sau susceptori).
- c) Mecanisme sau căi de cuplare (transmitere) a acestor perturbații, de la sursă la aparatul susceptibil; prin sintagma „căi de cuplare” se înțelege totalitatea interacțiunilor dintre un anumit aparat și înconjurătorul său electromagnetic.

În esență este vorba de un proces de emisie și apoi de recepție. Fiind vorba însă de recepționarea unor semnale nedorite se preferă folosirea termenilor „susceptor-susceptibilitate”.

## **4.2 Surse de perturbații electromagnetice**

### **4.2.1 Clasificări funcție de natura continuă sau tranzitorie a fenomenului generator.**

Există un număr foarte mare de surse care generează câmpuri electromagnetice care pot produce interferențe nedorite, perturbatoare.

Pentru o abordare sistematică, trebuie făcut referire la documentul IEC 61000-2-5, partea a doua a seriei generale 61000 (destinată Compatibilității

Electromagnetice), elaborată de INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, care sintetizează descrierea și clasificarea mediului electromagnetic.

Avem mai multe criterii de clasificare:

1. după fenomenul care le generează: un fenomen natural sau unul asociat funcționării unui proces creat de om;
2. după spectrul de frecvențe care este asociat perturbației: joasă, medie sau înaltă frecvență, cele de joasă și medie frecvență propagându-se preponderent prin mecanisme de conducție (cuplaje capacitive, inductive sau galvanice), cele de radio frecvență propagându-se preponderent prin mecanisme de radiație;
3. după natura continuă sau tranzitorie a fenomenelor care produc emisiile electromagnetice perturbatoare.

În tabelul 4.1 am realizat o sinteză a fenomenelor continui, cu precizarea principalelor acte normative, a metodelor de testare a emisiei, respectiv a susceptibilității (cu nivelele de testare impuse sau doar recomandate de aceste standarde) dar și a principalelor categorii de aparate sau dispozitive care sunt cel mai expuse la respectivele emisii.

Tabelul 4.1 Fenomene continui

Fenomenele electromagnetice, cauze principale, exemple, comentarii	Standarde de bază ce permit evaluarea impactului asupra înconjurătorului electromagnetic	Standarde pentru testarea emisiilor	Aparate principial susceptibile la acest tip de perturbatii	Standarde pentru testarea imunitatii si anumite nivele de test impuse sau doar recomandate
Variații ale surselor de alimentare cu energie electrică (c.a sau c.c.) De regulă,	IEC 1000-2-5		Orice echipament electronic, considerat susceptibil la variații > 10%.	IEC 61000-4-14 IEC 61000-4-28, IEC 61000-4-29 1: 3% Vnom 2: 10% Vnom 3: 15% Vnom

*Câmpuri electromagnetice: surse și interacțiuni*

<p>variațiile tensiunii nominale nu depășesc +/- 10% . În anumite industrii, variații mai mari pot fi cauzate consumuri foarte mari de putere, cum ar fi de exemplu cuptoarele cu arc, sudura electrică, electroliza și galvanizarea.</p>				
<p><b>Consumuri diferite (nesimetrice, dezechilibrate ) pe cele trei faze RST ale rețelei trifazate</b></p>	IEC 1000-2-5		<p>Echipamente cu alimentare trifazată, a căror bună funcționare se bazează pe simetria, echilibrul fazelor ( motoare AC, transformatoare) .Firul de nul se poate supraîncălzi. Siguranțele pot ceda.</p>	<p>IEC 61000-4-14 IEC 61000-4-27 1: 2% F<sub>nom</sub> 2: 3% F<sub>nom</sub></p>
<p><b>Riplu (de 50Hz) suprapus tensiunii continue de alimentare</b> Este datorat funcționării redresoarelor, care, după filtrare, alimentează un aparat sau încarcă un acumulator</p>	IEC 1000-2-5		<p>Dacă este mai mare de 10%, poate afecta aparatele alimentate prin intermediul unui redresor sau a unui acumulator care se încarcă în timpul funcționării</p>	IEC 61000-4-17

*Câmpuri electromagnetice: surse și interacțiuni*

<p><b>Armonici și interarmonici ale tensiunii de alimentare 50Hz (distorsiuni ale sinusoidei ideale)</b></p> <p>Sarcini neliniare:          - convertoare statice de frecvență și ciclo-convertoare, motoare de inducție, echipament de sudură          - convertoare de putere AC-DC (ex. acționări rapide sau surse de alimentare în comutație)          - transformatori ajunși la saturație          Rezonanțe ale rețelei de alimentare pot determina nivele foarte înalte la anumite frecvențe.</p>	<p>IEC 1000-2-4          IEC 1000-2-5</p>	<p>IEC 61000-3-2 (tensiuni joase, curenți sub 16A)          IEC 61000-3-4(tensiuni joase, curenți peste 16A)          IEC 61000-3-6(tensiuni medii și înalte)          IEC 61000-3-9 (interarmonici)</p>	<p>Convertoarele de putere și alte dispozitive electronice, care utilizează în funcționare trecerea prin zero, valoarea de vârf sau slew-rate (variația maximă a semnalului de ieșire raportată la unitatea de timp, V/s)          Distorsiunile formelor de undă pot afecta valoarea tensiunii continui de la ieșirea alimentatoarelor .          Condensatoarele de corecție a factorului de putere, transformatoarele de distribuție, cablurile, motoarele AC și comutatoarele se pot supraîncălzi.          Zgomote acustice și vibrații în echipamentele electromecanice.</p>	<p>IEC 61000-4-7 și IEC 61000-4-13</p> <p>1: 4% THD          2: 8% THD          3: 10% THD</p>
<p><b>Câmpuri magnetice CA sau CC</b></p> <p>Rețeaua de medie și înaltă tensiune (câmpul magnetic e proporțional cu curentul)</p>	<p>IEC 1000-2-7          NRPB-R265 (National Radiological Protection Board-UK)          IEC 1000-2-5</p>	<p>Metoda de măsurare cu bobină, anexa a, EN 55103-1</p>	<p>Monitoarele sau televizoarele de tip CRT (cathode ray tube) sunt afectate de câmpuri &gt;1A/m (prin ecranare, pot suporta câmpuri până la 20 A/m).          Sunt afectate</p>	<p>IEC 61000-4-8</p> <p>1: 3A/m          2: 10A/m          3: 30A/m          4: 100A/m</p>

*Câmpuri electromagnetice: surse și interacțiuni*

Amplificatoare audio de putere (stații) și sisteme de inducție.  Toate cablurile parcurse de curent, atât analog cât și digital, produc în jurul lor câmpuri magnetice (legea Biot-Savart)			microfoanele, difuzoarele, traductoarele cu efect Hall.	
<b>Câmpuri electrice AC sau DC</b>  Principala sursă o constituie cablurile rețelelor de medie și înaltă tensiune, când furnizează puteri mari (curenți importanți).	NRPB-R265  IEC 1000-2-5		Circuitele sensibile neecranate sau circuite analogice de înaltă impedanță (de ex., traductoare)	1: 0.1kV/m 2: 1kV/m 3: 10kV/m 4: 20kV/m
<b>Tensiuni de semnal pe cablurile de rețea</b> Perturbații conduse prin cablurile de rețea (frecvențe până la 10 kHz) sau frecvențe mai mari în cazul sistemelor de semnalizare care utilizează rețeaua drept suport fizic	IEC 1000-2-1 IEC 1000-2-2 IEC 1000-2-12 IEC 1000-2-5	IEC 61000-3-8 (în afara Europei)  EN 50056 (în Europa)	Convertoarele de putere și alte echipamente electronice, care utilizează în funcționare trecerea prin zero, valoarea de vârf sau slew-rate (variația maximă a semnalului de ieșire raportată la unitatea de timp)	IEC 61000-4-13 (până la 2.4 kHz)  1: 5% Vrms  2: 9% Vrms (numai în intervalul 0.1-3kHz)
<b>Interferențe conduse în conductoare, intervalul cc până la 150</b>	IEC 1000-2-1 IEC 1000-2-2 IEC 1000-2-4 IEC 1000-2-5		Receptoare radio de unde lungi și medii, sisteme de telefonie	IEC 61000-4-16  1: 1 Vrms 2: 3V 3: 10V

*Câmpuri electromagnetice: surse și interacțiuni*

<p><b>kHz (tensiuni si curenti)</b>                  Electronica industrială (dispozitive semiconductoare de putere, cum ar fi redresoare, tiristori) curenții de scurgere ai filtrelor de RF și a altor curenți de împământare, emițătoare radio în domeniul VLF (very low frequency)                  Nivele de perturbații conduse la 50 Hz pot ajunge la 250 V în instalații neprotejate și chiar 500 V în instalații exterioare, în preajma comutatoarelor de înaltă tensiune.</p>	<p>IEC 1000-2-6                  IEC 61000-2-12</p>		<p>analogică, Instrumentație analogică sensibilă (pentru măsurarea temperaturii, debitului, forțelor), audio și video.</p>	<p>4: 20V</p>
<p><b>Interferente conduse la frecvențe de peste 150kHz (tensiuni si curenti)</b>                  Câmpurile de radio-frecvență generate de emițătoarele radio fixe și mobile sau de unele echipamente</p>	<p>IEC 1000-2-3                  IEC 1000-2-5</p>	<p>EN 55011, 55013 55014 55015 55022</p>	<p>Receptoare radio                  Control numeric și procesarea numerică a semnalelor                  Instrumentație analogică sensibilă (pentru măsurarea temperaturii, debitului,</p>	<p>IEC 61000-4-6                  1: 1V (7mA)                  2: 3V (21mA)                  3: 10V (70mA)                  4: 30V (210mA)</p>

*Câmpuri electromagnetice: surse și interacțiuni*

din categoria ISM ( Industrial-Scientific-Medical in special Grupul 2 din EN 55011). De asemenea, cuplajele datorate circuitelor digitale sincronizate (semnal de tact) și a convertoarelor de putere cu semiconductori .			fortelor), audio, video, telefonie analogică	
<b>Interferențe radiate, la frecvențe de peste 150 kHz</b> Cel mai important de la radio fixe și mobile și emitoarele TV, precum și unele echipamente ISM (în special echipamentele din grupul 2 de EN 55011). De asemenea de la circuitele digitale sincrone și convertoarele de putere semiconductoare cum ar fi PSU și AC, invertoare de rețea.	NRPB-R265  IEC 1000-2-5	EN 55011 55013 55014 55015 55022	Receptoare radio  Control numeric și procesarea numerică a semnalelor. Interferențe radiate puternice pot provoca scântei, care aprind materiale inflamabile.	IEC 61000-4-3 1: 1 V/m 2: 3 V/m 3: 10 V/m 4: 30 V/m
<b>Interferențe radiate la frecvențe de peste 150 kHz, de la liniile de</b>	BS 5049-1  CISPR 18-1	BS 5049-2, BS 5049-3,  CISPR 18-2,	Receptoare radio (unde lungi și	



<b>întă tensiune</b> Datorita: -descarcari corona in aer, la suprafetele conductoarelor si la imbinari; -descarcari si scantei in zona unor contacte sau izolatii imperfecte		CISPR 18-3	medii)	
---	--	------------	--------	--

Fenomenele tranzitorii care pot produce perturbatii electromagnetice sunt sintetic prezentate in Tabelul 4.2.

<b>Fenomenele electromagnetice, surse sau cauze principale; câteva exemple și comentarii</b>	<b>Standarde pentru testarea emisiilor</b>	<b>Aparate principial susceptibile la acest tip de perturbatii</b>	<b>Standarde pentru testarea imunitatii si nivele prevazute</b>
<b>Fluctuații de tensiune, goluri și întreruperi scurte ale tensiunii de alimentare AC și DC</b>  Comutari de sarcina, defectiuni in retelele de alimentare cu energie electrica de joasa tensiune, variatii tranzitorii ale curentilor absorbiti de echipamentele conectate.	IEC 61000-3-3 ( $\leq 16$ A/fir de la sursa de tensiune scazuta) IEC 61000-3-5 ( $> 16$ A/fir de la sursa de tensiune scazuta) IEC 61000-3-7 ( surse de Medie si Inalta Tensiune) IEC 61000-3-11 (pt. Cuplaj special la retea publică de joasa tensiune, $I < 75$ A/fir )	Toate sistemele digitale pot fi afectate de scaderea tensiunii de alimentare sub o anumita valoare. Exista solutii hard si soft pentru recuperarea automată a datelor si reluarea functionarii, cu eficienta limitata.	IEC 61000-4-11 (AC) si IEC 61000-4-29 (DC)  Golurile pot varia de la 30% la 100 % din $V_{nom}$

		Sistemele analogice nu functioneaza atunci cand tensiunea de alimentare scade sub o anumita valoare, revin la functionarea normala odata cu tensiunea.	
<p><b>Variatii tranzitorii rapide (conduse si radiate)</b>                  Arcuri electrice ce apar la deconectarea sarcinilor mari (mai ales cele inductive). Au un spectru foarte larg, apar perturbatii in cablurile aflate in apropiere.</p>	<p>EN 55014</p> <p>Perturbatii discontinue                  (aparatele de uz casnic si aparatele similare)</p>	<p>Toate dispozitivele digitale pot da erori atunci cand sunt agresate de astfel de variatii. Exista dispozitive specifice si tehnici de circuit pentru recuperarea automata. Procesarea semnalului analogic poate fi afectata, dar revine la normal dupa disparitia arcului electric perturbator.</p>	<p>IEC 61000-4-4</p> <p>1: 500V                  2: 1kV                  3: 2kV                  4: 4kV</p>
<p><b>Supratensiuni ce apar in sursele de alimentare CA si CC si pe cablurile</b></p>		<p>Semiconductoarele din convertoarele de putere in</p>	<p>IEC 61000-4-5                  si IEC 61000-4-12</p>

<p><b>lungi (inclusiv cele de telecomunicatii)</b>                  Modificari ale valorilor sarcinilor ce cupleaza la rețelele de alimentare cu energie electrica de joasa tensiune, (in special sarcini reactive cum ar fi condensatorii de corectie a factorului de putere si circuite de rezonanta asociate cu dispozitive de comutare, gen triac-tiristor).</p>		<p>comutatie si semiconductoare legate direct la cablurile lungi sunt expuse la supratensiunile dintre faze (Mod diferential)                  Exista si supratensiuni de mod comun periculoase, intre faza si pamant</p>	<p>1: 0.5kV CM                  0.25kV DM                  2: 1kV CM                  0.5kV DM                  3: 2kV CM                  1kV DM</p>
<p><b>Descargarile electrostatice</b>                  (sarcini acumulate mai ales prin frecare, la suprafata operatorului uman, a masinilor sau a mobilierului)                  Se incarca materialele izolatoare, dar si anumite lichide, vapori sau piese metalice neimpamantate.                  Descarcarile pot fi directe sau indirecte.                  Se impune controlul</p>		<p>Sistemele digitale se pot defecta (reversibil sau nu, hardware sau software) atunci cand sunt afectate de descarcarile electrostatice. Aparatul poate fi afectat de curentul de descărcare (pot fi distruse componentele prin care se stabilește acest supracurent)</p>	<p>IEC 61000-4-2                  Standardul foloseste modelul corpului uman (HBM) pentru realizarea simulatorului de descărcări electrostatice, la descărcări prin contact sau prin aer.                  1: +/- 1kV                  2: +/- 4kV                  3: +/- 8kV</p>

acumularilor de sarcini in medii speciale precum cele de asamblare a componentelor semiconductoare sau acolo unde sunt gaze inflamabile .		sau datorită câmpurilor electrice și magnetice asociate.	4: +/- 16kV
<b>Probabilitate scazuta de aparitie, situații mai rar întâlnite</b>			
<b>Variatii ale frecvenței tensiunii de rețea</b>  Se datorează unor defecte majore in instalatia de distributie a energiei		Afectează procesele sincronizate cu frecvența rețelei, cum ar fi funcționarea sincronizată a unor motoare cu inducție, folosit în acționări.	IEC 61000-4-14 IEC 61000-4-28 1: 2% din frecventa nominală 2: 3% din frecventa nominală
<b>Supratensiuni induse în cabluri lungi(rețele de putere dar și rețele telefonie fixa)</b>  Fulgere, dar și regimuri tranzitorii, in sarcini cu stocari mari de energie: (motoare sau electromagneți mari)	Un sistem de impamantare multiplu, (tip plasă) poate reduce acest risc ( vezi IEC 61000-5-2:1998). Un trăsnet poate induce în linie supratensiuni de 10kV.	Supratensiunile de mod diferențial afectează echipamentele conectate la rețea. Supratensiunile de mod comun (între fază și pământ) afectează aparatele care prezintă defecte de izolație	IEC 61000-4-5 și IEC 61000-4-12  1: 1kV CM, 0.5kV DM 2: 2kV CM, 1kV DM 3: 4kV CM, 2kV DM
<b>Supratensiuni generate de funcționarea</b>		Supratensiunile de mod	IEC 61000-4-5 1: 0.5x V <sub>varf</sub>

<p><b>siguranțelor fuzibile</b></p>		<p>diferențial afectează echipamentele conectate la rețea. Supratensiunile de mod comun (între fază și pământ) afectează aparatele care prezintă defecte de izolație mai sus</p>	<p>2: <math>1 \times V_{\text{varf}}</math> 3: <math>2 \times V_{\text{varf}}</math></p>
<p><b>Supratensiuni tip oscilații amortizate în liniile de putere</b> Comutări în stațiile de medie și înaltă tensiune în aer liber, în particular la barele de contact.</p>		<p>Supratensiunile de mod diferențial afectează echipamentele conectate la rețea. Supratensiunile de mod comun (între fază și pământ) afectează aparatele care prezintă defecte de izolație mai sus</p>	<p>IEC 61000-4-12  1: 0.5 kV CM, 0.25 kV DM 2: 1 kV CM, 0.5 kV DM 3: 2 kV CM, 1 kV DM 4: 4 kV CM, 2 kV DM</p>
<p><b>Câmpuri magnetice (tip impuls) de scurtă durată</b> Sunt produse de fulgere, sisteme de tracțiune, curenți accidentali de scurgere la pământ</p>		<p>În general sunt afectate transductoarele magnetice și sistemele care utilizează devierea în câmp magnetic a fasciculului</p>	<p>IEC 61000-4-9</p>

		de electroni (CRT)	
<b>Campurile magnetice radiate(oscilații amortizate)</b>  Apar la comutările din substații de înaltă tensiune		Sunt afectate traductoarele magnetice	IEC 61000-4-10
<b>Câmpuri radiate de foarte scurtă durată (tip impuls)</b> În apropierea substațiilor de medie sau înaltă tensiune sau sub liniile aeriene de ÎT sau MT	Se poate estima că o viteză de variație de aproximativ 10 V/m/ns produce un câmp suplimentar de 10V/m	Au un potențial distructiv foarte mare, afectând atât componentele hard (analogice sau digitale) dar și corectura a programelor.	1: 100V/m/ns 2: 300V/m/ns 3: 1000V/m/ns 4: 3000V/m/ns 5: 10.000V/m/ns
<b>Lovituri directe de fulger</b>		Efecte catastrofale asupra tuturor componentelor electronice dar și a celor electrice sau mecanice.	IEC 61312-1 1% din curentul de descărcare datorat trăsnetului e mai mult de 200 kA

Este foarte important să avem o estimare corectă a intensității diverselor câmpuri electrice și magnetice, emise de diferite echipamente sau utilaje în funcționare, la distanțe standardizate.

#### 4.2.2 Exemple de campuri perturbatoare

##### a). Exemple de campuri magnetice de joasa frecventa:

O parte a acestor valori specifice, reprezentative dar totuși cu caracter orientativ au fost extrase și apoi prelucrate din lucrări de referință ale

domeniului, [1]. Alte valori ale câmpurilor electrice sau magnetice, la frecvențe mai mici de 1 MHz, au fost măsurate cu ajutorul analizorului spectral portabil SPECTRAN NF-5035. Acest analizor include o probă (senzor) de câmp electric apropiat, de tipul "dipol electric" (conductor electric neecranat, de lungime mai mică de 1 cm), dar și un senzor de câmp magnetic apropiat, omnidirecțional, izotrop, format din trei cercuri concentrice, situate în planuri două câte două perpendiculare (ecuator, meridianul 0-180 și respectiv meridianul 90-270).

- 100A/m este valoarea câmpului magnetic măsurată la o distanță de 10m de cablurile de alimentare ale motorului de cc. ce acționează un laminor de oțel (curent absorbit de  $\pm 8\text{kA}$ );
- La o distanță mai mică de 1 metru, valoarea aceluiași câmp depășește 1000 A/m
- O instalație de CIF (călire prin înaltă frecvență), lucrând la o frecvență de 1.1kHz și având o putere de 800kW, produce un câmp magnetic care are valoarea de 100A/m, la distanța de 1m;
- Un dispozitiv de sudat tevi de diametrul de 50mm, lucrând la o frecvență de 230 kHz și având o putere de 400kW, produce, la distanța de 25 cm, un câmp de 40A/m;
- Un încălzitor pentru piese cilindrice din cupru (50Hz, 6MW), generează 430A/m la o distanță de 1m;
- O instalație de electroliză care absoarbe 60kA de la o sursă de 700V current continu, generează un câmp de 15kA/m în zona de acțiune a operatorului uman;
- La nivelul solului, sub o linie de transport aeriană de 400 kV, nivelul câmpului măsurat este 32 A/m

- La nivelul solului, deasupra unei linii de transport subterane de 400 kV, nivelul câmpului măsurat este 160 A/m
- Incalzirea prin pardoseala generează un câmp de 160A/m la nivelul podelei iar la 1m inaltime, valoarea este de 10 ori mai mică, 16A/m;
- O pompă de apa de 1KW, produce un câmp de 800A/m la o distanță de 10 mm și 3A/m la o distanță 0.4 metri;

#### **Exemple de campuri electrice de joasa frecventa:**

Un încălzitor de tevi de oțel de putere 8kW alimentat cu o tensiune ce are frecventa de 490kHz, va emite un câmp electric de 100V/m la o distant de 0.3m;

O plita cu inductie având o putere de 1.5kW și lucrând la o frecvență de 20kHz, genereaza un câmp de 28V/m la o distanță de 250mm;

In aer liber, sub liniile aeriene 400 kV se măsoară un câmp de 10kV/m;

#### **Exemple de campuri de radiofrecventa**

- Incalzitoarele de materiale dielectrice (cuptoare cu microunde) celucează la frecvente de ordinul 2,45 MHz, cu puteri de la 750 W pana la 15kW, genereaza câmpuri electromagnetice de până la 300V/m în zona operatorului uman (valoare care depășește limitele acceptabile)
- Aparatele de emisie-recepție tip walkie-talkie (TETRA) si telefoanele celulare pot genera câmpuri de intensitate 30V/m la o distanță de 400 mm, respectiv de 250 mm si din ce in ce mai puternice odată cu scaderea distantei;
- O statie de emisie radio (unde medii) având puterea de 1200 kW, genereaza un câmp electromagnetic de 32V/m la o distanță de 0.5 km;



### 4.3 Perturbații tip impuls, fenomene tranzitorii

Cele mai importante surse de perturbații tip impuls sunt: comutarea sarcinilor inductive, descărcările atmosferice și descărcarea electrostatică provenită de la diverse obiecte și persoane. Perturbațiile de tip tranzitoriu, care sunt impulsuri nerepetitive, pot fi studiate în domeniul frecvență cu ajutorul transformatei Fourier.

Un fenomen tranzitoriu este reprezentat în mod uzual ca un puls unidirecțional. Un astfel de impuls singular, nerepetitiv, poate fi pozitiv sau negativ, în raport cu o referință (Fig. 4.1).

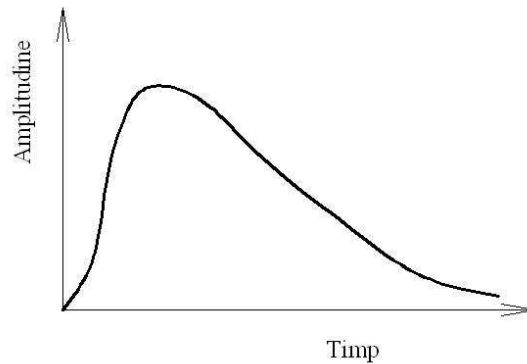


Fig. 4.1 Impuls unidirecțional

O examinare mai atentă a fenomenelor tranzitorii arată faptul că o formă de semnal asemănătoare cu cea din Fig. 4.1 se întâlnește foarte rar în practică, doar în cazul unor măsuri speciale. O forma de semnal mult mai des întâlnită în practică este prezentată în Fig. 4.2.

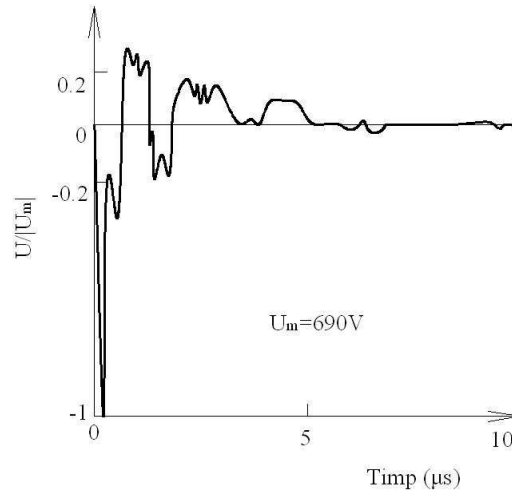


Fig. 4.2 Exemplu reprezentativ de fenomen tranzitoriu în rețeaua de alimentare (valoare relativă prin raportare la valoarea medie, de regim permanent)

În Fig. 4.3 sunt prezentate două impulsuri, al doilea fiind generat de reflexia primului, datorită unei discontinuități în mediul de propagare.

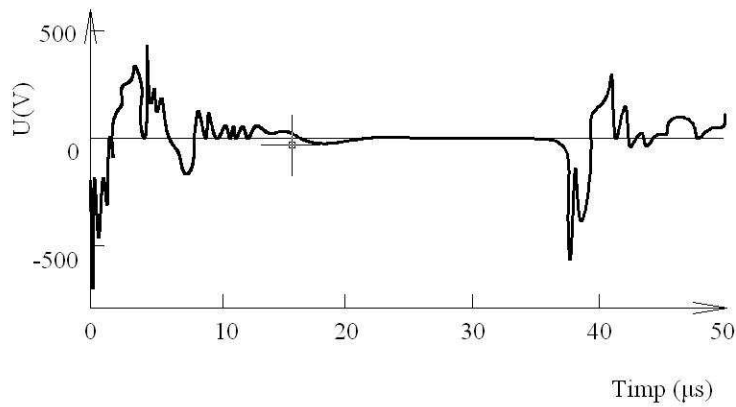


Fig. 4.3 Reflexiile în rețeaua principală de alimentare pot produce o repetare a perturbației cauzată de comutație

Din punct de vedere al variației în timp, fenomenele tranzitorii apar într-o multitudine de forme, care depind și de comportarea componentelor funcție de frecvență. Din figurile 4.2 și 4.3 se vede că descrierea corectă a unui fenomen tranzitoriu (timpul de creștere, frecvența de oscilație, durata unui vârf sau a întregului fenomen, intervalul de repetare) este foarte dificilă.

#### **4.3.1 Fenomene tranzitorii datorate comutărilor**

Comutarea sarcinilor inductive produce vârfuri cu durata cuprinsă între 0,1 și 10  $\mu$ s, în timp ce durata întregului fenomen tranzitoriu poate fi de până la 10 ms. În cazul echipamentelor alimentate direct de la rețeaua de tensiune, fenomenele tranzitorii datorate comutărilor sunt foarte importante, de exemplu în cazul închiderii și deschiderii motoarelor sau a releelor, acționarea siguranțelor, aparatele de sudură cu termostatare, etc. Perioada rețelei de alimentare cu tensiune (20ms pentru frecvența 50Hz) este folosită ca și scară de timp pentru aceste fenomene tranzitorii.

În momentul comutării, componentele inductive ale unui comutator, de exemplu, bobina releului, produc un impuls de tensiune (mai ales în cazul în care se întrerupe circuitul). În acest moment, curentul printr-un element inductiv este întrerupt. Modificarea de curent asociată cauzează apariția unei tensiuni mari pe acel element. Tensiunea maximă poate fi dedusă din relația de echilibru energetic:

$$\frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} C_p U^2 \quad (4.1)$$

unde  $L$  este inductanța proprie iar  $C_p$  este capacitatea parazită a bobinei (Fig. 4.4).

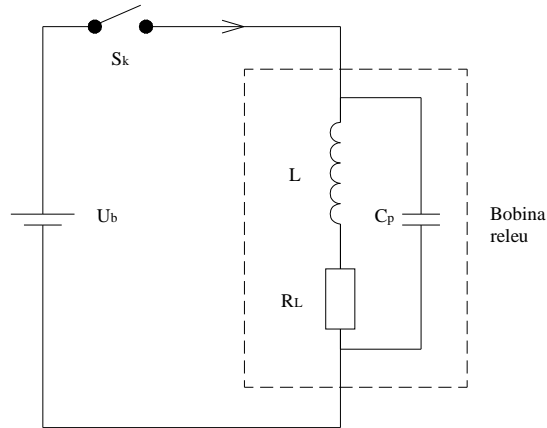


Fig. 4.4 Întreruperea curentului printr-o sarcină inductivă

De exemplu, pentru  $L=0,1$  H,  $I=1$ A iar  $C_p=100$ pF, se observă că, la deschiderea comutatorului, valoarea lui  $U$  ar putea teoretic crește până la 32kV. Practic, o asemenea valoare nu va fi niciodată înregistrată, datorită apariției unui arc electric între contacte înaintea atingerii acestei valori (orientativ, diferența de potențial la care se amorsează un arc electric la presiunea de 1 atm este aproximativ 3,7kV/mm). La apariția arcului, se restabilește curentul prin circuit, după care, din cauza depărtării contactelor, arcul se stinge, tensiunea va crește din nou, ș.a.m.d. Prin urmare, deschiderea comutatorului va cauza un număr relativ mare de impulsuri scurte (Fig. 4.5).

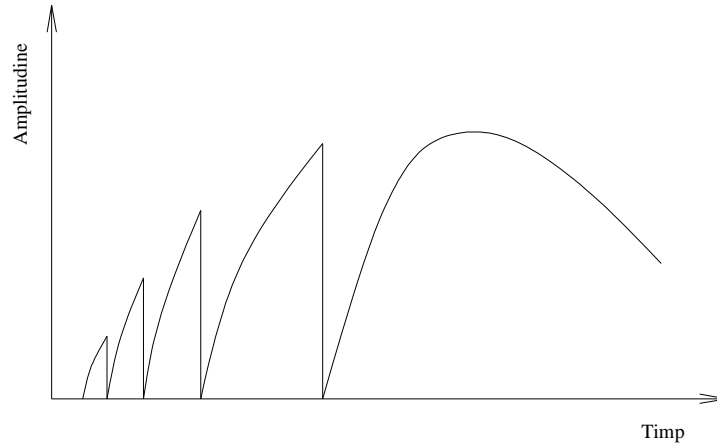


Fig. 4.5 Apariția unui tren de impulsuri la deschiderea unui contact electric

Perturbațiile datorate comutărilor pot fi nu numai conduse ci și radiate. Acest fenomen se poate observa cu ușurință prin amplasarea unui aparat radio în apropierea unui comutator. Astfel, perturbațiile datorate comutărilor cuplează prin radiație în diferite cabluri și linii de semnal.

Măsurarea fenomenelor tranzitorii într-un anumit punct dintr-un circuit, spre exemplu o priză de curent, este o problemă dificilă. Din cauza faptului că fenomenul în cauză este unul de scurtă durată și este nerepetitiv, măsurătorile trebuiesc făcute în domeniul timp. Pentru aceasta, trebuie făcută o conversie analog-digitală rapidă a semnalului prelevat, urmată de stocarea într-o memorie. După aceea, se poate prelua informația din acea memorie pentru a fi analizată în domeniul timp sau, cu ajutorul transformatei Fourier, în domeniul frecvență.

De asemenea, nu se știe când fenomenul tranzitoriu va apare și care vor fi proprietățile sale, spre exemplu amplitudinea maximă sau durata. Prin

urmare, persoana care face aceste măsurători nu va ști cum să configureze parametrii aparatului de măsură. Mai apare și problema numărului de măsurări trebuie efectuate pentru a fi relativ sigur că s-au luat în considerare și cele mai diferite și puternice cazuri de fenomene tranzitorii. Această problemă nu poate fi rezolvată practic. Întotdeauna poate exista un context care să favorizeze fenomene tranzitorii și mai perturbatoare. Singura modalitate de rezolvare a acestei probleme este de a face aceste măsurători de suficiente ori și în suficiente locații, pentru ca, mai apoi, să se realizeze o abordare statistică a problemei. Folosind o abordare statistică, împreună cu o anumită marjă de siguranță EMC, se vor obține valori apropiate de realitate. Echipamentele supuse unor astfel de teste pot fi supuse, ocazional, unor interferențe ce depind de marja de siguranță adoptată dar și de măsura în care testul de imunitate folosit reproduce condițiile reale de operare ale echipamentului respectiv. Aceste condiții includ modul de cuplaj al perturbațiilor, impedanța internă a sursei de perturbație, modul de conectare al echipamentului testat în mediul de lucru, etc.

Pentru formarea unei impresii asupra fenomenelor tranzitorii ce însoțesc rețeaua de alimentare de 230 V, se vor prezenta în continuare o serie de rezultate ale unui studiu statistic realizat de către Goedbloed și Meiseen, [8] care au măsurat aproximativ 28.000 fenomene tranzitorii în 40 locații diferite. Parametrul măsurat a fost tensiunea dintre contactele fazei și împământării prizei de tensiune în patru medii diferite: industrial, casnic, spațiu de birouri și de laborator.

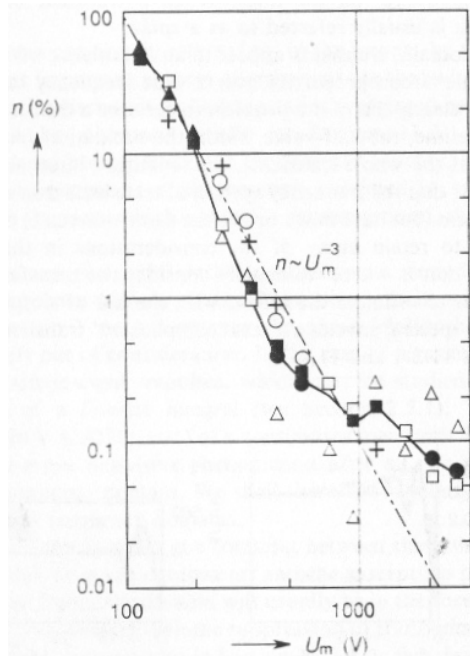


Fig. 4.6 Numărul relativ de fenomene tranzitorii dintr-o anumite categorie de mediu, funcție de amplitudinea  $U_m$  a tensiunii măsurate.

●- total; ◻ - mediu industrial; Δ - birouri; ○ - mediul casnic, + - laboratoare

Concluzia care se poate trage din acest studiu este că nu există o diferență majoră între cele patru clase (categoriile) de mediu. Numărul relativ variază în linii mari invers proporțional cu puterea a treia a tensiunii. Studiul statistic a demonstrat și faptul că un procent de 75% dintre fenomenele tranzitorii studiate au o valoare a gradientului pantei de maxim  $0,3\sqrt{U_m}$  V/ns.

#### 4.4 Fenomene de descărcare atmosferică

Fenomenul de descărcare atmosferică pune probleme mai ales acolo unde există cabluri suspendate între clădiri apropiate. Acest fenomen are o durată de aproximativ 0,2 s (Tabel 4.3). La o privire mai atentă, se observă că o descărcare atmosferică este constituită din mai multe descărcări parțiale. În fig. 4.7 este prezentată varianta cu cinci descărcări parțiale, prima începând imediat după ce pre-descărcarea a atins pământul.

Parametru	Unitate	Minim	Medie	Maxim
<b>Descărcare prin fulger</b>				
Durată	s	0,03	0,2	2
Sarcină	C	1	35	300
<b>Descărcări parțiale</b>				
Nr. per fulger		1	3	25
Intervalul între repetări	ms	3	50	100
Valoarea de vârf a curentului	kA	1	15	250
Timpul de creștere	$\mu$ s	<0,5	2	30
Panta de creștere a curentului	kA/ $\mu$ s	<1	20	200
Timpul de „înjumătățire” curentului de descărcare	a $\mu$ s	10	45	250
<b>Curent continuu</b>				
Durata	ms	50	150	500
Amplitudine	A	30	150	1600
Sarcină	C	3	25	330

Tabel 4.3 Proprietățile fenomenului de descărcare atmosferică



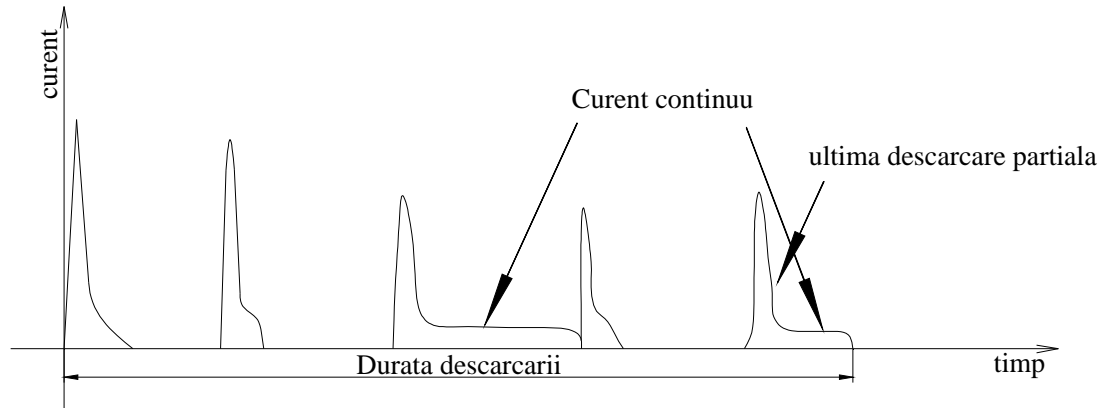


Fig. 4.7 Descărcări parțiale (5) într-o descărcare atmosferică

Constantele de timp ale descărcărilor parțiale se situează în domeniul microsecundelor. Dacă aproximăm un impuls ca fiind de forma unui trapez, rezultă ca un timp de creștere de  $2 \mu\text{s}$  implică faptul că frecvența în cel de-al doilea colț al trapezului este de aproximativ  $160 \text{ kHz}$ ,  $B = \frac{1}{\pi \bullet t_{cr}}$

În unele cazuri, între două descărcări parțiale apare un curent continuu, așa cum se poate observa din Fig.4.7.

Descărcările atmosferice directe pot cauza distrugerii foarte importante, în timp ce descărcările indirecte și descărcările care apar între doi nori cauzează probleme prin efecte de inducție. În cazul descărcărilor între doi nori, efectele pot fi observate și la sol sub forma nu numai a câmpului ce însoțește curentul de descărcare ci și a curentului prin pământ. Sarcina la sol este influențată de sarcina norilor de deasupra sa. Când apare o descărcare între doi nori, adică o redistribuire a sarcinilor electrice, va

apare o redistribuire a sarcinilor electrice și la sol, astfel luând naștere un curent.

Efectele transmise prin inducție pot fi estimate cu ajutorul câmpului impulsiv produs de curentul  $I(t)$  care apare în timpul descărcării. Câmpul generat este dat de relația:

$$H(t) = \frac{I(t)}{2\pi r} \quad (4.2)$$

unde  $r$  – distanța.

Din moment ce lățimea spectrului este limitată, tensiunea indusă în buclă poate fi calculată cu ajutorul relației:

$$U = - \frac{d\phi}{dt} \quad (4.3)$$

Important pentru inducție este raportul  $dH/dt$  și, pentru descărcări parțiale, este important de calculat raportul  $dI/dt$ . În cazul descărcărilor parțiale,  $dI/dt$  are valori de aproximativ  $20\text{kA}/\mu\text{s}$  sau  $2 \times 10^{10}$  A/s (vezi tabelul 4.3).

În afara de fenomenele inductive care apar din cauza fulgerului însuși, trebuie luate în considerare și fenomenele inductive ce apar datorită trecerii curentului prin paratrăsnete. Din această cauză, trebuie avută o grijă deosebită în amplasarea diferitelor fire conductoare în imediata apropiere a acestor paratrăsnete.

Dacă în relația  $U = L \frac{dI}{dt}$ , considerăm ca paratrăsnetul are lungimea de 30m,  $L=30\mu\text{H}$  și  $dI/dt=20\text{kA}/\mu\text{s}$ , obținem  $U=600\text{kV}$ .

Această tensiune este, de fapt, imposibil de măsurat din cauza câmpului generat. Totuși, această valoare prezintă importanță, ea conducând

la concluzia există posibilitatea ca un fulger să afecteze și alte cabluri aflate în apropierea paratrăsnetului.

#### **4.4.1 Acumulări electrostatice produse de activitatea umană.**

##### **Descărcări electrostatic-DES.**

Procesele de încărcare cu energie electrostatică pot duce la diferențe de potențial ce depășesc valoarea de 20kV. Descărcările electrostatice constituie cea mai mare problemă a echipamentelor digitale, în mare parte datorită timpului de creștere foarte mic ( $<1\text{ns}$ ) și duratei scurte de descărcare ( $<100\text{ns}$ ). În plus, un fenomen de descărcare electrostatică direct pe pini unei componente electronice este capabil să îi producă defecte ireversibile. Fenomenul de generare a sarcinilor electrostatice este, în general, de tip triboelectric, ceea ce înseamnă că sarcina este generată de frecarea dintre două corpuri, dintre care măcar unul trebuie să fie dintr-un material electroizolant (rezistivitatea de suprafață  $> 10^9\Omega/\text{pătrat}$ ). Dintre cele mai uzuale materiale care determină acumularea de sarcini și apoi apariția fenomenelor de descărcare electrostatică amintesc: coperțile sintetice, ambalajele și paharele din plastic, role de bandă adezivă etc. Un parametru important al procesului de acumulare de sarcină electrostatică este umiditatea relativă a mediului. În figura 1.8 se pot observa câteva exemple de tensiune maximă de încărcare, asociate diverselor tipuri de activități, în funcție de umiditate relativă.

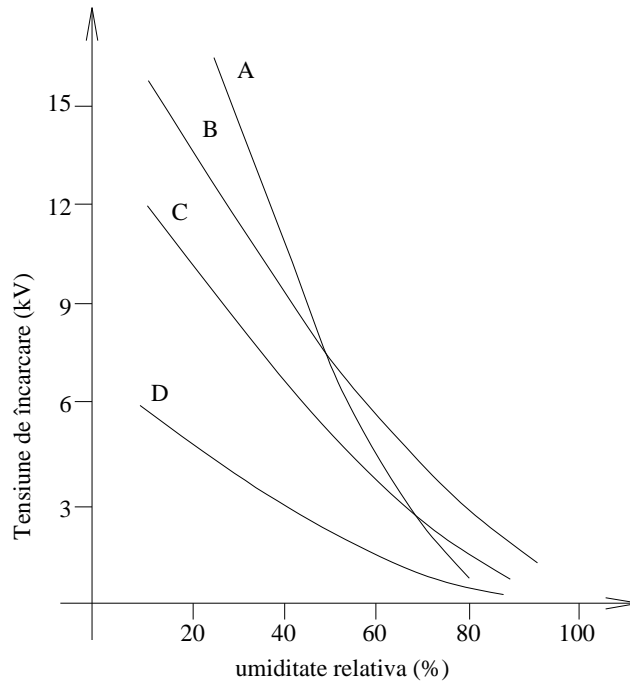


Fig. 4.8 Exemple de tensiune maximă de încărcare funcție de umiditatea relativă pentru diverse activități umane

A- Mers pe un covor de cauciuc pe o distanță de 6m

B- Ridicarea unei pungi de plastic de pe un stand de lucru

C- Mers pe un covor de PVC pe o distanță de 6m

D- Ridicarea din poziția de șezut de pe un scaun cu îmbrăcăminte piele artificială

Dacă procesul de acumulare a sarcinii electrostatice se oprește înainte să poată avea loc descărcarea, umiditatea relativă va influența timpul de disipare a sarcinii. Prin urmare, materialele ce atrag și rețin pe suprafața lor umezeala, rezultând o rezistivitate de suprafață scăzută ( $10^6 \div 10^9$

$\Omega/\text{pătrat}$ ) sunt considerate materialele antistatice. Descărcările în care sunt implicate corpuri din material conductor au loc într-un timp foarte scurt, de ordinul nanosecundelor, fiind însoțite de impulsuri de curent și, de asemenea, de câmpuri electrice și magnetice tranzitorii, tip impuls. Prin urmare, trebuie luate măsuri îndeosebi pentru prevenirea descărcărilor electrostatice spre conductori.

În timpul procesului de acumulare a sarcinii electrostatice, corpul omenesc se comportă ca și un condensator de  $100\div 200$  pF. Dacă persoana în cauză își schimbă poziția, își va schimba capacitatea și, prin urmare, sarcina de încărcare. Din valorile lui C și U din fig. 4.8, rezultă că energia care se acumulează,  $CU^2/2$  poate ajunge la valori de peste 1mJ. În cazul descărcărilor electrostatice, se presupune că un corp uman are o rezistență internă între  $150\div 1500$   $\Omega$ . Sarcina este concentrată pe zonele extreme, depărtate de trunchi, ale corpului omenesc, cum ar fi de exemplu o mână întinsă care ține o piesă metalică (șurubelniță sau tester).

Așa cum a fost menționat anterior, o descărcare electrostatică asupra unei conexiuni a unei componente electronice îi poate produce acesteia defecte permanente. Trebuie avut în vedere că nu numai dispozitivele semiconductoare sunt susceptibile la astfel de deteriorări, ci și rezistențe și condensatori de mici dimensiuni. În funcție de tipul dispozitivului, descărcările mai mari de 100 V pot produce defecțiuni ca, de exemplu, străpungerea dielectricului unei porți, deteriorarea unei joncțiuni, etc. Din acest motiv, circuitele semiconductoare sunt prevăzute din ce în ce mai des cu circuite de protecție integrate, scopul fiind obținerea imunității la descărcări de până la 2kV. Sigur, totul are un preț, circuitul de protecție are o capacitate proprie, care îi limitează viteza de răspuns.

Deteriorarea datorată descărcărilor electrostatice se produce mai ales când dispozitivele electronice sunt atinse în mod direct, cum ar fi, de exemplu, pe linia de producție sau pe perioada efectuării mentenanței. Prin urmare, cea mai importantă măsură de prevenire a acestor deteriorări este de a preveni acumularea sarcinilor electrostatice. Acest lucru este relativ greu de pus în practică, din moment ce oamenii simt descărcările electrostatice abia după valoarea de 2÷3 kV. Marea majoritate a descărcărilor au o valoare mai mică, astfel încât sunt greu de sesizat. Acumularea de sarcini electrostatice poate fi prevenită prin folosirea de covoare și folii de protecție antistatice, brățări antistatice, pungi protectoare ESD, îmbrăcăminte/încălțăminte specială, etc. Toate acestea au în comun faptul că sunt fabricate din materiale slab conductoare și nu permit formarea scânteilor și, cu condiția unei folosiri corecte, nu permit acumularea de sarcini electrostatice.

Tipul de interferență produs datorită descărcărilor electrostatice, poate fi simulat prin generarea de scânteii cu ajutorul unui aprinzător piezoelectric de aragaz în apropierea unui calculator de buzunar. Dacă acesta este susceptibil la interferențe, imaginea pe ecran va fi alterată. Câteodată, pentru aducerea ecranului calculatorului la stadiul inițial, este nevoie de o resetare a acestuia (închidere și apoi deschidere).

Generarea scânteilor cu ajutorul aprinzătorului piezoelectric poate fi folosită ca o metodă ieftină pentru detectarea celor mai susceptibile zone dintr-un circuit. Multe măsurări de verificare costisitoare pot fi înlăturate în acest mod, în faza incipientă în care modificarea schemei circuitului sau adăugarea unui condensator se poate face fără cheltuieli prea mari.

Figura 4.9 prezintă o variantă standardizată de investigare a formei de undă aferentă unor descărcări de sarcini electrostatice. Descărcarea se face pe o sferă metalică de dimensiuni mici, conectată prin intermediul unor rezistori conectați în paralel, dispuși sub formă de inel (valoare echivalentă  $1\Omega$ ) la referința generatorului ESD și printr-un rezistor de  $50\Omega$  la sistemul de măsură.

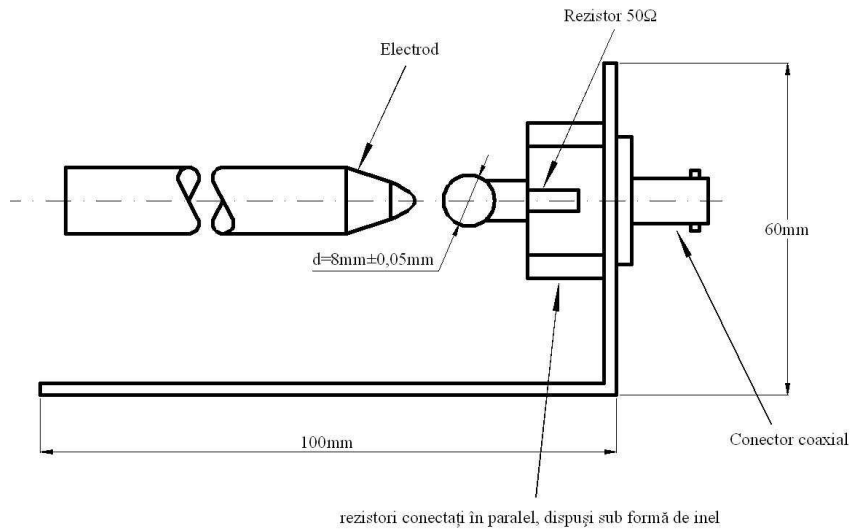


Fig. 4.9 Configurație standardizată IEC-61000-4-2 pentru studierea descărcării electrostatice pe o sarcină specială (Pellegrini) de bandă foarte largă

Un exemplu de impuls de curent de descărcare este dat în figura 4.10, pe o scară de timp de  $5\text{ns}/\text{div}$ , respectiv  $20\text{ns}$ . Operatorul uman a fost încărcat până la  $3\text{kV}$  și apoi descărcat prin intermediul unei șurubelnițe ținute în mână.

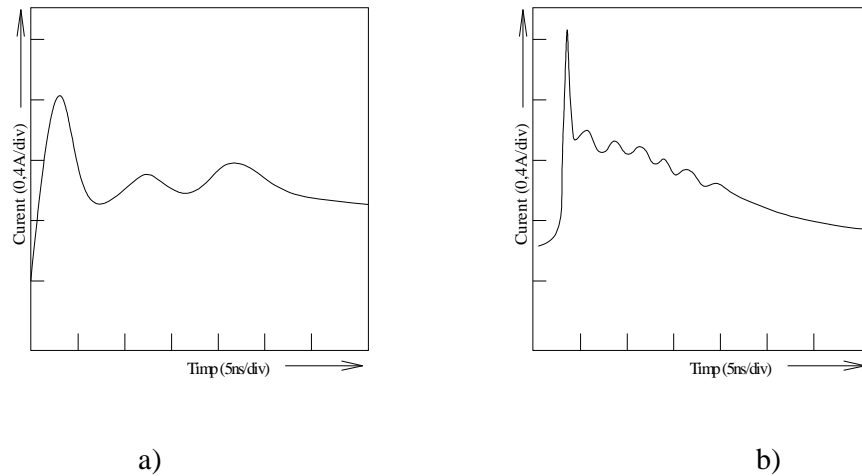


Fig. 4.10 Exemplu de impuls de curent generat de ESD

Prima concluzie care se poate trage este ca fenomenele ESD sunt extrem de rapide. Impulsul ajunge la punctul de maxim în mai puțin de 5ns, fenomenul terminându-se în aproximativ 100ns. Timpi de creștere mai mici de 1ns au fost observați cu ajutorul echipamentelor de măsură foarte performante.

Cea de-a doua concluzie care se poate trage este că impulsul este format dintr-un pre-impuls foarte rapid, urmat de un puls mai lent, lucru evidențiat mai ales în fig. 4.10 b). La o privire mai atentă se poate observa că pre-impulsul apare mai ales în cazul descărcărilor de până la 4kV. Acest pre-impuls rapid este asociat cu calea de închidere a curentului prin capacitățile parazite din punctul de descărcare. Impulsul care urmează este asociat cu căile de închidere a circuitului, incluzând conductorii de legătură la referință și la împământare (fig. 4.11)



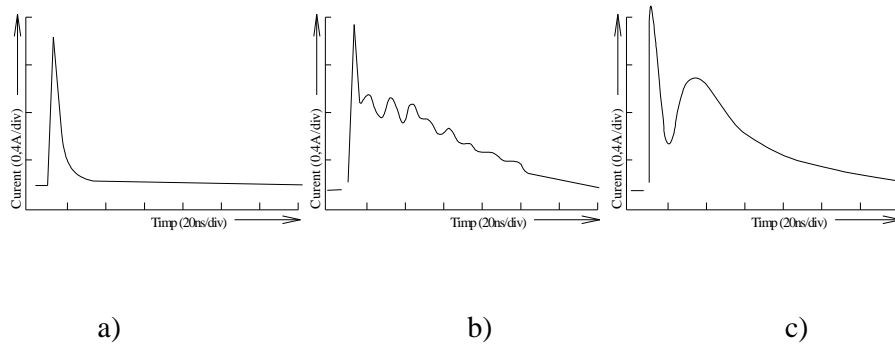


Fig. 4.11 Efectul prezenței sau absenței unei conexiuni directe între referința sondei

De osciloscop și elementul asupra căruia are loc descărcarea:

a) fără conexiune, b) conexiune de aproximativ 30 cm, c) conexiune de 200 cm

Pre-impulsul are importanță foarte mare în studierea fenomenului ESD pentru ca are o capacitate foarte mare de perturbare, mai ales datorită faptului că este sesizat foarte greu sau chiar deloc de către oameni. Când tensiunea depășește valoarea de 4kV, apare așa-numitul efect corona. Aerul din zona elementului de descărcare (un deget de la o mână, o șurubelniță manevrată de un muncitor, colțul unui cărucior cu unelte, dotat cu roți din material izolator, etc.) devine ionizat ca rezultat al câmpului electrostatic puternic prezent în acea zona. Dacă sarcina de pe elementul de descărcare este pozitivă, ionii pozitivi vor fi respinși spre punctul de descărcare. Astfel, calea de descărcare devine slab conductoare, astfel că sarcina ajunge în

punctul maxim mai încet, adică în 20÷30 ns, față de 5 ns. Reducerea pantei scade lățimea spectrului și deci șansa de interferență, chiar dacă tensiunea de descărcare este mai mare. Acest lucru a fost observat de multe ori în practică în trecut, când testele de imunitate ESD conțineau puține componente de frecvență ridicată iar tensiunilor scăzute li se dădea foarte puțină atenție. Astfel, un echipament care trece un test la 10-12kV, uneori se defecta în practică la tensiuni mai mici de 4kV.

În cazul descărcărilor în care intervine și efectul corona, panta impulsului de descărcare este în mare măsură determinată de viteza cu care se apropie cele două elemente între care are loc descărcarea. Dacă apropierea are loc destul de repede, nu va fi destul timp pentru calea de descărcare să devină slab conductoare din cauza ionilor ejectați, astfel încât panta de descărcare devine foarte abruptă.

Atât pre-impulsul, cât și impulsul lent pot fi approximate cu ajutorul unui impuls dublu-exponențial (fig. 4.12). Impulsul, care este foarte asemănător cu cel măsurat, este descris de relația:

$$I(t) = 7 \left( e^{-\frac{t}{1.5}} - e^{-\frac{t}{0.6}} \right) + 1.6 \left( e^{-\frac{t}{26}} - e^{-\frac{t}{3.5}} \right) \quad (4.4)$$

unde  $t$  este calculat în nanosecunde.

Acest impuls poate fi trecut din domeniul timp în domeniul frecvență. Funcția (1) din figura 4.12.a) reprezintă spectrul impulsului lent, iar funcția (2) reprezintă spectrul impulsului ESD complet, cuprinzând și frecvențe mult mai mari.

Câmpurile de tip impuls, generate de descărcările electrostatice nu au fost supuse unor investigații foarte temeinice, chiar dacă se știe faptul că aceste câmpuri sunt foarte puternice.

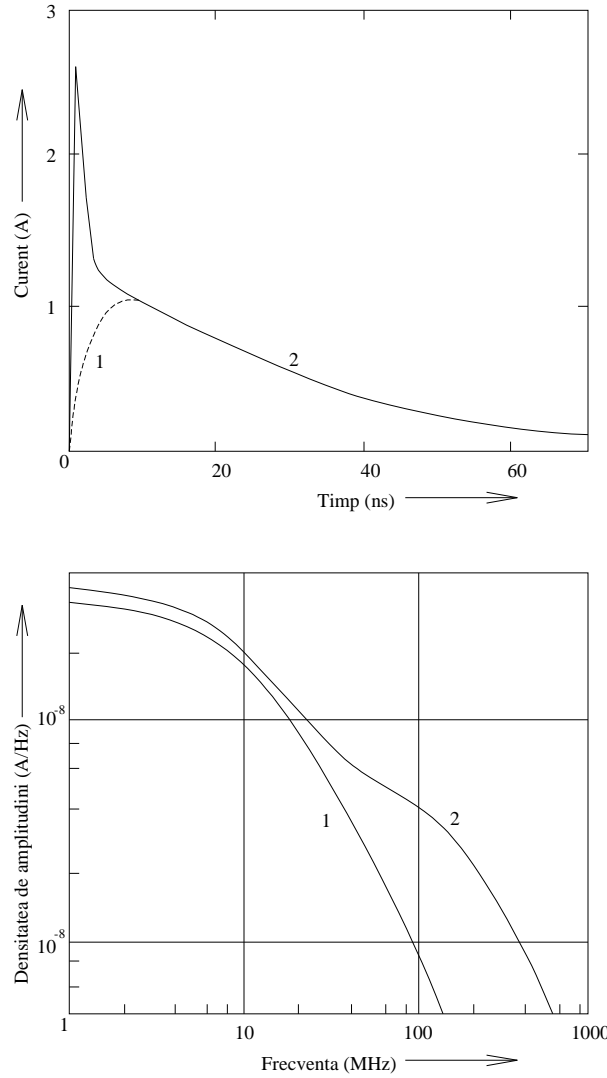


Fig. 4.12 a) Impuls ESD, în acord cu ecuația 4.4  
b) Spectrul densității de amplitudini asociat impulsului lent (1) și impulsului total (2)

#### **4.5 Estimări funcție de distanță a intensității câmpurilor electromagnetice produse de emițătoarele de radiofrecvență**

În Tabelul 4.4 sunt sintetizate caracteristicile celor mai des întâlnite emițătoare, din prisma puterii totale emise în regim de funcționare și a atenuării cu distanța, atunci când se propagă în spațiul liber. Teoretic, în spațiul cu adevărat liber, intensitatea câmpului electromagnetic variază invers proporțional cu distanța față de sursă. Se poate însă întâmpla ca puterea măsurată să fie mult mai mare decât cea teoretic estimată (chiar și dublă), datorită reflexiilor și rezonanțelor cu diverse structuri metalice din apropiere. Din contră, datorită eventualelor condiții de câmp apropiat (distanță față de sursă mai mică decât  $\lambda/2\pi$ ) și inprastierea sau absorpția de către obiectele aflate pe direcția de propagare, intensitatea câmpului electromagnetic scade proporțional cu  $1/r^n$ , unde exponentul  $n$  variază între 1.3 în câmp deschis și 2.8 pentru zonele urbane intens construite.

Standardul EN 55011 recomandă o valoare medie,  $n=2.2$ . Acesta este unul din principalele motive care justifică diferențe apreciabile între rezultatele aproximativ acelorași măsurări efectuate de ingineri experimentați, cu echipamente de calitate și în condiții aproximativ asemănătoare.

De exemplu, atenuarea produsă undelor radio de un zid de cărămidă este aproximativ 10 dB în medie, dar poate fi aproape zero pentru anumite frecvențe. Atenuarea produsă de o clădire cu structură de rezistență din oțel poate fi mult mai mare decât aceasta, cu excepția spectrului cuprins între 50-200 MHz (în centru se găsește banda alocată posturilor de radio FM).

Pentru propriile noastre determinări am folosit Analizorul Spectral mobil SPECTRAN HF 60105 V4, echipat fie cu antena directivă Hyper LOG 60100, fie cu antena izotropică Omni LOG 90200.

Nivelul de fond al radiațiilor electromagnetice de radio-frecvență în mediul citadin contemporan este între 0.1 și 1V/m, fiind dominat de semnale din gama undelor scurte, medii sau lungi.

Tabel 4.4 Distanța față de sursă, la care se înregistrează cele 4 valori reprezentative ale intensității câmpului electromagnetic.

Tipul de emițător de RF și puterea maximă emisă	Distanța la care se măsoară 1V/m	Distanța la care se măsoară 3V/m	Distanța la care se măsoară 10V/m	Distanța la care se măsoară 30V/m
Telefon celular 2,5G, (GSM), 0.8W tipic (2W maxim)	5(7.8)m	1.6(2.5)m	0.5(0.8)m	0.16 (0.25)m
Radio mobil privat,4W (TETRA sau walkie-talkie în banda VHF)	11m	3.6m	1.1m	0.36m
Comunicații (stații tip walkie-talkie) pentru serviciile de	16m	5m	1.6m	0.5m

*Câmpuri electromagnetice: surse și interacțiuni*

urgență (pompieri, salvare, poliție), 10W				
Stații radio speciale VHF, utilizate în comunicații navale, 20W	25m	8m	2.5m	0.8m
Radarul marin pulsator, 25KW	850m	290m	89m	29m
Posturi de radioemisie(FM sau AM, unde scurte, medii și lungi), 100KW	1.7Km	580m	170m	58m
Posturi de emisie TV în UHF, 5MW	12Km	4Km	1.2Km	400m
Faruri(din porturi) tip radar, 100MW	55Km	18Km	5.5Km	1.8Km
Controlul traficului aerian si radare meteo, 1GW	170Km	60Km	17Km	6Km

Radare militare, 10GW	550Km	180Km	55Km	18Km
--------------------------	-------	-------	------	------

De principiu, radarele lucrează în impulsuri. Valoarea de varf a puterii emise depinde de tipul de radar și de caracteristicile pulsatorii. Undele tip radar se propagă în linie dreaptă, fiind atenuate de diverse obstacole (dealuri, curbura pământului).

#### **4.6 Mecanisme de interacțiune (căi de cuplaj electromagnetic) între sursă și susceptor**

Orice situație de incompatibilitate electromagnetică prezintă două elemente esențiale: o sursă de interferențe și un susceptor, victimă a emisiilor acestei surse. În plus, mai există un al treilea factor și anume calea de cuplaj dintre sursă și susceptor, care poate fi prin conducție (cuplaj capacitiv, inductiv sau galvanic), sau prin radiație (există antenă emițătoare și apoi, antenă receptoare). Evident, antena este reversibilă, poate fi și emițătoare dar și receptoare. (Fig.4.13). Același echipament poate constitui o sursă de interferențe într-o situație și un susceptor (receptor de semnale nedorite) în alta.

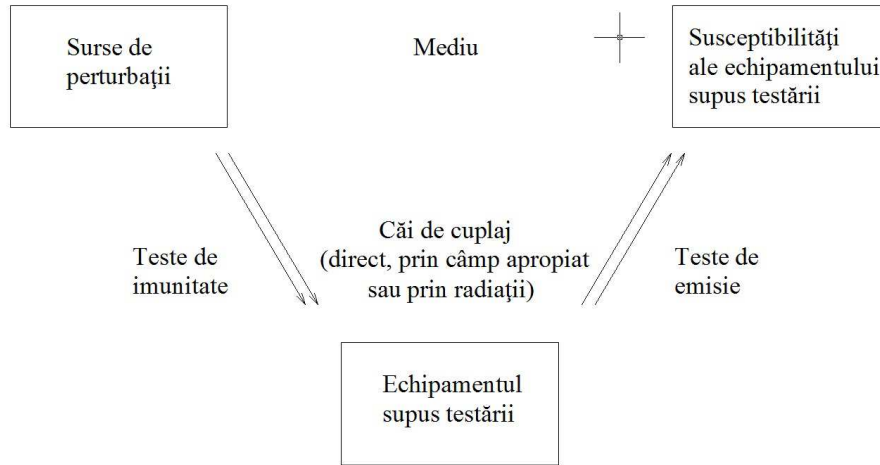


Fig. 4.13 Principiul testelor de compatibilitate electromagnetică: același aparat este și victimă și agresor.

#### 4.6.1 Cuplaj prin cablurile de tensiune sau de semnal

Calea de cuplaj cea mai ușor de identificat este conexiunea directă dintre sursă și susceptor, exemplul cel mai tipic fiind cel al cablurilor de alimentare de la sursa de putere (Fig. 4.14)

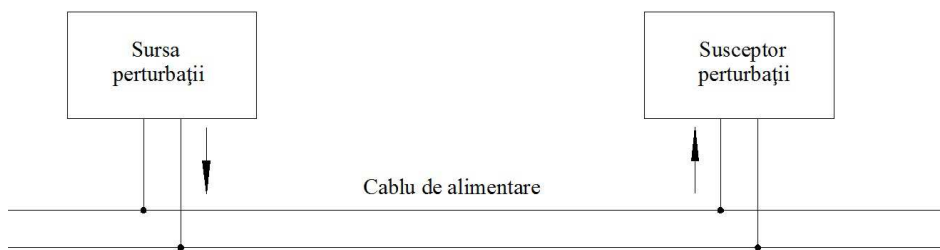


Fig. 4.14 Cuplaj prin cablul de alimentare cu energie electrică



Perturbațiile prezente la ieșirea sursei de interferențe sunt propagate de-a lungul cablurilor până la locul de alimentare al susceptului. Astfel, rețeaua de tensiune poate fi considerată un element pasiv în această schemă. Perturbațiile pot fi propagate de-a lungul acestei rețele în mod diferențial, adică între cablurile sale, sau în mod comun, de-a lungul cablurilor sale raportat la o referință comună. În majoritatea cazurilor, se regăsesc ambele moduri de cuplaj, unul dintre ele fiind însă dominant.

Calea de cuplaj poate fi modelată ca o sursă de zgomot cu impedanța proprie  $Z_S$ , conectată la impedanța caracteristică  $Z_0$  a rețelei de tensiune, considerată aici o linie de transmisie, care mai apoi alimentează impedanța de sarcină  $Z_L$  a susceptului (Fig. 4.15)

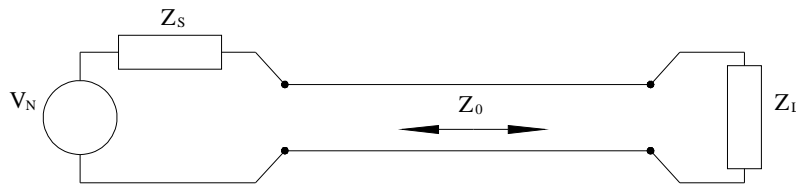


Fig. 4.15 Cuplaj prin cablurile de alimentare – circuit echivalent

În mod evident, cantitatea de perturbație care va ajunge la susceptor va depinde de valorile acestor impedanțe, care sunt complexe și puternic dependente de frecvență. În cazul rețelei de alimentare,  $Z_0$  este puternic afectat de sarcinile conectate la rețea în diferite puncte. În funcție de momentul din zi și de frecvență,  $Z_0$  poate lua valori între 2 și 2000  $\Omega$ , chiar dacă impedanța caracteristică a rețelei de alimentare cu energie electrică este relativ stabilă și previzibilă, conductorii fiind din cupru. CISPR - Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques – a introdus

valoarea de  $50\Omega/50\mu\text{H}$  pentru impedența dintre fiecare fază și nul, acoperind plaja de frecvențe 9kHz – 30MHz pentru testele de perturbații conduse. Această valoare este una medie, determinată în urma unor măsurători asupra mai multor instalații din diverse zone geografice.

În funcție de lungimea cablajului dintre sursa de perturbații și susceptori și de frecvența care prezintă interes, rețeaua de alimentare poate sau nu fi considerată o linie de transmisie. Parametrii liniilor de transmisie devin importanți pentru o lungime mai mare decât un sfert din lungimea de undă. Pentru valori mai mici, impedența poate fi reprezentată printr-o aproximare cu parametri concentrați. În cazul frecvențelor mai mari de 30 MHz, cablurile mai mari de 2,5 m trebuie considerate ca fiind linii de transmisie; de exemplu, la 1MHz, 75m reprezintă un sfert din lungimea corespunzătoare de undă de 300m.

Cantitatea de perturbație „injectată” de sursă în rețea este influențată atât de tensiunea propriu-zisă, dar și de adaptarea impedențelor (sursă și cablu). În mod normal, o asemenea nedorită potrivire între o sursă de interferențe și victima ei, care să aibă ca rezultat un cuplaj maxim, se întâlnește foarte rar. Scopul filtrelor amplasate pe cablurile de alimentare este de a minimiza această adaptare și deci, de a micșora transferul de putere cu câteva ordine de mărime. Gradul de potrivire este afectat de impedența circuitului de o parte și de alta a filtrului, motiv pentru care performanțele reale ale filtrelor vor avea foarte rar valorile oferite de producător.

Cuplajul în interiorul rețelei de curent electric nu este singurul exemplu de cuplaj direct. Totuși, prezintă cel mai mare interes pentru că, în general, nu există o relație între sursa de perturbații și victima sa, astfel încât inginerul proiectant nu va putea anticipa gradul de interacțiune dintre ele.

De asemenea, cablurile de date și de semnal dintre diferite echipamente pot conduce perturbații; prin urmare, și lor li se pot aplica aceleași analize de cuplaj.

#### 4.6.2 Cuplajul prin impedanță comună

O a doua formă de cuplaj direct are loc între două module separate, dar care au o impedanță comună. Cel mai uzual exemplu este cel al unei împământări comune. În acest caz, trecerea curentului prin impedanța comună distorsionează curenții din toate circuitele cuplate galvanic. În figura 4.16 este prezentată schema de principiu a două circuite cuplate galvanic prin intermediul impedanței comune  $Z_c$ :

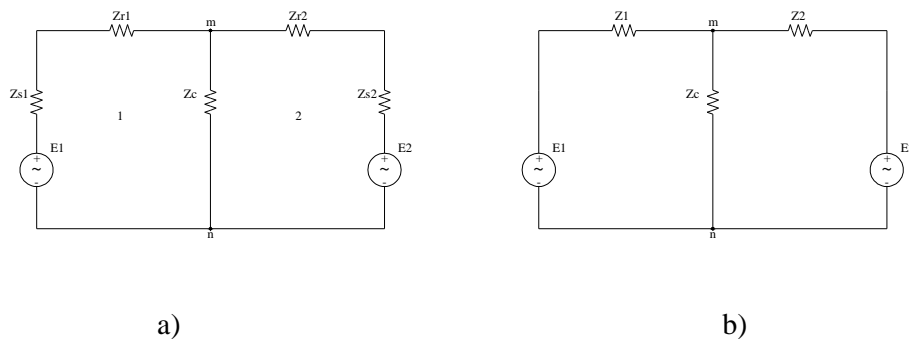


Fig. 4.16 Cuplajul galvanic a) schema completă, b) schema simplificată

unde:

- $E_1, E_2$  – tensiunile electromotore ale surselor;
- $Z_{s1}, Z_{s2}$  – impedanțele interne ale surselor ;
- $Z_{r1}, Z_{r2}$  – impedanțele receptoarelor.

În schema simplificată din Fig. 4.16 b), unde  $Z_1=Z_{r1}+Z_{s1}$  și  $Z_2=Z_{r2}+Z_{s2}$  se pot observa interferențele produse de cuplajul galvanic.

Ecuatiile de funcționare ale circuitelor sunt:

$$E_1 = Z_1 I_1 + Z_c(I_1 + I_2)$$

$$E_2 = Z_2 I_2 + Z_c(I_1 + I_2)$$

În mod uzual, cuplajul galvanic apare în schemele circuitelor imprimate în care punctele  $m$  și  $n$  din Fig.4.16 sunt puncte de pe conductorul de masă al schemei. Neutralizarea cuplajului galvanic se realizează prin unirea celor 2 puncte ca în fig. 4.17. În condițiile în care circuitul imprimat este destinat funcționării la frecvențe mari, de 10MHz÷10GHz, trebuie luate în considerare și alte cuplaje între linii, în afara cuplajului galvanic.

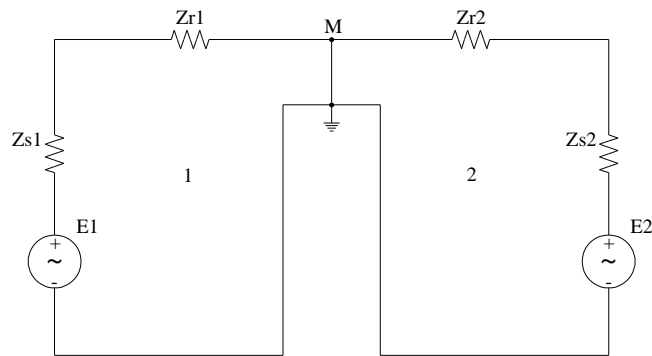


Fig. 4.17 Diminuarea cuplajului galvanic prin legarea la masă într-un singur punct

#### 4.6.3 Cuplajul galvanic datorat împământării

În figura 4.18 se arată ca, dacă prizele de împământare  $P_1$  și  $P_2$  se află la distanța  $d$  una de cealaltă, între  $P_1$  și  $P_2$  se va putea măsura o tensiune de valoare orientativă 0,1÷2,5V, în funcție de poziția geografică a terenului

și de eventualele instalații din zonă, cum ar fi conducte de apă și gaz, șine de cale ferată etc.

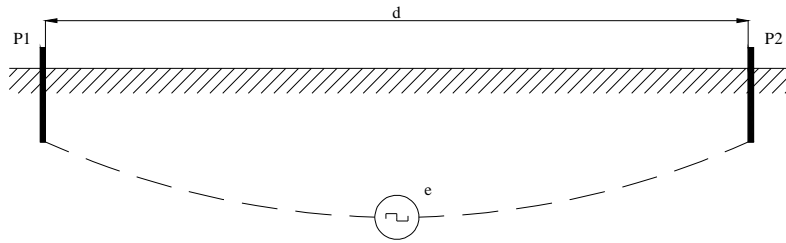


Fig. 4.18 Tensiunea electromotoare  $e$  între două prize de pământ

Diferența de potențial între cele două prize de pământ este atribuită curenților vagabonzi, care se stabilesc necontrolabil, impredictibil prin sol. Din punctul de vedere al compatibilității electromagnetice, se consideră că între cele două prize de împământare  $P_1$  și  $P_2$  apare o tensiune electromotoare echivalentă  $e$ , care acționează ca o perturbație de mod comun.

#### *Impedanța de cuplaj a cablului coaxial*

Uzual, conexiunea dintre un senzor și un aparat de măsură (de ex. un osciloscop) se realizează prin intermediul unui cablu coaxial cu impedanța caracteristică de  $50\pm 70 \Omega$ . Cablul coaxial constituie alegerea optimă datorită faptului că varianta unei linii cu două conductoare ar avea inductivitatea specifică mai mare, fără a beneficia de avantajele unui ecran.

Dacă se consideră un cablu coaxial de lungime  $l$ , scurtcircuitat la o extremitate, al cărui ecran este străbătut de curentul armonic  $I(\omega)$ , se va observa că la extremitatea liberă se obține tensiunea  $U(\omega)$  (Fig.4.18).

Impedanța de cuplaj a cablului coaxial, exprimată în  $\Omega/m$  va fi dată de expresia:

$$Z_c = \frac{U(\omega)}{I(\omega)l}$$

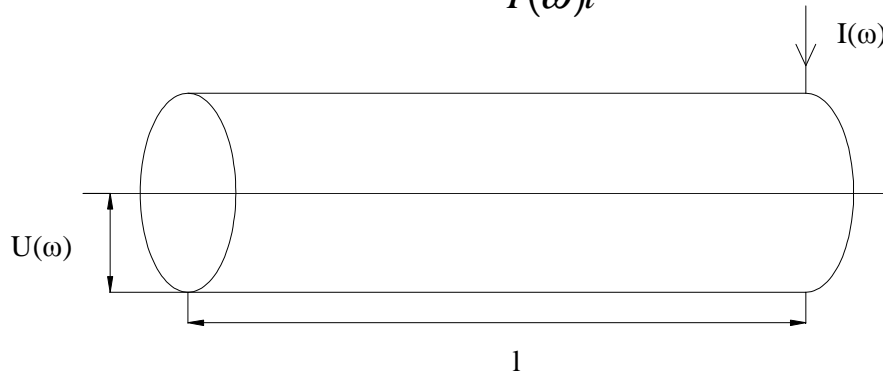


Fig. 4.19 Impedanța de cuplaj a unui cablu coaxial

Figura 4.20 prezintă două module legate la aceeași bornă de împământare, care este apoi conectată la bara de împământare generală printr-un alt cablu.

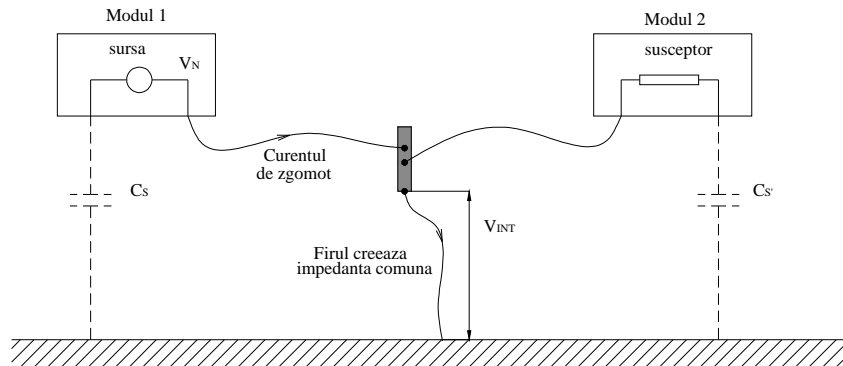


Fig. 4.20 Cuplaj prin impedanță comună

Modulul 1 poate prezenta un zgomot intern  $V_N$ , cuplat la firul de împământare, și raportat la sistemul exterior de masă prin conexiunea la alte module. Curentul produs de această tensiune parazită va trece nu numai prin cablul de împământare al Modulului 1 dar și prin cablul comun de împământare care face legătura cu borna de referință a sistemului. Din cauză că impedanța acestui cablu este finită, o nouă tensiune parazită  $V_{int}$  apare între borna de împământare și referința sistemului. Prin urmare, ea va fi cuplată la conexiunea de împământare a Modulului 2.

#### 4.6.4 Cuplajul parazit în câmp apropiat

Interferențele au loc chiar și în lipsa unei conexiuni între două sau mai multe module. Câmpul magnetic apare în jurul unui conductor parcurs de un curent electric, iar cel electric apare când doi conductori apropiați au potențial diferit. Amândouă aceste timpuri de câmp sunt capabile de a

induce interferențe celui de-al doilea sistem cuplat la câmp. Principiile implicate sunt aceleași folosite la transformatoare și condensatoare. Rezolvarea unei probleme de cuplaj EMC în zona de câmp apropiat înseamnă, de fapt, controlarea apariției unor transformatoare și condensatoare parazite nedorite în structura sistemului. La frecvențe ridicate, aceste elemente devin foarte problematice.

#### **4.6.4.1. Cuplaj parazit magnetic/inductiv**

Tensiunea indusă într-un conductor de un curent ce trece printr-un al doilea conductor, aflat în imediata vecinătate a primului (Fig. 4.21) este:

$$V_N = -M \frac{di}{dt}$$

unde  $M$  este inductanța mutuală a celor doi conductori. Această tensiune apare în circuitul susceptor în serie cu semnalul util și nu depinde de impedanțele circuitului. Inductanța mutuală este determinată de distanța dintre conductori, de lungimea porțiunii pe care ei sunt alăturați, de geometria lor și, eventual, de prezența unui ecran magnetic în jurul unuia dintre conductori. Cea mai întâlnită situație în care cuplajul magnetic are valori sesizabile este atunci când mai multe circuite sunt adunate într-un singur manșon.



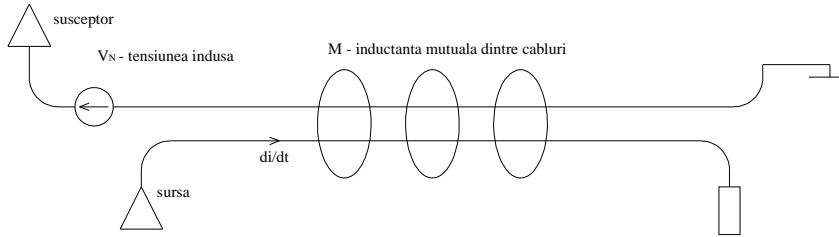
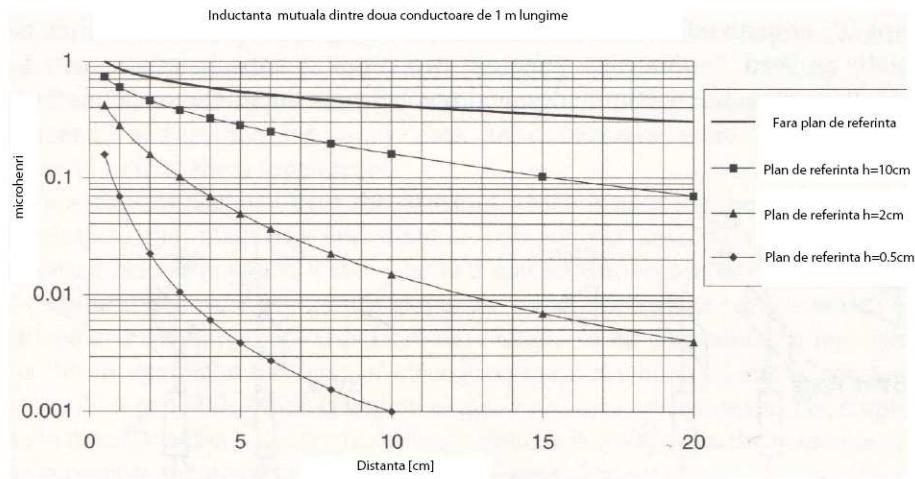


Fig. 4.21 Cuplaj în câmp magnetic

În acest caz, pe toată lungimea manșonului, aceste cabluri sunt foarte apropiate iar inductanța mutuală are valori mari. Acesta este unul din motivele pentru care cablurile electrice trebuie separate pe clase. În figura 4.22 se poate observa o analiză cantitativă a efectelor acestor separări (distanțe între conductori) asupra inductanței mutuale.



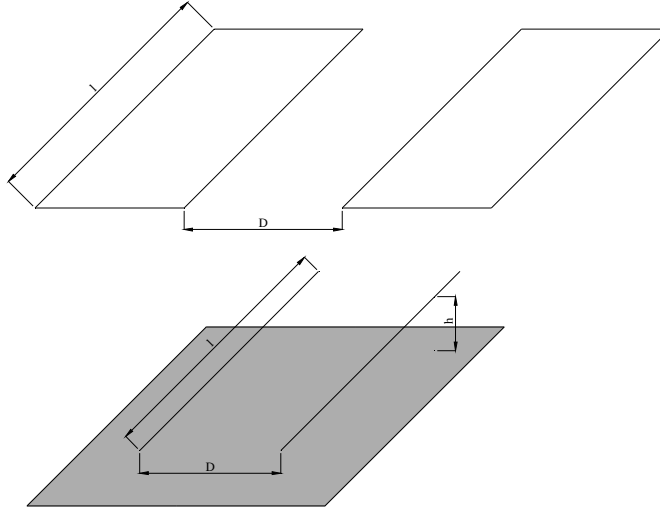


Fig.4.22 Influența distanței relative și a poziției planului de referință asupra inductanței mutuale a doi conductori

Pentru două cabluri, fără plan de referință,  $D/l \ll 1$ , avem:

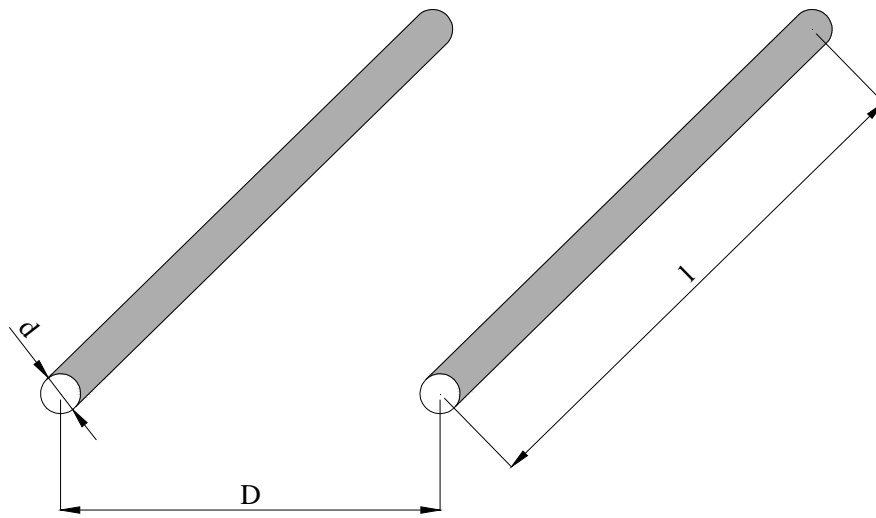
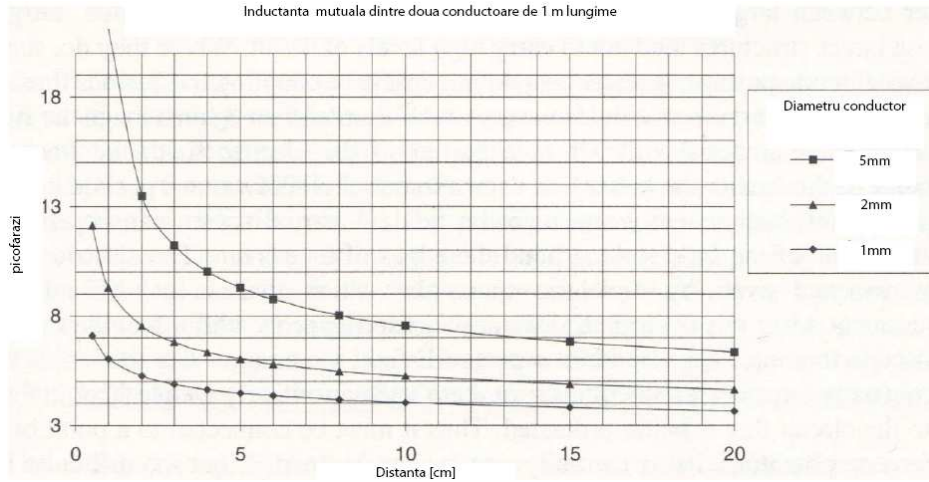
$$M = 0,002 \cdot l \cdot \left( \ln \frac{2l}{D} + \frac{D}{l} - 1 \right)$$

Curentul de întoarcere prin planul de referință este:

$$M = 0,001 \cdot l \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{2h}{D} \right)^2 \right)$$

unde M este exprimat în  $\mu\text{H}$ , lungimile fiind exprimate în cm.

In fig. 4.23 este prezentată grafic influența distanței dintre fire, a diametrului lor asupra capacității mutuale, distribuite pe unitatea de lungime a conductorului.



$$C = \frac{0,0885 \cdot l \cdot \pi}{\cosh \frac{D}{d}}$$

unde C este exprimat în pF iar D și d în cm.

Fig. 4.23 Efectele distanței dintre doi conductori asupra cuplajului electric (capacitate mutuală)

Dacă un circuit de întoarcere este plasat în apropierea cablului de tensiune sau semnal, câmpul magnetic datorat curentului de semnal este anulat din cauza curentului de întoarcere, egal în modul. Din acest motiv, perechile de cabluri semnal/întoarcere sau tensiune/retur (sau tripleta/cvadruplul, în cazul alimentării trifazate în triunghi/stea) ar trebui întotdeauna trecute prin același manșon.

O altă situație în care cuplajul magnetic are valori semnificative este cazul în care este implicată o componentă magnetică, de genul unui transformator sau a unei înfășurări a unui motor. Câmpul magnetic din jurul miezului unei astfel de componente poate avea valori mult mai mari decât acela din jurul unui conductor prin care trece un curent echivalent, dar scade invers proporțional cu cubul distanței. Problemele apar în general doar în cazul în care un fir aparținând unui circuit sensibil sau chiar un dispozitiv sensibil din punct de vedere magnetic (cum ar fi un senzor) este montat exact lângă o asemenea componentă. În acest caz, o distanțare foarte mică va avea ca rezultat o îmbunătățire majoră. De exemplu, o mărire a distanței de la 2 la 20 cm va avea ca rezultat o scădere a cuplajului cu 60dB, adică de 1000 de ori.

Ecranarea magnetică este foarte greu de realizat. Majoritatea materialelor conductoare cum ar fi cuprul sau aluminiul sunt foarte transparente la câmpul magnetic și nu oferă o atenuare semnificativă la frecvențe scăzute. Un material permeabil din punct de vedere magnetic cum ar fi oțelul, permalloy sau  $\mu$ -metal este mai eficient, dar necesită dimensiuni sporite ale ecranului pentru o absorbție eficientă și este dificil de implementat (cost, gabarit, greutate). Singura soluție reală la problema

cuplajului magnetic este de a înfășura sursa sau susceptorul pe toata lungimea lor, cu un tub din material conductor (Fig. 4.24) prin care va trece un curent egal dar de sens opus, al cărui efect va fi de a anula cuplajul magnetic prin câmp în afara tubului. Dacă tubul și conductorul sunt perfect coaxiale, cuplajul magnetic este nul. Acesta este unul din cele mai importante principii de funcționare a cablurilor RF coaxiale ecranate.

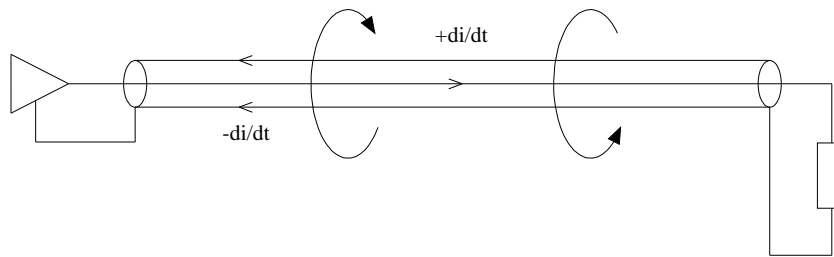


Fig. 4.24 Atenuarea câmpului magnetic. Curentul ce trece prin ecranul cablului coaxial anulează câmpul magnetic produs de curentul ce trece prin conductorul central

#### 4.6.4.2 Cuplajul parazit electric/capacitiv

Când între doi conductori există o diferență de potențial, apare un câmp electric ce va induce în conductorul susceptor o tensiune:

$$V_{in} = C_c \cdot Z_m \cdot \frac{dV_s}{dt}$$

unde  $V_{in}$  este tensiunea indusă în circuitul susceptor de impedanță  $Z_{in}$ , de tensiune parazită  $V_s$ , impedanța sursei fiind neglijabilă, cuplată printr-o capacitate mutuală  $C_c$ . Primul fapt care se poate observa este că, spre deosebire de cuplajul magnetic, gradul cuplajului electric depinde de

impedanța de sarcină a suscepterului, astfel încât circuitele cu impedanță mare sunt cele mai sensibile. În plus, circuitele sursei și suscepterului trebuie conectate la masă împreună. Acest lucru se poate observa și din figura 4.25, unde circuitele au același punct de împământare, dar cuplajul electric poate avea loc și între circuite separate printr-un ecran unul de celălalt. În acest caz, sunt implicate două capacități de cuplaj, una între nodurile sursei și suscepterului și una între punctele de masă ale fiecărui circuit.

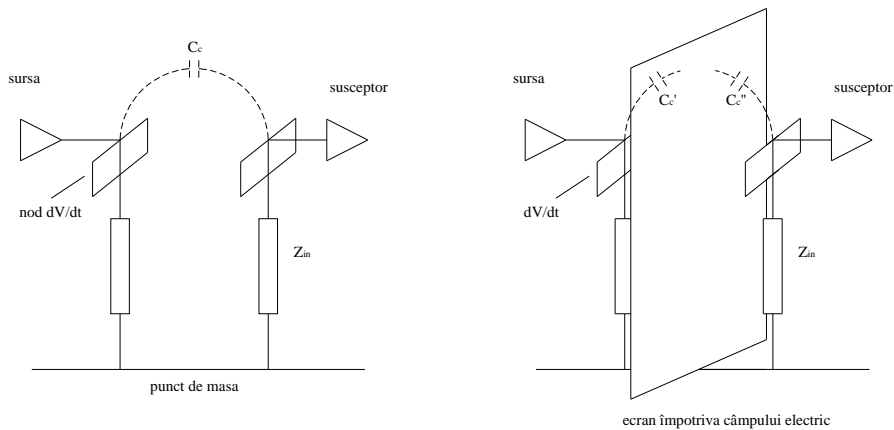


Fig. 4.25 Cuplaj parazit prin câmp electric

Capacitatea mutuală apare de regulă între două noduri aflate la potențiale diferite nenule ale unui circuit; intensitatea curentului nu are relevanță deosebită. Evident, putem întâlni ambele variante în aceeași structură, cum ar fi o pereche de conductoare. Capacitatea este dependentă de distanța dintre cele două conductoare, de geometria lor, de natura dielectricului și/sau prezența unui ecran de câmp electric între cele două

noduri. Din cauză că aria suprafeței „față-n față” este importantă, cuplajul capacitiv este în general mai mare în cazul obiectelor cu dimensiuni mai mari decât în cazul celor de dimensiuni reduse. Totuși, nivelurile ridicate ale raportului  $dV/dt$  se întâlnesc destul de rar în cazul structurilor cu dimensiuni mari. În rarele cazuri când acest lucru se întâmplă, cuplajul capacitiv va constitui un potențial perturbator semnificativ.

Ecranarea împotriva câmpurilor electrice este mult mai ușor de realizat decât cea împotriva câmpurilor magnetice. Orice material conductor va constitui un ecran împotriva câmpului electric. Chiar dacă eficacitatea ecranului este invers proporțională cu rezistivitatea materialului, chiar și un material cu o rezistivitate foarte scăzută, cum ar fi un strat de vopsea pe bază de nichel, va atenua foarte eficient câmpul electric. Un ecran parțial poate oferi suficientă protecție, chiar dacă există scăpări în zona marginilor ecranului. Materialele dielectrice vor produce și ele distorsiuni asupra câmpurilor electrice, fapt care îngreunează măsurările specifice, din moment ce orice probă va distorsiona câmpul ce trebuie măsurat. Un aspect important în ecranarea câmpului electric este acela că ecranul trebuie să fie la potențial nul, pentru a nu cupla capacitiv cu circuitul protejat. Pentru aceasta, ecranul trebuie conectat la pământ. Problema în implementarea practică este că multe împământări, presupuse a avea potențial nul, se află la diferite nivele de tensiune. În cadrul proiectării detaliate a ecranării sistemelor, punctul de conectare la pământ trebuie ales cu foarte mare grijă. Chiar dacă poate fi folositor din alte puncte de vedere, un ecran din material conductor, neconectat la un punct de masă, nu este folositor din punct de vedere al câmpului electric.

#### 4.6.5 Cuplaj parazit prin radiație (câmp depărtat)

Formulele  $i = C \frac{du}{dt}$  și  $u = -L \frac{di}{dt}$  arată legătura directă între curentul

și tensiunea variabilă. Un câmp electric variabil ( $\frac{du}{dt}$ ) produce un câmp magnetic variabil ( $\frac{di}{dt}$ ), reciproca fiind, evident, valabilă. În concluzie, dacă tratarea câmpurilor electrice și magnetice poate fi făcută separat la joasă frecvență, pe măsură ce crește frecvența, separarea lor este lipsită de sens și utilitate practică.

La o distanță suficient de mare de structura iradiantă, componenta magnetică și cea electrică se unesc într-o undă electromagnetică. Vectorii celor două componente sunt situați în unghi drept unul față de celalalt, într-un plan perpendicular pe direcția de propagare, practic un front de undă sferic (Fig. 4.26). În vid, pe orice punct al acestei sfere, raportul dintre componenta electrică și cea magnetică este constant și egal cu  $120\pi$  sau  $377\Omega$ , valoare cunoscută și ca “impedanța vidului”. Amplitudinile celor două componente variază în funcție de dimensiunile și formele (preponderent liniară, respectiv circulară) ale diverselor elemente radiante (porțiunile de circuit parcurse de un curent de înaltă frecvență).



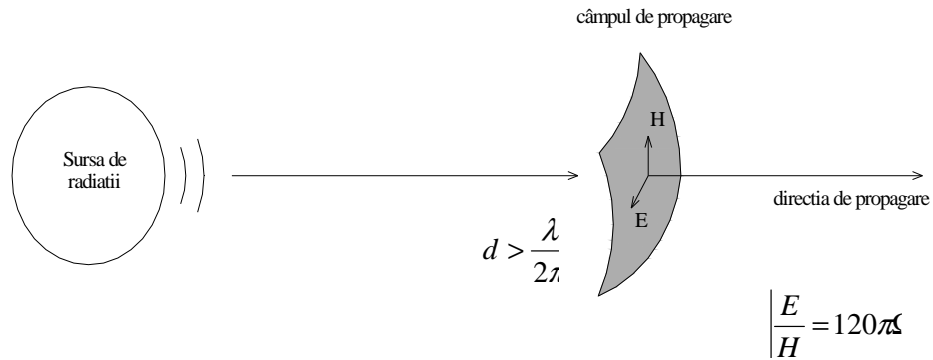


Fig. 4.26 Frontul de undă sferic (cazul ideal). Componentele Camp Electric și Camp Magnetic ale câmpului electromagnetic sunt perpendiculare, situate în planul perpendicular pe direcția de propagare

Distanța de la care începe regiunea de impedanță constantă poate fi dedusă din ecuațiile lui Skelkunoff și este  $\lambda/2\pi$ , sau aproximativ a șasea parte din lungimea de undă. De exemplu, la 30MHz, această distanță este de 1,5m, la 1Mhz – 48m, la 300MHz – 16cm sau 48km la 1kHz. După această distanță, în câmp depărtat, mecanismul dominant de cuplaj și propagare este prin radiație. Unda electromagnetică induce curenți și tensiuni în structura susceptoare, acționând ca o antenă. Potențialul de interferență al undei poate fi exprimat ca și densitate de putere ( $W/m^2$  sau  $mW/cm^2$ ), sau ca o intensitate de câmp electric (V/m), sau intensitate de câmp magnetic (A/m).

Cuplajul radiat dintre sursă și susceptor depinde de eficacitatea celor două elemente ca și antene (emițătoare, respectiv receptoare). Produsele electrice și electronice, altele decât cele radio, sunt rareori proiectate pentru acest scop și sunt în general niște receptori relativ ineficienți de energie

radiată la majoritatea frecvențelor. Totuși, există posibilitatea ca o anumită amplasare a elementelor componente să aibă ca rezultat o mărire a eficienței aceluși dispozitiv ca și antenă receptoare pentru unele frecvențe. Antenele eficiente au grupuri de elemente aranjate intenționat astfel încât curenții și tensiunile sunt în relația de fază dorită la frecvența de rezonanță a structurii pentru a asigura transferul maxim de energie la acea frecvență.

Dimpotrivă, proiectarea în spirit EMC, vizând minimizarea radiației, înseamnă tocmai aranjarea deliberată a elementelor dintr-o schemă astfel încât să împiedice apariția rezonanțelor sau să le amortizeze, iar eventualii curenți și tensiuni induse să nu cupleze peste un anumit nivel cu circuitele interne.

Eliminarea rezonanțelor este dificilă, în special din cauză că majoritatea carcaselor sunt de formă rectangulară, astfel încât fenomenul de rezonanță va apărea de fiecare dată când una din dimensiunile de gabarit ale carcasei va fi un multiplu de un sfert sau o jumătate de lungime de undă. Cu cât frecvența oscilației este mai mare, cu atât va fi mai ușor de „îndeplinit” această condiție ( $\lambda/4$  având valori tot mai mici, care se găsesc în mod firesc într-un echipament obișnuit).

În tabelul 4.5 sunt exemplificate câteva posibile elemente conductoare ale unui anume echipament sau dispozitiv care pot deveni antene emițătoare sau receptoare pentru anumite frecvențe (este îndeplinită condiția de rezonanță).

Frecvență	$\lambda/2$	Elemente care îndeplinesc condiția de rezonanță pentru frecvența respectivă
10 MHz	15 m	Cabluri de lungime mare
50 MHz	3 m	Cabluri de lungime medie, carcase (dulapuri) de dimensiuni mari

100 MHz	1,5 m	Cabluri de lungime mică, carcase (dulapuri) de dimensiuni medii
300 MHz	50 cm	Carcase de dimensiuni medii, conexiuni electrice interne
600 MHz	25 cm	Carcase de dimensiuni mici, PCB (cablaje imprimate)

Tabel 4.5 Exemple de posibile antene parazite pentru anumite frecvențe (lungimi de undă) ale perturbației radiate

Atenuarea se poate realiza relativ eficient, mai ales ca ea se produce oricum, în mod natural, odată cu introducerea în cadrul echipamentelor a structurilor de dimensiuni mai mici (cum ar fi plăcile calculatoarelor sau traseele electrice interioare). Atenuarea se poate realiza și prin folosirea unor cabluri prevăzute cu inele din ferită (șoc de RF) pentru traseele electrice principale. Prin urmare, principalul scop al compatibilității electromagnetice este separarea interferențelor (parazite) care apar în echipament de curenții și tensiunile utile din circuit, iar acest lucru se realizează prin ecranare, împământare și filtrare (inclusiv separarea, creșterea distanțelor dintre perturbat și perturbator).

#### **4.7 Cuplaj de mod diferențial și cuplaj de mod comun**

Unul dintre cele mai importante aspecte ale compatibilității electromagnetice este de a înțelege deosebiriile dintre modurile de cuplaj. Baza acestei deosebiri este ideea că două circuite separate pot exista în

același set de conductoare. De-a lungul conductorilor de semnal sau alimentare - dus și întors – curenții trec în mod diferențial, în sens opus unul față de celălalt. Acești conductori formează circuitul util. În afară de acesta mai există și un circuit parazit, format între circuitul util și structura în care acesta este plasat. Acest circuit se numește “de mod comun” toți curenții având același sens. În figura 4.27 sunt ilustrate diferite moduri de cuplaj pentru un echipament generic, care are un circuit de alimentare cu energie de la rețea și unul de date (circuit de semnal). Săgețile din figură implică existența unor emisii.

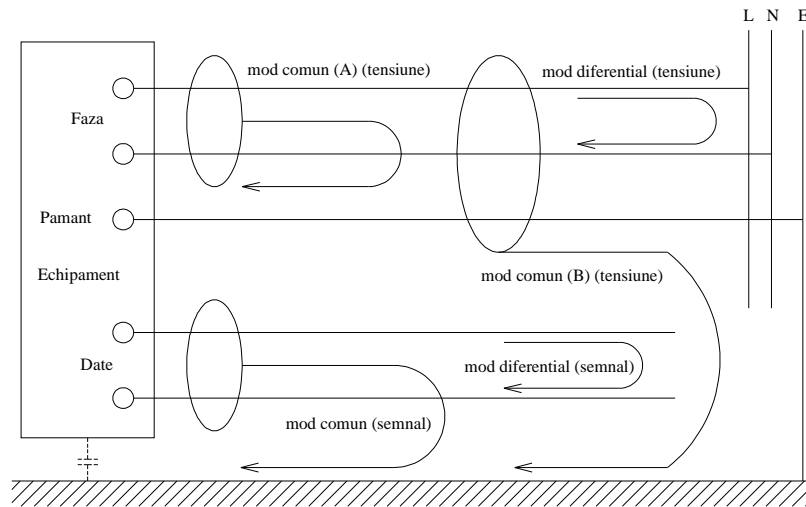


Fig. 4.27 Cuplaj de mod diferențial și de mod comun

#### 4.7.1 Perturbații conduse de mod diferențial

Cazul de perturbație condusă de mod diferențial cel mai ușor de vizualizat este cel al unei surse de tensiune. Perturbația apare între fazele

sursei (între L și N în cazul sursei de curent alternativ, între plusul și minusul sursei de curent continuu sau între fazele sursei trifazate) și se propagă până la nivel de echipament doar prin conductorii aflați sub tensiune. Metoda convențională de atenuare a acestor perturbații este de a plasa un filtru în serie. Sursele tipice ale emisiilor de acest gen sunt sursele de tensiune în comutație sau curenții convertizoarelor cu comutare, iar sursele tipice de interferențe sunt supracurenții de scurtcircuit și cei apăruți în urma descărcărilor atmosferice.

Un mecanism similar apare și în cazul cablurilor de semnal, chiar dacă problemele care pot apare și metodele de eliminare a lor sunt diferite. Asta datorită faptului că, în general, conexiunile de date se realizează pe distanțe mult mai scurte, astfel încât interferențele nu au posibilitatea de a polua o zonă foarte întinsă, ca în cazul precedent. Curenții diferențiali reziduali din conexiunile de date depind în primul rând de însuși semnalul de pe fir. Dacă acest semnal este de curent continuu sau alternativ de frecvență joasă (de ex. în cazul majorității senzorilor sau semnalele din spectrul audio), potențialul de interferență este redus, iar filtrarea va îmbunătățirea imunitatea față de semnalele induse de frecvențe mai ridicate. Dacă semnalele utile sunt de banda largă atunci vor exista probleme și din punct de vedere al emisiei cât și din cel al susceptibilității, iar filtrarea este mult mai dificil de realizat. De regulă, în cazul cablurilor de semnal, cuplajul prin radiație este mai des întâlnit decât cel prin conducție.

#### **4.7.2 Perturbații conduse de mod comun**

Conductorii de alimentare cu energie electrică dar și cei de semnal sunt purtători de perturbații conduse de mod comun. În acest caz, interferența nu apare între conductori, ci în fiecare dintre conductori, față de o referință comună. Curenții de interferență se vor deplasa într-o buclă ce va conține acest al treilea punct. În cazul sursei de tensiune, al treilea punct poate fi fie cablul de împământare, de protecție (mod comun (A) în fig. 4.27), fie împământarea generală (mod comun (B) în fig. 4.27). Chiar dacă împământarea alimentării este în mod normal conectată la împământarea generală, între aceste două cazuri (A și B) există câteva diferențe; cea mai importantă este aceea că, în primul caz, curenții circulă de-a lungul cablului de fază și se întorc prin cablul de împământare, pe când în cazul al doilea, toți conductorii, inclusiv cel de împământare, conduc curentul de mod comun care se va întoarce pe o cale separată. Evident, aparatele aparținând clasei a doua de siguranță (care nu au fir de împământare) vor fi afectate doar de cazul al doilea (B).

Sursele de emisii de mod comun sunt mult mai greu de anticipat și de controlat. Ele sunt în mod normal asociate cu funcțiile interne de frecvență ridicată cum ar fi ceasul procesorului, care nu sunt în mod intenționat cuplate la sursa de tensiune. În mod similar, interferențele de mod comun provenite de la surse externe (tipic, trenuri de impulsuri rapide și semnal la frecvențe radio) cuplează cu circuitele interne prin astfel de căi. Simpla filtrare între conductorii de fază nu are niciun impact asupra acestui mod de interferență. Cuplajul (A) poate fi filtrat printr-un bobină șoc de mod comun și condensatori dispuși în paralel între fază și împământare, metodă care agravează în schimb poluarea prin curentul de dispersie. Această metodă de filtrare este folosită în majoritatea unităților de filtrare a

rețelei de tensiune. Testele de emisii conduse măsoară separat diferențele de tensiune dintre fază și împământare, respectiv dintre nul și împământare. În cazul în care componenta diferențială este nulă, atunci semnalele de mod comun (A) sunt indicate direct. Cuplajul de mod (B) nu poate fi atenuat prin filtrare capacitivă din cauză că nu există posibilitatea de conectare a bateriei de condensatoare. O metodă ar fi dispunerea de șocuri de mod comun în toate cablurile, inclusiv cel de împământare. În rest, toate soluțiile fiabile implică modificări structurale asupra aparatului.

Zgomotul de mod comun din cablurile de semnal este la fel de important. Comentariile de mai sus legate de filtrare se pot aplica și în cazul acesta. În cazul semnalelor cu bandă largă apare o problemă în plus, aceea că filtrele capacitive vor afecta semnalul dorit în aceeași măsură ca și perturbația. La fel ca și cuplajul parazit din interiorul echipamentului, în cazul semnalelor de bandă largă mai apare o sursă de perturbații: prin scurgerile de curent dintre circuit și mediul înconjurător, o parte din curentul de semnal scapă din circuitul diferențial și se întoarce înapoi în structură, rezultând o componentă de mod comun a semnalului. Măsura în care acest fenomen se petrece depinde de parametrii cablurilor folosite.

Perturbațiile conduse de mod comun produc în general probleme mai mari decât cele de mod diferențial, deoarece căile de cuplaj includ structuri fizice care nu sunt proiectate pentru acest lucru. În consecință, efectele acestor perturbații sunt dificil de anticipat și controlat, sunt variabile în timp din cauza modificărilor structurale necontrolabile, pot afecta o gamă largă de echipamente iar curenții care apar se pot deplasa în bucle de mari dimensiuni, crescând potențialul de cuplaj radiat.

### **4.7.3 Perturbații radiate de mod diferențial**

Aceleași circuite de alimentare și semnal din fig. 4.27 pot fi folosite pentru a vizualiza cuplajul radiat. Se știe că un element conductor poate deveni antenă emițătoare sau receptoare atunci când dimensiunile sale geometrice sunt apropiate de un sfert sau o jumătate din lungimea de undă a radiației electromagnetice. Astfel, în cazul frecvențelor joase ( $\lambda$  foarte mare), condiția nu poate fi îndeplinită decât de cabluri suficient de lungi. În Tabelul 4.5 este prezentată relația dintre frecvență (și implicit lungimea de undă) și dimensiunile și formele posibilelor antene parazit radiante. Se poate trage concluzia că mecanismele de cuplaj radiat peste 100-200MHz vor fi în general carcasele echipamentelor, iar sub 30 MHz – doar cablurile de lungime mare.

În cazul în care cuplajul apare între două structuri aflate la o distanță mică una față de cealaltă, efectele parazite capacitive și inductive domină, iar lungimea de undă nu mai este un factor atât de important. În acest caz, cuplajul va apare pe o plajă largă de frecvențe.

În cazul cablurilor cuplate în mod diferențial, calea de întoarcere a curentului este cunoscută și se va afla în apropierea căii directe. Astfel, câmpurile magnetice produse de curenții din cele două cabluri se vor anula reciproc, iar câmpurile electrice cauzate de tensiunile ce se găsesc pe conductori se vor concentra pe aceștia. Astfel, cuplajul radiat este minim când distanța dintre cele două cabluri este minimă, cel mai bun exemplu fiind cel al firelor răsucite. Totuși, la frecvențe ridicate, chiar și în acea zona de dimensiuni foarte reduce care există între cele două cabluri există posibilitatea de apariție a cuplajului radiat. Din această cauză, amplitudinea



și frecvența semnalelor de bandă largă ce pot fi transportate cu ajutorul acestor cabluri sunt limitate.

În cazul echipamentelor este în general mai dificilă obținerea unei geometrii optime pentru toate circuitele. Constrângerile create de schema plăcii de circuite integrate vor duce la alegerea unor soluții de compromis în ceea ce privește regula de minimă suprafață din interiorul unei bucle închise. Din acest motiv, cuplajul radiat de mod diferențial din circuitele interne va prezenta o importanță deosebită, mai ales în cazul frecvențelor de rezonanță determinate de carcasa echipamentelor (peste 100-200 MHz).

#### **4.7.4 Perturbații radiate de mod comun**

Cerința eficientă în cazul perturbațiilor de mod diferențial (turul și returul de alimentare, respectiv semnal să fie cât mai apropiate) nu are relevanță deosebită în cazul perturbațiilor de mod comun. De cele mai multe ori, suprafața efectivă a buclei de mod comun este greu de anticipat și estimat, putând lua dimensiuni considerabile. Suprafața buclei de mod comun poate fi minimizată doar prin plasarea cablului pe toată lungimea sa pe lângă o structură care conduce în mod intenționat curentul de întoarcere de mod comun. În rest, cablul funcționează ca o antenă, eficiența maximă fiind atinsă la frecvența de rezonanță. În alte cazuri mai grave, dar destul de comune, există posibilitatea ca însuși ecranul cablurilor ecranate să conțină curenți de mod comun. Ecranul trebuie proiectat astfel încât curenții de mod comun generați în interiorul său nu sunt transferați în exteriorul ecranului și viceversa - curenții perturbatori care inevitabil există în exterior, nu trebuie

să ajungă în circuitele interne. Pentru aceasta, calitatea ecranului și felul în care este terminat la capete, sunt factori esențiali.

Cablurilor le este atribuită în mare parte apariția perturbației radiate de mod comun datorită lungimii lor, chiar dacă orice structură conductoare poate fi străbătută de curenți de mod comun și va funcționa ca un emițător sau ca un receptor. Curentul parcurge suprafața exterioară a carcaselor metalice și, la frecvențele de rezonanță, constituie cele mai bune emițătoare de radiații. Evident, metalul nu poate fi înlăturat total din construcția carcaselor sistemelor și instalațiilor, de aceea, o bună proiectare din punct de vedere al compatibilității electromagnetice implică izolarea acestora de eventualele excitații provenite de la sistemul din interior, iar curenții generați de sursele de interferență exterioare să nu afecteze circuitele operaționale ale sistemului.

Această descriere a cuplajului de mod comun dintre structuri și circuite, care apare și între cabluri și în interiorul echipamentului însuși, evidențiază faptul că limitarea transferului dintre moduri este un scop esențial al controlului interferențelor.

#### Bibliografie:

1. SR EN 61000-4-2+A1 „Compatibilitatea electromagnetică (CEM) - Partea 4:Tehnici de încercare și măsurare - Secțiunea 2: Încercarea de imunitate la descărcări electrostatice”
2. Sălceanu A., Crețu M., Sărmășanu C. , “Zgomote și interferențe în instrumentație”, Ed. Tehnică, Științifică și Didactică CERMI, Iași, 1999

3. Schwab A., “Compatibilitatea Electromagnetică”, Ed. Tehnică, București, 1996
4. Langguht W., “Fundamentals of Electromagnetic Compatibility”  
Copper Development Assoc., 2006
5. Durcansky G., “EMC Correct Design of Apparatus”, Francis, 1995
6. Halperin S., „Guidelines for Static Control Management”, Eurostat, 1990
7. Williams T., Armstrong K. „EMC for Systems and Instalations”  
Newnes, 2000
8. Goedbloed J. „Electromagnetic compatibility”, Kluwer Technische Boeken B.V., 1990