

LUCRAREA NR. 6

MĂSURAREA DISTORSIUNILOR ARMONICE

Noțiunea de *distorsiune* se utilizează numai în raport cu un semnal sinusoidal. Astfel, prin distorsiune se înțelege abaterea formei unui semnal de la cea ideală (sinusoidală). Un semnal sinusoidal ideal ar trebui să fie reprezentat printr-o componentă sinusoidală unică. Semnalele reale sunt reprezentate prin rezultanta unei sume de componente sinusoidale, ca urmare se abat mai mult sau mai puțin de la forma ideală. Abaterea unui semnal sinusoidal de la forma ideală se exprimă cantitativ prin *gradul de distorsiune*. Distorsionarea unui semnal poate fi provocată de sursa care generează semnalul (oscilator, generator de semnal, rețea de c.a., etc.) sau de către diportul parcurs de semnal (amplificator, modulator, etc.), datorită neliniarității caracteristicii de transfer a acestora. Ca urmare, gradul de distorsiune poate caracteriza fie un semnal și prezintă interes din punct de vedere al analizei semnalelor, fie un diport, când prezintă interes din punct de vedere al analizei liniarității diporților. Măsurarea gradului de distorsiune este necesară în special în domeniul transmisiilor radio și de televiziune și telefoniei pentru a asigura sunet și voce de calitate; de asemenea, în sistemele de reglaj automat și în rețelele de curent alternativ, pentru reducerea pierderilor și a perturbațiilor. Câteva valori limită ale gradului de distorsiune admise în practică sunt următoarele:

- 0,01%, pentru generatoarele de semnal utilizate în distorsiometre, analizoare de undă și de spectru precum și în aparate de precizie;
- 0,1...0,5%, pentru aparatura electroacustică Hi-Fi;
- 1...1,5%, pentru canalele de sunet normale din radio-televiziune;
- 2%, pentru echipamentele telefonice;
- 3...5%, nivel tolerabil pentru urechea umană;
- 5...10%, nivel tolerabil pentru rețeaua de curent alternativ.

Deoarece gradul de distorsiune este un parametru global, măsurarea nu permite și o caracterizare calitativă a semnalului prin acest parametru în sensul cunoașterii contribuției fiecărei armonici la valoarea rezultată. Atât timp cât valoarea lui este sub o limită impusă informația este suficientă, dar în activități de proiectare de multe ori este necesară analiza în *domeniul frecvență* a rezidului deformant rezultat ca semnal de ieșire în *domeniul timp*. Pornind de la descompunerea în serie Fourier a unui semnal periodic:

$$u(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (6.1)$$

rezultă descrierea matematică a gradului de distorsiune și a reziduului deformant:

$$d = 100 \frac{U_a}{U} = 100 \frac{\sqrt{U_2^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + \dots + U_n^2}} [\%] \text{ sau } \delta = 100 \frac{U_a}{U_1} = 100 \frac{\sqrt{U_2^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} [\%] \quad (6.2)$$

în care U este tensiunea totală, U_1 este componenta fundamentală, U_a este valoarea efectivă a tensiunii armonicilor ce constituie *reziduul deformant*, U_0 este componenta medie, d și δ , gradul de distorsiune în două modalități de exprimare care dau rezultate foarte apropiate pentru distorsiuni sub 10% iar n este ordinul armonicii.

A. Măsurarea distorsiunilor armonice cu distorsiometrul

Pentru distorsiometru este mult mai simplu de implementat practic relația de calcul a gradului de distorsiune d . Din analiza acestui parametru rezultă că un distorsiometru trebuie să conțină un filtru care să rejeteze fundamentala și un voltmetru de valori efective pentru măsurarea reziduului deformant raportat la valoarea efectivă a semnalului. Plecând de la aceste premise, rezultă schema bloc din fig. 6.1.

Blocul esențial al distorsiometrului îl reprezintă filtrul pentru rejecția fundamentalei, FRF. Acest filtru trebuie să aibă o caracteristică cu o selectivitate ridicată sau o caracteristică trece-sus cu pantă abruptă și cu o atenuare de min. 80 dB (10^{-4}) în ambele variante, fig. 6.2.

Pentru determinarea gradului de distorsiune a unui semnal, acesta este adus în primă etapă în domeniul de măsurare prin blocul de condiționare DTI cu Sw_1 și P_1 pentru indicație maximă (100%) pe funcțiunea U selectată din Sw_3 . În a doua etapă Sw_3 este trecut pe măsurarea reziduului deformant U_a , acesta rezultând din semnalul inițial prin rejecția fundamentalei de către filtrul selectat cu Sw_2 și acordat cu P_2 și P_3 . Indicația rezultată în procente pentru d este adusă în domeniul de afișare optim prin modificarea gamei voltmetrului de ieșire din Sw_4 . În cazul distorsiometrelor semi-automate și automate multe din aceste reglaje nu sunt prezente. Automatizarea principală o constituie acordul FRF pentru minim la ieșire și măsurarea relativă în care tensiunea totală reprezintă referința iar reziduul deformant, eventual amplificat, valoarea măsurată. Deși valoarea efectivă este cea cerută de definiția gradului de distorsiune, totuși multe distorsiometre utilizează măsurarea valorii medii din considerente de simplitate a părții de voltmetru.

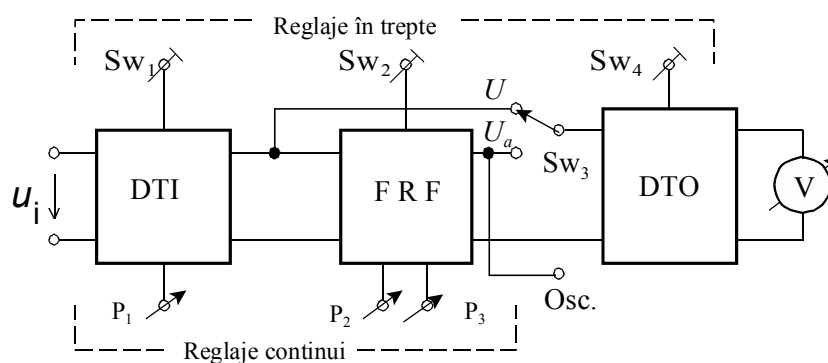


Figura 6.1 Distorsiometrul: schema bloc simplificată.

DTI = condiționar de semnal de intrare; FRF = filtru pentru rejectarea fundamentalei; DTO = condiționar de semnal de ieșire; Sw_1 = selectare gamă de măsură; Sw_2 = selectare bandă de frecvență; Sw_3 = selectare mod de lucru; Sw_4 = selectare gamă grad de distorsiune; P_1 = reglaj de etalonare 100%; P_2, P_3 = acord FRF; $Osc.$ = ieșire reziduu deformant.

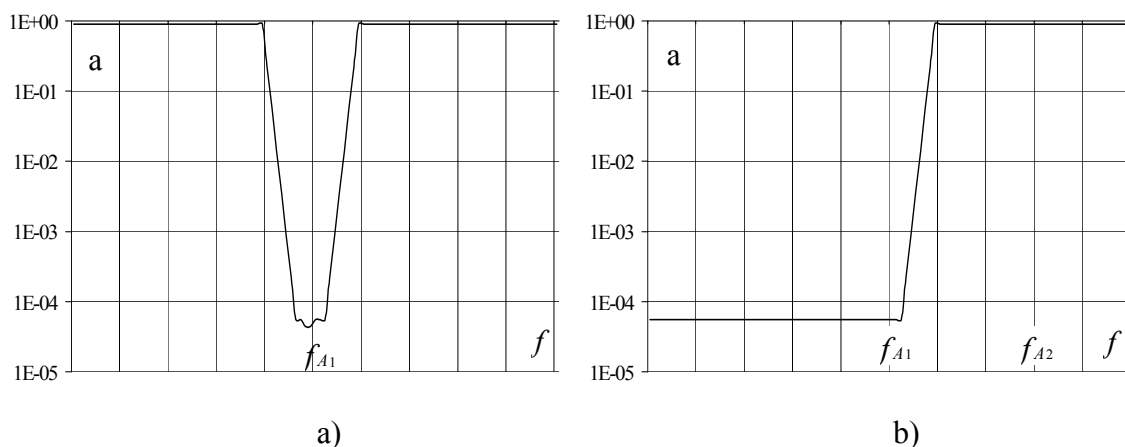


Figura 6.2 Caracteristica filtrului de rejectare a fundamentalei în cazul: a) FOB; b) FTS

Exemplu de distorsiometru - Analizorul de distorsiuni HP 8903E având performanțele:

- frecvența fundamentală: 20 Hz – 100 kHz;
- domeniul de afișare: 0,0001% - 100%;
- intervalul tensiunilor de intrare: 50 mV – 300 V;
- mod de detecție a tensiunii: valoare efectivă;
- distorsiune reziduală: -80 dB sau 15 μ V în banda 20 Hz – 20 kHz.

B. Măsurarea distorsiunilor armonice cu voltmetrul selectiv

Voltmetrul selectiv permite determinarea atât a distorsiunilor armonice cât și a celor de intermodulație prin măsurarea amplitudinilor spectrale descrise de o serie Fourier. În cazul voltmetrului selectiv se pierde informația de fază.

Voltmetrul selectiv necesită o operație de calibrare cu un semnal de referință intern, după

care urmează operația de măsurare propriu zisă, care constă în acordarea aparatului pe frecvența semnalului de măsurat, indicată prin maximul tensiunii și citirea tensiunii și frecvenței corespunzătoare acestui maxim care constituie informație de măsurare. Se măsoară în acest fel valoarea fundamentalei ca frecvență și tensiune. Se face apoi acordul pe un număr posibil de armonici și se calculează valoarea gradului de distorsiune cu relațiile cunoscute. În acest caz, aplicarea relației de calcul pentru δ este posibilă și chiar indicată.

Exemplu de voltmetru selectiv - Analizorul audio NFA-1 al firmei Wandel & Goltermann (Germania) având performanțele:

- banda de frecvență: 15 Hz – 60 kHz cu rezoluție de 0,5 Hz / 30 Hz;
- intervalul tensiunii de intrare: -135 dB - +30 dB;
- nr. de canale: două canale flotante de impedanță 150 Ω , 300 Ω , 600 Ω și 100 k Ω ;
- raportul armonicilor intrinseci (datorate aparatului): > 80 dB;
- erori limită la măsurarea raportului între armonici: < 0,25%

C. Măsurarea distorsiunilor armonice cu analizorul de spectru

Analizorul de spectru măsoară, ca și voltmetrul selectiv, în domeniul frecvență, dar spre deosebire de acesta el dă densitatea spectrală de putere definită de relația:

$$S(f_0) = \left. \frac{dP(f)}{df} \right|_{f=f_0} \quad (6.3)$$

Ceea ce se poate măsura practic este puterea mediei într-o bandă de frecvență B_f , care se apropie de densitatea spectrală cu cât banda este mai mică. Puterea medie a unui semnal $x(t)$ într-o bandă B_f , centrată pe f_0 , va fi:

$$P(f_0, B_f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |x_{B_f}(t)|^2 dt \quad (6.4)$$

Această putere poate fi măsurată de un aparat care are facilități de acordare pe frecvența f_0 cu o lățime de bandă B_f urmată de o detecție pătratică și integrare sau filtrare a componentei medii. Modul de realizare a acestor operații este divers rezultând și diverse tipuri de analizoare de spectru: analizorul în timp real cu filtre paralele, analizorul cu filtru acordabil, analizorul heterodină, analizorul FFT (Fast Fourier Transform), etc. Un semnal distorsionat examinat în domeniul timp cu osciloscopul va avea o imagine ca în fig. 6.3 a), curba cu linie plină, iar analiza în domeniul frecvență va avea ca rezultat o imagine pe ecranul analizorului ca cea din fig. 6.3 b). Dacă în domeniul timp componentele semnalului

distorsionat (figurate cu linii punctate) s-ar putea obține printr-o filtrare adecvată, iar în domeniul frecvență toate componentele de interes apar în rezultatul afișat.

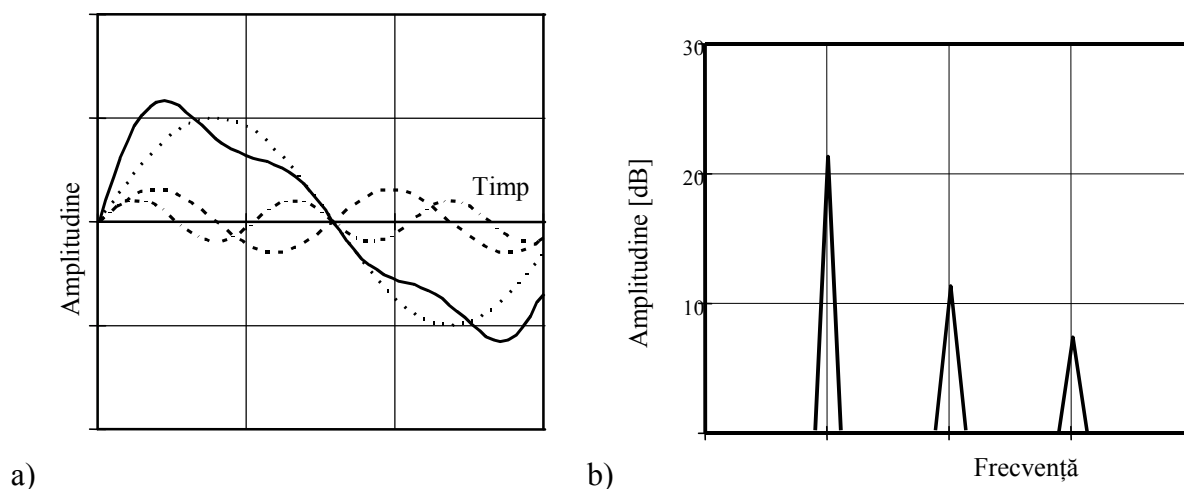


Figura 6.3 Reprezentarea unui semnal distorsionat în domeniul: a) timp; b) frecvență.

Cel mai întâlnit analizor este cel heterodină cu schema bloc din fig. 6.4. El redă pe un afișaj panoramic (ecran de tub catodic) spectrul semnalului de intrare exprimat în dBm cu o rezoluție în frecvență cuprinsă între 1 Hz și 1 kHz, dependent de banda de frecvență în care se face caracterizarea și de viteza de explorare.

Semnalul este adus în domeniul de lucru al mixerului prin intermediul atenuatorului de intrare AT_x . Câștigul mixerului M se reglează prin schimbarea nivelului semnalului oscilatorului local, oscilator comandat în tensiune – OCT, cu ajutorul atenuatorului referinței, AT_r . Frecvența acestui semnal este comandată de către baza de timp pentru a obține calibrarea axei X în frecvență. Rezultatul mixării: $U_M = K_M K_{AT_x} K_{AT_r} U_x U_r$, dispus în două benzi de frecvență, este trecut prin filtrul de frecvență intermediară, FI, filtrul trece-bandă (FTB) cu caracteristică cunoscută (filtru gaussian¹) și lățimea de bandă reglabilă (BW) cu care se selectează banda corespunzătoare și rezoluția în frecvență: $f_{OL} - f_x$. Urmează o detecție pătratică și filtrarea video, rezultând o tensiune de genul semnalului video (variabilă axat pe o componentă continuă) dată de o relație de forma:

$$U_{0FTJ} = \frac{1}{T} \int_T K_{DP} (K_M K_{AT_x} K_{AT_r} K_{FTB} U_x U_r)^2 dt$$

¹ $|H(\omega)| = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega - \omega_a}{\sigma}\right)^2\right] = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega - \omega_a}{\omega_B}\right)^2 \ln 2\right]$ în care ω_a este pulsația de acord iar $\omega_B = |\omega - \omega_B|$ este lățimea de bandă la -3 dB.

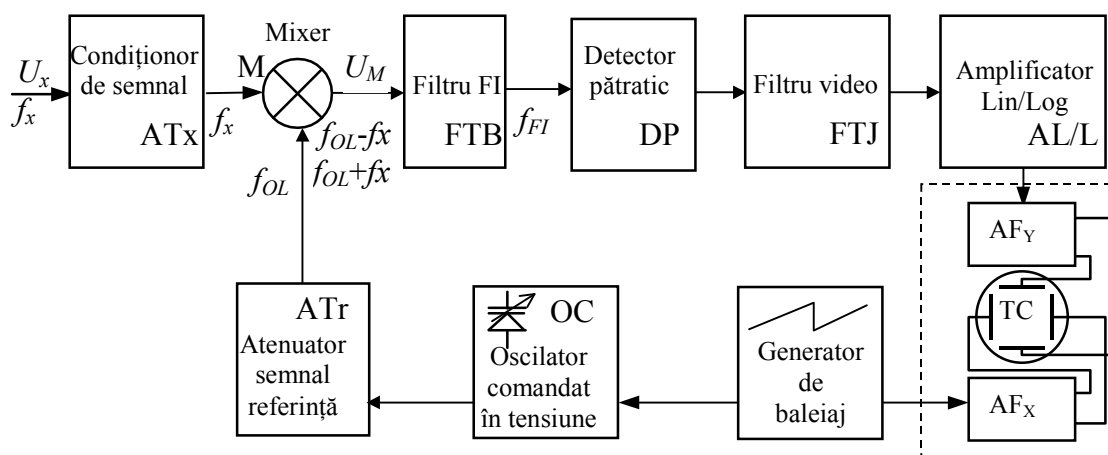


Figura 6.4 Analizorul de spectru superheterodină cu simplă schimbare de frecvență.

Acest semnal este amplificat liniar sau logaritmic și este aplicat intrării Y a blocului de afișaj, un osciloscop X-Y. Intrarea X este un semnal liniar variabil provenind tot de la generatorul de baleiaj ce comandă frecvență oscilatorului local. Se obține astfel $X = K_B f_{OL}$ iar reprezentarea $Y(X)$ devine $U_{Bf}^2(f)$.

Principalii parametri ai analizoarelor de spectre sunt:

- banda de frecvență până la zeci de GHz;
- gama dinamică măsurată: 100 - 140 dB;
- gama dinamică afișată: 60 - 100 dB;
- rezoluția în frecvență: 1...30 Hz;
- precizia pe orizontală: min. 0,1%;
- precizia pe verticală: 0,1 - 1 dB;
- rezistența de intrare: 50 Ω , mai rar 60 sau 75 Ω ;
- tensiunea maximă admisibilă: 1...10 Vc.a., 50 Vc.c. tipic.

Cu ajutorul analizorului este posibilă măsurarea distorsiunilor armonice și de intermodulație, a gradului de modulație în amplitudine și frecvență, a performanțelor de selectivitate și zgomot, etc. Reprezentarea este de regulă în mod logaritmic față de puterea referință de 1 mW/50 ohmi (în dBm) sau față de tensiunea de 1 μ V (dB μ). Reprezentarea liniară este posibilă pentru semnale cu componente spectrale foarte apropiate ca valoare sau nivel al semnalului aproape constant. Utilizarea analizorului de spectru solicită operatorului o cunoaștere aprofundată a principiului de funcționare al acestuia și rolului elementelor de reglaj pentru referință, lățime de bandă, viteză de explorare, etc. Corecțiile aplicate rezultatelor brute sunt explicitate prin note de aplicație (ex. Hewlett Packard, AN 150:

Spectrum Analyzer Basics; AN = Application Note, eng.) sau prin programe software.

Pentru a măsura gradul de distorsiune δ cu analizorul de spectru trebuie să se facă trecerea în format liniar a valorile în format logaritmice, valori de genul celor din fig. 6.3 citite pe ecranul analizorului de spectru. Relația 6.2 de calcul a coeficientului δ poate deveni de forma:

$$\delta = 100 \sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{A_3}{A_1}\right)^2 + \dots} = 100 \sqrt{10^{0,1(A_2-A_1)_{dB}} + 10^{0,1(A_3-A_1)_{dB}} + \dots} \quad (6.5)$$

relație ce poate fi aplicată cu ușurință în practică prin reglarea referinței și citirea directă a diferenței în dB față de fundamentală pentru toate armonicile semnificative. Pentru o sensibilitate de 10 dB/div., diferențele în diviziuni reprezintă valorile exponenților din relația 6.5. Pentru exemplul figurat în 6.3, când fundamentală și cele două armonici prezente au amplitudinile 1 V, 0,3 V și respectiv 0,2 V ($\delta = 36\%$), gradul de distorsiune măsurat pe imaginea redată de analizor este: $\delta = 100 \sqrt{10^{-1,1} + 10^{-1,4}} = 34,5\%$.

MĂSURAREA DISTORSIUNILOR DE INTERMODULAȚIE

Măsurarea distorsiunilor de intermodulație se poate face cu aparate dedicate acestui scop numite intermodulometre, cu voltmetrul selectiv sau cu analizoarele de spectru. Amestecul celor două semnale de intrare se poate realiza cu rețele sumatoare pasive, cu rezistențe sau cu transformatoare, sau cu rețele sumatoare active. La ieșirea circuitului de amestec nu trebuie să rezulte componente de intermodulație măsurabile. Pentru exemplificare, în fig. 6.5 sunt reprezentate două tipuri de rețele rezistive de amestec: în stea și în punte.

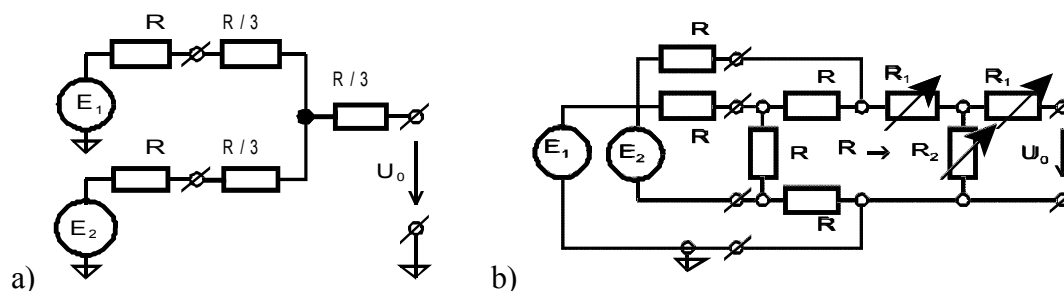


Figura 6.5 Obținerea semnalului de testare a distorsiunilor de intermodulație prin sumare cu rețea rezistivă: a) în stea; b) în punte.

În fig. 6.6 este figurat rezultatul sumării reprezentat în domeniul timp și în domeniul frecvență. Se recunoaște forma semnalului de “bătăi” rezultat din sumarea a două semnale pur sinusoidale, de amplitudini egale și diferite ca frecvență, fără a avea armonici comune. În spectru

nu apar alte componente în întreg domeniul măsurabil.

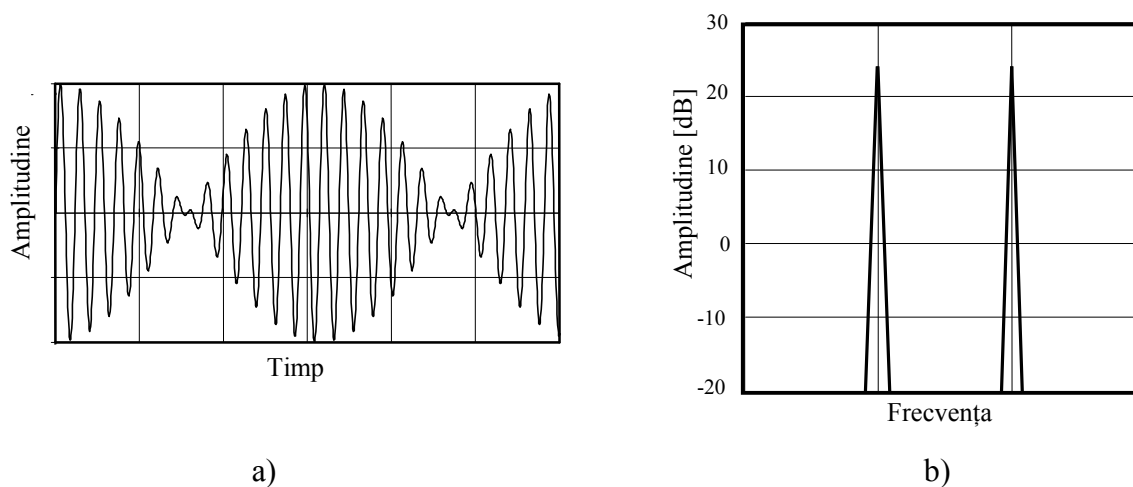


Figura 6.6 Semnalul de test a distorsiunilor de intermodulație vizualizat cu: a) osciloscopul; b) analizorul de spectru.

Dintre metodele existente, prezintă interes cea a tonurilor egale datorită simplității și posibilității de aplicare atât cu voltmetru selectiv cât și cu analizorul de spectru. Această metodă constă în aplicarea simultană a două semnale cu amplitudinile egale ($U_2 = U_1$), de valoare jumătate din valoarea tensiunii nominale de intrare și de frecvențe care să satisfacă relația $f_2 - f_1 = 71...400$ Hz. Se consideră ca măsură a distorsiunilor de intermodulație distorsiunile de ordin 2 și superior până la maxim 5.

Măsurarea cu voltmetrul selectiv presupune determinarea componentelor cele mai importante ca valoare și calculul distorsiunilor de intermodulație funcție de ordinul lor:

$$D_{ic2[\%]} = 100 \frac{U_{f_2-f_1} + U_{f_1+f_2}}{U_1 + U_2} ; \quad D_{ic3[\%]} = 100 \frac{U_{2f_2-f_1} + U_{2f_1-f_2} + U_{2f_2+f_1} + U_{2f_1+f_2}}{U_1 + U_2} \quad (6.6)$$

Măsurarea devine laborioasă cu voltmetrul selectiv dacă se extinde asupra distorsiunilor de ordin superior lui 3. De exemplu, pentru $f_1 = 900$ Hz și $f_2 = 1300$ Hz rezultă următoarele frecvențe ale componentele de intermodulație posibile:

- de ordin 2: 400 și 2200 Hz;
- de ordin 3: 500, 1700, 3100 și 3500 Hz;
- de ordin 4: 800, 1400, 3000, 4000, 4400, 4800 Hz;
- de ordin 5: 100, 2100, 2300, 4300, 4900, 5300, 5700, 6100 Hz.

Măsurarea cu analizorul de spectru devine mai simplă deoarece componentele de intermodulație apar într-un singur ecran la o singură explorare a spectrului de frecvență între zero și frecvența maximă a intermodulației ce este luată în considerație. Rezoluția cu care se trasează

densitatea spectrală de putere trebuie să fie mai bună decât ecartul de frecvență minim dintre componentele de intermodulație pentru a le putea discerne (mai bună de 100 Hz: în cazul prezentat 30 Hz sau 10 Hz). Aprecierea se face prin verificarea situației valorilor sub anumite limite care devin tot mai reduse cu creșterea ordinului. În exemplul figurat în fig. 6.7, aceste limite sunt - 31 dB pentru ordinul 2, - 45 dB pentru ordinul 3, - 55 dB pentru ordinul 4 și - 65 dB pentru ordinul 5 față de valoarea echivalentă a celor două fundamentale (cu 3 dB mai mare decât a unui singur semnal).

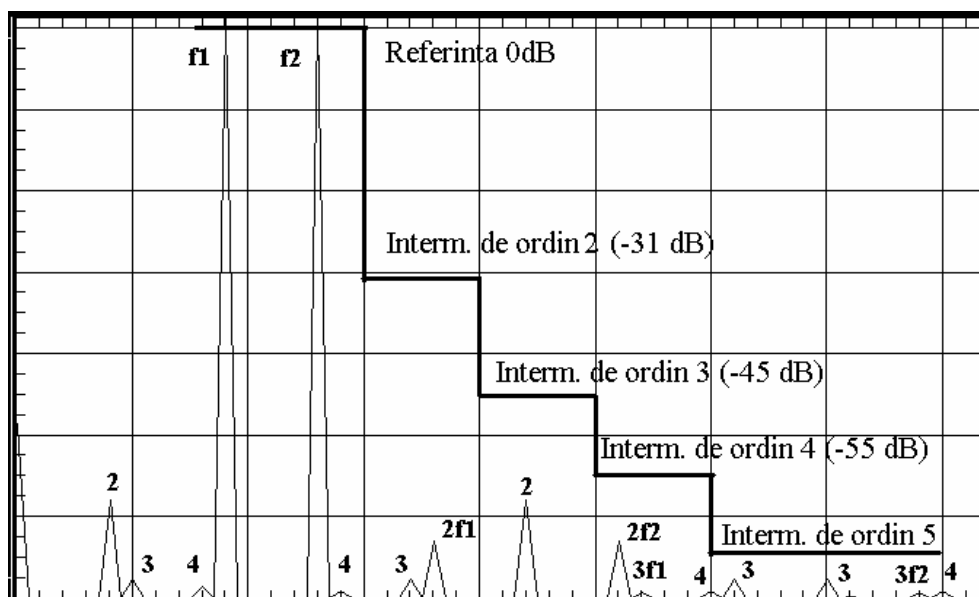
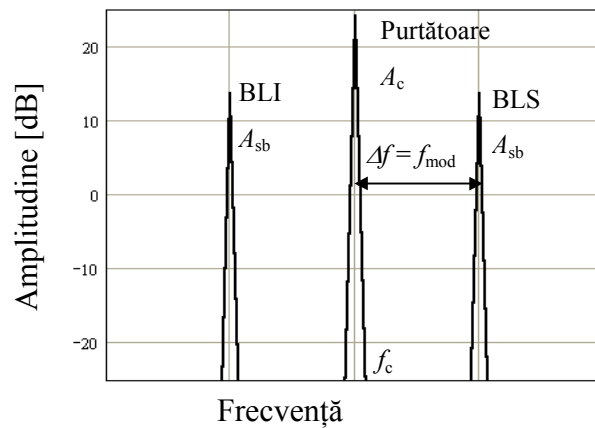


Figura 6.7 Imaginea rezultată pe ecranul analizorului de spectru la testarea liniarității unui diport cu două tonuri de $f_1 = 900$ și $f_2 = 1300$ Hz.

În imaginea dată sunt prezentate aceste limite, cele două fundamentale și o parte din produsele de intermodulație. Sunt precizate și armonicile doi și trei ale celor două fundamentale ($2f_1 = 1800$ Hz, $3f_1 = 2700$ Hz respectiv $2f_2 = 2600$ Hz și $3f_2 = 3900$ Hz) care nu trebuie să fie confundate cu produsele de intermodulație.

MĂSURAREA GRADULUI DE MODULAȚIE

Caracterizarea unui semnal modulat este posibilă în mai multe moduri: cu osciloscopul, cu modulometrul sau analizorul de modulație, cu voltmetrul selectiv și cu analizorul de spectru. Măsurarea cu analizorul de spectru este atractivă comparativ cu cea bazată pe voltmetrul selectiv datorită plusului de informație pe care îl oferă în aceeași imagine: frecvența și amplitudinea purtătoarei, f_c și A_c , frecvența și amplitudinea semnalului (semnalelor) de modulare, f_{mod} și A_{sb} , fig. 6.8.



$$\frac{A_{sb}}{A_c} = 10^{\frac{(A_{sb})_{dB} - (A_c)_{dB}}{20}} = 10^{\frac{-10}{20}} = 0,31$$

$$m_{[\%]} = 62\%$$

Figura 6.8 Imagine pe ecranul analizorului de spectru la măsurarea gradului de modulație în amplitudine ($m = 60\%$): BLI = banda laterală inferioară; BLS = banda laterală superioară.

Rezoluția filtrului de frecvență intermediară cu care se face explorarea în frecvență trebuie să fie mult mai mică decât frecvența modulatorie: $BW = 100$ Hz pentru $f_{mod} = 1$ kHz, ceea ce va avea ca rezultat un timp mai lent de înregistrare a trasei (câteva secunde). Indicele de modulație rezultă din relația de calcul:

$$m_{[\%]} = \frac{2A_{sb}}{A_c} \times 100 \quad (6.7)$$

Calculul acestui raport trebuie să se facă ținând cont de reprezentarea spectrului, ce poate fi în dB. Analizoarele de spectru moderne calculează automat $m_{[\%]}$ pe funcțiunea %AM.

LUCRARI DE EFECTUAT IN LABORATOR**a) Măsurarea gradului de distorsiune cu distorsiometrul**

1) Se măsoară gradul de distorsiune pentru mai multe surse de semnal. Datele experimentale se trec în tabelul nr.1.

Tabelul nr. 1

Nr. crt.	Sursa de semnal	U [V]	f [kHz]	D [%]	Observații
1					
2					
⋮					

2) Pentru una din sursele de semnal se măsoară gradul de distorsiune în funcție de puterea de ieșire la frecvența de 1 kHz. Puterea de ieșire se măsoară prin metoda wattmetrului de ieșire ($P = U^2/R$, U - tensiunea de ieșire măsurată cu un voltmetru, R - rezistența de sarcină). Datele experimentale se trec în tabelul nr.2 și se trasează grafic curba $D = f(P)$.

Tabelul nr. 2

Nr. crt.	U [V]	R [Ω]	P [mW]	D [%]	Observații
1					
2					
⋮					

b) Măsurarea gradului de distorsiune cu voltmetru selectiv Se repetă măsurarea gradului de distorsiune cu ajutorul voltmetrului selectiv. Datele experimentale se trec în tabelul nr.3 și se trasează grafic spectrul semnalului (în abscisă frecvența la scară liniară, iar în ordonată, amplitudinile armonicilor la scară logaritmică, utilizându-se ca referință amplitudinea armoniciei de grad maxim, posibil de măsurat).

Tabelul nr. 3

Ordinul armoniciei	f [kHz]	U [V]	U_m [V]	U'_m [dB]	Observații
1					
2					
⋮					

c) Măsurarea puterii limitată de distorsiunile armonice

Măsurarea distorsiunii se efectuează conform pct. a.1) iar puterea se măsoară conform pct. a.2). Datele experimentale se trec în tabelul nr.4. Se trasează grafic curbele $D = f(P)$ și $D = f(f)$.

Tabelul nr.4

Nr. crt.	U [V]	P [mW]	D(P) [%]	Observații	f [kHz]	D(f) [%]	Observații
1							
2							
⋮							

d) Măsurarea gradului de distorsiune cu analizorul de spectru

Pentru un generator de semnal programabil, se măsoară gradul de distorsiune folosind drept analizor de spectru funcția FFT a unui osciloscop digital. Frecvența va fi 1 kHz, iar formele de undă vor fi: dreptunghiulară, triunghiulară și sinusoidală. Gradul de distorsiune se calculează cu relația 6.5.

Datele experimentale se trec în tabelul nr. 5.

Tabelul 5

Nr. crt.	A2-A1	A3-A1	A4-A1	A5-A1	A6-A1	A7-A1	D [%]	Observații
1.								semnal dreptunghiular
2.								semnal triunghiular
3.								semnal sinusoidal