

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

Facultatea de Inginerie Electrică

Ceangă Emil, Aiordăchioaie Dorel, Cernega Dana

# Semnale, Circuite și Sisteme

## -Îndrumar de laborator-

Ediția I, Galați - 1998

## *Prefață*

Lucrarea se adresează studenților de la secția Electronică Aplicată, anii II și III. Poate fi folosită în întregime și de studenții de la secția Electronică, din cadrul Colegiului Universitar Tehnic, la disciplina "*Semnale, Circuite și Sisteme pentru Telecomunicații*".

Ca organizare, îndrumarul de laborator urmărește programa analitică actuală a disciplinei Semnale, Circuite și Sisteme și se dorește a fi un material în parcurgerea lucrărilor practice.

Prima parte a îndrumarului cuprinde 7 lucrări, care sunt efectuate în semestrul patru, unde se studiază - cu preponderență - aspecte de bază privitoare la modelarea și procesarea semnalelor.

Partea a doua cuprinde 13 lucrări, efectuate în semestrul 5, anul III de studiu, și este conectată - mai ales - la aspectele de bază ale circuitelor electrice, privite ca sisteme dinamice.

Fiind la prima ediție, toate propunerile și observațiile trimise autorilor vor fi avute în vedere la următoarea apariție.

Galați, 15 Ianuarie 1998

Autorii

## Cuprins

<b>PARTEA I - Semnale</b>	<b>2</b>
1. Prezentarea aparaturii din laborator	3
2. Semnale aleatoare. Determinarea funcției de repartiție a probabilității (SA)	7
3. Analiza armonică a semnalelor periodice (SP)	11
4. Semnale modulate în amplitudine (MA)	16
5. Semnale modulate în frecvență (MF)	19
6. Modulația de produs (MP)	23
7. Modulația impulsurilor în amplitudine (MIA)	27
 <b>PARTEA a-II-a -Circuite și Sisteme</b>	 <b>33</b>
1. Filtre trece jos de ordinul unu	35
2. Elemente derivatoare la limită cauzale și cauzale	39
3. Circuite integratoare cu amplificatoare operaționale	43
4. Filtre trece jos de ordinul doi	47
5. Conversia: caracteristica logaritmică câștig-frecvență în funcție de transfer	51
6. Conversia: funcție pondere în funcție de transfer	53
7. Sisteme de fază neminimă	56
8. Filtru activ trece-jos cu AO, de tip Sallen & Key, de ordinul doi	59
9. Filtru activ trece-jos cu AO, cu reacție multiplă, de ordinul trei	63
10. Filtru activ trece-bandă cu AO	67
11. Analiza sistemelor analogice prin simulare numerică	71
12. Simularea numerică a procesării semnalelor analogice cu SIMULINK	77
13. Analiza sistemelor analogice în planul fazelor	79
 Anexa 1 - Schema electrică a generatorului de zgomot (pentru L2, P I)	 83
Anexa 2 - Valorile funcțiilor Bessel de speța întâi (pentru L5, P I)	85
Anexa 3 - Programul sursă în cod Matlab (pentru L6, P II)	97
 Bibliografie	 99

Partea I

# Semnale

## Lucrarea nr.1

## PREZENTAREA APARATURII DIN LABORATOR

**1.1 Obiectivul lucrării:** prezentarea aparatelor de măsură din laboratorul de Semnale, Circuite și Sisteme, a mărimilor fizice mai des utilizate în analiza spectrală și a particularităților privind măsurarea cu milivoltmetrul selectiv.

**1.2 Unități de transmisiune** Variația amplitudinii unui semnal se poate aprecia prin mărimile logaritmice **deciBel** și **Neper**, acestea fiind denumite și unități de transmisiune. În acest sens, se definește generatorul normal, prezentat în figura 1.1. Nivelul absolut de putere,  $n_{ap}$ , este:

$$n_{ap} = 10 \log \left( \frac{P}{P_0} \right) [dB] \quad n_{ap} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) [Np] \quad (1.1)$$

în care  $P_0=1\text{mW}$ , dacă puterea este activă și  $P_0=1\text{mVA}$ , dacă puterea este aparentă.

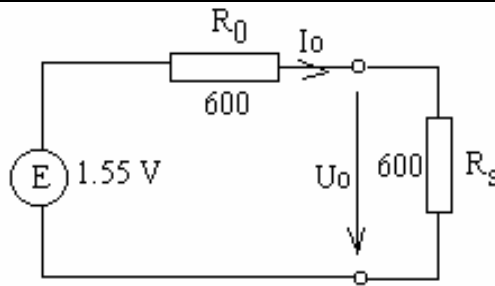


Figura 1.1 Definirea generatorului normal de semnal

Nivelurile absolute de tensiune și curent,  $n_{aU}$ ,  $n_{aI}$ , se definesc cu relațiile:

$$n_{au} = 20 \log \left( \frac{U}{U_0} \right) [dB] \quad n_{au} = \ln \left( \frac{U}{U_0} \right) [Np] \quad (1.2)$$

$$n_{aI} = 20 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) [dB] \quad n_{aI} = \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) [Np] \quad (1.3)$$

Când mărimile de referință diferă de valorile generatorului normal, se obțin nivelurile relative de curent, tensiune și putere,  $n_{rp}$ ,  $n_{ru}$ ,  $n_{rI}$ , definite prin relațiile:

$$n_{rp} = 10 \log \left( \frac{P}{P_0} \right) [dB] \quad (1.4)$$

$$n_{ru} = 20 \log \left( \frac{U}{U_0} \right) [dB] \quad (1.5)$$

$$n_{rI} = 20 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) [dB] \quad (1.6)$$

În relațiile de mai sus s-au considerat valori efective, dar valorile finale ale mărimilor logaritmice rămân neschimbate dacă se utilizează valori ale amplitudinilor.

Fie  $H(j\omega)$  funcția de transfer a unui circuit electronic, cu tensiunea de ieșire  $y(t)$ , având amplitudinea  $Y$ , și tensiunea sinusoidală de intrare  $u(t)$ , de amplitudine  $U$  și pulsație  $\omega$ . Nivelul relativ intrare-ieșire de tensiune este:

$$n_u = 20 \log\left(\frac{Y}{U}\right) = 20 \log(|H(j\omega)|) \quad [dB] \quad (1.7)$$

Dacă  $Y > U$ , atunci  $n_u > 0$ , circuitul amplifică și se spune că se realizează o amplificare de  $n$  dB. În caz contrar, circuitul atenuează cu  $(-n_u)$  dB.

**1.3 Voltmetrul selectiv** Amplitudinile componentelor armonice ale unui semnal periodic se pot măsura direct, cu ajutorul unui aparat denumit (mili)voltmetru selectiv. Acesta este, în esență, un analizor de spectru, în care componentele spectrale se determină consecutiv, prin acordarea (mili)voltmetrului selectiv pe frecvența fiecărei armonici. Funcționarea analizorului este întrucâtva asemănătoare funcționării unui radioreceptor, care selectează emisiunea dorită, fiind prevăzut cu circuite selective. Deosebirea principală constă în faptul că banda de trecere a analizorului este mult mai mică decât banda de trecere a unui receptor radio, deoarece nu trebuie să se permită decât "trecerea" unei singure componente. Altă deosebire este că amplificarea analizorului este constantă și cunoscută, astfel încât componenta continuă obținută după detecție este direct proporțională cu amplitudinea componentei măsurate.

Ca și la un receptor radio, la milivoltmetrul selectiv (MVS) există posibilitatea de a varia frecvența componentei selectate și, prin urmare, există un reglaj și o scală corespunzătoare de frecvență. În locul amplificatorului de audiofrecvență și al difuzorului existent în radioreceptoare, analizorul este prevăzut cu un amplificator de curent continuu și un instrument de măsură etalonat, fie direct în unități de tensiune (mV, V), fie în unități logaritmice (dB, Np). Pentru a realiza aceeași selectivitate, indiferent de frecvența componentei analizate, voltmetrele selective sunt construite, în cele mai multe cazuri, pe baza principiului receptorului superheterodină (cu o schimbare de frecvență). Schema bloc simplificată este prezentată în figura 1.2.

La o intrare a etajului schimbător de frecvență (SF) se aplică semnalul de analizat, care conține - între altele - componenta care ne interesează, de amplitudine  $U_s$  și frecvență  $f_s$ , și, la cealaltă intrare, un semnal sinusoidal generat de oscilatorul (OL), de amplitudine  $U_h$  și frecvență  $f_h$ . La ieșire se obține un semnal având frecvența egală cu diferența celor două frecvențe  $f_i = f_h - f_s$  și cu amplitudinea proporțională cu produsul amplitudinilor celor două oscilații  $U_i = K U_s U_h$ . Acest semnal este amplificat de amplificatorul de frecvență intermediară (AFI), acordat pe  $f_i$ .

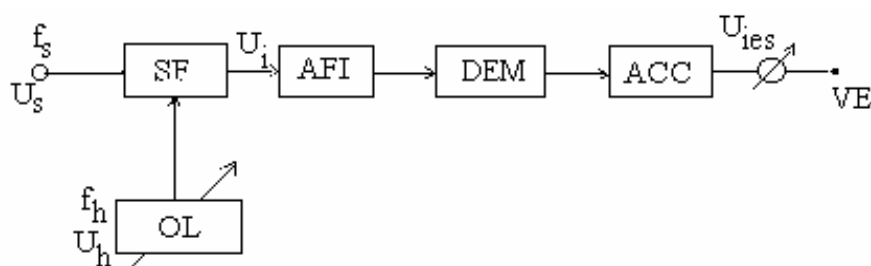


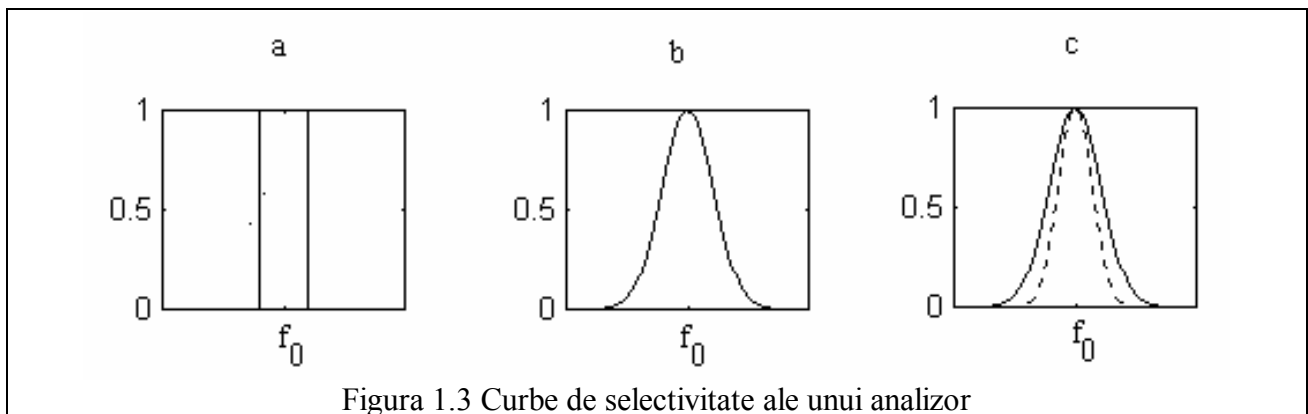
Figura 1.2 Schema bloc a unui voltmetru selectiv

Orice altă componentă de frecvență  $f_s'$  va produce la ieșirea schimbătorului o frecvență  $f_i' = f_h - f_s' \neq f_i$ , care va fi atenuată de circuitele AFI. Deoarece  $U_h = \text{const}$ ,  $U_i$  va fi proporțională cu  $U_s$  și, după amplificare și detecție, tensiunea continuă rezultată  $U_{ies}$  este aplicată unui voltmetru de curent continuu. De asemenea, scala oscilatorului local este etalonată direct în valori ale frecvenței componente analizate  $f_s$ . Pentru a "citi" altă componentă, se variază  $f_h$ , astfel încât, să se obțină aceeași frecvență intermediară  $f_i$ .

Teoretic, curba de selectivitate a circuitelor acordate ar trebui să fie curba unui filtru trece bandă ideal, avînd o bandă de trecere  $B$  cât mai îngustă. Această curbă reprezintă raportul între tensiunea la ieșire  $U_{ies}$ , atunci când se aplică o singură componentă sinusoidală de o frecvență oarecare  $f$ , analizorul fiind acordat pe  $f_s$ , și tensiunea la ieșire  $U_{ies}$  când se aplică un semnal sinusoidal de aceeași amplitudine, dar de frecvență  $f_s$ , analizorul rămânând în continuare acordat pe  $f_s$ .

Când componenta ce se măsoară are o frecvență ce diferă cu mai mult de  $\pm B/2$  de frecvența pe care este acordat analizorul, la ieșire indicația este nulă. Mărimea  $B$  reprezintă rezoluția analizorului, adică ecartul minim posibil (teoretic) între două componente alăturate, astfel încât analizorul să le poată separa. Când componentele sunt mai dese decât permite rezoluția, atunci tensiunea de la ieșire nu mai este proporțională cu amplitudinea unei singure componente. Cum detectorul este de obicei un detector de vîrf, indicația  $U_{ies}$  va reprezenta suma amplitudinilor componentelor care există în intervalul  $f_s - \frac{B}{2}$ ,  $f_s + \frac{B}{2}$ , și nu amplitudinea componente de frecvență  $f_s$  pe care este acordat milivoltmetrul.

În practică, curba ideală de selectivitate (figura 1.3.a), nu este realizată decât aproximativ și forma tipică a curbei de selectivitate a unui analizor este cea din figura 1.3-b. Aici, definirea benzii de frecvențe  $B$  impune stabilirea unei convenții referitoare la atenuarea admisă față de valoarea maximă în bandă. Se poate defini banda la 3dB, notată  $B_{3dB}$ , ca diferența frecvențelor la care valoarea de la ieșire scade la 0,707 din valoarea maximă.



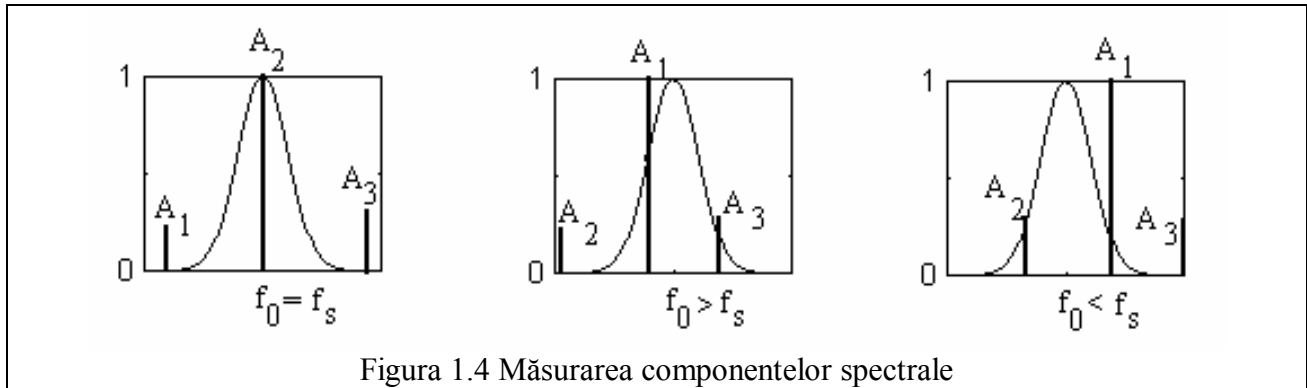
În același timp, examinând forma curbei din figura 1.3-b, rezultă că, pentru ca amplitudinea indicată să fie cea reală, este absolut necesar ca citirea să se facă doar în momentul în care componenta de măsurat a fost "adusă" la valoarea maximă, modificându-se fin acordul analizorului (al oscilatorului OL).

Operația este similară acordării unui receptor pentru a recepționa un post, cu ajutorul unui indicator optic de acord sau pe baza intensității auzului. În caz contrar, indicația instrumentului analizorului este mai mică decât cea reală și depinde de dezacordul (depărtarea) față de punctul de maxim.

Fie, de exemplu, de măsurat trei componente  $A_1$ ,  $A_2$  și  $A_3$ . În figura 1.3, se prezintă următoarele cazuri:

- corect (stânga), în care milivoltmetrul este acordat pe frecvența  $f_s$  a semnalului de măsurat;
- incorect (centru și dreapta) în care milivoltmetrul nu măsoară corect nici una din componentele dorite, fiind acordat pe altă frecvență.

Deci, citirea corectă a nivelului unei componente se face numai atunci când se obține maximumul indicatorului de nivel.



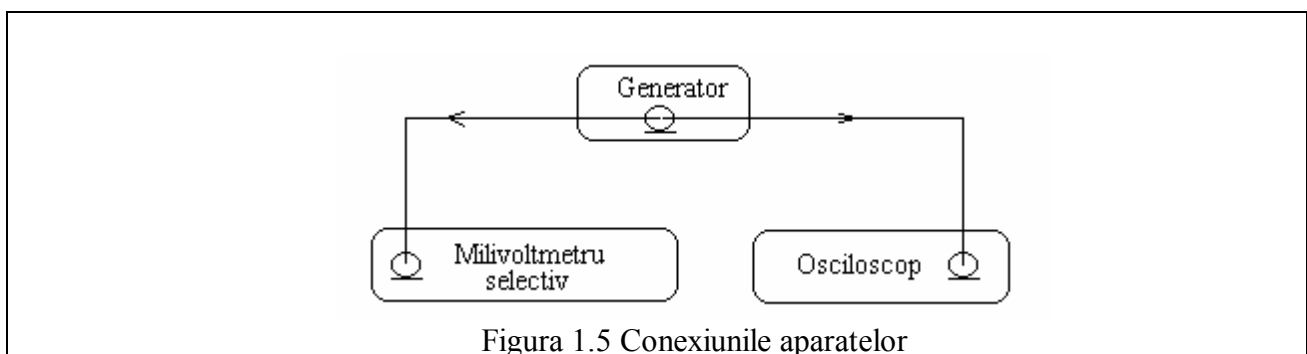
**1.4 Coeficientul de distorsiuni armonice** De multe ori ne interesează cât de mult diferă un semnal periodic nesinusoidal de semnalul periodic sinusoidal pur, distorsiuni datorate neliniarităților existente în cicuit. Ca o măsură a acestor distorsiuni se folosește mărimea numită coeficient de distorsiuni armonice  $\delta$ , definită prin:

$$\delta = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} \quad (1.8)$$

## 1.5. Desfășurarea lucrării

1.5.1. Se fac conexiunile după figura 1.5, pentru măsurarea nivelului de tensiune a unui semnal periodic sinusoidal, la diferite frecvențe.

1.5.2. Se aplică un semnal sinusoidal, de amplitudine între 0.1...1V și frecvența în intervalul 10KHz...100KHz. Se măsoară în domeniul timp (cu osciloscopul) și în domeniul frecvență (cu voltmetrul selectiv) parametrii semnalului: amplitudine și frecvență. Se compară valoarea indicată de milivoltmetrul selectiv cu valoarea calculată indirect cu osciloscopul. Care dintre cele două valori este mai aproape de realitate ?



1.5.3. Se măsoară componentele semnalului sinusoidal cu frecvența  $f_0=10\text{KHz}$ , la frecvențele  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$ ,...  $7f_0$ . Se calculează coeficientul de distorsiuni armonice.

## Lucrarea nr.2

### SEMNALE ALEATOARE

**2.1 Obiectivul lucrării:** determinarea mediei și dispersiei unui zgomot electric, modelat ca un semnal aleator cu repartiție normală (gaussiană).

### 2.2 Noțiuni teoretice

Un *proces aleator*, este definit ca o funcție de două variabile:

$$X(k, t) = X^{(k)}(t) \quad (2.1)$$

unde  $t$  ia valori pe axa reală a timpului iar  $k$  ia valori întregi și reprezintă "realizarea" procesului guvernat de legi probabilistice. În figura 2.1 se prezintă două realizări ale unui proces aleator,  $X^{(k)}(t)$ ,  $k=1,2$ . Realizările particulare, la momentele  $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$  se mai numesc și serii aleatoare.

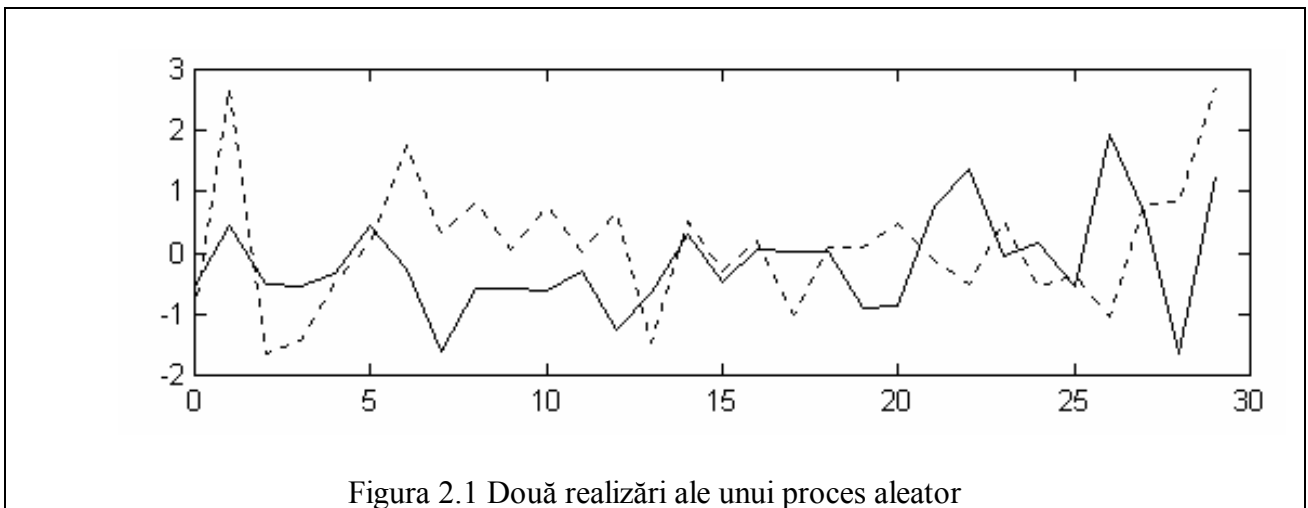


Figura 2.1 Două realizări ale unui proces aleator

Pentru a caracteriza proprietățile statistice ale semnalelor aleatoare se folosește *funcția de repartiție* și *funcția densitate de probabilitate*. Funcția de repartiție sau funcția de repartiție a probabilității de ordinul unu este:

$$F_1(x_1, t_1) = P\{X(t_1) \leq x_1\} \quad (2.2)$$

Funcția densitate de probabilitate este:

$$w_1(x_1, t_1) = \frac{\partial F_1(x_1, t_1)}{\partial x_1} \quad (2.3)$$

În cadrul semnalelor aleatoare, o clasă importantă este dată de semnalele staționare, semnale ale căror proprietăți sunt invariante la schimbarea arbitrară a originii timpului:

$$w_1(x_1, t_1) = w_1(x_1, t_2) = w_1(x_1) \quad (2.4)$$

Semnalele aleatoare nu pot fi cunoscute în detaliu (în sensul determinării exacte a valorii instantanee viitoare). Pentru caracterizarea lor se estimează valori medii statistice de diferite ordine, cum sunt valoarea medie, valoarea pătratică medie și dispersia.

### 2.3 Distribuția normală (gaussiană)

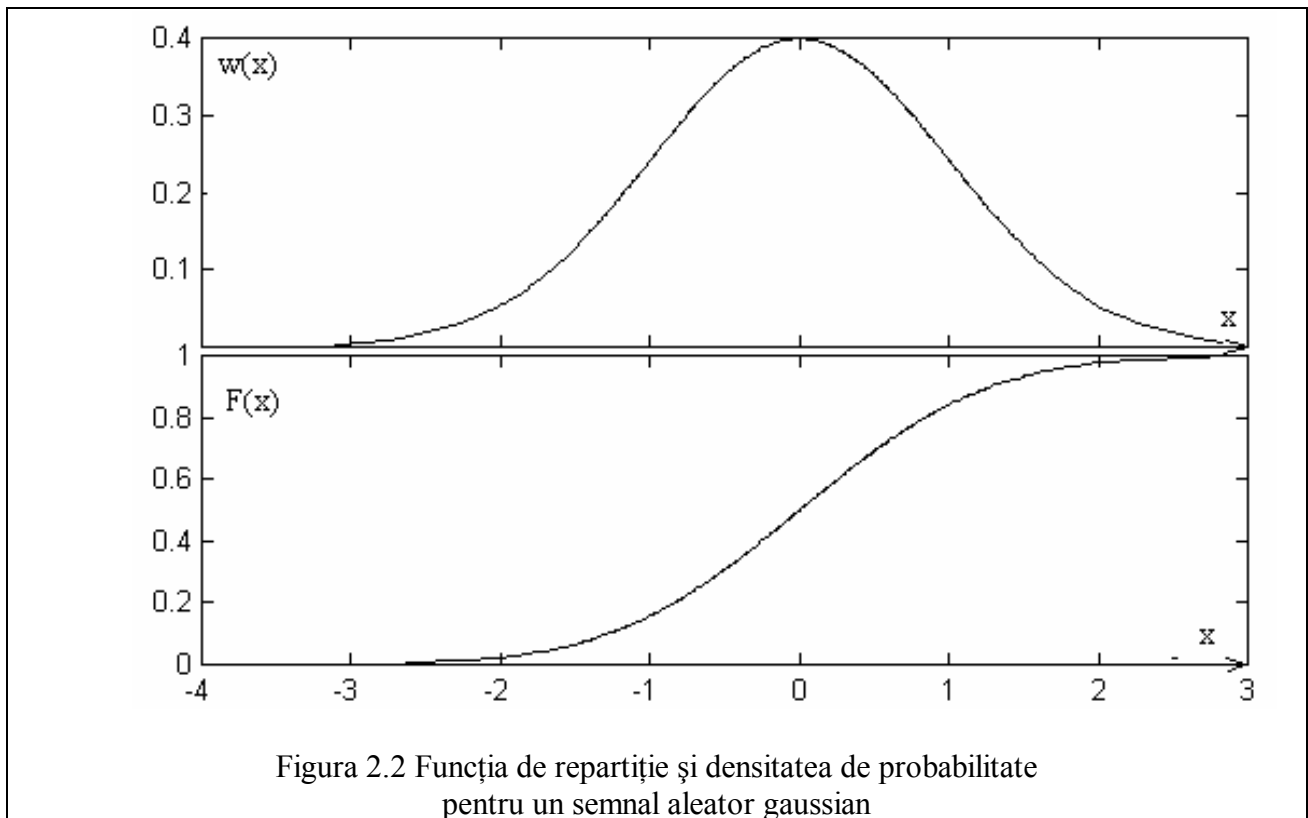
Un semnal aleator cu distribuție normală are funcția densitate de probabilitate:

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.5)$$

unde  $\sigma^2$  este dispersia și  $x_0$  este valoarea medie. Funcția de repartiție este:

$$F(z) = \int_{-\infty}^z w(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2.6)$$

În figura 2.2 se prezintă funcția de repartiție și funcția densitate de probabilitate pentru un semnal aleator gaussian, cu medie zero și dispersie unu.



În expresia (2.6), făcând schimbarea de variabilă

$$v = \frac{x - x_0}{\sigma} \quad (2.7)$$

se obține o variabilă aleatoare normalizată sau standard ce are media zero și dispersia 1. Se folosește notația  $N(m, \sigma^2) = N(0, 1)$ . Funcția de repartiție a variabilei aleatoare standard este:

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{v^2}{2}} dv \quad (2.8)$$

și are proprietatea de simetrie

$$F(-z) = 1 - F(z) \quad (2.9)$$

O variabilă aleatoare cu distribuție normală ia valori cu o probabilitate aproape unu într-un interval  $\pm 3\sigma$ , axat pe valoarea medie  $x_0$ . Acest lucru se scrie:

$$P\left\{\left|\frac{x - x_0}{\sigma}\right| \leq 3\right\} = P\left\{-3 \leq \frac{x - x_0}{\sigma} \leq 3\right\} = F(3) - F(-3) = 2F(3) - 1 \cong 0.997 \quad (2.10)$$

**2.3 Schema montajului** este prezentată în figura 2.3 și conține:

- generatorul de zgomot;
- osciloscop catodic;
- voltmetru electronic de c.c.;
- surse de tensiune pentru alimentarea montajului

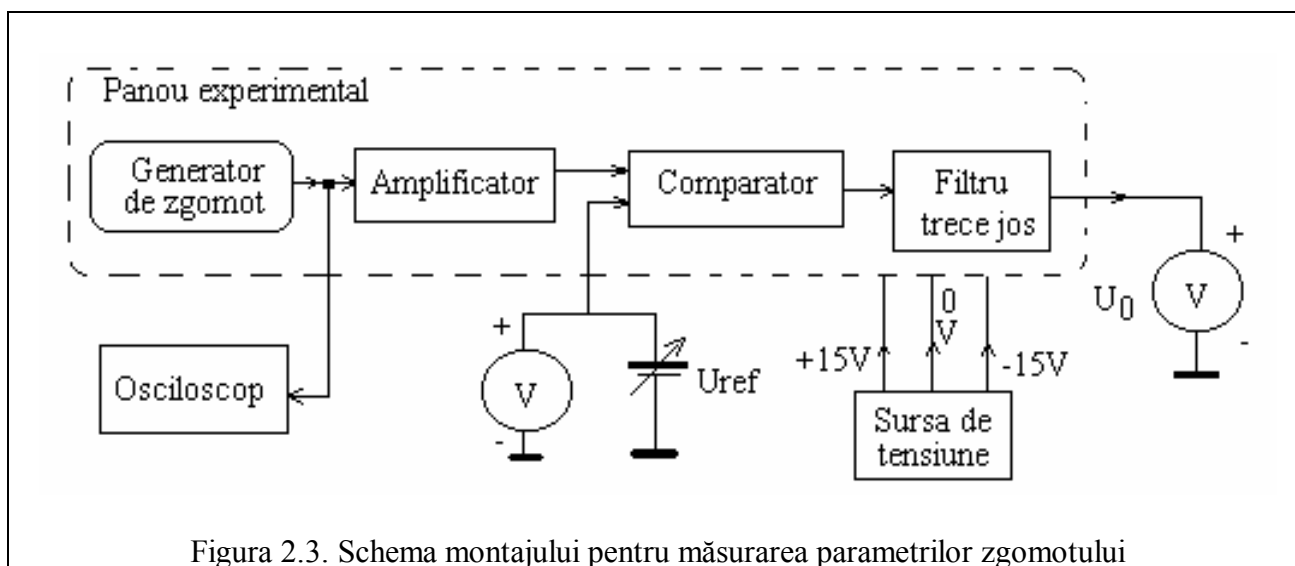


Figura 2.3. Schema montajului pentru măsurarea parametrilor zgomotului

Schema electrică a generatorului de zgomot și a panoului experimental este prezentată în Anexa 1.

## 2. 4 Desfășurarea lucrării

2.4.1. Se realizează conexiunile conform figurii 2.3. Panoul se alimentează cu tensiune simetrică de  $\pm 15V$ . Se vizualizează semnalul aleator generat pe osciloscop și se desenează semnalul în caiet.

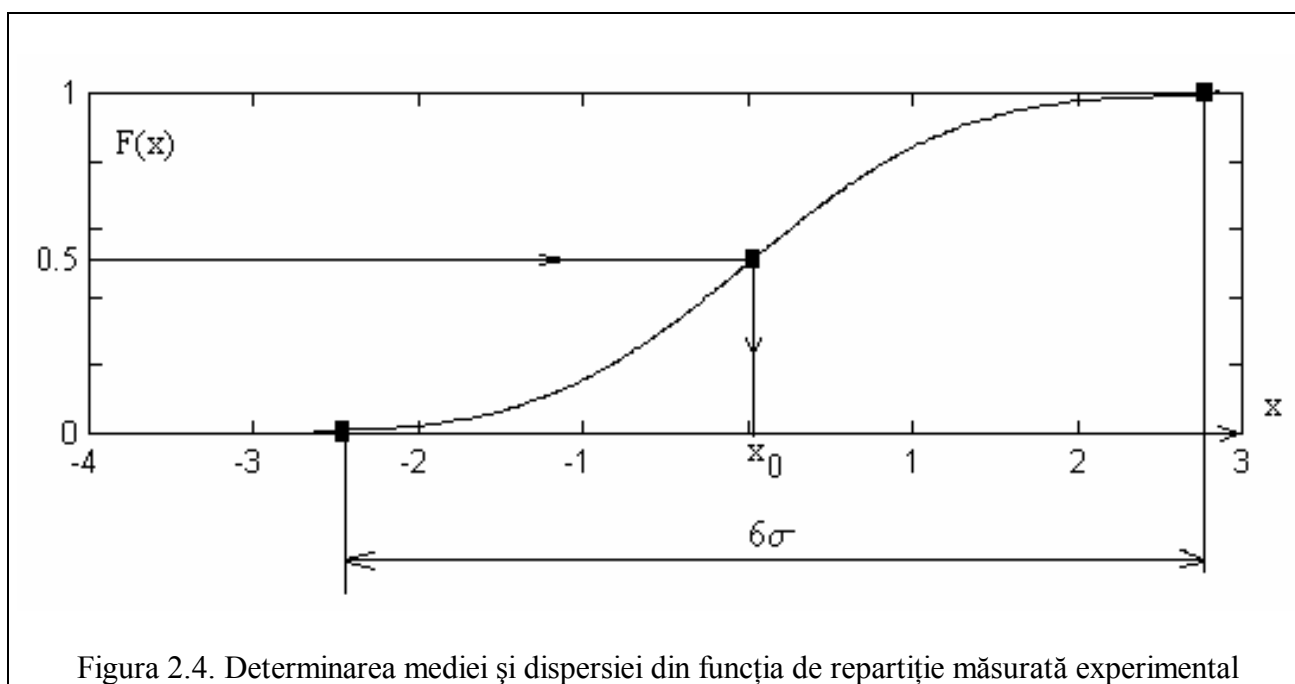
2.4.2. Se modifică valoarea tensiunii de referință  $U_{ref}$ , conform valorilor din tabelul 1, pentru ridicarea funcției de repartiție a probabilității. Celelalte linii ale tabelului se referă la operațiile de:

- normalizare a domeniului valorilor, prin împărțirea axei  $Y$  la valoarea  $U_{OM}$  ce reprezintă  $|U_{omax}-U_{omin}|$ ;
- obținerea de valori pozitive, prin adunarea valorii 1 la valorile de la punctul anterior;
- o nouă normalizare, prin împărțire la 2, pentru ca valorile măsurate să poată fi interpretate ca probabilități.

2.4.3. Se reprezintă grafic funcția de repartiție și se determină media și dispersia, așa cum se arată în figura 2.4.

Tabel 1

$U_{ref}[V]$	-15	-14.5	-14	...	0	...	14	14.5	15
$U_0[V]$									
$U_1=U_0/U_{OM}$									
$U_2=U_1+1$									
$F(x)=U_2/2$									



## Lucrarea nr.3

## ANALIZA ARMONICĂ A SEMNALELOR PERIODICE

**3.1. Obiectivul lucrării:** măsurarea spectrelor de amplitudini ale semnalului dreptunghiular și semnalului triunghiular.

**3.2. Introducere teoretică**

Reprezentarea vectorială a unui semnal se bazează pe dezvoltarea acestuia într-o combinație liniară de funcții  $\phi_i(t)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ :

$$s(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi_i(t) \quad (3.1)$$

unde  $n$  este dimensiunea spațiului vectorial, iar setul de funcții  $\phi_i(t)$  formează o bază a spațiului vectorial respectiv. Cei  $n$  coeficienți  $a_i$  constituie o reprezentare discretă a semnalului  $s(t)$  și formează spectrul semnalului  $s(t)$ , relativ la setul de funcții  $\phi_i(t)$ .

Un semnal periodic  $s(t)$ , de perioadă  $T$ , dacă îndeplinește anumite condiții destul de generale (condițiile lui Dirichlet), poate fi descompus într-o serie Fourier:

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \left( a_i \cos i\omega_0 t + b_i \sin i\omega_0 t \right) = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(i\omega_0 t + \phi_i) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i e^{ji\omega_0 t} \end{aligned} \quad (3.2)$$

unde  $\omega_0 = 2\pi/T$  reprezintă frecvența unghiulară (pulsția) fundamentală, egală cu frecvența de repetiție a semnalului. În ultima relație sunt evidențiate trei forme echivalente ale seriei Fourier: trigonometrică, armonică și complexă. Forma trigonometrică evidențiază componentele pare și impare ale semnalului, prin intermediul funcțiilor sinus și cosinus. Forma armonică evidențiază armonicile semnalului de analizat și reprezintă forma cea mai apropiată de reprezentarea reală a semnalului  $s(t)$ , întrucât milivoltmetrul selectiv măsoară amplitudinile armonicilor  $A_i$ . Forma complexă (exponențială) se folosește mult în abordările teoretice, pentru obținerea unor rezultate generale.

Dezvoltarea (3.2) evidențiază faptul că semnalul periodic poate fi descompus într-o sumă de componente cosinusoidale având anumite amplitudini și faze, componente care reprezintă armonicile frecvenței de repetiție  $f_0 = 1/T$ . Armonica întâi ( $i=1$ ) se numește fundamentală.

Semnificația fizică a seriei Fourier este aceea că un semnal periodic poate fi privit ca o sumă (finită sau infinită) de sinusuri și cosinusuri (sau numai de cosinusuri, dar cu diferite faze inițiale), așa cum se arată în figura 3.1.

Pentru semnalul periodic dreptunghiular, unde au fost reprezentate numai primele  $i=3$  armonici impare (o dată separate și apoi sumate)(armonicele pare sunt nule); se observă că suma ponderată a acestora se apropie de forma originală a semnalului considerat. Ponderile reprezintă coeficienții Fourier.

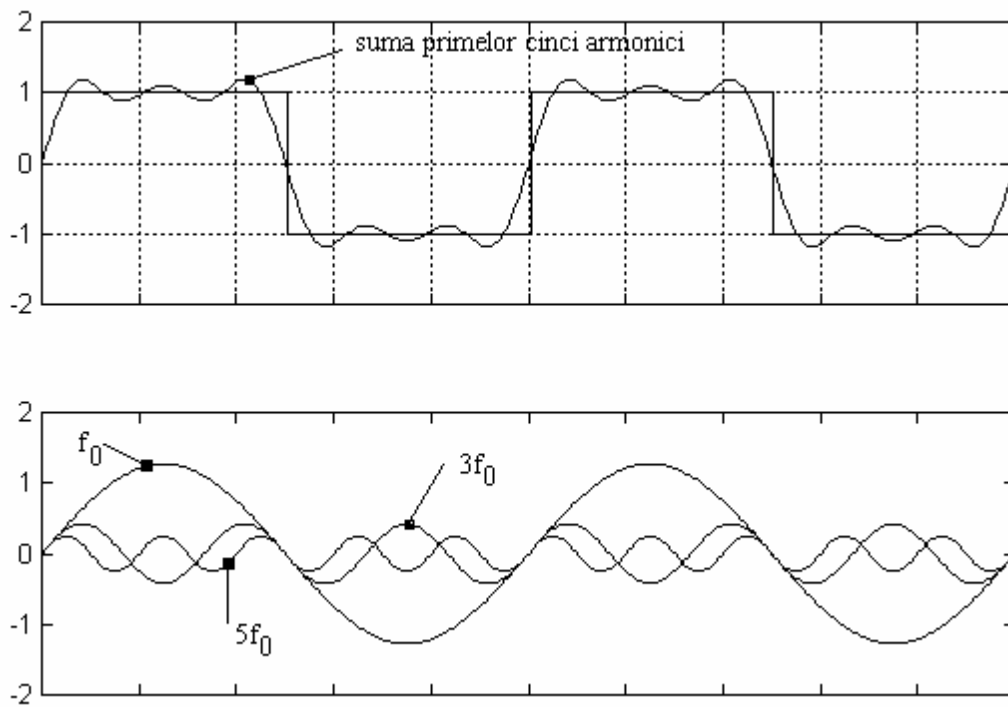


Figura 3.1 Descompunerea unui semnal dreptunghiular în componentele sale armonice

Armonicele pot fi măsurate cu ajutorul milivoltmetrului selectiv, acordându-l succesiv pe frecvența semnalului periodic dreptunghiular și pe multiplii întregi ai acesteia.

### 3.2.3 Semnalul periodic dreptunghiular

Semnalul este reprezentat în figura 3.2, iar spectrul de amplitudini este dat de componentele:

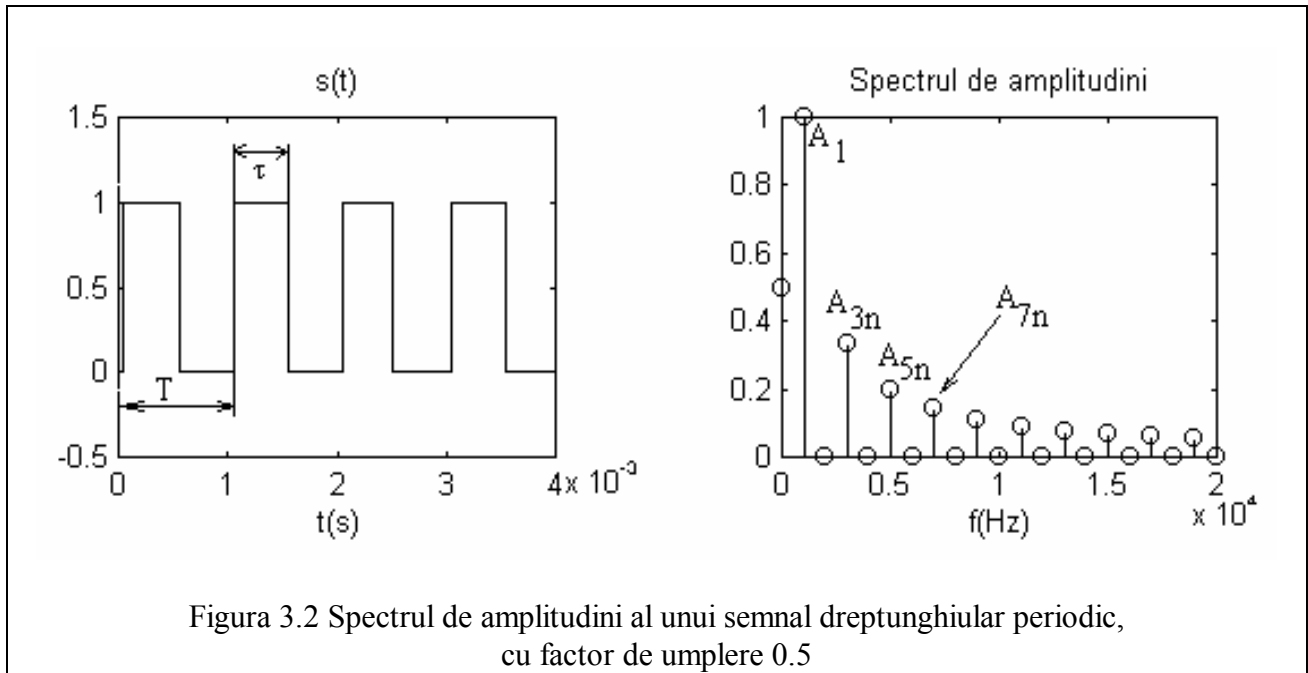
$$A_i = \frac{2E}{i\pi} \sin \frac{\tau}{T} \pi i \quad ; \quad \frac{a_0}{2} = E \frac{\tau}{T} \quad (3.3)$$

unde  $E$  este amplitudinea semnalului dreptunghiular și  $\tau$  este durata impulsului în cadrul perioadei, conform figurii 3.2. Rezultă că anumite armonici, chiar de ordin  $i^*$  nu prea mare, pot lipsi dacă este îndeplinită condiția:

$$\frac{i^*}{T} \tau \pi = k\pi \quad \text{sau} \quad i^* = k \frac{T}{\tau} = \frac{k}{\theta} \quad (3.4)$$

unde  $\theta = \frac{\tau}{T} \in (0,1)$  se numește coeficient (factor) de umplere al succesiunii de impulsuri dreptunghiulare. Deoarece  $k$  și  $i^*$  sunt numere întregi, rezultă că  $\theta = k/i^*$  este un număr rațional. În particular, dacă  $\theta = 1/N$ , atunci  $i^* = kN$ , adică spectrul nu conține armonicile de ordin  $N, 2N, 3N, 4N$  etc.

În figura 3.2 s-a reprezentat spectrul în cazul  $\theta = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{2}$ . Spectrele sunt normate la valoarea  $A_1$  a fundamentalei, astfel că  $A_{in}$  reprezintă este valoarea normalată a amplitudinii componentei spectrale de ordin  $i$ .



**3.2.4 Semnalul periodic triunghiular** este reprezentat în figura 3.3, pentru  $\tau = T/2$ , iar spectrul se calculează cu relațiile:

$$A_i = \frac{T^2 E}{\pi^2 \tau (T - \tau) i^2} \sin \left( i \pi \frac{\tau}{T} \right) \text{ pentru } i \geq 1 \quad (3.5)$$

$$A_0 = 0$$

unde  $E$  este amplitudinea. Se observă că amplitudinile componentelor sunt proporționale cu  $1/i^2$ . De asemenea, dacă  $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{N}$ , unde  $N$  este un număr întreg, armonicile de ordin  $N, 2N, 3N$ , etc lipsesc, întocmai ca la succesiunea de impulsuri dreptunghiulare.

De observat că semnalul periodic triunghiular poate fi obținut prin integrarea semnalului dreptunghiular periodic.

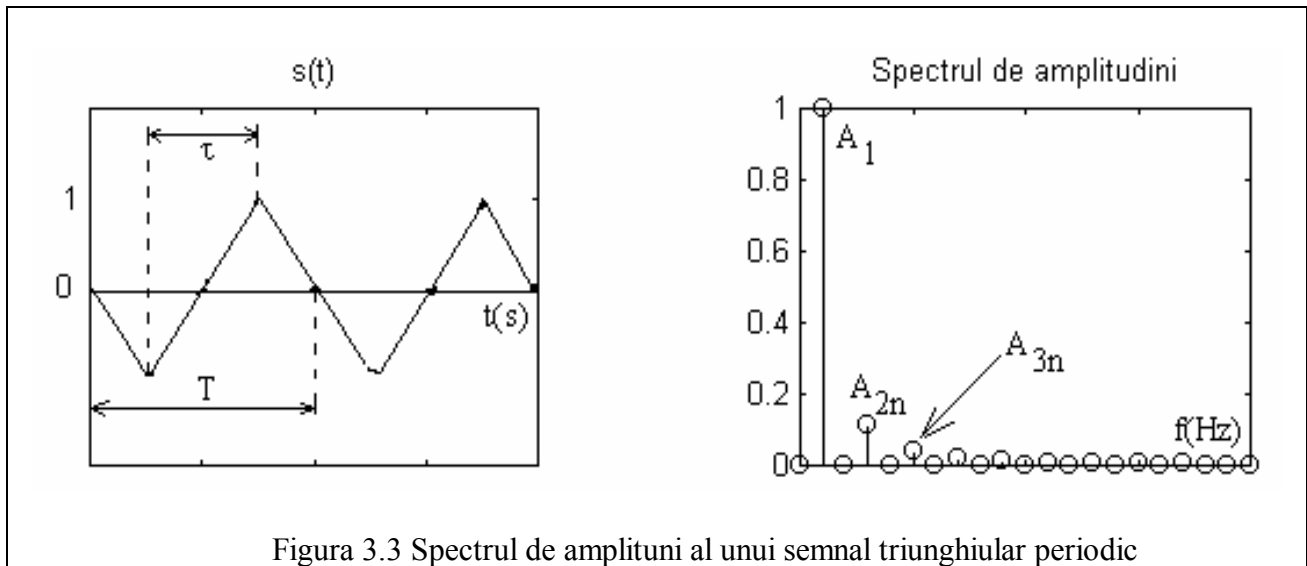


Figura 3.3 Spectrul de amplituni al unui semnal triunghiular periodic

### 3.3 Desfășurarea lucrării

3.3.1. Se realizează conexiunile din figura 3.4.

3.3.2. Se reglează generatorul de impulsuri pentru a obține o succesiune de impulsuri dreptunghiulare cu durata  $\tau = 100 \mu s$  și perioada  $T_I = 2\tau$ . Perioada de repetiție  $T$  se stabilește cu ajutorul generatorului sinusoidal de sincronizare. Se reglează durata  $\tau$ , mai întâi aproximativ, cu ajutorul osciloscopului, și apoi exact, urmărindu-se extincția (anularea) armonice a doua cu ajutorul milivoltmetrului selectiv.

3.3.3. Se reglează amplitudinea impulsurilor încât indicația corespunzătoare fundamentalei să fie  $0dB$ . Se măsoară amplitudinea  $E$  cu osciloscopul.

3.3.4. Se măsoară componentele spectrale ale semnalului (cel puțin primele 10 componente) și se completează tabelul 3.1. În ultima linie se calculează valorile măsurate  $A_e$  în volți.

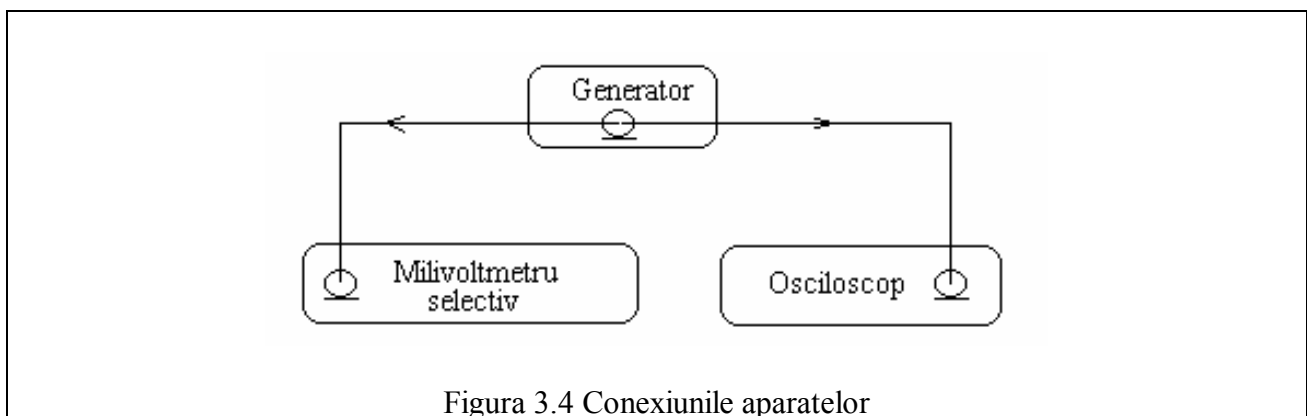


Figura 3.4 Conexiunile aparatelor

3.3.5. Se trasează spectrul discret de amplitudini, măsurat în volți (din linia a patra a tabelului 3.1), funcție de frecvență.

3.3.6. Se trasează spectrul teoretic în același sistem de axe.

3.3.7. Se repetă punctele 2, 3, 4, 5 și 6 pentru  $\tau = 100 \mu\text{sec}$  și  $T_2 = 3\tau$ .

Tabelul 3.1

f [KHz]	$f_0$	$2f_0$	$3f_0$	$4f_0$	$5f_0$	$6f_0$	$7f_0$	$8f_0$	$9f_0$	$10f_0$
$A_e$ [dB]										
$A_n = A_e/A_1$										
$A_t$ [V]										
$\log^{-1}(A_e/20)$										

3.3.8. Se măsoară spectrul unui semnal triunghiular, cu aceiași parametrii cu ai semnalului dreptunghiular, și se repetă punctele de la 1 la 7.

**Lucrarea nr. 4****SEMNALE MODULATE ÎN AMPLITUDINE (MA)**

**4.1 Obiectivul lucrării** este măsurarea și analiza spectrului de amplitudine al unui semnal modulat în amplitudine (M.A.).

**4.2 Semnale modulate în amplitudine (MA). Noțiuni teoretice**

Fie un semnal sinusoidal periodic  $s(t)$ , cu semnificație de purtătoare, definit prin:

$$s(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (4.1)$$

și un semnal periodic  $s_m(t)$  de pulsație  $\omega_m \ll \omega_0$ , definit prin:

$$s_m(t) = U_m \cos(\omega_m t + \varphi_m) \quad (4.2)$$

Expresia generală a semnalului  $s(t)$  modulat în amplitudine de semnalul  $s_m(t)$ , ce va fi notat prin  $s_{MA}(t)$ , este:

$$s_{MA}(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_0 \left[ 1 + m \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (4.3)$$

unde mărimea  $m = kU_m$ , proporțională cu amplitudinea semnalului modulator, se numește grad de modulație, fiind o mărime pozitivă subunitară. Dacă  $m > 1$ ,  $A(t)$  devine negativă, obținându-se o supramodulație. Mărimea  $k$  este panta caracteristicii  $m = f(U_m)$  a modulatorului, reprezentată în figura 4.1.b.

Ultima expresie poate fi rescrisă, în vederea evidențierii componentelor spectrale, astfel:

$$s_{MA}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{mU_0}{2} \cos((\omega_0 + \omega_m)t + \varphi_0 + \varphi_m) + \frac{mU_0}{2} \cos((\omega_0 - \omega_m)t + \varphi_0 - \varphi_m) \quad (4.4)$$

care pune în evidență următoarele componente spectrale:

- 1) purtătoarea, de amplitudine  $A_0 = U_0$ ;
- 2) componenta laterală superioară, de amplitudine  $A_1 = mU_0 / 2$ , la frecvența  $f_1 = f_0 + f_m$ ;
- 3) componenta laterală inferioară, de amplitudine  $A_{-1} = mU_0 / 2$ , la frecvența  $f_{-1} = f_0 - f_m$ .

Forma semnalului modulat în amplitudine este prezentat în figura 4.1.a. Se observă că amplitudinea semnalului modulat în amplitudine variază între valorile  $A_{max} = U_0(1+m)$  și  $A_{min} = U_0(1-m)$ , de unde rezultă relația de calcul a gradului de modulație:

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} = \frac{2 \cdot A_{\max} - 2 \cdot A_{\min}}{2 \cdot A_{\max} + 2 \cdot A_{\min}} \quad (4.5)$$

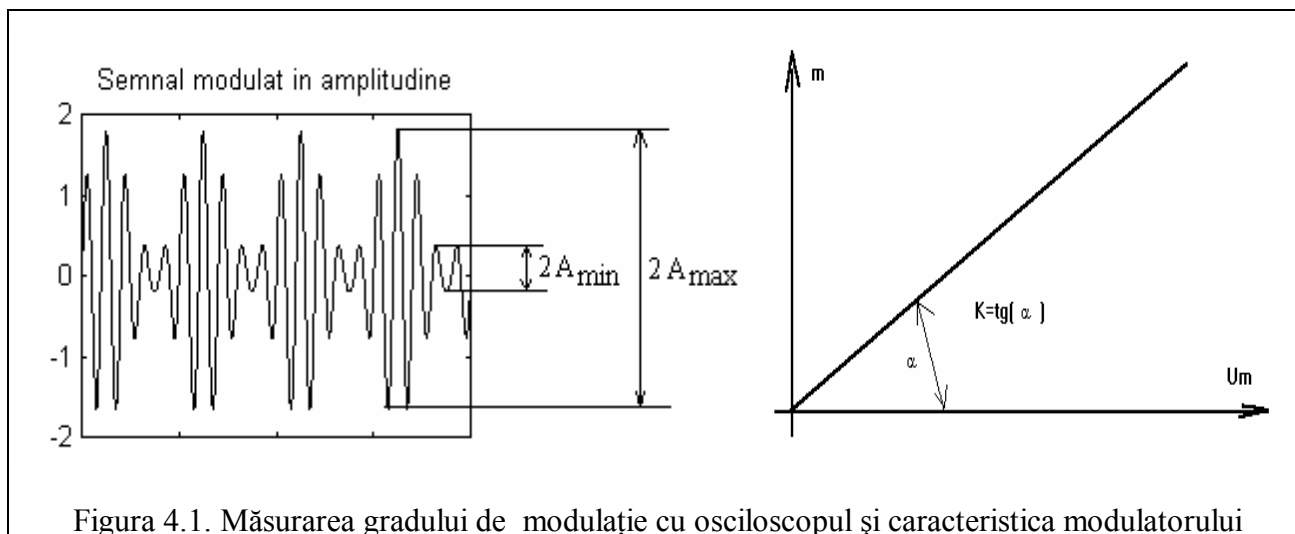


Figura 4.1. Măsurarea gradului de modulație cu osciloscopul și caracteristica modulatorului

Din figura 4.2, se observă că banda semnalului modulat în amplitudine de un semnal modulator sinusoidal este  $B = 2f_m$ . Dacă semnalul modulator are banda  $B_m$ , atunci banda semnalului modulat în amplitudine va fi  $2B_m$ .

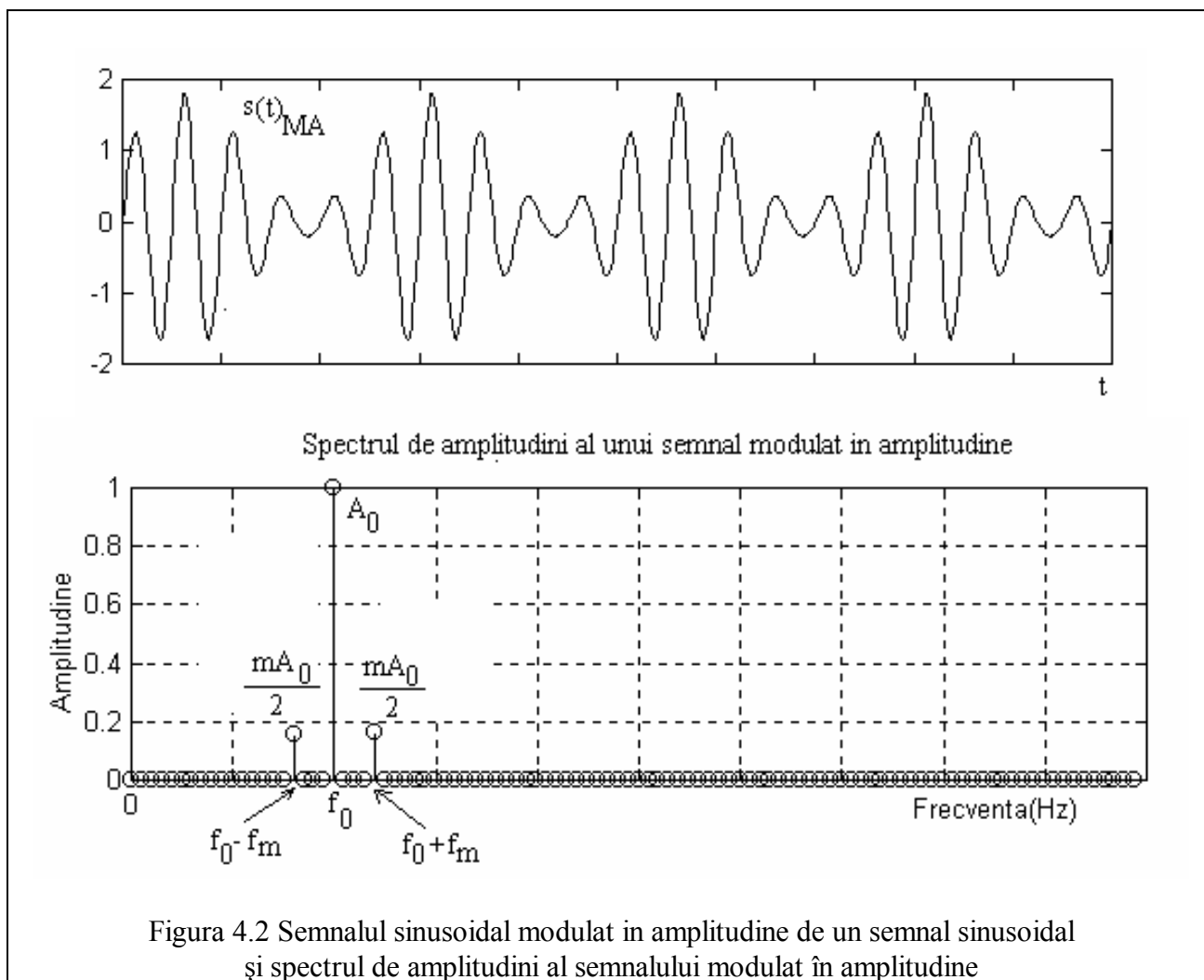


Figura 4.2 Semnalul sinusoidal modulat in amplitudine de un semnal sinusoidal și spectrul de amplitudini al semnalului modulat în amplitudine

### 4.3 Desfășurarea lucrării

4.3.1. Se realizează conexiunile din figura 4.3, dintre milivoltmetrul selectiv (MVS), generatorul de joasă frecvență (GJF) 10HZ-10KHz și osciloscopul catodic (OSC). TRIG este intrarea de sincronizare externă a osciloscopului, IN este intrarea de semnal și OUT este ieșirea.

4.3.2. Se măsoară cu osciloscopul gradul de modulație al unui semnal MA sinusoidal având  $f_o=100$  KHz și  $f_m=4$  KHz. Se completează tabelul 4.1, pentru trei valori ale tensiunii modulatoroare.

4.3.3. Se măsoară componentele spectrale cu milivoltmetrul selectiv. Se calculează amplitudinea componentelor spectrale în raport cu purtătoarea nemodulată, prin normare la aceasta.

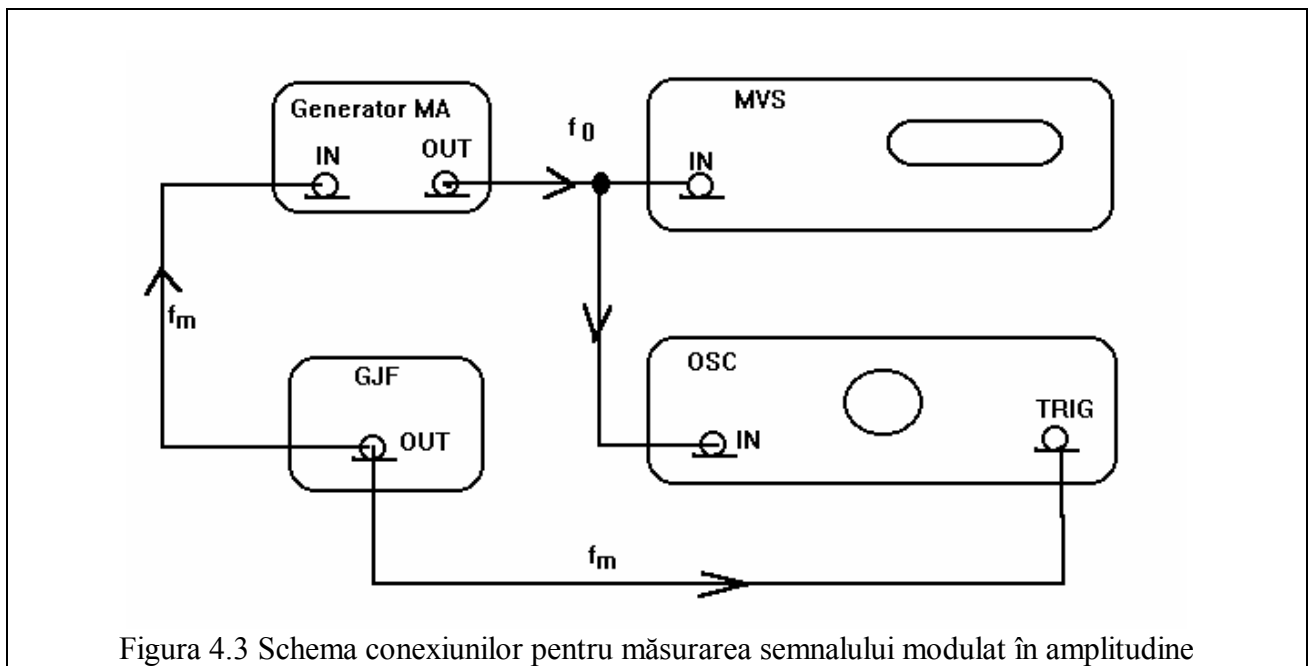


Figura 4.3 Schema conexiunilor pentru măsurarea semnalului modulat în amplitudine

Tabel 4.1

$U_m[V]$	$2A_{max}$	$2A_{min}$	$m$	$A_0[dB]$	$A_1[dB]$	$A_{-1}[dB]$	$A_0[V]$	$A_1[V]$	$A_{-1}[V]$	$A_{1t}=mA_0/2$
0.2										
0.4										
0.6										

4.3.4. Se calculează gradul de modulație din raportul componentelor spectrale și se compară cu cel măsurat (indirect) cu osciloscopul.

4.3.5. Se determină panta modulatorului  $k$ , din caracteristica  $m=f(U_m)$  trasată experimental cu datele din tabelul 4.1.

4.3.6. Se reprezintă grafic spectrele de amplitudine teoretice și experimentale (în volți) pe hârtie milimetrică. Se compară și se explică eventualele diferențe.

**Lucrarea nr. 5****SEMNALE MODULATE ÎN FRECVENȚĂ (MF)**

**5.1. Obiectivul lucrării:** măsurarea și analiza spectrului discret de amplitudini al unui semnal periodic cu modulație de frecvență.

**5.2. Introducere** Expresia generală a unui semnal modulat în frecvență este:

$$s(t) = U_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + k \cdot \int s_m(t) \cdot dt + \varphi_0) \quad (5.1)$$

unde:  $\omega_0$  -este frecvența unghiulară a purtătoarei,  $U_0$ - este amplitudinea semnalului,  $\varphi_0$ - este faza inițială a purtătoarei,  $k$ -este o constantă de proporționalitate. Frecvența instantanee a acestui semnal este proporțională cu semnalul de modulator  $s_m(t)$ :

$$\omega_i(t) = \frac{d\Phi}{dt} = \omega_0 + k \cdot s_m(t) \quad (5.2)$$

În cazul modulației cu semnal modulator sinusoidal, expresia (5.1) devine:

$$s(t) = U_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \beta \sin(\omega_m \cdot t)) \quad (5.3)$$

Pentru simplitate nu s-a mai considerat faza inițială a purtătoarei  $\varphi_0$  și faza inițială a semnalului modulator  $\varphi_m$ . S-a notat cu  $\omega_m$  frecvența unghiulară a semnalului modulator, iar  $\beta$  este indicele de modulație. Frecvența unghiulară instantanee este:

$$\omega_i(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cdot \cos(\omega_m \cdot t) \quad (5.4)$$

unde  $\Delta\omega$  este deviația de frecvență unghiulară. Se observă că, între  $\Delta\omega$  și  $\beta$  există relația:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \quad (5.5)$$

iar  $\beta$  poate fi mai mic sau mai mare decât unu.

În cazul în care  $s(t)$  este un semnal periodic, semnalul modulat în frecvență (MF), se poate descompune într-o sumă de componente sinusoidale de amplitudini și faze bine precizate. Dacă semnalul modulator  $s_m(t)$  este sinusoidal, dezvoltarea conține funcții Bessel de prima speță, având ca argument indicele de modulație. Expresia (5.3) devine:

$$s(t) = U_0 \cdot \sum_{i=-\infty}^{+\infty} J_i(\beta) \cdot \cos(\omega_0 + i \cdot \omega_0) \cdot t = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} A_i \cdot \cos(\omega_0 + i \cdot \omega_m) \cdot t \quad (5.6)$$

cu notația:

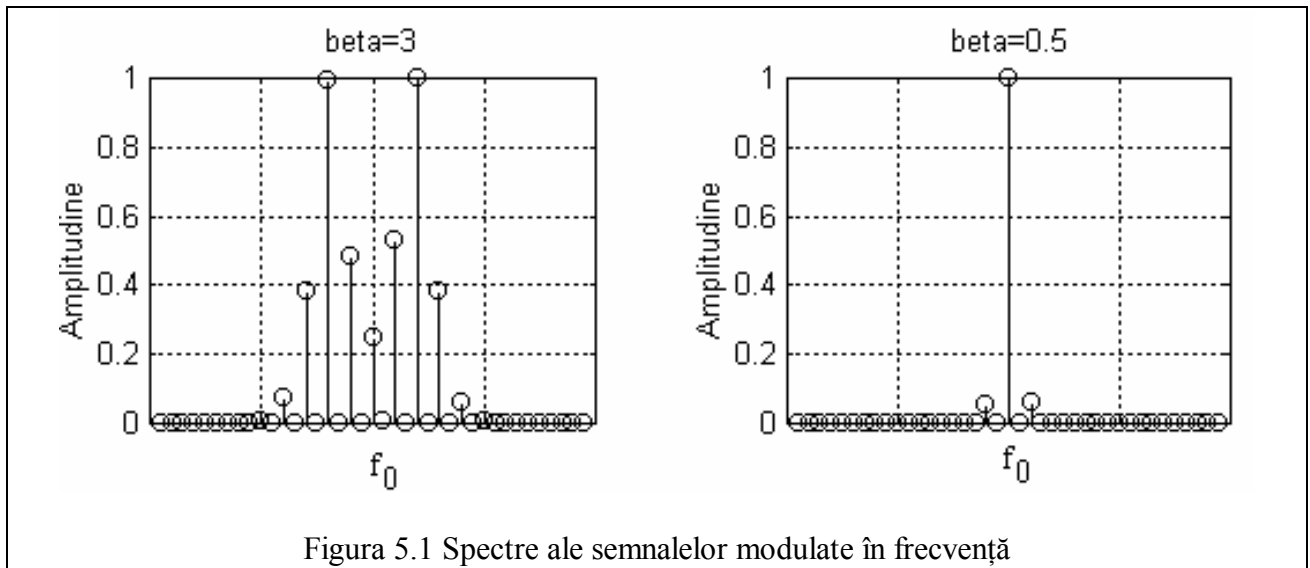
$$A_i = U_0 \cdot J_i(\beta) \quad (5.7)$$

$J_i(\beta)$  este funcția Bessel de speța întâi, de ordin  $i$  și argument  $\beta$ . Purtătoarea are frecvența  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$  și este proporțională cu  $J_0(\beta)$ , nefiind constantă ca la semnalul modulat în amplitudine.

Componentele laterale sunt situate de o parte și de alta a purtătoarei cu ecarturi (distanțe) în frecvență egale cu multiplii întregi ai frecvenței de modulație  $f_m$ , iar componentele simetrice față de  $\omega_0$  au amplitudinile egale, deoarece:

$$J_{-i}(\beta) = J_i(\beta) \cdot (-1)^i \quad (5.8)$$

În figura 5.1 este reprezentat spectrul de amplitudini normat la valoarea cea mai mare, pentru  $\beta=3$ . Pentru anumite valori ale indicelui de modulație  $\beta$ , anumite componente (inclusiv componenta pe frecvența purtătoare) pot să se anuleze. Anularea componentei  $A_i$  corespunde valorilor indicelui  $\beta$  care reprezintă rădăcinile ecuației  $J_i(\beta) = 0$ . Componentele de ordin foarte mare sunt neglijabil de mici, dar, pe măsură ce  $\beta$  crește, numărul de componente care au amplitudini importante (de pildă mai mari de 1% din valoarea purtătoarei nemodulate  $U_0$ ) crește. Pentru  $\beta < 0,3$ , spectrul se reduce practic la trei componente ( $A_{-1}$ ,  $A_0$  și  $A_1$ ), dar pentru  $\beta > 3$  numărul de componente este mult mai mare (figura 5.1).



Dacă semnalul modulator este o succesiune de impulsuri dreptunghiulare cu coeficientul de umplere  $\theta = 0.5$ , semnalul MF corespunzător poate fi descompus astfel:

$$s(t) = U_0 \cdot \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \frac{2 \cdot m \cdot \sin\left[(m+i)\frac{\pi}{2}\right]}{\pi \cdot (m^2 - i^2)} \cdot \cos(\omega_0 + i \cdot \omega_m) \cdot t \quad (5.9)$$

cu:

$$m = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_m} \quad (5.10)$$

unde  $U_0$  este amplitudinea semnalului,  $\omega_1$  și  $\omega_2$  reprezintă frecvențele unghiulare instantanee corespunzătoare “saltului” de frecvență ( $\omega_2 - \omega_1 = 2\Delta\omega$ ), și  $f_m$  este frecvența de repetiție a succesiunii de impulsuri (semnalul modulator). Apar componente de frecvențe  $f_0$ ,  $f_0 \pm if_m$ , dar amplitudinile sunt altele. Pentru anumite valori întregi ale coeficientului  $m$  (analog indicelui de modulație  $\beta$ ), și aici este posibil ca unele componente laterale să se anuleze.

### Concluzii:

1) Spectrul unui semnal sinusoidal modulat în frecvență cu alt semnal sinusoidal conține:

- o componentă pe frecvența purtătoare, cu amplitudinea  $A_0 = U_0 J_0(\beta)$ ;
- o infinitate de componente laterale superioare, pe frecvențele  $f_0 \pm if_m$ ,  $i=1,2,3,\dots$  având amplitudinile  $|A_i| = U_0 |J_i(\beta)|$ ;
- o infinitate de componente laterale inferioare, pe frecvențele  $f_0 \pm if_m$ ,  $i=-1,-2,-3,\dots$  având amplitudinile  $|A_i| = U_0 |J_i(\beta)|$ .

2) Datorită simetriei funcțiilor Bessel, spectrul de amplitudini este simetric în raport cu frecvența purtătoare.

## 5.3 Desfășurarea lucrării

5.3.1. Se conectează aparatele după schema din figura 5.2.

5.3.2. Se vizualizează pe osciloscop un semnal sinusoidal cu modulație de frecvență, sincronizându-se osciloscopul cu semnalul modulator și, apoi, cu semnalul purtător.

5.3.3. Se determină caracteristica modulatorului de frecvență a generatorului MF utilizându-se metoda extincției purtătoarei. Valorile indicelui de modulație  $\beta$ , la care se anulează purtătoarea sunt date în tabelul 5.1. Cu datele din tabelul 5.1, se reprezintă grafic caracteristica modulatorului  $\Delta f = f(U_m)$ .

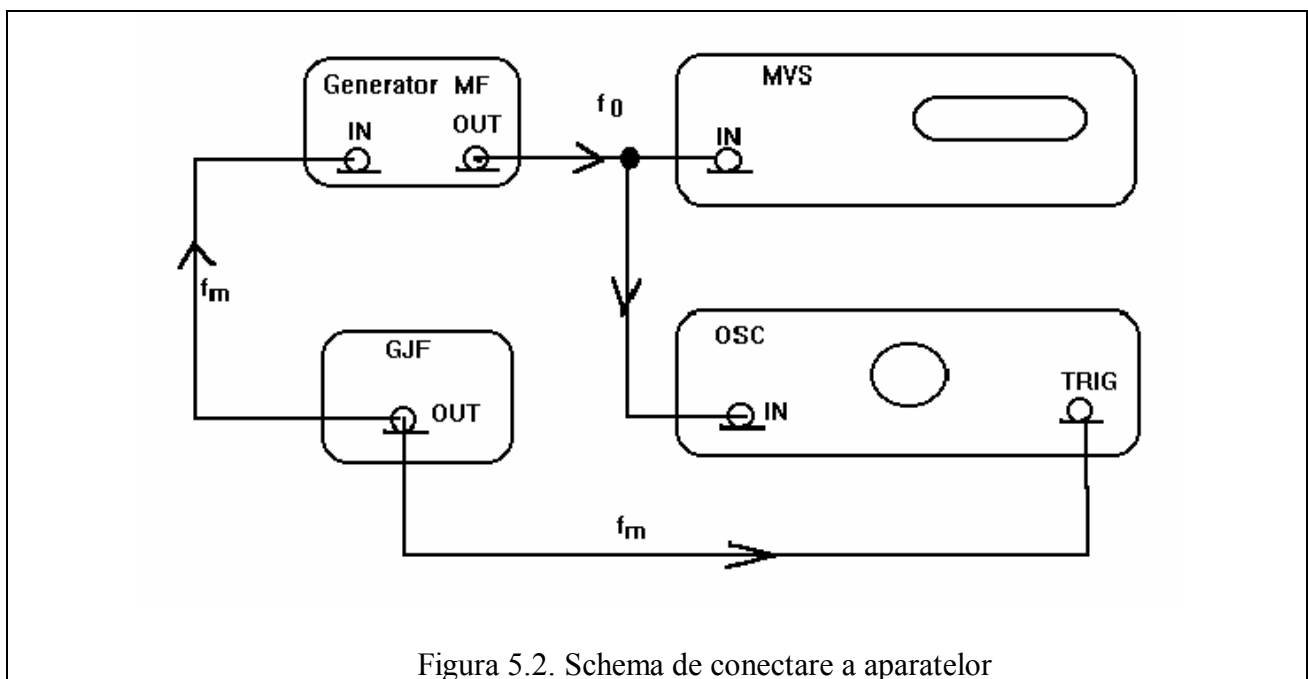


Figura 5.2. Schema de conectare a aparatelor

Tabelul 5.1 (după referința [2])

$U_m$ [V]	0						
$\beta$	0	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915	14,931	18,071
$\Delta f$ [KHz]	0						

## Lucrarea nr. 6

## MODULAȚIA MA DE TIP PRODUS

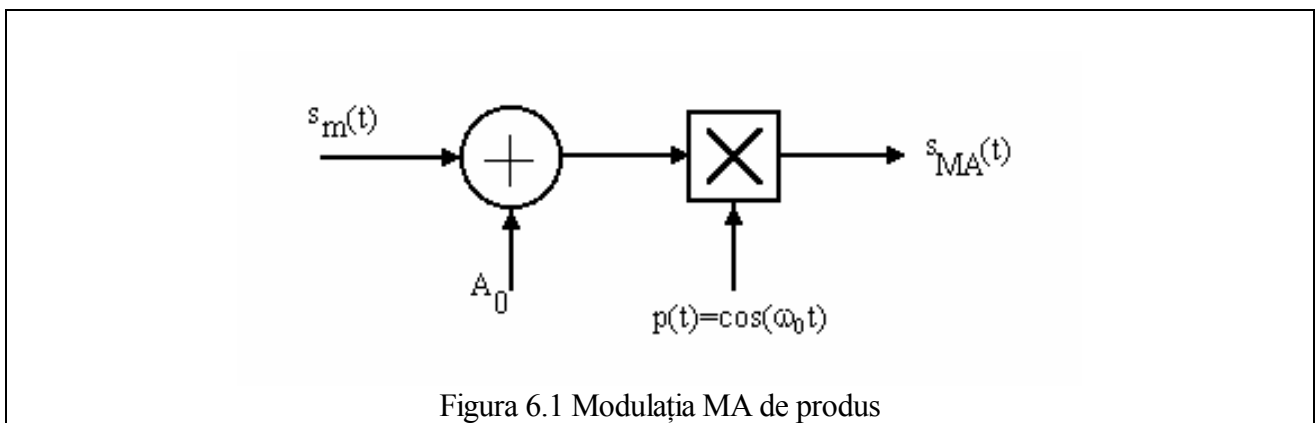
**6.1 Obiectivul lucrării:** Studiul semnalelor modulate în amplitudine cu purtătoare suprimată și măsurarea spectrului de amplitudine.

**6.2 Noțiuni teoretice** Prin modulația în amplitudine (sau *modulația liniară*) semnalul modulator  $m(t)$  modifică amplitudinea unui semnal de frecvență ridicată  $p(t)$ , numit *purtătoare*. Forma generală a unui semnal modulat în amplitudine (MA) este:

$$s_{MA}(t) = A_0(1 + s_m(t))\cos\omega_0 t \quad (6.1)$$

unde  $A_0$  este amplitudinea purtătoarei,  $s_m(t)$  este semnalul modulator, iar  $\omega_0$  este pulsația purtătoarei. Diagrama spectrală de amplitudine, pentru cazul unui semnal modulator sinusoidal, conține trei componente: purtătoarea la frecvența  $f_0$  și cele două componente laterale la frecvențele  $f_0 \pm f_m$ .

Principiul de obținere a unui semnal modulat în amplitudine prin utilizarea produsului este prezentat în figura. 6.1.



Dacă  $A_0$  este amplitudinea purtătoarei atunci semnalul modulat în amplitudine este:

$$s_{MA}(t) = (A_0 + s_m(t)) \cdot p(t) = A_0 \left( 1 + \frac{1}{A_0} s_m(t) \right) \cdot p(t) \quad (6.2)$$

Când amplitudinea purtătoarei, din diagrama spectrală de amplitudine, este nulă, semnalul modulat în amplitudine astfel obținut se numește semnal MA cu purtătoare suprimată (MA-PS). În acest caz, din spectrul semnalului MA lipsește componenta din dreptul pulsației  $\omega_0$ , așa cum se arată în figura 6.2 și cum rezultă din ecuația:

$$\begin{aligned} s_{MA}(t) &= A_m A_0 \cos(\omega_m t) \cos(\omega_0 t) = \\ &= \frac{A_m A_0}{2} \cos(\omega_0 - \omega_m)t + \frac{A_m A_0}{2} \cos(\omega_0 + \omega_m)t \end{aligned} \quad (6.3)$$

La recepție nu se poate aplica detecția de anvelopă, întrucât înfășurătoarea semnalului MA-PS nu reproduce exact semnalul modulator. Se poate aplica, de exemplu, demodularea sincronă ce constă într-o

nouă înmulțire a semnalului modulat cu semnalul purtător  $\cos(\omega_0 t)$ , refăcut sau generat local, urmat de o filtrare trece jos:

$$s_m(t) \cos \omega_0 t = s_m(t) \cos^2 \omega_0 t = \frac{1}{2} s_m(t) + \frac{1}{2} s_m(t) \cos 2 \omega_0 t \quad (6.4)$$

În urma filtrării trece-jos se va obține numai componenta de joasă frecvență, și anume  $s_m(t)$ .

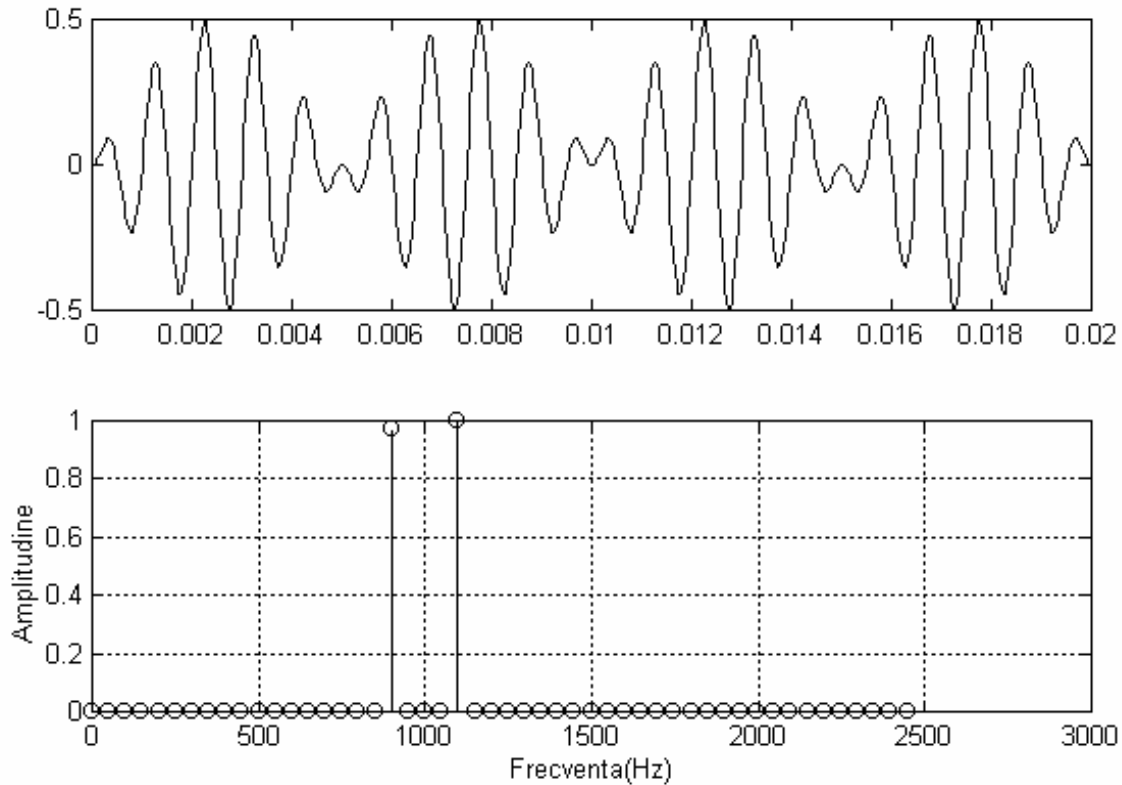


Figura 6.2 Semnalele rezultate din modulația de produs și spectrul de amplitudine aferent

### 6.3 Modul de lucru

6.3.1. Se generează un semnal modulat în amplitudine folosind circuitul din figura 6.3, unde semnalul  $p(t)$  este semnalul purtător de pulsație  $\omega_0$ ,  $s_m(t)$  este semnalul modulator de pulsație  $\omega_m$ , iar cu ajutorul potențiometrului alimentat între  $+V_c$  și  $-V_c$  se aplică la pinii respectivi o componentă continuă variabilă, pentru modificarea gradului de modulație în amplitudine.

6.3.2. Se reglează - mai întâi - un grad de modulație  $m < 1$ , astfel încât semnalul MA să arate pe ecranul osciloscopului ca în figura 6.4. Se măsoară indicele de modulație cu relația:

$$m = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \quad (6.5)$$

6.3.3. Se aplică apoi pe intrarea X a osciloscopului semnalul modulator  $s_m(t)$ ; se trece osciloscopul în modul de lucru X-Y, obținându-se o figură Lissajous, ca în fig. 6.4, de forma unui trapez. Se măsoară din nou indicele de modulație în amplitudine folosindu-se relația:

$$m = \frac{B-b}{B+b} \quad (6.6)$$

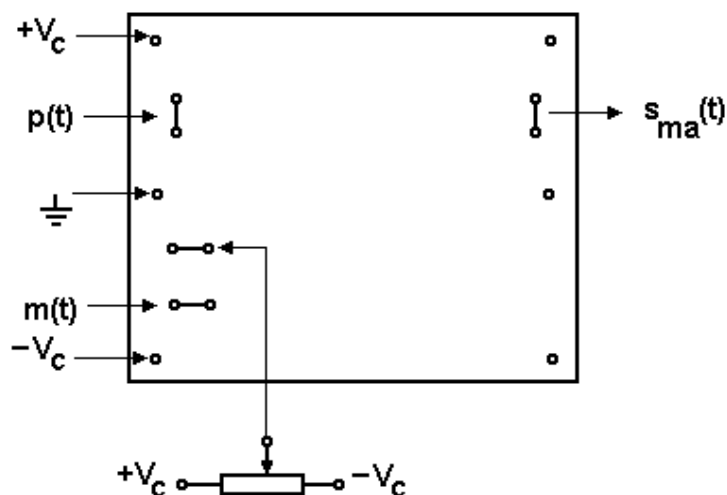


Figura 6.3 Panoul experimental pentru studiul modulației de tip produs

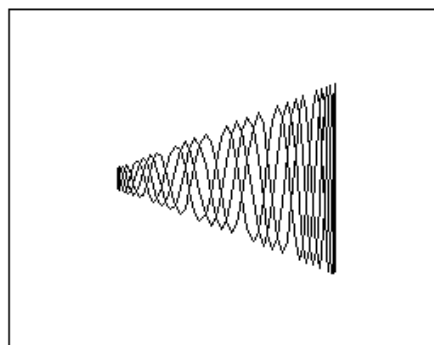
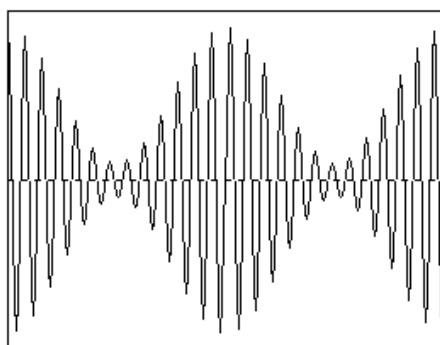


Figura 6.4 Măsurarea gradului de modulație, în situația  $m < 1$

6.3.4. Se aplică semnalul MA și, la intrarea milivoltmetrului selectiv, se măsoară spectrul acestuia și se determină valoarea gradului de modulație  $m$ , ca fiind dublul raportului dintre indicația milivoltmetrului selectiv de la  $f_0 \pm f_m$  și indicația de la  $f_0$ . Se completează tabelul 1.

Tabel 1.

$U_m[V]$	$2A_{\max}$	$2A_{\min}$	$m$	$A_0[dB]$	$A_1[dB]$	$A_{-1}[dB]$	$A_0[V]$	$A_1[V]$	$A_{-1}[V]$	$A_{1t}=mA_0/2$
0.2										
1										
2										

6.3.5. Se reglează un indice de modulație  $m > 1$  astfel încât semnalul MA să arate ca în fig. 6.5. Se refac măsurătorile de indice de modulație de la punctul 2, ținând cont de relațiile:

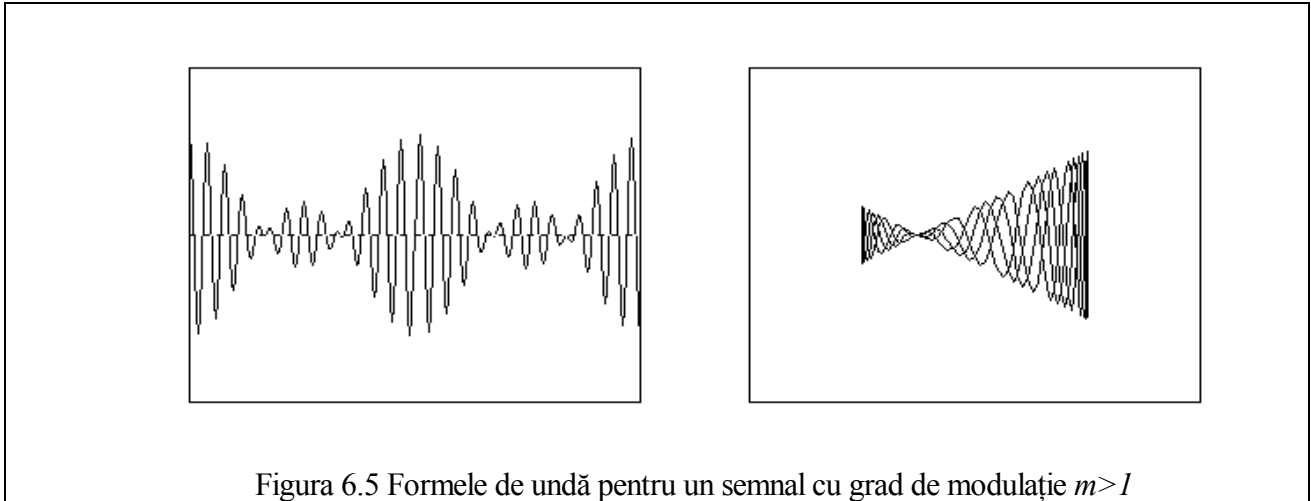
$$m = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (6.7)$$

respectiv

$$m = \frac{B + b}{B - b} \quad (6.8)$$

notațiile  $B$  și  $b$  fiind de data aceasta improprii, deoarece noua figură Lissajous nu mai este un trapez.

6.3.6. Se încearcă obținerea unui semnal MA-PS observând, mai întâi, forma de undă de pe ecranul osciloscopului, și apoi, cu milivoltmetrul selectiv, obținând un minim la frecvența purtătoare.



6.3.7. Se reprezintă grafic diagramele spectrale ale semnalelor MA și MA-PS împreună cu cele teoretice.

## Lucrarea nr.7

## MODULAȚIA IMPULSURILOR ÎN AMPLITUDINE (M.I.A)

**7.1 Obiectivul lucrării** este măsurarea și analiza spectrului de amplitudine al unui semnal purtător în impulsuri modulat în amplitudine.

## 7.2 Semnalul purtător

Se va considera drept semnal de bază, care urmează a fi modulat, un semnal periodic dreptunghiular. Acesta se obține prin repetarea unui impuls dreptunghiular  $s_o(t) = p_{\tau}(t)$ . Se poate scrie:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} s_o(t - iT) \quad (7.1)$$

și

$$S_o(\omega) = \tau E \cdot \frac{\sin \frac{\omega \tau}{2}}{\frac{\omega \tau}{2}} = \tau E \operatorname{sinc} \left( \frac{\omega \tau}{2} \right) \quad (7.2)$$

unde  $E$  este amplitudinea.

Modulația în amplitudine a unui purtător de impulsuri  $s_p(t)$ , cu un semnal modulator  $m(t)$  este reprezentată în figura 7.1.

Semnalul obținut prin înmulțirea directă a celor două semnale  $s_p(t)$  și  $m(t)$  este prezentat în figura 7.1 jos și este considerat, ca fiind obținut prin **MIA naturală**:  $S_{MIAN}(t)$ .

Intrucât dispozitivele logice cu care se realizează eșantionarea nu urmăresc valoarea instantanee a semnalului modulator, ci iau valoarea semnalului modulator din momentul eșantionării  $t=kT$  pentru intervalul de timp  $\tau$ , în locul semnalului din figura 7.1 jos se obține semnalul din figura 7.2 considerat ca fiind obținut prin **MIA uniformă**  $S_{MIAU}(t)$ .

Semnalul  $s(t)$  poate fi dezvoltat în serie Fourier:

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{\tau}{T} E + \sum_{i=1}^{\infty} \left[ 2E \frac{\tau}{T} \cdot S_a \left( i\pi \frac{\tau}{T} \right) \cos i\omega t \right] = \\ &= \frac{\tau}{T} E + \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{2E}{i\pi} \sin \left( i\pi \frac{\tau}{T} \right) \cdot \cos i\omega_o t \right] = A_o + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos i\omega_o t \end{aligned} \quad (7.3)$$

Spectrul obținut este reprezentat în figura 7.3, pentru  $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{4}$ . Dacă factorul de umplere  $\frac{\tau}{T}$  este inversul unui număr întreg, de exemplu  $m$ ,  $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{m}$  toate armonicile de ordin  $n=km$  sunt nule. Această proprietate este utilă pentru reglarea cu precizie a duratei impulsurilor.

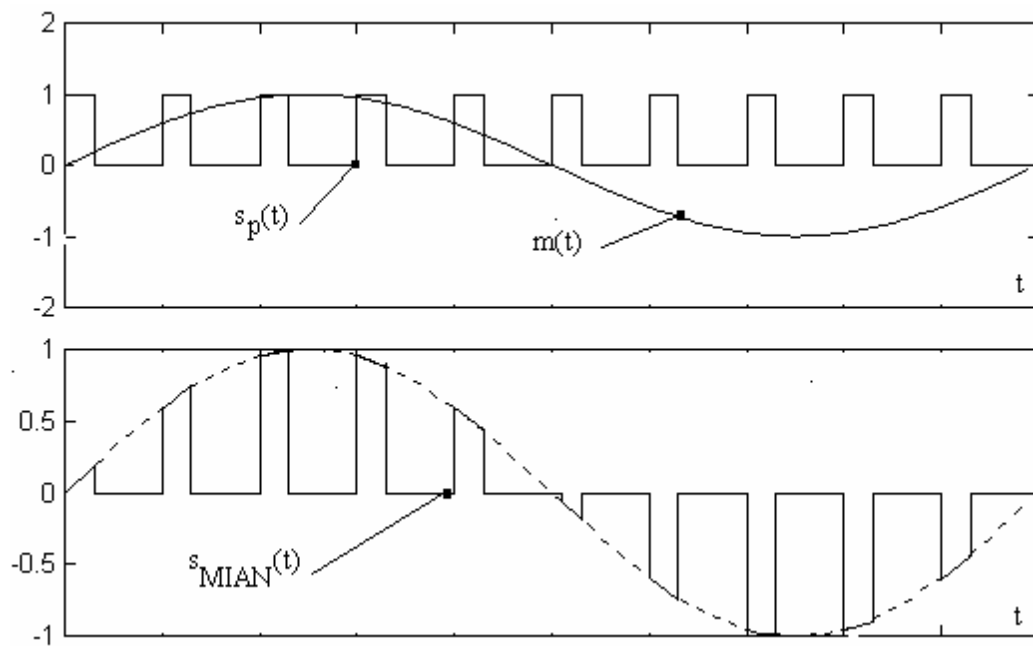


Figura 7.1 Semnalul obținut prin modulația în impulsuri naturala (MIAN)

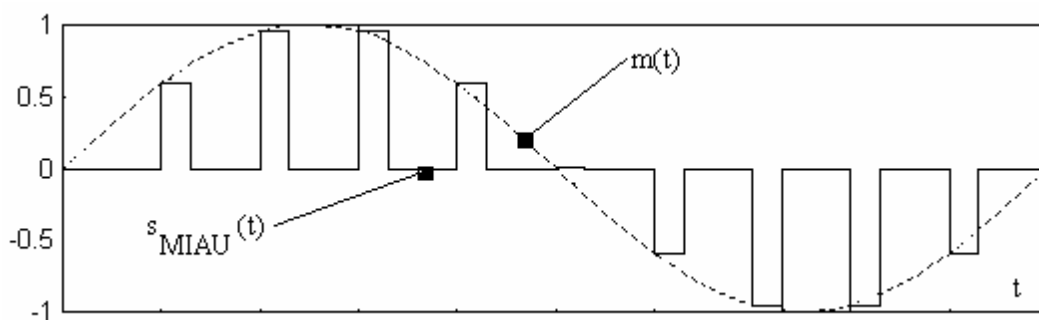


Figura 7.2 Modulația impulsurilor în amplitudine uniformă (MIAU)

### 7.3 Spectrul modulației impulsurilor în amplitudine(MIAN)

Se va nota cu  $f(t)$  semnalul modulator și cu  $g(t)$  semnalul modulat, cu expresia:

$$g(t) = [1 + mf(t)]s(t) \quad (7.4)$$

unde  $m$  are semnificație de *grad de modulație*. Fie  $f(t)$  este un semnal modulator sinusoidal:

$$f(t) = \cos \omega_m t \quad (7.5)$$

$$g(t) = [1 + m \cos \omega_m t]s(t) \quad (7.6)$$

Semnalul  $g(t)$  poate fi scris punând în evidență componentele spectrale, sub forma:

$$g(t) = C_{o,0} + C_{o,1} \cos \omega_m t + \sum_{i=1}^{\infty} \left[ C_{i,0} \cos i \omega_o t + C_{i,1} \cos(i \omega_o + \omega_m)t + C_{i,-1} \cos(i \omega_o - \omega_m)t \right] \quad (7.7)$$

unde s-a notat cu  $C_{i,m}$  amplitudinea componentei pe frecvența  $i\omega_o + m\omega_m$ . Aceste amplitudini sunt date de:

$$C_{o,0} = E \frac{\tau}{T} \quad ; \quad C_{o,1} = mE \frac{\tau}{T}; \quad C_{i,0} = \frac{2E}{i\pi} \sin i\pi \frac{\tau}{T}; \quad C_{i,\pm 1} = \frac{m}{2} \frac{2E}{i\pi} \sin i\pi \frac{\tau}{T} \quad (7.8)$$

În figura 7.3 sunt reprezentate spectrele pentru semnalul nemodulat,  $s(t)$ , și pentru semnalul modulat,  $g(t)$ . S-a considerat cazul particular  $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{4}$ , astfel încât componenta pe frecvența  $4\omega_o$  este nulă. Se constată următoarele:

- componentele de frecvențe  $i\omega_o$ , existente în spectrul lui  $s(t)$ , apar și în spectrul lui  $g(t)$ , cu aceleași amplitudini,  $C_{i,0} = A_i$ ;
- în spectrul semnalului modulat apar- în plus - componente laterale în jurul frecvențelor  $i\omega_o$ . Un asemenea grup format din componentele  $C_{i,0}$ ,  $C_{i+1}$ ,  $C_{i-1}$  reprezintă de fapt spectrul unei oscilații MA cu purtătoarea sinusoidală de frecvență  $i\omega_o$ , cu amplitudinea  $C_{i,0}$  și gradul de modulație  $m$ .
- în spectrul lui  $g(t)$  mai apare și o componentă pe frecvența de modulație,  $C_{0,1}$ . Aceasta permite demodularea semnalului MIA prin filtrarea cu un filtru trece jos, care să separe această componentă.

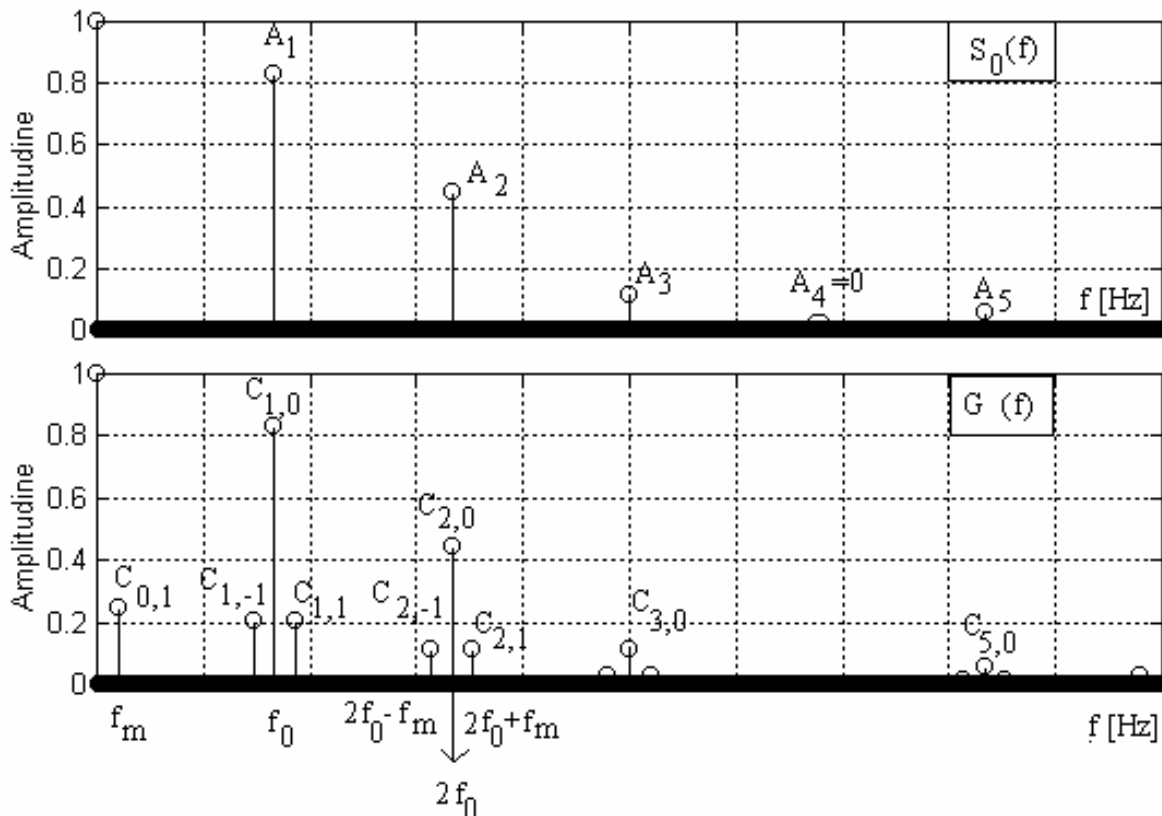


Figura 7.3 Spectrul semnalului purtător (impulsuri) și al semnalului cu modulația impulsurilor în amplitudine,  $\tau=0.03s$ ,  $T=0.12s$ ,  $f_m=10Hz$

## 7.4 Descrierea montajului utilizat

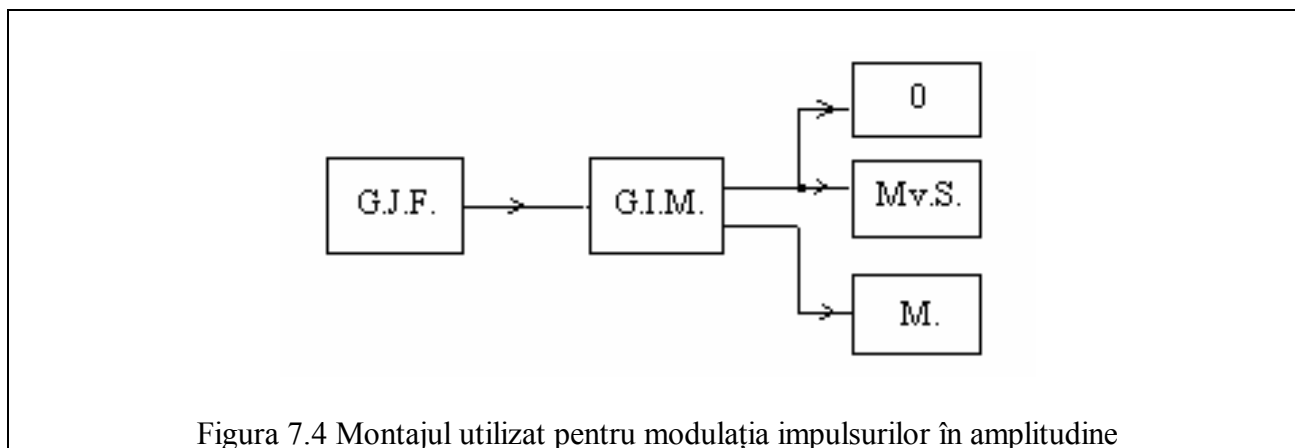
Modulația impulsurilor în amplitudine se realizează cu ajutorul unui circuit de tip poartă. Aceasta este comandată de impulsurile de la ieșirea comparatorului.

Pentru măsurarea mărimii  $m$  se utilizează un filtru trece jos, care selectează componenta pe frecvența  $\omega_m$  a semnalului MIA.

Nivelurile sunt reglate cu ajutorul unor atenuatoare, astfel încât valoarea tensiunii obținute la ieșire este numeric egală cu  $m$ .

## 7.5 Metode de măsură

Pentru realizarea măsurătorilor se utilizează montajul prezentat în figura 7.4, unde s-au notat: G.J.F. - generator de joasă frecvență; G.I.M.- generatorul de impulsuri modulate descris la punctul 6.4, 0 - osciloscop; Mv.S - milivoltmetru selectiv MV61; M - multimetru numeric (sau milivoltmetru de joasă frecvență).



Generatorul de joasă frecvență generează semnalul modulator. Cu ajutorul multimetrului M (în regim de voltmetru de curent alternativ) se măsoară gradul de modulație  $m$ .

Reglarea generatorului pentru a obține parametrii impuși ai semnalului începe cu stabilirea parametrilor impulsurilor nemodulate  $s(t)$ .

Se va presupune că se lucrează cu  $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{4}$ , și cu o frecvență de repetiție  $f_0 = 100$  KHz. Se face mai întâi un reglaj aproximativ, cu ajutorul osciloscopului. Pentru un reglaj precis se procedează în modul următor:

1. se scoate semnalul de modulație;
2. se pune milivoltmetrul selectiv pe frecvența  $f_0 = 100$  KHz;
3. se reglează frecvența generatorului de impuls până când milivoltmetrul selectiv indică prezența fundamentalei;
4. se acordează milivoltmetrul selectiv pe armonica a patra (400 KHz) a semnalului. Se reglează durata impulsului până se obține extincția (micșorarea maximă) a acestei componente.

În final, se aplică generatorul de joasă frecvență și se reglează  $m$ , prin reglarea nivelului generatorului. În realizarea măsurătorilor se are în vedere faptul că indicațiile milivoltmetrului selectiv sunt date în decibeli.

[illegible]

Partea a -II -a

# Circuite și Sisteme

## Lucrarea nr. 1

## FILTRUL DE ORDINUL UNU

## 1.1. Obiectivele lucrării

- determinarea experimentală a caracteristicilor temporale și frecvențiale ale unui filtru RC pasiv de ordinul unu;
- determinarea experimentală a parametrilor filtrului de ordinul unu din caracteristicile temporale și frecvențiale.

## 1.2. Noțiuni teoretice

În domeniul timp, filtrul de ordinul unu este caracterizat de ecuația diferențială:

$$T \frac{dy}{dt} + y = ku \quad (1.1)$$

unde:  $k$  este coeficientul de amplificare și  $T$  este constantă de timp.

Funcția de transfer se obține aplicând transformata Laplace în condiții inițiale nule:

$$H(s) = \frac{k}{Ts + 1} \quad (1.2)$$

În figura 1.1 sunt prezentate funcția pondere și indicială pentru un filtru trece jos de ordinul unu, având parametrii  $k=1$  și  $T=0.1s$ .

Constanta de timp  $T$  reprezintă intervalul de timp după care ieșirea  $y(t)$  a filtrului a atins valoarea  $(1-1/e)$  din regimul staționar, ceea ce corespunde la aproximativ 2/3 din valoarea finală. În domeniul timp, constanta de timp  $T$  se poate determina pe cale grafică în mai multe moduri echivalente:

1. ca tangenta trigonometrică a unghiului dintre axa ordonatelor și tangenta geometrică în origine la curba  $y(t)$ , răspuns indicial;
2. ca intervalul de timp după care semnalul de ieșire  $y(t)$  a atins valoarea  $(1-1/e)$  din valoarea finală, ceea ce corespunde la aproximativ 2/3 din valoarea finală;
3. ca intervalul de timp după care tangenta geometrică, într-un punct A arbitrar, de coordonate  $(t_1, y(t_1))$ , intersectează asimptota orizontală (corespunzătoare regimului staționar) în punctul de abscisă  $B(t_1 + T, k)$ .

O mărime des folosită este **timpul de răspuns**  $t_r$  al filtrului. Se definește ca fiind intervalul de timp necesar ca semnalul de ieșire al filtrului să ajungă la regimul staționar cu o aproximație de  $\pm 5\%$  din momentul aplicării semnalului de intrare, după care - mai departe - semnalul nu mai variază cu mai mult de 5% din regimul staționar. Cum  $5\% \cong 1/(e^3)$ , rezultă că timpul de răspuns la 5% este egal cu de trei ori constanta de timp  $T$ .

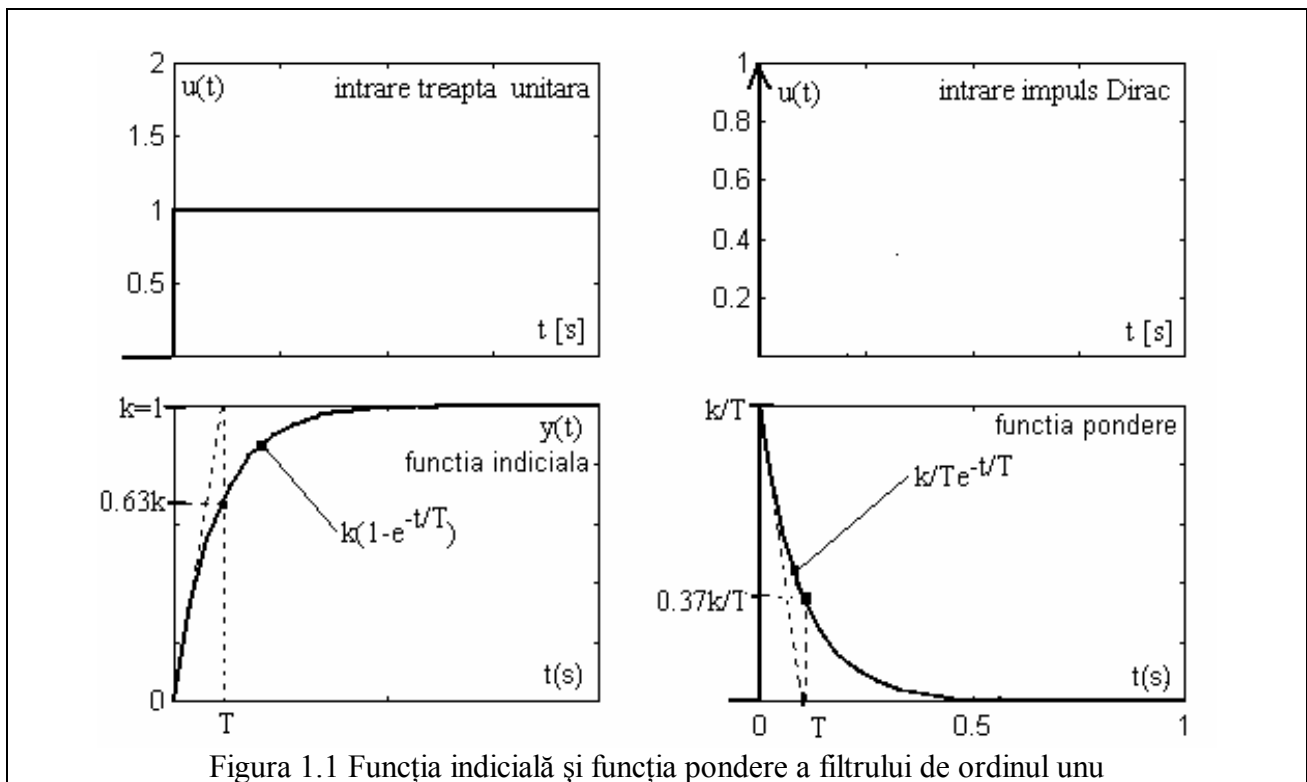


Figura 1.1 Funcția indicială și funcția pondere a filtrului de ordinul unu

Caracteristicile logaritmice de frecvență se obțin făcând  $s=j\omega$  și reprezentând  $A_{dB}=20 \lg |H(j\omega)|$  și  $\arg(H(j\omega))$  în funcție de frecvență. În figura 1.2 sunt prezentate aceste caracteristici, cunoscute și sub numele de caracteristicile Bode, iar în figura 1.3 este trasată caracteristica Nyquist.

În domeniul frecvență, parametrii filtrului se determină astfel:

- constanta  $k$  este valoarea câștigului la frecvența zero,  $k=A_{dB}|_{f=0}$ ;
- constanta de timp este  $T=1/2\pi f_f$ , unde  $f_f$  este frecvența de frângere a caracteristicii asimptotice, corespunzătoare unei atenuări de 3dB față de valoarea de la joasa frecvență ( $f=0$  Hz).

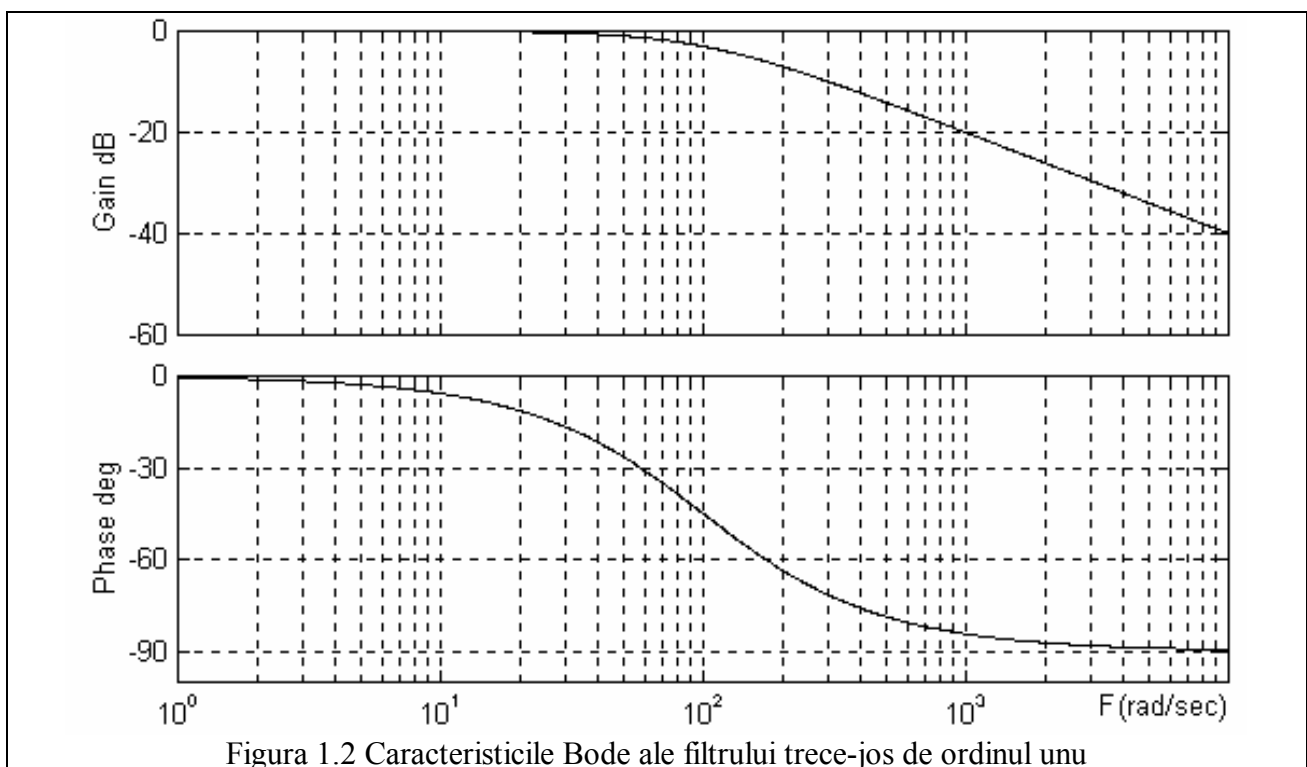


Figura 1.2 Caracteristicile Bode ale filtrului trece-jos de ordinul unu

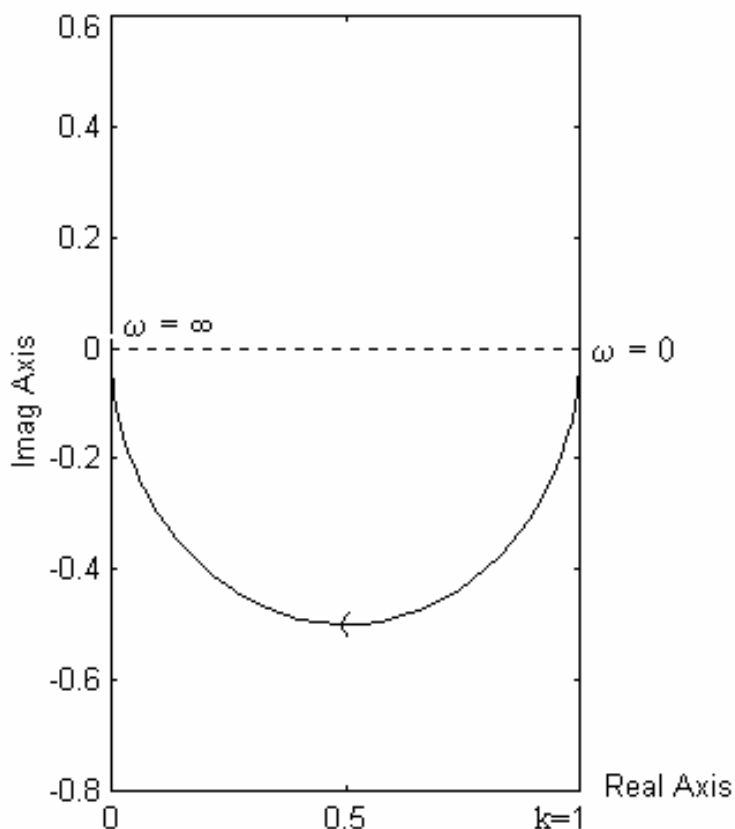


Figura 1.3. Caracteristica Nyquist a filtrului de ordinul unu

În figura 1.4 se prezintă răspunsul filtrului de ordinul unu pentru un semnal de intrare dreptunghiular.

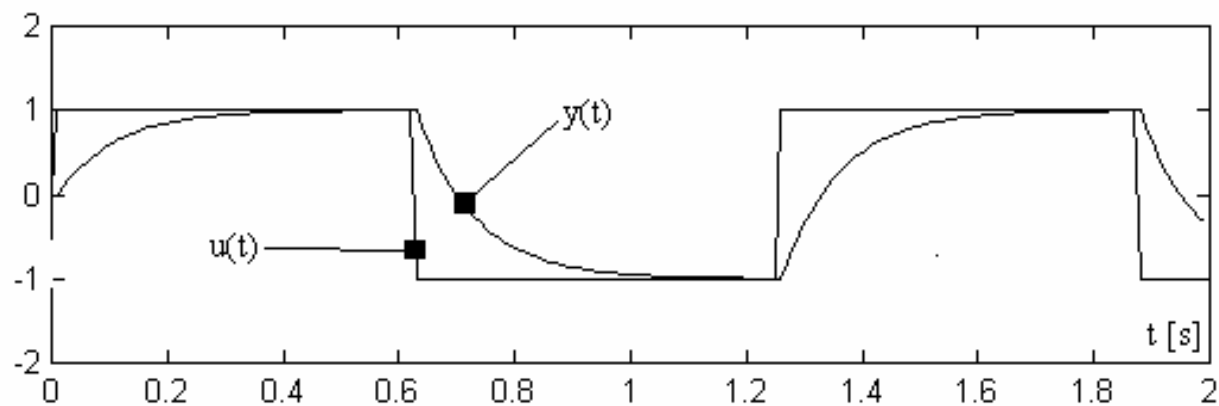
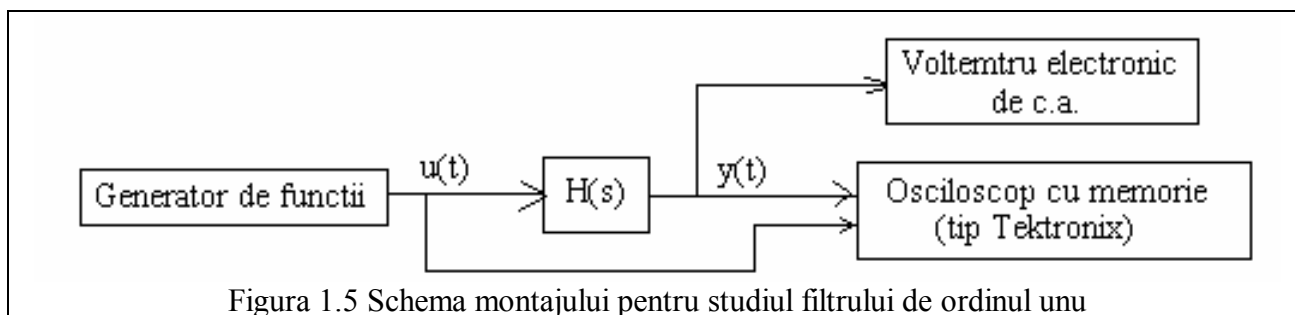


Figura 1.4. Răspunsul filtrului de ordinul unu la un semnal de intrare dreptunghiular

**1. 3. Schema montajului** este prezentată în figura 1.5, în care intervin următoarele aparate de măsură:

- generator de funcții (impulsuri, semnal dreptunghiular și sinusoidal), cu sistem de decalare a fazei (pentru determinarea caracteristicii de fază) (tip Orion);
- osciloscop cu memorie (tip Tektronix);
- voltmetru electronic de c.a;
- panoul experimental, reprezentat prin  $H(s)$ .



#### 4. Modul de lucru

- 4.1. Se calculează constanta de timp teoretică  $T_t = RC$  și frecvența de frângere a caracteristicii logaritmice câștig-frecvență  $f_t = 1/(2\pi T_t)$ . Indicele "t" evidențiază valoarea teoretică.
- 4.2. Se aplică la intrare un semnal format din impulsuri cu durata  $\tau \ll T$  (de exemplu,  $T/10$ ), se vizualizează și se desenează răspunsul filtrului.
- 4.3. Se aplică la intrarea filtrului un semnal dreptunghiular, se vizualizează și se desenează răspunsul filtrului, la frecvențele  $f_1 = f_t/2$ ,  $f_2 = f_t$  și  $f_3 = 10f_t$ .
- 4.4. Din răspunsurile obținute la punctele 1 și 2 se calculează parametrii  $k$  și  $T$ .
- 4.5. Se aplică semnal sinusoidal la intrare cu amplitudinea de 1V. Se vizualizează și se desenează răspunsul filtrului la frecvențele  $f_1$ ,  $f_2$  și  $f_3$ .
- 4.6. Se modifică frecvența semnalului sinusoidal de la intrare și se completează tabelul 1, pentru determinarea caracteristicilor Bode, pe lungimea a trei decade: de la 10 Hz la 1000Hz. În tabel sunt prezentate frecvențele numai pentru prima decadă. Pentru celelalte decade valorile se obțin prin multiplicare cu 10, respectiv 100.

Tabel 1

f [Hz]	10	13	17	21.5	28	36	46	60	77	100
$\omega$ [rad/s]										
U [V]										
Y [V]										
A=Y/U										
A <sub>dB</sub>										
$\phi$ [rad/s]										

- 4.7. Se trasează caracteristicile Bode teoretice și experimentale. Din caracteristica experimentală se determină  $k$  și  $T$ . Se completează tabelul 2.
- 4.8. Se trasează grafic caracteristica Nyquist.

Tabel 2

	Teoretic	Din domeniul timp	Din domeniul frecvență
$k$			
$T$			

## Lucrarea nr.2\_

## ELEMENTE DERIVATOARE LA LIMITĂ CAUZALE ȘI CAUZALE

## 2.1. Obiectivele lucrării

- determinarea experimentală a caracteristicilor temporale și frecvențiale pentru elementele derivatoare la limită cauzale și cauzale;
- determinarea experimentală a parametrilor unui element derivator la limită cauzal.

## 2.2. Noțiuni teoretice

Funcția de transfer a derivatorului la limită cauzal este:

$$H_1(s) = \frac{T_d s}{T_1 s + 1} \quad (2.1)$$

iar a derivatorului cauzal:

$$H_2(s) = \frac{T_d s}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (2.2)$$

în care  $T_d$ ,  $T_1$  și  $T_2$  sunt constante de timp.

În figurile 2.1, 2.2 și 2.3 sunt date: răspunsul indicial, caracteristicile Nyquist și Bode, respectiv răspunsul la un semnal rampă și la un semnal dreptunghiular, ale derivatorului la limită cauzal. Parametrii derivatoarelor sunt:  $T_d=0.1$ ;  $T_1=0.05$ ;  $T_2=0.001$ .

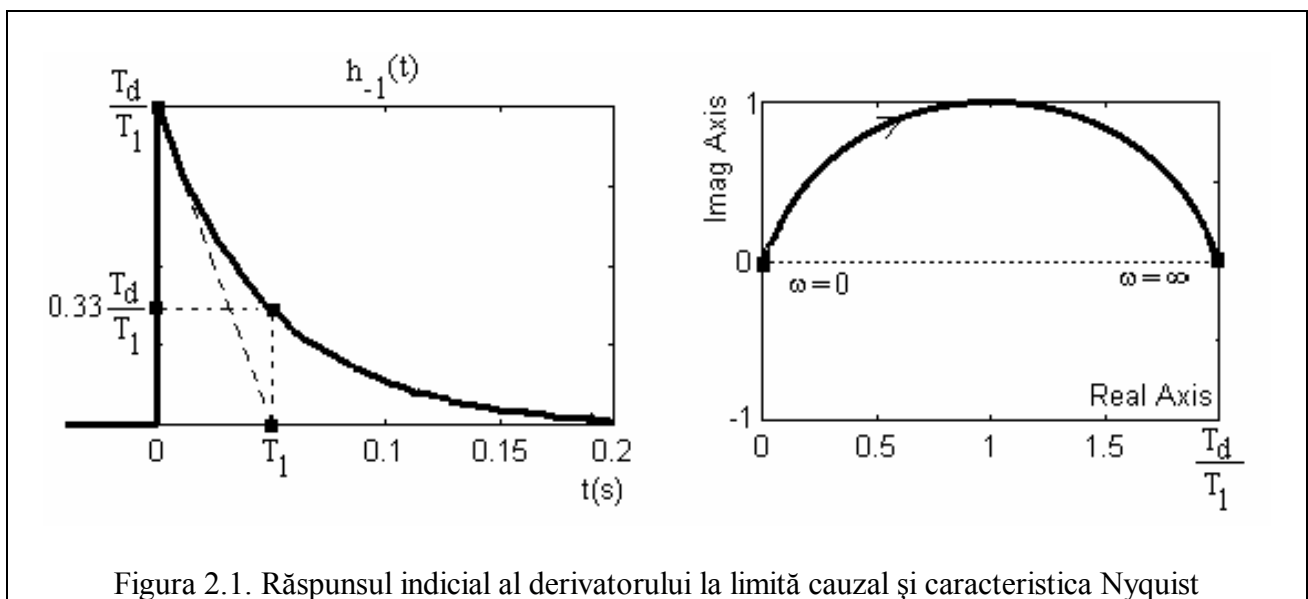


Figura 2.1. Răspunsul indicial al derivatorului la limită cauzal și caracteristica Nyquist

Pentru derivatorul cauzal, în figurile 2.4 și 2.5 sunt date forma răspunsului indicial și caracteristicile Bode  $A_{dB}(\omega)$ .

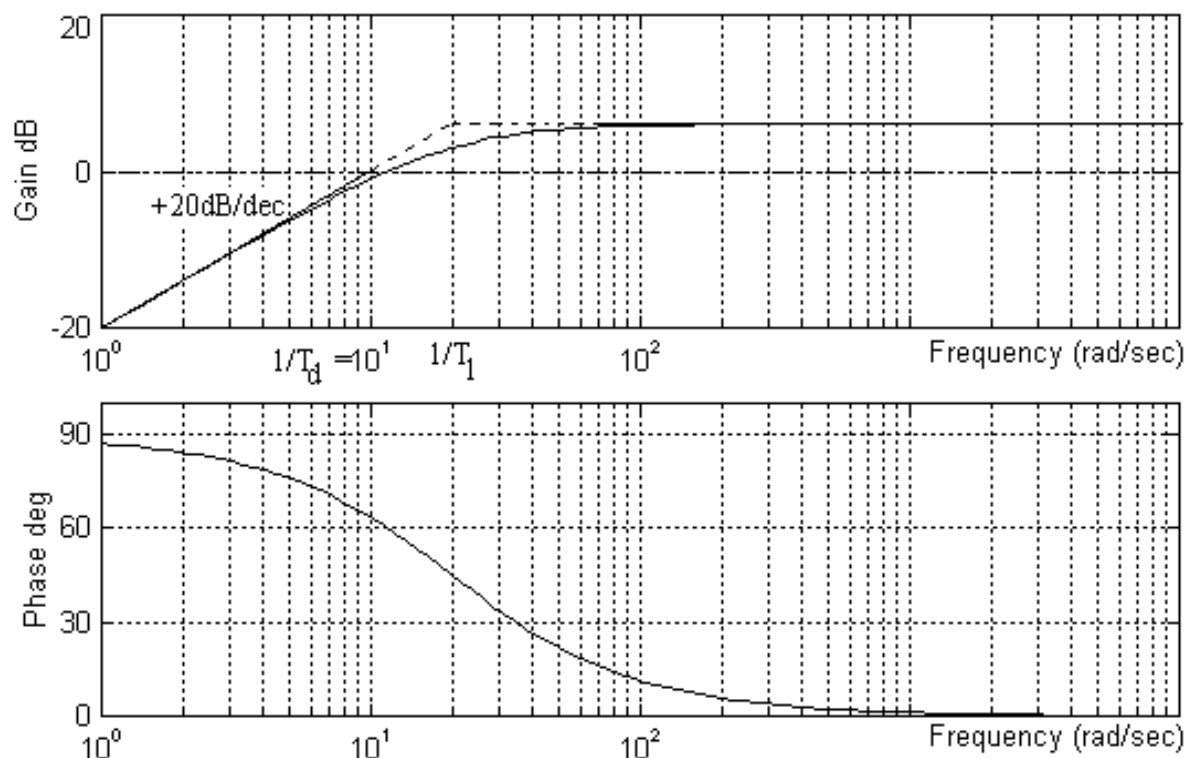


Figura 2.2 Caracteristicile Bode ale derivatorului la limită cauzal

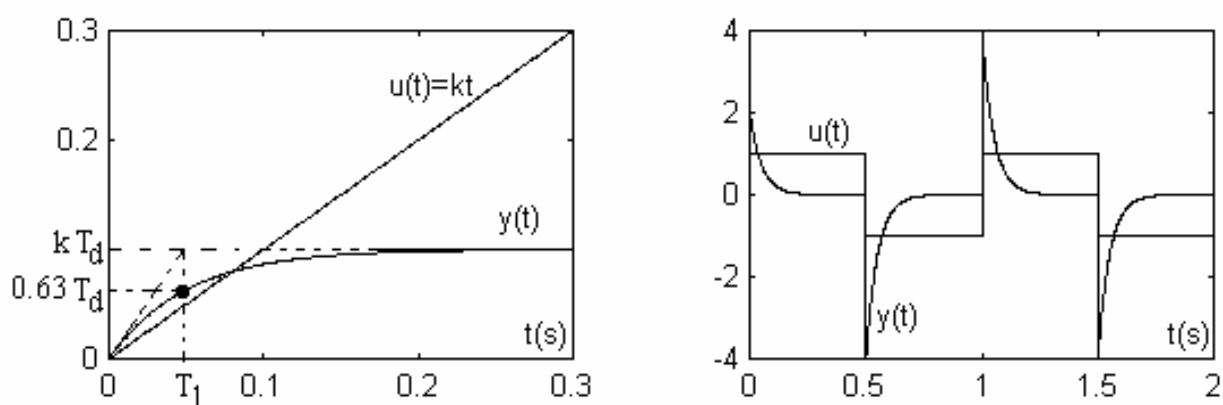


Figura 2.3 Răspunsul derivatorului la limită cauzal la un semnal rampă și la un semnal dreptunghiular

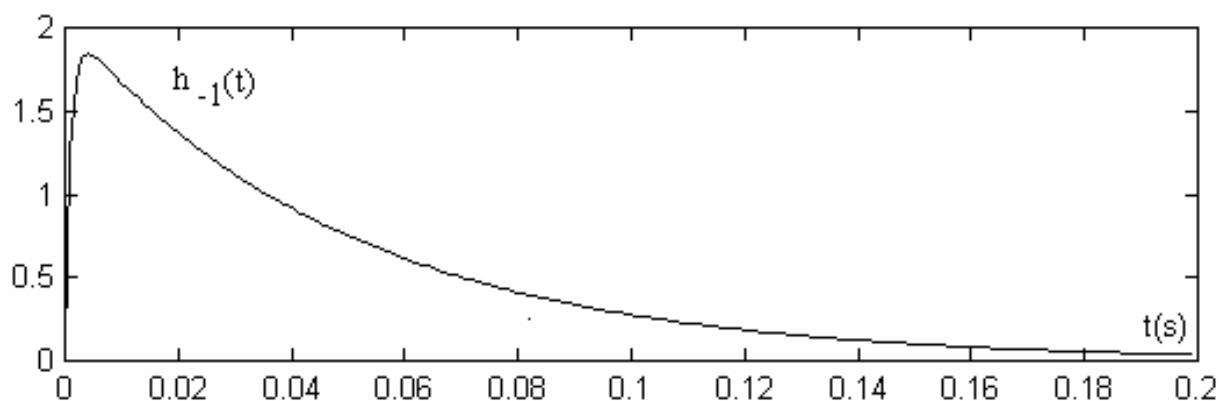


Figura 2.4 Răspunsul indicial al derivatorului cauzal

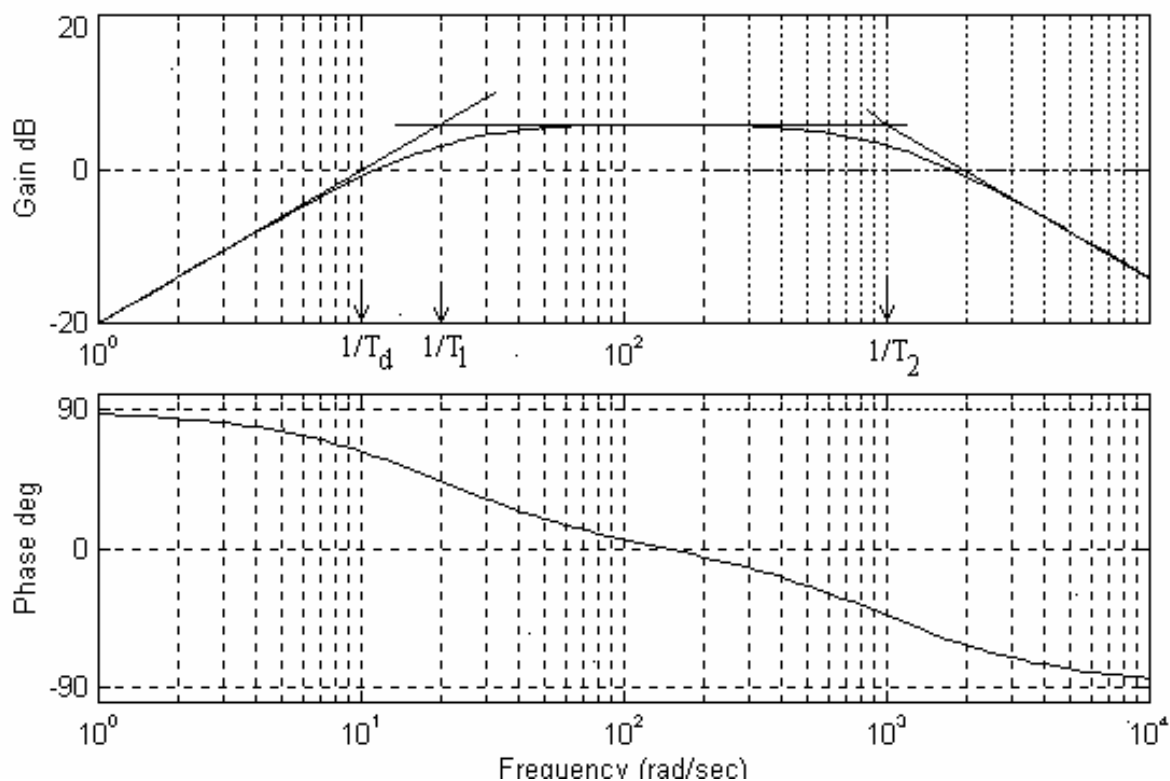


Figura 2.5. Caracteristicile Bode ale derivatorului cauzal

**2.3. Schema montajului** este dată în figura 2.6, în care intervin următoarele aparate de măsură:

- generator de funcții (impulsuri, semnal dreptunghiular și sinusoidal), cu sistem de decalare a fazei (pentru determinarea caracteristicii de fază) (tip Orion);
- osciloscop cu memorie (tip Tektronix);
- voltmetru electronic de c.a.;
- panoul experimental, reprezentat prin  $H(s)$ .

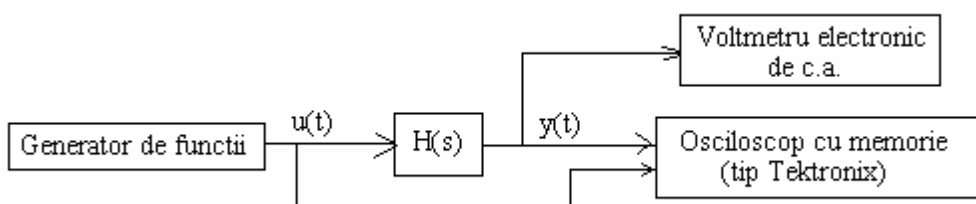


Figura 6. Schema montajului pentru studiul derivatoarelor

## 2.4. Modul de lucru

### A. Studiul experimental al derivatorului la limita cauzal

- 4.1. Se scrie funcția de transfer a derivatorului de pe panoul experimental. Se determină constantele de timp teoretice  $T_d$  și  $T_I$ .
- 4.2. Se aplică la intrare un semnal dreptunghiular și se determină cu osciloscopul răspunsul la semnal treaptă al derivatorului, la pulsațiile  $\omega_1 = \omega_T/5$ ,  $\omega_2 = \omega_T$  și  $\omega_3 = 5\omega_T$ . Pulsația  $\omega_T$  este pulsația de tăiere a axei frecvențelor și se calculează cu relația  $\omega_T = 1/T_d$ . Se memorează și se salvează, prin tipărire la imprimantă, răspunsurile de pe ecranul osciloscopului. Din aceste forme de undă, se determină grafic parametrii  $T_d$  și  $T_I$ .
- 4.3. Se aplică la intrarea derivatorului semnal triunghiular și se repetă punctul 4.2.
- 4.4. Se aplică la intrare semnal sinusoidal cu amplitudine de 0.1V și se completează tabelul 1, pe lungimea a trei decade: de la 10 Hz la 1000Hz. În tabel sunt prezentate frecvențele numai pentru prima decadă. Pentru celelalte decade valorile se obțin prin multiplicare cu 10, respectiv 100.
- 4.5. Se trasează caracteristicile Bode ale derivatorului. Se deduc, din această caracteristică, parametrii  $T_d$  și  $T_I$ .
- 4.6. Se completează tabelul 2, ce conține valorile parametrilor derivatorului, deduse din domeniul timp și din domeniul frecvență.

Tabel 1

f [Hz]	10	13	17	21.5	28	36	46	60	77	100
$\omega$ [rad/s]										
U [V]										
Y [V]										
A=Y/U										
A [dB]										
$\phi$ [rad/s]										

Tabel 2

	Teoretic	Din domeniul timp	Din domeniul frecvență
$T_1$			
$T_2$			
$T_d$			

### B. Studiul experimental al derivatorului cauzal

- 4.7 Se repetă punctele 4.2-4.6 pentru derivatorul cauzal.

**Lucrarea nr. 3****CIRCUITE INTEGRATOARE CU AMPLIFICATOARE OPERAȚIONALE****3.1. Obiectivul lucrării**

Determinarea experimentală a modelelor în domeniul timpului și în domeniul frecvență pentru elementul integrator.

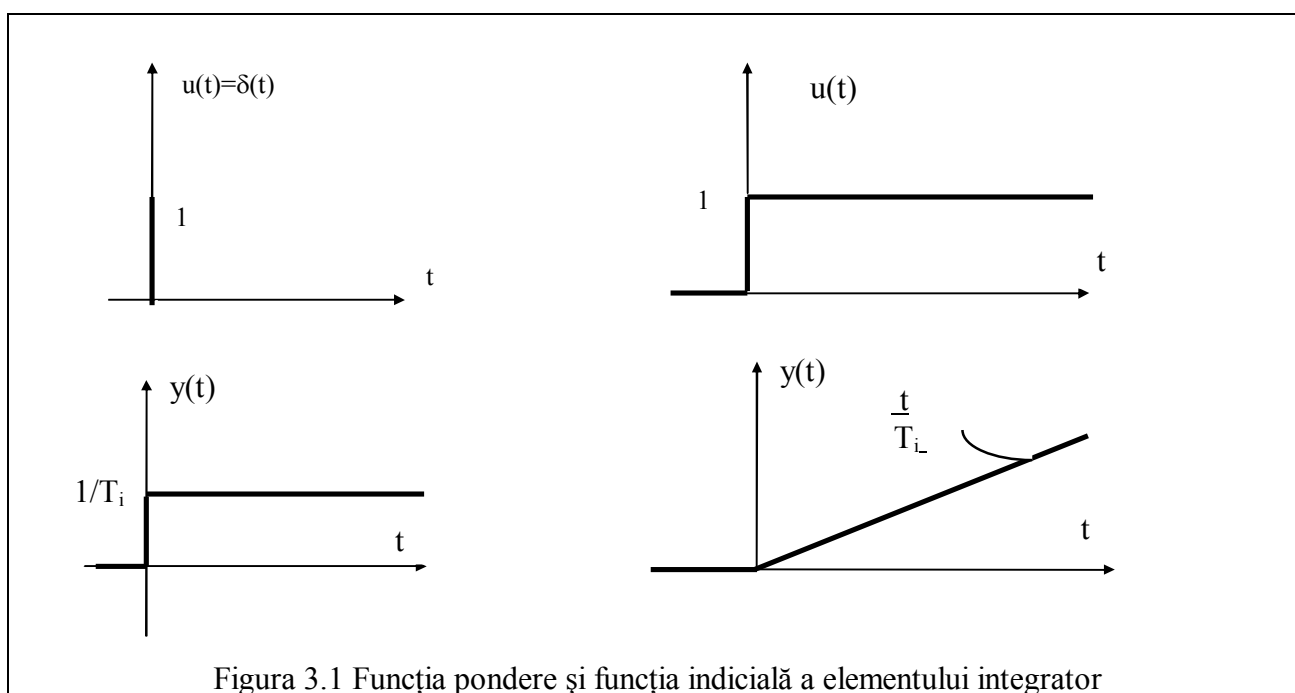
**3.2. Noțiuni teoretice**

Modelul în domeniul “s”, funcția de transfer a integratorului este:

$$H(s) = \frac{1}{T_i s} = \frac{k_v}{s}, \quad (3.1)$$

unde  $T_i$  este constanta de timp de integrare [s] și  $k_v$  este coeficient de viteză [ $s^{-1}$ ].

În figura 3.1 sunt prezentate funcția pondere respectiv funcția indicială pentru elementul integrator.



Se observă că  $T_i$ , constanta de integrare, se poate defini ca timpul necesar semnalului de ieșire să înregistreze o variație egală cu valoarea semnalului de intrare, când acesta variază în treaptă.

În figura 3.2 sunt reprezentate caracteristicile Bode ale elementului integrator. În figura 3.3. este prezentat răspunsul integratorului pentru semnal de intrare dreptunghiular.

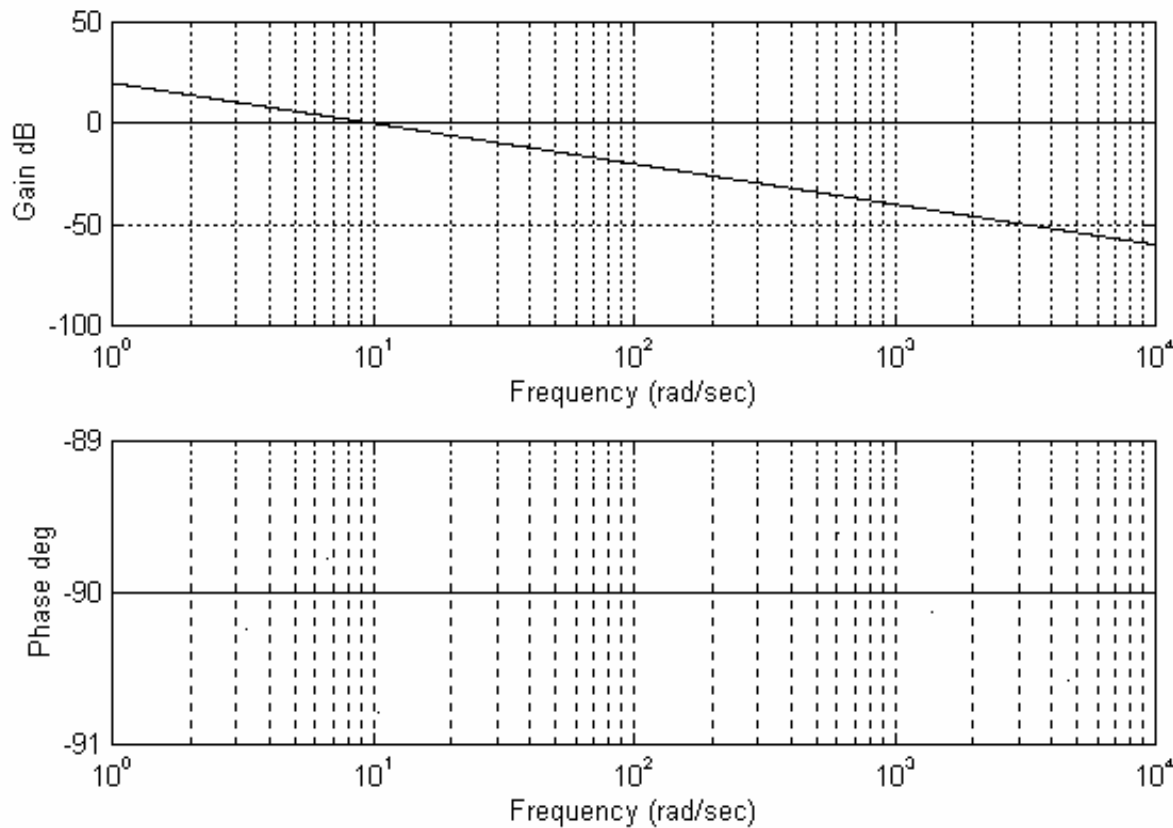


Figura 3.2 Caracteristicile Bode ale elementului integrator cu  $T_i=0.1s$

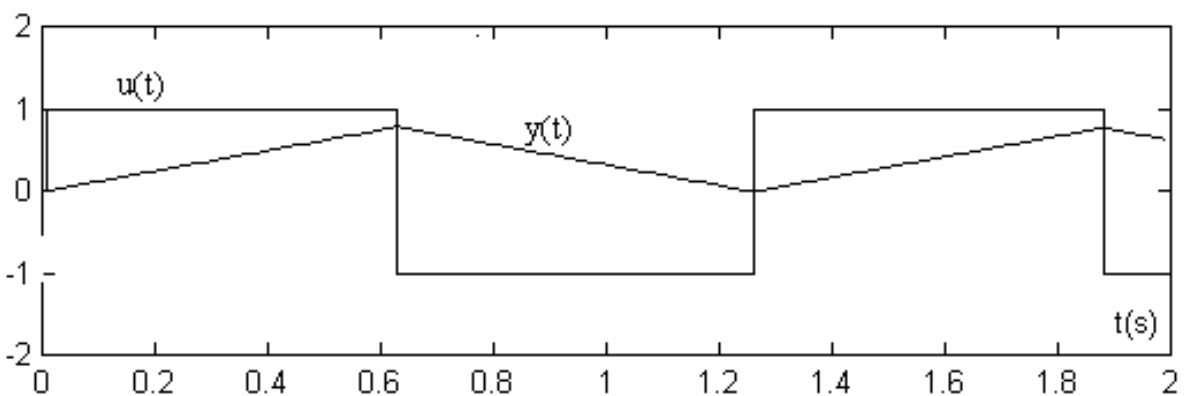


Figura 3.3 Răspunsul integratorului la un semnal de intrare dreptunghiular

**3.3 Schema utilizată** pentru efectuarea măsurărilor experimentale este dată în figura 3.4. La intrare se utilizează, consecutiv, un generator de impulsuri și un generator de funcții.

Se vor studia două tipuri de circuite integratoare, prezentate în figura 3.5. Cele două circuite integratoare vor fi denumite  $I_1$  respectiv  $I_2$ . Integratoarele sunt realizate cu amplificatoare operaționale alimentate simetric la  $\pm 15$  V. Componentele au valorile:  $C=0.33 \mu F$ ,  $R=13 K\Omega$  și  $R_1=20 K\Omega$ .

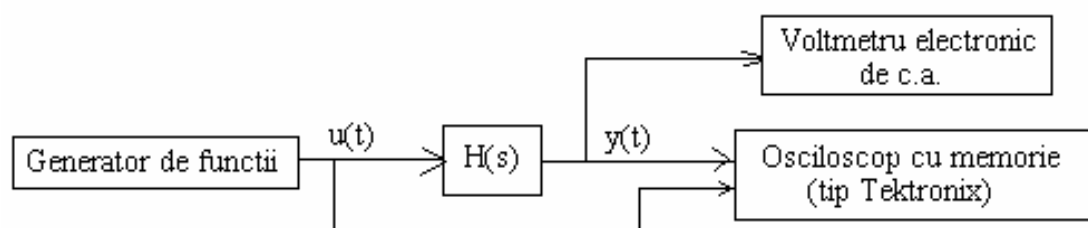


Figura 3.4. Schema montajului pentru studiul integratorului

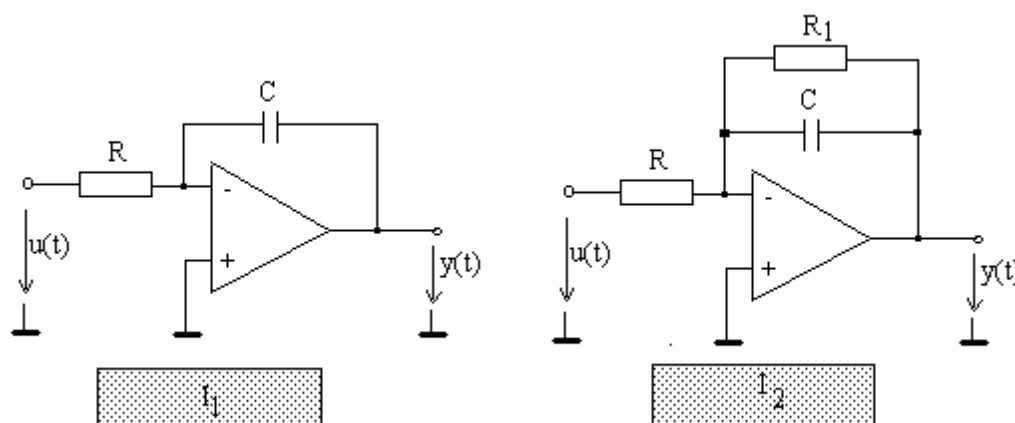


Figura 3.5 Schema electrică a integratoarelor studiate

### 3.4. Modul de lucru

- 3.4.1. Se scrie funcția de transfer a integratorului  $I_1$ . Se calculează constanta de integrare  $T_i = RC$  și frecvența de frângere  $f_{fi} = 1/T_i$ .
- 3.4.2. Se aplică la intrarea circuitului un tren de impulsuri cu polaritate dublă, de la generatorul de impulsuri, cu factor de umplere  $\tau/T = 0.1$  și  $T = 10T_i$ . Se vizualizează cu osciloscopul semnalele de intrare și de ieșire. Se desenează formele de undă.
- 3.4.3. Se aplică la intrare impulsuri pozitive de frecvență joasă, de exemplu  $T = 20T_i$ , și se extrage răspunsul corespunzător unui ciclu de baleiaj al osciloscopului. Se concepe funcționarea unui generator de semnal în scară.
- 3.4.4. Se cuplează la intrare generatorul de funcții. Se aplică la intrarea circuitului semnal dreptunghiular și se extrage graficul răspunsului obținut pe osciloscop, pentru frecvențele  $f_1 = f_{fi}/2$ ,  $f_2 = f_{fi}$  și  $f_3 = 2f_{fi}$ . Se deduce din grafic, constanta de timp de integrare  $T_i$ .
- 3.4.5. Se aplică la intrare semnal triunghiular și se explică răspunsul obținut pe osciloscop, la cele trei frecvențe.

3.4.6. Se trasează caracteristicile logaritmice de frecvență, utilizând tabelul 1, pe lungimea a trei decade. În tabelul 1 sunt date frecvențele numai pentru prima decadă.

3.4.7. Se trasează caracteristicile logaritmice de frecvență  $A_{dB}(\omega)$  și  $\varphi(\omega)$ .

3.4.8. Se deduce  $T_i$  din reprezentarea grafică a caracteristicilor Bode, și se compară cu rezultatele obținute la punctele 1 și 4. Se completează tabelul 2.

3.4.9. Se repetă punctele 1-7 pentru integratorul  $I_2$ .

Tabel 1

f [Hz]	10	13	17	21.5	28	36	46	60	77	100
$\omega$ [rad/s]										
U [V]										
Y[V]										
A=Y/U										
A [dB]										
$\varphi$ [rad/s]										

Tabel 2

	Teoretic	Din domeniul timp	Din domeniul frecvență
$T_{i1}$			
$T_{i2}$			
$k$ (amplificarea pentru $I_2$ )			

**Lucrarea nr.4**

## FILTRUL TRECE JOS DE ORDINUL DOI (ELEMENTUL OSCILANT)

**4.1. Obiectivele lucrării**

- determinarea experimentală a caracteristicilor temporale și frecvențiale ale filtrului de ordinul doi;
- deducerea experimentală a parametrilor filtrului din caracteristicile temporale și frecvențiale.

**4.2. Noțiuni teoretice**

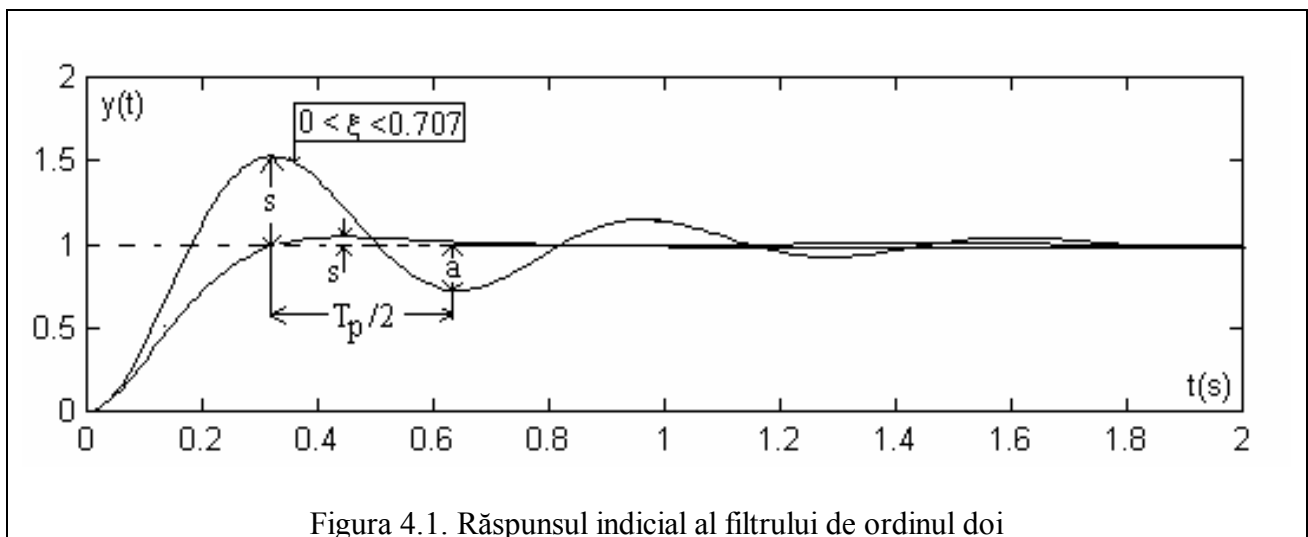
Funcția de transfer a filtrului de ordinul doi este:

$$H(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} = k \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.1)$$

în care  $k$  este coeficientul de amplificare,  $T$  - constanta de timp,  $\xi$  - factorul de amortizare (subunitar) și  $\omega_n = 1/T$  este pulsația naturală.

În figura 4.1 este dată funcția indicială (răspunsul filtrului la o intrare treaptă unitară). Pentru  $0 < \xi < 1/\sqrt{2} = 0.707$ , funcția indicială are un caracter oscilant. Perioada proprie  $T_p$  este:

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} \quad ; \quad \omega_p = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.2)$$



Factorul de amortizare  $\xi$  se poate exprima în funcție de  $s$  și  $a$  cu relația:

$$\xi = \frac{\ln(s/a)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(s/a))^2}} \quad (4.3)$$

Pentru  $1/\sqrt{2} = 0.707 < \xi < 1$  răspunsul nu are oscilații. La  $\xi = 1/\sqrt{2} = 0.707$  se obține  $s = 4\%$  (din K). Variabila  $s$  depinde în mod univoc de  $\xi$ :

$$s = \exp\left(-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \cdot 100 \quad (4.4)$$

În figura 4.2 sunt prezentate caracteristicile Bode ale elementului oscilant. Pentru  $\xi < 0.707$ , caracteristica  $A_{dB}(\omega)$  are un maxim la frecvența de rezonanță:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \quad (4.5)$$

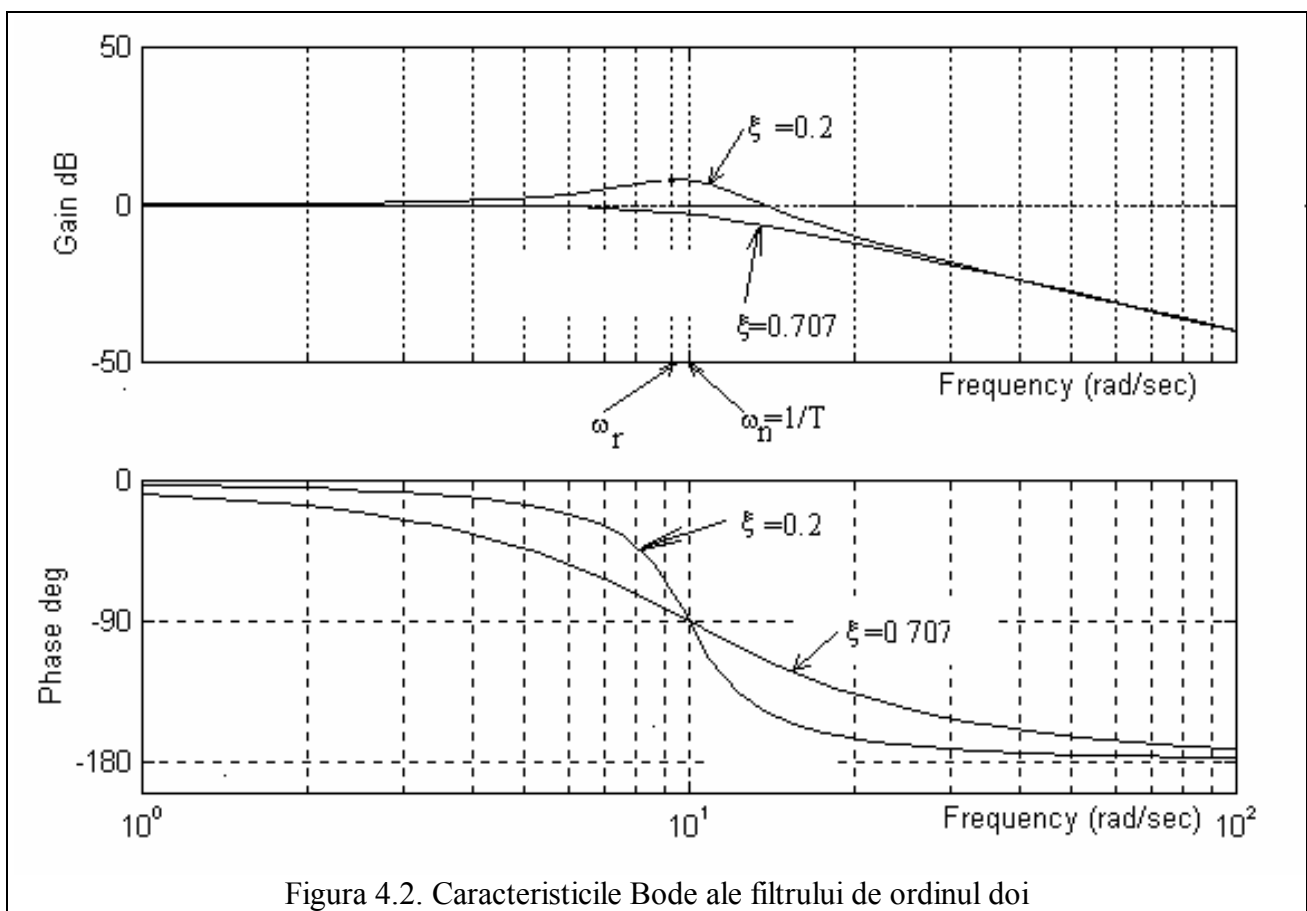


Figura 4.2. Caracteristicile Bode ale filtrului de ordinul doi

Definind factorul de rezonanță  $Q$  prin relația:

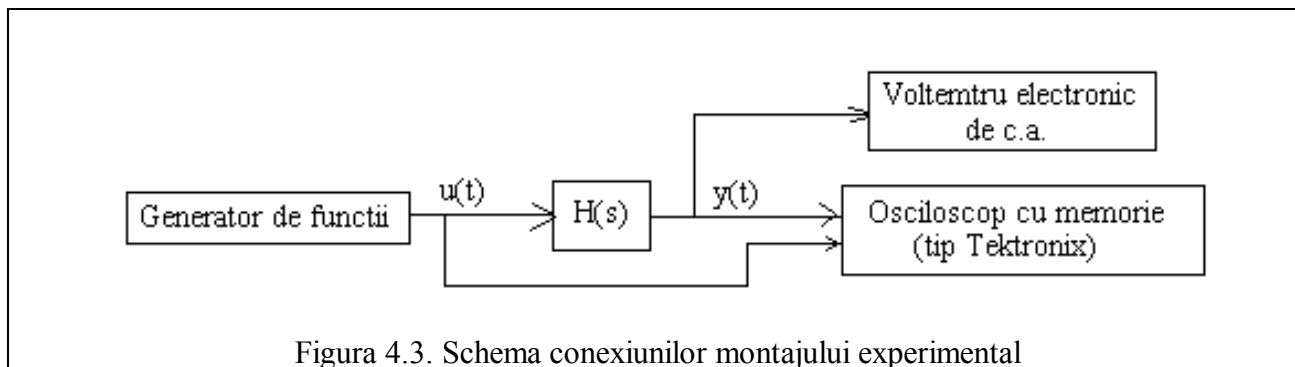
$$Q = \frac{A_{\max}}{k}, \quad A_{\max} = 10 A_{dB}(\omega_r) / 20 \quad (4.6)$$

variabila  $Q$  depinde univoc de  $\xi$  prin relația:

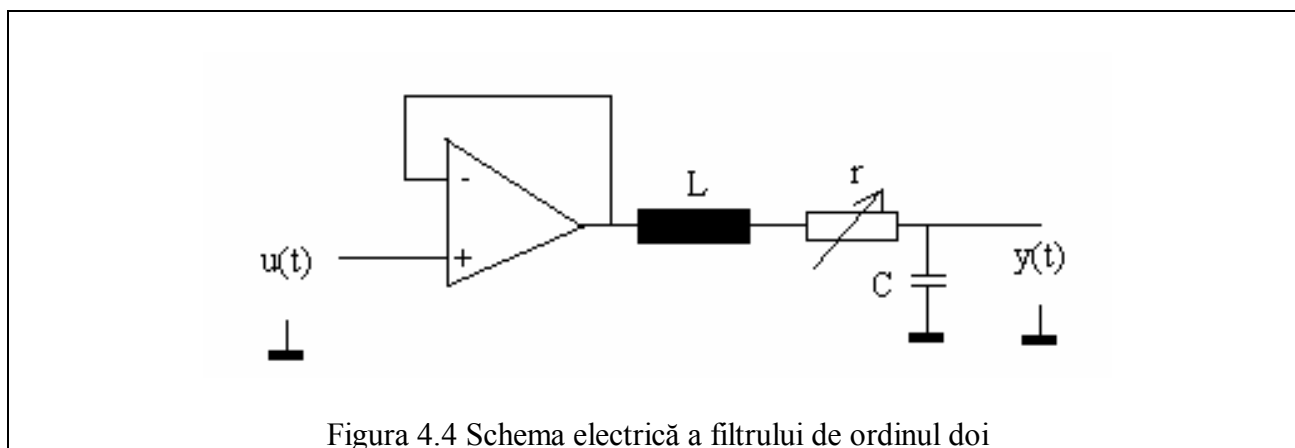
$$Q = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (4.7)$$

Când elementul oscilant se utilizează ca filtru trece jos de ordinul doi (pentru atenuarea componentelor de înaltă frecvență utilizând porțiunea descrescătoare a caracteristicii amplitudine-frecvență, cu panta -40dB/dec.) se adoptă  $\xi=0.707$ .

**4.3. Schema montajului** este dată în figura 4.3.



Filtrul are schema din figura 4.4. Alimentarea amplificatorului operațional se face cu tensiune simetrică de  $\pm 10V$ .



#### 4.4. Modul de lucru

4.4.1. Se scrie funcția de transfer a filtrului. Se determină factorul de amplificare, constanta de timp și factorul de amortizare pentru filtrul din figura 4.4, comparându-se cu relațiile

$$T = \sqrt{LC} \quad \xi = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4.8)$$

4.4.2. Se cunosc:  $L=10.8 \text{ H}$ ,  $C=30\text{nF}$ . Se va ține seama și de rezistența ohmică a bobinei  $r_L=150 \Omega$ .

4.4.3. Se aplică la intrare un semnal dreptunghiular și se determină cu osciloscopul răspunsul la semnal treaptă al filtrului, pentru trei valori distincte ale factorului de amortizare  $\xi=0.2, 0.7$  și  $0.9$ , la pulsațiile  $\omega_1=\omega_T/5$ ,  $\omega_2=\omega_T$  și  $\omega_3=5\omega_T$ . Pulsația  $\omega_T$  este pulsația de tăiere (frângere) și este egală cu pulsația naturală  $\omega_n$ . Modificarea valorii parametrului  $\xi$  se obține din cutia de rezistoare ce determină rezistența variabilă.



**Lucrarea nr. 5**

## CONVERSIA: CARACTERISTICĂ DE FRECVENȚĂ - FUNCȚIE DE TRANSFER

**5.1. Obiectivele lucrării**

- efectuarea conversiei: caracteristică de frecvență - funcție de transfer, pornind de la o caracteristică de frecvență determinată experimental, pentru un sistem de fază minimă;
- validarea experimentală a conversiei.

**5.2. Noțiuni teoretice**

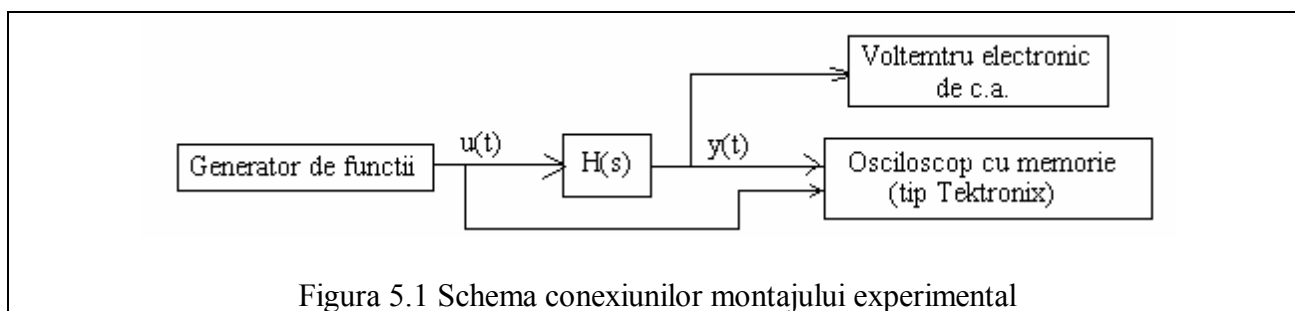
La un sistem de fază minimă, caracteristica de amplificarea determină complet modelul matematic al sistemului respectiv, întrucât nu există în structura acestuia elemente pur defazoare.

Metodologia de conversie se bazează pe aproximarea caracteristicii Bode, dedusă experimental, printr-o caracteristică asimptotică, liniară pe porțiuni. Pantele din caracteristica asimptotică trebuie să fie de  $\pm k$  20 dB/decadă. Principalele etape ale metodologiei sunt:

1. se aproximează caracteristica logaritmică  $A_{dB}(\omega)$  printr-o caracteristică asimptotică;
2. se examinează comportarea asimptotică a caracteristicii pentru  $\omega \rightarrow 0$  și se deduce factorul monom din funcția de transfer;
3. se deduc factorii de forma binom din funcția de transfer, pornind de la pulsațiile de frângere ale caracteristicii asimptotice. Dacă frângerea caracteristicii asimptotice (schimbarea de pantă) este de 20 dB/dec., factorul respectiv se ia de forma  $(s/\omega_f + 1)$ , unde  $\omega_f$  este pulsația de frângere. Dacă frângerea este de +40 dB/dec. și nu există rezonanță (fapt care se constată din caracteristica de frecvență inițială), factorul respectiv se ia de forma  $[(s/\omega_f)^2 + 2\xi s/\omega_f + 1]$ , cu  $\xi=0.7$ . Dacă variațiile de pantă sunt negative, factorii respectivi se consideră la numitorul funcției de transfer; dacă sunt pozitivi, ei se plasează la numărătorul funcției de transfer.

În acest fel, se obține o funcție de transfer  $\hat{H}(s)$ , căreia îi corespunde o caracteristică de frecvență ce aproximează caracteristica  $A_{dB}(\omega)$ , dată inițial.

Caracteristica de fază a sistemului se deduce cu relația  $\hat{\phi}(\omega) = \arg \hat{H}(j\omega)$ .

**5.3. Schema montajului** este dată în figura 5.1.



**Lucrarea nr. 6****CONVERSIA: FUNCȚIE PONDERE - FUNCȚIE DE TRANSFER****6.1. Obiectivele lucrării**

- efectuarea conversiei: funcție pondere - funcție de transfer, pornind de la un răspuns la impuls real, determinat experimental;
- validarea prin calcul a conversiei.

**6.2. Noțiuni teoretice**

Dacă se consideră că funcția de transfer a sistemului,  $H(s)$ , are  $n$  poli reali ( $s_1, s_2, \dots, s_n$ ), se poate utiliza descompunerea:

$$H(s) = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{s - s_i} \quad (6.1)$$

la care corespunde funcția pondere:

$$h(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{s_i t} \quad (6.2)$$

Răspunsul unui filtru la impuls foarte scurt  $u(t)$  este prezentat în figura 6.1.

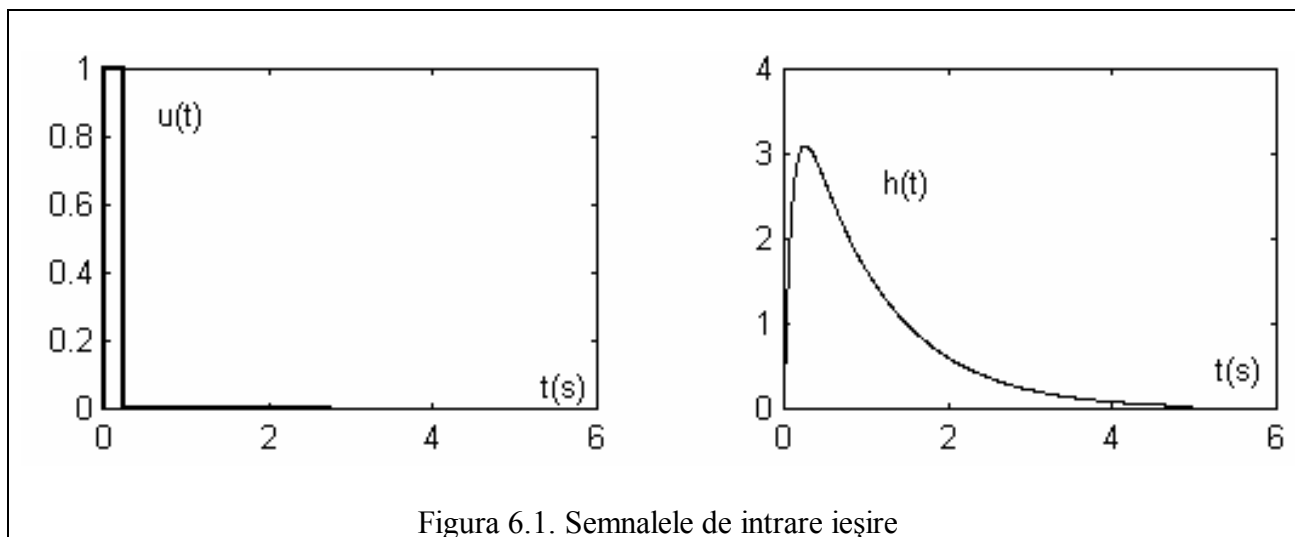


Figura 6.1. Semnalele de intrare ieșire

În relația (6.1) intervin  $n$  filtre de ordinul 1, având constantele de timp  $T_i = -1/s_i$  (polii se consideră negativi) și coeficienții de amplificare  $K_i = C_i T_i$ . Termenii din dezvoltarea funcției de transfer se consideră ordonați după valorile descrescătoare ale constantelor de timp:  $T_1 > T_2 > \dots > T_n$ .

Relația (6.2) devine:

$$h(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{-t/T_i} \quad (6.3)$$

Pentru valori mari ale timpului contează numai primul termen din suma (6.3), deci  $h(t) \cong C_1 \exp(-t/T_1)$ . Prin logaritmare rezultă:

$$\ln(h(t)) \cong \ln(C_1) - \frac{t}{T_1} \quad (6.4)$$

Se reprezintă grafic  $\ln(h(t))$ , unde  $h(t)$  este obținut pe cale experimentală, iar la valori mari ale timpului se aproximează curba obținută printr-o dreaptă (asimptotă), ca în figura 6.2. Se obțin:

$$C_1 = e^{a_1}; \quad T_1 = \frac{\Delta t_1}{\Delta v_1} \quad (6.5)$$

unde  $a_1$ ,  $\Delta v$  și  $\Delta t$  sunt definite ca în figura 6.2.a.

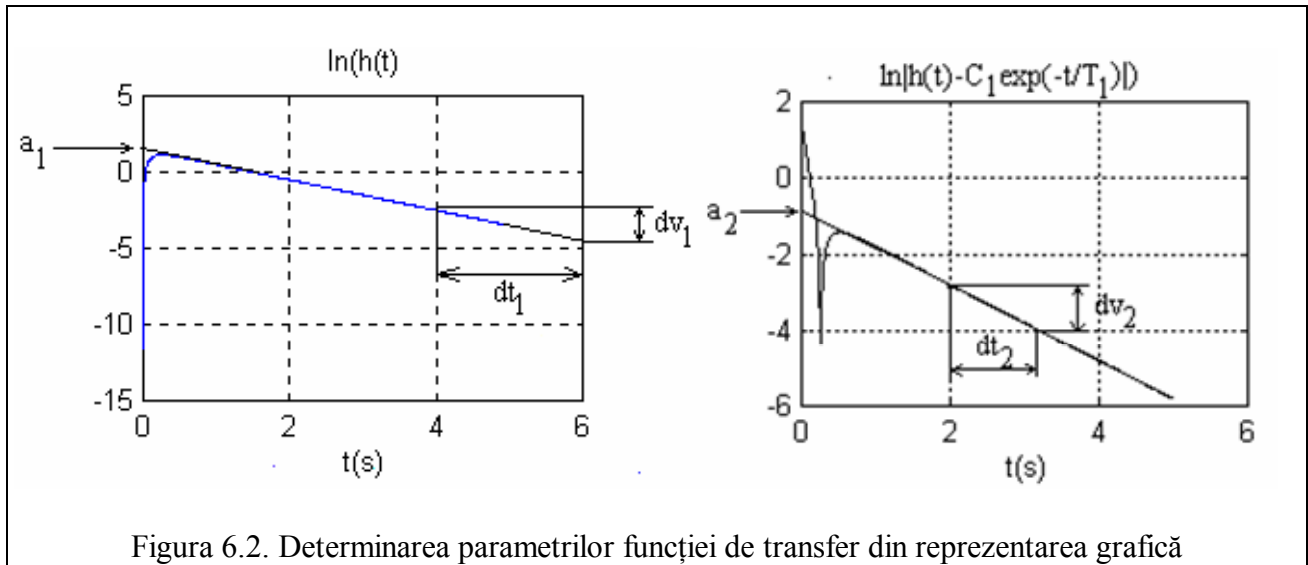


Figura 6.2. Determinarea parametrilor funcției de transfer din reprezentarea grafică

În continuare, se calculează  $h(t) - C_1 \exp(-t/T_1)$ , care reprezintă cei  $(n-1)$  termeni rămași din suma (6.1). La valori mari ale timpului, din acești termeni contează numai  $C_2 \exp(-t/T_2)$ . Deci, se reprezintă grafic  $\ln|h(t) - C_1 \exp(-t/T_1)|$ , se aproximează curba obținută, la valori mari ale timpului, printr-o dreaptă (asimptotă), ca în figura 6.2, și se calculează:

$$C_2 = e^{a_2}; \quad T_2 = \frac{\Delta t_2}{\Delta v_2} \quad (6.6)$$

Procedura continuă, rezultând cei  $n$  termeni din (6.2).

**6.3. Schema utilizată** este prezentată în figura 6.3. Circuitul studiat este prezentat în figura 6.4.

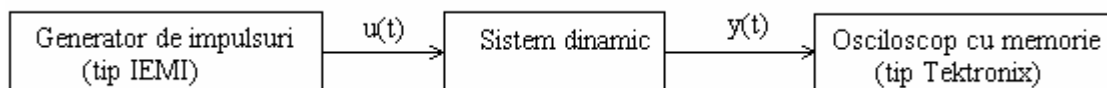


Figura 6.3. Schema conexiunilor montajului experimental

Amplificatoarele operationale sunt de tipul 324. Alimentarea amplificatoarelor operationale se face cu tensiune simetrică de  $\pm 10$  V. Valorile componentelor sunt:  $R_1 = 10\text{K}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{K}\Omega$ ,  $R_3 = 10\text{K}\Omega$ ,  $R_4 = 10\text{K}\Omega$ ,  $C_1 = 10\text{nF}$ ,  $C_2 = 100\text{nF}$ .

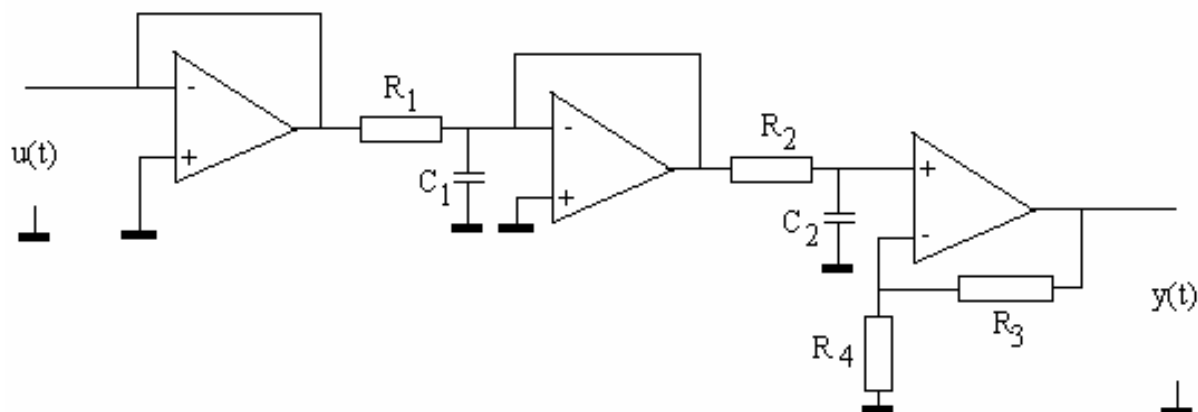


Figura 6.4. Schema electrică a circuitului studiat

## 6. 4. Modul de lucru

- 4.1 Se aplică la intrarea circuitului un tren de impulsuri, pentru care răspunsul sistemului se încadrează corect în perioada impulsurilor. Se calculează aria  $A$  a impulsurilor.
- 4.2 Se extrage de pe ecranul osciloscopului răspunsul  $y(t)$ , prin memorarea și tipărirea acestuia.
- 4.3 Se calculează  $h(t) \cong y(t)/A$ .
- 4.4 Se aplică procedura de converție  $h(t) \rightarrow H(s)$ , adoptând  $n=2$ .
- 4.5 Se reprezintă, pe același grafic, curbele  $h(t)$  și  $h_{est}(t) = C_1 \exp(-t/T_1) + C_2 \exp(-t/T_2)$ .

Observație: În Anexa 3, se prezintă o variantă de program în cod Matlab pentru determinarea în mod interactiv a parametrilor.

**Lucrarea nr.7****SISTEME DE FAZĂ NEMINIMĂ****7.1. Obiectivele lucrării**

Determinarea experimentală a caracteristicilor temporale și frecvențiale pentru următoarele sisteme de fază neminimă:

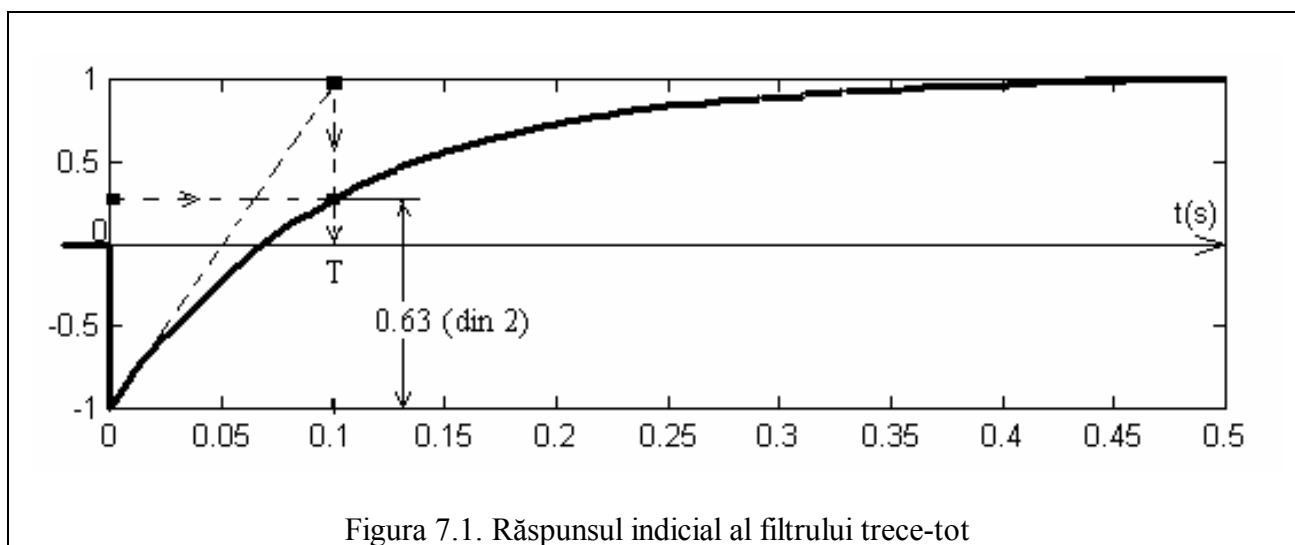
- filtru defazor de ordinul unu (filtru trece tot de ordinul unu);
- un sistem cu un zero în semiplanul drept.

**7.2. Noțiuni teoretice**

Funcția de transfer a unui filtru trece tot de ordinul unu este:

$$H_{TT}(s) = \frac{1 - Ts}{1 + Ts} \quad (7.1)$$

în care  $T$  este constanta de timp. În figurile 7.1, 7.2 și 7.3 sunt date răspunsul indical, respectiv locul de transfer și caracteristicile Bode. Este indicată modalitatea de determinare grafică, din răspunsul indical, a constantei de timp  $T$ .



**7.3. Schema montajului** este prezentată în figura 7.4. Schema este formată dintr-un filtru trece tot de ordinul unu, cu funcția de transfer (7.1), și un filtru de ordinul unu, având constanta de timp  $T_1$ . Ca aparate de măsură, se utilizează:

- un generator de funcții (tip Orion);
- un osciloscop catodic cu memorie (tip Tektronix);
- un voltmetru electronic de c.a..

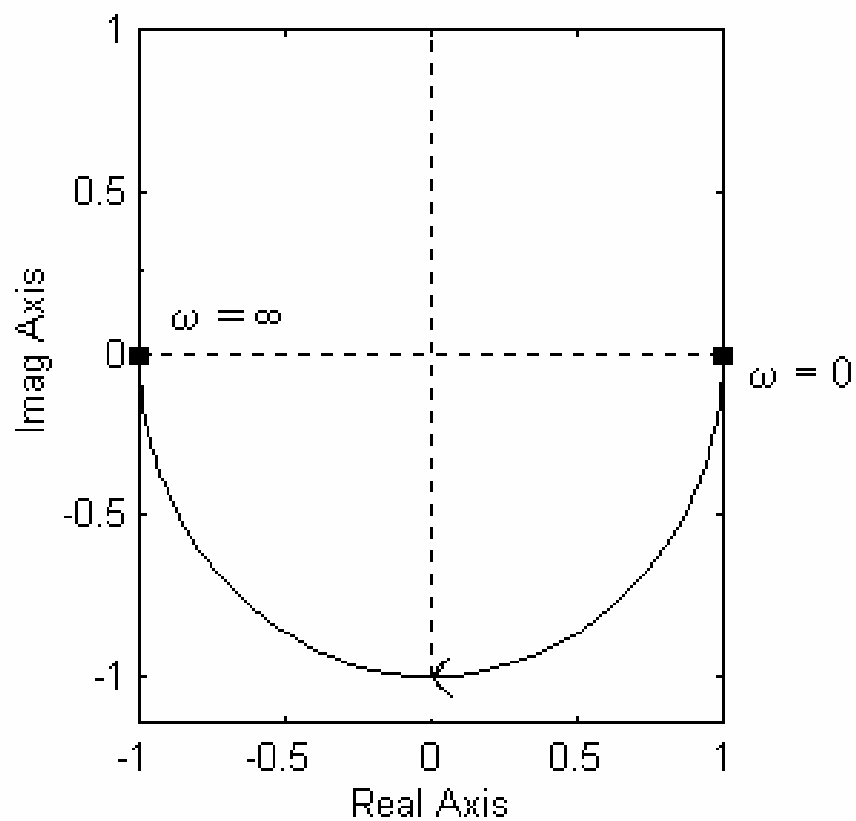


Figura 7.2. Caracteristica Nyquist a filtrului trece-tot

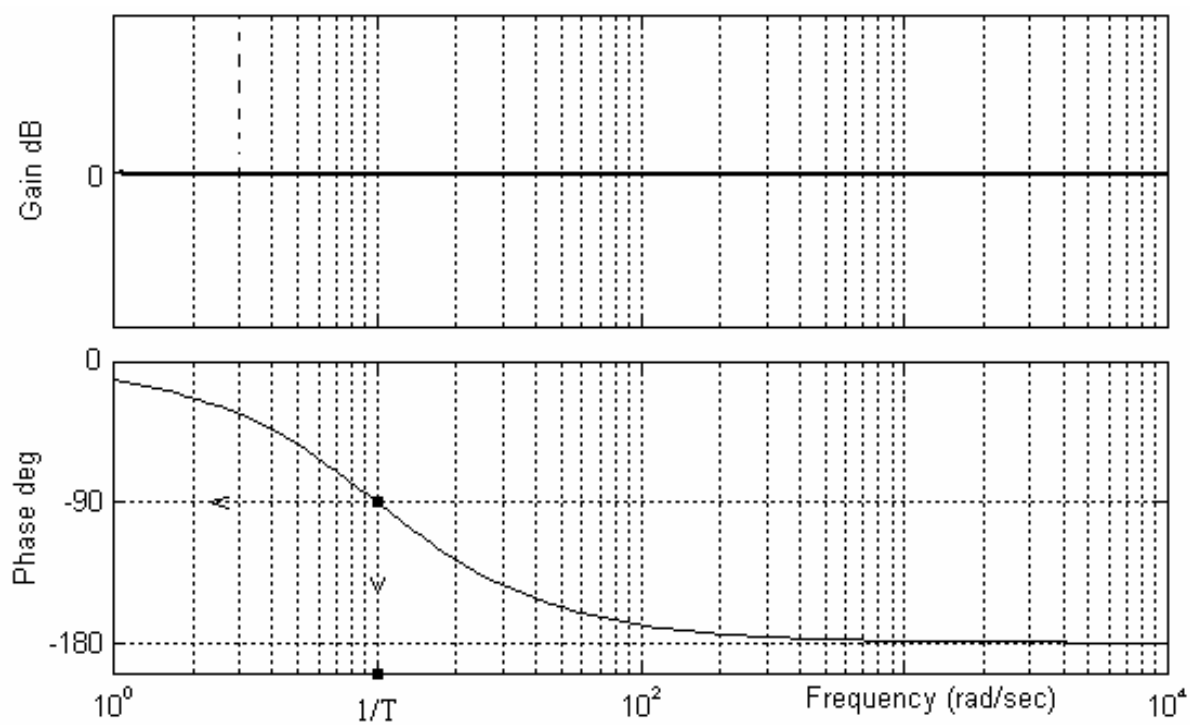
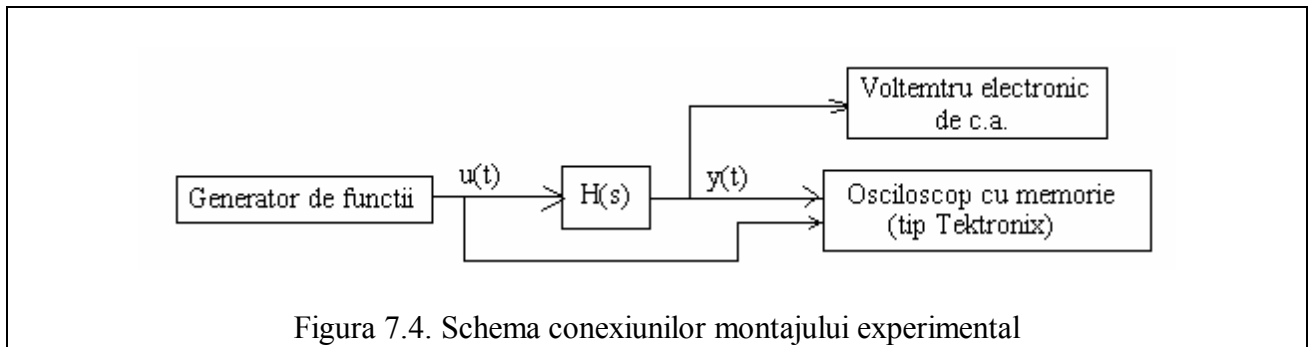


Figura 7.3. Caracteristicile Bode ale filtrului trece-tot



## 7.4. Modul de lucru

### A. Studiul experimental al filtrului trece-tot

7.4.A.1. Se aplică la intrare un semnal dreptunghiular și se determină cu osciloscopul răspunsul la semnal treaptă al filtrului.

7.4.A.2. Se memorează și se salvează, prin tiparire la imprimantă, răspunsurile de pe ecranul osciloscopului.

7.4.A.3. Se aplică la intrare semnal sinusoidal cu amplitudine de 2V și se completează tabelul 1, pe durata a trei decade: de la 10 Hz la 1000Hz.

7.4.A.4. Se trasează caracteristicile Bode ale filtrului.

7.4.A.5. Se determină grafic valoarea constantei de timp, din înregistrarea efectuată la punctul 4.1 Se verifică valoarea defazajului la pulsația  $1/T$ , utilizând caracteristica trasată la punctul anterior.

Tabel 1

f [Hz]	10	13	17	21.5	28	36	46	60	77	100
$\omega$ [rad/s]										
U [V]										
Y [V]										
A=Y/U										
A [dB]										
$\phi$ [rad/s]										

### B. Studiul sistemului de fază neminimă obținut prin înserierea filtrului trece tot cu filtrul trece jos de ordinul unu

7.4.B.1. Se determină experimental răspunsul sistemului la semnal treaptă (similar punctului 7.4.A.1). Se pune în evidență particularitatea răspunsului indicial.

7.4.B.2. Se completează un tabel similar tabelului 1 și se trasează caracteristicile Bode ale sistemului de fază neminimă.

## Lucrarea nr. 8

### FILTRE ACTIVE RC SALLÉN & KEY

**8.1 Obiectivele lucrării:** Proiectarea, realizarea și determinarea caracteristicii de frecvență a unui filtru RC activ trece jos de tip Butterworth și de tip Cebîșev, cu structura Sallen & Key.

### 8.2 Noțiuni teoretice

Un filtru permite trecerea semnalelor cu anumite frecvențe și atenuează semnalele de alte frecvențe. Frecvența semnalelor care se regăsesc la ieșirea filtrului formează banda de trecere. Frecvențele semnalelor care sunt atenuate determină banda de oprire.

Există mai multe tipuri de filtre, după gama de frecvență "procesată": filtre trece-jos (FTJ), filtre trece bandă (FTB), filtre oprește bandă (FOB) sau filtre trece sus (FTS). Întrucât, din punct de vedere teoretic, celelalte tipuri de filtre enunțate se pot obține prin transformări de frecvență din filtrul trece-jos, în continuare va fi prezentat numai acest tip de filtru, fiind și cel mai răspândit ca utilizare.

Un filtru activ este un filtru ce conține dispozitive active, deci poate realiza o amplificare în banda de trecere.

Schema Sallen & Key (1957), prezentată în figura 8.1, conține un amplificator operațional și două rezistoare, astfel conectate încât să formeze o sursă de tensiune controlată în tensiune (VCCVS=Voltage Controlled Voltage Source).

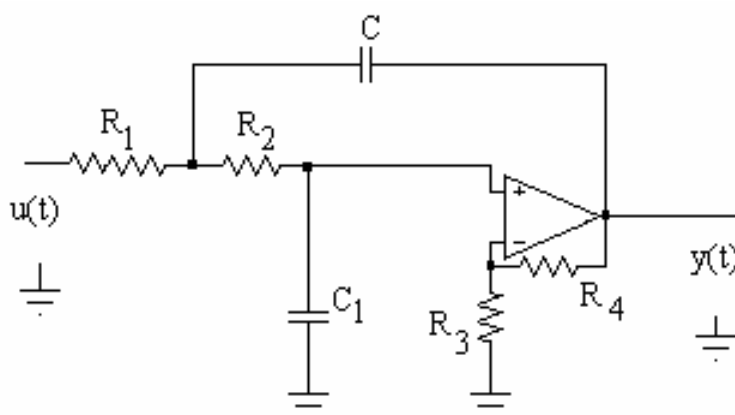


Figura 8.1. Filtru activ RC trece jos, de tip Sallen & Key, de ordinul doi

Funcția de transfer este:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ab_0}{s^2 + b_1s + b_0} \quad (8.1)$$

cu parametrii

$$b_0 = \frac{1}{R_1 R_2 C C_1} \quad (8.2)$$

$$b_1 = \frac{1}{R_2 C_1} (1 - A) + \frac{1}{R_1 C} + \frac{1}{R_2 C} \quad (8.3)$$

$$A = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (8.4)$$

Filtrele active Sallen & Key de ordin mai mare (par) se obțin prin conectarea în cascadă a mai multor celule de ordinul doi.

### 8.2.1 Exemplu de proiectare a unui filtru trece jos cu structura Sallen & Key, n=2

Filtrele active se pot proiecta după mai multe proceduri, cum sunt programe specializate de proiectare și simulare, sau după tabele. În continuare, proiectarea se va face pe baza tabelelor 2 și 3, de la sfârșitul lucrării. Tabelele sunt valabile pentru variabila intermediară  $k \geq 1$ .

Date inițiale:

- tipul filtrului: Cebîșev sau Butterworth;
- riplul în bandă RW (Ripple Width) pentru filtrele Cebîșev, implicit 3 dB pentru Butterworth;
- frecvența de tăiere:  $f_c = 2000\text{Hz}$ ;
- amplificarea în bandă  $A=2$ ;
- ordinul filtrului  $n=2$ .

Se parcurg succesiv următorii pași:

1. Se alege valoarea capacității:

$$C = 0.01 \mu\text{F} = C' [\mu\text{F}]$$

2. Se calculează coeficientul  $k$  cu relația:

$$k = \frac{100}{f_c C'} = \frac{100}{2 \cdot 10^3 \cdot 0.01} = \frac{100}{20} = 5$$

care trebuie să fie mai mare sau egal decât unu. În caz contrar, se modifică valoarea de plecare a capacității  $C$ .

3. Din tabel se determină direct  $C_1$ , din ultima linie.

4. Rezistențele din tabel sunt calculate pentru  $k=1$ . Valorile reale se obțin prin multiplicarea valorilor din tabel. Pentru FTJ-Butterworth și Cebîșev, rezultă valorile din tabelul 1.

Tabelul 1. Valorile componentelor pentru exemplu

	Butterworth	Cebîșev
$R_1 [\text{K}\Omega]$	$5 \cdot 1.12 = 5.6$	$5 \cdot 2.46 = 12.3$
$R_2 [\text{K}\Omega]$	$5 \cdot 2.25 = 11.25$	$5 \cdot 1.45 = 7.25$
$R_3 [\text{K}\Omega]$	$5 \cdot 6.75 = 33$	$5 \cdot 7.835 = 39.175$
$R_4 [\text{K}\Omega]$	$5 \cdot 6.75 = 33$	$5 \cdot 7.835 = 39.175$
$C_1 [\mu\text{F}]$	0.01	0.01

5. Alegerea valorilor standard ale rezistoarelor.

Tabel 2. Valorile componentelor FTJ Butterworth, schema Sallen & Key,  $n=2$ 

	<b>Butterworth</b>					
<b>A</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>R<sub>1</sub></b>	1.422	1.12	0.8	0.61	0.52	0.46
<b>R<sub>2</sub></b>	5.399	2.25	1.53	2.051	2.4	2.74
<b>R<sub>3</sub></b>	---	6.75	3.14	3.2	3.3	3.56
<b>R<sub>4</sub></b>	0	6.75	9.44	16.01	23.6	32.08
<b>C<sub>1</sub></b>	0.33C	C	C	C	C	C

Tabel 3 Valorile componentelor filtrului trece jos Cebîșev, schema Sallen & Key,  $n=2$ 

	<b>Cebîșev</b>					
<b>A</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>R<sub>1</sub></b>	3.15	2.46	1.301	0.87	0.71	0.61
<b>R<sub>2</sub></b>	11.34	1.45	1.375	2.04	2.5	2.89
<b>R<sub>3</sub></b>	---	7.835	3.56	3.5	3.68	3.9
<b>R<sub>4</sub></b>	0	7.835	10.7	17.5	25.77	35.09
<b>C<sub>1</sub></b>	0.1C	C	2C	2C	2C	2C

### 8.2.2 Recomandări privind proiectarea filtrelor active Sallen & Key

1. Pentru atingerea performanțelor impuse, trebuie ca rezistența de intrare în amplificatorul operațional să fie de cel puțin 10 ori mai mare decât suma rezistențelor la intrarea neînversoare, adică  $R_1 + R_2$ .
2. Valorile din tabele pentru rezistoarele  $R_3$  și  $R_4$  sunt calculate din condiția de minimizare a offset-ului de c.c. al AO. Alte valori ale rezistoarelor pot fi utilizate, dar raportul rezistențelor trebuie să aibă aceeași valoare ca în tabel.
3. Toleranțele pentru rezistoare trebuie corelate cu ordinul filtrului:  $\pm 5\%$  pentru  $n \leq 4$ ,  $\pm 2\%$  pentru  $4 < n < 6$  și  $\pm 1\%$  pentru  $n = 7, 8$ . Ca recomandare generală, indiferent de ordinul filtrului, valorile rezistoarelor trebuie să fie cât mai apropiate de cele din tabel.
4. Toleranțele pentru capacități și  $n < 4$  pot fi de maxim  $\pm 10\%$ . În cazul unor toleranțe mai mari este necesar introducerea unor trimeri în paralel.
5. Amplificarea fiecărui etaj este  $(1 + R_4/R_3)$  și poate fi ajustată prin înlocuirea lui  $R_3$  sau  $R_4$  cu un potențiometru.
6. Câștigul în buclă deschisă la frecvența de tăiere trebuie să fie de cel puțin 50 ori mai mare decât câștigul impus al filtrului.
7. Valoarea vârf-vârf a semnalului sinusoidal la frecvența de tăiere nu trebuie să depășească valoarea de  $10^6/\pi/f_c$  din SW-ul (Slew-Rate) amplificatorului operațional.



## Lucrarea nr. 9

## FILTRE ACTIVE TRECE JOS CU REACȚIE MULTIPLĂ

**9.1 Obiectivele lucrării:** Proiectarea, realizarea și determinarea caracteristicii de frecvență a unui filtru RC activ trece jos de tip Butterworth și Cebîșev, de ordin 3, după structura cu reacție multiplă.

### 9.2 Noțiuni teoretice

Filtrele active cu reacție multiplă sunt similare filtrelor S&K în cascadă dar se adaugă o reacție capacitivă de la ieșirea fiecărui operațional spre intrare. În figurile 9.1 și 9.2, se prezintă două structuri de filtre active RC cu reacție multiplă de ordinul trei și patru.

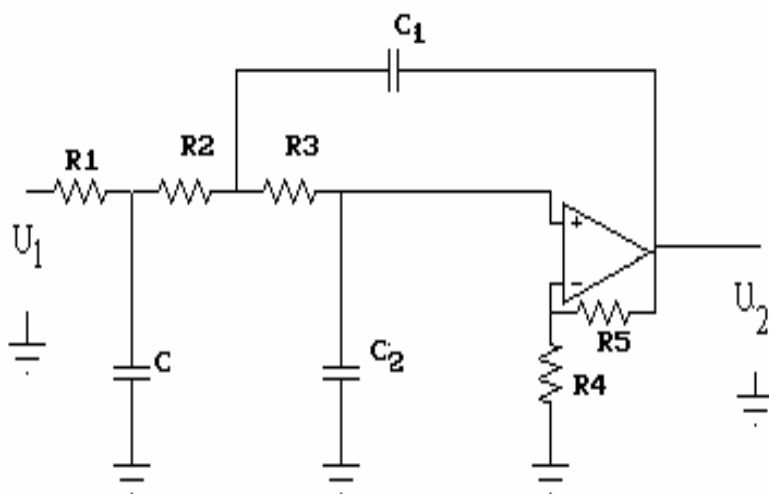


Figura 9.1. Filtru activ RC cu reacție multiplă de ordinul trei

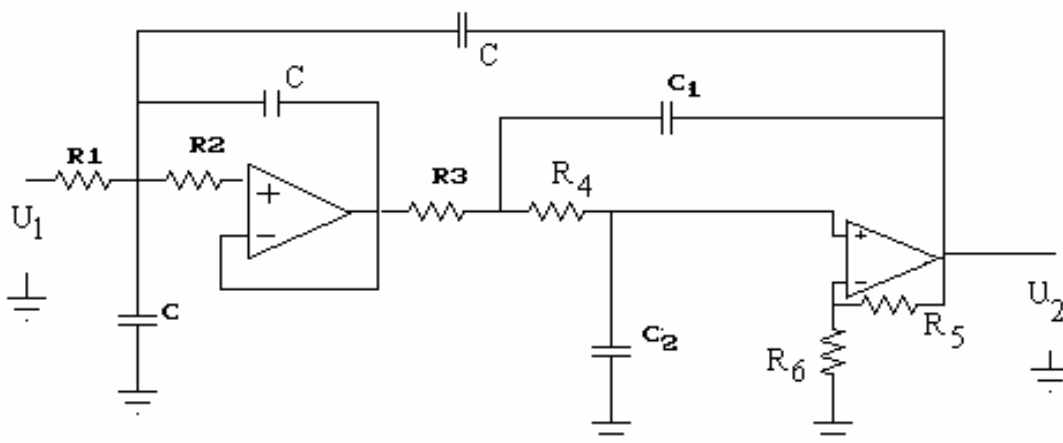


Figura 9.2. Filtru activ RC cu reacție multiplă de ordinul patru

Pentru  $n=3$ , parametrii funcției de transfer sunt:

$$b_0 = \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2} \quad (9.1)$$

$$b_1 = \mu \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{R_2 R_3 C_2} - \frac{1}{R_2 R_2 C_1} \quad (9.2)$$

$$b_2 = \mu + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (9.3)$$

$$A = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (9.4)$$

$$\mu = \left[ \frac{C_1}{R_3} (1 - A) + C_2 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \right] / C_1 C_2 \quad (9.5)$$

### 9.2.1 Exemplu de proiectare a unui filtru trece jos cu reacție multiplă, $n=3$

Date inițiale:

- Tipul filtrului: Cebâșev sau Butterworth;
- Riplul în bandă RW pentru filtre Cebâșev; 3 dB pentru Butterworth;
- Frecvența de tăiere:  $f_c=2000\text{Hz}$ ;
- Amplificarea în bandă  $A=2$ ;
- Ordinul filtrului  $n=3$ .

Se parcurg succesiv următorii pași:

1. Se alege valoarea capacității:

$$C=0.047\mu\text{F}=C' [\mu\text{F}]$$

2. Se calculează coeficientul  $k$  cu relația:

$$k = \frac{100}{f_c C'} = \frac{100}{2 \cdot 10^3 \cdot 0.047} = \frac{50}{47} = 1.063 \geq 1$$

3. Din tabel se determină  $C_1$  și  $C_2$ , din ultima linie.

4. Rezistențele din tabel sunt calculate pentru  $k=1$ . Valorile reale se obțin prin multiplicarea valorilor din tabel. Pentru FTJ-Butterworth și Cebâșev la 3dB, rezultă valorile din tabelul 1.

5. Alegerea valorilor standard ale rezistoarelor, în toleranța necesară.

Tabel 1

	Butterworth	Cebîșev
$R_1$ [K $\Omega$ ]	$1.063 \cdot 2.491 = 2,65$	$1.063 \cdot 5.612 = 5.96$
$R_2$ [K $\Omega$ ]	$1.063 \cdot 2.339 = 2,48$	$1.063 \cdot 10.149 = 10.78$
$R_3$ [K $\Omega$ ]	$1.063 \cdot 0.692 = 0,735$	$1.063 \cdot 0.283 = 0.30$
$R_4$ [K $\Omega$ ]	$1.063 \cdot 11.043 = 11.74$	$1.063 \cdot 32.087 = 34.10$
$R_5$ [K $\Omega$ ]	$1.063 \cdot 11.043 = 11.74$	$1.063 \cdot 32.087 = 34.10$
$C_1$ [ $\mu$ F]	0.047	0.047
$C_2$ [ $\mu$ F]	0.047	0.047

Tabel 2. Valorile componentelor FTJ Butterworth și Cebîșev, schema RM,  $n=3$ 

	Butterworth		Cebîșev			
$RW$	3 dB		1 dB		3 dB	
$A$	1	2	1	2	1	2
$R_1$	1.639	2.491	3.345	3.621	5.338	5.612
$R_2$	11.697	2.339	10.624	5.8	48.310	10.149
$R_3$	2.103	0.692	3.977	0.391	2.079	0.283
$R_4$	---	11.043	---	19.623	---	32.087
$R_5$	0	11.043	0	19.623	0	32.087
$C_1$	C	C	1.5C	C	3C	C
$C_2$	0.1C	C	0.039C	C	0.01C	C

### 9.2.2 Recomandări privind proiectarea filtrelor active cu reacție multiplă

1. Pentru atingerea performanțelor impuse, trebuie ca rezistența de intrare în amplificatorul operațional să fie de cel puțin 10 ori mai mare decât suma rezistențelor la intrarea neînversoare.
2. Valorile din tabele pentru rezistoarele  $R_5$  și  $R_6$  sunt calculate din condiția de minimizare a offset-ului de c.c. al AO. Alte valori ale rezistoarelor pot fi utilizate, cu condiția ca raportul rezistențelor să aibă aceeași valoare ca în tabel.
3. Toleranțele pentru rezistoare trebuie corelate cu ordinul filtrului:  $\pm 5\%$  pentru  $n \leq 4$ ,  $\pm 2\%$  pentru  $4 < n < 6$  și  $\pm 1\%$  pentru  $n = 7, 8$ . Ca recomandare generală, indiferent de ordinul filtrului, valorile rezistoarelor trebuie să fie cât mai apropiate de cele din tabel.
4. Toleranțele pentru capacități și  $n < 4$  pot fi de maxim  $\pm 10\%$ . În cazul unor toleranțe mai mari este necesar introducerea unor trimeri în paralel.
5. Amplificarea fiecărui etaj este  $(1 + R_4/R_3)$  și poate fi ajustată prin înlocuirea lui  $R_3$  sau  $R_4$  cu un potențiomtru.
6. Câștigul în buclă deschisă la frecvența de tăiere trebuie să fie de cel puțin 50 ori mai mare decât câștigul impus al filtrului.
7. Valoarea vârf-vârf a semnalului sinusoidal la frecvența de tăiere nu trebuie să depășească valoarea de  $10^6/\pi/f_c$  din SW-ul (Slew-rate) amplificatorului operațional.



## Lucrarea nr. 10

## FILTRE ACTIVE RC TRECE BANDĂ

**10.1 Obiectivele lucrării:** Proiectarea, realizarea și măsurarea caracteristicilor în domeniul timp și în domeniul frecvență, pentru un filtru activ RC trece bandă.

## 10.2. Introducere

Un filtru trece bandă permite trecerea semnalelor cu frecvența cuprinsă în banda  $B$  în jurul frecvenței centrale  $f_o$ , și atenuează toate celelalte frecvențe.

Raportul  $Q=f_o/B$  se numește factor de calitate și este o măsură a selectivității filtrului. Un filtru cu factor de calitate mare va avea o bandă mică de trecere în comparație cu frecvența centrală.

Amplificarea filtrului este valoarea modulului funcției de transfer la frecvența centrală. Caracteristica unui filtru trece bandă ideal este prezentată în figura 10.1, împreună cu o caracteristică reală. Există două frecvențe de tăiere  $f_1$  și  $f_2$ , la care amplificarea scade la 0.7 din valoarea de la frecvența centrală.

Filtrele trece bandă se pot obține prin transformarea prototipului de joasă frecvență. Funcția de transfer a filtrului trece bandă, obținută în acest fel este, pentru cazul general, de forma:

$$H(s) = \frac{Ab_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0} \Big|_{s = (s^2 + s_o^2) / Bs} \quad (10.1)$$

Filtrele trece bandă Butterworth au o caracteristică de tip maxim plat, cu maxim la frecvența centrală. Frecvențele de tăiere  $f_1$  și  $f_2$  se definesc la 3dB.

Filtrele Cebîșev au riplu în banda de trecere. Cu excepția riplului de 3dB, frecvențele  $f_1$  și  $f_2$  sunt frecvențele la care se termină riplul din banda de trecere.

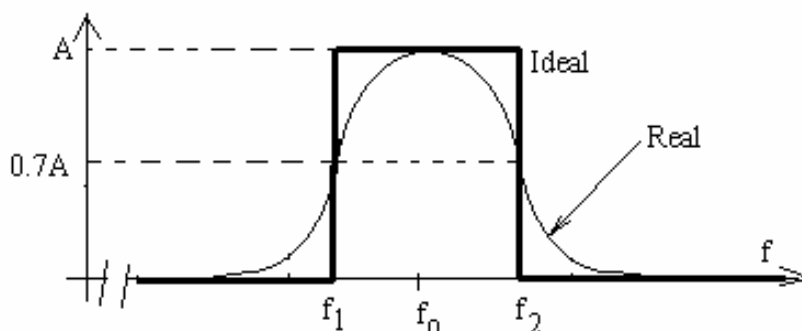


Figura 10.1. Caracteristica amplitudine - frecvență a filtrului trece bandă ideal și real

În general, pentru ecuația (10.1), frecvența centrală este media geometrică a frecvențelor  $f_1$  și  $f_2$ ,  $f_o = (f_1 * f_2)^{0.5}$ . Pentru ordinul doi, funcția de transfer a filtrului trece bandă devine:

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{ABs}{s^2 + Bs + \omega_o^2} \quad (10.2)$$

unde  $A$  este amplificarea și  $B$  este banda.

Filtrul trece bandă cu structura Sallen&Key este prezentat în figura 10.2, fiind indicat pentru  $Q < 10$ . Un avantaj important, față de alte tipuri de filtre active, este că banda poate fi modificată prin modificarea lui  $A$ , fără a influența frecvența centrală  $f_o$ .

Acordarea poate fi finalizată prin ajustarea lui  $R_2$ , pentru frecvența centrală dorită, și prin ajustarea parametrului  $A$ , pentru banda dorită  $B$ . Din analiza circuitului rezultă următoarele relații:

$$B = \frac{1}{C} \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} + \frac{1-A}{R_3} \right] \quad (10.3)$$

$$\omega_o^2 = \frac{1}{R_2 C C} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (10.4)$$

$$G = \frac{A}{R_1 C B} \quad (10.5)$$

$$A = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (10.6)$$

$$\mu = \left[ \frac{C_1}{R_3} (1-A) + C_2 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \right] / C_1 C_2 \quad (10.7)$$

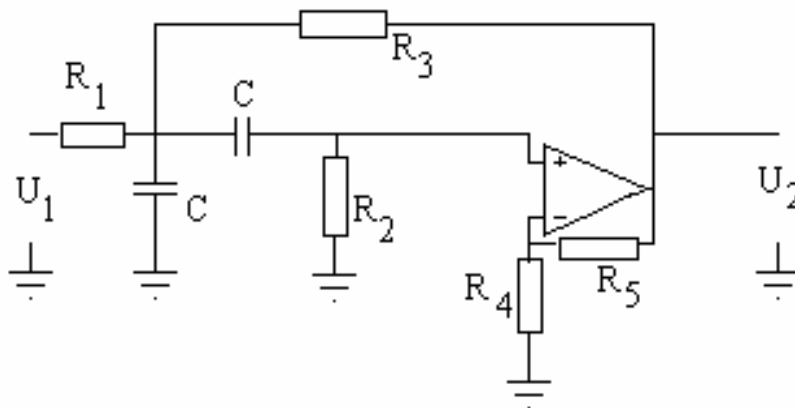


Figura 10.2. Filtru activ trece bandă S&K, de ordinul doi

### 10.3. Exemplu de proiectare a unui filtru trece bandă

Procedura de proiectare este aceeași ca la filtrele trece jos. În tabelul 1 se dau valorile componentelor pentru  $Q=5$  și FTB de ordinul doi de tip Cebîșev.

Tabel 1

	Valorile elementelor					
Amplificare	1	2	4	6	8	10
$R_1$	15.915	7.958	3.979	2.653	1.989	1.592
$R_2$	2.251	2.416	2.778	3.183	3.626	4.100
$R_3$	1.211	1.208	1.183	1.137	1.077	1.010
$R_4, R_5$	4.502	4.832	5.556	6.366	7.252	8.2

Date inițiale:

- amplificarea  $A=4$ ;
- frecvența centrală  $f_0=1\text{KHz}$ ;
- factorul de calitate  $Q=5$  (sau banda  $B=f_0/Q=400\text{Hz}$ );

Se parcurg succesiv următorii pași:

1. Se alege valoarea capacității:

$$C=0.047 \mu\text{F}=C'[\mu\text{F}]$$

2. Se calculează coeficientul  $k$  cu relația:

$$k = \frac{100}{f_0 C'} = \frac{100}{2 \cdot 10^3 \cdot 0.047} = \frac{50}{47} = 1.063$$

3. Din tabel se determină direct  $C_1$  din ultima linie.
4. Rezistențele din tabel sunt calculate pentru  $k=1$ ; valorile reale se obțin prin multiplicarea valorilor din tabel. Rezultă valorile:

$$R_1=1.063 \cdot 3.979 = 4.23 \text{ K}\Omega,$$

$$R_2=1.063 \cdot 2.778 = 2.95 \text{ K}\Omega,$$

$$R_3=1.063 \cdot 1.183 = 1.89 \text{ K}\Omega,$$

$$R_4 = R_5 = 1.063 \cdot 5.556 = 5.90 \text{ K}\Omega.$$

5. Alegerea valorilor standard ale rezistoarelor.

#### 10.4. Modul de lucru

1. Se proiectează un filtru trece bandă Cebîșev la 3 dB cu amplificarea  $A=2$  și frecvența centrală de  $f_0=10 \text{ KHz}$ . A doua echipă realizează un filtru trece bandă cu  $A=4$  și  $f_0=1 \text{ KHz}$ .
2. Se realizează practic filtrul. Amplificatoarele operaționale sunt de tipul 741 și se alimentează cu tensiune simetrică la  $\pm 10 \text{ V}$ .

- Tabel 2

[illegible]

## Lucrarea nr. 11

# ANALIZA SISTEMELOR ANALOGICE PRIN SIMULARE NUMERICĂ

**11.1. Obiectivul lucrării:** asimilarea cunoștințelor practice de bază pentru utilizarea mediului de simulare software SIMULINK, în scopul analizei sistemelor analogice prin metoda simulării numerice.

## 11.2. Noțiuni teoretice

În problemele de analiză a sistemelor se dau:

- modelul matematic al sistemului;
- forma semnalului de intrare (de regulă, un semnal tipizat: impuls, treaptă, rampă);

și se cere determinarea prin calcul a răspunsului sistemului, atunci când starea inițială a acestuia este cunoscută.

La analiza sistemelor prin simulare numerică, determinarea răspunsului sistemului se face prin integrarea numerică a ecuațiilor modelului matematic.

Fie un sistem a cărui ecuație de stare este:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (11.1)$$

unde  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ . Orice simulator are la bază schema bloc din figura 11.1, în care  $G_1, \dots, G_m$  sunt generatoare de semnal ce furnizează intrările  $u_1(t), \dots, u_m(t)$  iar  $O_1, \dots, O_m$  sunt “osciloscopae” pentru înregistrarea stărilor  $x_1(t), \dots, x_n(t)$ .

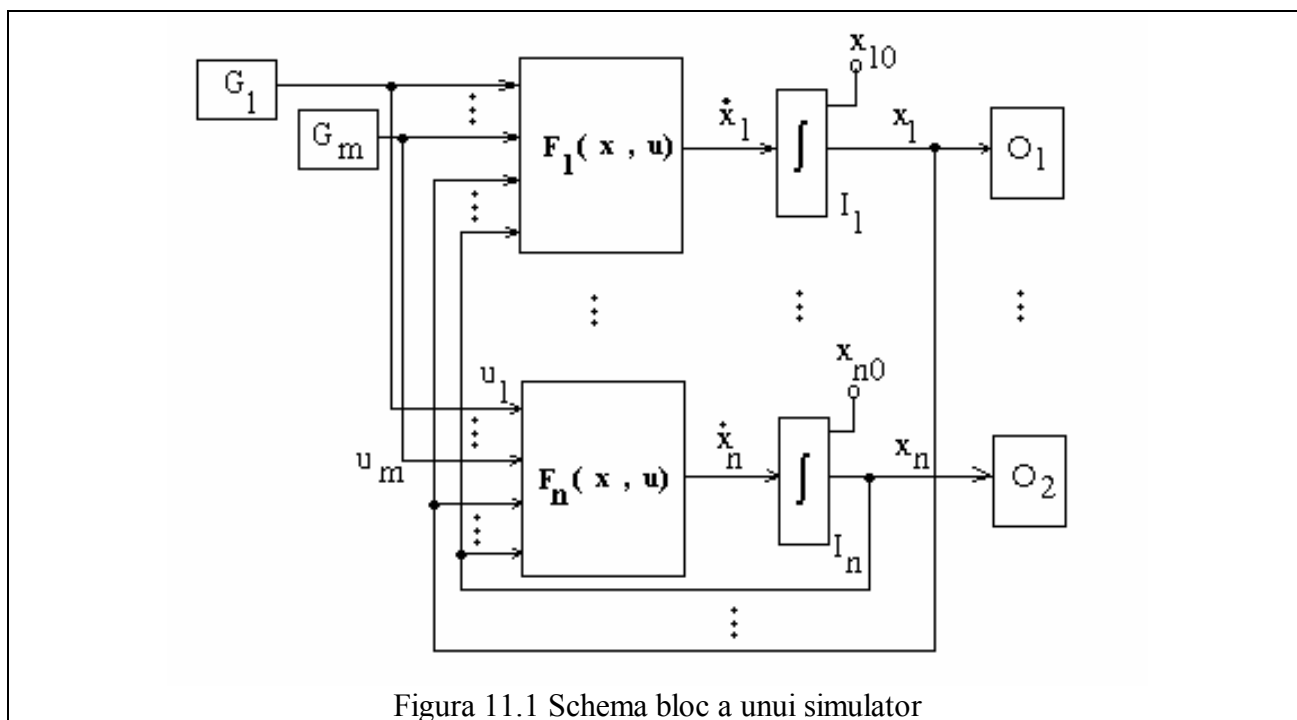


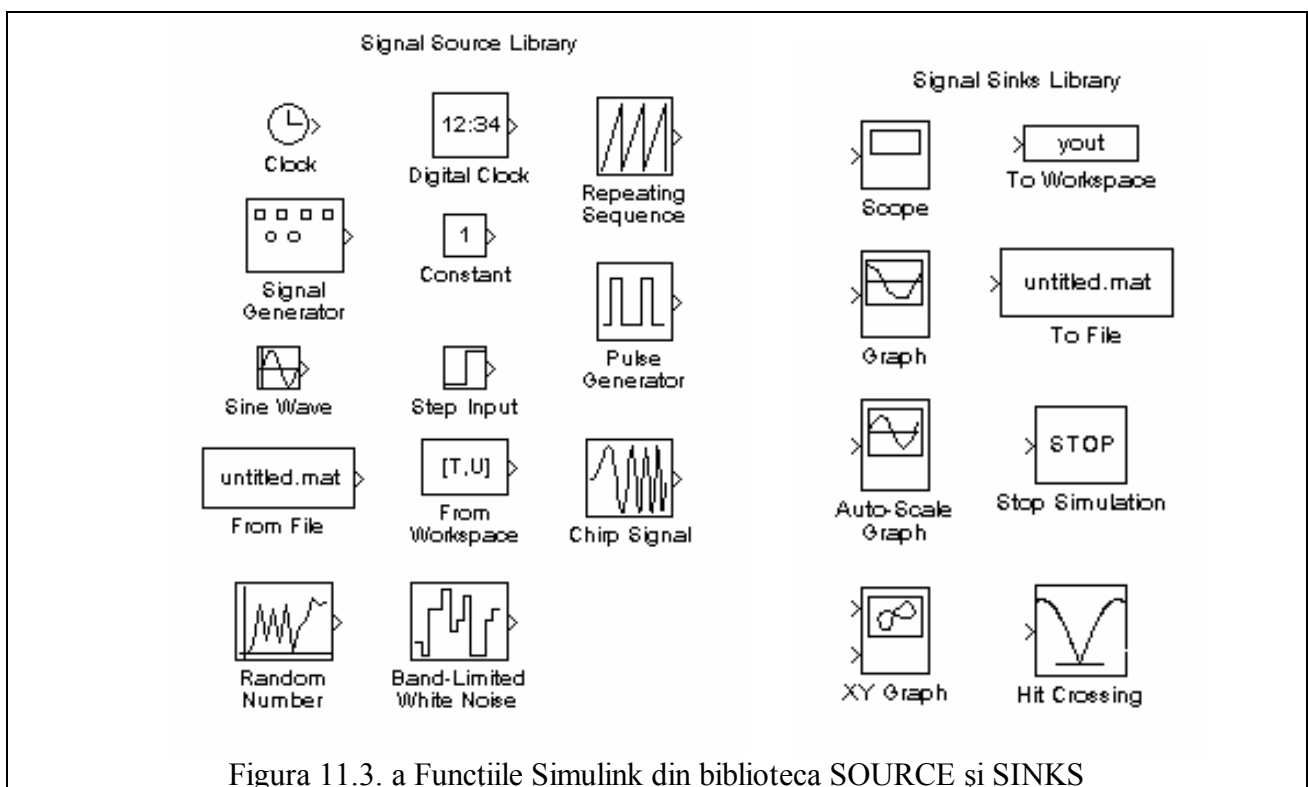
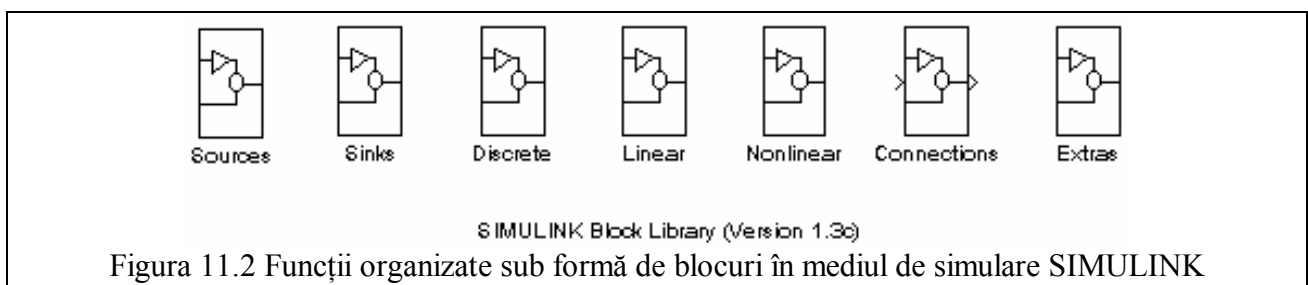
Figura 11.1 Schema bloc a unui simulator

Simulatorul software include blocurile pentru calculul funcțiilor  $F_i(x,u)$ ,  $i=1,2,\dots,n$  și integratoarele  $I_1, I_2, \dots, I_n$ . S-au notat cu  $x_{i0}$ ,  $i=1,\dots,n$ , stările inițiale ale integratoarelor.

Mediul de simulare SIMULINK, utilizat în cadrul lucrării de laborator, este o componentă a pachetului MatLab. El oferă următoarele facilități:

1. editarea schemei bloc a sistemului, care este analizat prin simulare numerică. În acest scop se pot utiliza: **integratoare** (cu posibilitatea fixării stării inițiale), **blocuri liniare** definite prin funcții de transfer, **blocuri neliniare**, subsisteme definite prin modelul de stare (A,B,C,D), funcții standard sau dedicate scrise în cod MatLab etc;
2. generarea de semnale utilizate ca intrări în sistemul simulat;
3. înregistrarea rezultatelor prin vizualizarea variațiilor de timp ale mărimilor și/sau prin înregistrarea unor traiectorii de fază (cu înregistratoare X-Y);
4. realizarea unor facilități la editarea schemelor, prin structurarea acestora pe subansambluri, utilizarea de multiplexoare-demultiplexoare etc.

În figura 11.2 se prezintă ansamblul bibliotecilor ce formează mediul de simulare SIMULINK, iar în figura 11.3 componența acestora.



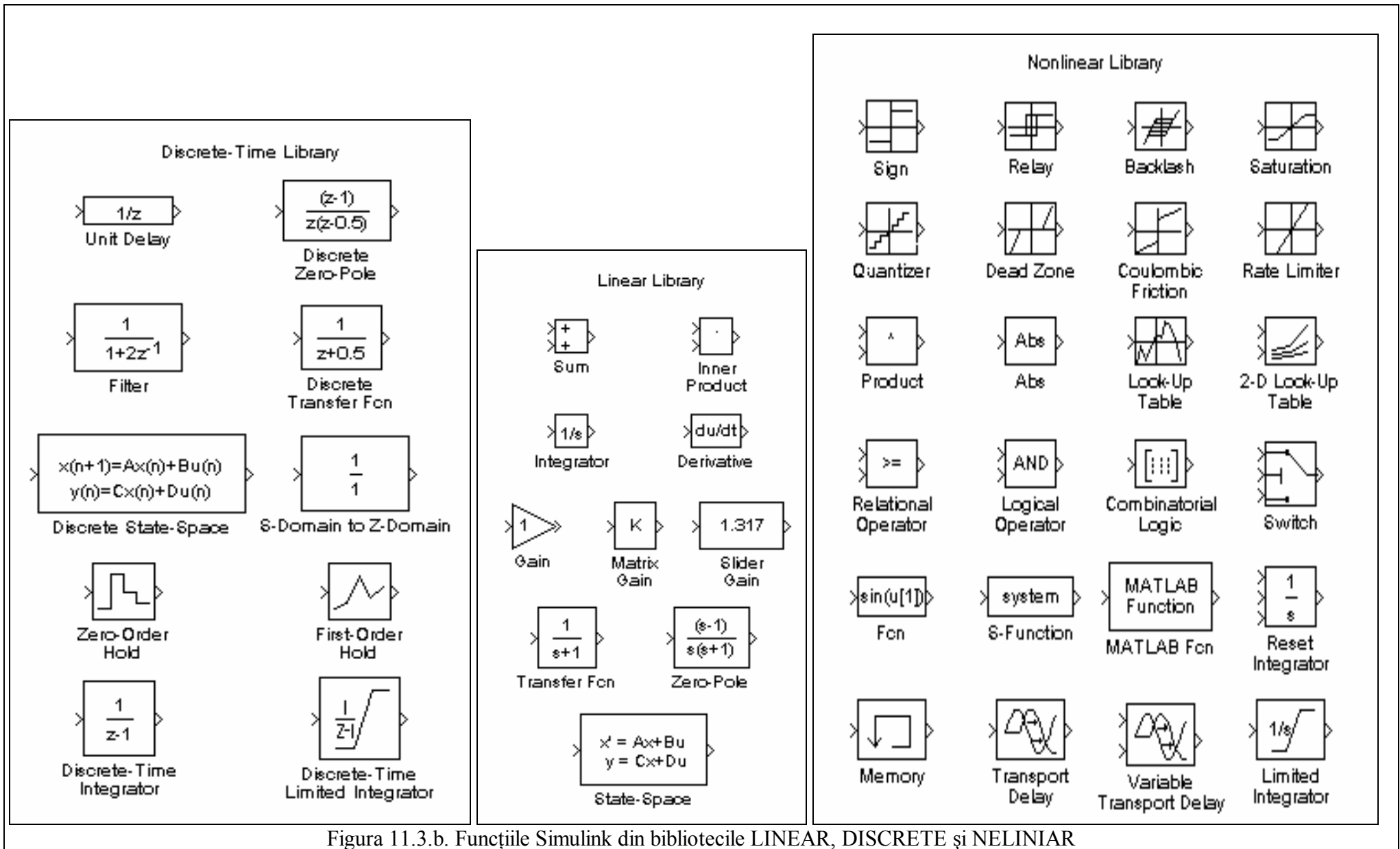


Figura 11.3.b. Funcțiile Simulink din bibliotecile LINEAR, DISCRETE și NELINIAR

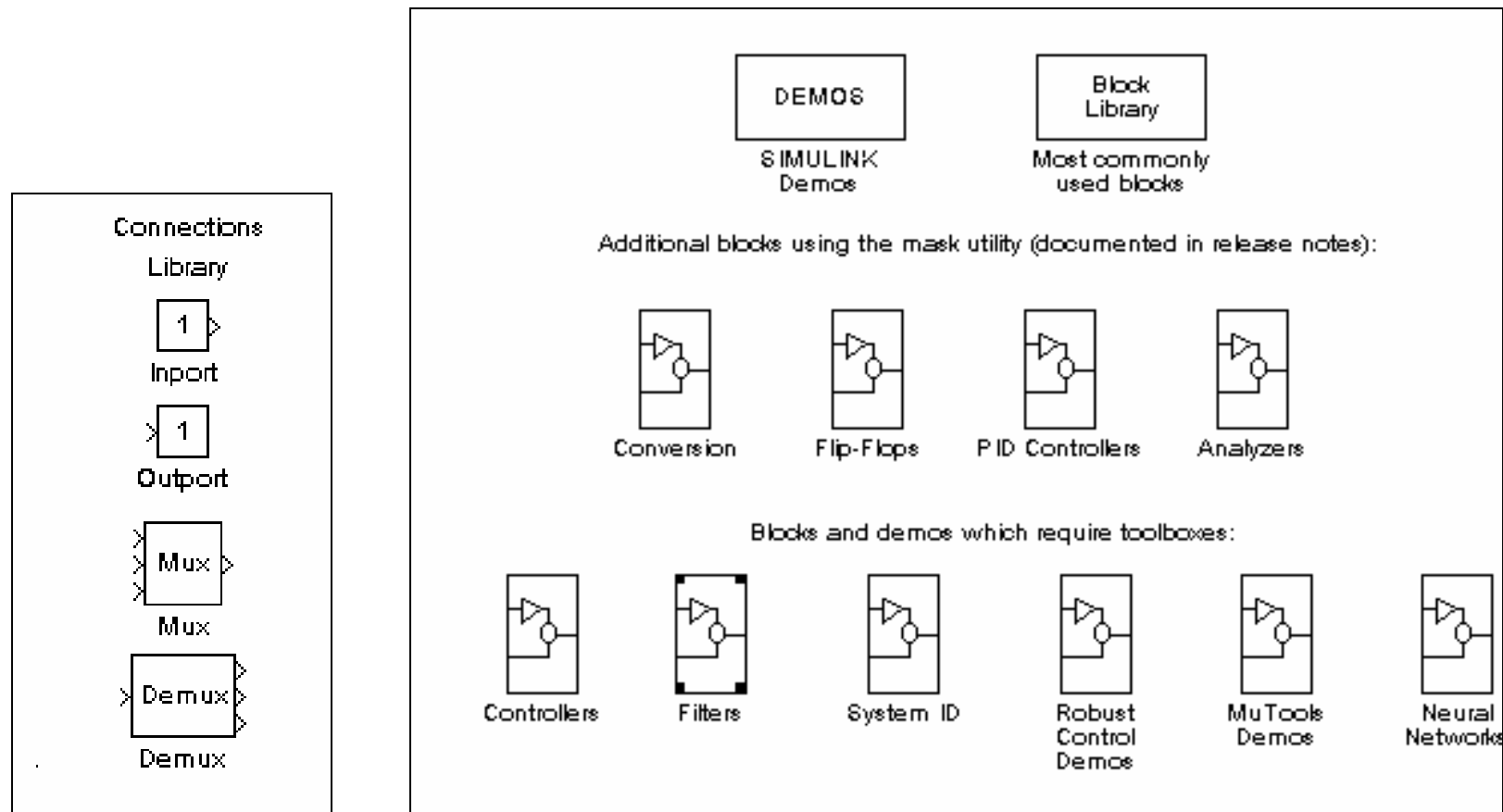


Figura 11.3.c Funcțiile SIMULINK din bibliotecile CONNECTIONS și DEMO

### 11.3. Modul de lucru

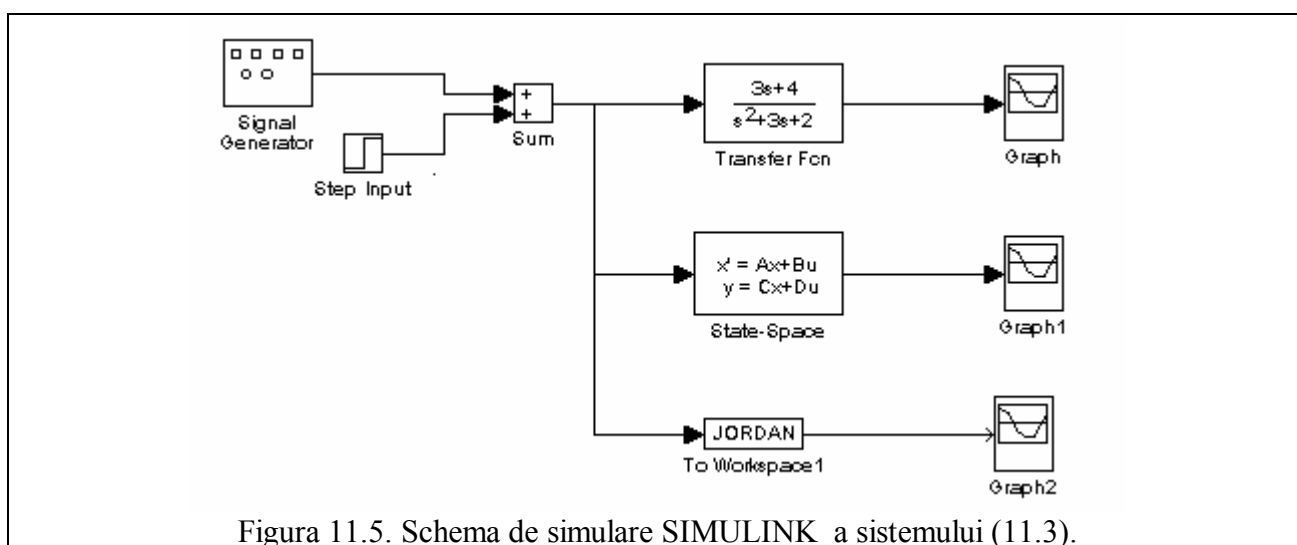
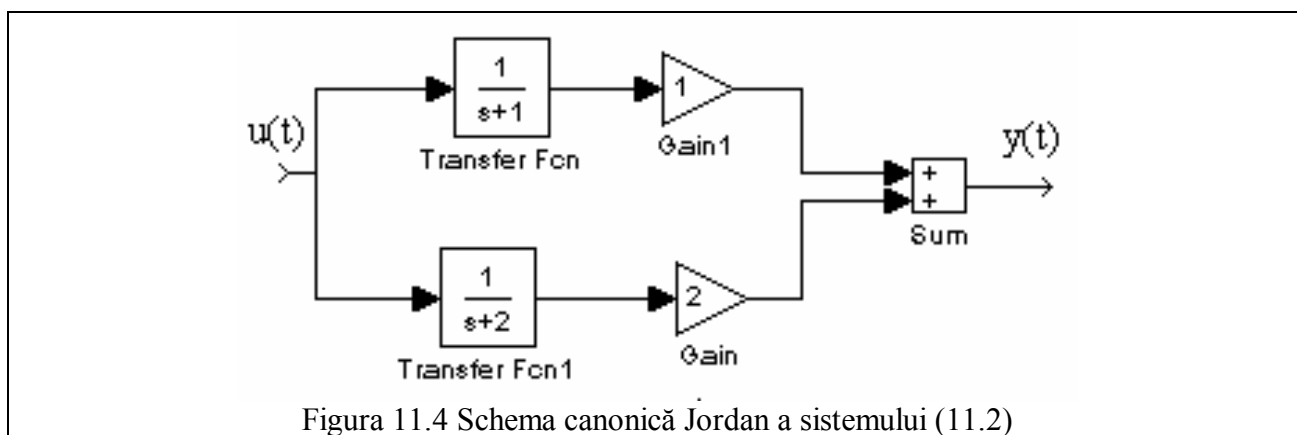
3.1 Fie sistemul cu funcția de transfer:

$$H(s) = \frac{3s+4}{s^2+3s+2} \quad (11.2)$$

Știind că modelul de stare al sistemului este definit prin matricile:

$$A = \begin{bmatrix} -3 & -2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 3 & 4 \end{bmatrix} \quad (11.3)$$

și că reprezentarea canonică Jordan este cea din figura 11.4, să se determine în SIMULINK, simultan, răspunsurile indiciale ale sistemului în cele trei reprezentări menționate. O variantă a schemei de simulare SIMULINK este prezentată în figura 11.5.



### Recomandări privind alegerea metodei de integrare

Există șase algoritmi de integrare, alegerea făcându-se în funcție de problemă. Câteva indicații generale merită evidențiate:

1. **LINSIM**: se utilizează pentru sisteme liniare sau sisteme ce conțin neliniarități mici. Se utilizează - de asemenea - pentru sistemele dificile sau "tari" (sisteme ce conțin atât dinamică lentă cât și dinamică rapidă; de exemplu, un pol la 0.01 și un pol la 1000);
2. **RK45, RK23**: sunt metode Runge-Kutta de ordin 5 și 3. Sunt indicate pentru simularea sistemelor cu neliniarități mari și discontinue, precum și pentru sistemele hibride (continuu și discret). Metoda **rk45** este mai rapidă și mai precisă decât **rk23**, dar utilizează mai puține puncte. Nu este recomandată pentru sistemele "tari";
3. **GEAR**: se utilizează pentru sistemele neliniare netede. Nu se recomandă pentru sistemele discontinue;
4. **ADAMS** - se utilizează pentru sisteme netede, neliniare sau pentru sisteme ne-dificile;
5. **EULER** cea mai simplă și cea mai cunoscută tehnică; este cea mai rapidă dar suferă în precizie și în stabilitate. De exemplu, dându-se un sistem stabil, este posibil să se obțină un răspuns instabil dacă mărimea pasului de integrare este incorect. Se poate folosi pentru verificarea rapidă a rezultatelor altor metode de integrare.

În lipsa altor restricții, pasul minim de integrare se ia egal cu pasul maxim de integrare și de 10-20 ori mai mic decât cea mai mică constantă de timp a sistemului studiat.

**Lucrarea nr 12.****SIMULAREA NUMERICĂ A PROCESARII SEMNALELOR  
ANALOGICE CU SIMULINK**

**12.1 Obiectivul lucrării:** simularea numerică a unor metode de procesare analogică a semnalelor.

**12.2 Modul de lucru**

12.2.1. Să se realizeze în SIMULINK schema din figura 12.1, în care "Signal Generator" este un generator de semnal sinusoidal cu amplitudine unitară și pulsația egală cu 10 rad/s, iar "Signal Generator1" generează un semnal sinusoidal de amplitudine unitară și pulsația de 1 rad/s.

12.2.2. Să se simuleze numeric sistemul și să se explice rezultatul obținut. Ce influență are frecvența de tăiere a filtrului trece jos ?

Parametrii folosiți la simulare sunt:

- perioada de integrare 0.01s;
- timpul total de integrare 20 s.
- metoda de integrare: Runge-Kutta;

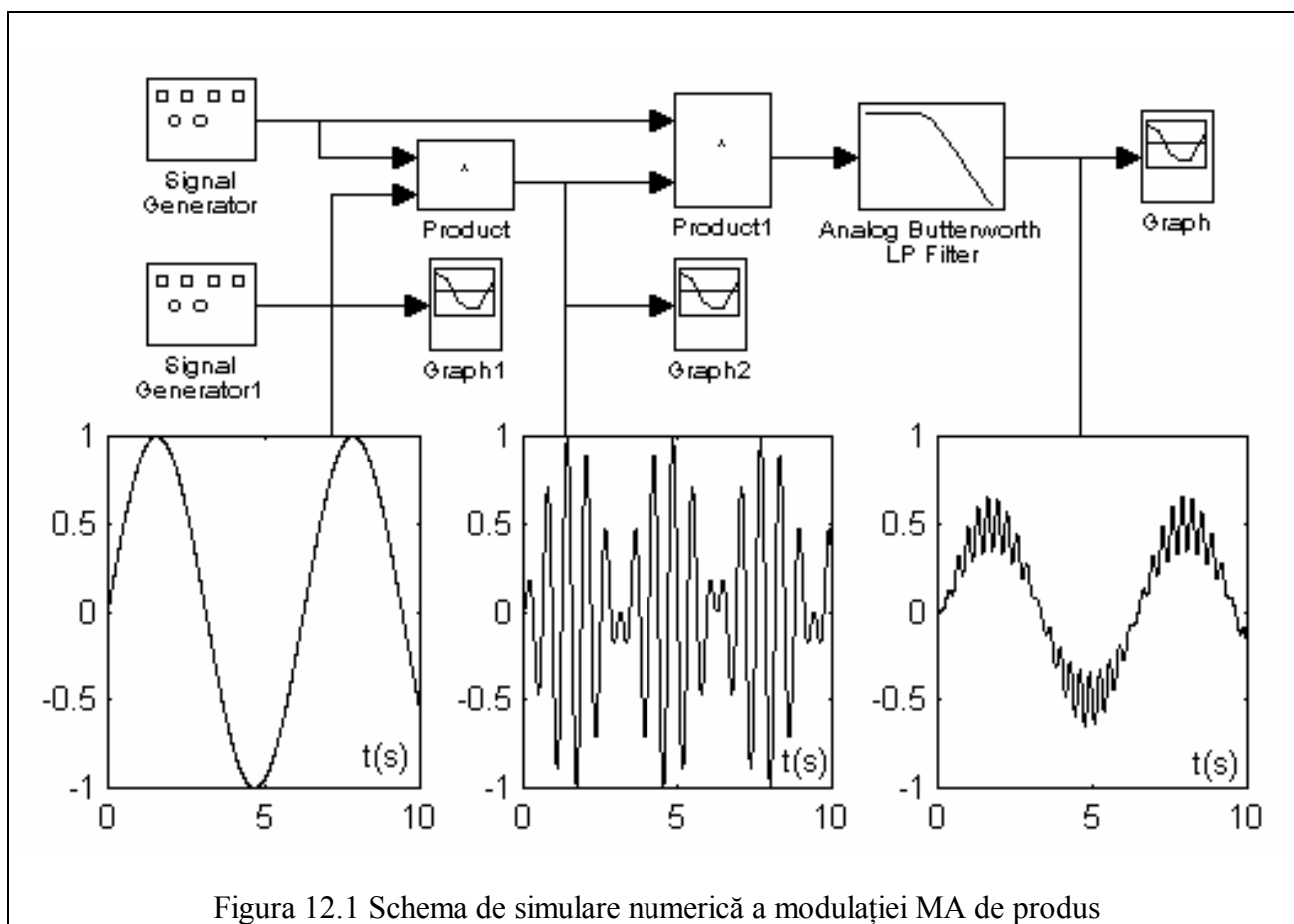
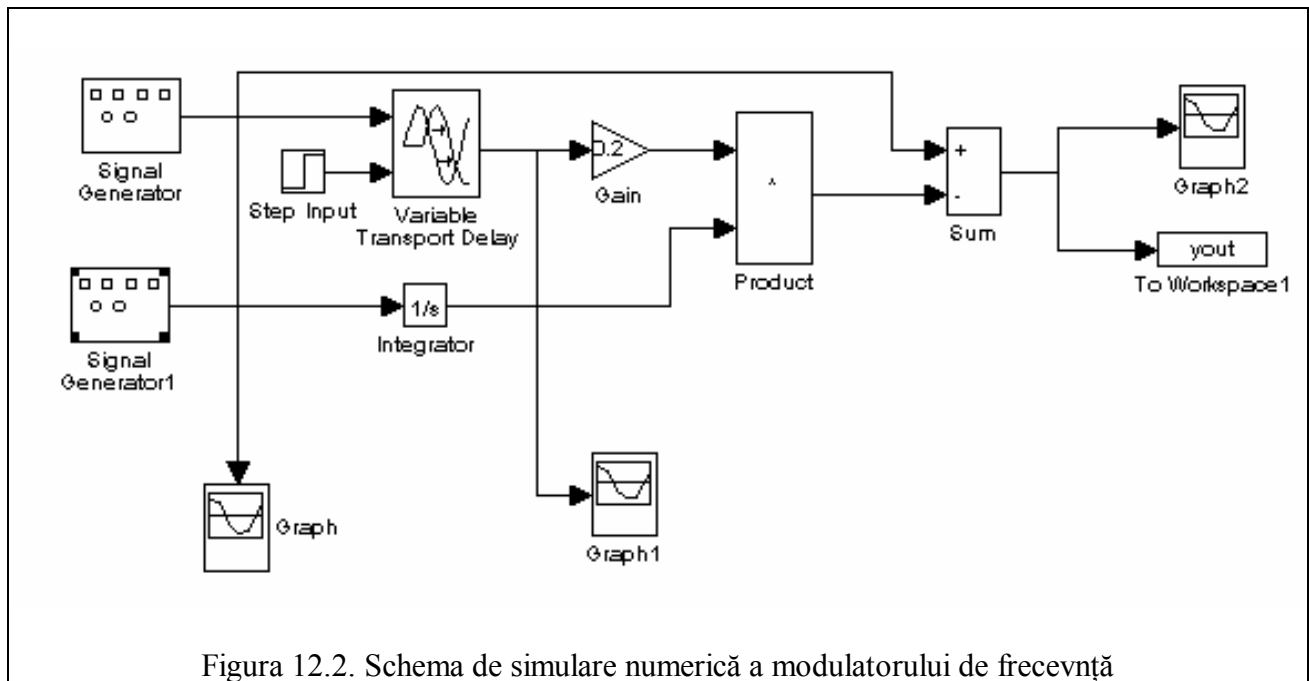


Figura 12.1 Schema de simulare numerică a modulației MA de produs

12.2.3 Să se realizeze schema din figura 11.2, în care “*Signal Generator*” furnizează un semnal cu pulsația de 1 rad/s și amplitudinea de 1V, iar “*Signal Generator 1*” dă un semnal de amplitudine egală cu 0.2 V și pulsația de 0.15 rad/s. Valoarea întârzierii produsă de elementul de întârziere (“*Variable transport Delay*”) este de  $\pi/2$ .



12.2.4 Să se simuleze numeric sistemul (timpul de integrare este 50s) și să se explice rezultatul obținut.

**Lucrarea nr. 13****ANALIZA SISTEMELOR ANALOGICE ÎN PLANUL FAZELOR****13.1. Obiectivul lucrării:**

- simularea unui sistem neliniar;
- stabilirea corespondenței dintre formele traiectoriilor de fază și evoluțiile temporale ale componentei libere din răspunsul dinamic al unui sistem.

**13.2. Noțiuni teoretice**

Fie un sistem de ordinul 2, având ecuațiile de stare:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2) \quad (13.1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2) \quad (13.2)$$

Din ecuațiile (13.1) și (13.2) rezultă (prin împărțire):

$$\frac{dx_2}{dx_1} = F(x_1, x_2) \quad (13.3)$$

unde

$$F(x_1, x_2) = \frac{f_1(x_1, x_2)}{f_2(x_1, x_2)} \quad (13.3.a)$$

Considerând starea inițială ( $x_{10}$  și  $x_{20}$ ) nenulă, integrarea ecuației (13.3) conduce la traiectoria de fază în planul  $x_1$ - $x_2$  (planul fazelor). Câteva configurații ale traiectoriilor de fază și evoluțiile în timp ale ieșirii  $y=x_1(t)$  sunt date în figura 13.1.

În ultima diagramă, traiectoria de fază închisă reprezintă un ciclu limită și corespunde unor evoluții periodice ale variabilelor  $x_1$  și  $x_2$ .

**13.3. Modul de lucru**

13.3.1 Se consideră un sistem dinamic neliniar analogic, având ecuațiile de stare:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.2x_1|x_1| + 0.8x_2 + 4 \\ \dot{x}_2 &= 1.5x_1x_2 + 1.2x_2 \end{aligned} \quad (13.4)$$

Se realizează schema de simulare, utilizând un generator de funcții pentru obținerea semnalului de intrare  $u(t)$ . Variabilele  $x_1(t)$  se vor vizualiza la "Osciloscop" (blocul SCOPE), iar pentru determinarea traiectoriilor de fază se va utiliza un inregistrator X-Y.

Punând  $u(t)=0$ , se vor determina răspunsurile libere ale sistemului și traiectoriile de fază, pornind de la următoarele condiții inițiale:

$$\text{a) } x_1(0)=3; x_2(0)=-1; \quad \text{și} \quad \text{b) } x_1(0)=3; x_2(0)=0.005; \quad (13.5)$$

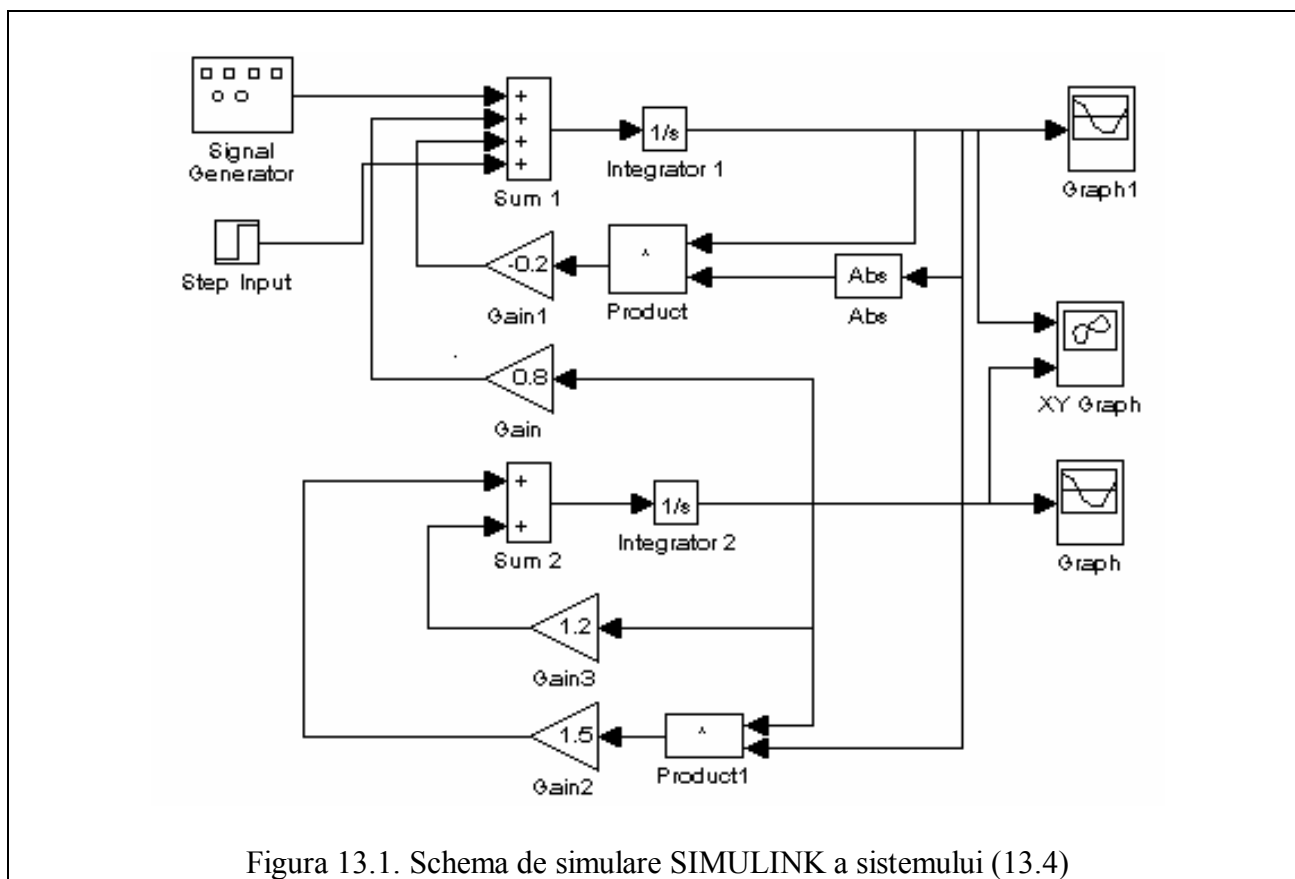


Figura 13.1. Schema de simulare SIMULINK a sistemului (13.4)

13.3.2. Să se realizeze schema de simulare din figura 13.3. Prin "step input" se fixează condiții inițiale nenule ale sistemului de ordinul 2.

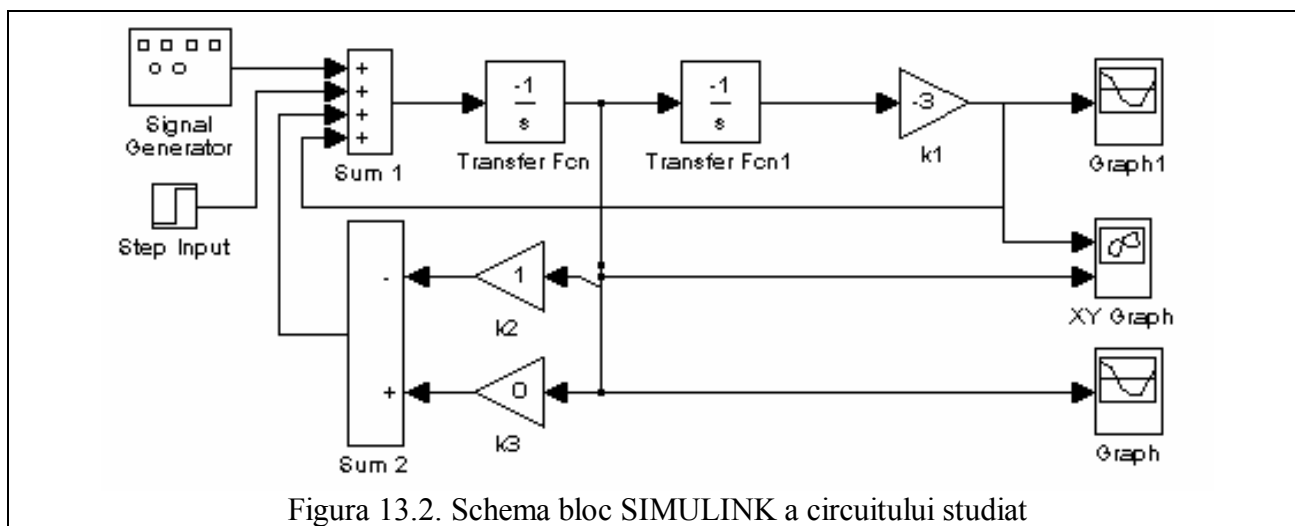


Figura 13.2. Schema bloc SIMULINK a circuitului studiat

13.3.3. Pornind de la schema din figura 13.2, se deduce modelul matematic al sistemului în descriere intrare-ieșire și în descriere intrare-stare-ieșire.

13.3.4 Se înregistrează traiectoriile de fază pentru: a)  $k_2=0$ ,  $k_3=1$ ; b)  $k_2=1$ ,  $k_3=0$ . Alura semnalelor pentru al doilea caz este prezentată în figura 13.3.

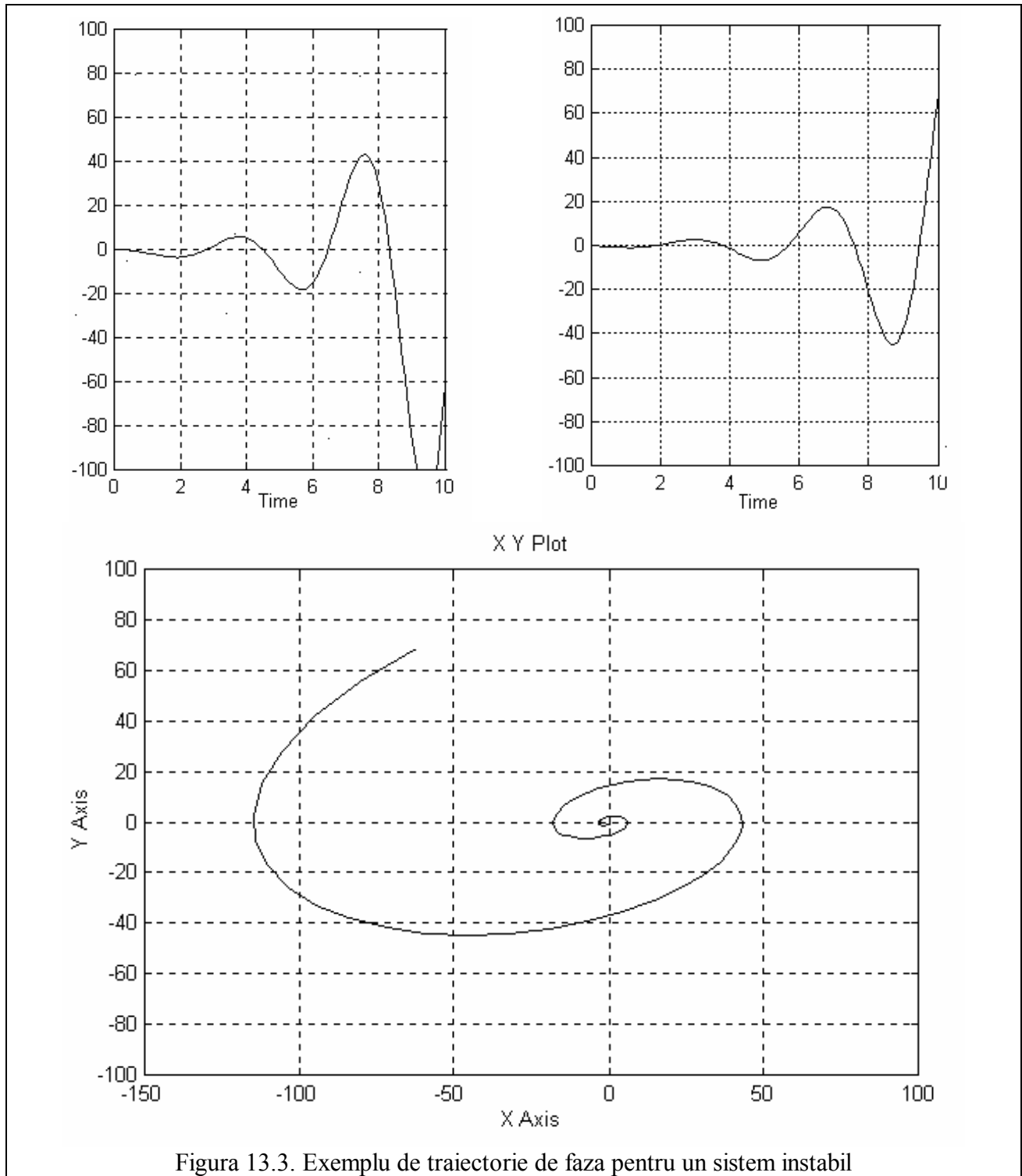


Figura 13.3. Exemplu de traiectorie de faza pentru un sistem instabil

13.3.5 Se va da o variație, de forma unei unde dreptunghiulare, variabilei de intrare  $u(t)$  și se vor înregistra variabilele de stare.

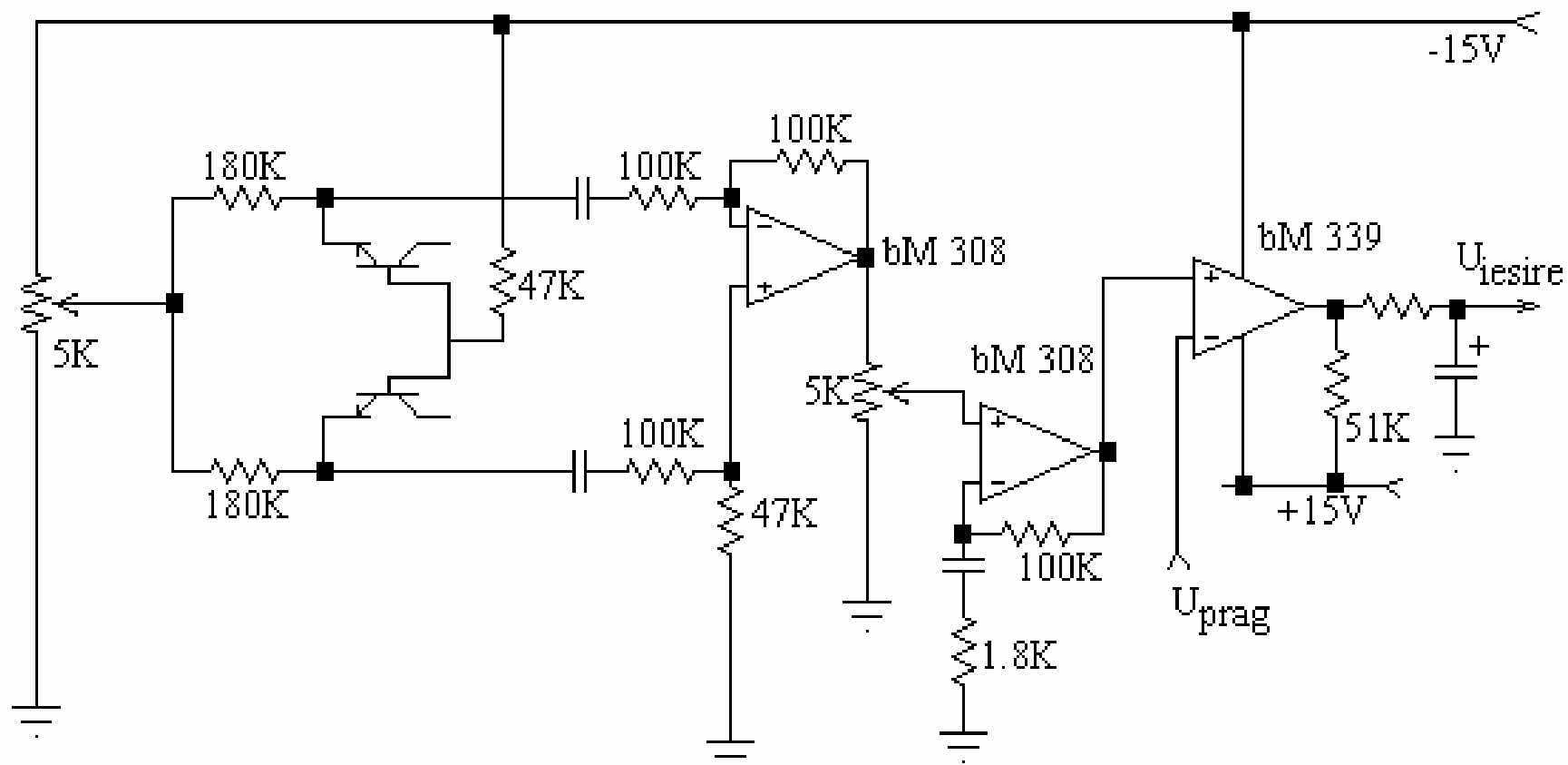
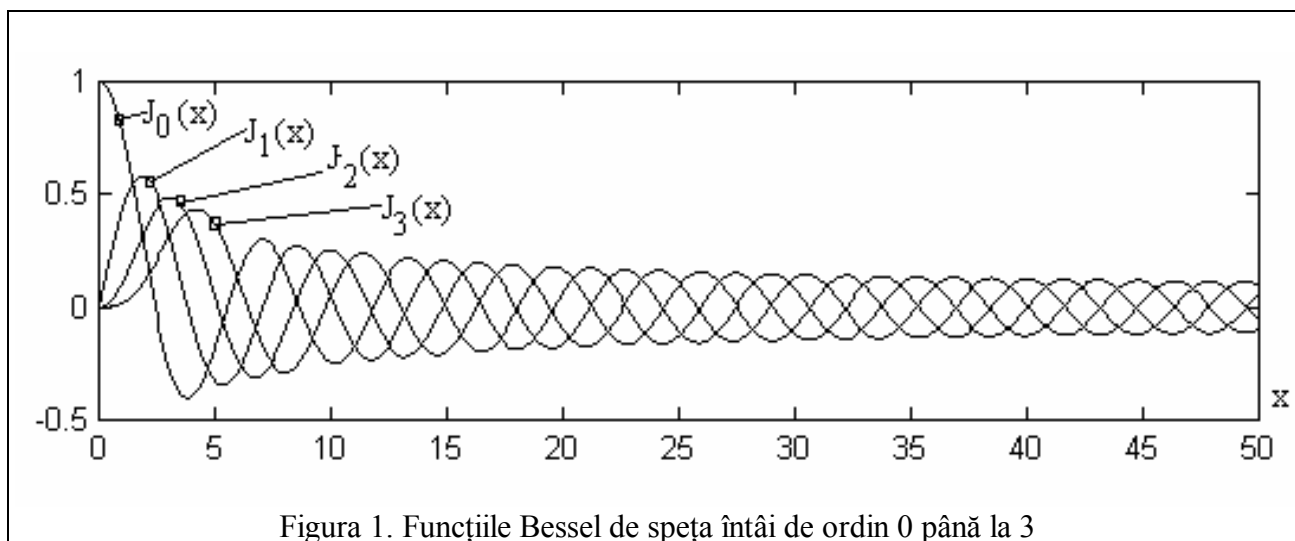


Figura A1. Schema electrică de principiu a generatorului de zgomot pentru lucrarea “*Semnale Aleatoare*”, (L2-P I)

**ANEXA 2- FUNCȚIILE BESSEL DE SPEȚA ÎNTÂI****Valorile funcțiilor Bessel de speța întâi**

<b>x</b>	<b><math>J_0(x)</math></b>	<b><math>J_1(x)</math></b>	<b><math>J_2(x)</math></b>	<b><math>J_3(x)</math></b>	<b><math>J_4(x)</math></b>	<b><math>J_5(x)</math></b>
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0100	1.0000	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0200	0.9999	0.0100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0300	0.9998	0.0150	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
0.0400	0.9996	0.0200	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
0.0500	0.9994	0.0250	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.9991	0.0300	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
0.0700	0.9988	0.0350	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000
0.0800	0.9984	0.0400	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
0.0900	0.9980	0.0450	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.9975	0.0499	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000
0.1100	0.9970	0.0549	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000
0.1200	0.9964	0.0599	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000
0.1300	0.9958	0.0649	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000
0.1400	0.9951	0.0698	0.0024	0.0001	0.0000	0.0000
0.1500	0.9944	0.0748	0.0028	0.0001	0.0000	0.0000
0.1600	0.9936	0.0797	0.0032	0.0001	0.0000	0.0000
0.1700	0.9928	0.0847	0.0036	0.0001	0.0000	0.0000
0.1800	0.9919	0.0896	0.0040	0.0001	0.0000	0.0000
0.1900	0.9910	0.0946	0.0045	0.0001	0.0000	0.0000
0.2000	0.9900	0.0995	0.0050	0.0002	0.0000	0.0000
0.2100	0.9890	0.1044	0.0055	0.0002	0.0000	0.0000
0.2200	0.9879	0.1093	0.0060	0.0002	0.0000	0.0000
0.2300	0.9868	0.1142	0.0066	0.0003	0.0000	0.0000
0.2400	0.9857	0.1191	0.0072	0.0003	0.0000	0.0000
0.2500	0.9844	0.1240	0.0078	0.0003	0.0000	0.0000
0.2600	0.9832	0.1289	0.0084	0.0004	0.0000	0.0000

0.2700	0.9819	0.1338	0.0091	0.0004	0.0000	0.0000
0.2800	0.9805	0.1386	0.0097	0.0005	0.0000	0.0000
0.2900	0.9791	0.1435	0.0104	0.0005	0.0000	0.0000
0.3000	0.9776	0.1483	0.0112	0.0006	0.0000	0.0000
0.3100	0.9761	0.1531	0.0119	0.0006	0.0000	0.0000
0.3200	0.9746	0.1580	0.0127	0.0007	0.0000	0.0000
0.3300	0.9730	0.1628	0.0135	0.0007	0.0000	0.0000
0.3400	0.9713	0.1676	0.0143	0.0008	0.0000	0.0000
0.3500	0.9696	0.1723	0.0152	0.0009	0.0000	0.0000
0.3600	0.9679	0.1771	0.0160	0.0010	0.0000	0.0000
0.3700	0.9661	0.1819	0.0169	0.0010	0.0000	0.0000
0.3800	0.9642	0.1866	0.0178	0.0011	0.0001	0.0000
0.3900	0.9623	0.1913	0.0188	0.0012	0.0001	0.0000
0.4000	0.9604	0.1960	0.0197	0.0013	0.0001	0.0000
0.4100	0.9584	0.2007	0.0207	0.0014	0.0001	0.0000
0.4200	0.9564	0.2054	0.0217	0.0015	0.0001	0.0000
0.4300	0.9543	0.2101	0.0228	0.0016	0.0001	0.0000
0.4400	0.9522	0.2147	0.0238	0.0018	0.0001	0.0000
0.4500	0.9500	0.2194	0.0249	0.0019	0.0001	0.0000
0.4600	0.9478	0.2240	0.0260	0.0020	0.0001	0.0000
0.4700	0.9455	0.2286	0.0271	0.0021	0.0001	0.0000
0.4800	0.9432	0.2332	0.0283	0.0023	0.0001	0.0000
0.4900	0.9409	0.2377	0.0294	0.0024	0.0001	0.0000
0.5000	0.9385	0.2423	0.0306	0.0026	0.0002	0.0000
0.5100	0.9360	0.2468	0.0318	0.0027	0.0002	0.0000
0.5200	0.9335	0.2513	0.0330	0.0029	0.0002	0.0000
0.5300	0.9310	0.2558	0.0343	0.0030	0.0002	0.0000
0.5400	0.9284	0.2603	0.0356	0.0032	0.0002	0.0000
0.5500	0.9258	0.2647	0.0369	0.0034	0.0002	0.0000
0.5600	0.9231	0.2692	0.0382	0.0036	0.0003	0.0000
0.5700	0.9204	0.2736	0.0395	0.0038	0.0003	0.0000
0.5800	0.9177	0.2780	0.0409	0.0040	0.0003	0.0000
0.5900	0.9149	0.2823	0.0423	0.0042	0.0003	0.0000
0.6000	0.9120	0.2867	0.0437	0.0044	0.0003	0.0000
0.6100	0.9091	0.2910	0.0451	0.0046	0.0004	0.0000
0.6200	0.9062	0.2953	0.0465	0.0048	0.0004	0.0000
0.6300	0.9032	0.2996	0.0480	0.0051	0.0004	0.0000
0.6400	0.9002	0.3039	0.0495	0.0053	0.0004	0.0000
0.6500	0.8971	0.3081	0.0510	0.0056	0.0005	0.0000
0.6600	0.8940	0.3124	0.0525	0.0058	0.0005	0.0000
0.6700	0.8909	0.3166	0.0540	0.0061	0.0005	0.0000
0.6800	0.8877	0.3207	0.0556	0.0064	0.0005	0.0000
0.6900	0.8845	0.3249	0.0572	0.0066	0.0006	0.0000
0.7000	0.8812	0.3290	0.0588	0.0069	0.0006	0.0000
0.7100	0.8779	0.3331	0.0604	0.0072	0.0006	0.0000
0.7200	0.8745	0.3372	0.0620	0.0075	0.0007	0.0000
0.7300	0.8711	0.3412	0.0637	0.0078	0.0007	0.0001
0.7400	0.8677	0.3452	0.0654	0.0082	0.0008	0.0001
0.7500	0.8642	0.3492	0.0671	0.0085	0.0008	0.0001
0.7600	0.8607	0.3532	0.0688	0.0088	0.0008	0.0001

0.7700	0.8572	0.3572	0.0705	0.0092	0.0009	0.0001
0.7800	0.8536	0.3611	0.0723	0.0095	0.0009	0.0001
0.7900	0.8500	0.3650	0.0740	0.0099	0.0010	0.0001
0.8000	0.8463	0.3688	0.0758	0.0102	0.0010	0.0001
0.8100	0.8426	0.3727	0.0776	0.0106	0.0011	0.0001
0.8200	0.8388	0.3765	0.0794	0.0110	0.0011	0.0001
0.8300	0.8350	0.3803	0.0813	0.0114	0.0012	0.0001
0.8400	0.8312	0.3840	0.0831	0.0118	0.0013	0.0001
0.8500	0.8274	0.3878	0.0850	0.0122	0.0013	0.0001
0.8600	0.8235	0.3915	0.0869	0.0126	0.0014	0.0001
0.8700	0.8195	0.3951	0.0888	0.0131	0.0014	0.0001
0.8800	0.8156	0.3988	0.0907	0.0135	0.0015	0.0001
0.8900	0.8116	0.4024	0.0926	0.0140	0.0016	0.0001
0.9000	0.8075	0.4059	0.0946	0.0144	0.0016	0.0001
0.9100	0.8034	0.4095	0.0966	0.0149	0.0017	0.0002
0.9200	0.7993	0.4130	0.0985	0.0154	0.0018	0.0002
0.9300	0.7952	0.4165	0.1005	0.0159	0.0019	0.0002
0.9400	0.7910	0.4200	0.1025	0.0164	0.0019	0.0002
0.9500	0.7868	0.4234	0.1046	0.0169	0.0020	0.0002
0.9600	0.7825	0.4268	0.1066	0.0174	0.0021	0.0002
0.9700	0.7783	0.4302	0.1087	0.0179	0.0022	0.0002
0.9800	0.7739	0.4335	0.1107	0.0185	0.0023	0.0002
0.9900	0.7696	0.4368	0.1128	0.0190	0.0024	0.0002
1.0000	0.7652	0.4401	0.1149	0.0196	0.0025	0.0002
1.0100	0.7608	0.4433	0.1170	0.0201	0.0026	0.0003
1.0200	0.7563	0.4465	0.1191	0.0207	0.0027	0.0003
1.0300	0.7519	0.4497	0.1213	0.0213	0.0028	0.0003
1.0400	0.7473	0.4528	0.1234	0.0219	0.0029	0.0003
1.0500	0.7428	0.4559	0.1256	0.0225	0.0030	0.0003
1.0600	0.7382	0.4590	0.1278	0.0231	0.0031	0.0003
1.0700	0.7336	0.4620	0.1299	0.0237	0.0032	0.0003
1.0800	0.7290	0.4650	0.1321	0.0244	0.0033	0.0004
1.0900	0.7243	0.4680	0.1343	0.0250	0.0035	0.0004
1.1000	0.7196	0.4709	0.1366	0.0257	0.0036	0.0004
1.1100	0.7149	0.4738	0.1388	0.0264	0.0037	0.0004
1.1200	0.7101	0.4767	0.1410	0.0270	0.0038	0.0004
1.1300	0.7054	0.4795	0.1433	0.0277	0.0040	0.0005
1.1400	0.7006	0.4823	0.1456	0.0284	0.0041	0.0005
1.1500	0.6957	0.4850	0.1478	0.0292	0.0043	0.0005
1.1600	0.6909	0.4878	0.1501	0.0299	0.0044	0.0005
1.1700	0.6860	0.4904	0.1524	0.0306	0.0046	0.0005
1.1800	0.6810	0.4931	0.1547	0.0314	0.0047	0.0006
1.1900	0.6761	0.4957	0.1570	0.0321	0.0049	0.0006
1.2000	0.6711	0.4983	0.1593	0.0329	0.0050	0.0006
1.2100	0.6661	0.5008	0.1617	0.0337	0.0052	0.0006
1.2200	0.6611	0.5033	0.1640	0.0344	0.0054	0.0007
1.2300	0.6561	0.5058	0.1664	0.0352	0.0055	0.0007
1.2400	0.6510	0.5082	0.1687	0.0360	0.0057	0.0007
1.2500	0.6459	0.5106	0.1711	0.0369	0.0059	0.0007
1.2600	0.6408	0.5130	0.1735	0.0377	0.0061	0.0008

1.2700	0.6356	0.5153	0.1758	0.0385	0.0062	0.0008
1.2800	0.6305	0.5176	0.1782	0.0394	0.0064	0.0008
1.2900	0.6253	0.5198	0.1806	0.0403	0.0066	0.0009
1.3000	0.6201	0.5220	0.1830	0.0411	0.0068	0.0009
1.3100	0.6149	0.5242	0.1854	0.0420	0.0070	0.0009
1.3200	0.6096	0.5263	0.1878	0.0429	0.0072	0.0010
1.3300	0.6043	0.5284	0.1903	0.0438	0.0075	0.0010
1.3400	0.5990	0.5305	0.1927	0.0447	0.0077	0.0010
1.3500	0.5937	0.5325	0.1951	0.0457	0.0079	0.0011
1.3600	0.5884	0.5344	0.1976	0.0466	0.0081	0.0011
1.3700	0.5830	0.5364	0.2000	0.0476	0.0083	0.0012
1.3800	0.5777	0.5383	0.2024	0.0485	0.0086	0.0012
1.3900	0.5723	0.5401	0.2049	0.0495	0.0088	0.0012
1.4000	0.5669	0.5419	0.2074	0.0505	0.0091	0.0013
1.4100	0.5614	0.5437	0.2098	0.0515	0.0093	0.0013
1.4200	0.5560	0.5455	0.2123	0.0525	0.0096	0.0014
1.4300	0.5505	0.5472	0.2147	0.0535	0.0098	0.0014
1.4400	0.5450	0.5488	0.2172	0.0546	0.0101	0.0015
1.4500	0.5395	0.5504	0.2197	0.0556	0.0104	0.0015
1.4600	0.5340	0.5520	0.2222	0.0566	0.0106	0.0016
1.4700	0.5285	0.5536	0.2246	0.0577	0.0109	0.0016
1.4800	0.5230	0.5551	0.2271	0.0588	0.0112	0.0017
1.4900	0.5174	0.5565	0.2296	0.0599	0.0115	0.0017
1.5000	0.5118	0.5579	0.2321	0.0610	0.0118	0.0018
1.5100	0.5062	0.5593	0.2346	0.0621	0.0121	0.0019
1.5200	0.5006	0.5607	0.2371	0.0632	0.0124	0.0019
1.5300	0.4950	0.5620	0.2395	0.0643	0.0127	0.0020
1.5400	0.4894	0.5632	0.2420	0.0655	0.0130	0.0020
1.5500	0.4838	0.5644	0.2445	0.0666	0.0133	0.0021
1.5600	0.4781	0.5656	0.2470	0.0678	0.0136	0.0022
1.5700	0.4725	0.5667	0.2495	0.0689	0.0140	0.0022
1.5800	0.4668	0.5678	0.2520	0.0701	0.0143	0.0023
1.5900	0.4611	0.5689	0.2545	0.0713	0.0146	0.0024
1.6000	0.4554	0.5699	0.2570	0.0725	0.0150	0.0025
1.6100	0.4497	0.5709	0.2595	0.0737	0.0153	0.0025
1.6200	0.4440	0.5718	0.2619	0.0750	0.0157	0.0026
1.6300	0.4383	0.5727	0.2644	0.0762	0.0161	0.0027
1.6400	0.4325	0.5735	0.2669	0.0774	0.0164	0.0028
1.6500	0.4268	0.5743	0.2694	0.0787	0.0168	0.0028
1.6600	0.4210	0.5751	0.2719	0.0800	0.0172	0.0029
1.6700	0.4153	0.5758	0.2743	0.0813	0.0176	0.0030
1.6800	0.4095	0.5765	0.2768	0.0825	0.0180	0.0031
1.6900	0.4038	0.5772	0.2793	0.0838	0.0184	0.0032
1.7000	0.3980	0.5778	0.2817	0.0851	0.0188	0.0033
1.7100	0.3922	0.5783	0.2842	0.0865	0.0192	0.0034
1.7200	0.3864	0.5788	0.2867	0.0878	0.0196	0.0035
1.7300	0.3806	0.5793	0.2891	0.0891	0.0200	0.0036
1.7400	0.3748	0.5798	0.2916	0.0905	0.0205	0.0037
1.7500	0.3690	0.5802	0.2940	0.0919	0.0209	0.0038
1.7600	0.3632	0.5805	0.2964	0.0932	0.0214	0.0039

1.7700	0.3574	0.5808	0.2989	0.0946	0.0218	0.0040
1.7800	0.3516	0.5811	0.3013	0.0960	0.0223	0.0041
1.7900	0.3458	0.5813	0.3037	0.0974	0.0227	0.0042
1.8000	0.3400	0.5815	0.3061	0.0988	0.0232	0.0043
1.8100	0.3342	0.5817	0.3086	0.1002	0.0237	0.0044
1.8200	0.3284	0.5818	0.3110	0.1017	0.0242	0.0045
1.8300	0.3225	0.5818	0.3134	0.1031	0.0246	0.0046
1.8400	0.3167	0.5819	0.3157	0.1045	0.0251	0.0048
1.8500	0.3109	0.5818	0.3181	0.1060	0.0256	0.0049
1.8600	0.3051	0.5818	0.3205	0.1075	0.0262	0.0050
1.8700	0.2993	0.5817	0.3229	0.1089	0.0267	0.0051
1.8800	0.2934	0.5816	0.3252	0.1104	0.0272	0.0053
1.8900	0.2876	0.5814	0.3276	0.1119	0.0277	0.0054
1.9000	0.2818	0.5812	0.3299	0.1134	0.0283	0.0055
1.9100	0.2760	0.5809	0.3323	0.1149	0.0288	0.0057
1.9200	0.2702	0.5806	0.3346	0.1165	0.0293	0.0058
1.9300	0.2644	0.5803	0.3369	0.1180	0.0299	0.0060
1.9400	0.2586	0.5799	0.3392	0.1195	0.0305	0.0061
1.9500	0.2528	0.5794	0.3415	0.1211	0.0310	0.0063
1.9600	0.2470	0.5790	0.3438	0.1226	0.0316	0.0064
1.9700	0.2412	0.5785	0.3461	0.1242	0.0322	0.0066
1.9800	0.2354	0.5779	0.3483	0.1258	0.0328	0.0067
1.9900	0.2297	0.5773	0.3506	0.1274	0.0334	0.0069
2.0000	0.2239	0.5767	0.3528	0.1289	0.0340	0.0070
2.0100	0.2181	0.5761	0.3551	0.1305	0.0346	0.0072
2.0200	0.2124	0.5754	0.3573	0.1321	0.0352	0.0074
2.0300	0.2066	0.5746	0.3595	0.1338	0.0359	0.0075
2.0400	0.2009	0.5738	0.3617	0.1354	0.0365	0.0077
2.0500	0.1951	0.5730	0.3639	0.1370	0.0371	0.0079
2.0600	0.1894	0.5721	0.3661	0.1387	0.0378	0.0081
2.0700	0.1837	0.5712	0.3682	0.1403	0.0384	0.0083
2.0800	0.1780	0.5703	0.3704	0.1419	0.0391	0.0084
2.0900	0.1723	0.5693	0.3725	0.1436	0.0398	0.0086
2.1000	0.1666	0.5683	0.3746	0.1453	0.0405	0.0088
2.1100	0.1609	0.5672	0.3767	0.1470	0.0411	0.0090
2.1200	0.1553	0.5661	0.3788	0.1486	0.0418	0.0092
2.1300	0.1496	0.5650	0.3809	0.1503	0.0425	0.0094
2.1400	0.1440	0.5638	0.3830	0.1520	0.0432	0.0096
2.1500	0.1383	0.5626	0.3850	0.1537	0.0440	0.0098
2.1600	0.1327	0.5614	0.3871	0.1554	0.0447	0.0101
2.1700	0.1271	0.5601	0.3891	0.1571	0.0454	0.0103
2.1800	0.1215	0.5587	0.3911	0.1589	0.0461	0.0105
2.1900	0.1159	0.5574	0.3931	0.1606	0.0469	0.0107
2.2000	0.1104	0.5560	0.3951	0.1623	0.0476	0.0109
2.2100	0.1048	0.5545	0.3970	0.1641	0.0484	0.0112
2.2200	0.0993	0.5530	0.3990	0.1658	0.0492	0.0114
2.2300	0.0937	0.5515	0.4009	0.1676	0.0500	0.0116
2.2400	0.0882	0.5500	0.4028	0.1693	0.0507	0.0119
2.2500	0.0827	0.5484	0.4047	0.1711	0.0515	0.0121
2.2600	0.0773	0.5468	0.4066	0.1729	0.0523	0.0124

2.2700	0.0718	0.5451	0.4084	0.1746	0.0531	0.0126
2.2800	0.0664	0.5434	0.4103	0.1764	0.0539	0.0129
2.2900	0.0609	0.5416	0.4121	0.1782	0.0548	0.0131
2.3000	0.0555	0.5399	0.4139	0.1800	0.0556	0.0134
2.3100	0.0502	0.5381	0.4157	0.1818	0.0564	0.0137
2.3200	0.0448	0.5362	0.4175	0.1836	0.0573	0.0139
2.3300	0.0394	0.5343	0.4192	0.1854	0.0581	0.0142
2.3400	0.0341	0.5324	0.4210	0.1872	0.0590	0.0145
2.3500	0.0288	0.5305	0.4227	0.1890	0.0599	0.0148
2.3600	0.0235	0.5285	0.4244	0.1908	0.0607	0.0151
2.3700	0.0182	0.5265	0.4261	0.1926	0.0616	0.0153
2.3800	0.0130	0.5244	0.4277	0.1945	0.0625	0.0156
2.3900	0.0077	0.5223	0.4294	0.1963	0.0634	0.0159
2.4000	0.0025	0.5202	0.4310	0.1981	0.0643	0.0162
2.4100	-0.0027	0.5180	0.4326	0.1999	0.0652	0.0165
2.4200	-0.0079	0.5158	0.4342	0.2018	0.0661	0.0169
2.4300	-0.0130	0.5136	0.4357	0.2036	0.0671	0.0172
2.4400	-0.0181	0.5113	0.4373	0.2055	0.0680	0.0175
2.4500	-0.0232	0.5091	0.4388	0.2073	0.0689	0.0178
2.4600	-0.0283	0.5067	0.4403	0.2092	0.0699	0.0181
2.4700	-0.0334	0.5044	0.4418	0.2110	0.0709	0.0185
2.4800	-0.0384	0.5020	0.4432	0.2129	0.0718	0.0188
2.4900	-0.0434	0.4996	0.4446	0.2147	0.0728	0.0192
2.5000	-0.0484	0.4971	0.4461	0.2166	0.0738	0.0195
2.5100	-0.0533	0.4946	0.4475	0.2185	0.0748	0.0199
2.5200	-0.0583	0.4921	0.4488	0.2203	0.0758	0.0202
2.5300	-0.0632	0.4895	0.4502	0.2222	0.0768	0.0206
2.5400	-0.0681	0.4870	0.4515	0.2241	0.0778	0.0209
2.5500	-0.0729	0.4843	0.4528	0.2259	0.0788	0.0213
2.5600	-0.0778	0.4817	0.4541	0.2278	0.0798	0.0217
2.5700	-0.0826	0.4790	0.4553	0.2297	0.0809	0.0220
2.5800	-0.0873	0.4763	0.4566	0.2315	0.0819	0.0224
2.5900	-0.0921	0.4736	0.4578	0.2334	0.0830	0.0228
2.6000	-0.0968	0.4708	0.4590	0.2353	0.0840	0.0232
2.6100	-0.1015	0.4680	0.4601	0.2372	0.0851	0.0236
2.6200	-0.1062	0.4652	0.4613	0.2390	0.0861	0.0240
2.6300	-0.1108	0.4624	0.4624	0.2409	0.0872	0.0244
2.6400	-0.1154	0.4595	0.4635	0.2428	0.0883	0.0248
2.6500	-0.1200	0.4566	0.4646	0.2447	0.0894	0.0252
2.6600	-0.1245	0.4536	0.4656	0.2465	0.0905	0.0257
2.6700	-0.1291	0.4507	0.4666	0.2484	0.0916	0.0261
2.6800	-0.1336	0.4477	0.4676	0.2503	0.0927	0.0265
2.6900	-0.1380	0.4446	0.4686	0.2522	0.0939	0.0269
2.7000	-0.1424	0.4416	0.4696	0.2540	0.0950	0.0274
2.7100	-0.1469	0.4385	0.4705	0.2559	0.0961	0.0278
2.7200	-0.1512	0.4354	0.4714	0.2578	0.0973	0.0283
2.7300	-0.1556	0.4323	0.4723	0.2597	0.0984	0.0287
2.7400	-0.1599	0.4291	0.4731	0.2615	0.0996	0.0292
2.7500	-0.1641	0.4260	0.4739	0.2634	0.1007	0.0297
2.7600	-0.1684	0.4228	0.4747	0.2653	0.1019	0.0301

2.7700	-0.1726	0.4195	0.4755	0.2671	0.1031	0.0306
2.7800	-0.1768	0.4163	0.4763	0.2690	0.1043	0.0311
2.7900	-0.1809	0.4130	0.4770	0.2708	0.1055	0.0316
2.8000	-0.1850	0.4097	0.4777	0.2727	0.1067	0.0321
2.8100	-0.1891	0.4064	0.4784	0.2746	0.1079	0.0326
2.8200	-0.1932	0.4030	0.4790	0.2764	0.1091	0.0331
2.8300	-0.1972	0.3997	0.4796	0.2783	0.1103	0.0336
2.8400	-0.2012	0.3963	0.4802	0.2801	0.1115	0.0341
2.8500	-0.2051	0.3928	0.4808	0.2819	0.1128	0.0346
2.8600	-0.2090	0.3894	0.4813	0.2838	0.1140	0.0351
2.8700	-0.2129	0.3859	0.4818	0.2856	0.1153	0.0357
2.8800	-0.2167	0.3825	0.4823	0.2874	0.1165	0.0362
2.8900	-0.2205	0.3790	0.4828	0.2893	0.1178	0.0367
2.9000	-0.2243	0.3754	0.4832	0.2911	0.1190	0.0373
2.9100	-0.2280	0.3719	0.4836	0.2929	0.1203	0.0378
2.9200	-0.2317	0.3683	0.4840	0.2947	0.1216	0.0384
2.9300	-0.2354	0.3647	0.4844	0.2965	0.1229	0.0389
2.9400	-0.2390	0.3611	0.4847	0.2983	0.1242	0.0395
2.9500	-0.2426	0.3575	0.4850	0.3001	0.1255	0.0401
2.9600	-0.2462	0.3538	0.4853	0.3019	0.1268	0.0407
2.9700	-0.2497	0.3502	0.4855	0.3037	0.1281	0.0412
2.9800	-0.2532	0.3465	0.4857	0.3055	0.1294	0.0418
2.9900	-0.2566	0.3428	0.4859	0.3073	0.1307	0.0424
3.0000	-0.2601	0.3391	0.4861	0.3091	0.1320	0.0430
3.0100	-0.2634	0.3353	0.4862	0.3108	0.1334	0.0436
3.0200	-0.2668	0.3316	0.4863	0.3126	0.1347	0.0442
3.0300	-0.2701	0.3278	0.4864	0.3143	0.1361	0.0449
3.0400	-0.2733	0.3240	0.4865	0.3161	0.1374	0.0455
3.0500	-0.2765	0.3202	0.4865	0.3178	0.1388	0.0461
3.0600	-0.2797	0.3164	0.4865	0.3196	0.1401	0.0467
3.0700	-0.2829	0.3125	0.4865	0.3213	0.1415	0.0474
3.0800	-0.2860	0.3087	0.4864	0.3230	0.1429	0.0480
3.0900	-0.2890	0.3048	0.4863	0.3247	0.1442	0.0487
3.1000	-0.2921	0.3009	0.4862	0.3264	0.1456	0.0493
3.1100	-0.2951	0.2970	0.4861	0.3281	0.1470	0.0500
3.1200	-0.2980	0.2931	0.4859	0.3298	0.1484	0.0507
3.1300	-0.3009	0.2892	0.4857	0.3315	0.1498	0.0514
3.1400	-0.3038	0.2852	0.4855	0.3332	0.1512	0.0520
3.1500	-0.3066	0.2813	0.4852	0.3349	0.1526	0.0527
3.1600	-0.3094	0.2773	0.4849	0.3365	0.1540	0.0534
3.1700	-0.3122	0.2733	0.4846	0.3382	0.1554	0.0541
3.1800	-0.3149	0.2694	0.4843	0.3398	0.1569	0.0548
3.1900	-0.3176	0.2654	0.4839	0.3414	0.1583	0.0555
3.2000	-0.3202	0.2613	0.4835	0.3431	0.1597	0.0562
3.2100	-0.3228	0.2573	0.4831	0.3447	0.1612	0.0570
3.2200	-0.3253	0.2533	0.4827	0.3463	0.1626	0.0577
3.2300	-0.3278	0.2492	0.4822	0.3479	0.1640	0.0584
3.2400	-0.3303	0.2452	0.4817	0.3495	0.1655	0.0592
3.2500	-0.3328	0.2411	0.4811	0.3510	0.1669	0.0599
3.2600	-0.3351	0.2370	0.4806	0.3526	0.1684	0.0607

3.2700	-0.3375	0.2330	0.4800	0.3542	0.1699	0.0614
3.2800	-0.3398	0.2289	0.4794	0.3557	0.1713	0.0622
3.2900	-0.3421	0.2248	0.4787	0.3572	0.1728	0.0629
3.3000	-0.3443	0.2207	0.4780	0.3588	0.1743	0.0637
3.3100	-0.3465	0.2165	0.4773	0.3603	0.1758	0.0645
3.3200	-0.3486	0.2124	0.4766	0.3618	0.1772	0.0653
3.3300	-0.3507	0.2083	0.4758	0.3633	0.1787	0.0661
3.3400	-0.3528	0.2042	0.4750	0.3648	0.1802	0.0669
3.3500	-0.3548	0.2000	0.4742	0.3662	0.1817	0.0677
3.3600	-0.3568	0.1959	0.4734	0.3677	0.1832	0.0685
3.3700	-0.3587	0.1917	0.4725	0.3691	0.1847	0.0693
3.3800	-0.3606	0.1876	0.4716	0.3706	0.1862	0.0701
3.3900	-0.3625	0.1834	0.4707	0.3720	0.1877	0.0710
3.4000	-0.3643	0.1792	0.4697	0.3734	0.1892	0.0718
3.4100	-0.3661	0.1751	0.4687	0.3748	0.1907	0.0726
3.4200	-0.3678	0.1709	0.4677	0.3762	0.1922	0.0735
3.4300	-0.3695	0.1667	0.4667	0.3775	0.1937	0.0743
3.4400	-0.3711	0.1625	0.4656	0.3789	0.1953	0.0752
3.4500	-0.3727	0.1583	0.4645	0.3802	0.1968	0.0760
3.4600	-0.3743	0.1541	0.4634	0.3816	0.1983	0.0769
3.4700	-0.3758	0.1500	0.4622	0.3829	0.1998	0.0778
3.4800	-0.3773	0.1458	0.4611	0.3842	0.2013	0.0787
3.4900	-0.3787	0.1416	0.4599	0.3855	0.2029	0.0796
3.5000	-0.3801	0.1374	0.4586	0.3868	0.2044	0.0804
3.5100	-0.3815	0.1332	0.4574	0.3880	0.2059	0.0813
3.5200	-0.3828	0.1290	0.4561	0.3893	0.2075	0.0822
3.5300	-0.3841	0.1248	0.4548	0.3905	0.2090	0.0832
3.5400	-0.3853	0.1206	0.4534	0.3917	0.2105	0.0841
3.5500	-0.3865	0.1164	0.4521	0.3929	0.2121	0.0850
3.5600	-0.3876	0.1122	0.4507	0.3941	0.2136	0.0859
3.5700	-0.3887	0.1080	0.4492	0.3953	0.2152	0.0868
3.5800	-0.3898	0.1038	0.4478	0.3965	0.2167	0.0878
3.5900	-0.3908	0.0996	0.4463	0.3976	0.2183	0.0887
3.6000	-0.3918	0.0955	0.4448	0.3988	0.2198	0.0897
3.6100	-0.3927	0.0913	0.4433	0.3999	0.2213	0.0906
3.6200	-0.3936	0.0871	0.4417	0.4010	0.2229	0.0916
3.6300	-0.3944	0.0829	0.4401	0.4021	0.2244	0.0926
3.6400	-0.3953	0.0788	0.4385	0.4031	0.2260	0.0935
3.6500	-0.3960	0.0746	0.4369	0.4042	0.2275	0.0945
3.6600	-0.3967	0.0704	0.4352	0.4052	0.2291	0.0955
3.6700	-0.3974	0.0663	0.4335	0.4063	0.2306	0.0965
3.6800	-0.3981	0.0621	0.4318	0.4073	0.2322	0.0975
3.6900	-0.3987	0.0580	0.4301	0.4083	0.2337	0.0985
3.7000	-0.3992	0.0538	0.4283	0.4092	0.2353	0.0995
3.7100	-0.3997	0.0497	0.4265	0.4102	0.2368	0.1005
3.7200	-0.4002	0.0456	0.4247	0.4111	0.2384	0.1015
3.7300	-0.4007	0.0414	0.4229	0.4120	0.2399	0.1025
3.7400	-0.4011	0.0373	0.4210	0.4130	0.2415	0.1036
3.7500	-0.4014	0.0332	0.4191	0.4138	0.2430	0.1046
3.7600	-0.4017	0.0291	0.4172	0.4147	0.2446	0.1056

3.7700	-0.4020	0.0250	0.4153	0.4156	0.2461	0.1067
3.7800	-0.4022	0.0210	0.4133	0.4164	0.2477	0.1077
3.7900	-0.4024	0.0169	0.4113	0.4172	0.2492	0.1088
3.8000	-0.4026	0.0128	0.4093	0.4180	0.2507	0.1098
3.8100	-0.4027	0.0088	0.4073	0.4188	0.2523	0.1109
3.8200	-0.4027	0.0047	0.4052	0.4196	0.2538	0.1120
3.8300	-0.4028	0.0007	0.4031	0.4203	0.2554	0.1130
3.8400	-0.4027	-0.0033	0.4010	0.4211	0.2569	0.1141
3.8500	-0.4027	-0.0074	0.3989	0.4218	0.2584	0.1152
3.8600	-0.4026	-0.0114	0.3967	0.4225	0.2600	0.1163
3.8700	-0.4025	-0.0153	0.3945	0.4231	0.2615	0.1174
3.8800	-0.4023	-0.0193	0.3923	0.4238	0.2630	0.1185
3.8900	-0.4021	-0.0233	0.3901	0.4244	0.2645	0.1196
3.9000	-0.4018	-0.0272	0.3879	0.4250	0.2661	0.1207
3.9100	-0.4015	-0.0312	0.3856	0.4256	0.2676	0.1218
3.9200	-0.4012	-0.0351	0.3833	0.4262	0.2691	0.1230
3.9300	-0.4008	-0.0390	0.3810	0.4268	0.2706	0.1241
3.9400	-0.4004	-0.0429	0.3786	0.4273	0.2721	0.1252
3.9500	-0.4000	-0.0468	0.3763	0.4279	0.2736	0.1263
3.9600	-0.3995	-0.0507	0.3739	0.4284	0.2751	0.1275
3.9700	-0.3990	-0.0546	0.3715	0.4288	0.2766	0.1286
3.9800	-0.3984	-0.0584	0.3690	0.4293	0.2781	0.1298
3.9900	-0.3978	-0.0622	0.3666	0.4297	0.2796	0.1309
4.0000	-0.3971	-0.0660	0.3641	0.4302	0.2811	0.1321
4.0100	-0.3965	-0.0698	0.3616	0.4306	0.2826	0.1332
4.0200	-0.3958	-0.0736	0.3591	0.4310	0.2841	0.1344
4.0300	-0.3950	-0.0774	0.3566	0.4313	0.2856	0.1356
4.0400	-0.3942	-0.0811	0.3540	0.4317	0.2871	0.1368
4.0500	-0.3934	-0.0849	0.3515	0.4320	0.2885	0.1379
4.0600	-0.3925	-0.0886	0.3489	0.4323	0.2900	0.1391
4.0700	-0.3916	-0.0923	0.3463	0.4326	0.2915	0.1403
4.0800	-0.3907	-0.0960	0.3436	0.4328	0.2929	0.1415
4.0900	-0.3897	-0.0996	0.3410	0.4331	0.2944	0.1427
4.1000	-0.3887	-0.1033	0.3383	0.4333	0.2958	0.1439
4.1100	-0.3876	-0.1069	0.3356	0.4335	0.2973	0.1451
4.1200	-0.3865	-0.1105	0.3329	0.4337	0.2987	0.1463
4.1300	-0.3854	-0.1141	0.3302	0.4339	0.3001	0.1475
4.1400	-0.3842	-0.1177	0.3274	0.4340	0.3016	0.1488
4.1500	-0.3831	-0.1212	0.3246	0.4341	0.3030	0.1500
4.1600	-0.3818	-0.1247	0.3219	0.4342	0.3044	0.1512
4.1700	-0.3806	-0.1282	0.3191	0.4343	0.3058	0.1524
4.1800	-0.3793	-0.1317	0.3162	0.4343	0.3072	0.1537
4.1900	-0.3779	-0.1352	0.3134	0.4344	0.3086	0.1549
4.2000	-0.3766	-0.1386	0.3105	0.4344	0.3100	0.1561
4.2100	-0.3752	-0.1421	0.3077	0.4344	0.3114	0.1574
4.2200	-0.3737	-0.1455	0.3048	0.4344	0.3128	0.1586
4.2300	-0.3722	-0.1489	0.3019	0.4343	0.3142	0.1599
4.2400	-0.3707	-0.1522	0.2989	0.4342	0.3155	0.1611
4.2500	-0.3692	-0.1556	0.2960	0.4341	0.3169	0.1624
4.2600	-0.3676	-0.1589	0.2930	0.4340	0.3183	0.1636

4.2700	-0.3660	-0.1622	0.2901	0.4339	0.3196	0.1649
4.2800	-0.3644	-0.1654	0.2871	0.4337	0.3210	0.1662
4.2900	-0.3627	-0.1687	0.2841	0.4335	0.3223	0.1674
4.3000	-0.3610	-0.1719	0.2811	0.4333	0.3236	0.1687
4.3100	-0.3593	-0.1751	0.2780	0.4331	0.3249	0.1700
4.3200	-0.3575	-0.1783	0.2750	0.4329	0.3262	0.1713
4.3300	-0.3557	-0.1814	0.2719	0.4326	0.3275	0.1726
4.3400	-0.3539	-0.1845	0.2688	0.4323	0.3288	0.1738
4.3500	-0.3520	-0.1876	0.2657	0.4320	0.3301	0.1751
4.3600	-0.3501	-0.1907	0.2626	0.4317	0.3314	0.1764
4.3700	-0.3482	-0.1938	0.2595	0.4313	0.3327	0.1777
4.3800	-0.3463	-0.1968	0.2564	0.4309	0.3339	0.1790
4.3900	-0.3443	-0.1998	0.2532	0.4305	0.3352	0.1803
4.4000	-0.3423	-0.2028	0.2501	0.4301	0.3365	0.1816
4.4100	-0.3402	-0.2057	0.2469	0.4297	0.3377	0.1829
4.4200	-0.3381	-0.2086	0.2437	0.4292	0.3389	0.1842
4.4300	-0.3360	-0.2115	0.2405	0.4287	0.3401	0.1855
4.4400	-0.3339	-0.2144	0.2373	0.4282	0.3413	0.1868
4.4500	-0.3318	-0.2173	0.2341	0.4277	0.3426	0.1881
4.4600	-0.3296	-0.2201	0.2309	0.4271	0.3437	0.1894
4.4700	-0.3274	-0.2229	0.2276	0.4266	0.3449	0.1908
4.4800	-0.3251	-0.2256	0.2244	0.4260	0.3461	0.1921
4.4900	-0.3228	-0.2284	0.2211	0.4253	0.3473	0.1934
4.5000	-0.3205	-0.2311	0.2178	0.4247	0.3484	0.1947
4.5100	-0.3182	-0.2337	0.2146	0.4240	0.3496	0.1960
4.5200	-0.3159	-0.2364	0.2113	0.4234	0.3507	0.1974
4.5300	-0.3135	-0.2390	0.2080	0.4226	0.3518	0.1987
4.5400	-0.3111	-0.2416	0.2047	0.4219	0.3529	0.2000
4.5500	-0.3087	-0.2442	0.2013	0.4212	0.3540	0.2013
4.5600	-0.3062	-0.2467	0.1980	0.4204	0.3551	0.2027
4.5700	-0.3037	-0.2492	0.1947	0.4196	0.3562	0.2040
4.5800	-0.3012	-0.2517	0.1913	0.4188	0.3573	0.2053
4.5900	-0.2987	-0.2541	0.1880	0.4179	0.3584	0.2067
4.6000	-0.2961	-0.2566	0.1846	0.4171	0.3594	0.2080
4.6100	-0.2936	-0.2589	0.1812	0.4162	0.3604	0.2093
4.6200	-0.2910	-0.2613	0.1778	0.4153	0.3615	0.2107
4.6300	-0.2883	-0.2636	0.1745	0.4143	0.3625	0.2120
4.6400	-0.2857	-0.2659	0.1711	0.4134	0.3635	0.2133
4.6500	-0.2830	-0.2682	0.1677	0.4124	0.3645	0.2147
4.6600	-0.2803	-0.2704	0.1643	0.4114	0.3655	0.2160
4.6700	-0.2776	-0.2726	0.1608	0.4104	0.3665	0.2173
4.6800	-0.2749	-0.2748	0.1574	0.4094	0.3674	0.2187
4.6900	-0.2721	-0.2770	0.1540	0.4083	0.3684	0.2200
4.7000	-0.2693	-0.2791	0.1506	0.4072	0.3693	0.2214
4.7100	-0.2665	-0.2812	0.1471	0.4061	0.3702	0.2227
4.7200	-0.2637	-0.2832	0.1437	0.4050	0.3711	0.2240
4.7300	-0.2609	-0.2852	0.1403	0.4038	0.3720	0.2254
4.7400	-0.2580	-0.2872	0.1368	0.4027	0.3729	0.2267
4.7500	-0.2551	-0.2892	0.1334	0.4015	0.3738	0.2280
4.7600	-0.2522	-0.2911	0.1299	0.4003	0.3746	0.2294

4.7700	-0.2493	-0.2930	0.1264	0.3990	0.3755	0.2307
4.7800	-0.2464	-0.2949	0.1230	0.3978	0.3763	0.2321
4.7900	-0.2434	-0.2967	0.1195	0.3965	0.3772	0.2334
4.8000	-0.2404	-0.2985	0.1161	0.3952	0.3780	0.2347
4.8100	-0.2374	-0.3003	0.1126	0.3939	0.3788	0.2361
4.8200	-0.2344	-0.3020	0.1091	0.3925	0.3795	0.2374
4.8300	-0.2314	-0.3037	0.1056	0.3912	0.3803	0.2387
4.8400	-0.2283	-0.3054	0.1022	0.3898	0.3811	0.2401
4.8500	-0.2253	-0.3070	0.0987	0.3884	0.3818	0.2414
4.8600	-0.2222	-0.3086	0.0952	0.3870	0.3825	0.2427
4.8700	-0.2191	-0.3102	0.0917	0.3855	0.3832	0.2440
4.8800	-0.2160	-0.3117	0.0882	0.3841	0.3839	0.2454
4.8900	-0.2129	-0.3132	0.0848	0.3826	0.3846	0.2467
4.9000	-0.2097	-0.3147	0.0813	0.3811	0.3853	0.2480
4.9100	-0.2066	-0.3161	0.0778	0.3795	0.3860	0.2493
4.9200	-0.2034	-0.3175	0.0743	0.3780	0.3866	0.2507
4.9300	-0.2002	-0.3189	0.0709	0.3764	0.3872	0.2520
4.9400	-0.1970	-0.3202	0.0674	0.3748	0.3879	0.2533
4.9500	-0.1938	-0.3216	0.0639	0.3732	0.3885	0.2546
4.9600	-0.1906	-0.3228	0.0604	0.3716	0.3890	0.2559
4.9700	-0.1874	-0.3241	0.0570	0.3699	0.3896	0.2572
4.9800	-0.1841	-0.3253	0.0535	0.3682	0.3902	0.2585
4.9900	-0.1809	-0.3264	0.0500	0.3665	0.3907	0.2598
5.0000	-0.1776	-0.3276	0.0466	0.3648	0.3912	0.2611

**Observatie:** Valorile funcțiilor Bessel din tabelul de mai sus s-au obținut cu funcția **BESSELJ(ALPHA, X)** din mediul de simulare Matlab, unde  $\alpha=0,1,2,3,4,5$  și  $x$  este argumentul  $x=0:5$ .

**ANEXA 3 - Programul sursă Matlab pentru conversia funcție pondere-funcție de transfer**

```

%*****
%      Se determina parametrii functiei de transfer H(s), din raspunsul experimental la impuls,
%      prin metoda logaritmarilor succesive;
%*****

clear;clc;clc;

% !!! Se definesc, mai intai, parametrii raspunsului la impuls din inregistrarea experimentală;
% vor rezulta vectorii: t(asa timpului) si h(funcția pondere);
%----->
ts=..
N=...
t=0:ts:(N-1)*ts;
h=[...];
plot(t, h);grid; pause;
%-----|

for i=1:N,
    hest(i)=0;
end

gata=0;
i=1;

while (gata==0),
    disp('determinati din grafic valorile Ci si Ti');
    plot(log(abs(h-hest)));grid;pause;
    z=0;
    while (z==0),
        C(i)=input('C1=');
        T(i)=input('T1=');
        h1=C(i)*exp(-t./T(i));
        plot(t,log(abs(h-hest)),t,log(abs(h1)));grid;pause;
        z=input('Este corect ?(1=da/0=nu)');
    end
    hest=hest+h1; i=i+1;
    plot(t,h,t,hest); xlabel('timp[s]'); ylabel('h(t)'); pause;
    gata=input('gata=..?(0=nu/1=da)');
end
C'
T'

```

**Anexa 4** - Unități de măsură logaritmice:  $y=20\log_{10}(x)$  [dB]

x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]
1.0100	0.0864	1.4100	2.9844	1.8100	5.1536	2.2100	6.8878
1.0200	0.1720	1.4200	3.0458	1.8200	5.2014	2.2200	6.9271
1.0300	0.2567	1.4300	3.1067	1.8300	5.2490	2.2300	6.9661
1.0400	0.3407	1.4400	3.1672	1.8400	5.2964	2.2400	7.0050
1.0500	0.4238	1.4500	3.2274	1.8500	5.3434	2.2500	7.0437
1.0600	0.5061	1.4600	3.2871	1.8600	5.3903	2.2600	7.0822
1.0700	0.5877	1.4700	3.3463	1.8700	5.4368	2.2700	7.1205
1.0800	0.6685	1.4800	3.4052	1.8800	5.4832	2.2800	7.1587
1.0900	0.7485	1.4900	3.4637	1.8900	5.5292	2.2900	7.1967
1.1000	0.8279	1.5000	3.5218	1.9000	5.5751	2.3000	7.2346
1.1100	0.9065	1.5100	3.5795	1.9100	5.6207	2.3100	7.2722
1.1200	0.9844	1.5200	3.6369	1.9200	5.6660	2.3200	7.3098
1.1300	1.0616	1.5300	3.6938	1.9300	5.7111	2.3300	7.3471
1.1400	1.1381	1.5400	3.7504	1.9400	5.7560	2.3400	7.3843
1.1500	1.2140	1.5500	3.8066	1.9500	5.8007	2.3500	7.4214
1.1600	1.2892	1.5600	3.8625	1.9600	5.8451	2.3600	7.4582
1.1700	1.3637	1.5700	3.9180	1.9700	5.8893	2.3700	7.4950
1.1800	1.4376	1.5800	3.9731	1.9800	5.9333	2.3800	7.5315
1.1900	1.5109	1.5900	4.0279	1.9900	5.9771	2.3900	7.5680
1.2000	1.5836	1.6000	4.0824	2.0000	6.0206	2.4000	7.6042
1.2100	1.6557	1.6100	4.1365	2.0100	6.0639	2.4100	7.6403
1.2200	1.7272	1.6200	4.1903	2.0200	6.1070	2.4200	7.6763
1.2300	1.7981	1.6300	4.2438	2.0300	6.1499	2.4300	7.7121
1.2400	1.8684	1.6400	4.2969	2.0400	6.1926	2.4400	7.7478
1.2500	1.9382	1.6500	4.3497	2.0500	6.2351	2.4500	7.7833
1.2600	2.0074	1.6600	4.4022	2.0600	6.2773	2.4600	7.8187
1.2700	2.0761	1.6700	4.4543	2.0700	6.3194	2.4700	7.8539
1.2800	2.1442	1.6800	4.5062	2.0800	6.3613	2.4800	7.8890
1.2900	2.2118	1.6900	4.5577	2.0900	6.4029	2.4900	7.9240
1.3000	2.2789	1.7000	4.6090	2.1000	6.4444	2.5000	7.9588
1.3100	2.3454	1.7100	4.6599	2.1100	6.4856	2.5100	7.9935
1.3200	2.4115	1.7200	4.7106	2.1200	6.5267	2.5200	8.0280
1.3300	2.4770	1.7300	4.7609	2.1300	6.5676	2.5300	8.0624
1.3400	2.5421	1.7400	4.8110	2.1400	6.6083	2.5400	8.0967
1.3500	2.6067	1.7500	4.8608	2.1500	6.6488	2.5500	8.1308
1.3600	2.6708	1.7600	4.9103	2.1600	6.6891	2.5600	8.1648
1.3700	2.7344	1.7700	4.9595	2.1700	6.7292	2.5700	8.1987
1.3800	2.7976	1.7800	5.0084	2.1800	6.7691	2.5800	8.2324
1.3900	2.8603	1.7900	5.0571	2.1900	6.8089	2.5900	8.2660
1.4000	2.9226	1.8000	5.1055	2.2000	6.8485	2.6000	8.2995

x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]
2.6100	8.3328	3.0100	9.5713	3.4100	10.6551	3.8100	11.6185
2.6200	8.3660	3.0200	9.6001	3.4200	10.6805	3.8200	11.6413
2.6300	8.3991	3.0300	9.6289	3.4300	10.7059	3.8300	11.6640
2.6400	8.4321	3.0400	9.6575	3.4400	10.7312	3.8400	11.6866
2.6500	8.4649	3.0500	9.6860	3.4500	10.7564	3.8500	11.7092
2.6600	8.4976	3.0600	9.7144	3.4600	10.7815	3.8600	11.7317
2.6700	8.5302	3.0700	9.7428	3.4700	10.8066	3.8700	11.7542
2.6800	8.5627	3.0800	9.7710	3.4800	10.8316	3.8800	11.7766
2.6900	8.5950	3.0900	9.7992	3.4900	10.8565	3.8900	11.7990
2.7000	8.6273	3.1000	9.8272	3.5000	10.8814	3.9000	11.8213
2.7100	8.6594	3.1100	9.8552	3.5100	10.9061	3.9100	11.8435
2.7200	8.6914	3.1200	9.8831	3.5200	10.9309	3.9200	11.8657
2.7300	8.7233	3.1300	9.9109	3.5300	10.9555	3.9300	11.8879
2.7400	8.7550	3.1400	9.9386	3.5400	10.9801	3.9400	11.9099
2.7500	8.7867	3.1500	9.9662	3.5500	11.0046	3.9500	11.9319
2.7600	8.8182	3.1600	9.9937	3.5600	11.0290	3.9600	11.9539
2.7700	8.8496	3.1700	10.0212	3.5700	11.0534	3.9700	11.9758
2.7800	8.8809	3.1800	10.0485	3.5800	11.0777	3.9800	11.9977
2.7900	8.9121	3.1900	10.0758	3.5900	11.1019	3.9900	12.0195
2.8000	8.9432	3.2000	10.1030	3.6000	11.1261	4.0000	12.0412
2.8100	8.9741	3.2100	10.1301	3.6100	11.1501	4.0100	12.0629
2.8200	9.0050	3.2200	10.1571	3.6200	11.1742	4.0200	12.0845
2.8300	9.0357	3.2300	10.1841	3.6300	11.1981	4.0300	12.1061
2.8400	9.0664	3.2400	10.2109	3.6400	11.2220	4.0400	12.1276
2.8500	9.0969	3.2500	10.2377	3.6500	11.2459	4.0500	12.1491
2.8600	9.1273	3.2600	10.2644	3.6600	11.2696	4.0600	12.1705
2.8700	9.1576	3.2700	10.2910	3.6700	11.2933	4.0700	12.1919
2.8800	9.1878	3.2800	10.3175	3.6800	11.3170	4.0800	12.2132
2.8900	9.2180	3.2900	10.3439	3.6900	11.3405	4.0900	12.2345
2.9000	9.2480	3.3000	10.3703	3.7000	11.3640	4.1000	12.2557
2.9100	9.2779	3.3100	10.3966	3.7100	11.3875	4.1100	12.2768
2.9200	9.3077	3.3200	10.4228	3.7200	11.4109	4.1200	12.2979
2.9300	9.3374	3.3300	10.4489	3.7300	11.4342	4.1300	12.3190
2.9400	9.3669	3.3400	10.4749	3.7400	11.4574	4.1400	12.3400
2.9500	9.3964	3.3500	10.5009	3.7500	11.4806	4.1500	12.3610
2.9600	9.4258	3.3600	10.5268	3.7600	11.5038	4.1600	12.3819
2.9700	9.4551	3.3700	10.5526	3.7700	11.5268	4.1700	12.4027
2.9800	9.4843	3.3800	10.5783	3.7800	11.5498	4.1800	12.4235
2.9900	9.5134	3.3900	10.6040	3.7900	11.5728	4.1900	12.4443
3.0000	9.5424	3.4000	10.6296	3.8000	11.5957	4.2000	12.4650

x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]
4.2100	12.4856	4.6100	13.2740	5.0100	13.9968	5.4100	14.6639
4.2200	12.5062	4.6200	13.2928	5.0200	14.0141	5.4200	14.6800
4.2300	12.5268	4.6300	13.3116	5.0300	14.0314	5.4300	14.6960
4.2400	12.5473	4.6400	13.3304	5.0400	14.0486	5.4400	14.7120
4.2500	12.5678	4.6500	13.3491	5.0500	14.0658	5.4500	14.7279
4.2600	12.5882	4.6600	13.3677	5.0600	14.0830	5.4600	14.7439
4.2700	12.6086	4.6700	13.3863	5.0700	14.1002	5.4700	14.7597
4.2800	12.6289	4.6800	13.4049	5.0800	14.1173	5.4800	14.7756
4.2900	12.6491	4.6900	13.4235	5.0900	14.1344	5.4900	14.7914
4.3000	12.6694	4.7000	13.4420	5.1000	14.1514	5.5000	14.8073
4.3100	12.6895	4.7100	13.4604	5.1100	14.1684	5.5100	14.8230
4.3200	12.7097	4.7200	13.4788	5.1200	14.1854	5.5200	14.8388
4.3300	12.7298	4.7300	13.4972	5.1300	14.2023	5.5300	14.8545
4.3400	12.7498	4.7400	13.5156	5.1400	14.2193	5.5400	14.8702
4.3500	12.7698	4.7500	13.5339	5.1500	14.2361	5.5500	14.8859
4.3600	12.7897	4.7600	13.5521	5.1600	14.2530	5.5600	14.9015
4.3700	12.8096	4.7700	13.5704	5.1700	14.2698	5.5700	14.9171
4.3800	12.8295	4.7800	13.5886	5.1800	14.2866	5.5800	14.9327
4.3900	12.8493	4.7900	13.6067	5.1900	14.3033	5.5900	14.9482
4.4000	12.8691	4.8000	13.6248	5.2000	14.3201	5.6000	14.9638
4.4100	12.8888	4.8100	13.6429	5.2100	14.3368	5.6100	14.9793
4.4200	12.9084	4.8200	13.6609	5.2200	14.3534	5.6200	14.9947
4.4300	12.9281	4.8300	13.6789	5.2300	14.3700	5.6300	15.0102
4.4400	12.9477	4.8400	13.6969	5.2400	14.3866	5.6400	15.0256
4.4500	12.9672	4.8500	13.7148	5.2500	14.4032	5.6500	15.0410
4.4600	12.9867	4.8600	13.7327	5.2600	14.4197	5.6600	15.0563
4.4700	13.0062	4.8700	13.7506	5.2700	14.4362	5.6700	15.0717
4.4800	13.0256	4.8800	13.7684	5.2800	14.4527	5.6800	15.0870
4.4900	13.0449	4.8900	13.7862	5.2900	14.4691	5.6900	15.1022
4.5000	13.0643	4.9000	13.8039	5.3000	14.4855	5.7000	15.1175
4.5100	13.0835	4.9100	13.8216	5.3100	14.5019	5.7100	15.1327
4.5200	13.1028	4.9200	13.8393	5.3200	14.5182	5.7200	15.1479
4.5300	13.1220	4.9300	13.8569	5.3300	14.5345	5.7300	15.1631
4.5400	13.1411	4.9400	13.8745	5.3400	14.5508	5.7400	15.1782
4.5500	13.1602	4.9500	13.8921	5.3500	14.5671	5.7500	15.1934
4.5600	13.1793	4.9600	13.9096	5.3600	14.5833	5.7600	15.2084
4.5700	13.1983	4.9700	13.9271	5.3700	14.5995	5.7700	15.2235
4.5800	13.2173	4.9800	13.9446	5.3800	14.6156	5.7800	15.2386
4.5900	13.2363	4.9900	13.9620	5.3900	14.6318	5.7900	15.2536
4.6000	13.2552	5.0000	13.9794	5.4000	14.6479	5.8000	15.2686

x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]
5.8100	15.2835	6.2100	15.8618	6.6100	16.4040	7.0100	16.9144
5.8200	15.2985	6.2200	15.8758	6.6200	16.4172	7.0200	16.9267
5.8300	15.3134	6.2300	15.8898	6.6300	16.4303	7.0300	16.9391
5.8400	15.3283	6.2400	15.9037	6.6400	16.4434	7.0400	16.9515
5.8500	15.3431	6.2500	15.9176	6.6500	16.4564	7.0500	16.9638
5.8600	15.3580	6.2600	15.9315	6.6600	16.4695	7.0600	16.9761
5.8700	15.3728	6.2700	15.9454	6.6700	16.4825	7.0700	16.9884
5.8800	15.3875	6.2800	15.9592	6.6800	16.4955	7.0800	17.0007
5.8900	15.4023	6.2900	15.9730	6.6900	16.5085	7.0900	17.0129
5.9000	15.4170	6.3000	15.9868	6.7000	16.5215	7.1000	17.0252
5.9100	15.4317	6.3100	16.0006	6.7100	16.5345	7.1100	17.0374
5.9200	15.4464	6.3200	16.0143	6.7200	16.5474	7.1200	17.0496
5.9300	15.4611	6.3300	16.0281	6.7300	16.5603	7.1300	17.0618
5.9400	15.4757	6.3400	16.0418	6.7400	16.5732	7.1400	17.0740
5.9500	15.4903	6.3500	16.0555	6.7500	16.5861	7.1500	17.0861
5.9600	15.5049	6.3600	16.0691	6.7600	16.5989	7.1600	17.0983
5.9700	15.5195	6.3700	16.0828	6.7700	16.6118	7.1700	17.1104
5.9800	15.5340	6.3800	16.0964	6.7800	16.6246	7.1800	17.1225
5.9900	15.5485	6.3900	16.1100	6.7900	16.6374	7.1900	17.1346
6.0000	15.5630	6.4000	16.1236	6.8000	16.6502	7.2000	17.1466
6.0100	15.5775	6.4100	16.1372	6.8100	16.6629	7.2100	17.1587
6.0200	15.5919	6.4200	16.1507	6.8200	16.6757	7.2200	17.1707
6.0300	15.6063	6.4300	16.1642	6.8300	16.6884	7.2300	17.1828
6.0400	15.6207	6.4400	16.1777	6.8400	16.7011	7.2400	17.1948
6.0500	15.6351	6.4500	16.1912	6.8500	16.7138	7.2500	17.2068
6.0600	15.6495	6.4600	16.2047	6.8600	16.7265	7.2600	17.2187
6.0700	15.6638	6.4700	16.2181	6.8700	16.7391	7.2700	17.2307
6.0800	15.6781	6.4800	16.2315	6.8800	16.7518	7.2800	17.2426
6.0900	15.6923	6.4900	16.2449	6.8900	16.7644	7.2900	17.2546
6.1000	15.7066	6.5000	16.2583	6.9000	16.7770	7.3000	17.2665
6.1100	15.7208	6.5100	16.2716	6.9100	16.7896	7.3100	17.2783
6.1200	15.7350	6.5200	16.2850	6.9200	16.8021	7.3200	17.2902
6.1300	15.7492	6.5300	16.2983	6.9300	16.8147	7.3300	17.3021
6.1400	15.7634	6.5400	16.3116	6.9400	16.8272	7.3400	17.3139
6.1500	15.7775	6.5500	16.3248	6.9500	16.8397	7.3500	17.3257
6.1600	15.7916	6.5600	16.3381	6.9600	16.8522	7.3600	17.3376
6.1700	15.8057	6.5700	16.3513	6.9700	16.8647	7.3700	17.3493
6.1800	15.8198	6.5800	16.3645	6.9800	16.8771	7.3800	17.3611
6.1900	15.8338	6.5900	16.3777	6.9900	16.8895	7.3900	17.3729
6.2000	15.8478	6.6000	16.3909	7.0000	16.9020	7.4000	17.3846

x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]
7.4100	17.3964	7.8100	17.8530	8.2100	18.2869	8.6100	18.7001
7.4200	17.4081	7.8200	17.8641	8.2200	18.2974	8.6200	18.7101
7.4300	17.4198	7.8300	17.8752	8.2300	18.3080	8.6300	18.7202
7.4400	17.4315	7.8400	17.8863	8.2400	18.3185	8.6400	18.7303
7.4500	17.4431	7.8500	17.8974	8.2500	18.3291	8.6500	18.7403
7.4600	17.4548	7.8600	17.9085	8.2600	18.3396	8.6600	18.7504
7.4700	17.4664	7.8700	17.9195	8.2700	18.3501	8.6700	18.7604
7.4800	17.4780	7.8800	17.9305	8.2800	18.3606	8.6800	18.7704
7.4900	17.4896	7.8900	17.9415	8.2900	18.3711	8.6900	18.7804
7.5000	17.5012	7.9000	17.9525	8.3000	18.3816	8.7000	18.7904
7.5100	17.5128	7.9100	17.9635	8.3100	18.3920	8.7100	18.8004
7.5200	17.5244	7.9200	17.9745	8.3200	18.4025	8.7200	18.8103
7.5300	17.5359	7.9300	17.9855	8.3300	18.4129	8.7300	18.8203
7.5400	17.5474	7.9400	17.9964	8.3400	18.4233	8.7400	18.8302
7.5500	17.5589	7.9500	18.0073	8.3500	18.4337	8.7500	18.8402
7.5600	17.5704	7.9600	18.0183	8.3600	18.4441	8.7600	18.8501
7.5700	17.5819	7.9700	18.0292	8.3700	18.4545	8.7700	18.8600
7.5800	17.5934	7.9800	18.0401	8.3800	18.4649	8.7800	18.8699
7.5900	17.6048	7.9900	18.0509	8.3900	18.4752	8.7900	18.8798
7.6000	17.6163	8.0000	18.0618	8.4000	18.4856	8.8000	18.8897
7.6100	17.6277	8.0100	18.0727	8.4100	18.4959	8.8100	18.8995
7.6200	17.6391	8.0200	18.0835	8.4200	18.5062	8.8200	18.9094
7.6300	17.6505	8.0300	18.0943	8.4300	18.5166	8.8300	18.9192
7.6400	17.6619	8.0400	18.1051	8.4400	18.5268	8.8400	18.9290
7.6500	17.6732	8.0500	18.1159	8.4500	18.5371	8.8500	18.9389
7.6600	17.6846	8.0600	18.1267	8.4600	18.5474	8.8600	18.9487
7.6700	17.6959	8.0700	18.1375	8.4700	18.5577	8.8700	18.9585
7.6800	17.7072	8.0800	18.1482	8.4800	18.5679	8.8800	18.9683
7.6900	17.7185	8.0900	18.1590	8.4900	18.5782	8.8900	18.9780
7.7000	17.7298	8.1000	18.1697	8.5000	18.5884	8.9000	18.9878
7.7100	17.7411	8.1100	18.1804	8.5100	18.5986	8.9100	18.9976
7.7200	17.7523	8.1200	18.1911	8.5200	18.6088	8.9200	19.0073
7.7300	17.7636	8.1300	18.2018	8.5300	18.6190	8.9300	19.0170
7.7400	17.7748	8.1400	18.2125	8.5400	18.6292	8.9400	19.0268
7.7500	17.7860	8.1500	18.2232	8.5500	18.6393	8.9500	19.0365
7.7600	17.7972	8.1600	18.2338	8.5600	18.6495	8.9600	19.0462
7.7700	17.8084	8.1700	18.2444	8.5700	18.6596	8.9700	19.0558
7.7800	17.8196	8.1800	18.2551	8.5800	18.6697	8.9800	19.0655
7.7900	17.8307	8.1900	18.2657	8.5900	18.6799	8.9900	19.0752
7.8000	17.8419	8.2000	18.2763	8.6000	18.6900	9.0000	19.0849

x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]	x	x [dB]
9.0100	19.0945	9.2600	19.3322	9.5100	19.5636	9.7600	19.7890
9.0200	19.1041	9.2700	19.3416	9.5200	19.5727	9.7700	19.7979
9.0300	19.1138	9.2800	19.3510	9.5300	19.5819	9.7800	19.8068
9.0400	19.1234	9.2900	19.3603	9.5400	19.5910	9.7900	19.8157
9.0500	19.1330	9.3000	19.3697	9.5500	19.6001	9.8000	19.8245
9.0600	19.1426	9.3100	19.3790	9.5600	19.6092	9.8100	19.8334
9.0700	19.1521	9.3200	19.3883	9.5700	19.6182	9.8200	19.8422
9.0800	19.1617	9.3300	19.3976	9.5800	19.6273	9.8300	19.8511
9.0900	19.1713	9.3400	19.4069	9.5900	19.6364	9.8400	19.8599
9.1000	19.1808	9.3500	19.4162	9.6000	19.6454	9.8500	19.8687
9.1100	19.1904	9.3600	19.4255	9.6100	19.6545	9.8600	19.8775
9.1200	19.1999	9.3700	19.4348	9.6200	19.6635	9.8700	19.8863
9.1300	19.2094	9.3800	19.4441	9.6300	19.6725	9.8800	19.8951
9.1400	19.2189	9.3900	19.4533	9.6400	19.6815	9.8900	19.9039
9.1500	19.2284	9.4000	19.4626	9.6500	19.6905	9.9000	19.9127
9.1600	19.2379	9.4100	19.4718	9.6600	19.6995	9.9100	19.9215
9.1700	19.2474	9.4200	19.4810	9.6700	19.7085	9.9200	19.9302
9.1800	19.2569	9.4300	19.4902	9.6800	19.7175	9.9300	19.9390
9.1900	19.2663	9.4400	19.4994	9.6900	19.7265	9.9400	19.9477
9.2000	19.2758	9.4500	19.5086	9.7000	19.7354	9.9500	19.9565
9.2100	19.2852	9.4600	19.5178	9.7100	19.7444	9.9600	19.9652
9.2200	19.2946	9.4700	19.5270	9.7200	19.7533	9.9700	19.9739
9.2300	19.3040	9.4800	19.5362	9.7300	19.7623	9.9800	19.9826
9.2400	19.3134	9.4900	19.5453	9.7400	19.7712	9.9900	19.9913
9.2500	19.3228	9.5000	19.5545	9.7500	19.7801	10.0000	20.0000

**ANEXA 5**

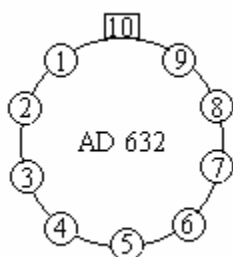
Valorile functiei Laplace

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

z	F(z)	z	F(z)	z	F(z)
0.0100	0.0040	0.4100	0.1591	0.8100	0.2910
0.0200	0.0080	0.4200	0.1628	0.8200	0.2939
0.0300	0.0120	0.4300	0.1664	0.8300	0.2967
0.0400	0.0160	0.4400	0.1700	0.8400	0.2995
0.0500	0.0199	0.4500	0.1736	0.8500	0.3023
0.0600	0.0239	0.4600	0.1772	0.8600	0.3051
0.0700	0.0279	0.4700	0.1808	0.8700	0.3078
0.0800	0.0319	0.4800	0.1844	0.8800	0.3106
0.0900	0.0359	0.4900	0.1879	0.8900	0.3133
0.1000	0.0398	0.5000	0.1915	0.9000	0.3159
0.1100	0.0438	0.5100	0.1950	0.9100	0.3186
0.1200	0.0478	0.5200	0.1985	0.9200	0.3212
0.1300	0.0517	0.5300	0.2019	0.9300	0.3238
0.1400	0.0557	0.5400	0.2054	0.9400	0.3264
0.1500	0.0596	0.5500	0.2088	0.9500	0.3289
0.1600	0.0636	0.5600	0.2123	0.9600	0.3315
0.1700	0.0675	0.5700	0.2157	0.9700	0.3340
0.1800	0.0714	0.5800	0.2190	0.9800	0.3365
0.1900	0.0753	0.5900	0.2224	0.9900	0.3389
0.2000	0.0793	0.6000	0.2257	1.0000	0.3413
0.2100	0.0832	0.6100	0.2291	1.0100	0.3438
0.2200	0.0871	0.6200	0.2324	1.0200	0.3461
0.2300	0.0910	0.6300	0.2357	1.0300	0.3485
0.2400	0.0948	0.6400	0.2389	1.0400	0.3508
0.2500	0.0987	0.6500	0.2422	1.0500	0.3531
0.2600	0.1026	0.6600	0.2454	1.0600	0.3554
0.2700	0.1064	0.6700	0.2486	1.0700	0.3577
0.2800	0.1103	0.6800	0.2517	1.0800	0.3599
0.2900	0.1141	0.6900	0.2549	1.0900	0.3621
0.3000	0.1179	0.7000	0.2580	1.1000	0.3643
0.3100	0.1217	0.7100	0.2611	1.1100	0.3665
0.3200	0.1255	0.7200	0.2642	1.1200	0.3686
0.3300	0.1293	0.7300	0.2673	1.1300	0.3708
0.3400	0.1331	0.7400	0.2704	1.1400	0.3729
0.3500	0.1368	0.7500	0.2734	1.1500	0.3749
0.3600	0.1406	0.7600	0.2764	1.1600	0.3770
0.3700	0.1443	0.7700	0.2794	1.1700	0.3790
0.3800	0.1480	0.7800	0.2823	1.1800	0.3810
0.3900	0.1517	0.7900	0.2852	1.1900	0.3830
0.4000	0.1554	0.8000	0.2881	1.2000	0.3849

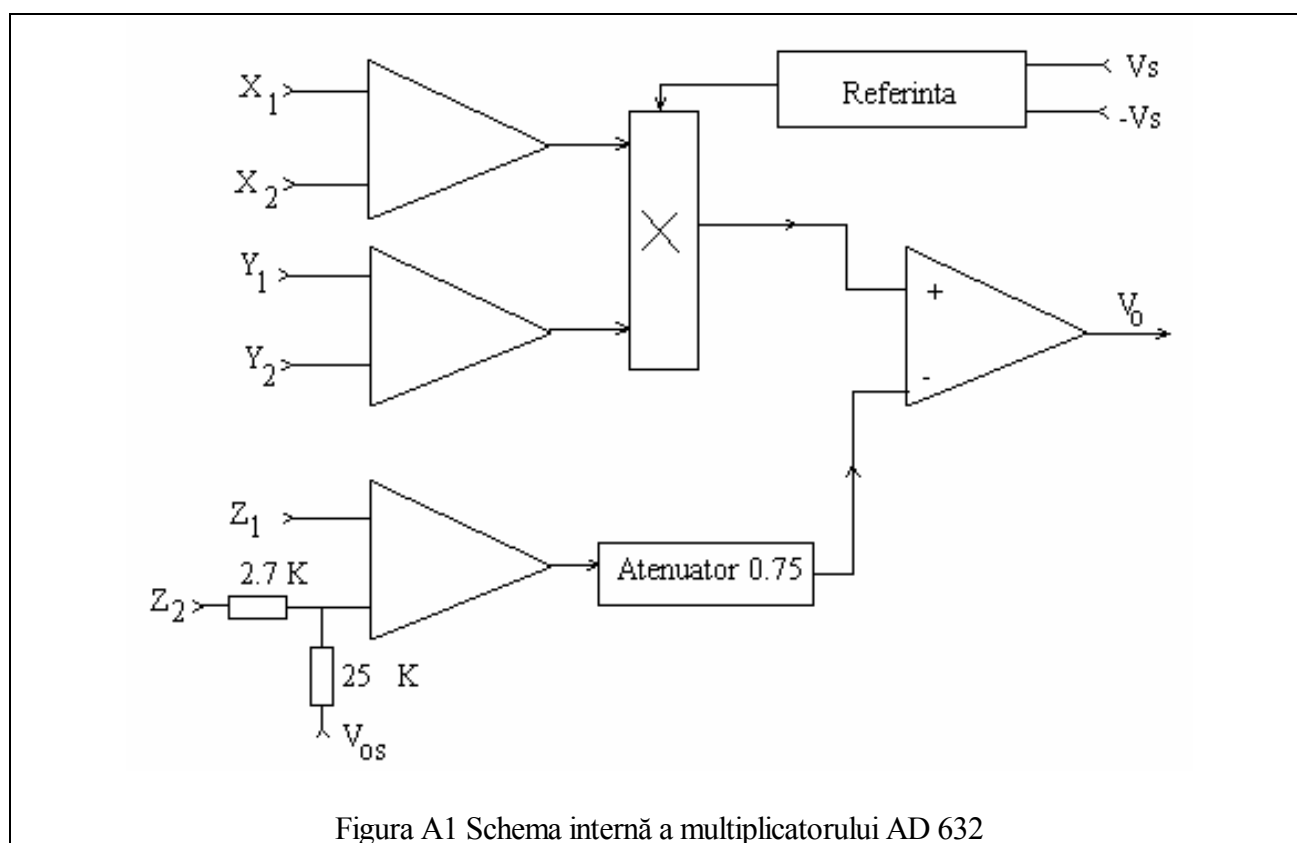
z	F(z)	z	F(z)	z	F(z)
1.2100	0.3869	1.6100	0.4463	2.0100	0.4778
1.2200	0.3888	1.6200	0.4474	2.0200	0.4783
1.2300	0.3907	1.6300	0.4484	2.0300	0.4788
1.2400	0.3925	1.6400	0.4495	2.0400	0.4793
1.2500	0.3944	1.6500	0.4505	2.0500	0.4798
1.2600	0.3962	1.6600	0.4515	2.0600	0.4803
1.2700	0.3980	1.6700	0.4525	2.0700	0.4808
1.2800	0.3997	1.6800	0.4535	2.0800	0.4812
1.2900	0.4015	1.6900	0.4545	2.0900	0.4817
1.3000	0.4032	1.7000	0.4554	2.1000	0.4821
1.3100	0.4049	1.7100	0.4564	2.1100	0.4826
1.3200	0.4066	1.7200	0.4573	2.1200	0.4830
1.3300	0.4082	1.7300	0.4582	2.1300	0.4834
1.3400	0.4099	1.7400	0.4591	2.1400	0.4838
1.3500	0.4115	1.7500	0.4599	2.1500	0.4842
1.3600	0.4131	1.7600	0.4608	2.1600	0.4846
1.3700	0.4147	1.7700	0.4616	2.1700	0.4850
1.3800	0.4162	1.7800	0.4625	2.1800	0.4854
1.3900	0.4177	1.7900	0.4633	2.1900	0.4857
1.4000	0.4192	1.8000	0.4641	2.2000	0.4861
1.4100	0.4207	1.8100	0.4649	2.2100	0.4864
1.4200	0.4222	1.8200	0.4656	2.2200	0.4868
1.4300	0.4236	1.8300	0.4664	2.2300	0.4871
1.4400	0.4251	1.8400	0.4671	2.2400	0.4875
1.4500	0.4265	1.8500	0.4678	2.2500	0.4878
1.4600	0.4279	1.8600	0.4686	2.2600	0.4881
1.4700	0.4292	1.8700	0.4693	2.2700	0.4884
1.4800	0.4306	1.8800	0.4699	2.2800	0.4887
1.4900	0.4319	1.8900	0.4706	2.2900	0.4890
1.5000	0.4332	1.9000	0.4713	2.3000	0.4893
1.5100	0.4345	1.9100	0.4719	2.3100	0.4896
1.5200	0.4357	1.9200	0.4726	2.3200	0.4898
1.5300	0.4370	1.9300	0.4732	2.3300	0.4901
1.5400	0.4382	1.9400	0.4738	2.3400	0.4904
1.5500	0.4394	1.9500	0.4744	2.3500	0.4906
1.5600	0.4406	1.9600	0.4750	2.3600	0.4909
1.5700	0.4418	1.9700	0.4756	2.3700	0.4911
1.5800	0.4429	1.9800	0.4761	2.3800	0.4913
1.5900	0.4441	1.9900	0.4767	2.3900	0.4916
1.6000	0.4452	2.0000	0.4772	2.4000	0.4918

$z$	$F(z)$	$z$	$F(z)$	$z$	$F(z)$
2.4100	0.4920	2.6100	0.4955	2.8100	0.4975
2.4200	0.4922	2.6200	0.4956	2.8200	0.4976
2.4300	0.4925	2.6300	0.4957	2.8300	0.4977
2.4400	0.4927	2.6400	0.4959	2.8400	0.4977
2.4500	0.4929	2.6500	0.4960	2.8500	0.4978
2.4600	0.4931	2.6600	0.4961	2.8600	0.4979
2.4700	0.4932	2.6700	0.4962	2.8700	0.4979
2.4800	0.4934	2.6800	0.4963	2.8800	0.4980
2.4900	0.4936	2.6900	0.4964	2.8900	0.4981
2.5000	0.4938	2.7000	0.4965	2.9000	0.4981
2.5100	0.4940	2.7100	0.4966	2.9100	0.4982
2.5200	0.4941	2.7200	0.4967	2.9200	0.4982
2.5300	0.4943	2.7300	0.4968	2.9300	0.4983
2.5400	0.4945	2.7400	0.4969	2.9400	0.4984
2.5500	0.4946	2.7500	0.4970	2.9500	0.4984
2.5600	0.4948	2.7600	0.4971	2.9600	0.4985
2.5700	0.4949	2.7700	0.4972	2.9700	0.4985
2.5800	0.4951	2.7800	0.4973	2.9800	0.4986
2.5900	0.4952	2.7900	0.4974	2.9900	0.4986
2.6000	0.4953	2.8000	0.4974	3.0000	0.4987

**Anexa 6 - Conexiunile circuitului multiplicator AD 632 folosit la modulația MA de produs**

AD 532, 632  
 Multiplicator în patru cadrane,  
 - intrări diferențiale,  
 -10Hz-10KHz.

Nr. pin	Notății	Semnificație
1	Y1	Intrare
2	+Vs	Alimentare pozitivă
3	Z1	Intrare
4	Out	Ieșire
5	-Vs	Alimentare negativă
6	X1	Intrare
7	X2	Intrare
8	Z2 (GND)	Intrare
9	Vos	Compensare
10	Y2	Intrare



Ecuția de funcționare:

$$V_o = A \left[ \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} - (Z_1 - Z_2) \right]$$

## Bibliografie

1. Constantin I., Stanomir, D. și Schuster, B., S.C.S. *Sisteme selective*, Institutul Politehnic București, 1980.
2. Marghescu, I, Ciochina, S., Dumitriu N., Petrescu T. si Zamfirescu D., *Semnale, Circuite și Sisteme. Îndrumar de laborator.*, Institutul Politehnic București, 1979.
3. Marghescu I., Constantin I., Stanomir D., Ciochina S., Ciurea D., Dumitriu N., Ioan L. Stanciu L. *Semnale, Circuite și Sisteme. Îndrumar de laborator.*, Institutul Politehnic București, 1988.
4. Gh.Cartianu, *Analiza și sinteza circuitelor electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1971.
5. A.Mateescu, *Analiza și sinteza circuitelor electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1975.
6. M. Săvescu, *Circuite electrice liniare*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968.
7. T.Petrescu, S.Ciochină, *Circuite electronice*, Litografia IPB, 1974.
8. D.Stanomir, I.Constantin, B.Schuster, *Semnale și Circuite*, partea I, Litografia I.P.B. 1979.
9. Johnson, D.E., *Rapid Practical Designs of Active Filters*, Jofn Wiley & Sons, 1975