

## **MĂSURĂRI ȘI TESTE ÎN CEM**

### **Subiecte**

#### **5.1. Generalități**

#### **5.2. Accesorii folosite la măsurările și testările CEM**

#### **5.3. Spații de măsurare**

#### **5.4. Receptorul de măsurare**

#### **5.5. Analizorul spectral**

#### **5.6. Măsurarea parametrilor antenelor**

***Evaluare: 1. Răspunsuri la întrebările finale***

***2. Discuție pe tema: “Comparație între receptorul de măsurare și analizorul spectral”***

### **5.1. Generalități**

Problema principală a măsurărilor și testelor de imunitate în CEM constă în determinarea *interacțiunii dintre perturbații și echipamente* și se realizează cu echipamentul/instalația în funcțiune; uneori, aceste măsurări se completează, de exemplu, cu măsurările de impedanță (de cuplaj, de radiație), de ecranare etc. Mărimile care se măsoară cel mai frecvent în domeniul CEM sunt: *tensiunile, curenții și câmpurile perturbatoare*.

Asigurarea *reproductibilității* măsurărilor și testelor în CEM reprezintă o condiție primordială a acestui domeniu; dacă acest lucru este posibil pentru perturbațiile care se transmit prin conducție sau dacă perturbațiile sunt unde continue, la măsurarea perturbațiilor de regim tranzitoriu, în special în cazul radiațiilor emise, pot să apară dificultăți destul de mari.

Măsurările din CEM pot fi clasificate în două categorii:

- măsurarea perturbațiilor emise de echipamente,
- testarea imunității echipamentelor la perturbații.

### **5.2. Accesorii folosite la măsurările și testările CEM**

Efectuarea măsurărilor în CEM necesită o grijă deosebită pentru a putea asigura *repetabilitatea și reproductibilitatea* măsurărilor; conectarea mijloacelor de măsurare, dar și a echipamentelor sau dispozitivelor care se testează la punctele de măsurare, la sursele de alimentare, la masă (potențialul de referință) etc., presupun folosirea unei conectici de calitate, dar și anumite accesorii indispensabile procesului de măsurare. Pentru multe măsurări, cablurile și conectoarele introduc anumite atenuări de care trebuie să se țină seama în procesul de măsurare; ele au o anumită caracteristică de frecvență, iar dacă în structura lor intră componente din materiale magnetice, pot să introducă și anumite neliniarități.

O categorie importantă de accesorii folosite la unele măsurări în CEM o reprezintă *rețele de cuplare/decuplare*.

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

Rețelele de cuplare au rolul de a injecta semnale de testare în diferite tipuri de cabluri, iar rețelele de decuplare asigură că semnalul perturbator să nu influențeze echipamentele auxiliare, ele conectându-se între EUT și acestea. În cadrul acestui paragraf vor fi prezentate câteva dintre accesoriile folosite în CEM pentru a sublinia importanța acestora în procesul de măsurare.

Asigurarea reproductibilității măsurărilor implică efectuarea acestora în condiții de referință; având în vedere faptul că foarte multe echipamente electronice se alimentează de la rețeaua electrică, a fost necesară standardizarea acesteia. Norma CISPR 16-2 definește *rețeaua artificială de alimentare* (Artificial Mains Network – AMN), ca având rolul:

- să definească impedanța de radiofrecvență văzută de echipamentul care se testează, la portul de alimentare, la valoarea  $50 \Omega \parallel 50 \mu\text{H} \pm 5 \Omega$ ;
- să permită cuplarea semnalelor perturbatoare provenite de la EUT la echipamentele de măsurat și să prevină aplicarea directă a tensiunii rețelei la intrarea acestora;
- să reducă nivelul zgomotului ambiant care ar putea să se propage prin rețeaua de alimentare.

Schema de principiu a unei rețele artificiale, pentru o singură fază, este prezentată în figura 5.1; pentru circuitele trifazate, schema se multiplică pentru fiecare fază, inclusiv pentru conductorul de nul. Așa cum rezultă din figură, rețeaua artificială este formată dintr-un filtru trece jos pe partea de alimentare și un filtru trece sus, care permite extragerea perturbațiilor și transmiterea lor la receptorul de măsurare, RM. Impedanța echivalentă a rețelei artificiale, conform normei CISPR 16, definită în gama de frecvențe 9 kHz – 30 MHz, este formată dintr-o rezistență de  $50 \Omega$  în paralel cu o inductivitate de  $50 \mu\text{H}$ , cu o toleranță de  $\pm 5 \Omega$ .

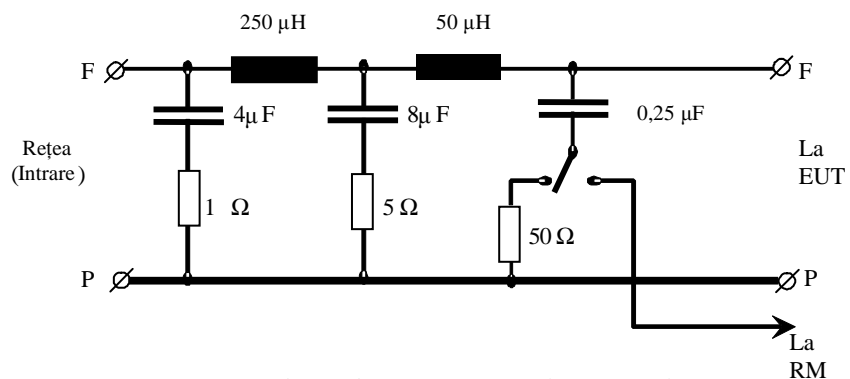


Fig. 5.1. Schema de principiu a rețelei artificiale

În acest caz, rețeaua de pământare reprezintă referința de potențial pentru măsurările efectuate. Standardele CISPR prevăd existența unei plăci pentru planul de referință de pământare cu dimensiunile minime de  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  sau un perete ori podeaua unei camere ecranate. Placa trebuie să depășească cu cel puțin  $0,5 \text{ m}$  marginile corespunzătoare ale EUT. Planul

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

de referință trebuie să fie continuu (prin sudură sau nituire) și poate fi din Al, oțel sau Cu, cu grosimea de circa 1 mm.

Pentru o tensiune de 230V, 50 Hz, existența unei capacități de circa 12  $\mu$ F spre masă conduce la un curent în conductorul de pământare, de circa 0,9 A, curent care este deosebit de periculos pentru operatorul uman. Prin urmare, este necesar ca rețeaua de alimentare trebuie să fie foarte bine legată la rețeaua de pământare.

*Cleștele sau penseta absorbantă* este un transformator de curent cu raportul de transformare 1:1 care se folosește la măsurarea perturbațiilor emise prin cabluri și este realizat (fig. 5.2), conform CISPR 16-1, din:

- o buclă de cablu coaxial formată din cablul central legat la treasă, în jurul a 2 - 3 inele de ferită care acționează ca un transformator și în care se induce un curent proporțional cu curentul de RF care trece printr-un cablu cuplat prin intermediul aceluiași inele de ferită,

- o secțiune absorbantă formată din inele de ferită, montate în continuarea feritelor principale în partea opusă sursei de perturbații, pentru a menține constantă impedanța de RF de mod comun și a reduce dependența de impedanța conectată la terminația cablului, inclusiv reducerea cuplajului capacitiv.

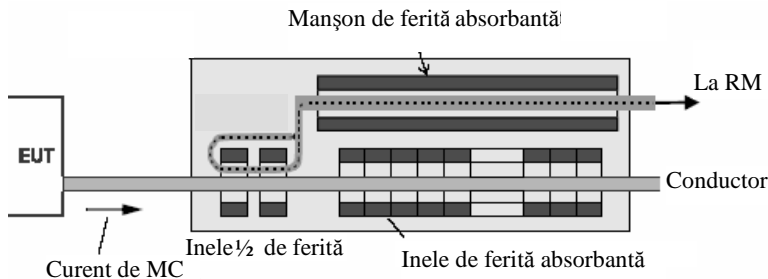


Fig. 5.2. Clește absorbant

Domeniul de frecvențe în care se fac măsurări cu cleștele absorbant este cuprins între 30 MHz și (1000) - 2500 MHz, cu tendința de creștere a limitei superioare, iar condițiile de măsurare impun determinarea situației celei mai defavorabile din cablul sursă ca urmare a posibilității de apariție a undelor staționare; în acest sens, cablul testat trebuie să fie suficient de lung, de minimum 5 m, pentru a putea pune în evidență maximele corespunzătoare undelor staționare la frecvența minimă de 30 MHz. Apariția undelor staționare poate fi datorată neadaptării dintre impedanța de ieșire a generatorului echivalent de perturbații, impedanța caracteristică a cablului testat și impedanța de sarcină, dar și datorită introducerii cleștelui absorbant în circuitul de măsurare.

Din cauza asemănării cu cleștele absorbant, merită a fi menționat și *cleștele de curent* care este un transformator de măsurare compus dintr-un miez toroidal din ferită, primarul - realizat, de obicei, dintr-o spiră - conductorul al cărui curent se

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

măsoară și secundarul - o înfășurare cu un anumit număr de spire care determină și admitanța de transfer (raportul de transformare). Pentru funcționarea corectă este necesar ca impedanța de sarcină (impedanța de intrare a unui mijloc de măsurare a tensiunii) trebuie să fie mult mai mică decât impedanța de ieșire a transformatorului. Sensibilitatea cleștilor de curent este cuprinsă între 1 și 10 mV/mA.

Schemele de măsurare a curentului cu cleștii de curent permit măsurarea curentului dintr-un conductor, măsurarea curentului de MC (prin trecerea ambelor conductoare prin interiorul cleștelui) și măsurarea curentului pe MD (asemănător măsurării pe MC, dar conductoarele de tur, respectiv retur, trebuie să treacă în sens opus).

### 5.3. Spații de măsurare

Creșterea continuă a nivelului perturbațiilor electromagnetice din mediul ambiant face din ce în ce mai dificile operațiile de măsurare în domeniul radiofrecvențelor. Pentru asigurarea reproductibilității măsurărilor a fost necesar să se creeze spații speciale pentru efectuarea acestor măsurări, respectiv a testelor de imunitate. Cerințele impuse *spațiilor de măsurare* sunt:

- să realizeze un mediu ambiant care să asigure reproductibilitatea măsurărilor,
- să asigure facilități de efectuare a testării/măsurării,
- să fie tehnic realizabile și economice sub aspectul costului realizării și recunoscute de organismele competente.

În afara cerințelor prezentate anterior, sub aspect tehnic, spațiile de măsurare trebuie să asigure:

- independența față de condițiile ambiante exterioare,
- condiții de propagare a undelor ca și în spațiul liber (undă progresivă), în condiții de limitare a spațiului de lucru și anumite limitări în ceea ce privește domeniul de frecvențe,
- să permită stabilirea unor corelații cu alte variante de spații de măsurare și evaluarea incertitudinii de măsurare.

În teoria antenelor se cunoaște *formula lui Friis*, care stabilește că raportul dintre puterea electrică recepționată de o antenă  $P_r$  și puterea electrică transmisă de antena emițătoare  $P_t$ , depinde de câștigul celor două antene  $G_r$  și  $G_t$ , distanța dintre ele  $R$  și lungimea de undă  $\lambda$ , conform relației:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_r G_t. \quad (5.1)$$

În relația (5.1), se constată că termenul din paranteză poate fi calculat deoarece depinde de distanță și lungimea de undă a semnalului transmis/recepționat. Această mărime se numește *atenuarea normalată a spațiului liber* (Normalised Site

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

Attenuation - NSA) și reprezintă o măsură a atenuării câmpului electromagnetic dintre un emițător și antena de măsurare.

Normele impun ca distanța de măsurare să fie de: 3, 10 și 30 m. În figura 5.3 se prezintă diagramele de variație ale NSA pentru distanțele de 3 și 10 m, separat pentru undele polarizate orizontal și vertical; atenuarea este diferită din cauza faptului că la polarizarea orizontală intervin și reflexiile de la pământ.

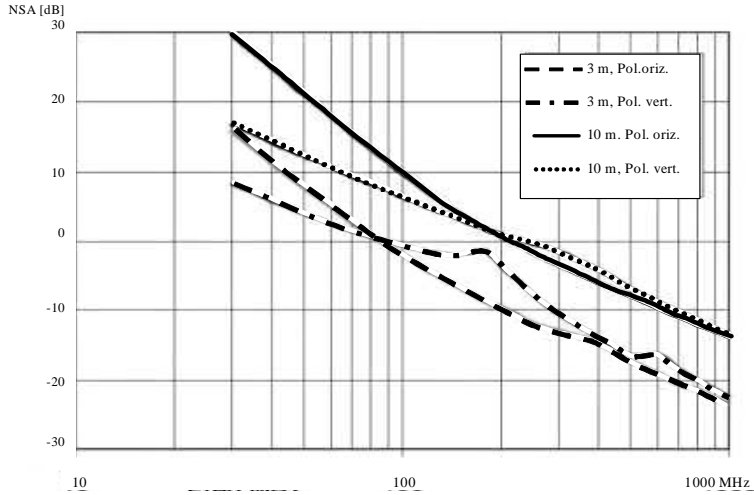


Fig. 5.3. Valorile teoretice pentru NSA

În practică se constată că valorile NSA măsurate diferă față de cele calculate; normele CEM prevăd ca între valorile teoretice și valorile măsurate să nu existe diferențe mai mari de  $\pm 4$  dB. Conform CISPR, se admite o incertitudine de măsurare de cel mult 3 dB pentru instrumentele de măsurat și de maximum 1 dB pentru variațiile datorate spațiului de măsurare.

Ca și principiu, există două tipuri de spații de testare: cu arie deschisă și cu spații ecranate (fig. 5.4). În continuare, vor fi prezentate principalele tipuri de spații de testare și caracteristicile acestora.

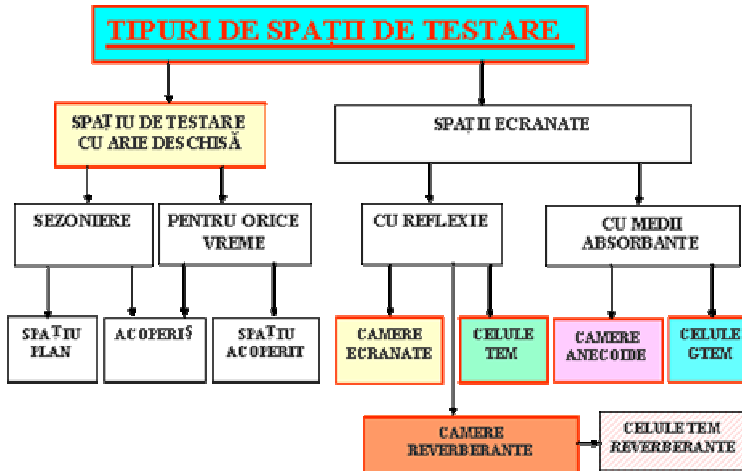


Fig. 5.4. Clasificarea spațiilor de testare

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

**Aplicatie:** Să se determine puterea de emisie necesară pentru producerea unui câmp electric de 10 V/m la distanța de 3 m dacă frecvența este de 300 MHz, iar antenele sunt dipoli.

**Soluție:** Se poate scrie:

$$P_r = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{100}{377} = 0,26W$$

Înlocuind în formula lui Friis, se obține:

$$P_t = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \frac{P_r}{G_r G_t} = \left(\frac{4\pi \cdot 3}{1}\right)^2 \frac{0,26}{1,5 \cdot 1,5} = 164W$$

*Spațiul de testare cu arie deschisă* (Open Area Test Site - OATS) este cel mai "vechi" spațiu de testare impus prin normele de protecție a radiorecepției. Caracteristicile acestui spațiu de măsurare sunt descrise în norma CISPR 16. Teoretic, trebuie să fie un spațiu plan, lipsit de obstacole și suprafețe reflectoare, cu excepția pământului, care este un reflector ideal. În acest spațiu nu trebuie să existe câmpuri electromagnetice perturbatoare sau semnale emise de alte surse. Dimensiunile spațiului de testare cu arie deschisă depind de distanța de măsurare, iar suprafața solului trebuie să fie acoperită cu o placă bună conducătoare de electricitate.

În figura 5.5 se prezintă schița de principiu a unui spațiu de testare cu arie deschisă; suprafața de măsurare are forma unei elipse în care diametrul major trebuie să fie de două ori mai mare decât distanța de măsurare. Planul metallic de masă produce *reflexii repetabile*, iar deplasarea antenei pe verticală permite maximalizarea compunerii undei directe și a undei reflectate. Absența planului de masă conduce la recombinarea undelor și deci, la erori suplimentare în limitele +6 dB și -25 dB.

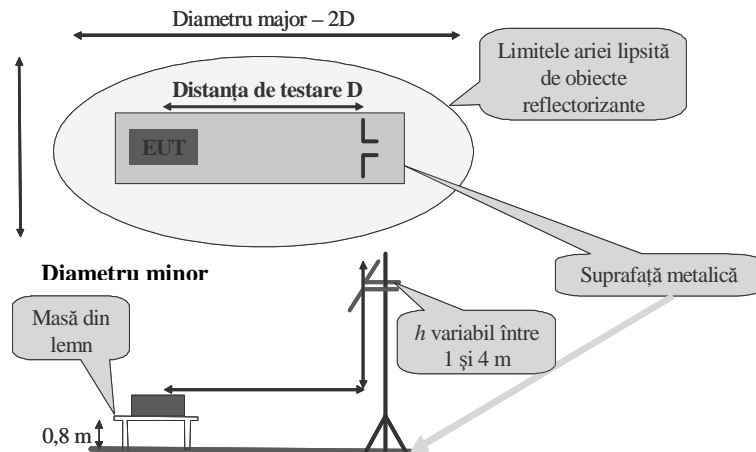


Fig. 5.5. Spațiu de testare cu arie deschisă

Echipamentul de testat (EUT) este așezat pe o masă din lemn cu înălțimea de 0,8 m. Din punctul de vedere al perturbațiilor emise prin radiație, normele prevăd rotirea

## Capitolul 5

### Măsurări în CEM

echipamentului care se testează pentru determinarea situației cele mai defavorabile.

Spațiul de testare cu arie deschisă este considerat ca spațiu etalon pentru măsurările de câmp electromagnetic, însă se poate folosi numai la măsurarea perturbațiilor emise și nu pentru testarea imunității la câmpurile electromagnetice. Măsurările pot fi afectate de câmpul exterior și de condițiile de vreme.

*Camerele anecoide* (fără ecou "de unde electromagnetice"), sunt spații de măsurare închise în care se asigură condiții de propagare identice (sau foarte apropiate), cu cele din spațiul liber. Ele se realizează în două variante constructive: cameră anecoidă (completă) – (Full Anchoid Chamber - FAC) și cameră semi-anecoidă – (Semi Anecoid Chamber - SAC). O cameră anecoidă (fig. 5.6), este compusă dintr-o cameră ecranată cu pereții acoperiți cu materiale absorbante a câmpului electromagnetic, care pot fi:

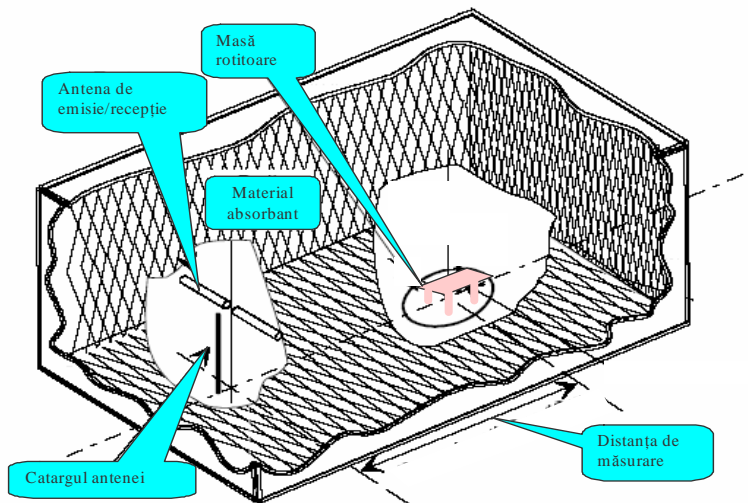


Fig. 5.6. Cameră anecoidă

- *piramide absorbante* realizate din spume poliuretanică cu carbon și/sau incluziuni metalice,
- *șigle* din ferite absorbante.

Dimensiunile camerei anecoide sunt alese în funcție de distanța de măsurare și dimensiunile EUT. Camera anecoidă asigură condiții de propagare ca și în spațiul liber; deoarece impedanța caracteristică a spațiului liber este de  $377 \Omega$ , iar impedanța de suprafață a ecranului (metal) este aproape nulă, este necesar să se realizeze o transformare de impedanță, respectiv adaptare. Pentru adaptare, se pot folosi: transformatoare de adaptare (linie neliniară), sub forma unor piramide absorbante, similare liniilor exponențiale, sau "circuite" de adaptare de impedanță, sub forma unor șigle cu ferite absorbante, având impedanța de suprafață cât mai apropiată de cea a spațiului liber.

Principiul de funcționare al piramidelor absorbante se bazează pe reflexiile repetate care au loc la suprafața acestora și

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

absorbțiile din interiorul lor (de unde pericolul de incendiu la intensități mari ale câmpului electromagnetic). Piramidele trebuie să aibă o înălțime cel puțin egală cu un sfert din lungimea de undă corespunzătoare frecvenței minime de interes (la 30 MHz, înălțimea trebuie să fie de aproximativ 2,4 m!). În zona de amplasare a EUT, pe o suprafață de  $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ , se măsoară intensitatea câmpului electromagnetic în 16 puncte; pentru cel puțin 75 % din măsurări, variațiile nu trebuie să depășească limitele  $-0 \text{ dB}/+6 \text{ dB}$ . Camerele anecoide pot fi folosite atât pentru măsurarea perturbațiilor emise, cât și pentru testarea imunității la câmpuri electromagnetice.

*Celula GTEM* (Gigahertz Transversal Electric Magnetic - GTEM) reprezintă o dezvoltare a celulelor TEM (Transversal Electric Magnetic - TEM). În principiu, o celulă GTEM este un cablu coaxial adaptat la ambele terminale. Principalul avantaj al celulei GTEM constă în realizarea unui volum mare de lucru, cu un câmp electromagnetic puternic pe unitatea de putere de intrare. Schema constructivă a unei celule GTEM în secțiune longitudinală este prezentată în figura 5.7.

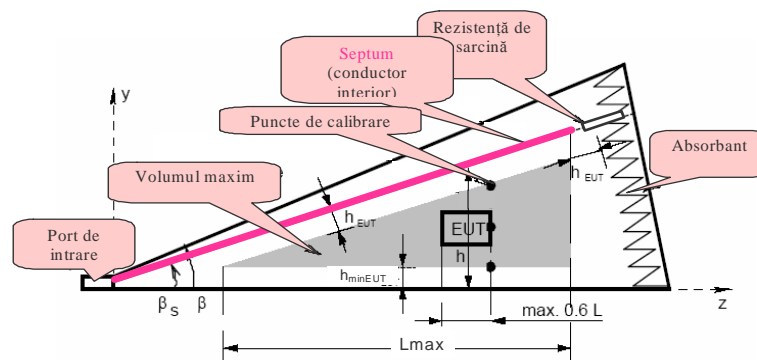


Fig. 5.7. Celula GTEM (secțiune longitudinală)

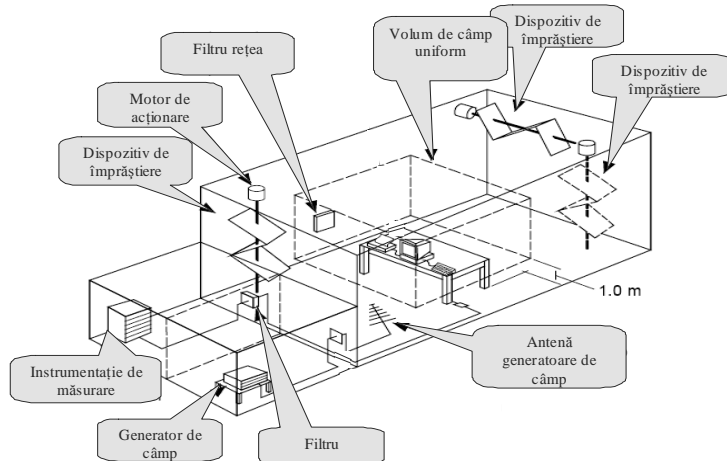
Celula GTEM este realizată sub forma unei piramide metalice, răsturnată, baza acesteia fiind acoperită cu piramide absorbante. În interior se găsește o placă metalică – *septum* – care reprezintă conductorul central al ghidului de undă coaxial. Între septum și panoul frontal sunt conectate mai multe rezistențe cu valoarea echivalentă de  $50 \Omega$  pentru adaptare. Se recomandă ca înălțimea EUT să nu depășească o treime din distanța dintre planul de masă al celulei și septum. Întrucât măsurarea/testarea EUT se face în trei poziții corespunzătoare unor rotații de  $90^\circ$ , principalul dezavantaj al celulei GTEM constă în dificultățile legate de poziționarea cablurilor, mai ales când se pune problema rotirii. Celula GTEM reprezintă un ghid de undă plan-paralel în care modul de propagare dominant al undelor este modul TEM. În afara unui preț de cost mai redus comparativ cu o cameră anecoidă, celula GTEM necesită și puteri mai reduse în cazul testelor de imunitate.

*Camera reverberantă* este o cameră ecranată prevăzută cu un sistem rotitor cu palete metalice (fig. 5.8), care au rolul de a



## Capitolul 5 Măsurări în CEM

împrăștia câmpul electromagnetic. Undele de radiofrecvență produse de o antenă, sunt focalizate pe paletele mobile și prin rotirea acestora, sunt împrăștiate în întregul spațiu al incintei. Se folosesc una sau mai multe turbine cu palete care modifică condițiile de frontieră în propagarea undelor. Aceste turbine cu palete trebuie să fie suficient de mari și să fie prevăzute cu îndoituri pentru împrăștierea cât mai neuniformă a câmpului.



*Fig. 5.8. Camera reverberantă*

Camerele reverberante au două moduri de lucru: modul împrăștiat (agitat/turbulent), la care paletele se rotesc în mod continuu, și modul acordat/de reglare, când paletele sunt deplasate în trepte, făcând posibilă măsurarea unor parametri ca: VSWR, puterea de intrare etc. Prin rotirea paletelor în jurul axei se modifică condițiile de frontieră producând, în timpul unei rotații complete, un câmp uniform aleatorizat. Camerele reverberante sunt folosite la frecvențe superioare frecvențelor corespunzătoare primelor 60 de moduri. Frecvențele proprii de rezonanță ale incintei, pot fi determinate cu relația:

$$f = 150 \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \text{ [MHz]}, \quad (5.2)$$

unde:  $a$ ,  $b$  și  $c$  sunt dimensiunile camerei ecranate, iar  $m$ ,  $n$ , și  $p$ , numere întregi. Se recomandă ca dimensiunile camerei să fie prime între ele pentru a avea cât mai multe moduri de lucru.

Diametrul tamburului cu palete și înălțimea acestuia trebuie să fie egale cel puțin cu 1/2 din lungimea de undă a frecvenței minime de lucru. Viteza de rotație a tamburului cu palete se alege astfel încât să se asigure răspunsul și depășirea regimului tranzitoriu al EUT. *Raportul de împrăștiere*, definit între valoarea maximă și valoarea minimă a câmpului într-un punct pentru o rotație completă a tamburului cu palete, trebuie să fie de cel puțin 20 dB.

## **Capitolul 5** **Măsurări în CEM**

Calibrarea camerei reverberante se realizează pentru modul “acordat” și presupune determinarea câmpului în 9 locații, pentru cele 3 axe de coordonate (în total, 27 de măsurări). Câmpul este considerat uniform dacă eroarea medie pătratică este cel mult 3 dB pentru frecvențe mai mari de 400 MHz și are o variație liniară de la 4 la 3 dB pentru frecvențe cuprinse între 100 și 400 MHz (la scară logaritmică).

Dintre avantajele camerelor reverberante pot fi citate:

- produc un câmp electromagnetic relativ uniform în întregul spațiu al camerei și nu doar într-un volum limitat;
- sistemul de reflectare mecanică a undelor produce împrăștierea câmpului electromagnetic în toată camera sub toate unghiurile posibile de polarizare.

Datorită factorului de calitate ridicat al camerei de reverberație, pentru a genera un câmp electromagnetic de un anumit nivel, este necesară o putere de intrare mai mică comparativ cu camerele anecoide sau cu OATS.

- **Din ce cauză trebuie deplasat cleștele absorbant de-a lungul conductorului măsurat?**
- **Care sunt criteriile de alegere a unui spațiu de măsurare cu arie deschisă?**
- **Din ce cauză, rezultatele măsurărilor CEM, în final, se raportează la OATS?**

### **5.4. Receptorul de măsurare**

*Receptorul de măsurare* realizează măsurarea nivelului unui semnal la o frecvență fixată, prin urmare, are proprietăți similare unui voltmetru selectiv. Receptorul de măsurare este realizat asemănător cu un receptor superheterodină de trafic, având însă, spre deosebire de acesta, funcții specifice unui mijloc de măsurare. Generația nouă de receptoare de măsurare conține o serie de blocuri de prelucrare numerică; funcționarea acestora este complet automatizată și dispun de o serie de facilități ca, interfațare cu calculatorul și controlul funcționării prin programe soft. Gama de frecvențe în care lucrează receptoarele de măsurare este cuprinsă între 9 kHz și câțiva GHz, cu tendința de creștere a limitelor. Întrucât receptoarele de măsurare au fost impuse ca mijloace de măsurare de normele de protecție a radiorecepției, selectivitatea este adaptată benzilor de frecvențe din radiodifuziune. Astfel, norma CIPSR – 16, împarte gama frecvențelor semnalelor de radiofrecvență în următoarele benzi:

<b>Banda de frecvențe</b>	<b>Limitele benzii</b>	<b>Banda de trecere</b>
A	10 kHz – 150 kHz	200 Hz
B	150 kHz – 30 MHz	9 kHz
C și D	30 MHz – 1 GHz	200 kHz
	Peste 1 GHz	1 MHz

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

Receptoarele de măsurare sunt construite pe principiul *superheterodinei*, având unul sau mai multe schimbătoare de frecvență și deci, frecvențe intermediare. *Schimbătoarele de frecvență* numite și *mixere* sunt blocuri neliniare (multiplicatoare), prevăzute cu două intrări și o ieșire. Rezultă că dacă la intrările unui mixer se aplică două semnale sinusoidale de frecvențe diferite:  $A_1\sin(\omega_1 t)$  și  $A_2\sin(\omega_2 t)$ , conform termenului de ordinul 2 al neliniarității, la ieșire se va obține:

$$y(t) = \frac{aA_1A_2}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t] \quad (5.3)$$

Din relația (5.3) rezultă că la ieșirea mixerului se obțin două componente spectrale, cu frecvențele egale cu suma și respectiv, diferența frecvențelor semnalelor aplicate la intrare. În aceste condiții, dacă unul dintre semnale, preluat din exterior, are frecvența  $f_x$ , iar local se generează un semnal cu amplitudinea constantă și frecvența  $f_0$  ( $f_0 > f_x$ ), de la ieșirea mixerului se poate extrage componenta cu frecvența  $f_0 - f_x$  numită *frecvență intermediară*, care păstrează informația de amplitudine a semnalului cu frecvența  $f_x$ . Conform figurii 5.9, există și o altă frecvență  $f_{im}$ , numită *frecvență imagine*, care îndeplinește aceeași condiție. Prin folosirea unor circuite selective adecvate la intrare, există posibilitatea ca schimbarea de frecvență să se efectueze cu precădere asupra componentei  $f_x$  și rejecția componentei  $f_{im}$ , cu păstrarea integrală a informației purtate de semnalul respectiv.

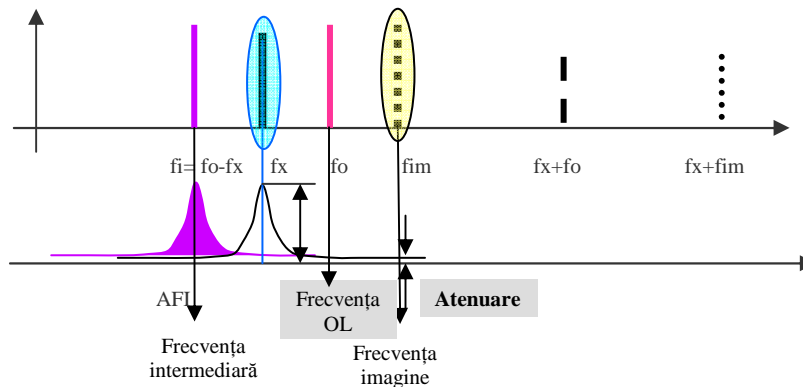


Fig. 5.9. Principiul superheterodinei

*Schema bloc a receptorului de măsurare* realizat pe principiul superheterodinei, cu dublă schimbare de frecvență, se prezintă în figura 5.10. Semnalul care urmează a fi măsurat, este aplicat unui *atenuator calibrat AC*, care asigură o impedanță de intrare constantă ( $50 \Omega$ ) și un raport de divizare independent de frecvență. Blocul următor - ARF - reprezintă *amplificatorul de radiofrecvență*, care îndeplinește două funcții importante:

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

- asigură sensibilitatea receptorului de măsurare care este limitată de zgomotul propriu al acestui amplificator;
- rejectează semnalul imagine și alte interferențe posibile prin proprietățile selective ale acestui bloc.

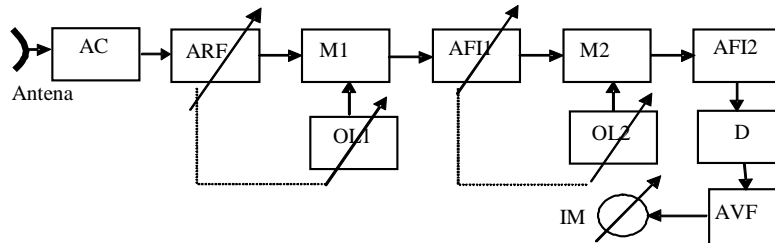


Fig. 5.10. Schema bloc a receptorului de măsurare

Semnalul obținut la ieșirea amplificatorului de radio-frecvență, împreună cu semnalul generat de oscilatorul local, OL1, este aplicat primului *schimbător de frecvență* (mixer), M1; la receptoarele moderne, acest oscilator local este un sintetizor de frecvență care furnizează semnale de frecvență fixă, reglabile cu trepte egale. Semnalul cu frecvența minimă de la ieșirea mixerului reprezintă prima frecvență intermediară pe care este acordat *amplificatorul de frecvență intermediară*, AFI1. Pentru creșterea selectivității amplificatorului, este posibil ca banda de frecvențe a amplificatorului AFI1 să se reducă prin folosirea în amplificator a unor circuite cu acord variabil care să exploreze banda de 1 MHz sincron cu oscilatorul local OL2, care comandă cel de-al doilea schimbător de frecvență, M2.

Cel de-al doilea amplificator de frecvență intermediară, AFI2, este acordat, de obicei, pe frecvență fixă, principalele lui funcții fiind legate de asigurarea selectivității și respectiv, a amplificării semnalului. În general, filtrele folosite în AFI pot fi filtre LC, dar și filtre cu cuarț sau ceramice, ori filtre numerice, care asigură o selectivitate superioară; conform normelor CISPR, receptoarele de măsurare asigură rejecții pentru frecvența intermediară, frecvența imagine și produsele de intermodulație, de cel puțin 40 dB. De asemenea, zgomotul de fond, cât și câmpurile electromagnetice exterioare nu trebuie să afecteze cu mai mult de 1 dB rezultatul măsurării, eroarea tolerată pentru un semnal sinusoidal fiind de cel mult  $\pm 2$  dB.

De la ieșirea celui de-al doilea amplificator de frecvență intermediară, semnalul este aplicat unui *detector* D, care trebuie să furnizeze, spre deosebire de receptorul de trafic, o informație privind nivelul semnalului măsurat. Blocul detector este urmat de *amplificatorul de video frecvență*, AVF, eventual un *amplificator logaritm* și apoi de *indicatorul de măsurare*, IM, etalonat în valori efective sau logaritmice (dBx) pentru forme de undă sinusoidale pure (unde  $x$  poate fi  $\mu\text{V}$ ,  $\mu\text{A}$ ,  $\text{mW}$  etc.).

Unul dintre blocurile importante ale receptorului de tip superheterodină este *mixerul*, care trebuie să realizeze translatarea de frecvență, fapt realizat de un circuit neliniar

## **Capitolul 5**

### **Măsurări în CEM**

căruia i se aplică două semnale la intrare. Dacă la intrarea unui astfel de sistem se aplică mai multe semnale sinusoidale, la ieșirea acestuia pot să apară semnale având frecvența egală cu diverse combinații liniare ale frecvențelor semnalelor de intrare; întrucât semnalul util, cu frecvența  $f_x$ , este dat, alegerea se face pentru frecvența intermediară  $f_i$ , rezultând frecvența necesară pentru oscilatorul local, dar și frecvența imagine; din cauza neliniarității apar și semnale având frecvența egală sau multiplu al frecvenței utile sau al frecvenței oscilatorului local. În afara acestora, pot să mai rezulte o serie de semnale parazite având frecvența în apropierea frecvenței utile, cum sunt produsele de intermodulație de ordinul III, ele putând fi eliminate doar prin anularea termenilor de ordin impar.

*Oscilatorul local* are rolul de a genera semnalul de referință pentru mixer, semnal prin care se selectează frecvența centrală a benzii de frecvențe preluată la intrarea receptorului de măsurare. În ultima perioadă, oscilatoarele locale sunt realizate sub forma unor sintetizoare de frecvență pornind de la un oscilator pilotat cu cuarț sau sub forma unor oscilatoare controlate în tensiune sincronizate cu oscilatoare cu cuarț, performanțele acestora influențând în mod direct caracteristicile mixerului, în special în ceea ce privește zgomotul.

Întrucât în majoritatea cazurilor, semnalul produs de oscilatorul local este limitat în amplitudine înainte de a fi aplicat mixerului, cel mai important efect rămâne cel al modificării fazei, fenomen cunoscut, prin modificarea perioadei, sub denumirea de *jitter*. Prin urmare, este deosebit de important ca oscilatoarele locale să aibă un zgomot de fază cât mai redus.

Pentru receptoarele de măsurare moderne, rezoluția de stabilire a frecvenței de măsurare poate fi de 0,1 Hz, cu o stabilitate de ordinul 1 ppm. De asemenea, receptoarele de măsurare pot lucra în modul "baleiat", asemănător analizatoarelor spectrale, rezultând, prin programul soft aferent, spectrul semnalelor din banda de frecvențe baleiată împreună cu o serie de date referitoare la limitele impuse de norme pentru diferite tipuri de detectoare (măști), iar prin intermediul unor marcheri, există posibilitatea de determinare a nivelului și frecvenței unor componente spectrale de interes.

Cea mai mare pondere în amplificarea semnalului util și implicit, în sensibilitatea receptorului de măsurare o au *amplificatoarele de frecvență intermediară*. Pentru a obține o sensibilitate și o selectivitate ridicate, fără pericolul de intrare în oscilație ce există la amplificatoarele cu amplificare mare, se preferă realizarea mai multor schimbări de frecvență. O particularitate a etajelor finale ale AFI este aceea că trebuie să asigure o dinamică mare întrucât receptorul de măsurare nu este prevăzut cu un reglaj automat al amplificării. Pentru a asigura o ponderare corectă la orice frecvență de repetiție a impulsurilor, este necesar ca gama dinamică pentru toate etajele radio-receptorului de măsurare, gamă impusă de detectorul de valori

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

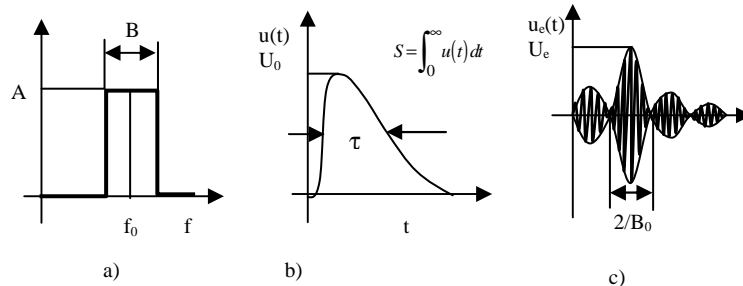
cvasi-vârf, să fie de minimum 43,5 dB. Gama de indicație liniară a receptorului de măsurare pornește, însă, de la nivelul de zgomot propriu al acestuia și se întinde până la un nivel la care semnalul începe să fie distorsionat (de exemplu, nivelul la care semnalul este comprimat cu 1 dB). Ținând seama de acest aspect, de nivelul de zgomot propriu, precum și de faptul că instrumentul indicator are un intervalul de măsurare de 10 dB, rezultă că receptoarele de măsurare trebuie să asigure o gamă dinamică foarte mare, de ordinul 120 dB; pentru a evita o supraîncărcare a etajelor de intrare și, respectiv, a primului mixer, este necesar ca la intrare, prin amplificatorul de radiofrecvență, să se evite supraîncărcarea printr-o preselectie a semnalului util cu ajutorul unor filtre adecvate. Este important să se rețină că nivelul de zgomot depinde și de banda de frecvențe; la schimbarea benzii de frecvențe de la  $B_1$  la  $B_2$ , nivelul de zgomot se schimbă cu valoarea:

$$\Delta L = 10 \log \frac{B_1}{B_2}. \quad (5.4)$$

De exemplu, schimbarea benzii de frecvențe de la 10 kHz la 120 kHz conduce la o creștere a pragului de zgomot cu 10,8 dB.

Alegerea frecvențelor intermediare se face din considerente legate de: rejecția dorită pentru frecvența imagine, banda de frecvențe acceptată și compromisul sensibilitate/selectivitate. Din cauza benzii de frecvențe limitate a amplificatoarelor de frecvență intermediară, ele elimină o parte din spectrul semnalelor complexe. Într-adevăr, dacă se consideră că la intrarea unui amplificator selectiv, cu caracteristica de transfer dreptunghiulară (fig. 5.11.a), caracterizat prin amplificarea  $A_0$ , cu banda de frecvențe  $B_0$ , centrată pe frecvența  $f_0$ , se aplică un impuls dreptunghiular (fig. 5.11.b), de amplitudine  $U_0$ , cu durată la 1/2 din amplitudine  $\tau < 1/f_0$  și suprafață  $S$ , exprimată în [V·s], la ieșirea amplificatorului, se obține un impuls de radiofrecvență de tip (sin x/x) - fig. 5.11.c. - a cărei valoare maximă este dată de relația:

$$U_e = 2S \cdot A_0 \cdot B_0, \quad (5.5)$$



*Fig. 5.11. Explicativă la răspunsul receptorului de măsurare la impuls*

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

valoare independentă de amplitudinea impulsului, dar care depinde de amplificator prin  $A_0$  și  $B_0$  și de suprafața  $S$  a impulsului.

Din acest exemplu rezultă că două impulsuri diferite, unul scurt de amplitudine mare și unul lung cu amplitudine redusă, cu aceeași arie, pot avea aceeași valoare maximă a tensiunii la ieșirea amplificatorului și deci, a unui detector de vârf. Extragerea informației referitoare la semnalul măsurat din semnalul de frecvență intermediară se realizează cu ajutorul unui detector. În măsurări sunt cunoscute următoarele tipuri de detectoare:

- *Detectoare de valori efective* – bazate pe definiția termică a valorii efective (valoarea efectivă a unui semnal este numeric egală cu valoarea unui semnal continuu care produce același efect termic într-o rezistență), sau pe relația:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} . \quad (5.6)$$

- *Detectoare de valori medii* – care folosesc redresarea monoalternanță sau dublă alternanță, urmată de mediere:

$$U_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt . \quad (5.7)$$

- *Detectoare de valori de vârf* – cele mai rapide, agreate de normele militare.

Un caz particular de detector de vârf îl reprezintă *detectorul de anvelopă* (utilizat la recepția MA), care urmărește doar anvelopa semnalului. Pentru detectoarele de valori medii cu redresare monoalternanță și detectoarele de vârf, contează și polaritatea semnalelor aplicate. De asemenea, trebuie menționat faptul că detectorul de vârf este sensibil la zgomote și la distorsiunile suferite de semnal.

Din punctul de vedere al protecției radiorecepției, pentru o audiere radio, este mai supărătoare apariția unei succesiuni de impulsuri repetitive de amplitudine mică, dar cu frecvență mare, decât a unor impulsuri de amplitudine mare, dar rare în timp. Aceste observații au condus la realizarea *detectorului de valori cvasi-vârf* (quasi-peak), a cărui schemă de principiu este prezentată în figura 5.12.a.

Spre deosebire de detectorul de vârf, încărcarea condensatorului  $C$  se face prin rezistorul  $R_1$ , iar descărcarea prin intermediul rezistorului  $R_2$ ; constantele de timp de încărcare și respectiv, de descărcare, se aleg în așa fel încât condensatorul  $C$  să se poată descărca în intervalul de timp dintre impulsuri, astfel încât instrumentul de măsurat să indice o valoare medie dependentă de frecvența impulsurilor (fig. 5.12.b), ținând astfel seama de caracteristicile fiziologice ale auzului uman. Alături

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

de constantele electrice definite anterior, în valoarea indicației intervin și constantele mecanice ale instrumentului de măsurat.

În prezent, pentru echipamentele numerice, schema electrică a detectorului de valori cvasi-vârf este simulată printr-o funcție de transfer corespunzătoare sistemelor "clasice".

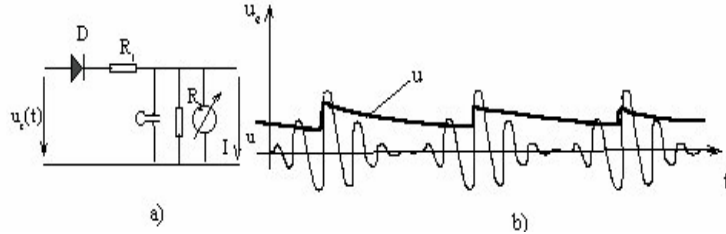


Fig. 5.12. Detectorul de valori cvasi- vârf

1. Un aparat de radio MA, poate fi transformat într-un receptor de măsurare; dar unul MF?
2. Ce avantaje prezintă folosirea mai multor schimbări de frecvență?
3. Ce corelație se poate stabili între răspunsul unui FTB și un impuls biexponențial aplicat la intrare?

**5.5. Analizorul spectral**

Unul dintre echipamentele cel mai adesea folosit în cadrul măsurărilor din domeniul frecvențelor înalte îl reprezintă *analizorul spectral*. Principial, există mai multe tipuri de analizoare spectrale, cele mai utilizate fiind analizoarele spectrale cu baleiere de frecvență, a căror schemă de principiu este prezentată în figura 5.13; schema bloc a analizorului spectral nu diferă mult de schema receptorului de măsurare, principala diferență fiind aceea că folosește un *oscilator local comandat* OLC, care primește semnalul de comandă de la *generatorul de baleiaj* GB, care produce și baleierea după axa Ox din blocul de afișare.

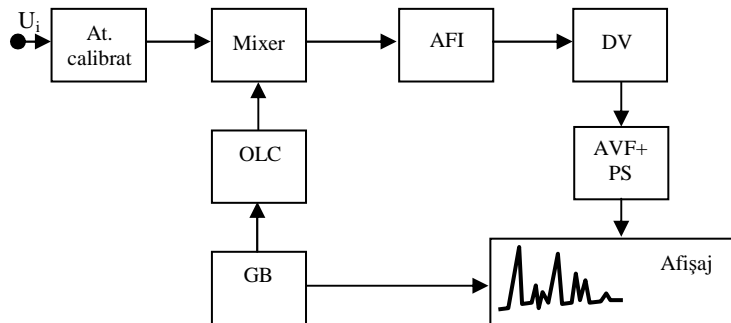


Fig. 5.13. Schema bloc a analizorului spectral

Rezultă că la analizorul spectral, oscilatorul local are frecvența variabilă într-o gamă de frecvențe prescrisă de



## Capitolul 5 Măsurări în CEM

utilizator, gamă în care se realizează analiza spectrală a semnalelor aplicate la intrare (fig. 5.14). Întrucât frecvența oscilatorului local se modifică în permanență, rezultă că frecvența corespunzătoare semnalului analizat se va schimba la rândul ei; pentru o singură componentă spectrală, întrucât semnalul de la ieșirea schimbătorului de frecvență este baleiat, rezultă că pe ecranul analizorului se va vizualiza caracteristica amplificatorului de frecvență intermediară, multiplicată cu amplitudinea componentei spectrale.

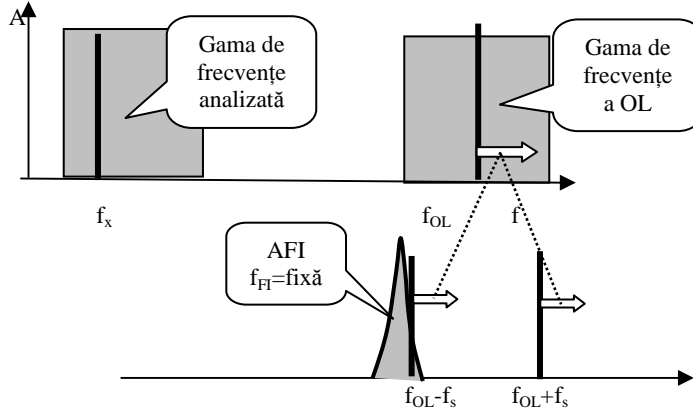


Fig. 5.14. Explicativă la schimbătorul de frecvență

Schema de principiu a analizorului spectral conține și un *detector de vârf* care are rolul de a extrage anvelopa semnalului. De la ieșirea acestui bloc, semnalul este aplicat unui bloc de amplificare care conține un *amplificator de videofrecvență* și un *amplificator logaritmice*, pentru a permite folosirea unei scări logaritmice pentru amplitudine și eventual, poate conține și un procesor de semnal, care are rolul de a extinde posibilitățile de măsurare ale analizorului. Analizoarele moderne sunt prevăzute cu "marcheri" reglabili pentru a determina valorilor de detaliu din imaginea vizualizată pentru amplitudine sau frecvență.

Măsurările efectuate cu analizorul spectral se referă la *amplitudine* – de regulă, în dB(x), unde  $x$  este mărimea de referință – și respectiv, la *frecvență* (fig. 5.15). În cazul amplitudinii, cea mai mare valoare (limita superioară), o reprezintă *nivelul de referință* care depinde de nivelurile de atenuare din blocul de intrare și respectiv, de amplificare în AFI. În funcție de constanta de sensibilitate aleasă, în dBx/div, se poate determina nivelul absolut sau relativ al semnalelor vizualizate. Trebuie reținut că ultima diviziune (cea mai de jos a ecranului), nu este calibrată, ea corespunzând zgomotului propriu al analizorului spectral. Pentru analizoarele moderne, la schimbarea benzii de frecvențe a AFI, nivelul de referință rămâne constant și se modifică doar nivelul de zgomot; creșterea atenuării de radiofrecvență la intrarea analizorului conduce însă, la scăderea raportului semnal/zgomot din cauza zgomotului propriu al analizorului.

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

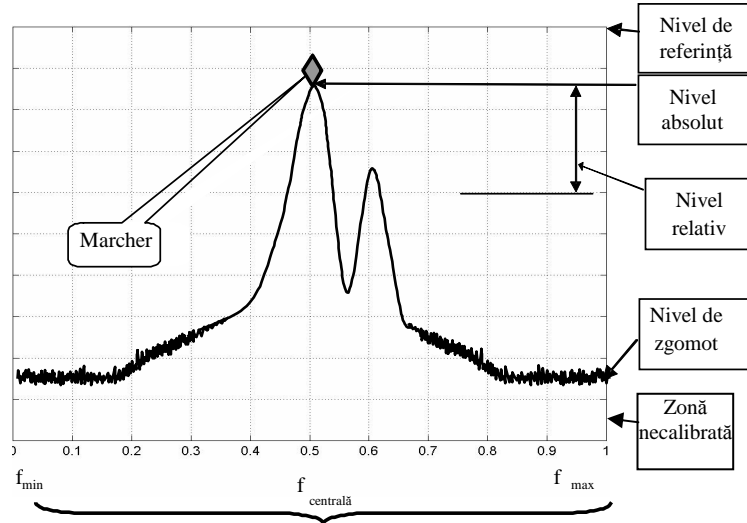


Fig. 5.15. Măsurări cu analizorul spectral

*Sensibilitatea* (rezoluția în amplitudine) reprezintă cel mai mic semnal care poate fi vizualizat pe dispozitivul de afișare. Se consideră că un semnal cu amplitudinea egală cu nivelul mediu al zgomotului vizualizat (displayed average noise level - DANL), exprimat în dBm, apare pe ecran sub forma unei "cocoșe" cu amplitudinea de 2,2 dB deasupra zgomotului.

*Domeniul de frecvențe baleiat* (span), este cuprins între o frecvență minimă și o frecvență maximă, indicându-se și frecvența centrală; pentru a avea informații referitoare la viteza de baleiere, se indică și timpul în care s-a efectuat baleierea. Incertitudinea de determinare a frecvenței depinde de: liniaritatea oscilatorului local și stabilitatea oscilatorului de referință, gama de frecvențe baleiată și rezoluția asigurată de AFI.

În principiu, *gama dinamică* a analizorului spectral este cuprinsă între nivelul maxim al puterii semnalului care poate fi aplicat la intrare, tipic: 10 - 30 dBm și nivelul zgomotului de fond care depinde de banda de frecvențe a AFI, precum și nivelul atenuării de radiofrecvență; în principiu, gama de operare pentru un analizor spectral (fără atenuator), este cea prezentată în figura 5.15.

Dacă se consideră și atenuatorul de la intrare, de exemplu, la o atenuare de 0 dB și o bandă de frecvențe de 1 kHz, nivelul zgomotului de fond este de - 115 dBm, rezultând o gamă dinamică de 125 - 145 dB. În realitate, gama dinamică a unui analizor este ceva mai redusă deoarece: schimbătorul de frecvență realizează o compresie a semnalului cu circa 10 dBm, iar nivelul distorsiunilor de intermodulație de ordinul II și III, produse de amplificatoare, limitează gama dinamică la circa 70 - 80 dB. Acesta este, de altfel, motivul pentru care gama de vizualizare conține doar 8 - 10 diviziuni (pentru 10 dB/div). Dinamica analizorului spectral este limitată de *zgomotul propriu* care impune semnalul minim care poate fi aplicat la

## Capitolul 5

### Măsurări în CEM

intrare. Deoarece în zgomotul propriu predomină *zgomotul termic*, rezultă că nivelul de zgomot depinde de banda de rezoluție a analizorului.

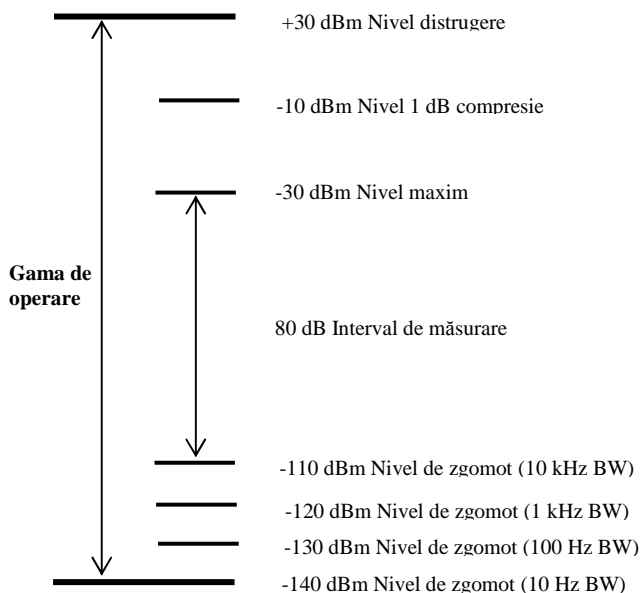


Fig. 5.15. Gama de operare a analizorului spectral

- Din ce cauză analizoarele spectrale nu folosesc detectoare de tip cvasi-vârf?
- Ce sunt distorsiunile de neurmărire?
- Cum se poate "curăța" o imagine "murdară"?

### 5.6. Măsurarea parametrilor antenelor

Orice *antena* poate fi considerată ca un cuadripol, având un port care poate fi caracterizat prin mărimi electrice, tensiune și curent și un port caracterizat prin mărimi de câmp electromagnetic. Pentru *antenele pasive*, fiecare dintre cele două porturi pot fi porturi de intrare sau de ieșire. Caracteristicile electrice și de radiație ale unei antene depind de geometria antenei și de caracteristicile materialelor din care este confecționată, dar sunt influențate și de mediul ambiant în care lucrează, precum și de punctul de observație/măsurare.

*Portul electric* este conectat la partea "electronică" prin intermediul unei linii de transmisiune (fider). La *portul de câmp electromagnetic*, pe lângă perturbațiile din mediul ambiant, pot să intervină și unde reflectate de la sol sau alte obiecte reflectoare existente în zonă (fig. 5.16), ceea ce face ca procesul de calibrare să fie influențat de o serie de factori perturbatori de care trebuie să se țină seama în procesul de măsurare.

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

În ultima perioadă se constată, pe lângă creșterea numărului de antene și o diversificare a tipurilor, din punct de vedere constructiv și al performanțelor.

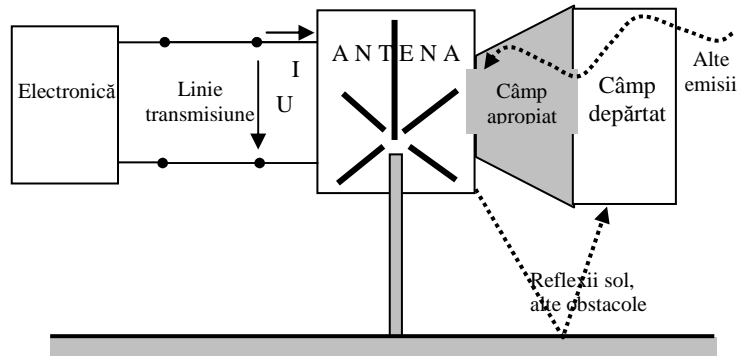


Fig. 5.16. Antena și “mediul înconjurător”

O atenție deosebită se acordă stabilirii caracteristicilor *locului de măsurare*, precum și reducerii duratei de calibrare. În momentul de față se dispune de echipamente de măsurare extrem de performante în ceea ce privește nivelul erorilor instrumentale și facilitățile oferite prin programele soft însă, în măsurările efectuate pot interveni o serie de factori care afectează incertitudinea de măsurare. În general, determinarea parametrilor antenelor, precum și etalonarea antenelor de măsurare, se face de firma producătoare. Deoarece parametrii antenelor se pot modifica în funcție de o serie de factori, ca: zona de câmp apropiat/depărtat, imperfecțiunile locului de măsurare, situarea în apropierea unor obiecte conductoare, inclusiv a pământului, neadaptarea și atenuarea cablurilor de legătură etc., este necesară efectuarea unor măsurări și calibrări periodice ale antenelor.

*Metodele de calibrare* ale antenelor se clasifică în:

- *metode de comparație*, la care parametrii se determină pornind de la un câmp etalon sau pornind de la valorile obținute de la o antenă de referință etalon;

- *metoda reciprocității*, care este o metodă absolută de măsurare, aplicabilă numai pentru antenele pasive, care se bazează pe faptul că antenele sunt reciproce, adică pot fi folosite atât în regim de emisie, cât și în regim de recepție.

Pentru a asigura reproductibilitatea măsurărilor, metodele de calibrare a antenelor sunt stabilite prin norme internaționale. Cele mai cunoscute norme de calibrare a antenelor sunt ANSI 63.5, SAE ARP 958 și DIN 45003. Calibrarea antenelor se poate efectua în spațiul liber, caracterizat prin absența reflexiilor sau în apropierea unui plan conductor – pământul, care introduce o undă reflectată care poate ajuta în procesul de calibrare, dar și în spații închise. Dacă pentru metodele de calibrare prezentate, măsurările se fac în câmp depărtat, în ultima perioadă au fost dezvoltate metode de calibrare a antenelor pe baza măsurărilor în câmp apropiat.

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

Datorită proprietăților lor de a transforma energia electrică în energie radiantă și invers, antenele și-au găsit un număr mare de aplicații în telecomunicații, radar, măsurări, simulări de câmpuri și impulsuri electromagnetice etc. Antenele pot funcționa în *regim de emisie* și/sau în *regim de recepție*, într-o bandă de frecvențe îngustă sau largă, ori în regim tranzitoriu, în impuls. Fără a fi o clasificare exhaustivă, din punctul de vedere al măsurărilor, antenele pot fi clasificate în următoarele tipuri:

- antene active și pasive de tip bară, baston sau mono-pol (100 Hz – 100 MHz),
- antene active și pasive de tip cadru (20 Hz – 100 MHz),
- dipoli acordabili (25 MHz – 1,7 GHz),
- antene biconice (20 MHz – 300 MHz),
- antene conice spiralate logaritmice (100 MHz – 10 GHz),
- rețea de antene log-periodice (80 MHz – 40 GHz),
- antene horn (200 MHz – 40 GHz).

După mărimea determinată, antenele pot fi:

- antene pentru măsurarea câmpului electric (de tip E),
- antene pentru măsurarea câmpului magnetic (de tip H).

Antenele de tip E sunt destinate măsurării câmpului electric care produce în conductoare deplasări de sarcină ce conduc la apariția unor diferențe de potențial de-a lungul acestora. Variantele de bază pentru antenele de tip E sunt antena mono-pol și antena dipol. *Antena mono-pol* cu contra greutate (antena baston) – figura 5.17.a – este formată dintr-un fir vertical și o bază – *contra greutate* – sub forma unei rețele radiale conductoare care poate fi sau nu legată la pământ. Datorită sensibilității reduse este mai puțin folosită în tehnica măsurărilor. *Antena dipol deschis* (fig. 5.17.b), respectiv, *antena dipol închis* (fig. 5.17.c), au lungimea  $\lambda/2$ ; ele pot fi folosite în gama de frecvențe de la 30 la 1000 MHz ( $\lambda/2 = 5 \text{ m} - 15 \text{ cm}$ ). Spre deosebire de antena monopol, antena dipol are o caracteristică directivă, iar sensibilitatea nu depinde prea mult de poziția față de pământ.

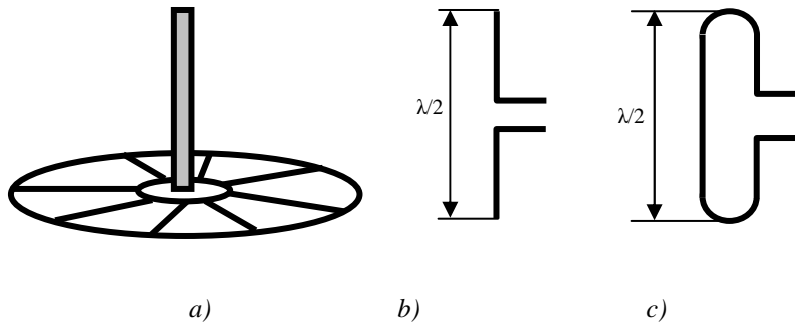


Fig. 5.17. Variante constructive de antene

Pentru reducerea componentelor de intermodulație este necesar ca antena să fie de bandă îngustă; pe de altă parte, în tehnica măsurărilor, se dorește ca antena să fie de bandă largă pentru a putea acoperi o gamă de frecvențe cât mai mare. De exemplu, pentru antena dipol deschis, dacă se mărește grosimea

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

barelor, (fig. 5.18.a), crește banda de frecvențe, scade rezistența proprie și frecvența proprie de rezonanță; capacitatea parazită care ia naștere între cele două bare șuntează însă antena. Eliminarea acestui neajuns se realizează la *antena biconică* (fig. 5.18.b), la care barele masive au fost înlocuite cu o rețea conică de conductoare subțiri; banda de frecvențe pentru aceste antene este caracterizată prin  $f_{\max}/f_{\min}$ , care este de circa 10.

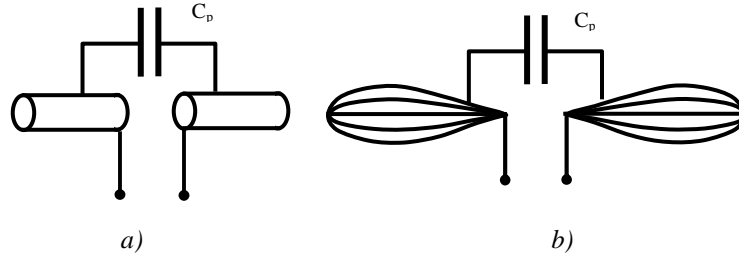


Fig. 5.18. Explicativă la antena biconică

Dacă o bară conductoare se găsește în câmp electromagnetic, în ea se induce curenți alternativi care, la rândul lor, generează în vecinătate un câmp electromagnetic; rezultă că pentru anumite configurații ale antenelor există posibilitatea de creștere a câștigului (comparativ cu dipolul), precum și obținerea unei noi caracteristici de directivitate. În această categorie intră *antenele Udo-Yagi* și *antenele logaritmico-periodice* (fig. 5.19). Prin dimensiunile elementelor, precum și prin dispunerea spațială a acestora, în zona dipolului antenei Yagi, pentru anumite frecvențe, se produce un câmp electromagnetic suplimentar în fază cu cel incident și deci, are loc creșterea tensiunii recepționate; aceste elemente suplimentare stabilesc câștigul antenei, banda de frecvențe, impedanța proprie a antenei, precum și caracteristica de directivitate.

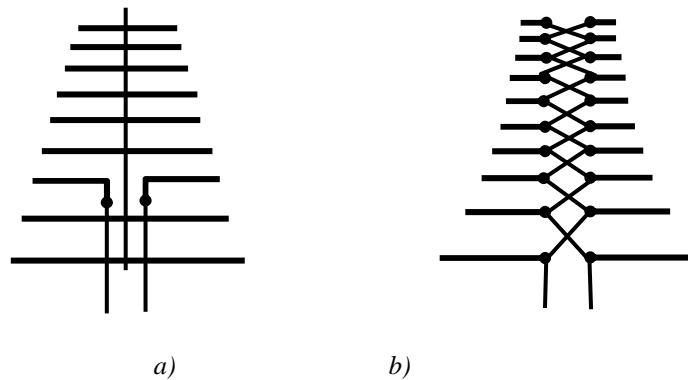


Fig. 5.19. a) Antena Udo – Yagi; b) Antena logaritmico-periodică

În cazul antenelor logaritmico-periodice, dipolii cuplați galvanic au o distribuție logaritmico-periodică atât pentru lungimea elementelor, cât și în ceea ce privește distanța dintre acestea; proprietățile unei asemenea antene se repetă periodic cu logaritmul frecvenței, permițând astfel dimensionarea acestora pentru o gamă largă de frecvențe, principalele caracteristici ale antenei, impedanța și câștigul antenei, rămânând constante.

## Capitolul 5 Măsurări în CEM

Dacă antenele biconice se folosesc în domeniul de frecvențe 30 - 300 MHz, antenele logaritmico-periodice acoperă domeniul 300 MHz - 2 GHz; cele două antene pot fi cuplate împreună obținându-se *antena bilog*. La frecvențe mai ridicate se folosesc alte tipuri de antene ca: antena conică cu spirală logaritmico în gama 1 - 2 GHz sau antena horn în gama 1 - 12 GHz. O altă observație se referă la faptul că dacă normele CISPR recomandă utilizarea antenelor având un anumit plan de polarizare, normativele militare prevăd utilizarea antenelor cu polarizare circulară.

Parametrii principali ai antenelor, care prezintă importanță practică și necesită măsurarea, sunt:

- factorul de antenă,
- diagrama de directivitate,
- câștigul,
- gama de frecvențe,
- poziția centrului de fază,
- coeficientul de reflexie etc.

Înălțimea sau *lungimea efectivă* a antenei,  $h_{ef}$ , se definește pentru regimul de recepție, ca fiind raportul dintre tensiunea în gol la bornele antenei  $U_0$  și intensitatea câmpului electric  $E$  în care este plasată:

$$h_{ef} = \frac{U_0}{E}. \quad (5.8)$$

Trebuie observat că această mărime nu se referă la înălțimea propriu-zisă a antenei, denumirea provenind din faptul că are dimensiunea în metri; înălțimea efectivă poate fi definită și pentru regimul de emisie ca fiind înălțimea unui dreptunghi echivalent care asigură aceeași distribuție de curent în antenă. Înălțimea efectivă depinde de dimensiunile geometrice ale antenei, de repartiția curentului în structura antenei și indirect, de frecvența câmpului electric. Dacă se consideră schema echivalentă a unei antene, aceasta conține, în afara generatorului de tensiune și a rezistenței proprii și o componentă reactivă; pentru antenele scurte, reactanța este de natură capacitivă (capacitatea parazită între antenă și referința de potențial). Din cauza acestei componente capacitive, înălțimea efectivă a antenei se reduce însă crește odată cu creșterea frecvenței.

Antena, cu o anumită impedanță proprie, se conectează printr-un cablu la un receptor de măsurare care are o anumită impedanță de intrare; din această cauză tensiunea la bornele receptorului va fi mai mică decât tensiunea în gol. Se definește *factorul de antenă* (antenna factor - AF), ca fiind raportul dintre câmpul electric incident și tensiunea la bornele receptorului:

$$AF = \frac{E}{U} \text{ sau în dB: } AF[dB] = 20 \lg \left( \frac{E}{U} \right). \quad (5.9)$$

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

Factorul de antenă este un parametru constructiv al antenei de recepție care depinde de frecvență; este dat de firma producătoare sub formă grafică, tabelară sau soft pentru câmpul depărtat. Din relația (5.9) se deduce intensitatea câmpului electric:

$$E [dB\mu V / m] = U [dB\mu V] + AF [dB \cdot 1/m]. \quad (5.10)$$

În funcție de locul măsurării, pot să apară alți factori de corecție; trebuie observat că prin creșterea factorului de antenă, sensibilitatea antenei scade. De reținut că în câmp apropiat relația (5.10) nu este valabilă.

În afara factorului de antenă, un alt parametru important este *câștigul* antenei  $G$ , care se definește ca raportul dintre densitatea de putere maximă  $p_{\max}$  într-un punct situat la distanța  $r$  de antenă și densitatea de putere în același punct produsă de o antenă izotropă -  $p_{i0}$ , ambele alimentate cu aceeași putere  $P_0$ :

$$G = \frac{P_{\max}}{P_{i0}} \text{ sau în dB: } G [dB] = 10 \lg(G). \quad (5.11)$$

Noțiunea de câștig nu presupune o amplificare; dacă se face o analogie cu un megafon, folosirea acestuia nu înseamnă o amplificare a puterii acustice, ci direcționarea puterii acustice spre o anumită zonă. Pentru o antenă izotropă, densitatea de putere este dată de următoarea expresie:

$$P_{i0} = \frac{P_0}{4\pi r^2}. \quad (5.12)$$

O caracteristică importantă a antenelor o reprezintă *caracteristica de directivitate/radiație* (fig.5.20), definită prin relația:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{P_{\max}} = \frac{1}{G} \frac{p(\theta, \varphi)}{P_{i0}}, \quad (5.13)$$

unde  $\theta$  și  $\varphi$  reprezintă unghiurile din coordonatele sferice.

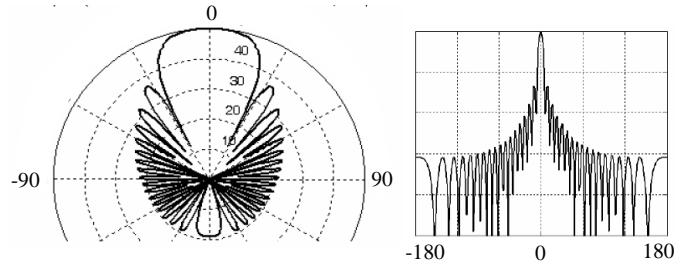


Fig. 5.20. Caracteristica de directivitate



## Capitolul 5 Măsurări în CEM

Datorită proprietăților directive ale antenelor reale, aria în care se transmite sau se recepționează puterea electromagnetică la o anumită distanță  $r$  față de antenă, este dependentă de câștigul antenei; *apertura*  $A_0$  sau *aria efectivă* a antenei reprezintă aria unei suprafețe echivalente cu care se înmulțește densitatea de putere transmisă  $p_t$  din centrul fasciculului, pentru a obține puterea radiată:

$$P_0 = A_0 p_t = A_{i0} p_{i0}. \quad (5.14)$$

Pentru antena izotropă se demonstrează că apertura este:

$$A_{i0} = \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (5.15)$$

Din cauza neadaptării dintre impedanța antenei și impedanța caracteristică a cablului de legătură, câștigul real al antenei este mai mic. Se poate demonstra că între câștigul antenei și factorul de antenă există relația:

$$AF = \frac{9,73}{\lambda\sqrt{G}} = 32,4 \frac{f[\text{GHz}]}{\sqrt{G}}. \quad (5.16)$$

Determinarea câștigului sau a factorului de antenă prin comparație cu o antenă cunoscută, numită și *metoda antenei standard*, este o metodă de substituție. În practică este convenabil ca antena de testat să fie antenă de recepție, iar antena emițătoare, care realizează câmpul de calibrare, să fie o antenă cu directivitate pronunțată pentru a avea o mai bună eficiență a generatorului și o perturbare mai redusă a mediului exterior. Incertitudinea de măsurare tipică, pentru metoda comparației, este de  $\pm 0,7$  dB în gama de frecvențe cuprinsă între 20 MHz și 5 GHz.

De obicei, *factorul de antenă* se determină pentru spațiul liber în condiții de câmp depărtat. Pentru măsurările în care se consideră pământul ca plan de referință, factorul de antenă are o valoare aproximativă; în acest caz factorul de antenă se poate determina pentru o anumită înălțime și o anumită polarizare.

Măsurările se pot efectua în spații special amenajate și care trebuie să îndeplinească anumite condiții; aceste spații pot fi: spații de testare în câmp deschis deasupra unui plan de masă metalic cu dimensiuni suficient de mari sau camerele anecoide.

Schema tipică de calibrare a antenelor prin metoda comparației este prezentată în figura 5.21. Antena de emisie AE care produce câmpul electromagnetic necesar procesului de calibrare, este alimentată de la generatorul de semnal GS, iar antena de recepție, AR, este conectată la receptorul de măsurare, RM; antena de referință și antena care se măsoară sunt plasate pe catarge/piloni, deasupra suprafeței pământului.

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

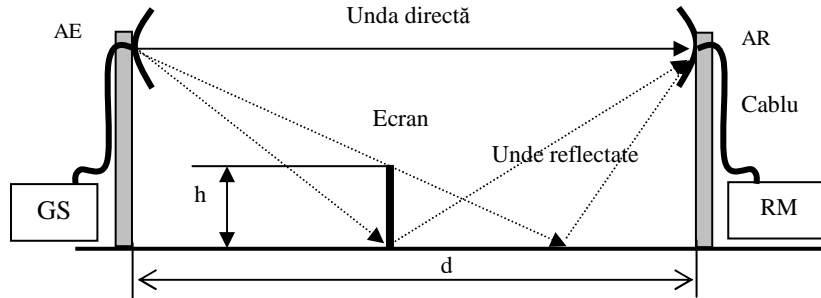


Fig. 5.21. Schema de calibrare a antenelor prin metoda comparației

Factorul de antenă/câștigul se definesc pentru câmp depărtat care, conform criteriului Rayleigh, satisface condiția:

$$d \geq 2 \frac{l^2}{\lambda}, \quad (5.17)$$

unde:  $d$  este distanța dintre cele două antene,  $l$  – lungimea (lățimea) sensorului/antenei de recepție, iar  $\lambda$  - lungimea de undă. Această condiție este satisfăcută destul de ușor la frecvențe ridicate. Pentru antenele mari care lucrează la frecvențe joase, măsurările se fac uneori cu mijloace aeriene.

Calibrarea antenelor la distanțe mici este avantajoasă și prin faptul că drumul undei directe este mai scurt, iar influența reflexiilor de la sol și de la alte obstacole învecinate este mai redusă, însă pot să apară și erori suplimentare datorate sfericității câmpului electromagnetic. Măsurarea antenelor cu deschidere largă ridică o serie de probleme legate de reflexiile care pot să apară din cauza obstacolelor din mediul exterior și a interferențelor. O problemă care poate să intervină în măsurări este cea legată de radiația cablurilor de legătură la antena de emisie care conduce la modificarea câmpului în zona de recepție. Pentru eliminarea reflexiilor de la sol, se plasează ecrane sau piramide absorbante în spațiul dintre cele două antene.

Calibrarea antenelor prin metoda reciprocității reprezintă o metodă absolută de determinare a câștigului sau a factorului de antenă și permite obținerea unei acurateți ridicate. Ca observație, în cazul aplicării metodei reciprocității, este necesar să se cunoască atenuarea spațiului dintre cele două antene, atenuare care se poate determina prin calcul sau experimental. Principial, etalonarea antenelor prin metoda reciprocității necesită trei antene (*metoda celor trei antene*), dintre care cel puțin una trebuie să fie reversibilă. Folosirea metodelor de reciprocitate la etalonare este convenabilă pentru antenele de bandă largă și cu o bună directivitate ca, antenele Yagi, antenele logaritmice-periodice etc.; în acest caz, perturbațiile externe influențează mai puțin procesul de măsurare. Pentru stabilirea relațiilor de calcul la calibrarea antenelor prin metoda

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

reciprocității, se exprimă densitatea de putere pentru câmp depărtat,  $p_r$ , în centrul fascicului antenei de recepție:

$$p_r = G_e \frac{P_e}{4\pi r^2}, \quad (5.18)$$

unde:  $P_e$  reprezintă puterea emisă,  $G_e$  – câștigul antenei de emisie, iar  $r$  – distanța dintre cele două antene.

Puterea recepționată de antena cu aria efectivă,  $A_r$ , va fi:

$$P_r = p_r A_r = G_r G_e \frac{P_e}{4\pi r^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (5.18)$$

de unde rezultă:

$$\frac{P_r}{P_e} = G_e G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2. \quad (5.19)$$

Presupunând că există adaptare de impedanțe, exprimăm puterile în funcție de tensiunile măsurate,  $U_e$  și  $U_r$  și se obține:

$$\frac{U_r}{U_e} = \sqrt{G_r G_e} \frac{23,9}{r \cdot f[\text{MHz}]}. \quad (5.20)$$

Dacă se ține seama și de influența unei reflectate de pământ, apare un coeficient de reflexie  $R$  definit prin relația:

$$R = 1 - (r/d), \quad (5.21)$$

unde  $d$  este lungimea drumului parcurs de unda reflectată. În acest caz, relația 5.20, devine:

$$\frac{U_r}{U_e} = R \sqrt{G_r G_e} \frac{23,9}{r \cdot f[\text{MHz}]}, \quad (5.22)$$

sau definind funcția de transfer a sistemului de măsurare:  $A = 20\lg(U_e/U_r)$ , rezultă:

$$A = 20\lg(r) + 20\lg(f) - 27,6 - R[\text{dB}] - (G_e[\text{dB}] + G_r[\text{dB}]).$$

În realitate, funcția de transfer a sistemului depinde și de înălțimea antenelor. Dacă se elimină câștigul antenelor, se obține *atenuarea normată a spațiului de măsurare*:

$$A = 20\lg(r) + 20\lg(f) - 27,6 - R[\text{dB}]. \quad (5.23)$$

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

Întrucât distanțele de măsurare sunt standardizate la 3, 10 și 30 m, valorile medii ale coeficientului de reflexie și intervalele de variație ale acestuia, sunt următoarele:

Distanța de măsurare r[m]	Intervalul pentru R [dB]	Valoarea medie R [dB]
3	3,74 - 4,84	4,3
10	5,46 - 5,86	5,7
30	5,91 - 5,98	5,9

În practică, dacă atenuarea măsurată diferă cu mai puțin de 3 dB față de cea normată, măsurarea se consideră corectă; dacă atenuarea măsurată diferă față de atenuarea normată cu 3 - 10 dB, această valoare se introduce ca o corecție a măsurărilor, iar dacă abaterea este mai mare de 10 dB, locul de măsurare este considerat impropriu și nu mai poate fi utilizat.

Dacă se consideră trei antene, dintre care cel puțin una este reversibilă și o antenă, *antena "i"*, este în regim emițător, iar *antena "j"*, în regim receptor, pentru sistemul format din cele două antene având câștigul  $G_i$  și respectiv,  $G_j$ , situate la distanța  $r$ , funcția de transfer a sistemului de măsurare, definit ca raportul dintre tensiunea de alimentare a antenei emițătoare și tensiunea obținută la bornele antenei receptoare, în dB, este:

$$A_{ij} = 20 \cdot \lg \frac{U_i}{U_j} = A_r - (G_i + G_j), \quad (5.24)$$

unde  $A_r$  este atenuarea corespunzătoare spațiului dintre antene. În situația în care se folosesc trei antene, prin permutarea acestora în procesul de măsurare, se obține sistemul de ecuații:

$$A_{ij} = A_r - (G_i + G_j), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (5.25)$$

de unde rezultă câștigurile corespunzătoare celor trei antene:

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{3}{2} A_r - \frac{1}{2} (A_{12} + A_{13} - A_{23}) \\ G_2 &= \frac{3}{2} A_r - \frac{1}{2} (A_{12} + A_{23} - A_{13}) \\ G_3 &= \frac{3}{2} A_r - \frac{1}{2} (A_{23} + A_{13} - A_{12}). \end{aligned} \quad (5.26)$$

Atenuarea normată a spațiului de calibrare,  $A_r$ , se poate calcula și, respectiv, se poate determina experimental folosind două antene identice plasate în cadrul aceleiași structuri; cele două antene care sunt folosite în experiment, pot fi și dipoli simpli pentru care parametrii pot fi calculați.

Principalele surse de erori sunt următoarele:

**Capitolul 5**  
**Măsurări în CEM**

- Atenuarea normată depinde de distanța dintre antene; pentru antenele cu mai multe elemente, centrul de greutate al antenei se deplasează în funcție de frecvență (la creșterea frecvenței către dipolii de dimensiuni mai mici), ceea ce face ca distanța dintre antene să fie o funcție de frecvență; erorile datorate acestui fenomen pot fi de ordinul  $\pm 2$  dB.

- Imperfecțiunea locului de măsurare conduce la erori de circa  $\pm 1$  dB.

- Erorile instrumentale sunt cele mai importante și pot atinge  $\pm 4$  dB.

**ÎNTREBĂRI FINALE**

1. Din ce cauză este necesar să se asigure reproductibilitatea măsurărilor în CEM și care sunt factorii care influențează negativ acest deziderat?
2. Cum se poate modifica un filtru de rețea pentru a deveni rețea artificială?
3. Dați exemple de echipamente care se măsoară în camere anecoide complete respectiv, în camere semianecoide.
4. Este posibil ca septumul din celulele GTEM să fie înlocuit cu un fir?
5. Care sunt mărimile care influențează viteza turbinelor din camerele reverberante?
6. Care este principiul de funcționare a echipamentelor de tip superheterodină?
7. Comparați performanțele detectoarelor cunoscute.
8. Care este rolul elementelor directoare și reflectoare la o antenă Yagi?
9. Dacă s-ar defini factorul de antenă pentru regimul de transmisie, care ar fi parametrul suplimentar de care ar trebui să se țină seama?
10. Ce se înțelege prin metodă absolută de măsurare (referitor la metoda celor trei antene)?
11. Care dintre cei doi dipoli electrici, cu buclă deschisă sau cu buclă închisă, au o sensibilitate mai mare?
12. Prezentați schemele de măsurare pentru MC și MD cu ajutorul cleștelui de curent.
13. Din ce cauză, în câmp depărtat, se măsoară doar una dintre componentele câmpului electromagnetic?

Capitolul 5  
Măsurări în CEM

**REZUMAT**

- Principala problemă a măsurărilor în CEM o reprezintă asigurarea *reproductibilității*.
- *Rețeaua artificială* simulează rețeaua de alimentare și este compusă dintr-un FTJ cu rol de tampon pentru perturbațiile din rețea și de la EUT și un FTS prin care se extrag perturbațiile generate de echipament.
- *Cleștele absorbant* permite determinarea perturbațiilor emise de cabluri.
- *Spațiul de testare cu arie deschisă (OATS)* se folosește ca referință pentru toate măsurările și testele CEM.
- *Camera anecoidă* asigură propagarea undelor ca și în spațiul liber prin plasarea unor materiale absorbante pe pereții unei incinte ecranate.
- *Celula GTEM* este asemănătoare unei linii lungi și realizează, într-un volum specificat, un câmp electromagnetic uniform.
- Principiul de funcționare al *camerei reverberante* se bazează pe împrăștierea neuniformă (aleatorizare) a undelor în interiorul unei incinte.
- *Receptorul de măsurare și analizorul spectral* au la baza funcționării principiul *superheterodinei* (schimbare de frecvență). Normele CEM prevăd utilizarea receptorului de măsurare ca mijloc de măsurare, însă analizorul spectral asigură o viteză de lucru mai mare.
- Calibrarea antenelor se poate realiza prin *metoda comparației* sau prin *metoda reciprocității* (metoda celor trei antene).

**TEMĂ: Comparație între metodele de calibrare ale antenelor**

- *Trăsături comune și specifice*
- *Locul de măsurare și surse de erori*
- *Exemplificare pentru parametrii care pot fi determinați*