

# **COMPATIBILITATE ELECTROMAGNETICĂ**

**Tema 7.**

**MIJLOACE DE MĂSURARE ÎN CEM**

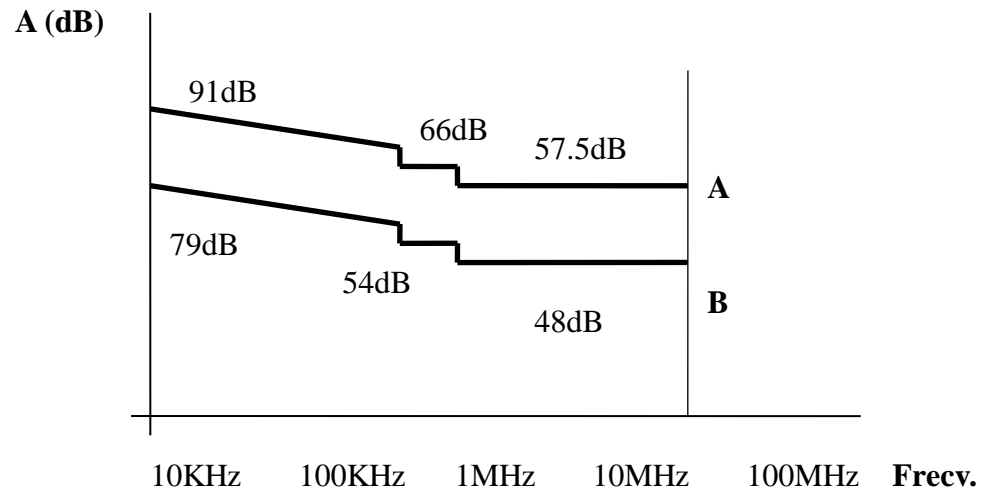
# Măsurări în EMC

Aparatura electronică este împărțită din punct de vedere EMC în 2 clase:

-clasa A- aparatura pentru uz industrial sau comercial, proiectată să admită nivele mai mari de perturbare, de exemplu calculatoare de proces, instalații de înaltă frecvență etc.

-clasa B- aparatura casnică, de exemplu aparatura audio, video, radio, TV, calculator personal etc.

Nivelele de perturbații se măsoară în condiții specificate de standarde, în camere anecoide (fără ecou) sau la locul de utilizare, la distanțe standard și în game de frecvențe standard. Un exemplu de limite de perturbare pentru clasele A și B este dat în figură.



Nivelele de perturbare și de susceptibilitate sunt foarte importante și trebuie cunoscute. Se impune astfel găsirea unor metode de măsurare specifice, care să asigure repetabilitatea măsurărilor. Clasificarea măsurărilor se face astfel: (Abrevierile sunt cele prevăzute de MIL STD 461)

- măsurarea perturbațiilor radiate **RE** (Radiated Emission);
- măsurarea susceptibilității la perturbații radiate **RS** (Radiated Susceptibility);
- măsurarea perturbațiilor conduse **CE** (Conducted Emission);
- măsurarea susceptibilității la perturbații conduse **CS** (Conducted Susceptibility);
- măsurarea mijloacelor de atenuare a perturbațiilor.

# Aparate pentru măsurări în EMC

Cel mai des întâlnite aparate de măsură specifice sunt:

1. Voltmetrul selectiv, care poate măsura

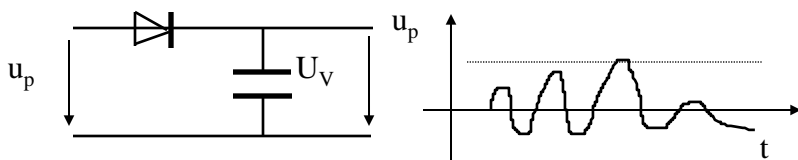
- valori de vârf
- valori de cvasi-vârf
- valori medii
- valori efective (se măsoară efectul termic al perturbației, aceste valori nu au o mare importanță în EMC).

2. Analizorul spectral, în 3 variante constructive:

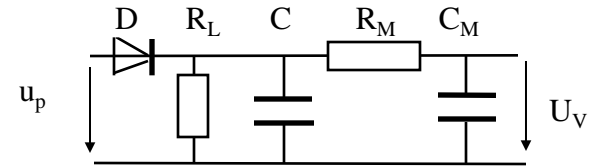
- scanarea în frecvență pe principiul superheterodinei
- cu set de filtre trece bandă
- achiziție A/D și prelucrare Fourier numerică

3. Osciloscop cu memorie, necesar pentru înregistrarea unor fenomene perturbatoare tranzitorii, așa cum este de exemplu perturbarea rețelei în momentul pornirii unui echipament.

**Valoarea de vârf**, poate fi măsurată prin încărcarea unui condensator. Constantele de timp  $CR_L$  și  $CR_E$  sunt specificate în standarde (CISPR de exemplu) pe game de frecvențe (DIN VDE 0876).



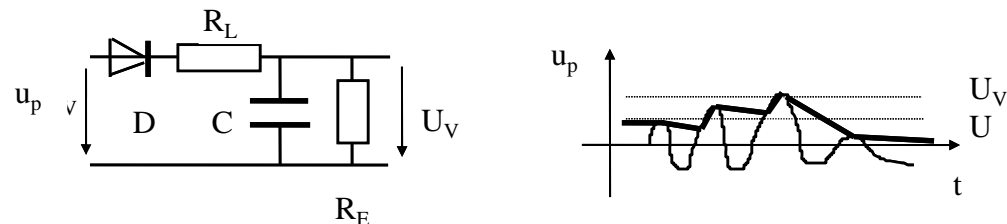
**Valoarea medie**, Tensiunea pe C urmărește vârfurile tensiunii, el fiind descărcat prin  $R_E$ . Filtrul trece jos cu  $R_M$  și  $C_M$  face media vârfurilor.



**Valoarea de cvasi-vârf** este mai relevantă pentru efectele pe care le are perturbația. Dacă perturbația este filtrată cu un filtru trece bandă care are banda de trecere B și amplificarea sau atenuarea V, iar impulsul perturbator are aria:

$$A = \int_0^t u_{p(t)} dt \quad U = 2AVB$$

Valorile V și B fiind constante pentru aparatul de măsură, este nevoie de fapt de măsurarea suprafeței impulsului (a integralei), ceea ce se poate realiza printr-un circuit de integrare, ca în figura



# Unde se fac măsurătorile EMC

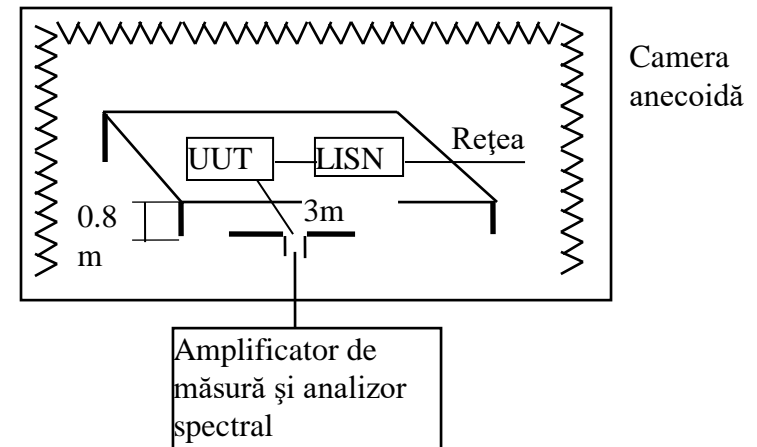
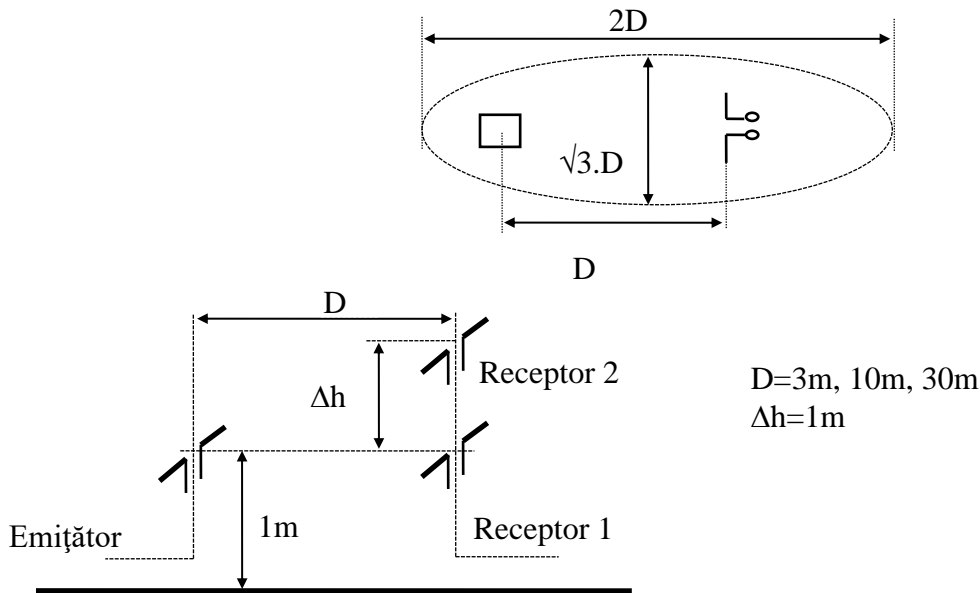
# Locuri pentru măsurare

**În aer liber** spațiul trebuie să fie fără obiecte sau clădiri în apropiere care să creeze reflexii. Oricum apar reflexii de la sol. Spațiul trebuie să aibă dimensiunile date în figura din stânga sus.

Pentru obiecte de dimensiuni mici măsurarea se poate face în **incinta TEM** (cu unde ElectroMagnetice Transversale) în care există volume în care vectorii E și H sunt perpendiculari, cu o direcție cunoscută. Forma unei astfel de incinte (incinta TEM Crawford) este dată în slide-ul următor.

Într-o cameră ecranată apar reflexii suplimentare de la tavan și pereți care duc la o neuniformitate a câmpului electromagnetic. Pentru a măsura această neuniformitate se folosesc 2 antene identice de recepție. Conform cu DIN 0877, diferența dintre semnalele recepționate, la 30m, nu trebuie să depășească 45dB (30MHz) și 0dB (600MHz), figura din stânga jos..

Cele mai corecte măsurări se fac în **camere absorbante (anecoide)**. Camera anecoidă are pereți speciali pentru a izola incinta de câmpul electromagnetic exterior și de a minimiza reflexiile. Pereții sunt din materiale plastice metalizate sau din ferită. O măsurare a câmpului în camere anecoide poate avea loc ca în figura dreapta jos.



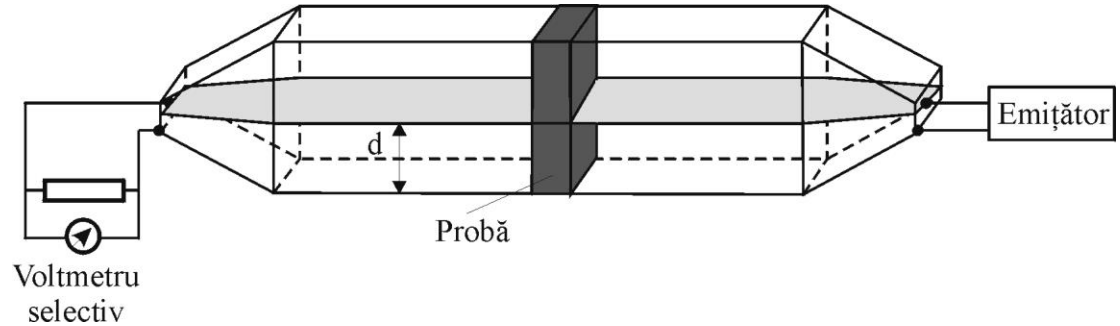
# Celula TEM

## a. Incinta TEM cu conductor interior de trecere

Metoda de măsurare este prezentată în figură și presupune ca:

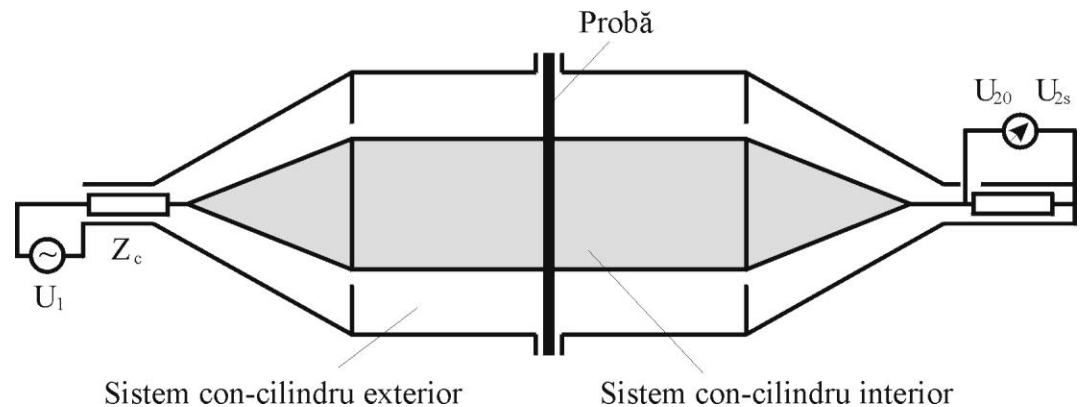
- Proba de material se plasează în interiorul unei linii coaxiale, cu impedanța caracteristică constantă.

- Proba de material este în formă de inel prin care trece conductorul interior. O parte din undele emițătorului este reflectată, o parte este transmisă receptorului, iar restul este disipată în probă sub formă de căldură.



## a. Incinta TEM cu conductor interior secționat

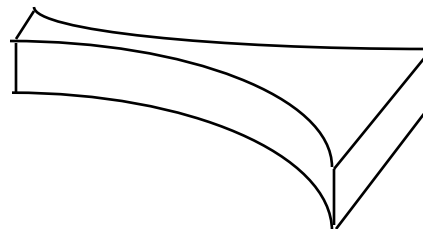
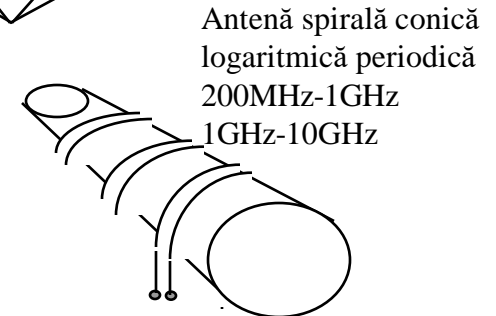
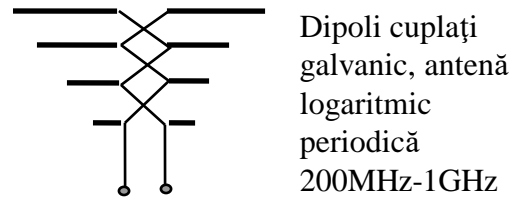
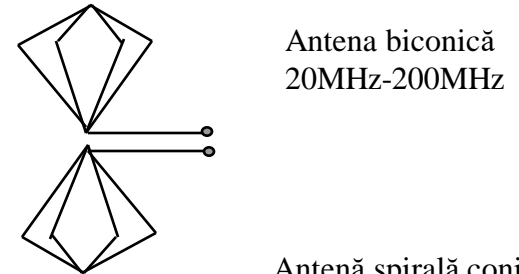
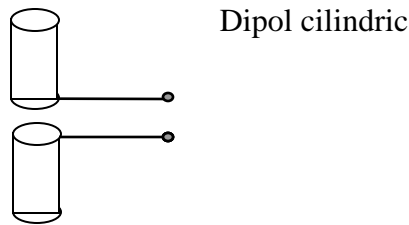
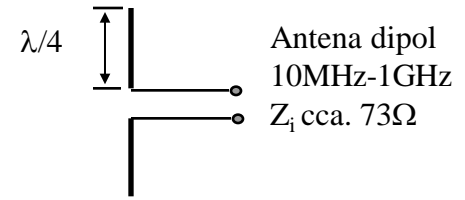
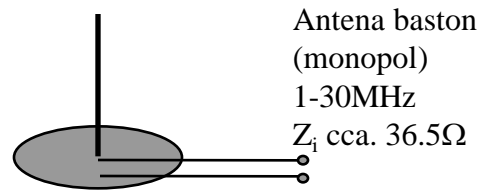
Pentru a îmbunătăți contactul cu materialul de încercat, proba sub formă de disc este introdusă între suprafețele frontale ale celor două jumătăți ale linie coaxiale care se îmbină cu o flanșă. Locul de îmbinare dintre jumătățile conductoarelor interior și exterior este șuntat capacitiv, fapt care conduce la o frecvență limită inferioară dependentă de grosimea probei, aproximativ 1...100MHz.



Măsurarea perturbațiilor  
radiate **RE** (Radiated  
Emission)

# Măsurarea perturbațiilor radiate. Antene de măsurare

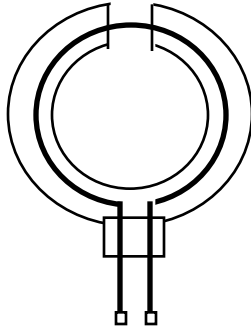
Măsurarea câmpurilor se face cu antene. Câteva tipuri de antene pentru câmp electric sunt arătate în continuare în figură.



Antenă Horn  
200MHz-2GHz  
1GHz-12GHz

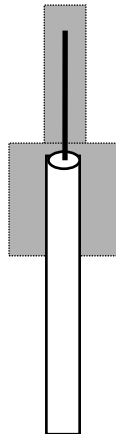


# Antene de măsurare

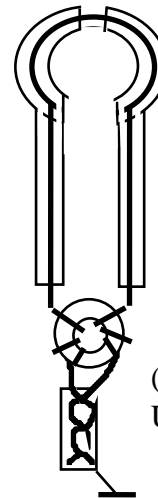


Antenă cadru (cu una sau mai multe spire)  
20Hz-200MHz pentru măsurarea câmpului magnetic.  
Pentru a elimina influențele câmpului electric,  
înfășurarea este introdusă într-un tub metalic.  
Ca să nu apară o spiră în scurtcircuit, tubul este secționat.  
La măsurarea câmpului magnetic trebuie ținut  
seama de câmpul magnetic al Pământului.

Pentru evaluarea primară a valorii câmpului se pot folosi sonde simple (care însă nu sunt calibrate), numite "Sniffer Probes",



Sonda pentru câmp  
electric (cablu  
ecranat cu firul  
central dezizolat)  
(50Ω)



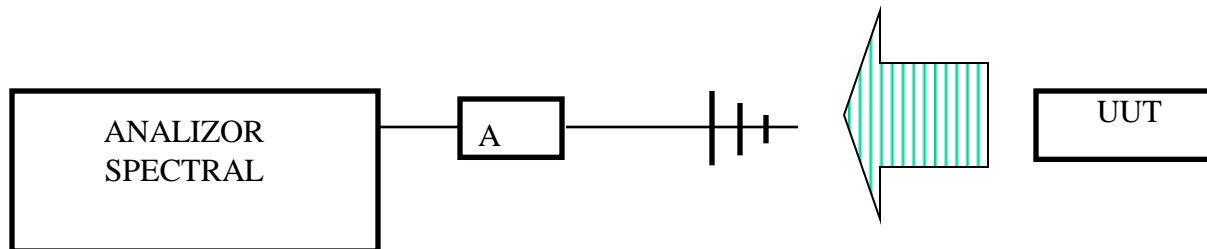
BALUN  
(BALanced  
UNbalanced)

# Măsurarea perturbațiilor radiate

Aparatul de testat și analizorul spectral sunt plasate într-un loc în care se pot face măsurări de câmp electromagnetic, conform standardelor.

Analizorul spectral calculează și afișează spectrul semnalului radiat în tot domeniul de frecvențe.

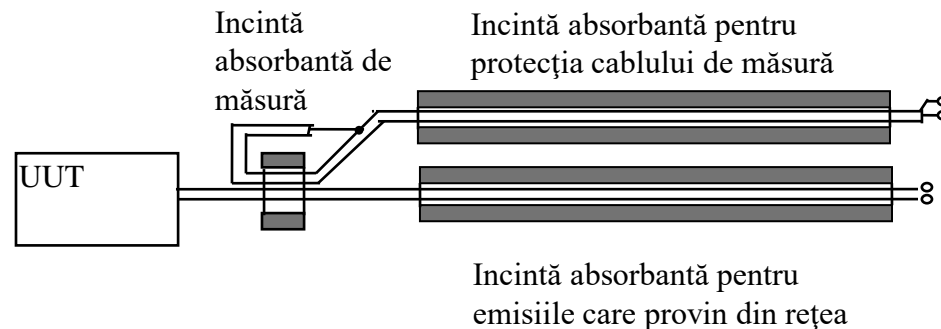
Testele se fac în zonele de frecvență în care se așteaptă emisii. De exemplu la un router wireless în zona 50Hz și mai ales 2,2GHz-2,6GHz.



# Simplificarea măsurării

La anumite aparate care radiază în special prin liniile de alimentare de la rețea (care au carcasa bine ecranată), se poate înlocui măsurarea câmpului radiat de aparat cu câmpul radiat de cablul de alimentare.

Măsurarea se face cu un cablu ecranat cu firul din mijloc legat la ecran, cu impedanța caracteristică cunoscută ( $50\Omega$ ). O incintă absorbantă ferește cablul de măsură de alte influențe decât cele din incinta de măsură.



# Măsurarea în domeniul militar



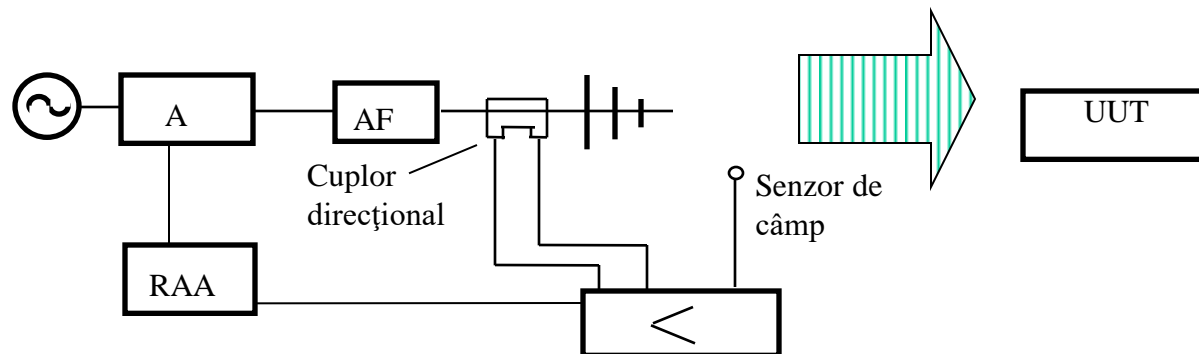
Măsurarea susceptibilității  
la perturbații radiate **RS**  
(Radiated Susceptibility)

# Măsurarea susceptibilității la perturbații radiate

Măsurarea susceptibilității constă în studiul comportării unui aparat supus la acțiunea unor perturbații cunoscute. Este nevoie de generarea unor perturbații, care în cazul perturbațiilor radiate se generează cu antenele prezentate în unul din slide-urile precedente, pentru diferite benzi de frecvență, conform schemei din figura următoare.

Semnalul generat de un generator de semnal este amplificat în amplificatorul A și etajul final de putere AF. Pentru a asigura aceeași valoare a câmpului pentru toate frecvențele este nevoie de o buclă de feed back pentru reglarea automată a amplificării RAA. În locul senzorului de câmp poate fi folosit un cuplor direcțional (Directional Coupler) care măsoară diferența între câmpul radiat și câmpul reflectat.

Măsurătorile se pot face în locurile prezentate în slide-urile anterioare

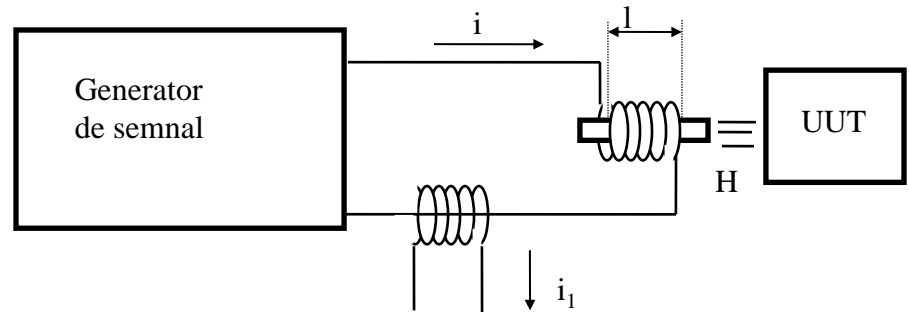


# Metode speciale de determinare a susceptibilității

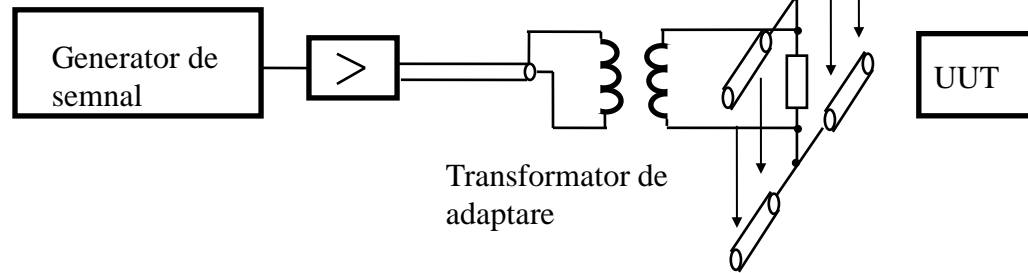
Susceptibilitatea la câmpuri magnetice puternice, în gama 30Hz-3MHz, se determină conform figurii:

Curentul  $i_1$  dă o măsură a câmpului magnetic generat, după relația  $H = \frac{Ni}{l}$

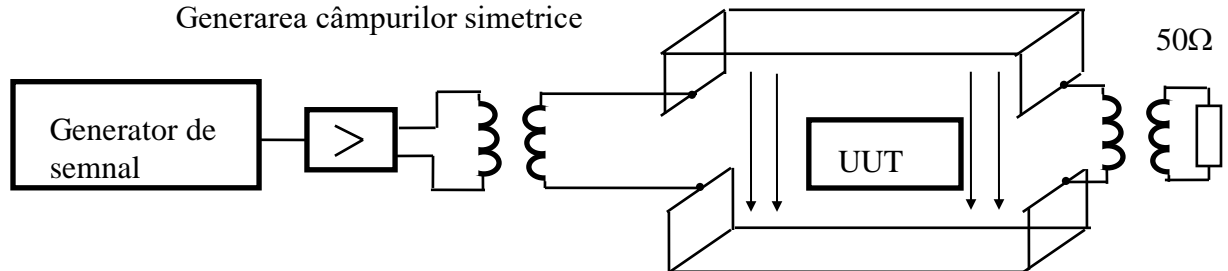
Obiectul supus încercării poate fi așezat și în interiorul bobinei.



Generarea câmpurilor asimetrice



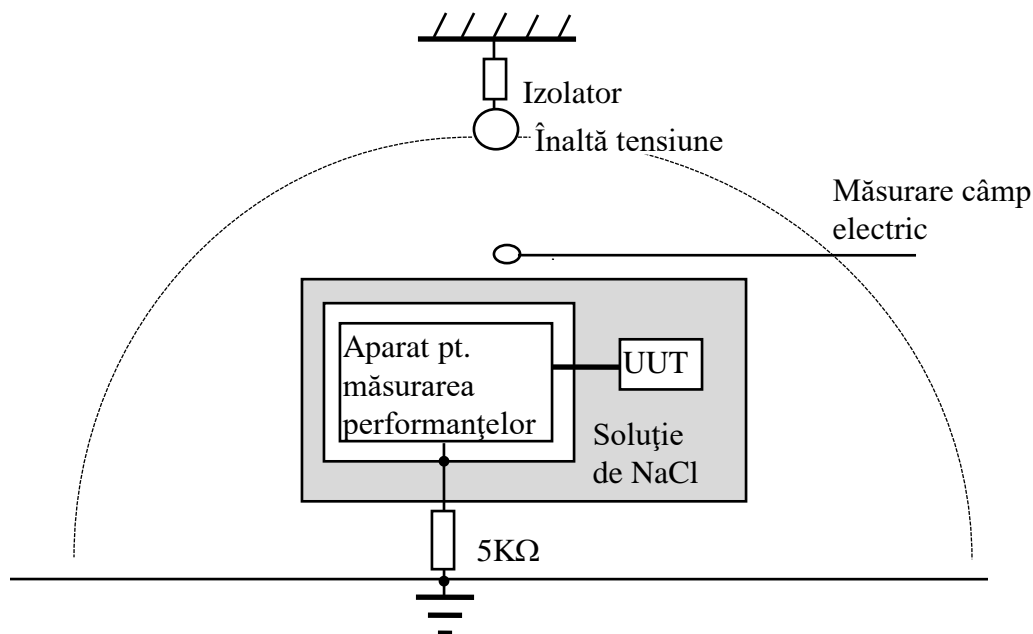
Generarea câmpurilor simetrice



Determinarea susceptibilității la câmpuri electrice puternice în gama 30MHz-150MHz se poate face și ca în figura:

# Metode speciale de determinare a susceptibilității

Măsurările de susceptibilitate sunt de o mare varietate. Măsurări specifice se realizează în electronica medicală, pentru aparate implantate, așa cum sunt de exemplu stimulatoarele cardiace, pompe de infuzie pentru insulină, stimulatoare musculare, proteze auditive etc. Un stand pentru determinarea susceptibilității aparatelor implantate la câmpuri cvasistatice cu frecvența de 50Hz este dat în figura:





# Măsurarea perturbațiilor conduse **CE** (Conducted Emission)

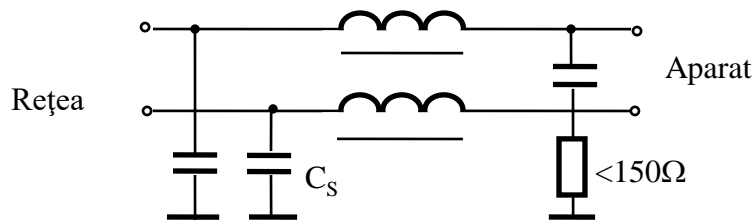
# Măsurarea perturbațiilor conduse

Majoritatea perturbațiilor conduse provin de la rețeaua industrială de c.a. Pentru repetabilitatea măsurătorilor, între obiect și rețea se interpune un aparat care creează o impedanță cunoscută (LISN- Line Impedance Stabilization Network), figura 1. Utilizarea LISN este standardizată și în România

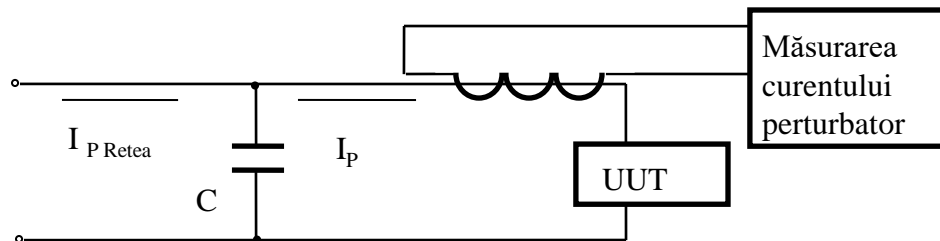
Măsurarea tensiunilor și curenților perturbatori (generat de rețea sau generat de un aparat în rețea) se face ca în figura de jos. Condensatorul C se pune ca și componentă de însumare a curenților perturbatori, creați de rețea și de aparatul supus testului. Curentul perturbator se măsoară cu ajutorul unei înfășurări, iar tensiunea perturbatoare se calculează aproximativ ca:

$$\underline{U}_P(\omega) = \underline{I}_P(\omega) \cdot \underline{Z}_N(\omega) \quad \text{unde } Z_N \text{ este impedanța cunoscută a LISN}$$

Curenții perturbatori se măsoară cu un analizor spectral în gama 9KHz-1GHz. Pentru a asigura repetabilitatea măsurătorilor, acestea se fac în condiții determinate și prevăzute de standarde, așa cum este DIN VDE 0877.

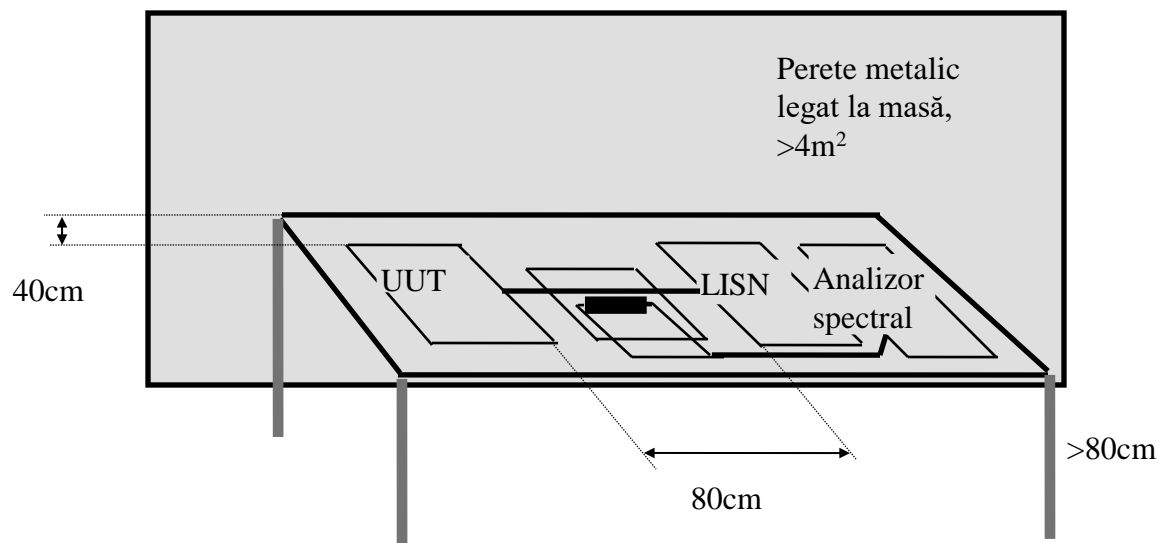


CISPR 1 recomandă această schemă în gama 150KHz-30MHz  
Condensatorii  $C_S$  au rolul de a nu permite intrarea în rețea a frecvențelor înalte generate de simulatorul de perturbații



# Locul de măsurare

Curenții perturbatori se măsoară cu un analizor spectral în gama 9KHz-1GHz.  
Pentru a asigura repetabilitatea măsurătorilor, acestea se fac în condiții determinate și prevăzute de standarde, așa cum este DIN VDE 0877. Un stand de măsură este dat în figură:

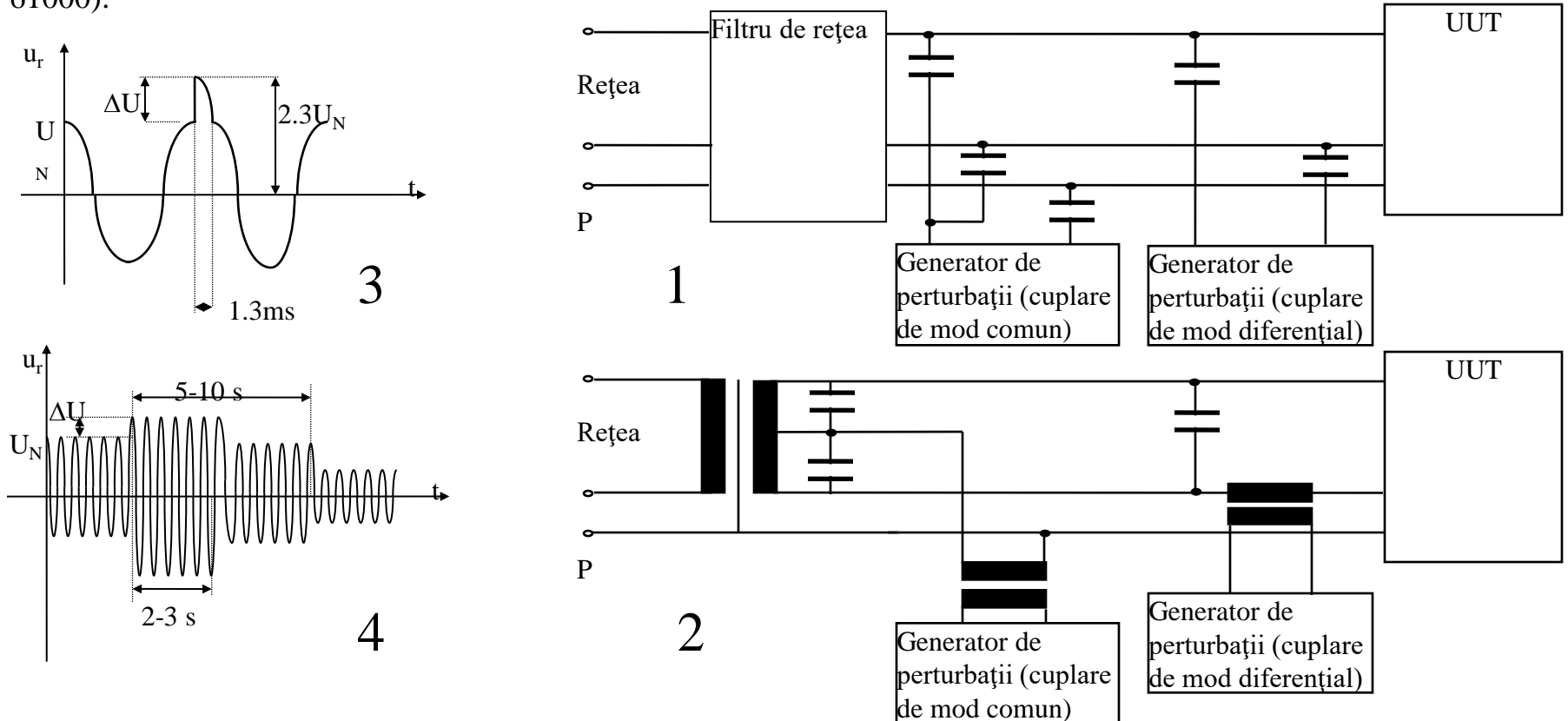


Măsurarea susceptibilității  
la perturbații conduse **CS**  
(Conducted Susceptibility)

# Măsurarea susceptibilității la perturbații conduse

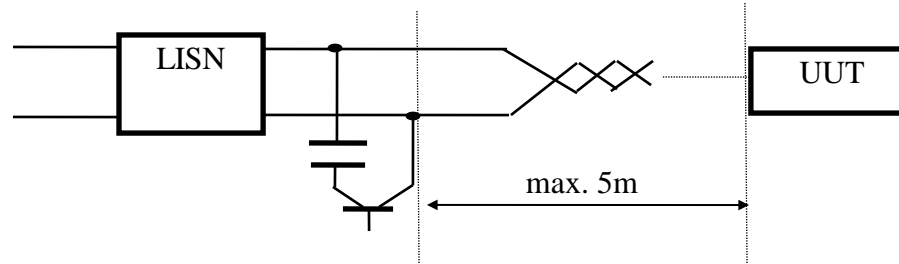
Pentru a măsura sau a verifica susceptibilitatea este nevoie de un simulator de perturbații și de un mijloc de cuplare a perturbației. Pentru simularea unei perturbații condusă de rețeaua de alimentare se pot utiliza căile de cuplare capacitivă și inductivă, de mod comun și diferențial, date în figura 1 și 2..

În figura 2 și 3 se arată parametrii tipici pentru supratensiunea în rețea ca semnal de test (conform EN 61000 și DIN VDE 0160) și parametrii tipici de test pentru variația de amplitudine, care prevede variații de +/-8% pentru rețele neperturbate și +/-16% pentru rețele puternic perturbate, pe perioade de 2-3s, apoi 3-7s amplitudine normală (EN 61000):

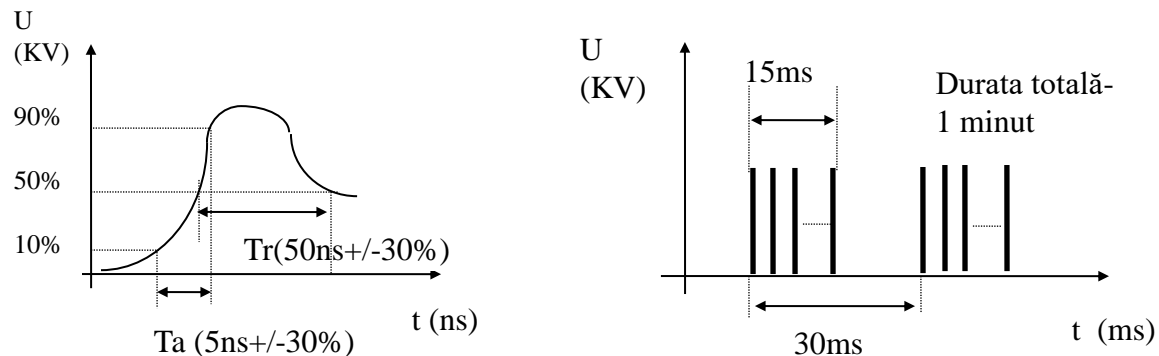


# Testarea susceptibilității la supratensiuni

Impulsul de test pentru studiul susceptibilității la supratensiuni se aplică ca în figură:



Salvele de impulsuri sunt frecvente în rețea datorită comutărilor releelor de forță. Forma impulsului de test este dublu exponențială, impuls des întâlnit în tehnica încercărilor de înaltă tensiune. Parametrii impulsului, precum și ai salvei de impulsuri sunt dați în figură:



Se definesc mai multe grade de severitate, în funcție de care se modifică tensiunea maximă a impulsului, astfel:

1- 0,5kV; 2- 1kV;

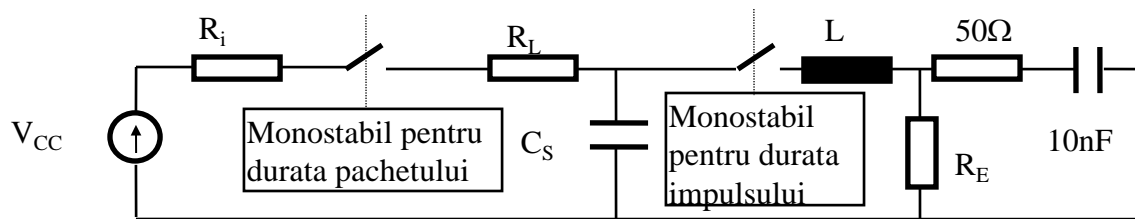
3- 2kV;

4- 4kV.

# Testarea susceptibilității la supratensiuni

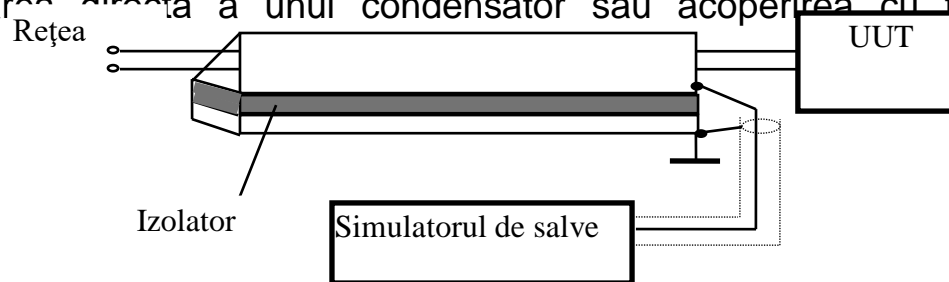
Schema principală a unui generator de salve este dată în figură:

$T_r$  este dat de descărcarea condensatorului cu constanta  $L/R_E$ , iar  $T_a$  este dat de încărcarea condensatorului cu constanta  $C_S R_L$ .



Cuplarea salvei de impulsuri (simulată prin rezistența de  $50\Omega$  și condensatorul de  $10\text{pF}$  se face capacitiv la cablul de alimentare de rețea al aparatului testat sau la liniile de semnal între 2 subsisteme, ca în figură:

Sunt admise și legarea directă a unui condensator sau acoperirea cu folie autoadezivă conductoare.



# Măsurarea susceptibilității la descărcări electrostatice

Pentru testare este nevoie de un generator de înaltă tensiune, un condensator de înaltă tensiune pentru acumularea energiei necesară descărcării și de un electrod de descărcare, conform IEC 801-2, ca în figură:

Se definesc mai multe grade de severitate:

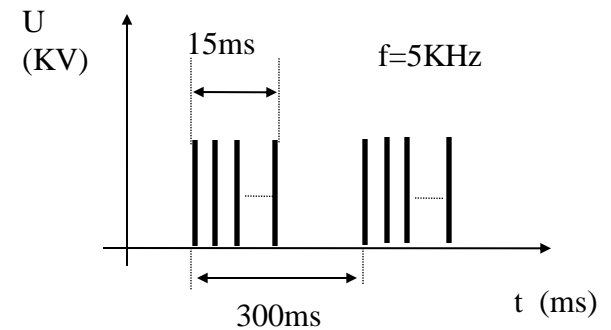
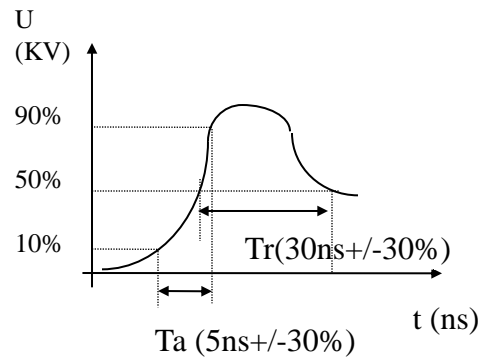
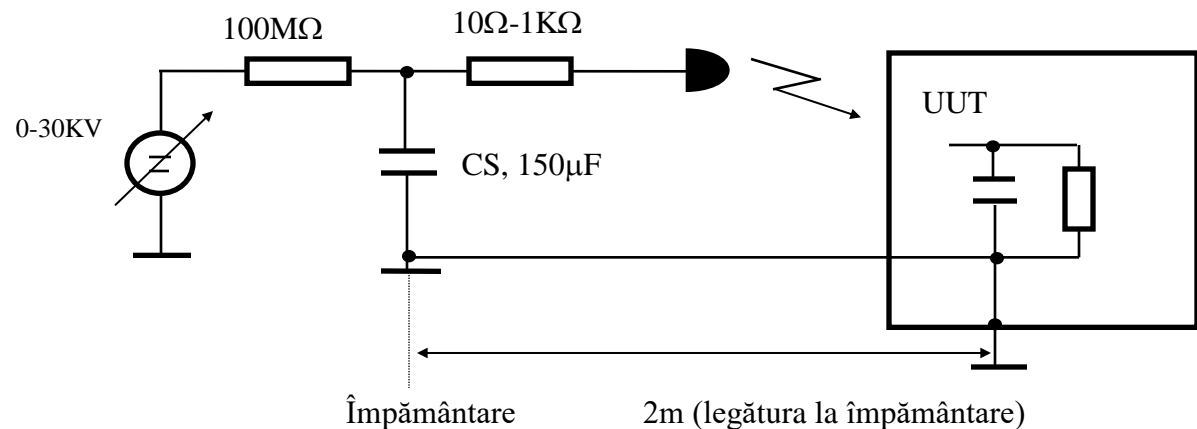
1-U=2kV

2-U=4kV

3-U=8kV

4- U=12kV

IEC 801-2 solicită testarea aparatelor la descărcări în rafale, cu caracteristicile din figura de jos:



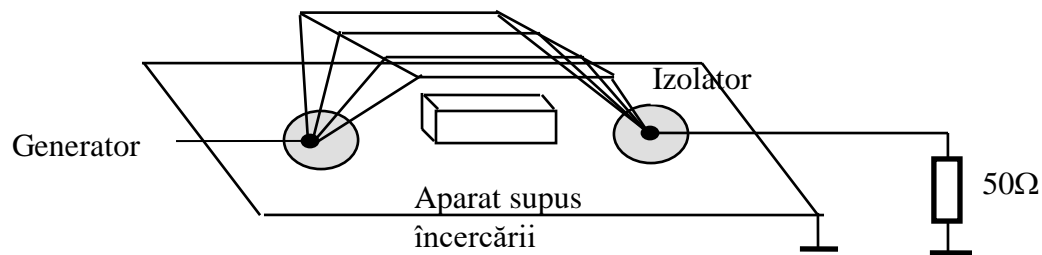
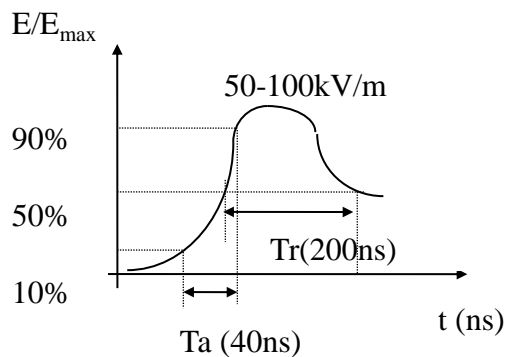


# Măsurarea susceptibilității la impulsuri nucleare

Un impuls NEMP este un impuls foarte scurt, de ordinul sutelor de ns, iar amplitudinea de ordinul MV.

Testele la susceptibilitate se fac de regulă în domeniul militar, în aviație și în tehnica spațială. O incintă pentru testarea susceptibilității la NEMP este arătată în figura:

Incintele de uz militar sunt de mari dimensiuni, pentru testarea vehiculelor, tancurilor și avioanelor. Mai nou însă, chiar și uzinele Volkswagen intenționează să încerce aparatura electrică a autoturismelor și la impulsuri NEMP.



# Teste de susceptibilitate pentru plachetele echipate

De exemplu la un câmp de 3V/m, la o placă cu un amplificator de instrumentație, cu cele două intrări de lungime 350 mm și respectiv 180 mm, traseu cu lățimea de 1 mm, la ieșirea amplificatorului apare un semnal de ordinul a 2V în gama de frecvențe de trecere a AO. Testarea se face în gama 9KHz-1GHz.

Testarea în câmp magnetic se afce cu 2 antene la 30 mm de placă, în gama 30MHz-1GHz.

Se mai pot face teste cu semnale speciale care sunt frecvente în atmosferă, așa cum este un semnal GSM.

Testarea cu impulsuri de înaltă tensiune în salvă se face conform figurii

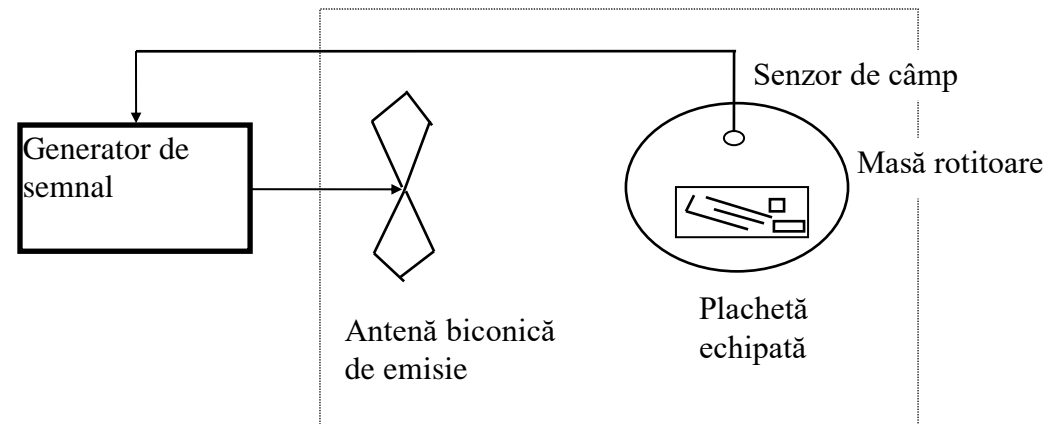
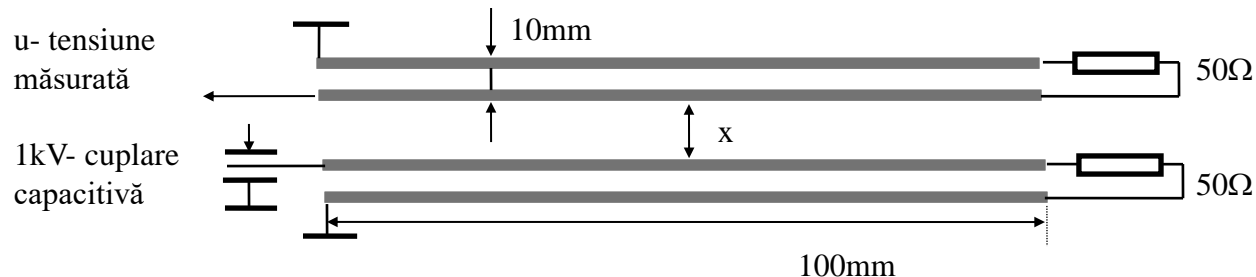
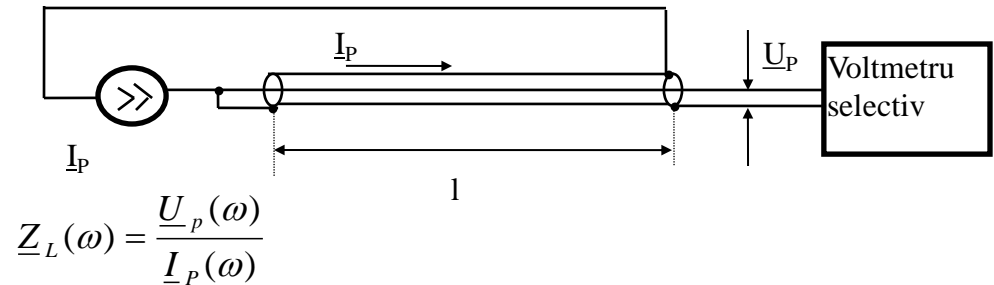


Figura 5.37

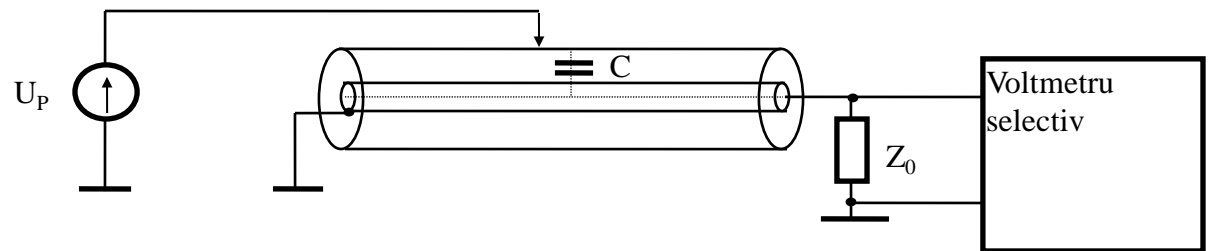


# Măsurarea atenuării ecranului cablurilor

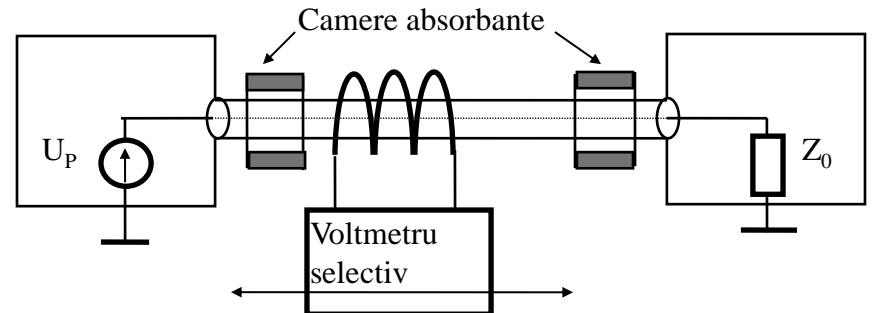
Măsurarea atenuării pentru câmpuri magnetice (funcție de frecvență) constă în determinarea impedanței de cuplaj (galvanic sau inductiv). Pentru că un câmp magnetic perturbator este creat de un curent, testarea se face injectând un curent  $I_p$ . Cu notațiile din figură, impedanța de cuplaj este:



Măsurarea atenuării pentru câmpuri electrice quasistatice se face aplicând un câmp electric perturbator prin intermediul unui ecran cilindric exterior, pe care se aplică tensiunea  $U_p$ . Apare capacitatea  $C$  prin ecranul cablului. Se definește admitanța de transfer ca:

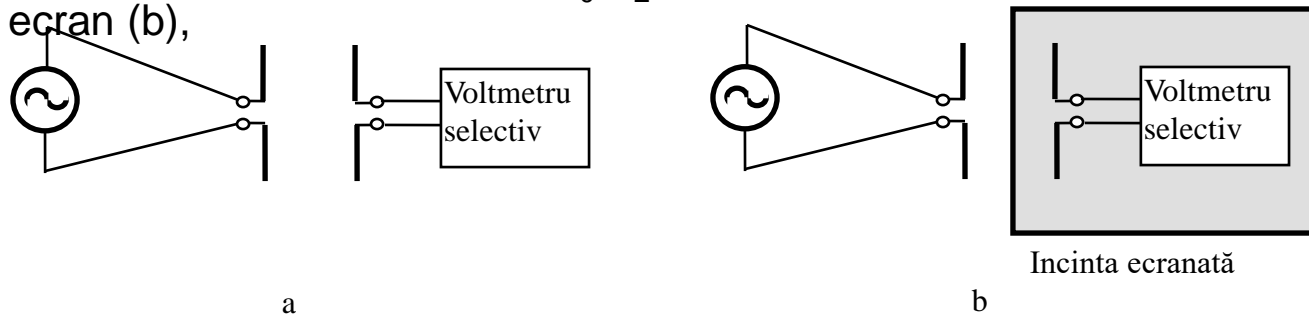
$$Y_T(\omega) = \frac{I(\omega)}{U_p(\omega)} \cong j\omega C$$


Măsurarea atenuării la câmp radiat se face pe baza principiului de **reciprocitate** care afirmă că atenuarea câmpului radiat din exterior este aceeași cu cea a câmpului radiat din interior spre exterior. Se măsoară astfel câmpul radiat în exterior

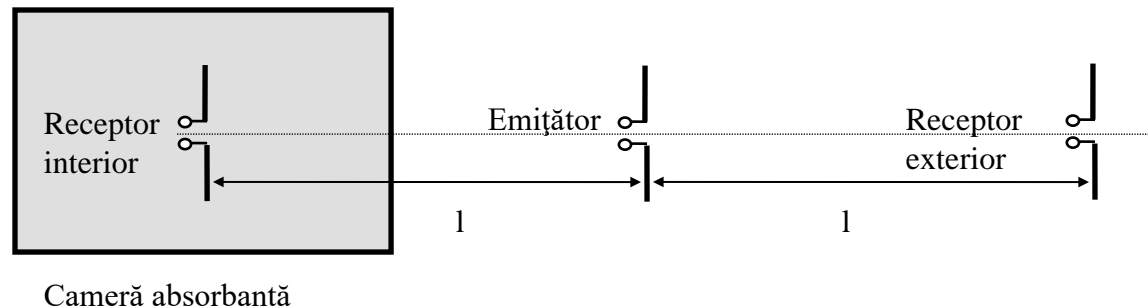


# Măsurarea atenuării pentru pentru carcasa și incinte ecranate

Se face o măsurare fără ecran și una cu ecran, cu antene conform domeniilor de frecvență. Atenuarea va fi  $a = a_0 - a_E$ , diferența atenuărilor fără ecran (a) și cu ecran (b),

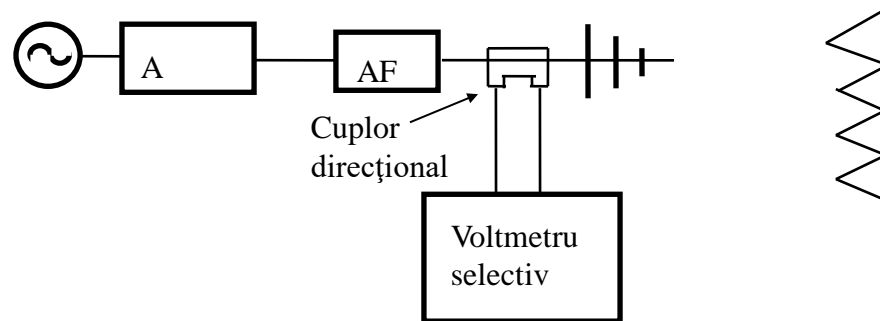


Pentru incintele mari, cum ar fi camerele absorbante se folosește o metodă punctuală aplicată la un perete cu un emițător în exterior, un receptor în exterior și un receptor în interior

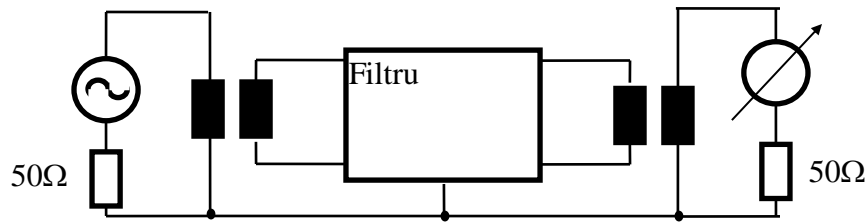


# Atenuarea prin reflexie a unui perete absorbant

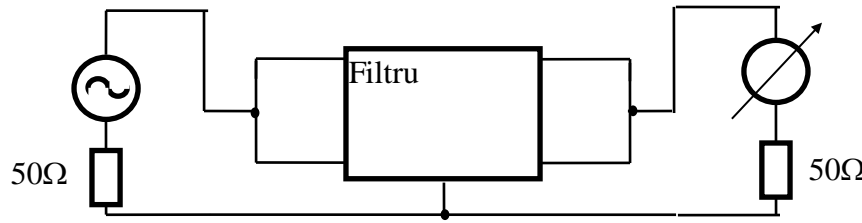
Profitând de proprietatea cuplorului direcțional de a furniza un semnal proporțional cu diferența între câmpul radiat și cel reflectat, se poate măsura coeficientul de reflexie al unui perete absorbant



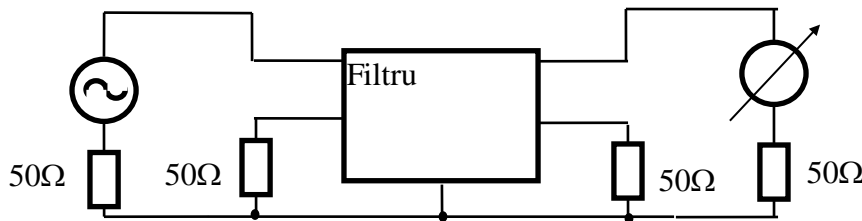
# Măsurarea atenuării pentru filtre de rețea



*pentru perturbații  
de mod diferențial  
(simetric)*



*pentru perturbații  
de mod comun  
(simetrice)*



*pentru perturbații  
de mod diferențial  
(asimetrice)*

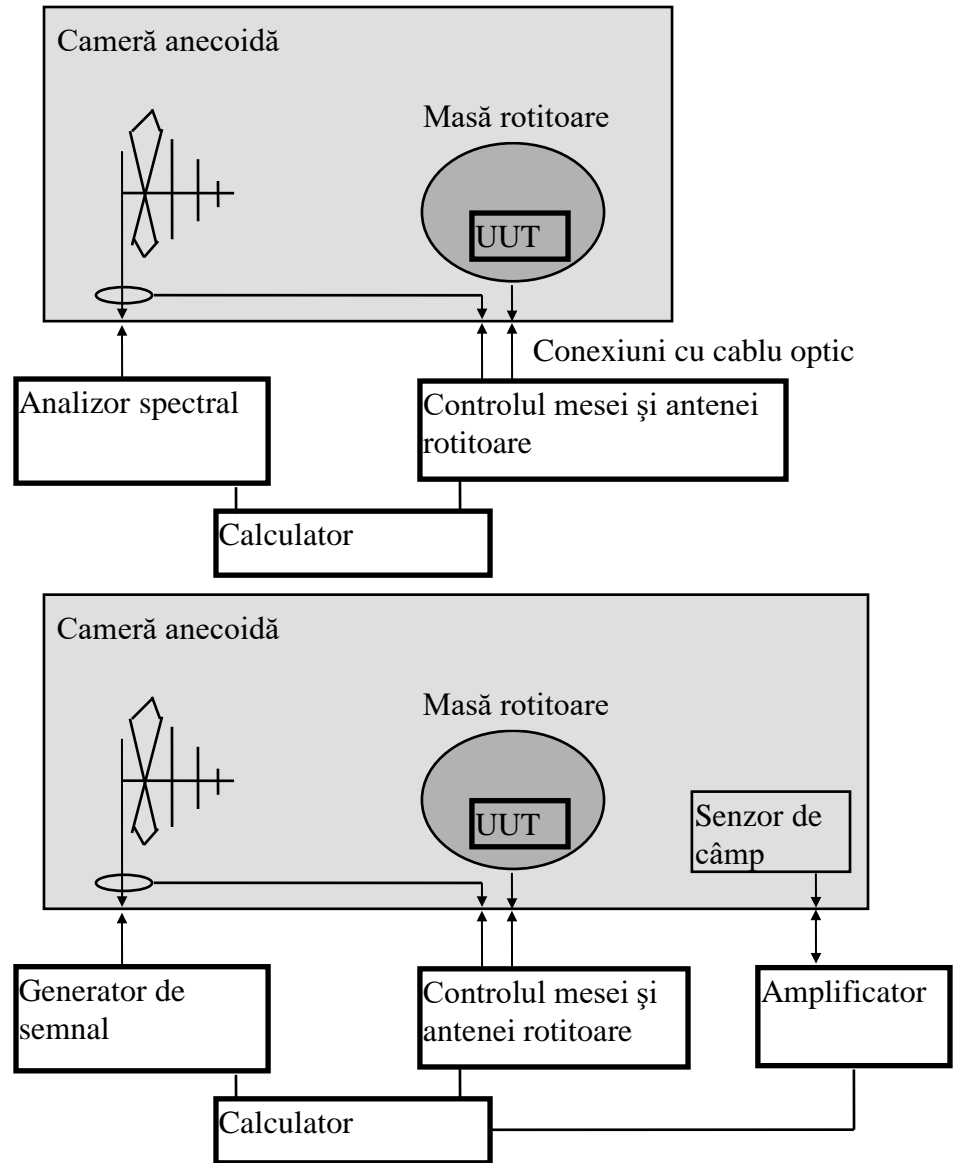
# Măsurări automate

Măsurările automate se fac etapizat, astfel:

- Pre-măsurarea dă un tablou general al spectrului perturbației. Se poate face prin detecția amplitudinii maxime, în tot spectrul.
- Culegerea de date- se stochează doar frecvențele critice sau domeniile de frecvență în care perturbația este mare (sau marginea de imunitate este mică).
- Măsurarea finală- se face doar în domeniile critice de frecvență.

O schemă bloc pentru măsurarea câmpului radiat este dată în figura de sus.

Schema bloc pentru determinarea susceptibilității la câmp radiat (după IEC 1000) este dată în figura de jos. La măsurarea susceptibilității nu este nevoie de schimbarea unghiului de măsurare. Generatorul de semnal este în gama 30-1000 MHz, cu amplificator de putere 25-200W pentru sisteme mici, realizând o intensitate a câmpului de 3-10V/m și cu amplificator de 1-10kW pentru a realiza 30-200V/m.



# Aparatură de măsură EMC



# Celula TEM

Caracteristici:

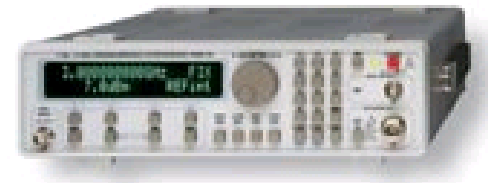
- gama de frecvențe DC 3GHz, (DC 1,5GHz 100MHz-3GHz)
- pierderi <0,2dB in toata gama de frecvențe
- ecranare efectiva >70dB

La intrarea celulei TEM semnalul se aplică prin intermediul unui generator de semnal RF

Caracteristici: gama de frecvențe 1Hz-3GHz , rezoluție minimă 1Hz, impedanța de ieșire: 50 ohmi, interfața: USB/RS232.

Semnalul aplicat trebuie amplificat, de aceea este nevoie de un amplificator de RF, care este un aparat scump și este posibil să nu acopere întreaga gamă de frecvențe. În aceste cazuri este nevoie de mai multe asemenea amplificatoare care acoperă câte un segment din banda de frecvențe.

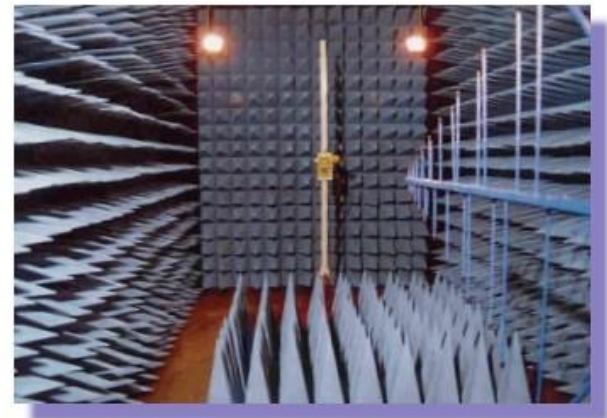
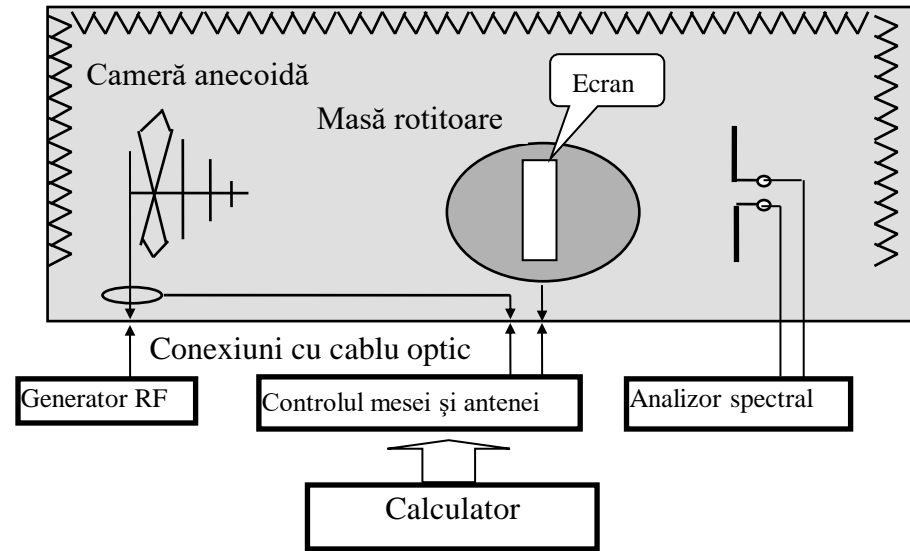
Semnalul este măsurat cu un voltmetru selectiv sau cu un analizor spectral. Un analizor spectral este arătat în figura :



# Camere anecoide

Cele mai corecte măsurări se fac în camere absorbante (anecoide). Camera anecoidă are pereți speciali pentru a izola incinta de câmpul electromagnetic exterior și de a minimiza reflexiile. Pereții sunt din materiale plastice metalizate sau din ferite. O măsurare a eficacității ecranării în camere anecoide poate avea loc ca în figura :

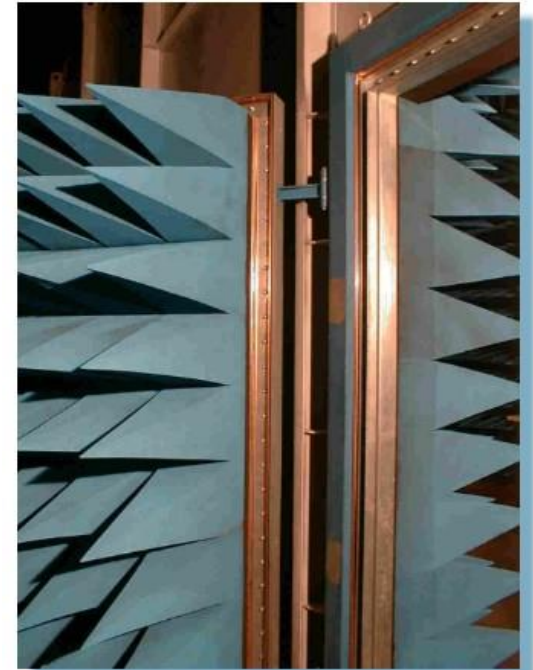
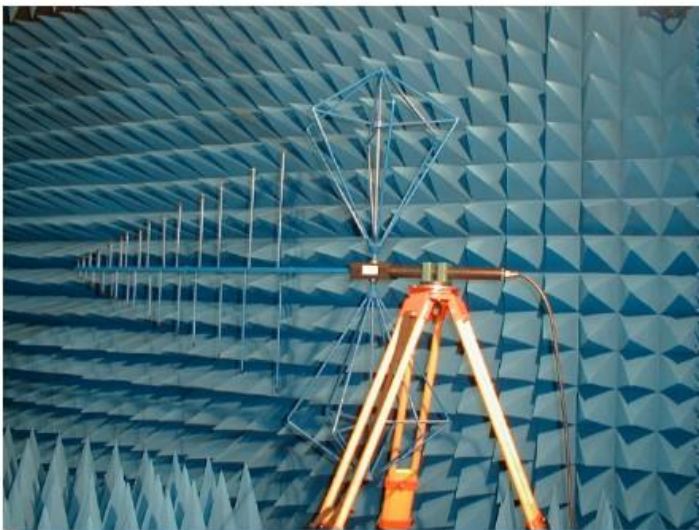
O astfel de cameră anecoidă există în România la ICMET Craiova (Institutul național de cercetare dezvoltare și încercări pentru electrotehnică). Camera anecoidă este prezentată în figura :



# Camere anecoide

Camera anecoidă este autorizată de DKD (Deutscher Kalibrierdienst, Germania, Societatea pentru calibrarea laboratoarelor) și are gama de frecvențe de măsurare 200MHz-1GHz, iar incertitudinea de măsurare maxim 1dB.

Un detaliu de asigurare a ecranării la îmbinarea ușii și antena pentru generarea /măsurarea câmpului electromagnetic sunt arătate în figura :

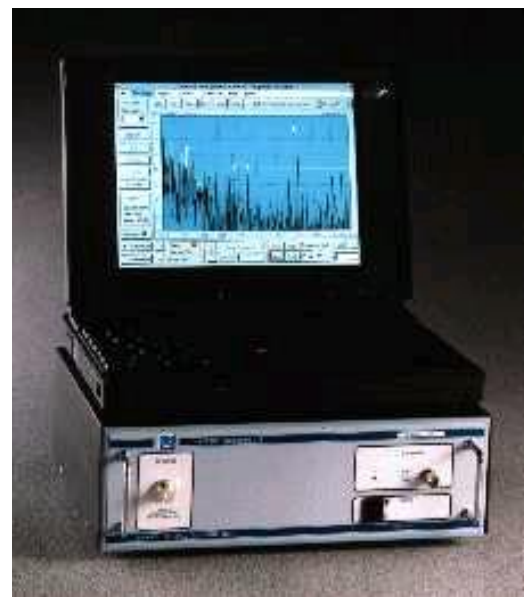


Camera anecoidă FRANKONIA

# Firme consacrate

O firmă consacrată este Laplace Instruments din Anglia care realizează o gamă largă de echipamente pentru EMC: camere anecoide, incinte TEM, antene, software specializat etc. Pe site-ul acestei firme se pot găsi și descrieri teoretice din domeniul EMC, soluții EMC și note de aplicații.

O celulă TEM este prezentată în figura de sus iar un sistem complet pentru analiza perturbațiilor în figura de jos. Sistemul de analiză a perturbațiilor conține un receptor de câmp, un analizor spectral și o unitate de prelucrare a datelor, partea software fiind compatibilă Windows.



# Incinte TEM



Incintă TEM Frankomia



Incintă TEM Laplace

# Firme consacrate

O altă firmă de cu renume în domeniu este Rohde & Schwartz. Un sistem portabil de măsură a câmpului electromagnetic și un sistem de măsurare a interferenței electromagnetice sunt arătate în figura :



Un sistem Rohde & Schwartz pentru măsurarea automată a câmpurilor emise de echipamentele wireless IT și de echipamentele GSM este dat în figura:

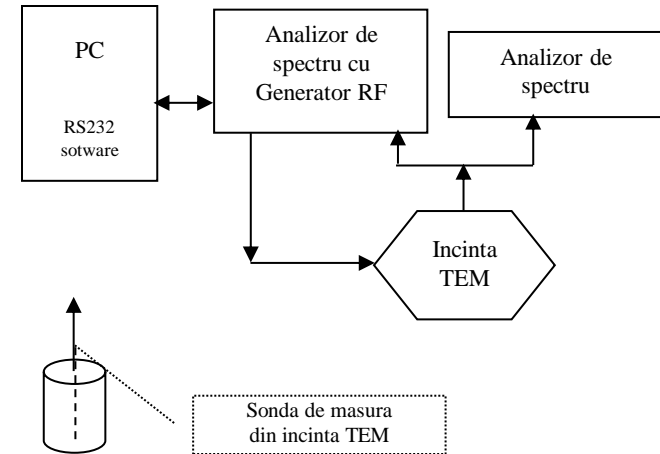


# Stand cu incintă TEM- laboratorul EMC

## Facultatea IESC

Sistemul de măsurare propus este alcătuit din următoarele elemente componente:

- Analizor de spectru, GSP-810, cu generator de radiofrecvență incorporat pentru domeniul 150 kHz la 1 GHz. Analizorul este prevăzut cu interfața RS232 pentru conectare la calculator în regim de achiziție de date folosind programul software standard “GSP810 try”;
- Mini incintă TEM de tipul TESCOM TC-5010B pentru lucrul în domeniul frecvențelor DC ÷ 1.5 GHz cu o atenuare efectivă de (70 ÷ 80) dB;
- Adaptor de măsură prevăzut cu sonda electrică;
- Calculator PC, în configurația specificată în documentația analizorului de spectru;
- Analizor de spectru, Hameg 1050, în banda 100 Hz ÷ 1100 MHz, utilizat pentru controlul măsurărilor;
- Elemente de conectică pentru gama metrică și decimetrică (cabluri coaxiale, distribuitor de semnale, mufe de conectare).



# Stand microunde- laboratorul EMC

## Facultatea IESC





# Sonde Spectran- laboratorul EMC

## Facultatea IESC

Laboratorul de Compatibilitate Electromagnetică a Universității TRANSILVANIA din Brașov a fost dotat în anul 2008 cu două analizoare spectrale, unul în gama 1Hz-1MHz și unul în gama 1MHz-6GHz. Analizoarele sunt portabile, memorează un număr de măsurători și pot transmite datele măsurate printr-o conexiune USB la calculator. Preluarea datelor cu calculatorul permite prelucrări ulterioare în Excel care aduc un aport important la înțelegerea fenomenelor electrice.

