

**Adrian Cătălin TĂUT**

# **Modelarea multidisciplinară a circuitelor electronice**

**Napoca STAR  
2024**

Editura NAPOCA STAR  
Strada București, nr. 1,  
e-mail: dinuvirgil2000@gmail.com  
www.napocastar.ro  
tel.: 0264/432.547  
mobil: 0740/167.461

*Director de editură:* Dinu Virgil-Ureche

ISBN 978-606-062-865-1

© Toate drepturile asupra acestei ediții aparțin autorului

## Cuprins

1	Introducere în MATLAB .....	1
1.1	Definirea variabilelor.....	2
2	Modelarea tranzistoarelor.....	9
2.1	Amplificator cu TB în emitor comun .....	10
2.2	Amplificator cu tranzistor MOS în conexiune sursă comună.....	17
3	Modelarea amplificatoarelor operaționale .....	28
3.1	Comparatoare fără reacție.....	29
3.2	Comparatoare cu reacție .....	36
3.3	Amplificatoare operațional cu reacție negativă.....	40
3.4	Amplificator diferențial .....	45
3.5	Circuite de integrare și derivare cu AO .....	51
3.6	Circuite astabil cu AO .....	60
4	Convertoare în comutație DC-DC .....	65
4.1	Convertorul Buck.....	67
4.2	Convertorul Boost .....	72
4.3	Convertorul Buck-Boost .....	81
4.4	Convertorul Forward.....	98
4.5	Convertorul Flyback .....	116
4.6	Platformă Matlab de simulare a convertoarelor cu separare galvanică flyback, push pull, half/full-bridge.....	122
	Bibliografie.....	138



## 1 Introducere în MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) - The Language of Technical Computing” ceea ce se traduce prin „MATLAB – Limbajul calculelor tehnice” este un mediu/sistem de dezvoltare care integrează calculul numeric și analiza statistică ce conține limbajul de programare cu același nume, creat de MathWorks și dezvoltat pornind de la două pachete de programe, LINPACK și EISPACK, reprezentând bazele soft-ului pentru calcul matricial.

Pachetul de programe MATLAB a cunoscut o puternică evoluție în decursul ultimilor ani, reprezentând astăzi în mediile universitare o unealtă standard de calcul, fiind asociată diverselor cursuri introductive sau avansate în matematică, știință și inginerie. În industrie, MATLAB este recunoscut ca un mijloc de investigație numerică, performant, utilizat în sprijinul unei activități de cercetare, dezvoltare și analiză de înalt nivel.

Astfel, Matlab este un mediu interactiv, de înaltă performanță, utilizat pentru calcule științifice și ingineresti, ce înglobează diverse posibilități de lucru, cum ar fi analiza numerică, calculul matricial, procesare de semnale și trasarea grafică, într-un mediu ușor de utilizat, ceea ce face ca, enunțurile și soluțiile returnate să poată fi exprimate așa cum sunt scrise matematic, nefiind necesară o programare tradițională.

Elementele de bază ale pachetului MATLAB sunt matricile, cu particularitatea că nu e necesară o dimensionare prealabilă a acestora. Utilitatea programului este dată de rezolvarea problemelor numerice integrând analiza numerică cu calculul matricial și permițând reprezentarea grafică a soluțiilor obținute.

Rezultatele obținute cu ajutorul acestui mediu pot fi utilizate în domenii ca: matematică, fizică, inginerie, finanțe, etc, deoarece permite manipularea variabilelor prin operații matematice fundamentale, analiza datelor, programare, reprezentări grafice 2D și 3D, realizarea de interfețe grafice, ori interfațarea cu alte medii de programare.

## 1.1 Definirea variabilelor

MATLAB este programul care lucrează numai cu un singur tip de obiecte și anume matrice numerice, având elemente reale sau complexe. Astfel, scalarii sunt priviți ca matrice de dimensiune 1x1, iar vectorii ca o matrice de dimensiune 1xn (dacă este vector de tip linie) sau nx1 (dacă este vector de tip coloană). În teoria informației o matrice este un tablou în care informațiile sunt organizate în linii și coloane. Este cel mai des întâlnit mod de organizare al informației și, din această cauză matricea este supranumită mama structurilor de date. În matematică matricile sunt de obicei tablouri de numere, iar pentru notații se utilizează parantezele pătrate între care se scrie tabloul de date. Pentru a scrie o matrice în Matlab este necesar ca elementele să fie cuprinse între paranteze drepte [], să fie separate prin virgulă (,) sau spațiu (blank) pe o linie și prin punct și virgulă (;) în cazul separării liniilor între ele.

```

%% Crearea Vectori
%      Linie = matrice 1*n n=5;
%-----%
    a=[1 2 3,5,6];
% Vector coloana = matrice n*1 n=5;
    mc=[1;2;3;5;6];
    mc=a';

%   Matrici   Descriere

%   []       matrice vida
%   eye      matrice unitate
%   magic    matrice magica Patratul magic
%   ones     matrice cu toate elementele 1
%   rosser   matrice simetrica test
%   zeros    matrice cu toate elementele 0
    m_vida=[];
    m_unitate=eye(3);
    m_magic=magic(4)
    m_ones=ones(2,5)
    m_rosser=rosser;
    m_zero=zeros(2,5);
% definirea rapidă a unor vectori
    b=linspace(1,10,10) % h=linspace(min,max,nr_el)
    c=logspace(0,2,7) % h=logspace(min,max,nr_el)
    b1=2:2:100 ;      % h = vi:pas:vf
%=====

```

```
%% exemplu definire scalari si calcul functii
a=21;
b=3.25;
c=10.012;

u= ((a+b)/c) *exp(b)/log(a)+sqrt(a^2+b^2-c^2)
v= sqrt(a)/(sqrt(b)-1)+sqrt(c)/(sqrt(a)-1)+sqrt(a*b/c)
w=sqrt(u^2+v^2)

alpha=30
beta=15

u1=sin(alpha)/(cos(alpha)+cos(beta))
```

Rezultatul acestor linii se regăsește în fereastra de comenzi sub forma:

```
u=39.2613, v=9.2025, w= 40.3254, u1=1.6319
```

Construcția unor semnale simple în MATLAB are la bază funcțiile trigonometrice.

În exemplul următor este reprezentată tensiunea alternativă de la rețea pentru 3 perioade de vizualizare.

```
clear all
close all
f=50
T=1/f
A=220*sqrt(2)
t=0:T/100:3*T
x= A*sin(2*pi*f*t)
plot(t,x)
hold on
grid on
xlabel('time [s]')
ylabel('amplitudine [V]')
```

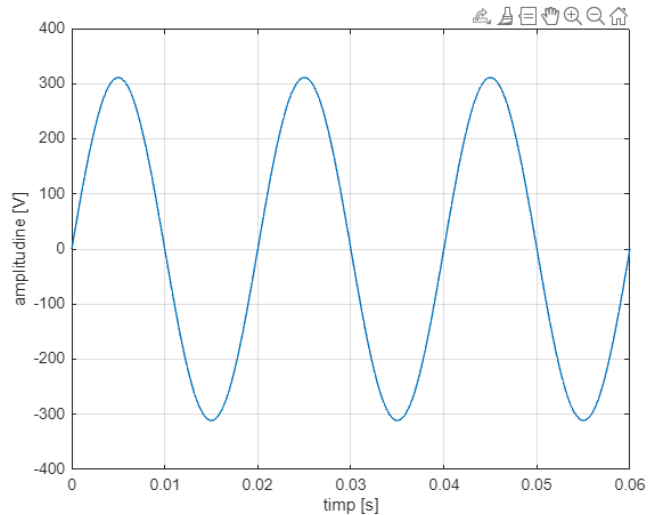


Figura 1.1 Reprezentare grafică a tensiunii de la rețea

EX 2: definirea unui semnal trapezoidal

```
close all;
clear all;

% Calculeaza un semnal trapezoidal
%-----
% s1=E.*t./tc      t<tc
% s2=E            t<tc < t < T-td
% s3=E-E.*t./td   T-td < t < T
%-----
E = 2.7; % Amplitudinea
T = 100; % Perioada
tc = 20; % Timp crestere
td = 40; % Timp descrestere
t = 0 : T / 100 : T;
nt = length(t);
s1 = (E ./ tc) .* t .* ( (t<tc) - (t<0) );
s2 = E .* ( (t < T-td) - (t<tc) );
s3 = (E - (E ./ td) .* (t - T + td) ) .* ( (t<T) - (t<T-td) );
s = s1 + s2 + s3;
rep=plot(t,s,'m','LineWidth',3);
grid on;
xlabel('time t [ s]');
ylabel(' s [ V ]');
title('Semnal trapezoidal');
```



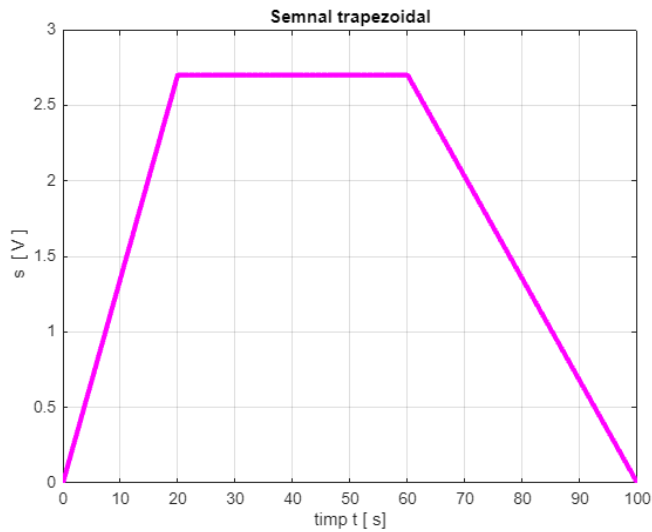


Figura 1.2 Reprezentarea unui semnal trapezoidal definit pe intervale

Programul Matlab permite utilizarea calculului simbolic. Această metodă permite nu doar rezolvarea rapidă a unor probleme matematice, ci și reprezentarea grafică a soluțiilor acestora.

```
%% ecuatia algebrica
% x^2 - 5*x + 6 = 0;
%% Declarare variabila simbolica
syms x
ec_a = x^2 - 5*x + 6
%% Rezolvare ecuatie
radacini = solve(ec_a)
%% Transformare (cast)
tra = double(radacini)
nt = size(tra)
ezplot(ec_a, [0,5]);
hold on;
plot(tra, zeros(nt), 'ro')
grid on
```

În exemplul anterior se prezintă o metodă simplă de calcul a unei ecuații de ordinul 2 și în același timp se propune o reprezentare grafică a funcției pe un interval de definiție.

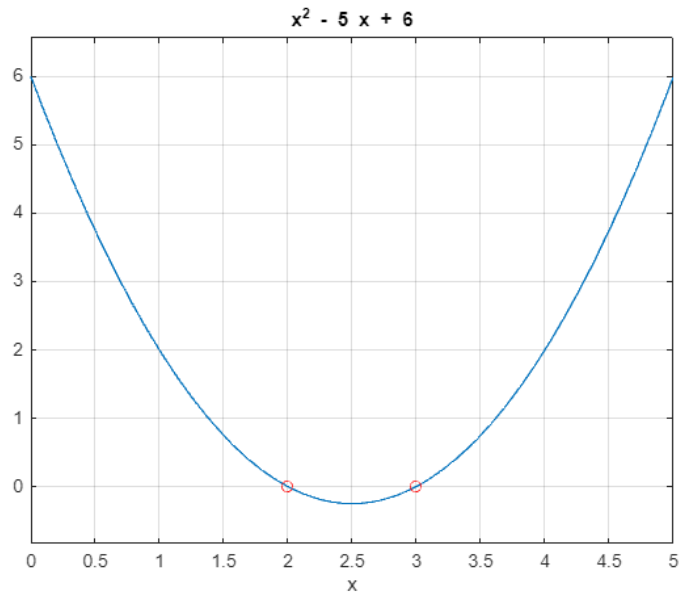


Figura 1.3 Reprezentarea soluțiilor ecuației de grad 2

EX3: să se calculeze  $\int \sin(x)dx$  definită pe intervalul  $[\pi/6, \pi/2]$

```
clear all;
close all;

%% Reprezentare functie
% f(x) = sin(x)
x1 = 0:pi./50:pi;
f1 = sin(x1);
plot(x1,f1,'r');
grid on;
hold on;
xa = pi / 6;
fa = sin(xa);
xb = pi / 2;
fb = sin(xb);
fill([xa, xb, xb, xa],[0, 0, fb, fa], 'm')
%% Declararea variabilei
x=sym('x');
%% Definire functie simbolica
f=sin(x);
%% Calcul integrala pe interval nedefinit
Integrala_ned = int(f)
%% Calcul integrala pe interval definit
Integrala_int_def = int(f,pi/6,pi/2)
```

Răspunsul acestor linii de cod se regăsește sub 2 forme. O formă grafică, prin care se sugerează aria ce urmează a fi calculată prin integrală și o formă numerică returnată în fereastra de comenzi.

```
Command Window
>> Integrare

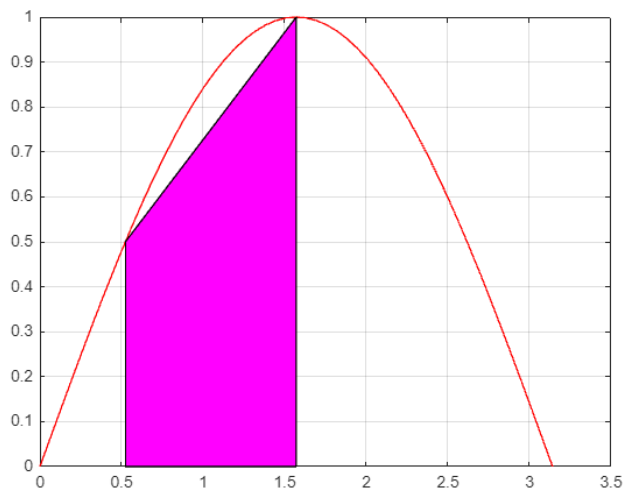
Integrala_ned =

-cos(x)

Integrala_int_def =

3^(1/2)/2

>>
```

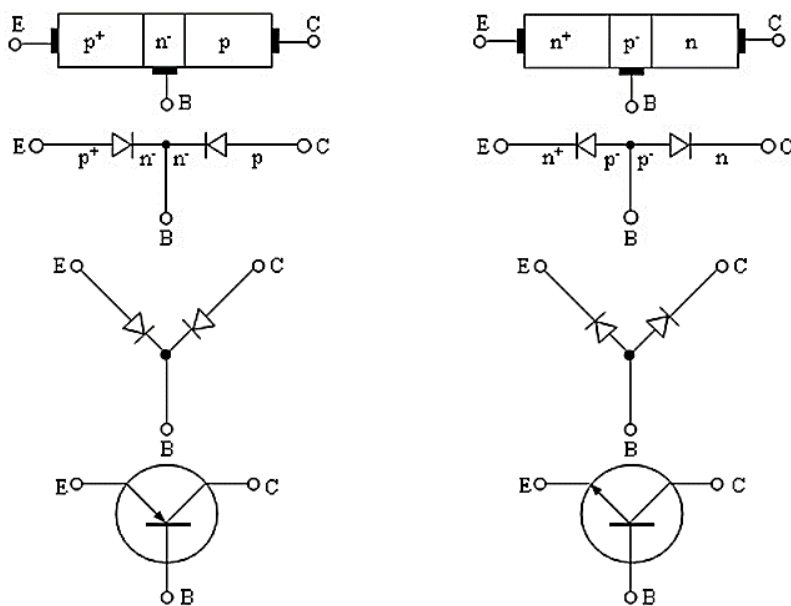


Cele 2 figuri de mai sus, reprezintă răspunsul programului ca urmare a liniilor de cod din ex3. Așa cum se poate observa, lucrând în tool-ul symbolic, nu e necesar să primim valori numerice, putem folosi răspunsul în ecuațiile noastre.



## 2 Modelarea tranzistoarelor

Tranzistorul bipolar este un dispozitiv electronic activ cu trei terminale: emitorul (E), baza (B) și colectorul (C). Aceste trei terminale sunt plasate pe trei regiuni semiconductoare de conductibilitate diferită (p sau n) ale aceluiași cristal semiconductor (în general germaniu – Ge sau siliciu – Si). Denumirea de tranzistor bipolar provine de la următoarea caracteristică: conducția este asigurată de două tipuri de purtători de sarcină de polaritate diferită (electroni și goluri).



Simbolul tranzistorului bipolar pnp

Simbolul tranzistorului bipolar npn

Se observă că prin alăturarea celor trei regiuni dopate diferit se formează două joncțiuni ce pot fi asemănaute cu două diode. Săgeata din simbol corespunde joncțiunii pn (emitor – bază). Sensul săgeții (întotdeauna de la zona p spre zona n) arată sensul normal, pozitiv al curentului prin joncțiunea bază – emitor polarizată direct.

## 2.1 Amplificator cu TB în emitor comun

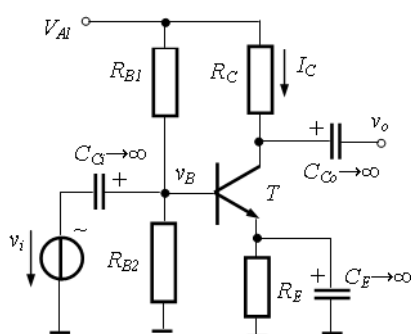


Figura 2.2 Amplificator cu TB în conexiune emitor comun

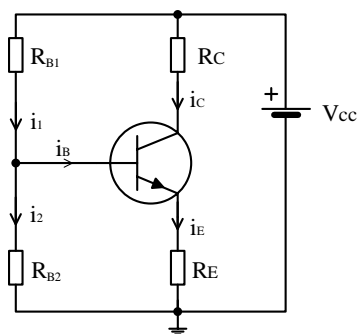


Figura 2.3 Schema de CC

Dacă reducem circuitul la un comportament în curent continuu atunci putem pe baza imaginii 2.3 determina punctul static de funcționare (PSF) de coordonate  $I_C$ ,  $V_{CE}$ .

$$V_B = V_{BE} + I_E R_E \quad 2.1$$

$$I_C = \beta I_B, I_E = I_C + I_B = (\beta + 1) I_B \quad 2.2$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E) \quad 2.3$$

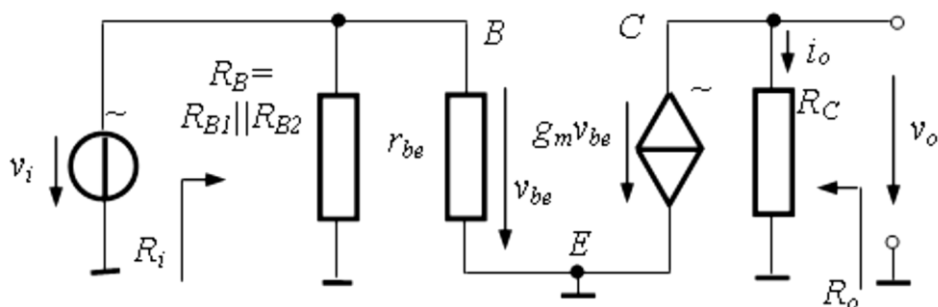


Figura 2.3 Schema de semnal mic

Din schema de semnal mic putem determina mărimile de interes ca: amplificarea în tensiune, amplificarea în curent, rezistența de intrare, rezistența de ieșire a circuitului utilizând formulele:

$$A_v = -g_m R_c \quad 2.4$$

$$R_i = R_B \parallel r_{be} = R_B \parallel \frac{\beta}{g_m} \quad 2.5$$

$$R_o = R_c \quad 2.6$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{R_B}{R_B + r_{be}} \beta \approx \beta \quad 2.7$$

Pornind de la aceste ecuații matematice prin modelul Matlab următor ne propunem să simulăm comportamentul unui astfel de circuit. Liniile de cod implementate permit analiza circuitului atât din punct de vedere a PSF, cât și din punct de vedere al comportamentului de amplificator.

#### MODEL MATLAB

##### FIȘIER START

```
Vbe=0.7;
Rb1=20;
Rb2=10;
Rc=2;
Re=2;
B=100;
f1=0.1;
n=5;
A1=10;
ec_grafic(Vcc,Vbe,B,Rb1,Rb2,Rc,Re,f1,n,A1);
```

##### FIȘIERUL DE CALCUL ȘI REPREZENTARE GRAFICĂ

```
Vbb=(Rb2/(Rb1+Rb2)).*Vcc;
Ic=(Vbb-Vbe)./Re;
Ib=Ic/B;
Vcesat=0.2;
Icex=(Vcc-Vcesat)./Rc;

if Ic<Icex
    vce=Vcc-Ic*(Rc+Re);
    gm=40*Ic;
    Av=-gm*Rc;
else
    Av=0;
end
```

```

%Tipuri de semnale
%Sinusoidal
if strcmp(Opt, 'Sinusoidal')==1
    T1=1/f1;
    t=0:T1/1000:n*T1;
    w=2*pi*f1;
    vi=A1*sin(w*t);
    A2=Av*A1;
    Vo1=A2*sin(w*t);
    sp1=subplot('Position',[0.65 0.4 0.3 0.2]);
    subplot(sp1);
    cla;
    title('Semnal de intrare|Sinusoidal');
    hold on;
    plot(t,vi,'r');
    xlabel('Timp[s]');
    ylabel('Vi[mv]');
    grid on;
    sp2=subplot('Position',[0.65 0.1 0.3 0.2]);
    subplot(sp2);
    cla;
    x0=min(Vo1,(Vcc*1000));
    x1=max(x0,-(Vcc*1000));
    plot(t,x1,'b');
    title('Semnal de iesire|Sinusoidal');
    xlabel('Timp[s]');
    ylabel('Vo[mv]');
    grid;
end
if strcmp(Opt, 'Monopolar')==1
    T1=1/f1;
    sp1=subplot('Position',[0.65 0.4 0.3 0.2]);
    subplot(sp1);
    %graficul tensiunii de intrare
    cla;
    t=0:T1/1000:n*T1;
    w=2*pi.*f1;
    vi=A1.*sign(sin(w.*t));
    x=(vi+A1)./2;
    plot(t,x,'r');
    grid on;
    title('Semnal de intrare|dr.monopolar');
    ylabel('Vi[mV]');
    xlabel('Timpul [s]');
    hold on;
    A2=Av*A1;
    vo1=A2.*sign(sin(w.*t));
    y=(vo1+A2)./2;

```



```

        x0=min(y,(Vcc*1000));
        x1=max(x0,-(Vcc*1000));
        grid on;
        sp2=subplot('Position',[0.65 0.1 0.3 0.2]);
        subplot(sp2);
        cla;

        plot(t,x1,'b');
        title('Semnal de iesire|dr.monopolar');
        xlabel('Timp[s]');
        ylabel('Vo[mv]');
        grid on;
end
%Dreptunghiular bipolar
if strcmp(Opt,'Bipolar')==1
    T1=1/f1;
    sp1=subplot('Position',[0.65 0.4 0.3 0.2]);
    subplot(sp1);
    %graficul tensiunii de intrare
    cla;
    t=0:T1/1000:n*T1;
    w=2*pi.*f1;
    vi=A1.*sign(sin(w.*t));
    plot(t,vi,'r');
    grid on;
    title('Semnal de intrare|dr.bipolar');
    ylabel('Vi[mV]');
    xlabel('Timpu[s]');
    hold on;
    A2=Av*A1;
    vo1=A2.*sign(sin(w.*t));
    grid on;
    sp2=subplot('Position',[0.65 0.1 0.3 0.2]);
    subplot(sp2);
    cla;
x0=min(vo1,(Vcc*1000));
x1=max(x0,-(Vcc*1000));
plot(t,x1,'b');
    title('Semnal de iesire|dr.bipolar');
    xlabel('Timp[s]');
    ylabel('Vo[mv]');
    grid on;
end
%Triunghiular
if strcmp(Opt,'Triunghiular')==1
    sp1=subplot('Position',[0.65 0.4 0.3 0.2]);
    subplot(sp1);
cla;

```

```

T1=1/f1;
t=0:T1/1000:n*T1;
    w=2*pi.*f1;
vi=2.*A1.*asin(sin(w.*t))./pi;
    plot(t,vi,'-r');
    hold off;
    grid on;
    title('Semnal de intrare|triunghiular');
    ylabel('Vi[mv]');
    xlabel('Timpu[s]');
sp2=subplot('Position',[0.65 0.1 0.3 0.2]);
    subplot(sp2);
    cla;
    %tens de iesire
    A2=Av*A1;
    w=2*pi.*f1;
vo1=2.*A2.*asin(sin(w.*t))./pi;
x0=min(vo1,(Vcc*1000));
    x1=max(x0,-(Vcc*1000));
plot(t,x1,'-b');
    hold off;
    grid on;
    title('Semnal de iesire|triunghiular');
    ylabel('Vo[mv]');
    xlabel('Timpu[s]');
end
if Ic<Icex
sp=subplot('Position',[0.24 0.6 0.3 0.3]);
    subplot(sp);
    cla;
    w=0:0.01:Vcc;
    crb=(Ic)*(1-exp(-2.*w));
plot(w,crb,'-r');
    hold on;
for k=0:Ic:2*Ic;
    crb=(k)*(1-exp(-2.*w));
plot(w,crb,'-r');
    hold on;
end
axis([0 Vcc 0 Vcc/Rc]);
title('Plasare PSF');
xlabel('Vce[v]');
ylabel('Ic[mA]');
grid on;
end

```

Rezultatul acestor linii de cod poate fi vizualizat în figurile ce urmează. Pornind de la un set de valori de intrare tool-ul implementat returnează sub o formă grafică mărimile de interes.

Parametrii Circuitului

Val	<input type="text" value="12"/>	[V]	Rb1	<input type="text" value="20"/>	[K]
Vbe	<input type="text" value="0.7"/>	[V]	Rb2	<input type="text" value="10"/>	[K]
B	<input type="text" value="100"/>	[mA/V <sup>2</sup> ]	Rc	<input type="text" value="2"/>	[K]
			Re	<input type="text" value="2"/>	[K]

Amplificare

Figura 2.4 Datele de intrare

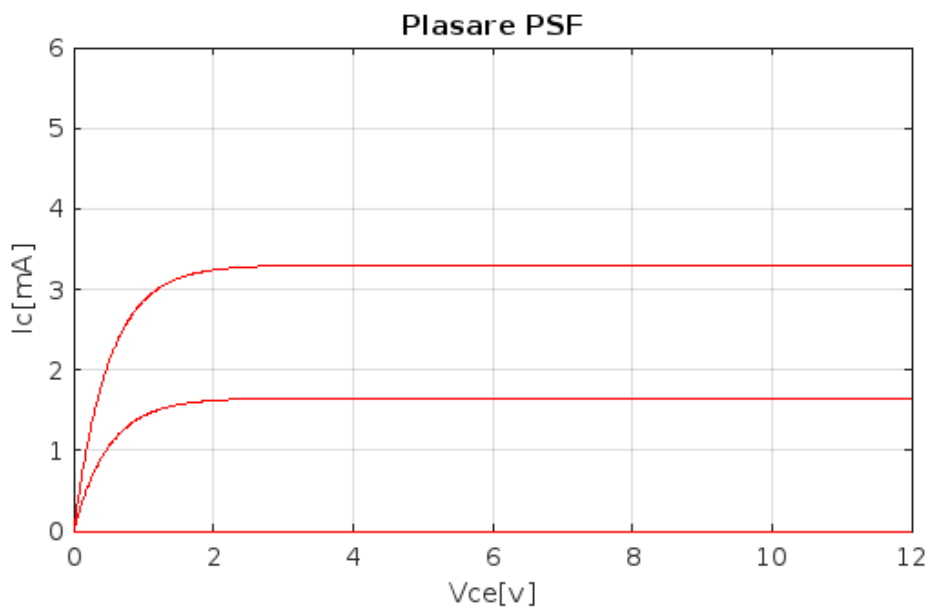


Figura 2.5 plasare PSF

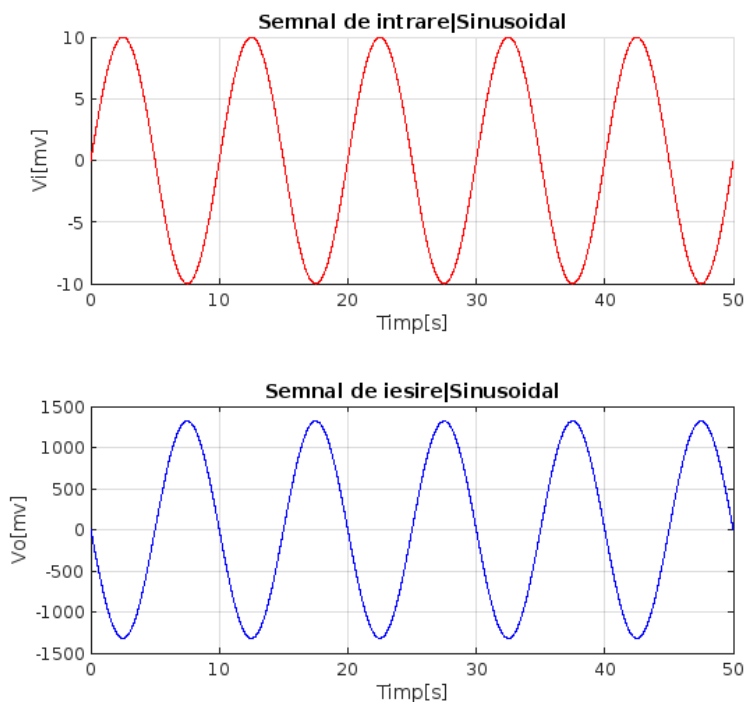


Figura 2.6 Tensiunea de intrare și tensiunea de ieșire

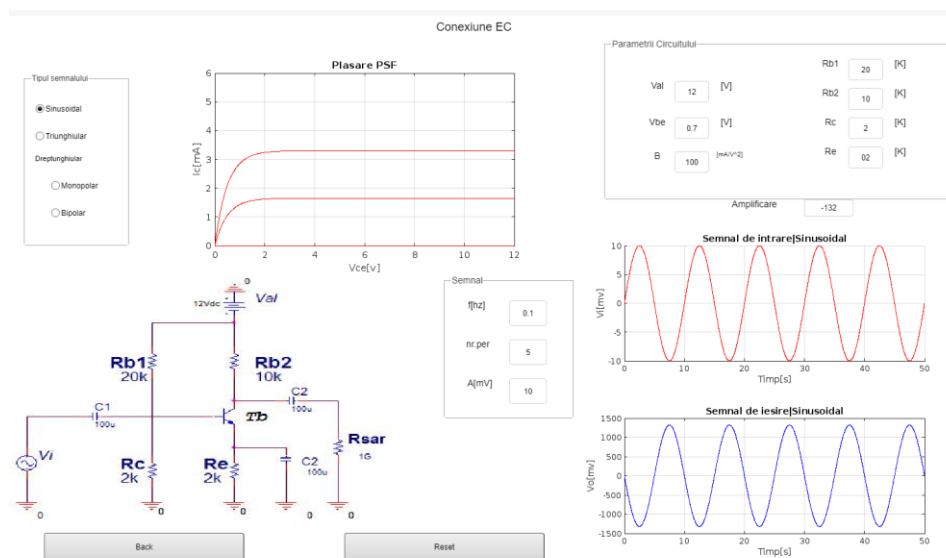


Figura 2.7 Tool-ul de simulare a amplificatoarelor în conexiune EC

## 2.2 Amplificator cu tranzistor MOS în conexiune sursă comună

Tranzistoarele MOS sunt în general tranzistoare de putere care funcționează cu precădere în saturație sau în blocare fiind în cele mai multe cazuri folosite sub forma unor comutatoare. În figura 2.8 se prezintă o schemă a unui astfel de circuit cu tranzistor MOS pe care ne propunem să îl controlăm astfel încât comportamentul acestuia să fie de amplificator.

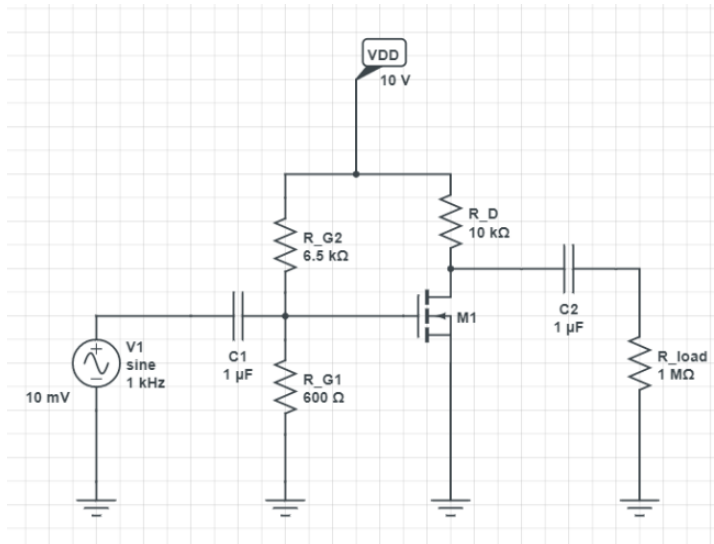


Figura 2.8 Schema de analiză a amplificatorului în conexiune sursă comună  
Pornind de la următoarele valori:

$$\beta = 2 \left[ \frac{\text{mA}}{\text{V}} \right]; V_{th} = 0.3\text{V}; V_A = 100\text{V}$$

și coroborat cu valorile de pe schemă ne dorim să analizăm circuitul dat. Astfel, un prim calcul ce trebuie făcut este determinarea PSF al tranzistorului.

$$V_{GS} = \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} = \frac{600}{7100} 10 = 0.845\text{V} \Rightarrow V_{GS} > V_{th} \Rightarrow \text{ne aflăm ori în af ori în cex}$$

Presupunem că ne aflăm în af:

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_{th})^2 = 0.002(0.845 - 0.3)^2 = 0.594\text{mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 10 - 0.59405 \cdot 10 = 4.0595\text{V}$$

$$V_{GS} - V_{th} = 0.545$$

Presupunerea a fost  
corectă

Putem acum să calculăm parametrii specifici regimului de semnal mic:

$$g_m = 2\beta(V_{GS} - V_{th}) = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0.545 = 2.18 \text{ mS}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{0.594} = 168.35 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_D || R_{load} || r_o = \frac{R_D \cdot R_{load} \cdot r_o}{R_D R_{load} + R_D r_o + r_o R_{load}} = 9.351 \text{ k}\Omega$$

$$A_v = -g_m \cdot R_{out} = -2.18 \cdot 9.351 = -20.385$$

$$\Rightarrow \text{pt } v_i = 0.01\sin(2\pi ft)[V] \Rightarrow v_o = 0.20385\sin(2\pi ft)[V]$$

Pornind de la aceste ecuații am dezvoltat un tool de simulare a unor astfel de amplificatoare cu tranzistori MOS a cărui model este prezentat în cele ce urmează.

#### MODEL MATLAB

```
close all;
clc;
f = 100;           %hz
N = 2;            %nr de perioade
Vth = 0.3;        %volti
beta = 2*10^-3;   %in amperi/V^2
R_g1 = 0.7*10^3;  %ohmi
R_g2 = 8*10^3;    %ohmi
R_d = 10*10^3;    %ohmi
R_load = 10^6;    %ohmi
Vdd = 10;         %volti
Vin = 10*10^(-3); %volti
N = 2;           %nr perioade
tip_semnal_input = 1; %sinus ca input
clm = false;     %channel length modulation
serieValoriR = 1; %serie valori normalizate ale rezistentelor
interfata(beta, Vth, Vdd, R_g1, R_g2, R_d, R_load, f, N, Vin,
tip_semnal_input, clm, serieValoriR);
```

#### FISIERUL INTERFATA

```
function interfata(beta, Vth, Vdd, R_g1, R_g2, R_d, R_load, f, N,
Vin, tip_semnal_input, clm, serieValoriR)
    if nargin == 0
```

```
f = 100;           %hz
N = 2;           %nr de perioade
Vth = 0.3;       %volti
beta = 2*10^-3;  %in amperi/V^2
R_g1 = 1.2*10^3; %ohmi
R_g2 = 8*10^3;  %ohmi
R_d = 10*10^3;  %ohmi
R_load = 10^6;  %ohmi
Vdd = 10;       %volti
Vin = 10*10^(-3); %volti
tip_semnal_input = 1;
clm = false;
serieValoriR = 1;
end
editParams_str = ['beta', 'Vth', 'Vdd', 'R_g1', 'R_g2', 'R_d',
'R_load', 'f', 'N', 'Vin', 'tip_semnal_input', 'clm',
'serieValoriR']; %vectori ce contin variabilele ce pot fi
editParams = [beta, Vth, Vdd, R_g1, R_g2, R_d, R_load, f,
N, Vin, tip_semnal_input, clm, serieValoriR];
%modificate de utilizator, cat si numele lor ca stringuri
if beta < 0
    beta = 0;
end
if Vth < 0
    Vth = 0;
end
if Vdd < 0
    Vdd = 1;
end
if R_g1 < 0
    R_g1 = 1;
end
if R_g2 < 0
    R_g2 = 1;
end
if R_d < 0
    R_d = 1;
end
if R_load < 0
    R_load = 1;
end
if f < 0
    f = 10;
end
if N < 0
    N = 1;
end
if Vin < 0
```

```

        Vin = 0;
    end
    semnalMare = false;
    blocare = false;
    %calcul parametruii specifici PSF-ului
    if serieValoriR > 1 % corecteaza la toate
ca sa ai mai mare de 1
        [R_g1Practic, R_g2Practic, R_dPractic, R_loadPractic] =
calculSerieValoriR(R_g1, R_g2, R_d, R_load, serieValoriR);
        rezistentePractice = [R_g1Practic, R_g2Practic, R_dPractic,
R_loadPractic];
    end
    [Vgs, Vds, Id, cex] = calcParamPSF(beta, Vdd, Vth, R_g1, R_g2,
R_d, clm);
    if Id == 0 && Vds == Vdd
        blocare = true;
    end
    if serieValoriR > 1
        [VgsPractic, VdsPractic, IdPractic, ~] = calcParamPSF(beta,
Vdd, Vth, R_g1Practic, R_g2Practic, R_dPractic, clm);
    end
    T=1/f;
    t=0:T/100:N*T;
    switch tip_semnal_input
    case 1
        input = Vin*sin(2*pi*f*N*t);
    case 2
        input = Vin*square(2*pi*f*N*t);
    case 3
        input = Vin*sawtooth(2*pi*f*N*t);
    otherwise
        input = Vin*sin(2*pi*f*N*t);
    end
    calculLargeSignal = false;
    %Interfata grafica
    fig = figure('Name', 'Amplificator in configuratia sursa
comuna', ...
        'Units', 'normalized', 'Position', [0.1, 0.1, 0.7, 0.7],...
        'NumberTitle', 'off');
    %imagine circuit
    subplot(2, 2, 1);
    %Calculul parametrilor de semnal mic
    % cazul cand amplitudinea semnalului de intrare e prea mare
    Vgs_max = (sqrt(1+4*beta*R_d*Vdd)+2*beta*R_d*Vth-
1)/(2*beta*R_d);
    if ( Vgs-Vin < Vth || Vgs+Vin > Vgs_max ) && cex == false
        semnalMare = true;
    end

```



```
[output, cex, blocare] = calcGraficeVinPreaMare(t, input,
beta, Vth, Vgs, Id, Vdd, R_d, R_load, clm);
plotGraphs(f, N, input, output, 0, serieValoriR);
if serieValoriR > 1
    [outputPractic, cex, blocare] =
calcGraficeVinPreaMare(t, input, beta, Vth, VgsPractic, IdPractic,
Vdd, R_dPractic, R_loadPractic, clm);
    plotGraphs(f, N, input, output, outputPractic,
serieValoriR);
end
else
    [input, output, gm, ro, Av, Rout] = calculGrafice(f, N,
beta, Vth, Vin, Vdd, Vgs, Id, R_d, R_load, tip_semnal_input, clm);
    plotGraphs(f, N, input, output, 0, serieValoriR);
    if serieValoriR > 1
        [~, outputPractic, gm, ro, Av, Rout] = calculGrafice(f,
N, beta, Vth, Vin, Vdd, VgsPractic, IdPractic, R_dPractic,
R_loadPractic, tip_semnal_input, clm);
        plotGraphs(f, N, input, output, outputPractic,
serieValoriR);
    end
end
```

### **FUNCTIE DE SELECTIE VALORI REZISTENȚĂ STANDARD**

```
function [R_g1Practic, R_g2Practic, R_dPractic, R_loadPractic] =
calculSerieValoriR(R_g1, R_g2, R_d, R_load, serieValoriR)
switch serieValoriR
case 2 %E12 - toleranta 10%
    serie = 12;
    possibleValues = [1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3,
3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2];
    valMax = 8.2;
case 3 %E24 - toleranta 5%
    serie = 24;
    possibleValues = [1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, 1.8,
2.0, 2.2, 2.4, 2.7, 3.0, 3.3, 3.6, 3.9, 4.3, 4.7, 5.1, 5.6, 6.2,
6.8, 7.5, 8.2, 9.1]; %la 3.33 aproximeaza la 3.6
    valMax = 9.1;
case 4 %E48 - toleranta 2%
    serie = 48;
    possibleValues = [1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.21, 1.27,
1.33, 1.40, 1.47, 1.54, 1.62, 1.69, 1.78, 1.87, 1.96, 2.05, 2.15,
2.26, 2.37, 2.49, 2.61, 2.74, 2.87, ...
3.01, 3.16, 3.32, 3.48, 3.65, 3.83, 4.02,
4.22, 4.42, 4.64, 4.87, 5.11, 5.36, 5.62, 5.90, 6.19, 6.49, 6.81,
7.15, 7.50, 7.87, 8.25, 8.66, 9.09, 9.53];
    valMax = 9.53;
end
```

```

R = [R_g1, R_g2, R_d, R_load];
R_practic = zeros(1, 4);
for i = 1:length(R)
    numarCifre = numel( num2str( fix(R(i)) ) ); %luam partea
    intreaga a nr, le transformam in string si apoi le numaram
    caracterele(elementele)
    R(i) = R(i).*10.^-(numarCifre-1);
    if R(i) > valMax
        R(i) = valMax;
    end
    if numarCifre > 7 % am luat ca val max sa fie valMax*10^6
    ~ valMax MegaOhmi
        numarCifre = 7;
    end
    ordinSerieR = serie*log10(R(i));
    ordinSerieR = round(ordinSerieR);
    R_practic(i) =
possibleValues(ordinSerieR+1)*10^(numarCifre-1);
    end
    R_g1Practic = R_practic(1);
    R_g2Practic = R_practic(2);
    R_dPractic = R_practic(3);
    R_loadPractic = R_practic(4);
    fprintf('val teoretice: [%i, %i, %i, %i]\nval practice: [%i,
%i, %i, %i]',...
    R(1), R(2), R(3), R(4),    R_practic(1), R_practic(2),
    R_practic(3), R_practic(4) );
end

```

### FUNCTIE CALCUL GRAFICE

```

function [input, output, gm, ro, Av, Rout] = calculGrafice(f, N,
beta, Vth, Vin, Vdd, Vgs, Id, R_d, R_load, tip_semnal_input, clm)
    T=1/f;
    t=0:T/100:N*T;
    Va = 100; %early voltage
    ro = Va/Id
    Vds = Vdd-Id*R_d;
    if Vds > Vgs-Vth %verificam daca suntem in
af(saturatie) sau cex(regiunea lineara)
        gm = 2*beta*(Vgs-Vth)
    else
        gm = 2*beta*Vds;
    end
    if clm == false
        Rout = parallelR(R_d, R_load)
    else
        Rout= parallelR(R_d, R_load, ro)
    end
end

```

```
Av = -gm*Rout
switch tip_semnal_input
    case 1
        input = Vin*sin(2*pi*f*N*t);
    case 2
        input = Vin*square(2*pi*f*N*t);
    case 3
        input = Vin*sawtooth(2*pi*f*N*t);
    otherwise
        input = Vin*sin(2*pi*f*N*t);
end
if Vgs < Vth
    output = Vdd*ones(1, length(t));
else
    output = Av*input;
end
end
```

### **FUNCTIE DETERMINARE PARAMETRI PSF**

```
function [Vgs, Vds, Id, cex] = calcParamPSF(beta, Vdd, Vth, R_g1,
R_g2, R_d, clm)
Vgs = R_g1/(R_g1+R_g2)*Vdd;
fprintf('Vgs: %f\n', Vgs);
if Vgs < Vth
    Vds = Vdd;
    Id = 0;
    cex = false;
    fprintf('Id: %f ; Vds: %f\n', Id, Vds);
else
    Vds = Vdd-beta*R_d*(Vgs-Vth)^2;
    if Vds < Vgs-Vth
        cex = true; %element de ui corespunzator
        fprintf('LUCRAM IN CEX!!\n');
    [Id, Vds] = calcParamCex(beta, Vgs, Vth, Vdd, R_d, clm);
    fprintf('Id: %f ; Vds: %f', Id, Vds);
    else
        cex = false;
        if clm == false
            Id = beta*(Vgs-Vth)^2;
            fprintf('Id: %f ; Vds: %f\n', Id, Vds);
        else
            Va = 100; %early voltage
            Id = (beta*(Vgs-Vth)^2)*(1+Vds/Va);
            fprintf('Id: %f ; Vds: %f\n', Id, Vds);
        end
    end
end
end
end
```

### FUNȚIE DETERMINARE PARAMETRII CEX

```
function [Id, Vds] = calcParamCex(beta, Vgs, Vth, Vdd, R_d, clm)
    if nargin == 0
        Vth = 1; %volti
        beta = 2000*10^-6; %in microamperi/V^2
        Vdd = 10; %volti
        R_b1 = 5.3333*10^3; %ohmi
        R_b2 = 8*10^3; %ohmi
        R_d = 10*10^3; %ohmi
        % Vgs = R_b1/(R_b1+R_b2)*Vdd; %volti
        Vds = Vdd-beta*R_d*(Vgs-Vth)^2; %volti
    end
    fprintf('Vgs in calcParamCex: %f\n', Vgs);
    syms Vds_sym; %symbolic variable
    eqn_Vds = beta*( 2*(Vgs-Vth)*Vds_sym-Vds_sym^2 )==( (Vdd-
    Vds_sym)/R_d ); %ecuatia simbolica ce rezulta din ecuatia
    curentului din drena din reg. de saturatie
    res = solve(eqn_Vds, Vds_sym);
    fprintf('res(1): %f \nres(2): %f\n', double( res(1) ), double(
    res(2) ));
    fprintf('Vgs-Vth: %f\n', Vgs-Vth);
    if (res(1) > 0 && res(1) < Vgs-Vth) && (res(2) < 0 || res(2) >
    Vgs-Vth)
        Vds = double( res(1) );
    elseif (res(1) < 0 || res(1) > Vgs-Vth) && (res(2) > 0 && res(2)
    < Vgs-Vth)
        Vds = double( res(2) );
    else
        fprintf('Error @ linear region Id calculation \ncheck res
        values: %d ; %d', res(1), res(2));
        Vds = -1;
        close;
    end
    fprintf('Vds: %f', Vds);
    if clm == false
        Id = (Vdd-Vds)/R_d
    else
        Va = 100;
        Id = ( (Vdd-Vds)/R_d )*(1+Vds/Va)
    end
end

end
```

### FUNȚIE LIMITARE SEMNAL IEȘIRE

```
function [output, cex, blocare, semnalMare] =
    calcGraficeVinPreamMare(t, input, beta, Vth, Vgs, Id, Vdd, R_d,
    R_load, clm)
    semnalMare = true;
```

```

Va = 100;
Vds = Vdd-(Vdd+Id*R_load)*R_d/(R_d+R_load);
output = zeros(1,length(t));
cex = false;
blocare = false;
for i = 1:length(t)
    vgs = Vgs + input(i);
    if vgs < Vth
        vds = Vdd;
        id = 0;
        blocare = true;
        %          fprintf('Id: %f ; Vds: %f\n', Id, Vds);
    else
        if clm == true
            id = (beta*(Vgs-Vth)^2)*(1+Vds/Va);
        else
            id = beta*(vgs-Vth)^2;
        end
        vds = Vdd-(Vdd+id*R_load)*R_d/(R_d+R_load);
        if vds < vgs-Vth
            cex = true;
            fprintf('LUCRAM IN CEX!!\n');
            vds = (R_d + R_load -
(4*beta^2*R_d^2*R_load^2*Vth^2 - 8*beta^2*R_d^2*R_load^2*Vth*vgs +
4*beta^2*R_d^2*R_load^2*vgs^2 - 4*beta*R_d^2*R_load*Vth +
4*beta*R_d^2*R_load*vgs + R_d^2 - 4*beta*R_d*R_load^2*Vth +
4*beta*R_d*R_load^2*vgs - 4*Vdd*beta*R_d*R_load^2 + 2*R_d*R_load +
R_load^2)^(1/2) - 2*R_d*R_load*Vth*beta +
2*R_d*R_load*beta*vgs)/(2*R_d*R_load*beta)
            %          fprintf('Id: %f ; Vds: %f', Id, Vds);
        else
            if clm == false
                Id = beta*(Vgs-Vth)^2;
                % fprintf('Id: %f ; Vds: %f\n', Id, Vds);
            else
                Va = 100;          %early voltage
                Id = (beta*(Vgs-Vth)^2)*(1+Vds/Va);
                % fprintf('Id: %f ; Vds: %f\n', Id, Vds);
            end
        end
        output(i) = vds-R_load*Vdd/(R_d+R_load);
    end
end
end

```

Rezultatele acestor linii de cod pot fi vizualizate în imaginile următoare. Platforma de simulare a acestor amplificatoare are la bază un model propus pentru tranzistorul MOS iar circuitul se învâрте în jurul variabilelor:

- factorul de amplificare  $\beta$  - beta;
- tensiunea de prag -  $V_{th}$
- tensiunea de alimentare -  $V_{dd}$
- rezistentele de polarizare din grila -  $R_{g1}$ ,  $R_{g2}$
- rezistenta din dreana -  $R_d$
- rezistenta de sarcina -  $R_{load}$
- rezistenta de iesire specifica modulatiei in canal -  $r_o$

Interfata mai permite modificarea unor parametri ce influenteaza atat semnalul transmis si prelucrat de catre amplificator, cat si cel de la iesire

- frecventa semnalelor -  $f$
- numarul de perioade ce se doreste a fi afisat -  $N$
- amplitudinea semnalului de intrare -  $V_{in}$
- tipul semnalului de intrare -  $tip\_semnal\_input$
- seria de valori normalizate de rezistente - E12/E24/E48

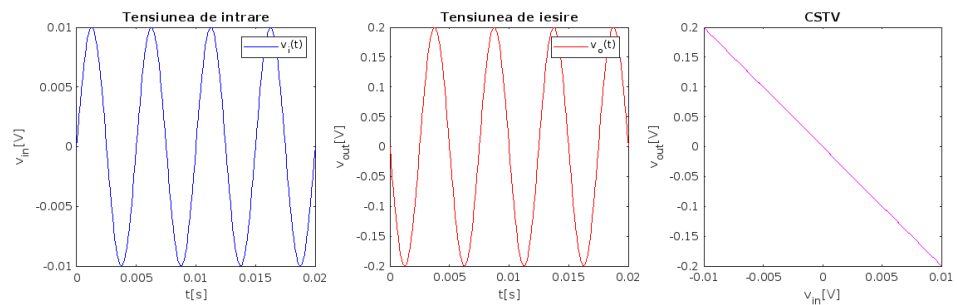


Figura 2.9 Formele de undă returnate

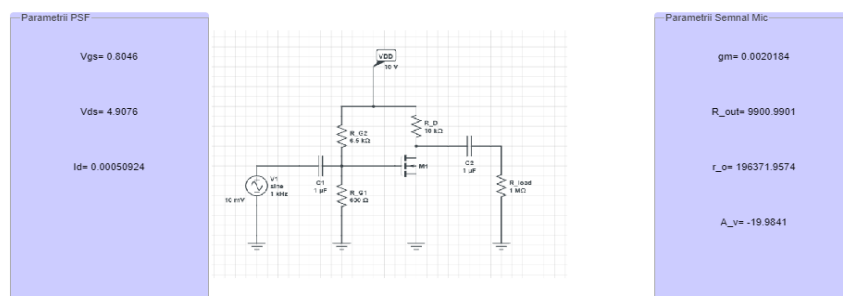


Figura 2.10 Calcule PSF și de semnal mic

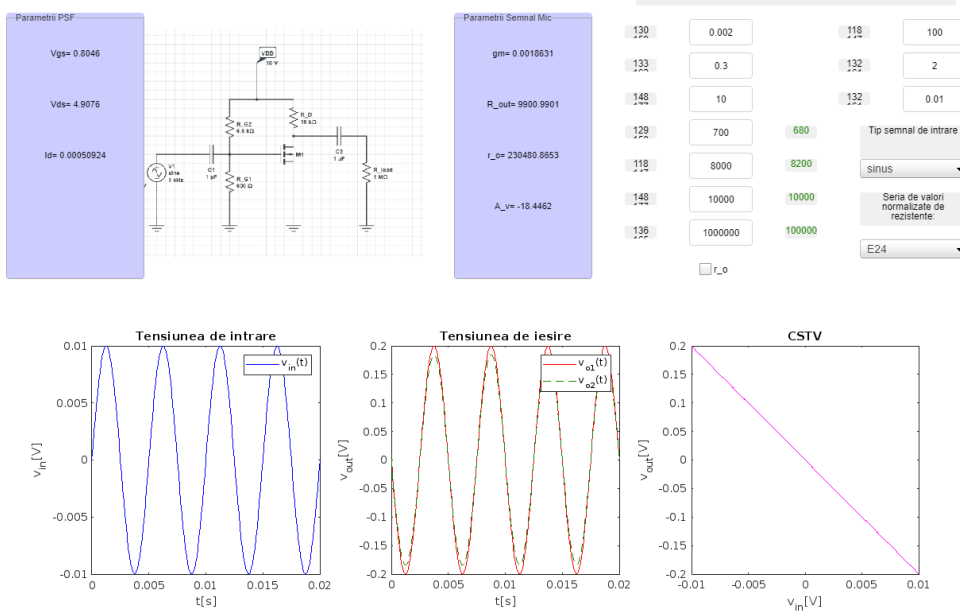


Figura 2.11 Platforma Matlab de simulare a amplificatorului MOS în conexiune sursă comună

### 3 Modelarea amplificatoarelor operaționale

Amplificatoarele operaționale reprezintă familia cu cea mai mare extindere dintre circuitele integrate analogice. Ele reprezintă în fapt amplificatoare electronice integrate, care se disting prin faptul că au performanțe de excepție. În principiu se comportă ca amplificatoare ideale de tensiune având amplificarea în tensiune foarte mare, rezistența de intrare de asemenea foarte mare și rezistența de ieșire foarte mică. Aceste calități le recomandă pentru lucrul în buclă închisă, astfel apărând posibilitatea proiectării unor amplificatoare a căror amplificare să fie determinată în mod exclusiv de rețeaua de reacție, rețea care în majoritatea cazurilor este constituită dintr-un atenuator calibrat.

În general structura unui amplificator operațional este destul de complexă având în componența sa în funcție de complexitate zeci sau chiar sute de tranzistoare, rezistori și uneori condensatoare. O schemă de principiu a unui astfel de dispozitiv electronic este prezentată în figura 3.1. Se pot evidenția cele 2 intrări de semnal și ieșirea amplificatorului operațional precum și terminalele de alimentare ale acestuia.

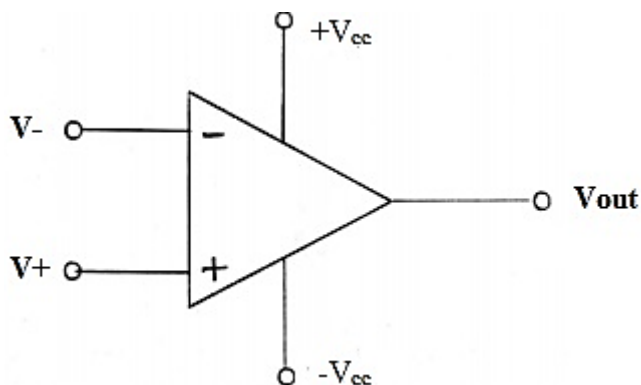


Figura 3.1 Simbolul unui amplificator operațional

Datorită complexității structurii interne a amplificatorului operațional aceste dispozitive sunt greu de modelat iar pentru simplitate vom folosi în analiză un model ideal. În tabelul următor se prezintă o paralelă între un model real și unul ideal.



AO IDEAL	AO REAL
câștigul în tensiune infinit	câștigul în tensiune foarte mare
impedanța de intrare infinită;	impedanță de intrare foarte mare
impedanța de ieșire zero	impedanță de ieșire foarte mică
lățimea de bandă infinită	bandă de trecere largă

### 3.1 Comparatoare fără reacție

Dacă privim spre simbolul amplificatorului operațional prezentat în figura 3.1 putem defini tensiunea de la ieșirea acestuia ca fiind:

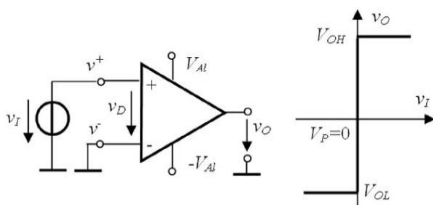
$$V_O = a \cdot V_D = a \cdot (v^+ - v^-) \quad 3.8$$

Cum domeniul tensiunii de ieșire este cuprins între  $-V_{CC}$  și  $+V_{CC}$  și cum amplificarea  $a = \infty$  într-un caz ideal putem spune că:

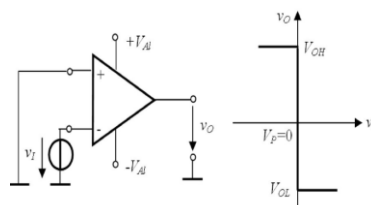
$$V_O = a \cdot V_D = \infty \cdot V_D = \begin{cases} +V_{CC}, & V_D > 0 \\ -V_{CC}, & V_D < 0 \end{cases} \quad 3.9$$

Ceea ce ne indică relația 3.2 este faptul că, aplicând semnale la cele 2 intrări ale amplificatorului operațional vom obține la ieșirea acestuia un semnal de tensiune continuă de valoare + sau  $-V_{CC}$  în funcție de diferența care se obține între cele 2 intrări ale AO. Putem spune astfel că la ieșirea AO avem de fapt un nivel de 1 sau 0 logic în funcție de semnalele pe care le aplicăm la cele 2 intrări ale AO.

Comparator neinversor



Comparator inversor



$$V_o = \begin{cases} V_{OH}, & v_i > 0 \\ V_{OL}, & v_i < 0 \end{cases} \quad V_o = \begin{cases} V_{OH}, & v_i < 0 \\ V_{OL}, & v_i > 0 \end{cases} \quad 3.11$$

**3.10**

MODEL MATLAB

```

t=0:T./200:N.*T;
    nt=length(t);
    w=2*pi./T;
ui=A.*sin(w.*t);
%=====Comparator inversor
if caz==1
titlul='Comparator inversor';
uo=zeros(1,nt);
for k=1:nt

    uo(k)=Va1;
    if ui(k)>Vph
        uo(k)=Va2;
    elseif ui(k)<Vph
        uo(k)=Va1;
    end
end
end
%=====Comparator neinversor
if caz==2
titlul='Comparator neinversor';
uo=zeros(1,nt);
for k=1:nt
    uo(k)=Va1;
    if ui(k)>Vph
        uo(k)=Va1;
    elseif ui(k)<Vph
        uo(k)=Va2;
    end
end
end
subplot(3,2,4); % Tensiunea de iesire in functie de timp
plot(t,uo,'m');
grid on;
title(titlul);
ylabel(' Uout [V]');
xlabel('Timpul [s]');
%-----
subplot(3,2,6); % Tensiunea de iesire in functie de tensiunea
de intrare
cla;

```

```
plot(ui,uo,'k');grid on;  
text(Vph,0,num2str(Vph));  
title('Caracteristica Uo-Ui');  
ylabel(' Uo [V]');  
xlabel('Tensiunea de intrare Ui [V]');
```

Compilarea acestor linii de cod conduce la rezultatele din figurile următoare unde se evidențiază atât forma tensiunii de ieșire cât și caracteristica statică de transfer în tensiune.

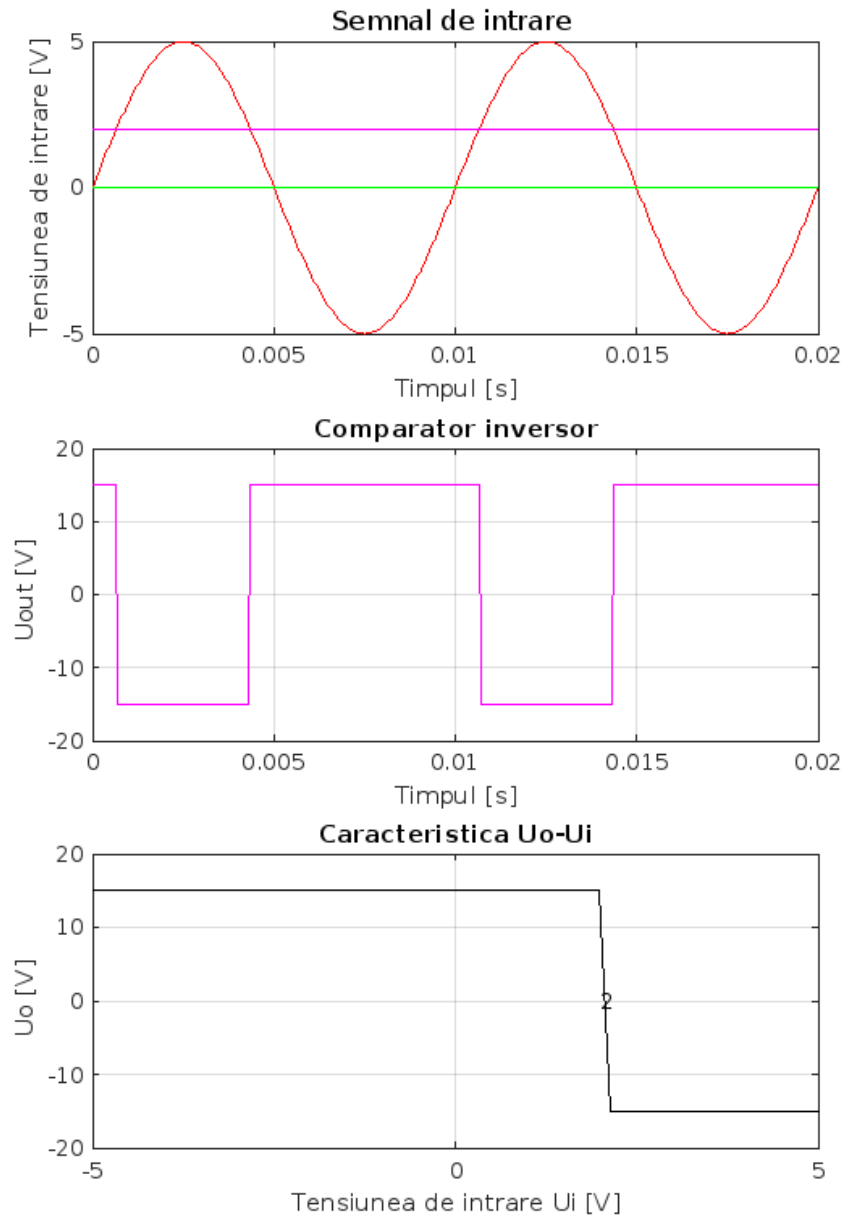


Figura 3.2 Simulare comparator inversor  $V_P=2V$

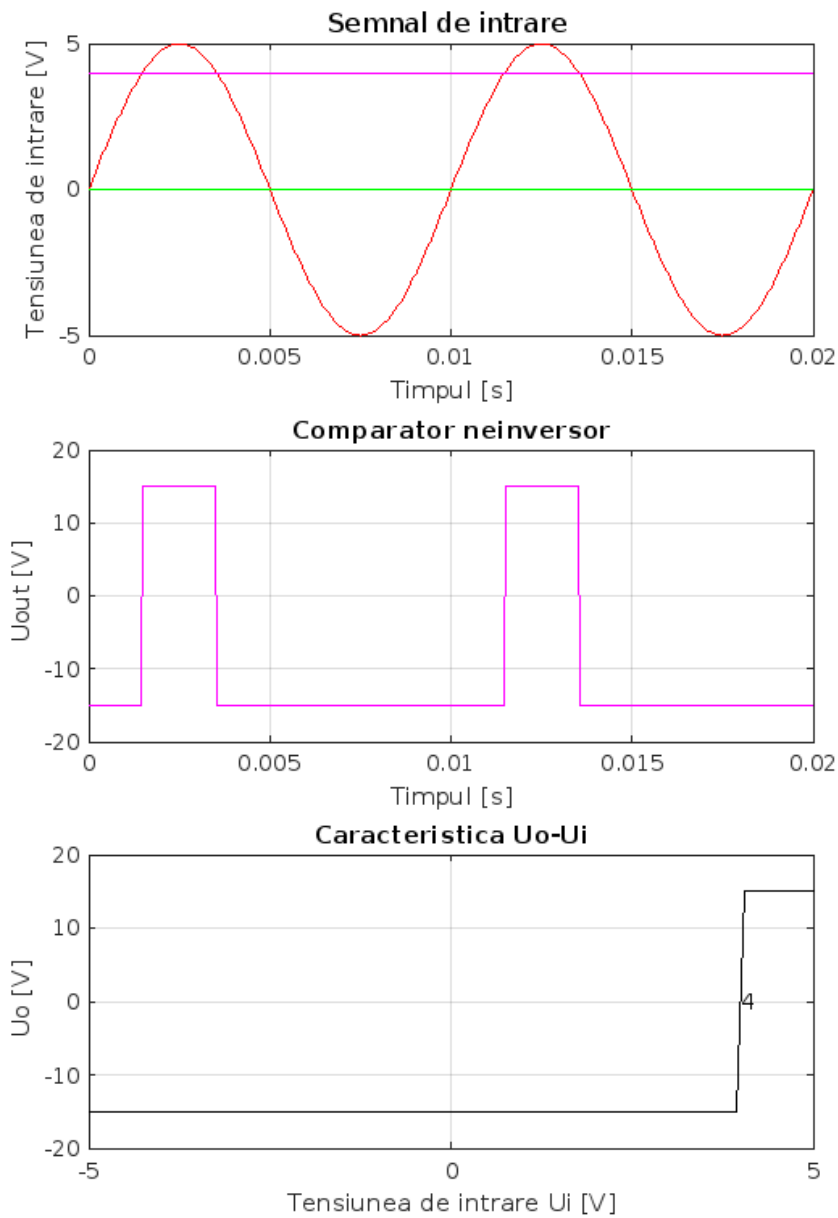


Figura 3.3 Simulare comparator neinversor  $V_P=4V$

În figurile 3.2 și 3.3 se pot observa rezultatele returnate în urma rulării codului descris anterior asupra funcționării unor comparatoare simple. Privind spre caracteristica statică de transfer în tensiune putem observa modul în care aceste circuite realizează bascularea la atingerea tensiunii de prag.

O combinație a celor 2 comparatoare este prezentată în figura alăturată unde cu ajutorul unei porți logice putem sa definim un comparator fereastră.

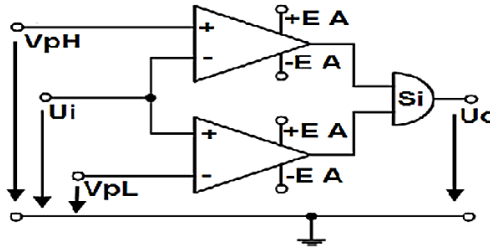


Figura 3.5 Schema de principiu a unui comparator fereastră

Așa cum se observă și în figura 3.5 un astfel de comparator poate fi utilizat atunci când dorim să asigurăm o histereză sau să obținem la ieșirea circuitului semnale condiționate. Rezultatele obținute sunt prezentate în figura 3.6 unde se poate observa că, semnalul de ieșire este o combinație a semnalelor de ieșire prezentate anterior trecute printr-o poartă AND. Codul de realizare al aplicației este prezentat în cele ce urmează.

```

if caz==3
titlul='Comparator Fereastră';
uo=zeros(1,nt);
for k=1:nt
    if (ui(k)>Vp1)&(ui(k)<Vph)
        uo(k)=Va1;
    else
        uo(k)=Va2;
    end
end
end
end

subplot(3,2,4); % Tensiunea de iesire in functie de timp
plot(t,uo,'m');
grid on;
title(titlul);
ylabel(' Uout [V]');
xlabel('Timpul [s]');
%-----
subplot(3,2,6); % Tensiunea de iesire in functie de tensiunea
de intrare
cla;
plot(ui,uo,'k');grid on;
text(Vph,0,num2str(Vph));
title('Caracteristica Uo-Ui');
ylabel(' Uo [V]');
xlabel('Tensiunea de intrare Ui [V]');
    
```

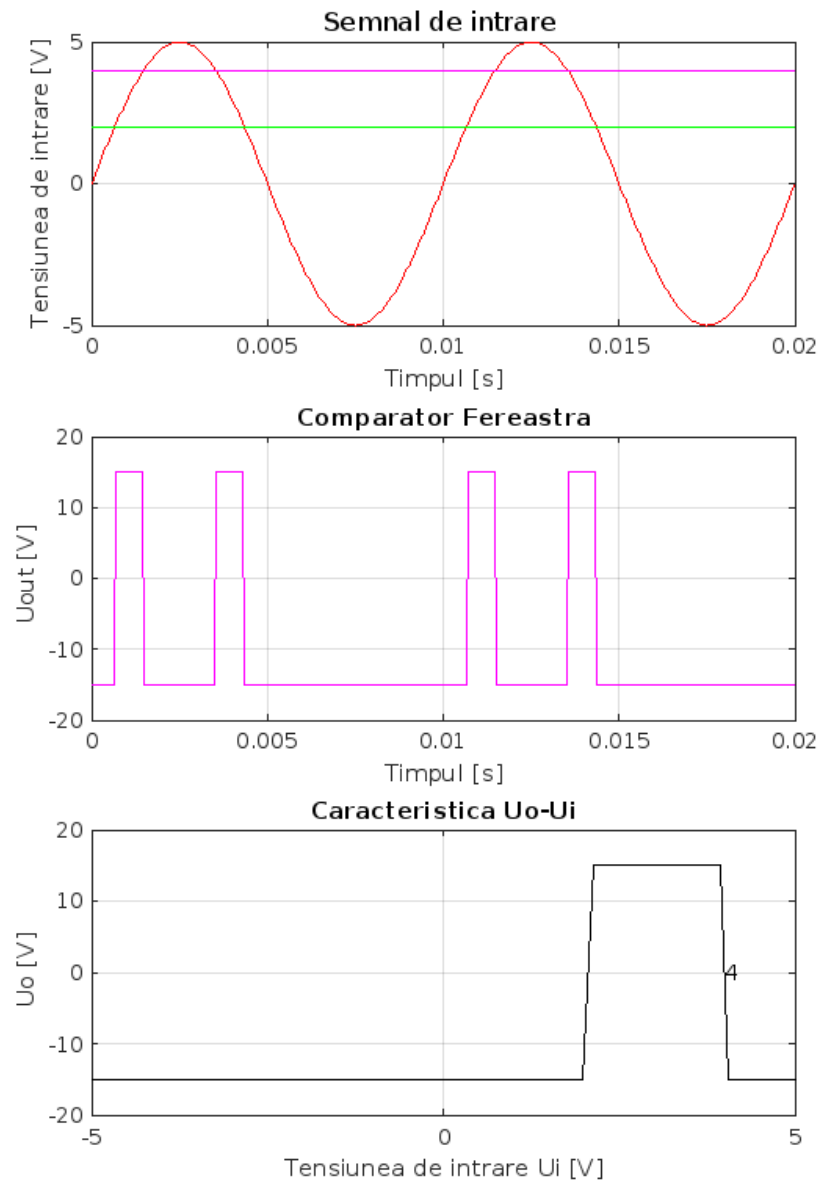
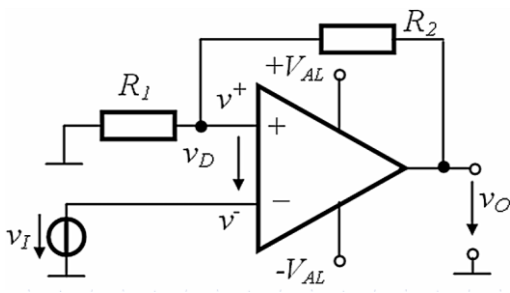
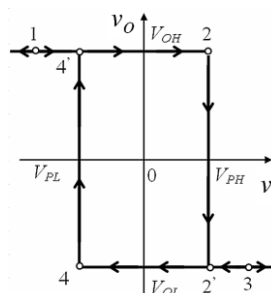
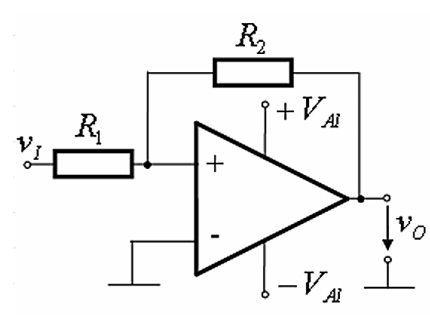
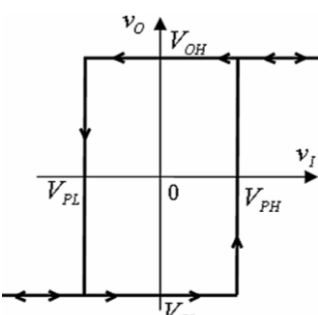


Figura 3.6 Simulare a comparatoarelor fereastră

### 3.2 Comparatoare cu reacție

Deși în ultimul exemplu prezentat am arătat că utilizarea AO ca și comparator ne poate furniza o oarecare lățime controlată a semnalului de la ieșirea acestuia, nu putem spune că avem o histereză în adevăratul sens al cuvântului, asta se observă foarte clar în caracteristica de ieșire a comparatorului fereastră. Pentru a asigura o basculare controlată între valorile tensiunii de alimentare a AO e nevoie de construirea unei reacții pozitive (RP) a AO.

Comparator inversor cu RP	CSTV AO cu RP inversor
	
$V_{PH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+V_{AL})$	<b>3.12</b>
$V_{PL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{AL})$	<b>3.13</b>
Comparator neinversor cu RP	CSTV AO cu RP neinversor
	
$V_{PH} = -\frac{R_1}{R_2} (-V_{AL})$	<b>3.14</b>
$V_{PL} = -\frac{R_1}{R_2} (+V_{AL})$	<b>3.15</b>



Din ecuațiile anterioare se poate observa ca o primă diferență față de comparatoarele simple prezența două praguri de comparare a semnalului de intrare. Aceste praguri sunt determinate de valorile celor 2 rezistențe din reacția pozitivă și de valoarea tensiunii de alimentare a AO.

```
%=====Triger Schmitt neinvorsor
```

```
if caz==1
titlul='Triger Schmitt invorsor';
Vph=Va1.*R1./(R1+Rp);
Vpl=-Vph;
Vp=Vph;
uo=zeros(1,nt);
for k=1:nt
```

```
    uo(k)=Va1;
    if ui(k)>Vp
        uo(k)=Va2;
        Vp=Vpl;
    elseif ui(k)<Vp
        uo(k)=Va1;
        Vp=Vph;
    end
end
```

```
end
```

```
end
```

```
%=====Triger Schmitt neinvorsor
```

```
if caz==2
titlul='Triger Schmitt neinvorsor';
Vph=Va1.*R1./Rp;
Vpl=-Vph;
Vp=Vph;
uo=zeros(1,nt);
for k=1:nt
```

```
    uo(k)=Va2;
    if ui(k)>Vp
        uo(k)=Va1;
        Vp=Vpl;
    elseif ui(k)<Vp
        uo(k)=Va2;
        Vp=Vph;
    end
end
```

```
end
```

```
end
```

Considerând că la intrarea circuitului se aplică un semnal sinusoidal așa cum am prezentat în modelul anterior cu ajutorul liniilor de cod de mai sus, se poate defini un model de simulare a unor astfel de comparatoare care țin cont de valorile rezistențelor din reacție și de valorile tensiunilor de alimentare pentru a calcula pragurile și a reprezenta grafic formele de undă caracteristice.

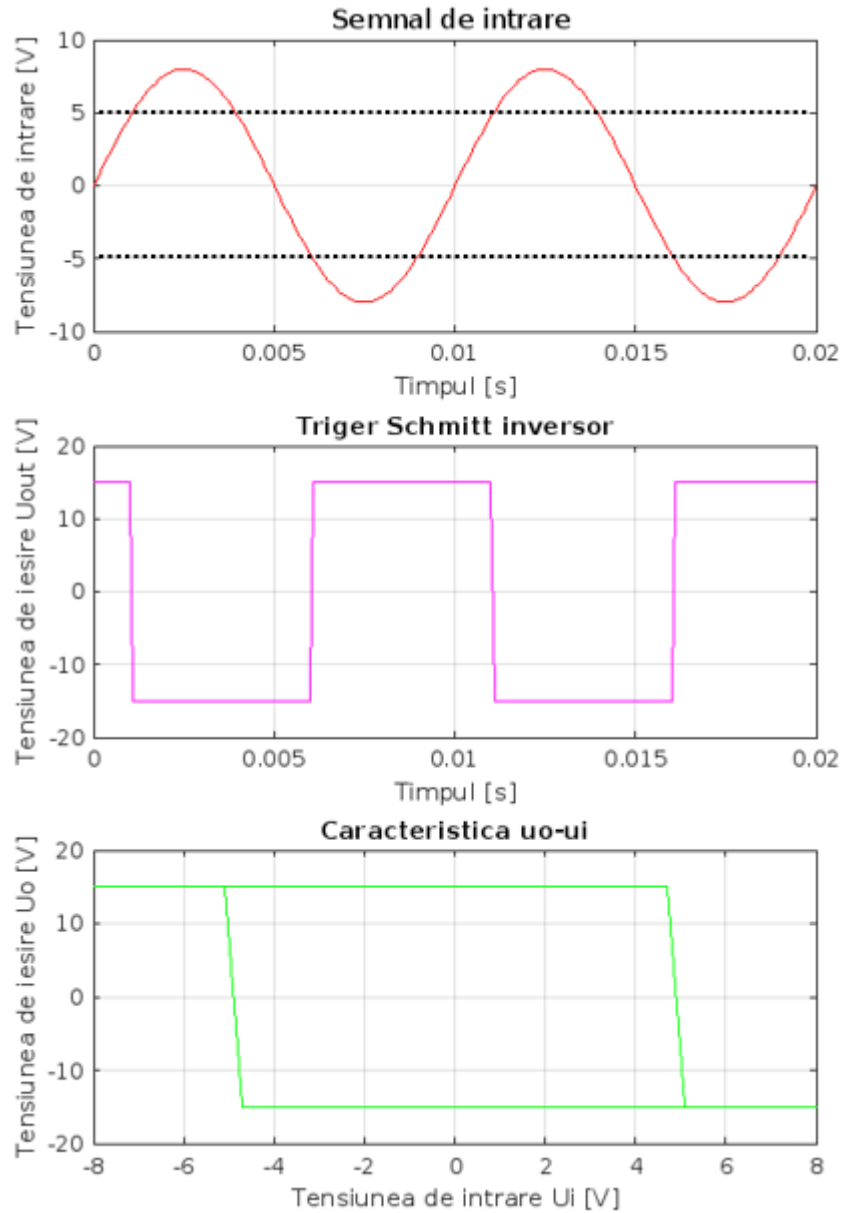


Figura 3.7 Simulare a AO inversor RP

Pentru rezultatul din figura 3.7 s-a folosit următorul set de valori:  $A=8$  (amplitudinea semnalului de intrare),  $+Val=15$ ,  $-Val=15$  (alimentările amplificatorului operațional),  $R1=2k$ ,  $R2=4k$ . Acest set de valori conduce la  $V_{ph}=5$  și  $V_{pl}=-5$ .

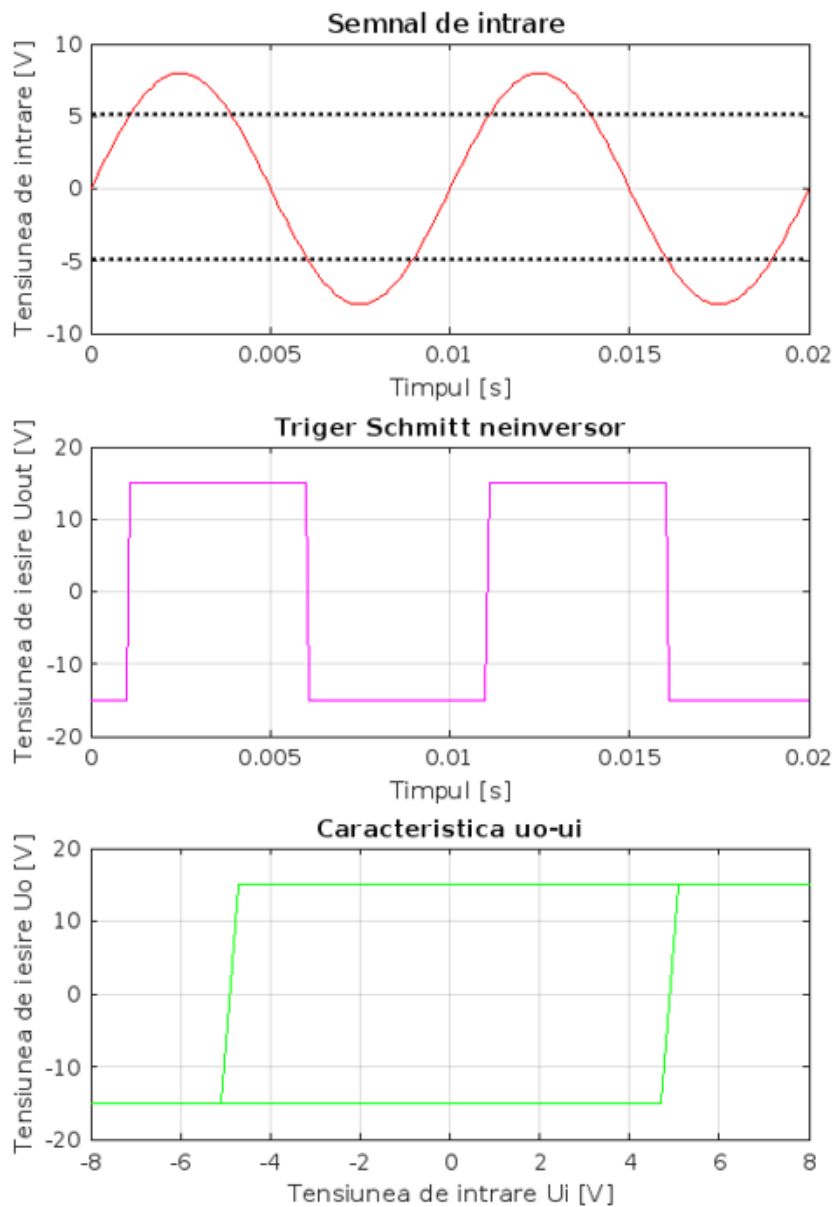


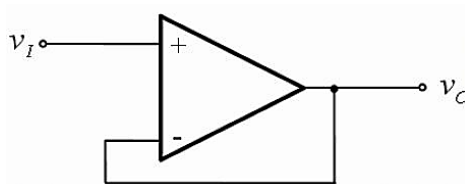
Figura 3.8 Simulare a AO neinversor RP

Pentru rezultatul din figura 3.7 s-a folosit următorul set de valori:  $A=8$  (amplitudinea semnalului de intrare),  $+Val=15$ ,  $-Val=15$  (alimentările amplificatorului operațional),  $R1=2k$ ,  $R2=6k$ . Acest set de valori conduce la  $V_{ph}=5$  și  $V_{pl}=-5$ .

### 3.3 Ampificatoare operațional cu reacție negativă

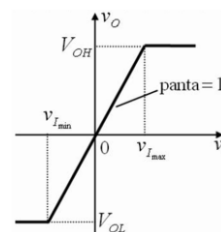
Privind înspre amplificatoarele operaționale cu reacție pozitivă putem spune că, dacă în cazul comparatoarelor simple amplificarea era în cazul ideal  $\infty$ , amplificarea acestora apare oarecum dublată din pricina basculării comparatorului doar la atingerea unui prag diferit față de cel la care s-a produs bascularea anterioară. Acest fapt face ca tensiunea de ieșire să fie + sau – tensiunea la care amplificatorul operațional este alimentat. Pentru a putea controla valoarea tensiunii de ieșire e necesară prezența unei reacții negative în circuit. O reacție negativă înseamnă conectarea ieșirii AO la intrarea inversoare a acestuia. Această reacție este o reacție totală și transformă AO într-un circuit repetor. Avantajul utilizării unui astfel de circuit, care repetă la ieșire ceea ce primește la intrare este nevoia de a asigura în unele cazuri o adaptare de impedanță. În prima parte a capitolului spuneam că, AO are impedanță de intrare foarte mare și impedanță de ieșire foarte mică. Schemele de principiu a unei reacții negative cu AO sunt prezentate în cele de urmează. În cazul unei reacții negative putem spune că  $v_+ = v_-$ . Cum  $v_o = A(v_+ - v_-)$ , rezultă că  $A = \frac{v_o}{v_i}$ .

Reacție totală negativă – repetor de tensiune



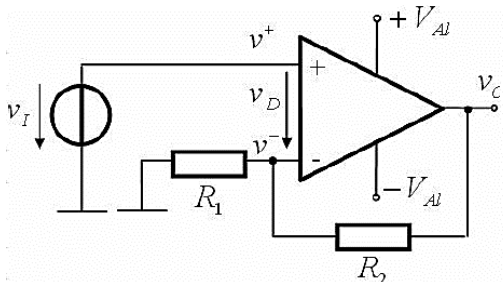
$$A=1, v_o=v_i$$

CSTV repetor



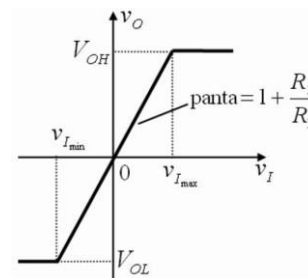
3.16

AO RN neinvorsor

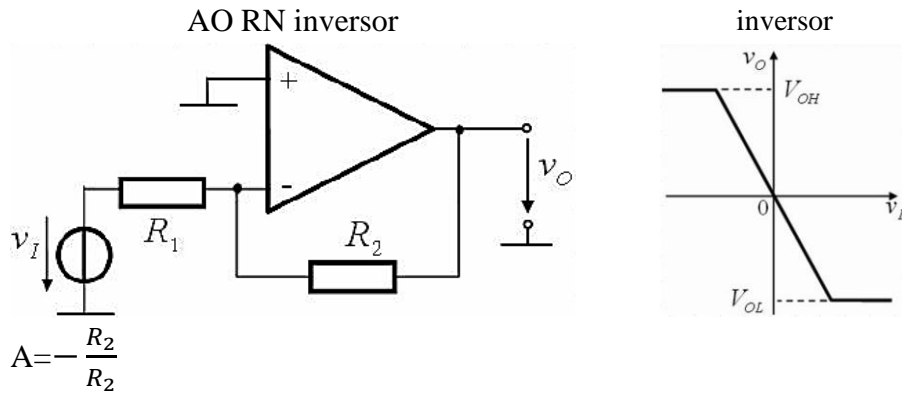


$$A=1 + \frac{R_2}{R_1}$$

CSTV neinvorsor



3.17



Așa cum sugerează și relațiile (3.10) și (3.11), reacția negativă a amplificatoarelor operaționale permite limitarea amplificării de la ieșirea circuitului oferind o variație liniară a tensiunii de ieșire controlată prin valorile rezistențelor de reacție. Privind spre amplificatorul neinversor, putem spune că, amplificarea minimă a acestuia este 1. Acest fapt se datorează unei reacții totale negative ce conduce la obținerea unui repetor. Dacă ne uită la amplificarea circuitului inversor, putem spune că, tensiunea de ieșire nu este doar defazată cu 180 de grade față de tensiunea de intrare, dar putem obține și un atenuator de tensiune, raportul rezistențelor din calculul amplificării putând fi subunitar.

În cele ce urmează se prezintă un model Matlab de simulare a acestor circuite pe baza ecuațiilor matematice prezentate anterior.

### MODEL MATLAB

```

%=====
% grafice
%=====
    t=0:T./100:3.*T;
    nt=length(t);
    w=2*pi./T;
if strcmp(Opt,'Sinusoidal')==1      %daca e selectat "Sinusoidal"
    ui=A.*sin(w.*t);
end
if strcmp(Opt,'Triunghiular')==1    %daca e selectat
"Triunghiular"
    ui=(2.*A./pi).*asin(sin(w.*t));
end
    
```

```

%=====Reprezentari grafice
subplot(3,2,2); % Tensiunea de intrare in functie de timp
cla;
plot(t,ui, '-r');
grid on;
title('Semnal de intrare ', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'demi');
ylabel('Tensiunea de intrare [V]');
xlabel('Timpul [s]');
%-----
if tip==1
    Ar=-Rn./R1;
    titlul='Semnal de iesire AO inversor';
end
if tip==2
    Ar=1+Rn./R1;
    titlul='Semnal de iesire AO neinversor';
end
subplot(3,2,4); % Tensiunea de iesire in functie de timp
uo=Ar.*ui;
k=1;
for k=1:nt
    uo(k)=Limitare_AO(uo(k),Va1,Va2);
end
plot(t,uo, 'm');
grid on;
title(titlul);
ylabel('Tensiunea de iesire Uout [V]');
xlabel('Timpul [s]');
%-----
subplot(3,2,6); % Tensiunea de iesire in functie de tensiunea
de intrare
cla;
plot(ui,uo, 'g');grid on;

title('Caracteristica uo-ui');
ylabel('Tensiunea de iesire Uo [V]');
xlabel('Tensiunea de intrare Ui [V]');

```

Liniile de cod de mai sus descriu un model matematic de simulare a unor astfel de circuite cu reacție negativă a aplicatoarelor operaționale. Se pot observa în liniile anterioare că, amplificarea e definită în raport cu rezistențele circuitului, iar tensiunea de ieșire este calculată pe baza semnalului aplicat la intrare și a amplificării obținute anterior. În funcție de variabila *tip* se poate parcurge oricare din cele trei amplificatoare cu RN prezentate anterior.

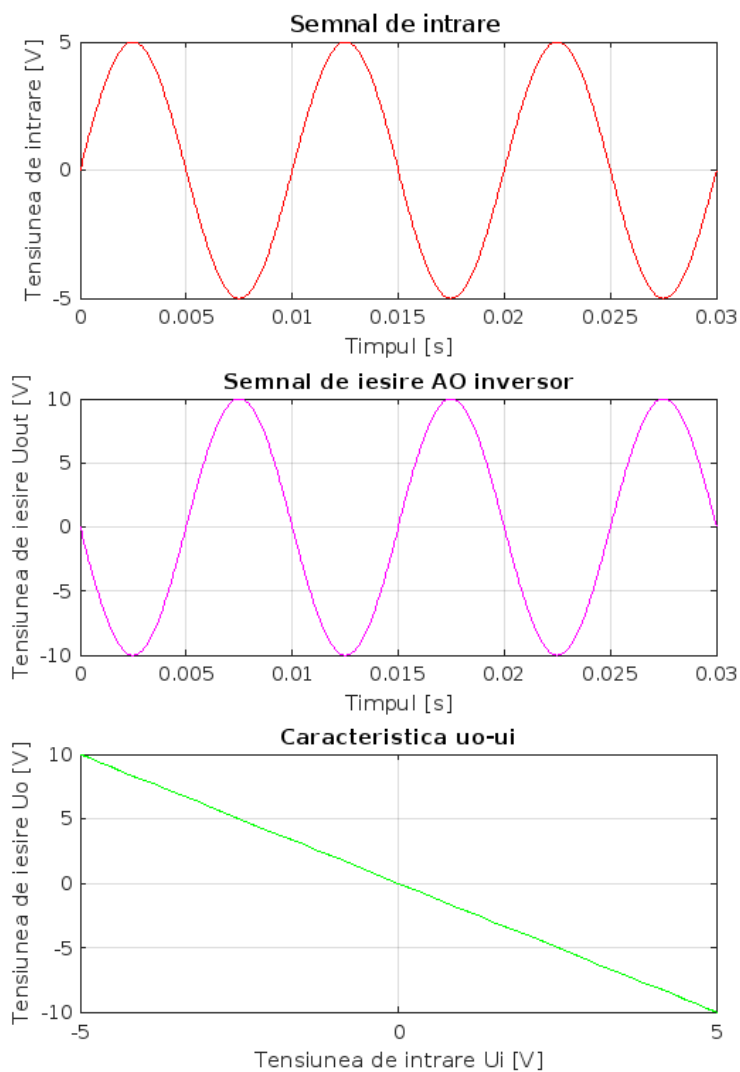


Figura 3.9 Simulare a AO inversor RN

Figura 3.9 prezintă o simulare a AO cu RN în configurație inversor pentru o amplificare de 2. Se observă că tensiunea de ieșire este defazată cu 180 grade în spatele tensiunii de intrare iar CSTV-ul arată o caracteristică liniară. Matematic, la ieșirea AO am putea obține orice valoare, așa cum reiese și din model, tensiunea de ieșire este de fapt, rezultatul unei înmulțiri a unui semnal de intrare cu o constantă. Pentru a replica funcționarea reală a amplificatorului operațional cu reacție negativă, în liniile ce urmează se prezintă o funcție de

limitare a tensiunii de ieșire la valorile maxime ale tensiunii de alimentare a AO, funcție ce se apelează în liniile de mai sus.

```
function [uo]=Limitare_AO(uo,Va1,Va2)
if uo>Va1
    uo=Va1;
elseif uo<Va2
    uo=Va2;
end
```

Această funcție ne permite să facem o evaluare a fiecărui eșantion din construcția semnalului de ieșire și să comparăm valoarea acestuia cu valoarea maximă sau minimă pe care putem să o obținem. Rezultatele unei amplificări care conduce la o tensiune de ieșire mult peste valoare de alimentare a AO este ilustrată în figura următoare.

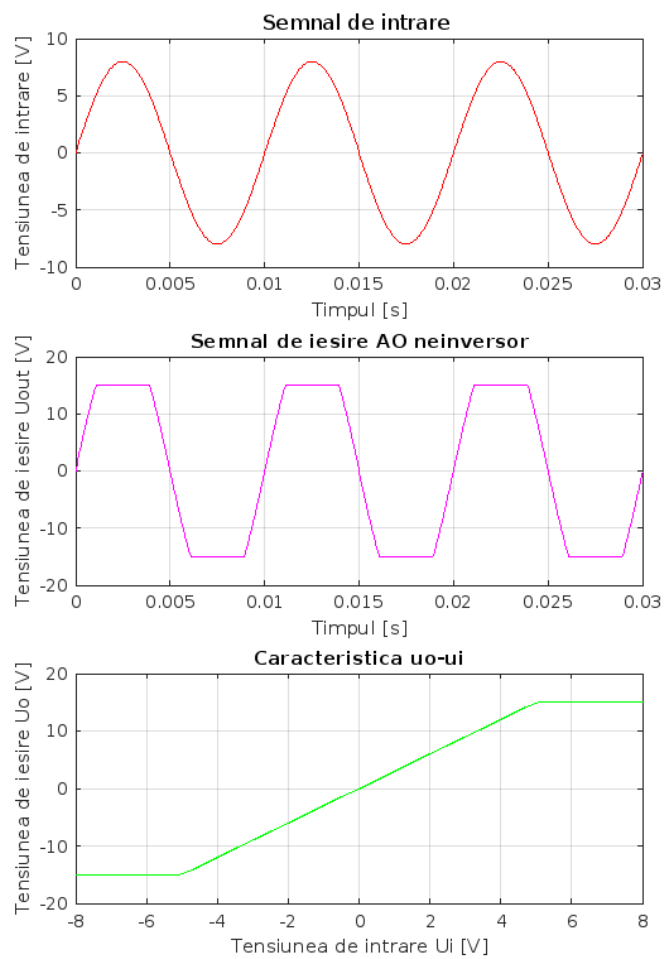


Figura 3.9 Simulare a AO neinversor RN  $V_{i_{max}}=8$ ,  $A=3$ ,  $V_{al}=15V$



### 3.4 Amplificator diferențial

În subcapitolul anterior s-a prezentat comportamentul unui AO cu RN. Am arătat că reacția negativă permite controlul amplificării și că amplificarea unui astfel de circuit este liniară în regiunea activă normală de funcționare a acestuia. De cele mai multe ori e nevoie ca semnalele pe care încercăm să le amplificăm, atenuăm, condiționăm să fie citite de unități decizionale, precum uC. Un amplificator diferențial ne permite să calculăm așa cum îi spune și numele diferența dintre 2 semnale aplicate la intrare lui. Un astfel de dispozitiv este util în măsurători de precizie asigurând o imunitate ridicată la intrare și realizând o adaptare de impedanță a semnalului cules în raport cu instrumentul de măsură.

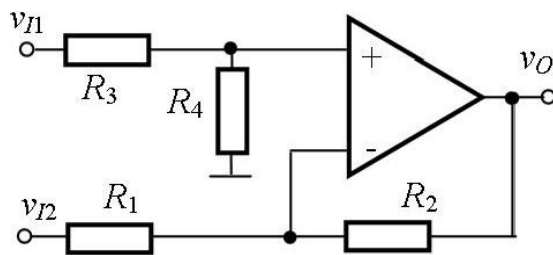
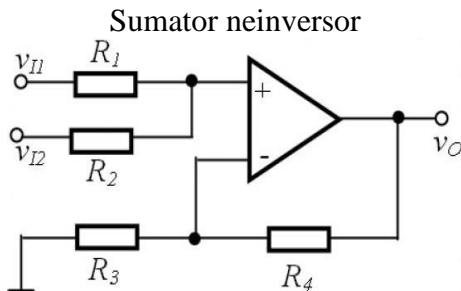


Figura 3.10 Schema de principiu a unui amplificator diferențial

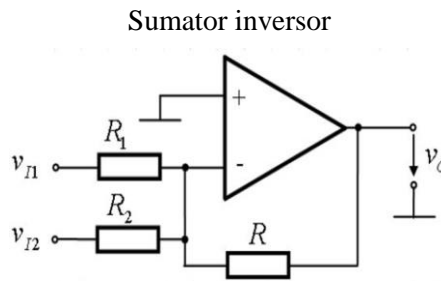
$$v_o = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{i1} - \frac{R_2}{R_1} v_{i2} \quad 3.19$$

### 2.1. Amplificator sumator



$$v_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{i1} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} v_{i2}\right)$$

3.20



$$v_o = -\left(\frac{R}{R_1} v_{i1} + \frac{R}{R_2} v_{i2}\right)$$

3.21

Opus amplificatorului diferentia, care calculează diferența dintre semnalele aplicate la intrarea sa, circuitul sumator adună mai multe semnale aduse pe intrările sale. Acest circuit poate să fi atât un circuit de însumare neinversor cât și inversor.

În liniile de cod de mai jos se prezintă un model matematic implementat în Matlab de simulare a unor astfel de circuite. Particular, este prezentată și o interfață grafică de simulare a unor astfel de circuite.

#### FISIERUL START

```
A1=5;
f1=50;
A2=6;
f2=100;
n=4;
alim=12;
R1=2000;
R2=10000;
R3=10000;
R4=10000;
titlu='titlu';
fig=6;
amplificator(fig,R1,R2,alim,A1,f1,n,A2,f2,R3,R4);
```

#### FISIER CALCULE

```
if strcmp(Opt,'Sinusoidal')==1
    %daca e selectat "Sinusoidal"
    sp1=subplot('Position',[0.05 0.07 0.43 0.85]);
    subplot(sp1);
    v1=A1*sin(2*pi*f1*t);
    v2=A2*sin(2*pi*f2*t);
    if (fig==3) v0=-(R1.*v1./R2+R1.*v2./R3); % sumator inversor
    elseif (fig==4) v0=(1+R4./R3).*(R2.*v1./(R1+R2) +
R1.*v2./(R1+R2)); % sumator neinversor
    else h1=(R4./(R3+R4)).*(1+R2./R1); % amplificator diferentia
        h2=(R2./R1);
        v0=h1.*v1-h2.*v2;
    end
    plot(t,v1,'-r');
    hold on;
    plot(t,v2,'-g');
    hold on;
    x0=min(v0,alim);
    x1=max(x0,-alim);
    plot(t,x1,'-b');
    hold on;
```

```

    title('Semnal de intrare -
sinusoidal', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'demi');
    ylabel('Amplitudine [V]', 'FontWeight', 'demi');
    xlabel('Timpul [s]', 'FontWeight', 'demi');
    legend('Vi1', 'Vi2', 'Vo');
    grid on;
end
if strcmp(Opt, 'Triunghiular')==1
    % daca e selectat "Triunghiular"
    sp1=subplot('Position',[0.05 0.07 0.43 0.85]);
    subplot(sp1);
    v1=2*A1*asin(sin(2*pi*f1*t))./pi;
    v2=2*A2*asin(sin(2*pi*f2*t))./pi;
    if (fig==3) v0=-(R1.*v1./R2+R1.*v2./R3);
    elseif (fig==4) v0=(1+R4./R3).*(R2.*v1./(R1+R2) +
R1.*v2./(R1+R2));
    else h1=(R4./(R3+R4)).*(1+R2./R1);
        h2=(R2./R1);
        v0=h1.*v1-h2.*v2;
    end
    plot(t,v1, '-r');
    hold on;
    plot(t,v2, '-g');
    hold on;
    x0=min(v0, alim);
    x1=max(x0, -alim);
    plot(t,x1, '-b');
    hold on;
    title('Semnal de intrare -
triunghiular', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'demi');
    ylabel('Amplitudine [V]', 'FontWeight', 'demi');
    xlabel('Timpul [s]', 'FontWeight', 'demi');
    legend('Vi1', 'Vi2', 'Vo')
    grid on;
end
if strcmp(Opt, 'Monopolar')==1
    %daca e selectat "Monopolar"
    sp1=subplot('Position',[0.05 0.07 0.43 0.85]);
    subplot(sp1);
    cla;
    v1=A1.*sign(sin(2*pi*f1*t));
    v11=(v1+A1)./2;
    v2=A2.*sign(sin(2*pi*f2*t));
    v22=(v2+A2)./2;
    if (fig==3) v0=-(R1.*v11./R2+R1.*v22./R3);
    elseif (fig==4) v0=(1+R4./R3).*(R2.*v11./(R1+R2) +
R1.*v22./(R1+R2));
    else h1=(R4./(R3+R4)).*(1+R2./R1);

```

```

        h2=(R2./R1);
        v0=h1.*v11-h2.*v22;
    end
        plot(t,v11,'-r');
        hold on;
        plot(t,v22,'-g');
        hold on;
        x0=min(v0,alim);
        x1=max(x0,-alim);
        plot(t,x1,'-b');
        hold on;
        grid on;
        title('Semnal de intrare - dreptunghiular,
monopolar','FontSize',12,'FontWeight','demi');
        ylabel('Amplitudine [V]','FontWeight','demi');
        xlabel('Timpul [s]','FontWeight','demi');
        legend('Vi1','Vi2','Vo')
        hold off;
    end
    if strcmp(Opt,'Bipolar')==1
        %daca e selectat "Bipolar"
        sp1=subplot('Position',[0.05 0.07 0.43 0.85]);
        subplot(sp1);
        v1=A1.*sign(sin(2*pi*f1*t));
        v2=A2.*sign(sin(2*pi*f2*t));
        if (fig==3) v0=-(R1.*v1./R2+R1.*v2./R3);
    elseif (fig==4) v0=(1+R4./R3).*(R2.*v1./(R1+R2) +
R1.*v2./(R1+R2));
    else h1=(R4./(R3+R4)).*(1+R2./R1);
        h2=(R2./R1);
        v0=h1.*v1-h2.*v2;
    end
        plot(t,v1,'-r');
        hold on;
        plot(t,v2,'-g');
        hold on;
        x0=min(v0,alim);
        x1=max(x0,-alim);
        plot(t,x1,'-b');
        hold on;
        grid on;
        title('Semnal de intrare - dreptunghiular,
bipolar','FontSize',12,'FontWeight','demi');
        ylabel('Amplitudine [V]','FontWeight','demi');
        xlabel('Timpul [s]','FontWeight','demi');
        legend('Vi1','Vi2','Vo')
        hold off;
    end
end

```

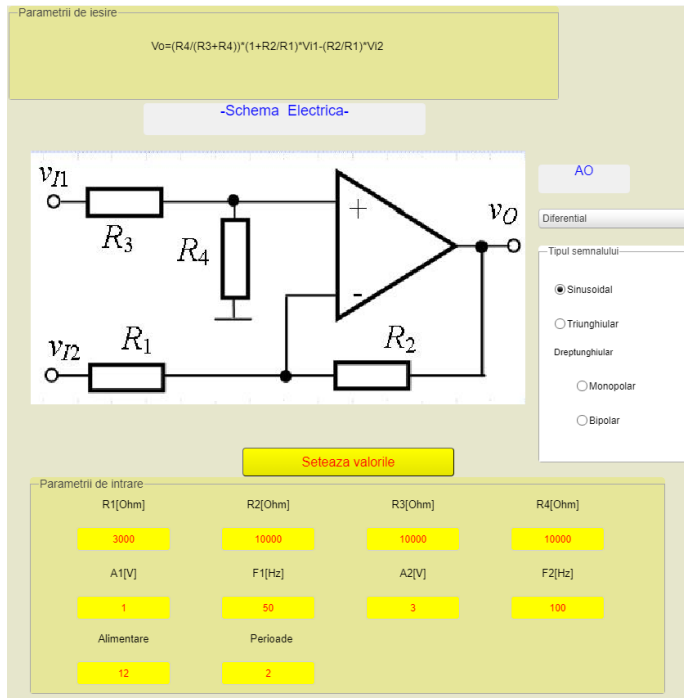


Figura 3.11 Interfață platformă MATLAB AO diferențial

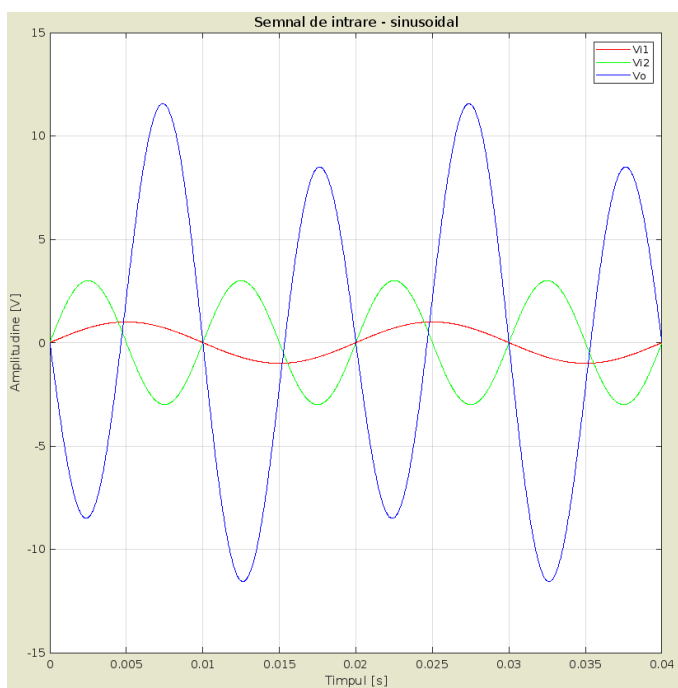


Figura 3.12 Simulare AO diferențial pentru valorile de mai sus

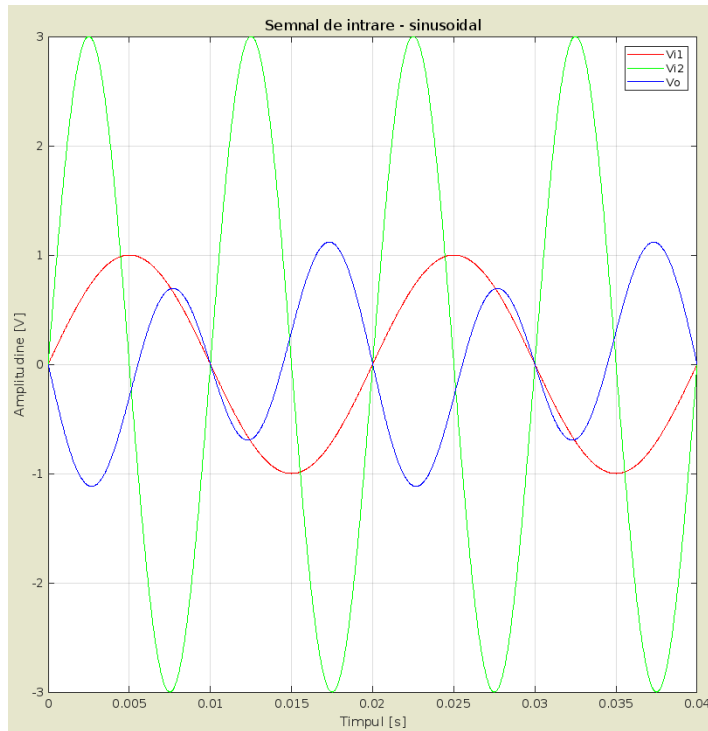


Figura 3.13 Simulare AO sumator inversor pentru valorile fig3.11

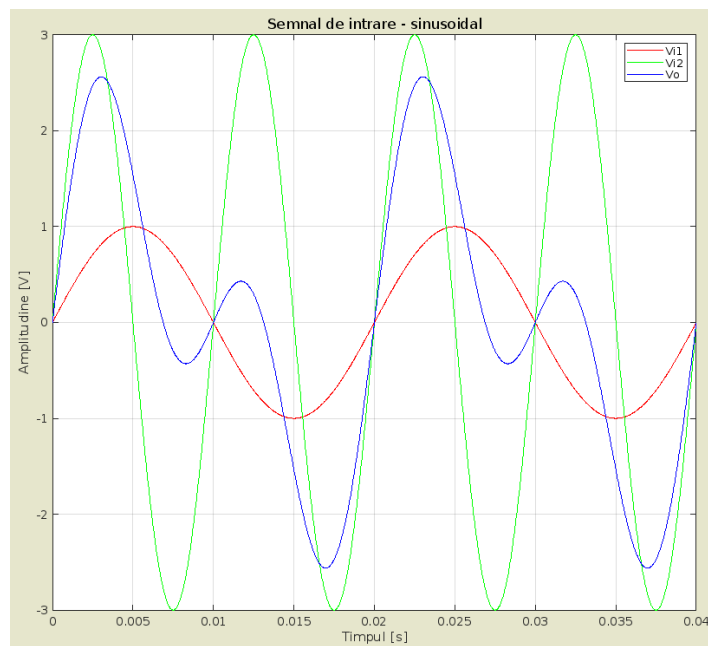


Figura 3.14 Simulare AO sumator neinversor pentru valorile fig3.11

### 3.5 Circuite de integrare și derivare cu AO

Schema unui circuit integrator inversor este prezentată în figura 3.15. Se poate constata că tensiunea de intrare este aplicată intrării inversoare a AO

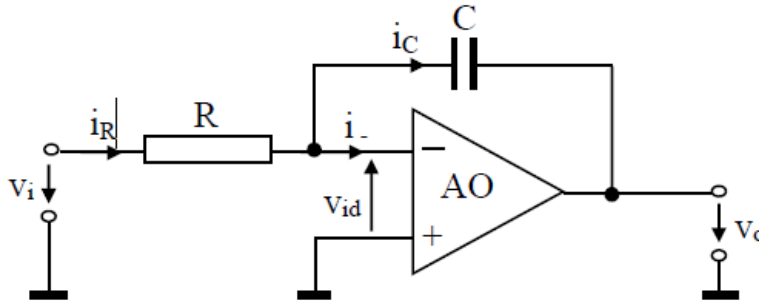


Figura 3.15 Schema integrator

$$\left. \begin{aligned} i_R(t) &= \frac{v_i(t)}{R} \\ i_C(t) &= -C \frac{du_C(t)}{dt} \\ i_R &= i_C(t) \\ u_C(t) &= U_{C_0} + v_o(t) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_i}{R} = -C \frac{dv_o(t)}{dt} \Leftrightarrow v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t v_i(\tau) d\tau + U_{C_0}$$

3.22

Unde cu  $U_{C_0}=u_C(t)$  s-a notat valoarea inițială a tensiunii pe condensator. Dacă notăm cu  $RC=T_i$  constanta de timp de integrare, expresia tensiunii de ieșire devine de forma:

$$v_o(t) = -\frac{1}{T_i} \int_{t_0}^t v_i(\tau) d\tau + U_{C_0} \tag{3.23}$$

De unde reiese că tensiunea de ieșire este integrala semnalului de intrare și prezintă un defazaj de  $180^\circ$  față de același semnal de intrare.

Pentru analiza acestui circuit și pentru a scoate în evidență comportamentul integrativ a circuitului s-a considerat că, semnalul de la intrare poate să aibă diferite forme: semnal constant pozitiv sau negativ, semnal sinusoidal sau triunghiular. Un model Matlab bazat pe ecuația de funcționare a circuitului este prezentat în cele ce urmează.

### FISIER START

```
%valori initiale
A=1.5;
R=1e4;
C=1e-6;
T=0.01;
tip=1; % sinus
CI=0;
integrator_cu_A01(A,R,C,T,tip,CI);grafic_integrator1;
```

### FISIER Calcule

```
if strcmp(Opt,'Constant plus')==1
    %daca e selectat "Constant plus"
    tip=1;
    t1=0:T./100:T;
    nt1=length(t1);
    si=A.*ones(1,nt1);
end
%-----
if strcmp(Opt,'Constant minus')==1
    %daca e selectat "Constant minus"
    tip=2
    t1=0:T./100:T;
    nt1=length(t1);
    si=-A.*ones(1,nt1);
    end
%-----
if strcmp(Opt,'Sinusoidal')==1
    %daca e selectat "Sinusoidal"
    tip=3;
    t1=0:T./100:T; % timpul ode pas
    w=2.*pi./T;
    si=A.*sin(w.*t1);
    end
%-----
if strcmp(Opt,'Triunghiular')==1
    %daca e selectat "Triunghiular"
    tip=4;
    t1=0:T./100:T; % timpul ode pas
    w=2.*pi./T;
    si=2.*A.*asin(sin(w.*t1));
end
%=====
w=2*pi./T;
t0=0;
tf=T;
[t,y]=ode23(@integrare,[t0,tf],[CI],[],A,w,tip);
```



```

nt=length(t);
uo=-A.*y./(R.*C);           %A./(w.*R.*C);
Va1=15;
Va2=-15;
k=1;
for k=1:nt
    uo(k)=Limitare_A0(uo(k),Va1,Va2);
end

```

%=====

FISIER INTEGRALA

```

function dy=integrare(t,y,A,w,tip)
dy=zeros(1,1);
switch tip
case 1 % constant plus
    dy=A;
case 2 % constant minus
    dy=-A;
case 3 % sinus
    dy=A.*sin(w.*t);
case 4 % tiunghi
    dy=2.*A.*asin(sin(w.*t))./pi;
end

```

Circuit de integrare cu amplificator operational

Parametrii circuitului		Semnal de intrare	
R [ohm]	10000	T [s]	0.01
C [F]	1e-06	A [V]	1.5
Ci [V]	0	Tipul semnalului <input type="radio"/> Constant plus <input type="radio"/> Constant minus <input checked="" type="radio"/> Sinusoidal <input type="radio"/> Triunghiular	

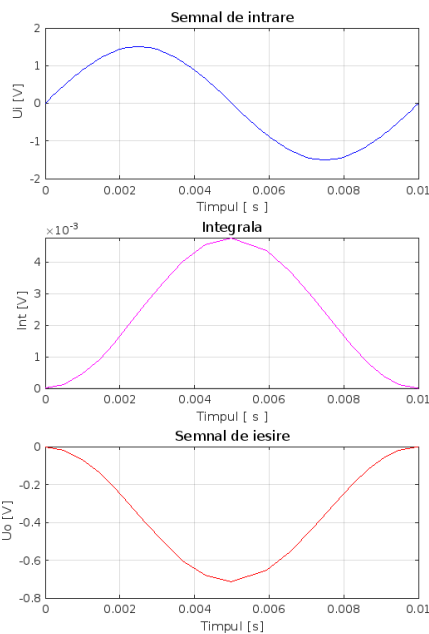


Figura 3.16 Simulare AO integrator sinus

Schema de principiu a unui circuit de derivare cu AO este ilustrată în figura 3.17 unde la fel ca în cazul circuitului de integrare avem o reacție negativă.

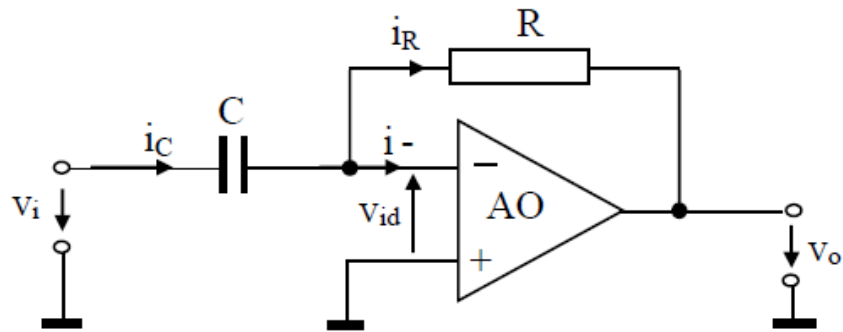


Figura 3.17 Schema integrator

$$\left. \begin{array}{l} v_- = v_+ = 0 \\ i_- = i_+ = 0 \Rightarrow i_R(t) = i_C(t) \\ i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = C \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_R(t) = -\frac{v_o(t)}{R} \end{array} \right\} \Rightarrow C \frac{dv_i(t)}{dt} = -\frac{v_o(t)}{R} \Leftrightarrow v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

3.24

Dacă notăm cu  $RC=T_d$  constanta de timp de derivare, expresia tensiunii de ieșire devine de forma:

$$v_o(t) = -T_d \frac{dv_i(t)}{dt} \quad 3.25$$

```
%-----
%  fisierul de start
%-----
%valori initiale
A=1.5;
R=1e4;
C=1e-6;
T=0.01;
R1=2e3;
%afisarea ferestrei si a graficelor
fereastră(R,C,A,T,R1);
graphic
```

```
%-----  
%  fisierul de calcul  
%-----  
if strcmp(Opt,'Monopolar') + strcmp(Opt,'Bipolar')==1  
    %daca e selectat "Monopolar" sau "Bipolar"  
    subplot(3,2,4);  
    %graficul tensiunii de iesire  
    cla;  
    for i=1:3  
        tspan=[(i-1).*T, (2*i-1).*T./2];  
        Yo=A;  
        [t,y]=ode23(@functia, tspan, Yo,[], R, C);  
        plot(t,y);  
        hold on;  
        tspan=[(2*i-1).*T./2, i.*T];  
        Yo=-A;  
        [t,y]=ode23(@functia, tspan, Yo, [], R, C);  
        plot(t,y);  
        hold on;  
    end  
    grid on;  
    title('Semnal de iesire','FontSize',12,'FontWeight','demi');  
    ylabel('Tensiunea de iesire Uout [V]');  
    xlabel('Timpul [s]');  
    hold off;  
    if strcmp(Opt,'Monopolar')==1  
        %daca e selectat "Monopolar"  
        subplot(3,2,2);  
        %graficul tensiunii de intrare  
        cla;  
        t=0:T./100:3.*T;  
        w=2*pi./T;  
        f=A.*sign(sin(w.*t));  
        f1=(f+A)./2;  
        plot(t,f1,'-r');  
        grid on;  
        title('Semnal de intrare - dreptunghiular,  
monopolar','FontSize',12,'FontWeight','demi');  
        ylabel('Tensiunea de intrare [V]');  
        xlabel('Timpul [s]');  
        hold off;  
    end  
    if strcmp(Opt,'Bipolar')==1  
        %daca e selectat "Bipolar"  
        subplot(3,2,2);  
        %graficul tensiunii de intrare  
        cla;  
        t=0:T./100:3.*T;
```

```

        w=2*pi.*1./T;
        f=A.*sign(sin(w.*t));
        plot(t,f,'-r');
        grid on;
        title('Semnal de intrare - dreptunghiular,
bipolar','FontSize',12,'FontWeight','demi');
        ylabel('Tensiunea de intrare [V]');
        xlabel('Timpul [s]');
        hold off;
    end
    if strcmp(Opt,'Sinusoidal')==1
        %daca e selectat "Sinusoidal"
        w=2*pi./T;
        %tens de intrare
        subplot(3,2,2);
        cla;
        t=0:T./100:3.*T;
        f=A.*sin(w.*t);
        plot(t,f,'-r');
        grid on;
        %hold off;
        title('Semnal de intrare -
sinusoidal','FontSize',12,'FontWeight','demi');
        ylabel('Tensiunea de intrare [V]');
        xlabel('Timpul [s]');

        subplot(3,2,4);
        %tens de iesire
        cla;
        %t=0:0.1:3.*T;
        y=A.*w.*cos(w.*t);
        plot(t,y);
        grid on;
        hold off;
        title('Semnal de iesire','FontSize',12,'FontWeight','demi');
        ylabel('Tensiunea de iesire Uout [V]');
        xlabel('Timpul [s]');
    end
    if strcmp(Opt,'Triunghiular')==1
        %daca e selectat "Triunghiular"
        subplot(3,2,2);
        %tens de intrare
        cla;
        t=0:T./100:3.*T;
        w=2*pi./T;
        f=(2.*A./pi).*asin(sin(w.*t));
        plot(t,f,'-r');
        %hold off;

```

```
grid on;
title('Semnal de intrare -
triunghiular', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'demi');
ylabel('Tensiunea de intrare [V]');
xlabel('Timpul [s]');
subplot(3,2,4);
%tens de iesire
cla;
t=0:T./100:3.*T;
w=2*pi.*1./T;
f=(2.*A./pi).*asin(sin(w.*t));
dfdt=diff(f)./diff(t);
t=0:T./100:3.*T-T./100;
plot(t,dfdt);
hold off;
grid on;
title('Semnal de iesire', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'demi');
ylabel('Tensiunea de iesire Uout [V]');
xlabel('Timpul [s]');
end
%daca circuitul nu-l contine pe R1
if CB==0
    %afisarea schemei circuitului
    subplot(3,2,5);
    Img1=imread('Circ1.bmp');
    image(Img1);
    axis off;
    set(gca, 'Position', [0.02 0.05 0.45 0.3]);
    %graficul lui Xc in functie de frecventa
    subplot(3,2,6);
    cla;
    fmin=0.1./T; fmax=10./T; pas=(fmax-fmin)./100;
    frecv=fmin:pas:fmax;
    Xc=1./(2.*pi.*frecv.*C);
    semilogx(frecv, Xc, 'g');
    title('Impedanta de intrare
Xc', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'demi');
    ylabel('Xc [ ohm ]');
    xlabel('Frecventa f [Hz]');
    hold off;
end
%daca circuitul il contine pe R1
if CB==1
    %afisarea schemei circuitului
    subplot(3,2,5);
    Img2=imread('Circ2.bmp');
    image(Img2);
    axis off;
```

```

set(gca, 'Position', [0.005 0.05 0.52 0.3]);
%graficul lui Xc si Z in functie de frecventa
subplot(3,2,6);
cla;
%Xc scade pana la R1
fo=1./(2.*pi.*R1.*C);
fmin=0.1./T;fmax=10./T;pas=(fmax-fmin)./100;
frecv=fmin:pas:fmax;
nf=length(frecv);
R2=R1.*ones(1,nf);
Xc=1./(2.*pi.*frecv.*C);
%fo=1./(2.*pi.*R1.*1e3.*C.*1e-6);
foy=1./(2.*pi.*fo.*C);
Z=sqrt((R1).^2 + Xc.^2);
semilogx(frecv,Xc,'g',frecv,Z,'b',frecv,R2,'r',fo,foy,'k*');
legend('Xc','Z','R1');
text(120,R1,'\leftarrow R1');
text(fo,foy./2,'fo','FontSize',12,'FontWeight','demi');
title('Impedantele Xc si Z cu
R1','FontSize',12,'FontWeight','demi');
ylabel('Xc, Z');
xlabel(cat(2,'Frecventa f [Hz]      fo = ',num2str(fo)));
hold off;
end
%-----
% definirea functiei care trebuie integrata
%-----
function dy=functia(t,y,R,C)
dy=zeros(1,1);
dy=-y./(R.*C);

```

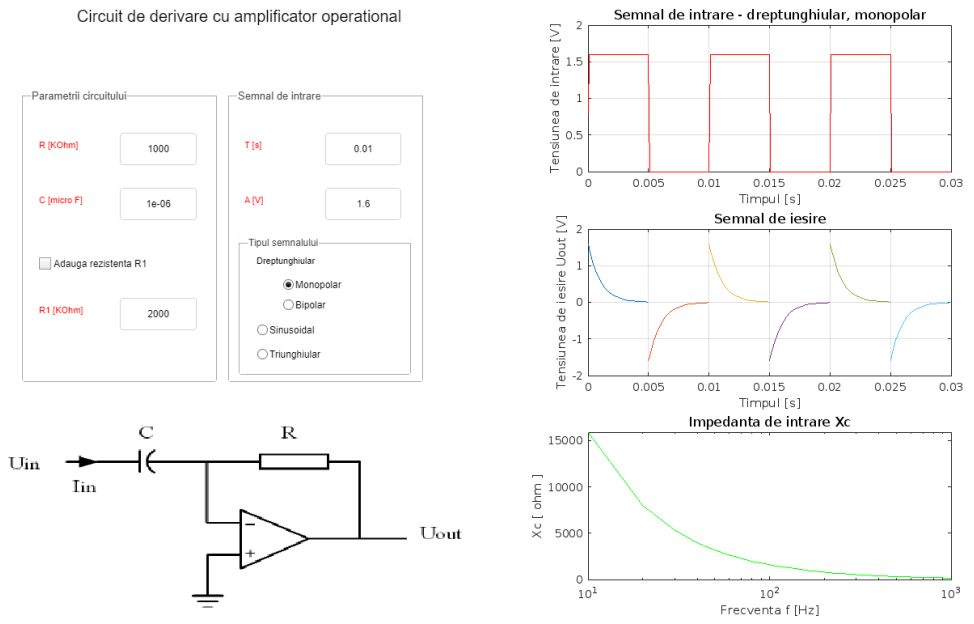


Figura 3.18 Simulare AO derivator monopolar

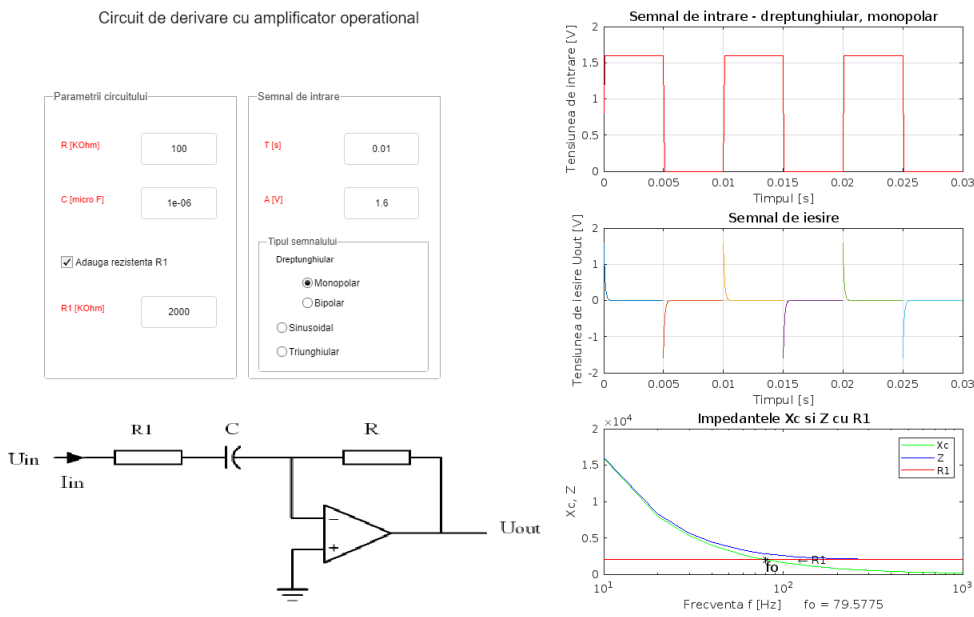


Figura 3.19 Simulare AO derivator monopolar modificare R și adăugare R1

### 3.6 Circuite astabil cu AO

Circuitul astabil sau multivibrator este un generator de impulsuri periodice dreptunghiulare. Funcționarea acestuia nu este comandată de un semnal de intrare ci funcționează pe baza unei tensiuni autogenerate. În figura 3.20 este prezentată schema de principiu a unui astfel de generator de semnal, iar în figura 3.21 formele de undă caracteristice.

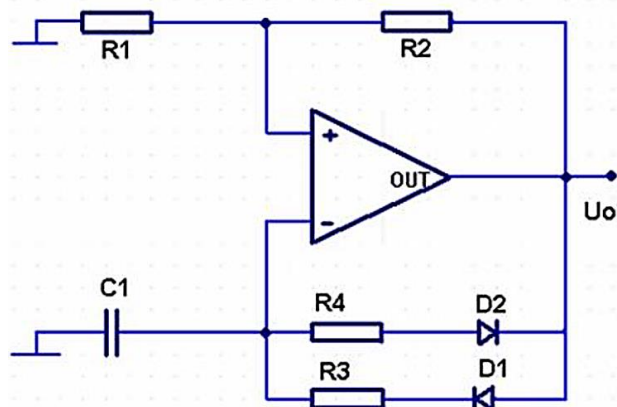


Figura 3.20 Circuit astabil (multivibrator) cu AO

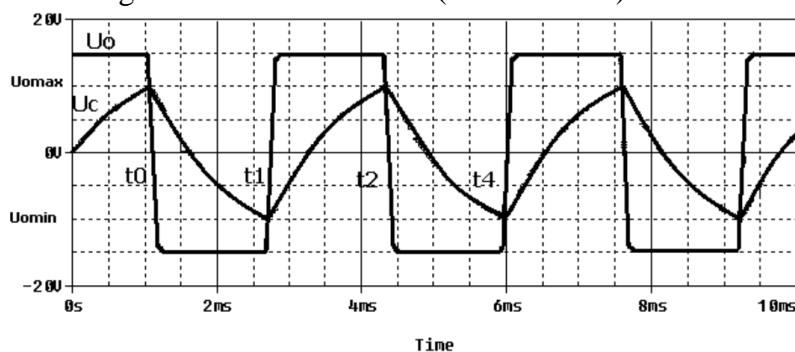


Figura 3.21 Formele de undă caracteristice

Schimbarea stării (bascularea) se bazează pe compararea tensiunii obținute pe divizorul R1-R2 cu tensiunea de pe condensatorul C1 din circuitul de integrare R-C1(R3 sau R4) , comparare realizată de AO cu reacție pozitivă. Sa considerăm că, la momentul  $t < t_0$ , sursa de alimentare simetrică a AO este decuplată,  $E = -E = 0$ . Condensatorul C1 este descărcat,  $U_{c1} = 0$ . La momentul  $t_0$  se cuplează sursa de alimentare a AO. Tensiunea de ieșire a acestuia,  $U_o$  suferă o variație spre valori pozitive sau negative (în mod aleator). Considerăm ca are loc o creștere pozitivă a lui  $U_o$ . Această creștere este



amplificată în avalanșă și, drept urmare, practic la momentul  $t_0$ ,  $U_0$  crește în salt la valoarea  $U_{omax}$ . Începând din acest moment, condensatorul  $C_1$  se încarcă prin  $R_3$  până la tensiunea  $U_{omax}$ , cu constanta de timp  $\tau_1 = R_3C_1$ . Tensiunea  $U_c$ , care crește exponențial, se aplică la intrarea inversoare a AO, la intrarea neinversoare, prin circuitul de reacție pozitivă aplicându-se tensiunea:

$$U_p = U_{omax} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad 3.26$$

La momentul  $t_1$ , tensiunea  $U_c$  pe condensator atinge valoarea  $U_p$ , comparatorul comută printr-un proces regenerativ care se termină atunci când  $U_0 = -U_{omax}$ . Din momentul  $t_1$ , începe încărcarea cu polaritate inversă a condensatorului prin rezistorul  $R_4$ , cu constanta de încărcare  $\tau_2 = R_4C_1$ , până la tensiunea  $-U_0$ . Când  $t_1 < t < t_2$ , la intrarea neinversoare a AO avem:

$$U_p = U_{omin} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad 3.27$$

Condensatorul  $C_1$  nu se încarcă până la  $-U_{omax}$  pentru că, în momentul  $t_2$  tensiunea pe acesta atinge valoarea  $-U_p$  și, din nou, se produce comutarea regenerativă a comparatorului, când se stabilizează valoarea tensiunii  $U_0 = U_{omax}$ ,  $U_p = U_p$ . În acest moment, începe o nouă încărcare a condensatorului prin  $R_3$ , iar când  $U_c(t_3) = U_p$ , comparatorul comută din nou și procesul devine iterativ. Procesul stabilizat începe când  $t = t_1$  și se caracterizează prin modificarea tensiunii pe condensator de la valoarea  $U_p$  la  $-U_p$  și invers. Intervalul  $[t_2, t_3]$  determină durata impulsului  $\tau_i$ , durata pauzei fiind  $[t_1, t_2]$ . Determinarea acestor intervale se face analizând încărcarea condensatorului  $C_1$  de la sursa  $E = U_{omax}$ , cu constanta de timp  $t_1 = R_3C_1$ . Procesul începe când  $U_c(0) = -U_0$  (momentul  $t_2$ ) și se termina când  $U_c(\tau_i) = U_p$ .

Ecuatia diferențială ce caracterizează circuitul RC este:

$$U_{omax} = RC \frac{dU_c}{dt} + U_c \quad 3.28$$

Cu soluția:

$$U_c(t) = U_c(\infty) - [U_c(\infty) - U_c(0)] e^{-\frac{t}{RC}} \quad 3.29$$

În regim permanent putem scrie că:

$$U_c(t) = U_{omax} - [U_{omax} - \alpha U_{omin}] e^{-\frac{t}{R_4C}}, \text{ la încărcare} \quad 3.30$$

$$U_c(t) = U_{omin} - [U_{omin} - \alpha U_{omax}] e^{-\frac{t}{R_3C}}, \text{ la descărcare}$$

Durata stărilor se poate exprima ca fiind:

$$T0 = R3Cln \frac{1}{1 - \alpha} \quad 3.31$$

$$T1 = R4Cln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \quad 3.32$$

$$T0 = R3Cln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \quad 3.33$$

#### FISIERUL START

```
clear all;
close all;
%ELEMENELE DE CIRCUIT
R1 = 1000;
R2 = 1000;
R3 = 200;
R4 = 200;
C1 = 4.7; %micro Farazi
E = 12;
n = 3;
proba(R1,R2,R3,R4,C1,E,n);
```

#### FISIERUL GRAFIC

```
function grafic(R1,R2,R3,R4,C1,E,n)
Uhi = (R1 / (R1 + R2)) * E;
Ulo = -1 * (R1 / (R1 + R2)) * E;
C = C1 / 1000000; %micro Farazi
t0 = R3 * C * log((R1 + R2) / R2);
t1 = R4 * C * log((2 * R1 + R2) / R2);
t2 = R3 * C * log((2 * R1 + R2) / R2);
T = t1 + t2;
%-----
subplot('Position',[0.2 0.1 0.75 0.32]);
ti = 0;
tf1 = t0;
tf2 = t0 + t1;
for k = 0 : (n-1)
    tspan = [ti tf1]; %timp incarcare(val initiala si val finala)
    U0 = Ulo;
    if (k==0)
        U0=0;
    end
    U0 = [U0; 0]; %cond initiale
    Uout = U0.';
    RC = R3*C;
    [t,U] = ode23(@ec_CBA, tspan, U0, [], RC, E);
    nt = length(t);
```

```

Uout = [Uout; U(2:nt,:)];
plot(t,Uout(:,1));
hold on;
grid on;
tspan = [tf1 tf2]; %timp incarcare(val initiala si val finala)
U0 = [Uhi; 0];
Uout = U0.';
RC=R4*C;
[t U] = ode23(@ec_CBA, tspan, U0, [], RC,-E);
nt = length(t);
Uout = [Uout; U(2:nt,:)];
plot(t,Uout(:,1),'r');hold on;
x=[ti tf1 tf1 tf2 tf2];
y=[E E -E -E E];
plot(x,y,'m');
hold on; %desen tens de iesire
x1 = [tf1];
y1 = [Uhi];
x2 = [tf2];
y2 = [Ulo];
plot(x1,y1,'*g',x2,y2,'*c');hold on; %desen pragde basculare
ti=tf2;
tf1=tf1+T;
tf2=tf2+T;
end
% -----
legend('Uc incarcare','Uc descarcare','Uo','U hi','U lo');
title('Comportarea in timp a circuitului astabil','FontSize',13);
ylabel([' Tensiunea [ Volti ] ']);
text(0,7.5,['Uhi = ',num2str(Uhi),
'],'HorizontalAlignment','right','FontSize',12);
text(0,0,['Ulo = ',num2str(Ulo),
'],'HorizontalAlignment','right','FontSize',12);
text(0,-7.5,['D = ',num2str(100*t2/T),'%
'],'HorizontalAlignment','right','FontSize',12);
text(0,15,['Uo=(+/-)E =(+/-)',num2str(E),
'],'HorizontalAlignment','right','FontSize',12);
text(0,-15,['f = ',num2str(1/T), ' Hz
'],'HorizontalAlignment','right','FontSize',12);
text(0,-19,['Regim tranzitoriu = ', num2str(t0.*1000),'ms Perioada
= ',num2str(T.*1000),' ms Timpul in secunde'],
'VerticalAlignment','top','HorizontalAlignment','left','FontSize',12);
function dU = ec_CBA(t,U,RC,e)
dU =(e / RC)-(U / RC);

```

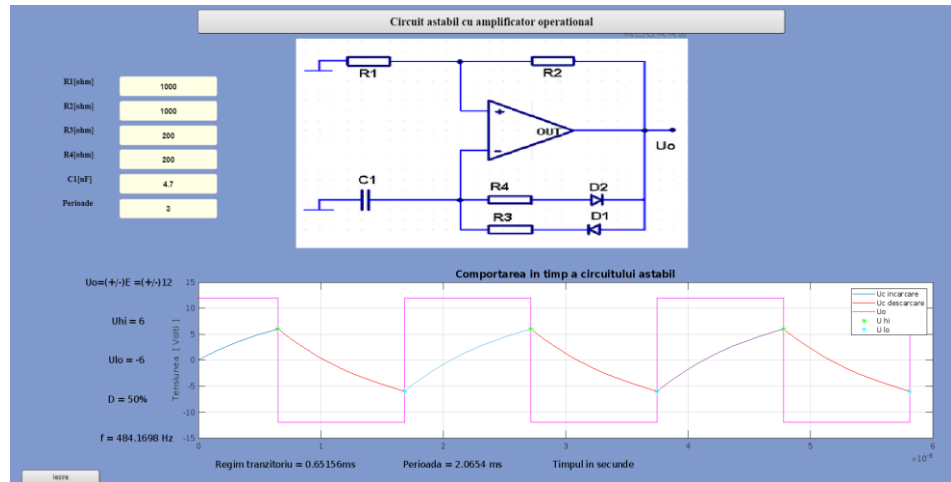


Figura 3.22 simulare astabil (multivibrator) cu AO 50% duty cycle

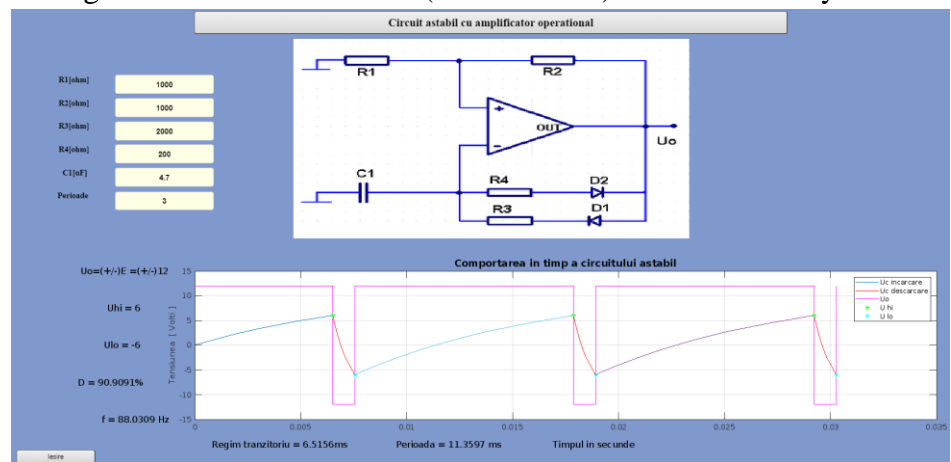


Figura 3.23 simulare astabil (multivibrator) cu AO 90% duty cycle

În figurile 3.22 și 3.23 este prezentată o platforma Matlab de simulare a acestor circuite cu AO realizată pe baza liniilor de cod de mai sus. Se poate observa în figurile de mai sus că aceste linii de cod permit afișarea formelor de undă caracteristice circuitului precum și returnarea unor calcule realizate asupra circuitului cum ar fi, factorul de umplere, frecvența semnalului, pragurile de basculare, ori durata regimului tranzitoriu. Partea de interfațare cu utilizatorul rămâne la latitudinea dezvoltatorului dar în aceste imagini este figurată și o interfață grafică din care utilizatorul poate să controleze parametrii circuitului ca: valorile rezistențelor, valoarea condensatorului ori tensiunea de alimentare a amplificatorului operațional.

## 4 Convertoare în comutație DC-DC

Orice circuit sau aparat electronic, are nevoie pentru funcționare de o sursă de alimentare. Pentru circuite sau echipamente de mică putere este suficientă, de multe ori o baterie, dar exceptând consumatorii alimentați în curent continuu de mare putere (motoare electrice DC, etc.) majoritatea echipamentelor electronice utilizează surse de tensiune continuă de ordinul zecilor de volți și curenți de ordinul amperilor sau în unele cazuri zeci de amperi. Astfel, putem spune că, în ultimele decenii convertoarele dc-dc în comutație câștigă tot mai mult teren în diverse domenii (surse de putere, comunicații mobile, echipamente de calcul mobile, domeniul auto, aplicații spațiale, sisteme pentru utilizarea energiei solare, etc.) datorită faptului că prezintă un gabarit redus și o eficiență de 85%-97%. Principiul de funcționare a acestor convertoare constă în acumularea energiei furnizată de sursa de curent continuu într-un anumit interval de timp și transferul acesteia către sarcină în alt interval de timp.

Există o varietate de topologii care stau la baza proiectării unor astfel de convertoare în comutație, dar o clasificare simplă a acestora se poate face în funcție de principiul de funcționare ce definește comportamentul acestora. Astfel putem identifica topologii care oferă o separare galvanică a sarcinii față de sursa de alimentare cum ar fi topologiile forward, flyback, push-pull sau topologii fără o separare galvanică cum ar fi buck, boost, buck-boost. Dintre aceste tipurile de convertoare dc-dc, doar convertoarele buck și boost reprezintă configurații de bază, celelalte convertoare fiind combinații a acestor topologii.

Aceste convertoare se caracterizează prin faptul că modifică valoarea tensiunii de la intrarea lor în tensiuni continue de valori mai mici sau mai mari sau eventual reglabile într-o scară dată. Ca și principiu de funcționare, convertoarele în comutație lucrează pe principiul conectării și deconectării sarcinii la sursa de alimentare prin intermediul elementului de putere, funcționând atât în regim de curent neîntrerupt (CCM- continuous conduction mode) cât și în regim de curent întrerupt (DCM – discontinuous conduction mode).

Regimul CCM este caracterizat de faptul că, curentul ce trece prin bobina de lucru a convertorului nu atinge valoarea zero pe o perioadă de comutație a tranzistorului, iar tensiunea de ieșire este independentă de curentul de sarcină.

Modul de funcționare DCM al unui convertor dc-dc apare în momentul în care, în circuit, apar condițiile ca unul din comutatoare (tranzistor sau diodă) să se blocheze în mod natural. De regulă apare atunci când riplul curentului prin bobină are valori mari în timpul funcționării cu o sarcină mică și comutatoarele convertorului sunt unidirecționale în curent (curentul prin comutator tinde să devină negativ). Astfel pentru o durată scurtă de timp dintr-o perioadă de comutație, curentul prin bobină atinge valoarea zero și rămâne la această valoare până în următoarea perioadă de comutație când unul din cele două comutatoare se deschide din nou. În acest caz particular de funcționare a convertoarelor, proprietățile acestora se modifică radical. Definind funcția de transfer în tensiune ca  $M = \frac{U_S}{E}$ , unde  $U_S$  este tensiunea de ieșire iar  $E$  este tensiunea de alimentare a convertorului, putem spune că aceasta devine dependentă de sarcină iar impedanța circuitului de ieșire este mult ridicată.

Deși funcționare DCM este un caz particular datorat în general unei dimensionări atipice a bobinei convertorului, în practică se proiectează surse în comutație, care să funcționeze în acest mod din cauza ușurinței cu care se poate controla convertorul.

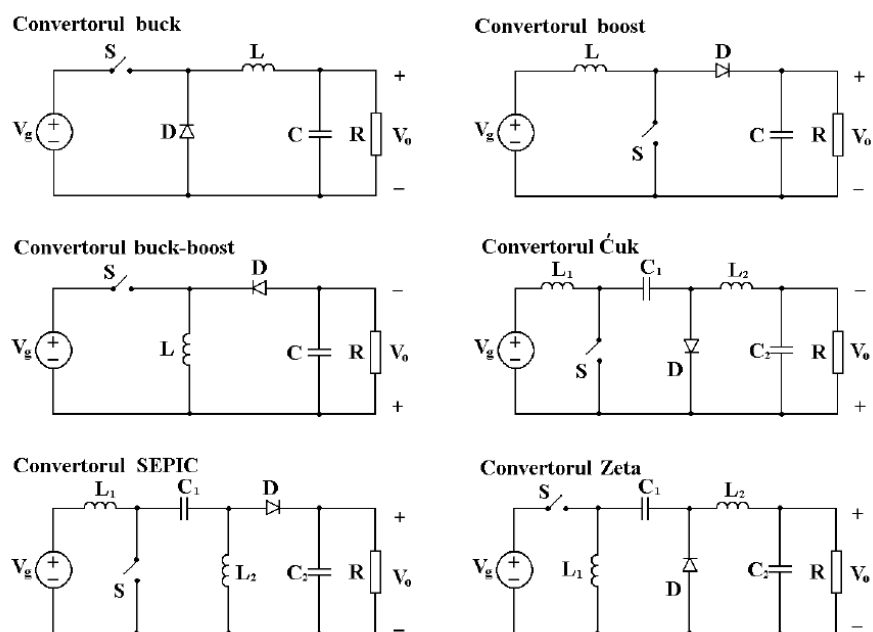


Figura 4.1 Topologii de bază ale convertoarelor dc-dc

### 4.1 Convertorul Buck

Convertorul coborâtor (Buck), se regăsește integrat pe majoritatea aparatelor electronice moderne, caracterizat fiind de faptul că tensiunea continuă furnizată la ieșire, este mai mică decât tensiunea continuă aplicată la bornele de intrare a convertorului. Topologia acestui convertor este una simplă, ce oferă o eficiență ridicată în majoritatea aplicațiilor în care este folosit. Schema de principiu a convertor Buck este prezentată în figura 4.2, iar formele de undă caracteristice curentului și tensiunii prin bobina L în regim CCM și DCM sunt de asemenea reprezentate.

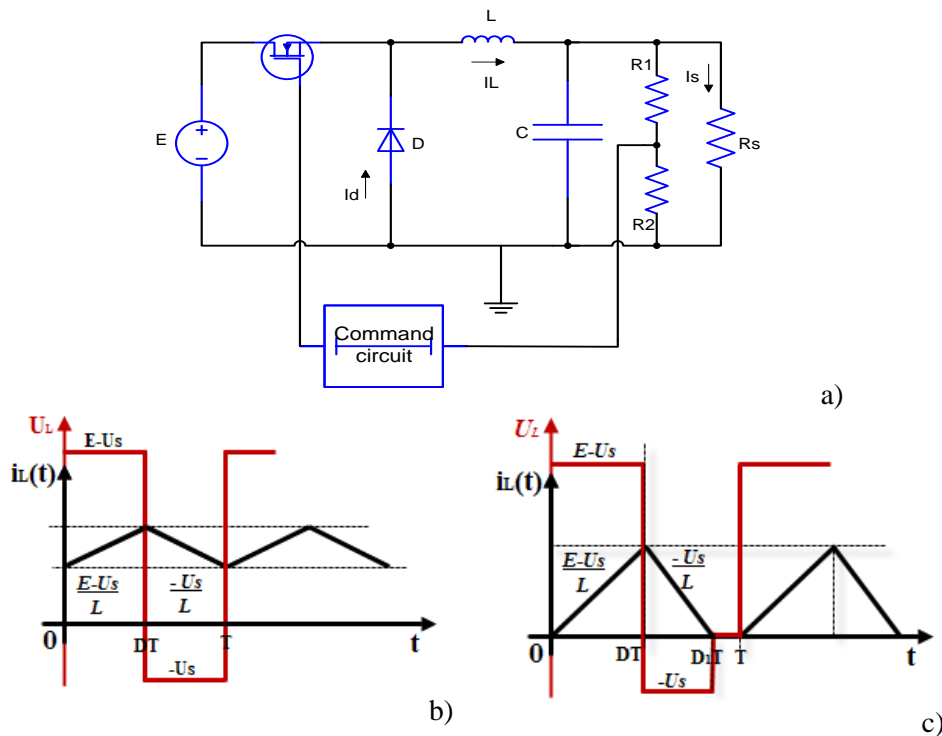


Figura 4. 2 a) Topologia de principiu a convertorului Buck; b) forma curentului în regim CCM de funcționare; c) forma curentului în regim DCM de funcționare

La intrarea convertorului se aplică o tensiune continuă  $E$  și se asigură la ieșirea pe rezistența de sarcină  $R_s$  o tensiune continuă  $U_s$  în condițiile în care tensiunea de intrare și sarcina variază între anumite limite. O analiză matematică asupra convertorului se poate realiza în funcție de stările de conducție și blocare a celor două comutatoare. Dacă ne raportăm la modul CCM în interval de conducție a tranzistorului  $[0-DT]$ , unde cu  $D$  s-a notat factorul de umplere a semnalului de comandă (duty-cycle), tensiunea pe

bobină este dată de relația (4.1), iar curentul crește liniar cu o panta dată de relația (4.2).

$$U_L = E - U_s = L \cdot \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = L \cdot \frac{I_{Lmax} - I_{Lmin}}{T_C} = L \cdot \frac{I_{Lmax} - I_{Lmin}}{D \cdot T} \quad 4.34$$

$$i_L = \frac{E - U_s}{L} \quad 4.354$$

La momentul de timp  $DT$  tranzistorul este comandat să se blocheze. Deoarece curentul prin bobină nu poate cădea instant la zero, dioda intră în conducție pe intervalul de timp  $[DT-T]$ , interval în care tensiunea pe bobină este inversul tensiunii de sarcină iar curentul prin aceasta scade cu o pantă dată de relația (4.4).

$$U_L = -U_s = -L \cdot \frac{\Delta i_L}{dt} = -L \cdot \frac{I_{Lmax} - I_{Lmin}}{T_B} = -L \frac{I_{Lmax} - I_{Lmin}}{(1-D) \cdot T} \quad 4.36$$

$$i_L = -\frac{U_s}{L} \quad 4.374$$

Cum valoarea medie a tensiunii pe bobină pe o perioadă de comutație este nulă, prin relația (4.5) se arată faptul că tensiunea de ieșire este direct proporțională cu factorul de umplere a semnalului de comandă a tranzistorului convertorului Buck.

$$\begin{aligned} U_L &= (E - U_s) \cdot D \cdot T + [-U_s \cdot (1 - D) \cdot T] = 0 \\ \Rightarrow E \cdot D \cdot T - U_s \cdot T &= 0 \Rightarrow U_s = D \cdot E \end{aligned} \quad 4.38$$

Curentul de sarcină  $i_s$  este media curentului prin bobina  $L$  a convertorului coborâtor. Astfel:  $I_s = \frac{I_{Lmax} + I_{Lmin}}{2} = \frac{U_s}{R_s}$

4.39

$$\text{Cum } \Delta i_L \text{ este: } \Delta i_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{E - U_s}{L} \cdot D \cdot T = -\frac{U_s}{L} (1 - D) \cdot T$$

4.40



Putem exprima valoarea curentului minim și maxim prin bobină din relațiile (4.6) și (4.7) ca fiind:

$$\begin{cases} \frac{I_{Lmin} + \frac{E-U_s}{L} \cdot D \cdot T + I_{Lmin}}{2} = \frac{U_s}{R_s} \Rightarrow 2 \cdot I_{Lmin} = 2 \cdot \frac{U_s}{R_s} - \frac{E-U_s}{L} \cdot D \cdot T \Rightarrow I_{Lmin} = \frac{U_s}{R_s} - \frac{E-U_s}{2 \cdot L} \cdot D \cdot T \\ I_{Lmax} = \frac{U_s}{R_s} + \frac{E-U_s}{2 \cdot L} \cdot D \cdot T \end{cases}$$

4.41

Pentru ca convertorul să lucreze în regim de conducție neîntrerupt, valoarea curentului minin prin bobină pe o perioadă de comutație nu trebuie să atingă valoarea zero. Astfel condiția ce trebuie îndeplinită pentru a asigura un regim CCM de funcționare a convertorului este prezentată în relația (4.9).

$$\begin{aligned} I_{Lmin} &= \frac{U_s}{R_s} - \frac{E-U_s}{2 \cdot L} \cdot D \cdot T \\ \frac{U_s}{R_s} &> \frac{E-U_s}{2 \cdot L} \cdot D \cdot T \Rightarrow \frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T} > \frac{E-U_s}{U_s} \cdot D \Rightarrow \frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T} > \frac{U_s(1-D)}{U_s} \Rightarrow \frac{2 \cdot L}{R_s T} > (1-D) \end{aligned}$$

4.42

Dacă ne raportăm la modul de lucru DCM prezentat în figura 4.2 c), în intervalul  $[D_1 T - T]$  valoarea curentului prin bobina L a convertorului este zero și se menține la această valoare până în următoarea perioadă de comutație. Acest fapt se datorează blocării pe cale naturală a diodei convertorului care ar trebui pe acest interval să conducă un curent negativ. Astfel valoarea curentului și tensiunii pe bobina L devin nule pe intervalul  $[D_1 T - T]$ . Valoarea curentului pe condensatorul C,  $i_c$ , este dată de relația:

$$\begin{cases} [0 - D_1 T] \rightarrow i_c = i_L - i_s \\ [D_1 T - T] \rightarrow i_c = -i_s; U_L = 0, i_L = 0 \end{cases}$$

4.43

Cum valoarea tensiunii pe bobină pe o perioadă de comutație este nulă putem scrie:

$$U_L = \frac{E-U_s}{L} \cdot D \cdot T + (-U_s \cdot D_1 \cdot T) + 0 \cdot T = 0 \Rightarrow U_s \cdot (D + D_1) = D \cdot E \Rightarrow U_s = E \frac{D}{D \cdot D_1}$$

4.44

Relația (4.11) arată faptul că tensiunea de ieșire în conducție întreruptă nu mai este dependentă doar de factorul de umplere  $D$  și de perioada de conducție a diodei. Această perioadă este o perioadă necunoscută și astfel o estimare a tensiunii de ieșire nu se poate realiza. Cunoscând valoarea maximă a curentului prin bobină și știind că valoarea curentului mediu absorbit de la sursa de alimentare este curentul prin tranzistor, dacă considerăm convertorul ideal, atunci din egalarea puterilor putem scrie:

$$\begin{cases} P_s = P_i \Rightarrow \frac{U_s^2}{R_s} = E \cdot I_{med}; I_{med} \cdot T = \frac{1}{2} I_{Lmax} \cdot D \cdot T \\ I_{Lmax} = \frac{E-U_s}{L} \cdot D \cdot T \Rightarrow I_{med} = \frac{E-U_s}{2 \cdot L} D^2 \cdot T \\ \frac{U_s^2}{R_s} = E \cdot D^2 T \cdot \frac{E-U_s}{2 \cdot L} \Rightarrow \frac{U_s^2}{E^2} = \frac{R \cdot T}{2 \cdot L} D^2 \left(1 - \frac{U_s}{E}\right) \end{cases} \quad 4.45$$

Folosind notația  $M = \frac{U_s}{E}$  pentru raportul de transfer în tensiune a convertorului în regim DCM de funcționare putem scrie astfel în urma unor calcule matematice raportul de transfer ca fiind:  $M = \frac{U_s}{E} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T}}{D^2}}}$  4.46

Relația (4.13) indică faptul că în regim DCM raportul de transfer în tensiune depinde pe lângă factorul de umplere  $D$  și de raportul  $\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T}$ , raport ce se regăsește și în relația (4.9), relație ce indică delimitarea cele două zone de lucru ale convertorului. O detaliere a variației raportului de transfer  $M$  în funcție de factorul de umplere  $D$  și de raportul  $\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T}$  se prezintă în figura următoare.

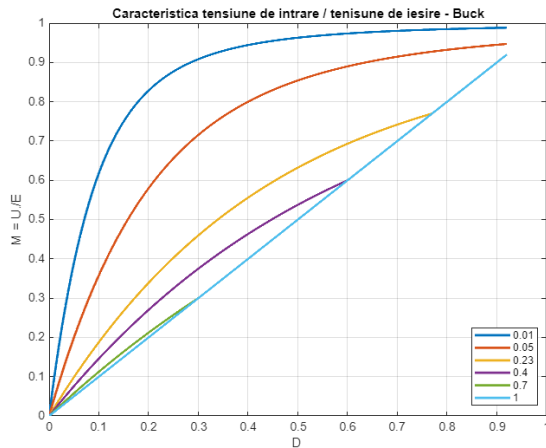


Figura 4.3 Caracteristica în tensiune a convertorului Buck în funcție de factorul de umplere D și raportul  $2L/RT$

Figura 4.3 prezintă caracteristica convertorului Buck în funcție de variația factorului de umplere D și al raportului  $\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T}$ . Se poate observa că pentru valori sub-unitare ale raportului convertorul lucrează în mod discontinuu, iar comanda acestuia este greoi de realizat.

MATLAB CODE

```
function buclaf_Bu_Bo2
D=0:0.0001:0.92;
y=0;
n=length(D);
x=[1 5 23 40 70 100];
for k=1:n,
    for j=1:6,
        a=0.01*x(j);
        if a>=(1-D(k))
            y(k,j)=D(k);
        else
            y(k,j)=2/(1+sqrt(1+(4*a./(D(k).^2))));
        end
    end
end
end
a=(1-D).^2;
z=D./(1-D);
plot(D,y(:,1:6), 'linewidth',2);grid on;
title('Caracteristica tensiune de intrare / tensiune de iesire
- Buck');
legend(num2str(x(1)*0.01),num2str(x(2)*0.01),num2str(x(3)*0.01),num
2str(x(4)*0.01),num2str(x(5)*0.01),num2str(x(6)*0.01), 'Location', 'B
est')
```

```
xlabel('D ');
ylabel('M = U./E');
```

## 4.2 Convertorul Boost

Convertorul boost este cel mai utilizat pentru a obține la ieșirea sa o valoare a tensiunii medii mai mari decât tensiunea la care se alimentează. Schema de principiu a convertorului Boost este prezentată în figura alăturată.

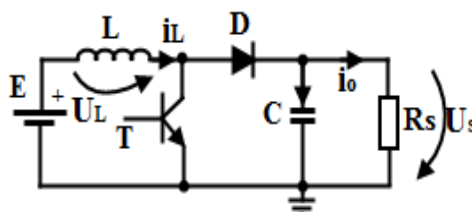


Figura 4. 1 Schema de principiu a convertorului Boost

Analizând convertorul în regim neîntrerupt și staționar de funcționare, valoarea tensiunii și valoarea curentului de la sfârșitul unui interval de funcționare trebuie să fie egale cu valorile de la începutul intervalului. Formele de undă ale curentului prin bobina L și ale tensiunii pe condensatorul C caracteristice convertorului boost în regim de funcționare staționar sunt prezentate în figura 4.5.

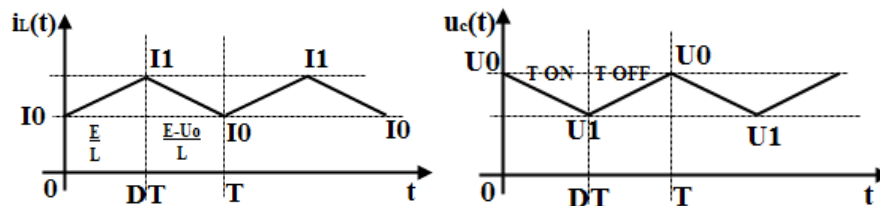


Figura 4. 5 Formele de undă caracteristice convertorului Boost în regim staționar

Pe intervalul  $[0, DT]$  tranzistorul este închis, tensiunea de intrare este aplicată direct inductanței  $L$ , determinând prin aceasta un curent liniar crescător, ceea ce duce la acumularea unei energii în inductanță. Variațiile curentului prin bobină și a tensiunii pe condensator se exprimă ca:

$$\begin{cases} i_L = I_0 + \frac{E}{L} \cdot t \\ u_C(t) = U_0 \cdot e^{-2 \cdot a \cdot t} \end{cases} \quad 4.47$$

, unde  $a$  este o constantă dată de:  $a = \frac{1}{2 \cdot R_s \cdot C}$

La sfârșitul acestui interval, similar cu sfârșitul perioadei de conducție a tranzistorului valorile curentului și a tensiunii vor fi date de relațiile:

$$\begin{cases} i_L = I_0 + \frac{E}{L} \cdot D \cdot T \\ u_C(t) = U_0 \cdot e^{-2 \cdot a \cdot D \cdot T} \end{cases} \quad 4.48$$

Pe intervalul  $[DT, T]$ , tranzistorul este deschis, iar variația curentului prin bobină și tensiunea pe condensator este dată de relațiile:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{E - u_C}{L} \\ \frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C} \left( i - \frac{u_C}{R_s} \right) \end{cases} \quad 4.49$$

Derivând cea de-a doua ecuație se obține:

$$\frac{du_C^2}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{di_L}{dt} - \frac{du_C}{dt} \cdot \frac{1}{R_s \cdot C} \quad 4.50$$

Înlocuind  $\frac{di_L}{dt}$  din ultima ecuație se obține pentru (4.17) o formă de ordinul 2 a ecuației:

$$\frac{du_C^2}{dt} = -\frac{1}{R_s \cdot C} \cdot \frac{du_C}{dt} - \frac{u_C}{L \cdot C} + \frac{E}{L \cdot C} \quad 4.51$$

$$\frac{du_C^2}{dt} + \frac{du_C}{dt} \cdot \frac{1}{R_s \cdot C} + \frac{u_C}{L \cdot C} = \frac{E}{L \cdot C} \quad | \cdot LC \quad 4.52$$

$$L \cdot C \frac{du_C^2}{dt} + \frac{L}{R_s} \cdot \frac{du_C}{dt} + u_C = E \quad 4.53$$

Ecuația curentului se deduce în mod analog cu ecuația tensiunii și este dată de relația:

$$L \cdot C \frac{di_L^2}{dt} + \frac{L}{R_s} \cdot \frac{di_L}{dt} + i_L = 0 \quad 4.54$$

Dacă notăm  $p = \frac{di_L}{dt}$  și rescriem ecuația 4.21, atunci aceasta devine:

$$L \cdot C \cdot p^2 + \frac{1}{R} \cdot p + 1 = 0 \quad 4.55$$

Soluțiile acestei ecuații sunt date de:

$$p_{1,2} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C} \quad 4.56$$

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot R \cdot C} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot R \cdot C}\right)^2 - \frac{1}{L \cdot C}} \quad 4.57$$

cum  $a = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C}$  și  $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$  putem rescrie soluțiile ecuației 4.21 ca fiind:

$$p_{1,2} = -a \pm \sqrt{a^2 - \omega_r^2} \quad 4.58$$

În funcție de soluțiile ecuației se poate purta o discuție ce duce la trei cazuri distincte:

Dacă  $a = \omega_r$  atunci  $p_1 = p_2 = -a$  iar valorile curenților și tensiunilor pe fiecare interval sunt de forma:

$$\begin{cases} I_1 = I_0 + \frac{E}{L} DT, & t \in (0, DT) \\ U_1 = U_0 \cdot e^{-2at}, & t \in (0, DT) \\ I_0 = \frac{E}{R} + (A_i + B_i t)e^{-2at}, & t \in (DT, T) \\ U_0 = E + (A_u + B_u t)e^{-2at}, & t \in (DT, T) \end{cases} \quad 4.59$$

Cazul al doilea este caracterizat de condiția  $a > \omega_r$ , ceea ce duce la  $p_{1,2} = -a \pm \omega_r$ .

Dacă  $a < \omega_r$  atunci  $p_{1,2} = -a \pm j\omega_r$  de unde rezultă valorile curenților și tensiunilor pe fiecare interval de forma:

$$\begin{cases} I_1 = I_0 + \frac{E}{L} \cdot D \cdot T, & t \in [0, DT] \\ U_1 = U_0 \cdot e^{-2aDT}, & t \in [0, DT] \quad \square \\ I_0 = \frac{E}{R} + [A_i \cos \omega (T - DT) + B_i \cos \omega (T - DT)] \cdot e^{-2a(T-DT)}, & t \in [DT, T] \quad \square \\ U_0 = E + [A_u \cos \omega (t - t_0) + B_u \cos \omega (t - t_0)] \cdot e^{-2a(T-DT)}, & t \in [DT, T] \quad \square \end{cases}$$

4.60

Coefficienții  $A_i, B_i, A_u, B_u$ , din relațiile (4.26), (4.27) sunt dați de:

$$\begin{cases} A_i = \left( I_1 - \frac{E}{R_s} \right) \\ B_i = \frac{\frac{E - U_1}{L} + a \cdot \left( I_1 - \frac{E}{R_s} \right)}{\omega_r} \\ A_u = (U_1 - E) \\ B_u = \frac{2 \cdot I_1 \cdot R_s - E - U_1}{\omega_r} \cdot a \end{cases} \quad 4.61$$

Cum în modul CCM valoarea medie a tensiunii pe bobină în timpul conducerii tranzistorului este egală cu valoarea medie pe durata de blocare, putem să determinăm valoarea tensiunii de sarcină exprimată în funcție de tensiunea de alimentare și factorul de umplere și raportul tensiune de ieșire tensiune de intrare ca fiind:

$$\begin{cases} E \cdot D \cdot T = (U_s - E) \cdot (1 - D) \cdot T \Rightarrow E = U_s \cdot (1 - D) \Rightarrow U_s = E \cdot \frac{1}{1 - D} \\ M = \frac{U_s}{E} = \frac{1}{1 - D} \end{cases}$$

4.62

Condiția ca convertorul să lucreze în regim neîntrerupt este ca valoarea curentului minim dată de relația:  $i \frac{U_s}{R_s \cdot (1-D)} \frac{E \cdot D \cdot T}{2 \cdot L} \geq I_{min}$  să fie mai mare ca 0.

Rezultă:  $\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T} \geq D \cdot (1 - D)^2$ . Pe baza ecuațiilor prezentate anterior se pot implementa platforme Matlab în calcul simbolic cu ajutorul cărora să se determine valorile curentului și a tensiunii în regim staționar.

În regim de conducerie întrerupt valoarea curentului prin bobina L a convertorului ajunge la zero. Astfel avem un al treilea interval de funcționare în care tensiunea pe bobină și curentul au valoarea zero.

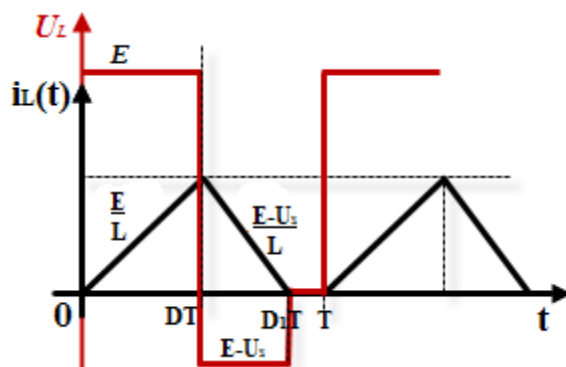


Figura 4. 6 Formele de undă ale curentului și tensiunii pe bobină în regim întrerupt de funcționare

Știind că pe perioada de conducție a tranzistorului tensiunea pe bobină  $U_L = E$  și curentul prin condensator este dat de  $i_C = -\frac{U_s}{R}$ , pe perioada de conducție a diodei tensiunea pe bobină este  $U_L = E - U_s$ , iar curentul prin condensator se poate exprima ca:  $i_C = i_L - i_s = i_L - \frac{U_s}{R_s}$  și că în intervalul  $[D_1T-T]$  curentul și tensiunea pe bobină sunt zero, putem exprima curentul prin condensator ca în cazul conducției tranzistorului. Cum valoarea componentei continue a tensiunii pe bobină într-o perioadă de comutație este nulă putem scrie astfel:

$$E \cdot D \cdot T + (E - U_s) \cdot D_1 \cdot T + 0 = 0 \Rightarrow E \cdot (D + D_1) = U_s \cdot D_1$$

$$\Rightarrow U_s = E \cdot \frac{D + D_1}{D_1}$$

4.63

Relația (4.30) ne indică valoarea tensiunii de ieșire în conducție întreruptă. Dacă perioada de conducție a tranzistorului este cunoscută, intervalul  $D_1T$ , ce reprezintă perioada de conducție a diodei, este necunoscut, ceea ce ne arată că relația (4.30) nu este suficientă pentru determinarea tensiunii de ieșire a convertorului Boost în regim neîntrerupt. Astfel pe intervalul de conducție al diodei curentul ce străbate dioda este egal cu suma curenților prin condensatorul de filtraj și sarcină. Dacă ne raportăm la un regim permanent de funcționare componenta continuă a curentului prin condensator este zero și atunci putem exprima curentul de sarcină ca fiind valoarea medie a curentul prin diodă pe o perioadă de comutație.



$$i_D \cdot T = \frac{1}{2} \cdot I_{max} \cdot D_1 \cdot T = \frac{U_s}{R_s} \Rightarrow \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{L} \cdot D \cdot T \cdot D_1 \cdot T = \frac{U_s}{R_s}$$

$$\Rightarrow \frac{E}{2L} D \cdot D_1 \cdot T = \frac{U_s}{R_s}$$

4.64

Din ultima egalitate a relației (4.31) și din relația (4.30) de unde  $D_1 = D \cdot \frac{E}{U_s - E}$  putem scrie tensiunea de ieșire a convertorului Boost în regim DCM de funcționare ca fiind:

$$U_s = \frac{R_s \cdot T}{2 \cdot L} \cdot D^2 \cdot E^2 \cdot \frac{1}{U_s - E} \Rightarrow U_s^2 - U_s \cdot E - E^2 \cdot D^2 \cdot \frac{T \cdot R_s}{2 \cdot L} \quad 4.65$$

Soluțiile ecuației de ordinul doi din relația (3.35) sunt date de:

$$U_{s1,2} = \frac{E \pm \sqrt{E^2 + 4 \cdot E^2 \cdot D^2 \cdot \frac{R_s T}{2L}}}{2} = E \frac{1 \pm \sqrt{1 + 4 \cdot D^2 \cdot \frac{R_s \cdot T}{2 \cdot L}}}{2} \quad 4.66$$

Cum tensiunea de ieșire a convertorului Boost trebuie să fie pozitivă, soluția tensiunii de ieșire este soluția a cărei numărător este supraunitar, de unde se poate deduce și funcția de transfer în tensiune de forma:

$$M = \frac{U_s}{E} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot D^2 \cdot \frac{R_s \cdot T}{2 \cdot L}}}{2} \quad 4.67$$

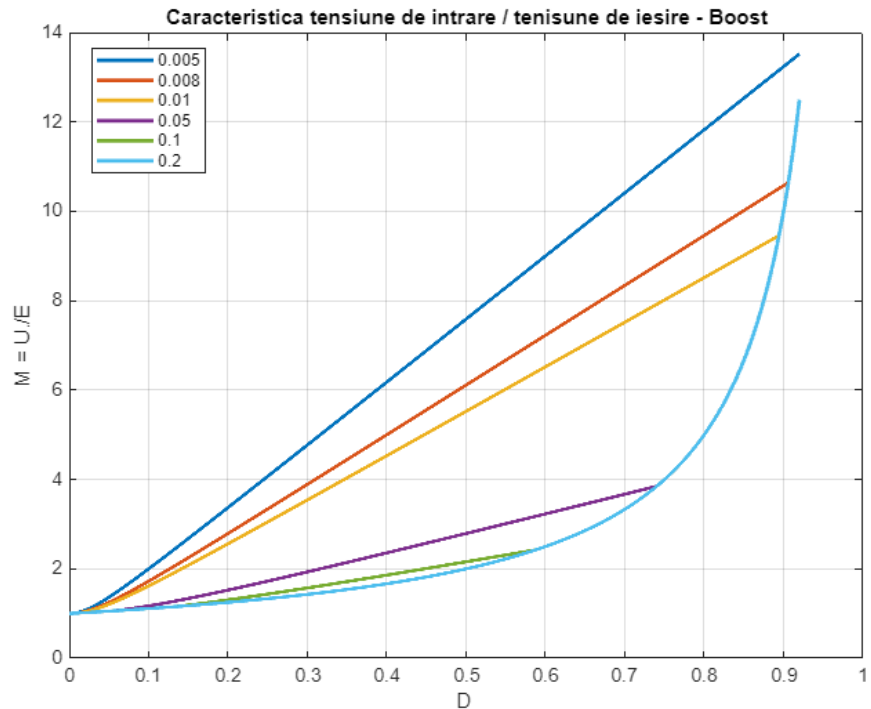


Figura 4. 7 Caracteristica detransfer în tensiune în funcție de factorul de umplere D și raportul  $\frac{2L}{RT}$

Figura 4.7 prezintă variația raportului de transfer în tensiune  $M$  în funcție de factorul de umplere al semnalului de comandă  $D$ , pentru diferite valori ale raportului  $\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T}$ . Se poate observa că valori mici ale acestui raportului conduc la o caracteristică liniară, dar spre deosebire de convertorul Buck această caracteristică liniară, prezintă un regim de funcționare DCM, regim în care controlul asupra convertorului este ușor de realizat.

O implementare a acestei caracteristici a convertorului cu ajutorul programului MATLAB este prezentată în liniile de cod următoare.

#### MATLAB CODE

```
function buclaf_Bu_Bo2
D=0:0.0001:0.92;
D1=0:0.05:0.92;
y=0;
n=length(D);
x=[.5 .8 1 5 10 20];
for k=1:n,
```

```

for j=1:6,
    a=0.01*x(j);
    if a>=D(k).*((1-D(k)).^2)
        y(k,j)=1./(1-D(k));
    else
        y(k,j)=(1+sqrt(1+(4*D(k).^2)./a))/2;
    end
end
end
a=(1-D).^2;
z=D./(1-D);
plot(D,y(:,1:6), 'linewidth',2);grid on;
title('Caracteristica tensiune de intrare / tensiune de iesire
- Boost');
legend(num2str(x(1)*0.01),num2str(x(2)*0.01),num2str(x(3)*0.01),num
2str(x(4)*0.01),num2str(x(5)*0.01),num2str(x(6)*0.01), 'Location', 'B
est')
xlabel('D ');
ylabel('M = U./E');

```

Se poate observa că valoarea minimă a raportului pentru care convertorul să funcționeze în mod CCM este în jurul valorii de 0,148. Acest aspect este evidențiat în figura următoare, unde cu albastru este reprezentată curba  $D \cdot (1 - D)^2$ , iar cu roșu s-a impus un raport  $\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T} = 0.1$ . Intersecțiile dreptei raportului egal cu 0.1 cu curba  $D \cdot (1 - D)^2$ , delimitează regimul DCM, regim în care convertorul se controlează ușor dar riplul curentului prin bobină este mare.

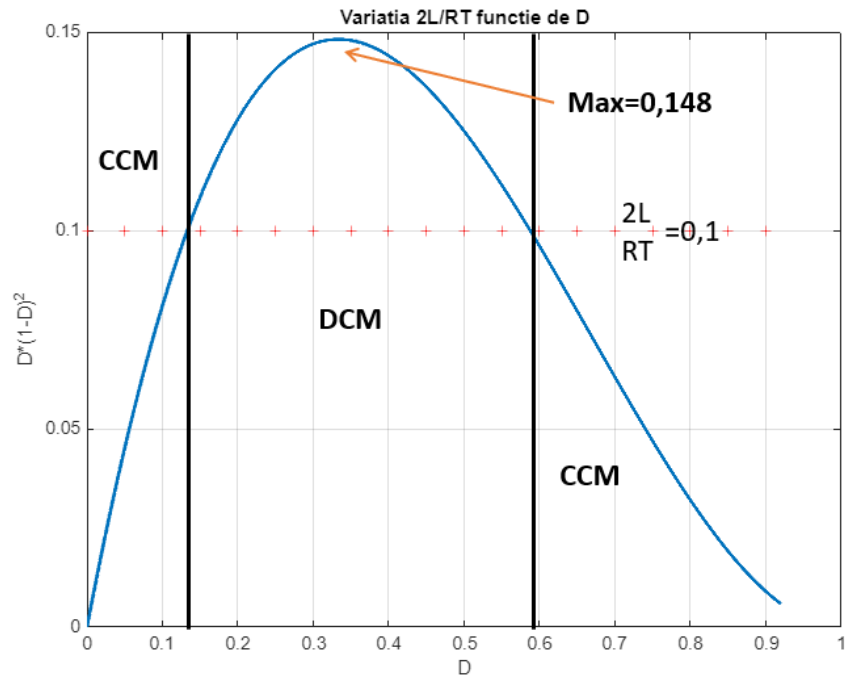


Figura 4. 8 Reprezentarea grafică a condiției regimurilor de lucru

#### MATLAB CODE

```
function buclaf_Bu_Bo2
D=0:0.0001:0.92;
D1=0:0.05:0.92;
y=0;
n=length(D);
for k=1:n,
    y(k)=D(k)*((1-D(k))^2);
end
a=(1-D).^2;
z=D./(1-D);
ss=0.1;
plot(D,y,'linewidth',2); grid on; hold on;
plot(D1,ss,'r+');
title('Variatia 2L/RT functie de D')
xlabel('D')
ylabel('D*(1-D)^2')
end
```

### 4.3 Convertorul Buck-Boost

Convertorul Buck-Boost se caracterizează prin faptul că produce la ieșire o tensiune de polaritate inversă tensiunii de intrare, cu particularitatea că valoarea absolută a tensiunii de ieșire poate fi mai mare sau mai mică decât valoarea tensiunii de intrare. Schema de principiu a unui convertor Buck-Boost este prezentată în figura 4.9 și se poate obține prin conectarea în cascadă a unui convertor Buck și a unui convertor Boost. Formele de undă ale curentului și tensiunii pe bobina L, caracteristice celor două regimuri de funcționare sunt prezentate în figura 4.10.

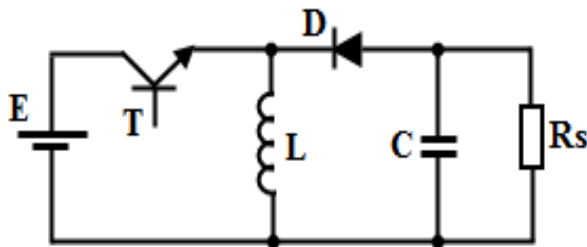


Figura 4.9. Schema de principiu a convertorului Buck-Boost

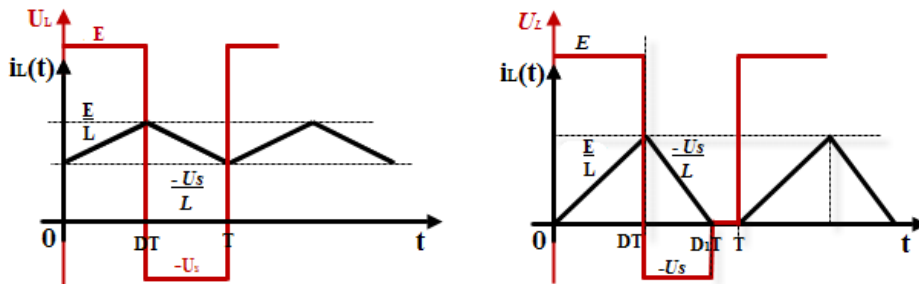


Figura 4.10. Formele de undă ale curentului și tensiunii pe bobina L caracteristice convertorului Buck-Boost

Pe durata de conducție a tranzistorului,  $[0-DT]$  dioda este blocată, inductanța  $L$  înmagazinează energie de la sursa de alimentare  $E$ , iar condensatorul se descarcă pe rezistența de sarcină. Pe durata blocării tranzistorului, datorită inversării polarității tensiunii de pe bobină, dioda intră în conducție, iar energia înmagazinată în bobină este cedată condensatorului de filtraj și circuitului de sarcină.

Astfel în regim CCM de funcționare valoarea medie a tensiunii pe bobina  $L$  a convertorului este nulă. Astfel putem exprima tensiunea la bornele de ieșire ale convertorului și raportul de transfer în tensiune ca fiind:

$$\begin{cases} U_L = E \cdot D \cdot T - U_s \cdot (1 - D) \cdot T = 0 \Rightarrow U_s = E \cdot \frac{D}{1 - D} \\ M = \frac{U_s}{E} = \frac{D}{1 - D} \end{cases} \quad 4.68$$

Variația curentului prin bobină  $\Delta i_L = I_{max} - I_{min} = \frac{E \cdot D \cdot T}{L}$ , iar cum curentul mediu prin diodă pe o perioadă de comutație este curentul de sarcină, se poate astfel exprima valoarea minimă a curentului și din condiția ca acesta să fie mai mare ca zero pentru regimul neîntrerupt, rezultă:

$$\begin{cases} I \frac{U_s}{R_s \cdot (1 - D)} \frac{E \cdot D \cdot T}{2 \cdot L} \quad I_{min} \\ \frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T} \geq (1 - D)^2 \end{cases} \quad 4.69$$

Dacă condiția dată de relația (3.36) nu este îndeplinită convertorul funcționează în regim întrerupt de funcționare, iar pe intervalul  $[D_1 T - T]$ , așa cum se arată și în figura 4.10, valoarea curentului și a tensiunii pe bobina L a convertorului sunt egale zero. Exprimarea tensiunii de sarcină în acest regim de funcționare este greu de realizat având 3 intervale de funcționare din care, cunoaștem, doar intervalul de timp în care tranzistorul conduce.

O analiză a convertorului în regim DCM se poate face plecând de la ipoteza unui convertor ideal în care puterea de intrare este egală cu puterea de ieșire. Astfel valoarea curentului mediu absorbit de convertor de la sursa de alimentare, este valoarea medie a curentului ce trece prin tranzistor. Valoarea tensiunii de ieșire precum și a factorului de transfer în tensiune sunt date în relația (3.37).

$$\begin{cases} I_{med} \cdot T = \frac{1}{2} \cdot I_{max} \cdot D \cdot T = \frac{E \cdot D^2 \cdot T}{2 \cdot L} \\ P_i = P_o \Rightarrow E \cdot I_{med} = \frac{U_s^2}{R_s} \Rightarrow E^2 \frac{D^2 \cdot T \cdot R_s}{2 \cdot L} = U_s^2 \\ U_s = E \cdot D \sqrt{\frac{T \cdot R_s}{2 \cdot L}} \Rightarrow M = \frac{U_s}{E} = \frac{D}{\sqrt{\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T}}} \end{cases} \quad 4.70$$

Variația raportului de transfer în tensiune în funcție de factorul de umplere  $D$  și raportul  $\frac{2 \cdot L}{R_s \cdot T}$  este ilustrat în figura alăturată. Se poate observa că valori mici ale raportului impun o comportare în regim DCM dar caracteristica este liniară, ceea ce face convertorul mai ușor de controlat.

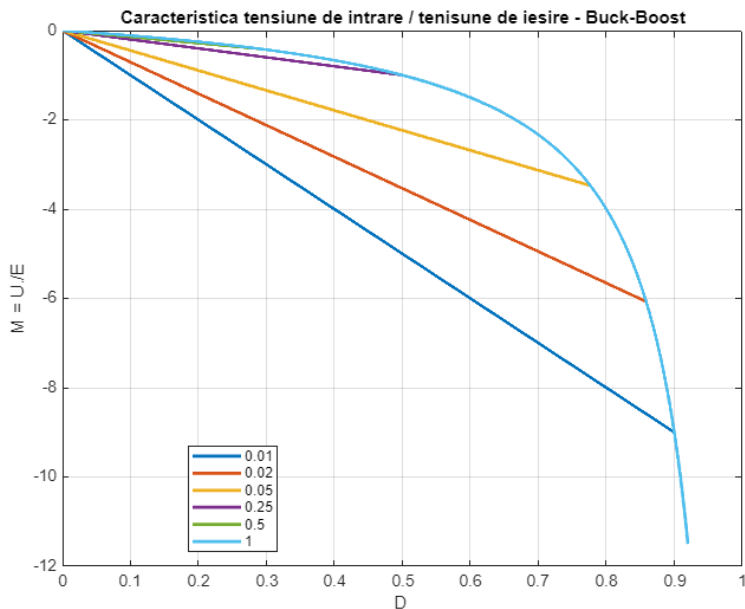


Figura 4. 11 Variația raportului de transfer în tensiune a convertorului Buck-Boost

#### MATLAB CODE

```
function buclaf_Bu_Bo2
D=0:0.0001:0.92;
D1=0:0.05:0.92;
y=0;
n=length(D);
x=[1 2 5 25 50 100];
for k=1:n,
    for j=1:6,
        a=0.01*x(j);
        if a>=(1-D(k)).^2
            y(k,j)=-D(k)./(1-D(k));
        else
            y(k,j)=-D(k)./sqrt(a);
        end
    end
end
end
a=(1-D).^2;
z=D./(1-D);
```

```
plot(D,y(:,1:6),'linewidth',2);grid on;
title('Caracteristica tensiune de intrare / tensiune de iesire
- Buck-Boost');
legend(num2str(x(1)*0.01),num2str(x(2)*0.01),num2str(x(3)*0.01),num
2str(x(4)*0.01),num2str(x(5)*0.01),num2str(x(6)*0.01),'Location','B
est')
xlabel('D ');
ylabel('M = U./E');
```

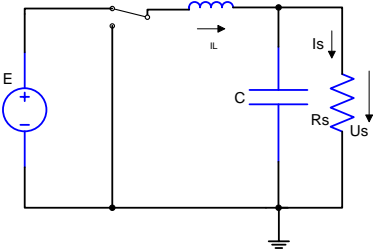
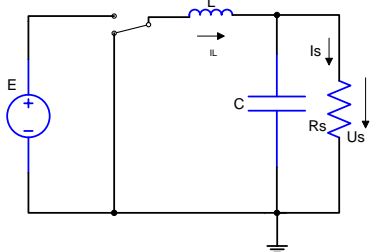
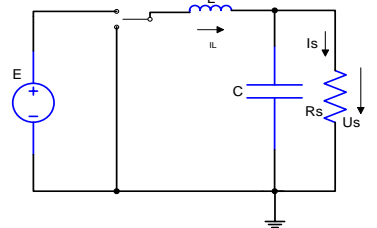
## 2.2. Modelare matematică în MATLAB a convertoarelor buck, boost, buck-boost

Pornind de la analiza matematică a convertoarelor în topologie simplă fără izolare se prezintă în cele ce urmează o implementare a unui platforme de simulare și dimensionare a unor astfel de convertoare în buclă închisă. Deoarece programul Matlab este un program matricial și deoarece, urmărim să reprezentăm sub o formă grafică formele de undă caracteristice acestor convertoare independent de regimul de funcționare al acestora, vom defini în cele ce urmează un set de ecuații de stare ale convertoarelor analizate. Aceste ecuații diferențiale se bazează pe caracterizarea stărilor de conducție sau blocare ale comutatoarelor din circuit și sunt folosite pentru a reprezenta în domeniul timp formele de undă ale curentului prin bobină și a tensiunii de la ieșirea convertorului.

Analiza ce urmează a fi făcută este o analiză în buclă închisă care permite utilizatorului să seteze un set de valori de intrare și să aștepte răspunsul tool-ului de simulare asupra valorilor componentelor și a formelor de undă de interes într-un regim tranzitoriu sau static de funcționare.

Valorile pe care utilizatorul le poate seta ca input-uri pentru aplicație sunt: tipul convertorului (buck, boost, buck-boost), regimul de funcționare (CCM, DCM), tensiunea de intrare la bornele convertorului, frecvența de comutație, tensiunea de ieșire și riplul maxim admis al tensiunii de ieșire, curentul de sarcină precum și riplul maxim admis al curentului prin bobina de lucru. Ceea ce platforma de simulare și dimensionare returnează este: valoarea minimă a inductanței pentru regimul de lucru ales, valoarea optimă a inductanței, valoarea condensatorului de filtrare, valoarea factorului de umplere a semnalului de comandă în regim permanent de funcționare, precum și reprezentarea grafică a soluțiilor ecuațiilor diferențiale ale tensiunii și curentului prin elementele circuitului analizat.



Convertorul Buck model matematic diferential	
Schema	Ecuatii
Intervalul I de funcționare: Tranzistorul conduce, dioda blocată.	
	$\begin{cases} \frac{du_s}{dt} = \left(i_L - \frac{u_s}{R_s}\right) \cdot \frac{1}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{E - u_s}{L} \end{cases}$
Intervalul II de funcționare: Tranzistorul blocat, dioda conduce	
	$\begin{cases} \frac{du_s}{dt} = \left(i_L - \frac{u_s}{R_s}\right) \cdot \frac{1}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = -\frac{u_s}{R_s} \end{cases}$
Intervalul III de funcționare: Tranzistorul și dioda blocate	
	$\begin{cases} \frac{du_s}{dt} = \left(i_L - \frac{u_s}{R_s}\right) \cdot \frac{1}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = 0 \end{cases}$

În regim de conducție neîntreruptă tensiunea de ieșire este dată de relația  $U_s = E \cdot D$ , unde  $D$  este factorul de umplere cu care se comandă tranzistorul la frecvența de comutație  $f_{com}$ .

Valoarea bobinei minime astfel încât convertorul să funcționeze la granița conducerii continue și întrerupte este dată de:

$$L \frac{1}{2 \cdot f_{com} s_{min}}$$

4.71

, astfel valoarea bobinei convertorului în regim de conducție continuă pentru limitarea riplului curentului de sarcină este dată de:

$$L = \frac{E \cdot D \cdot (1 - D)}{\Delta i \cdot f_{com}} \quad 4.72$$

, unde  $\Delta i = I_{sS_{min_{max}}}$  și  $I_{sS}, I_{sS_{min_{max}}}$ .

În modul de conducție discontinuă valoarea bobinei convertorului este dată de relația (4.40) unde parametru  $a$  reprezintă o valoare în procente din bobina minimă calculată în relația (4.38).

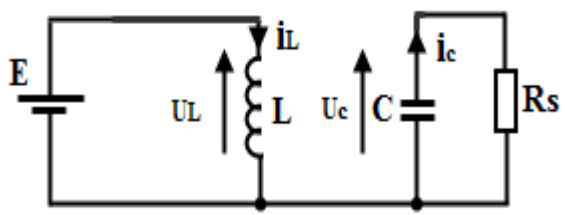
$$L = a \cdot L_{min} \quad 4.73$$

Condensatorul de filtraj este dat de relația (3.41) și este exprimat în funcție de frecvența de lucru a convertorului:

$$C = \frac{(E - U_s) \cdot U_s}{8 \cdot E \cdot L \cdot f_{com}^2 \cdot \Delta U_s} \quad 4.74$$

În regim de conducție neîntreruptă factorul de umplere poate fi ușor ca raportul dintre tensiunea de ieșire și tensiunea de intrare, însă în regim de conducție discontinuă factorul de umplere nu mai respectă această relație și poate fi determinat din relația (3.42), unde cu  $D'$  s-a notat factorul de umplere exprimat în conducție neîntreruptă.

$$D = D' \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot f_{com}}{R_s \cdot (1 - D')}} \quad 4.75$$

Convertorul Boost model matematic diferențial	
Schema	Ecuatii
Intervalul I de funcționare: Tranzistorul conduce, dioda blocată.	
	$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = E \\ \frac{du_s}{dt} = -\frac{u_s}{R_s \cdot C} \end{cases}$
Intervalul II de funcționare: Tranzistorul blocat, dioda conduce.	

	$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{u_s}{L} \\ \frac{du_s}{dt} = \left(i_L - \frac{u_s}{R_s}\right) \cdot \frac{1}{C} \end{cases}$
<p>Intervalul II de funcționare: Tranzistorul blocat, dioda blocată.</p>	
	$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = 0 \\ \frac{du_s}{dt} = -\frac{u_s}{R_s \cdot C} \end{cases}$

Valoarea minimă a bobinei convertorului pentru ca acesta să se afle la granița celor două regimuri de lucru CCM și DCM este dată de relația:

$$L \frac{R_s \cdot D \cdot (1 - D^2)}{2 \cdot f_{com}} \quad \text{min} \quad 4.76$$

În conducție continuă bobina de lucru a convertorului poate fi determinată de relația:

$$L = \frac{(U_s - E) \cdot E}{U_s \cdot f_{com} \cdot \Delta i} \quad 4.77$$

Variația curentului prin bobină se determină din relația (4.45), iar curentul maxim din relația (3.46). Cum variația curentului prin bobină este egală cu diferența dintre curentul maxim și curentul minim, valoarea curentului minim este ușor de calculat având cele două relații .

$$\begin{cases} \Delta i = 2 \cdot (\alpha - 1) \cdot I_s \\ \Delta i = I_{max} - I_{min} \end{cases} \quad 4.78$$

$$I_{max} = \frac{I_s}{1 - D} + \frac{\Delta i}{2} \quad 4.79$$

În regim de curent întrerupt tensiunea de ieșire este dată de relația (4.47), iar factorul de umplere  $D$  este exprimat ca fiind (4.48).

$$U_s = \left( \frac{1}{2} + \sqrt{0,25 + \frac{R_s \cdot D^2}{2 \cdot L \cdot f_{com}}} \right) \cdot E \quad 4.80$$

$$D = \sqrt{2 \cdot L \cdot U_s \cdot \frac{U_s - E}{R_s \cdot E^2 \cdot T}} \quad 4.81$$

Valoarea curentului prin tranzistor, precum si valoarea curentului prin dioda satisfac urmatoarele relatii:

$$I_T = I_s \cdot \frac{U_s}{E} + \frac{E}{2 \cdot L \cdot f_{com}} \left( 1 - \frac{E}{U_s} \right) \quad 4.82$$

$$I_D = I_s \cdot \frac{U_s}{E} + \frac{E \cdot L}{2 \cdot f_{com}} \left( 1 - \frac{E}{U_s} \right) \quad 4.83$$

Convertorul Boost model matematic diferential	
Schema	Ecuatii
Intervalul I de functionare: Tranzistorul conduce, dioda blocata.	
	$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = E \\ \frac{du_s}{dt} = -\frac{u_s}{R_s \cdot C} \end{cases}$
Intervalul II de functionare: Tranzistorul blocat, dioda conduce.	
	$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{u_s}{L} \\ \frac{du_s}{dt} = \left( i_L - \frac{u_s}{R_s} \right) \cdot \frac{1}{C} \end{cases}$
Intervalul III de functionare: Tranzistorul blocat, dioda blocata.	
	$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = 0 \\ \frac{du_s}{dt} = -\frac{u_s}{R_s \cdot C} \end{cases}$

Ecuatiile de dimensionare a componentelor convertorului buck-boost pe care platforma Matlab le utilizează atât în regim neîntrerupt cât și în regim întrerupt de funcționare sunt prezentate în cele ce urmează.

Valoare minimă a bobinei convertorului pentru ca acesta să funcționeze la granița dintre cele două regimuri de funcționare este determinată cu ajutorul relației (4.51), orice valoare a bobinei mai mică decât valoarea rezultată din această relație face ca convertorul să lucreze în regim DCM.

$$L \frac{R_s \cdot D \cdot (1 - D^2)}{f_{com} \cdot \Delta i} \quad \text{min} \quad 4.84$$

Valoarea optimă a bobinei convertorului pentru regimul CCM este exprimată de relația:

$$L = \frac{U_s \cdot E}{f_{com} \cdot \Delta i} \quad 4.85$$

Variația tensiunii de ieșire este asigurată de o dimensionare corectă a condensatorului de filtraj. O valoare corectă a condensatorului se poate determina din relația matematică dată de formula (4.53).

$$C = \frac{U_s^2}{R \cdot \Delta U \cdot f_{com}} \quad 4.86$$

Curentul prin tranzistor și curentul prin diodă se pot determina aplicând relațiile (3.59) și (3.60) și sunt valabile atât în regim CCM cât și în regim DCM de funcționare.

$$I_T = I_s \cdot \left(1 + \frac{U_s}{E}\right) + \frac{E}{2 \cdot L \cdot f_{com}} \cdot \left(\frac{U_s}{U_s + E}\right) \quad 4.87$$

$$I_D = I_s \cdot \left(1 + \frac{U_s}{E}\right) + \frac{E \cdot L}{2 \cdot f_{com}} \cdot \left(\frac{U_s}{U_s + E}\right) \quad 4.88$$

## MODEL MATLAB

Structura programului Matlab are la baza 4 fișiere de tip script-funcție care se apelează între ele într-o manieră automată sau pe baza proprietății callback a obiectelor grafice utilizate în interfatarea cu utilizatorul. Cele 4 fișiere sunt: start (fișierul de lansare al aplicației), calcule (fișierul în care se dimensionează componentele convertorului), interfață (fișierul de interfațare cu utilizatorul), rezolvare\_ode (fișier ce conține modelul ecuațiilor diferențiale ale convertoarelor analizate).

### Fișierul START

```
clear all
close all
clc
%=====
% Tipul convertorului
tip=1; % Buck
%modul de functionare
mod=1; % CCM
p=1; %Regim permanent
%===== Date de intrare =====
E=12.5;
Us=25;
DU=0.8;
Is=1;
alfa1=2;
fcom=20000;
%===== Reprezentari grafice =====
N=10;
%=====
%===== Apelare functie =====
[R,L,C,D,Lmin,Imax,Imin,DI]=calcule(tip,mod,E,Us,DU,Is,alfa1,fcom);
interfata(tip,mod,E,Us,DU,Is,alfa1,fcom,R,L,C,D,Lmin,Imax,Imin,DI,N,p);
rezolvare_ode(E,R,L,C,D,fcom,N,tip,p,Is);
```

### Fișierul CALCULE

```
function
[R,L,C,D,Lmin,Imax,Imin,DI]=calcule(tip,mod,E,Us,DU,Is,alfa1,fcom);
T=1/fcom;
if alfa1 == 1
    alfa=1.1;
    ss=0.9;
elseif alfa1==2
    alfa=1.2;
```

```

    ss=0.8;
elseif alfa1==3
    alfa=1.3;
    ss=0.7;
elseif alfa1==4
    alfa=1.4;
    ss=0.6;
elseif alfa1==5
    alfa=1.5;
    ss=0.5;
end

if (tip==1) && (Us>E)
    Us=E/2;
elseif (tip==2) && (E>Us)
    Us=E*2;
end
if (tip==1) && (mod==1)
    D=Us/E;
    Imax=alfa*Is;
    Imin=Is*(2-alfa);
    DI=Imax-Imin;
    R=Us/Is;
    Lmin=0.5*R*T*(1-D);
    L=(E*D*(1-D)*T)/DI;
    C=((E-Us)*Us)/(8*E*L*(fcom^2)*DU);
elseif (tip==1) && (mod==2)
    R=Us/Is;
    v=Us./E;
    Lmin=0.5*R*T*(1-v);
    L=ss*Lmin;
    D=v.*sqrt(2.*L./(R.*T.*(1-v)));
    Imax=((E-Us)*T*D)/L;
    Imin=0;
    DI=Imax-Imin;
    C=((E-Us)*Us)/(8*E*L*(fcom^2)*DU);
end
if (tip==2) && (mod==1)
    D=(Us-E)/Us;
    R=Us/Is;
    C=(Us-E)/(R*fcom*DU);
    Lmin=0.5*R*T*D*(1-D)^2;
    %Imax=Is*Us/E+(E*T/2*L)*(1-E/Us);
    DI=2*(alfa-1)*Is;
    L=(Us-E)*E/(Us*fcom*DI);
    Imax=(Is/(1-D))+DI/2;
    Imin=Imax-DI;

```

```

elseif (tip==2) && (mod==2)
    v=(Us-E)/Us;
    R=Us/Is;
    Lmin=0.5*R*T*v*(1-v)^2/2;
    L=ss*Lmin;
    D=sqrt(2*L*Us*(Us-E)/(R*E^2*T));
    Imin=0;
    Imax=(E*D*T)/L;
    C=(Us-E)/(R*fcom*DU);
    DI=Imax-Imin;
end
if (tip==3) && (mod==1)
    D=Us/(E+Us);
    R=Us/Is;
    Lmin=0.5*R*T*D*(1-D)^2;
    C=(Us*D*T)/(R*DU);
    DI=2*(alfa-1)*Is;
    L=E*D*T/DI;
    %Imax=Is*(1+Us/E)+(E*T/2*L)*(Us/E+Us);
    Imax=Us/(R*(1-D))+E*D*T/(2*L);
    Imin=Imax-DI;
elseif (tip==3) && (mod==2)
    R=Us/Is;
    v=Us/(E+Us);
    Lmin=0.5*R*T*(1-v)^2;
    L=ss*Lmin;
    D=sqrt((Us^2*L)/(E^2*T*R));
    C=(Us*D*T)/(R*DU);
    Imax=E*D*T/L;
    Imin=0;
    DI=Imax-Imin;
end

```

### Fișierul REZOLVARE ODE

```

function rezolvare_ode(E,R,L,C,D,fcom,N,tip,p,Is)
t=0;
y=[0 0];
T=1/fcom;
N1=3;
for k=1:N
    nt=length(t);
    % ----- interval=1;
        t0=(k-1).*T;
        tf=t0+D.*T;
        ci=y(nt,:);
        int=1;
        [t,y]=ode45(@diferentiale,[t0,tf],[ci],[],E,R,L,C,tip,int);
    end
end

```



```

        nt=length(t);
        pp=Is.*y(:,2);
        pp1=max(pp);
        pp2=min(pp);
        ppp=sqrt(((pp1.^2)-(pp2.^2))/2);
%-----
        subplot(3,2,2);
        plot(t,y(:,1),'r');%grid on;hold on;
        subplot(3,2,4);
        plot(t,y(:,2),'r');%grid on;hold on;
        subplot(3,2,6);
        plot(t,pp,'r');
%-----
        if (p==0)&&(k<=N-N1)
                subplot(3,2,2); hold off;
                subplot(3,2,4); hold off;
                subplot(3,2,6); hold off;
        else
                subplot(3,2,2); hold on;
                subplot(3,2,4); hold on;
                subplot(3,2,6); hold on;
        end
%-----interval=2;
        t0=(k-1).*T+D.*T;
        tf=k.*T;
        ci=y(nt,:);
        int=2;
        options=odeset('Events',@detectare);
[t,y,te,ye,ie]=ode45(@diferentiale,[t0,tf],[ci],[options],E,R,L,C,t
ip,int);
        nt=length(t);
        te;
        pp=Is.*y(:,2);
        pp1=max(pp);
        pp2=min(pp);
        ppp=sqrt(((pp1.^2)-(pp2.^2))/2);
%-----
        subplot(322)%('Position',[0.1 0.55 0.50 0.30]);
        plot(t,y(:,1),'b');%grid on;hold on;
        subplot(324)%('Position',[0.1 0.15 0.50 0.30]);
        plot(t,y(:,2),'b');%grid on;hold on;
        subplot(3,2,6);
        plot(t,pp,'r');
        if (p==0)&&(k<=N-N1)
                subplot(3,2,2); hold off;
                subplot(3,2,4); hold off;
                subplot(3,2,6); hold off;
        else

```

```

        subplot(3,2,2); hold on;
        subplot(3,2,4); hold on;
        subplot(3,2,6); hold on;
    end
%-----interval=3;

    if te>0;
    t0=t(nt);
    tf=k.*T;
    ci=y(nt,:);
    int=3;
    [t,y]=ode45(@diferentiale,[t0,tf],[ci],[],E,R,L,C,tip,int);
    nt=length(t);
    pp=Is.*y(:,2);
    pp1=max(pp);
    pp2=min(pp);
    ppp=sqrt(((pp1.^2)-(pp2.^2))/2);
%-----
    subplot(3,2,2);
    plot(t,y(:,1),'g');%grid on;hold on;
    subplot(3,2,4);
    plot(t,y(:,2),'g');%grid on;hold on;
    subplot(3,2,6);
    plot(t,pp,'r');
%-----
    if (p==0)&&(k<=N-N1)
        subplot(3,2,2); hold off;
        subplot(3,2,4); hold off;
        subplot(3,2,6); hold off;
    else
        subplot(3,2,2); hold on;
        subplot(3,2,4); hold on;
        subplot(3,2,6); hold on;
    end
%-----
end
end
%=====
Q=(sqrt(L./C))./R;
if tip==1
    subplot(3,2,2);grid on;
    ylabel(['iL [ A ]']);
    title(['Circuit Buck - Coborator de tensiune']);
    subplot(3,2,4);grid on;
    if L>=0.5*R*T*(1-D);
        Us=D.*E;
    else
        v=2.*D./(D+sqrt(D.^2+8.*L./(R.*T)));
    end
end
end
end

```

```
    Us=v*E;
end
ylabel(['Us [ V ]']);
title([' Us = ',num2str(Us)]);
subplot(3,2,6);grid on;
xlabel(['Timp [s]']);
ylabel(['P [W]']);

sss=imread('buck.png');
subplot('position',[0.05 0.05 0.25 0.22])
image(sss);
axis off;
elseif tip==2
subplot(3,2,2);grid on;
ylabel(['iL [ A ]']);
title(['Circuit Boost - Ridicator de tensiune']);
subplot(3,2,4); grid on;
ylabel(['Us [ V ]']);
%title([' Us = ',num2str(Us)]);
subplot(3,2,6)
grid on;
xlabel(['Timp [s]']);
xlabel(['Timp [s]']);
title([' Q = ',num2str(Q)])
sss=imread('boost.png');
subplot('position',[0.05 0.05 0.25 0.22])
image(sss);
axis off;
elseif tip==3
subplot(3,2,2);grid on;
ylabel(['iL [ A ]']);
title(['Circuit Buck-Boost - Inversor de tensiune']);
xlabel(['Timp [s]']);
subplot(3,2,4);grid on;
ylabel(['Us [ V ]']);
%title([' Us = ',num2str(Us)]);
%xlabel(['Timp [s]']);
%xlabel(['Timp [s]', 'Q= ',num2str(Q)]);
subplot(3,2,6)
grid on;
xlabel(['Timp [s]']);
ylabel(['P [W]'])
sss=imread('buck_boost.png');
subplot('position',[0.05 0.05 0.25 0.22])
image(sss);
axis off;
end
```

### Fișierul DIFERENȚIALE

```
function dy=diferentiale(t,y,E,R,L,C,tip,int)
dy=zeros(2,1);
switch tip
    case 1 %---- Buck -----%
        if int==1
            a=1;b=1;c=1;
        elseif int==2
            a=0;b=1;c=1;
        else
            a=0;b=0;c=0;
        end
    case 2 %---- Boost -----%
        if int==1
            a=1;b=0;c=0;
        elseif int==2
            a=1;b=1;c=1;
        else
            a=0;b=0;c=0;
        end
    case 3 %---Buck-Boost---%
        if int==1
            a=1;b=0;c=0;
        elseif int==2
            a=0;b=1;c=1;
        else
            a=0;b=0;c=0;
        end
end
        dy(1)=(a.*E-b.*y(2))./L; % Curent
        dy(2)=(c.*y(1)-y(2))./R)./C; % Tensiune
```

Rezultatul compilării și rulării acestor fișiere conduce la deschiderea unei ferestre care oferă posibilitatea utilizatorului să selecteze valorile de intrare dorite și să obțină sub o valoare numerică calculele componentelor critice ale convertorului analizat. În același timp, platforma returnează formele de undă caracteristice mărimilor de interes precum tensiune și curent atât în regim tranzitoriu cât și în regim permanent de funcționare.

O imagine succintă cu rezultatele obținute în urma rulării secvențelor de cod, este ilustrată în figura următoare. Formele de undă sunt reprezentate cu culori diferite pentru fiecare interval de funcționare a convertorului, astfel se poate distinge ușor între momentul de conducție sau de blocare al tranzistorului, ori intervalul de timp caracteristic regimului întrerupt.

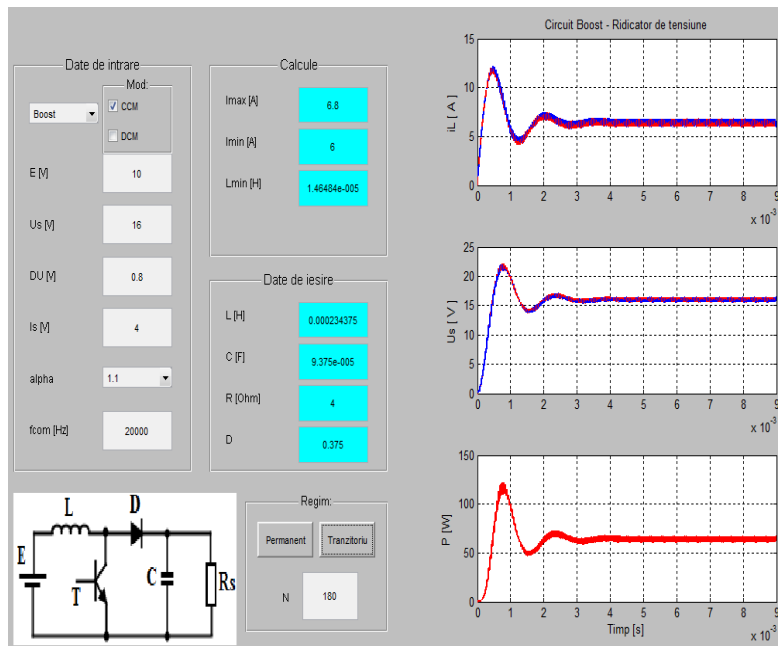


Figura 4.12 Analiza convertorului boost, CCM, regim tranzitoriu

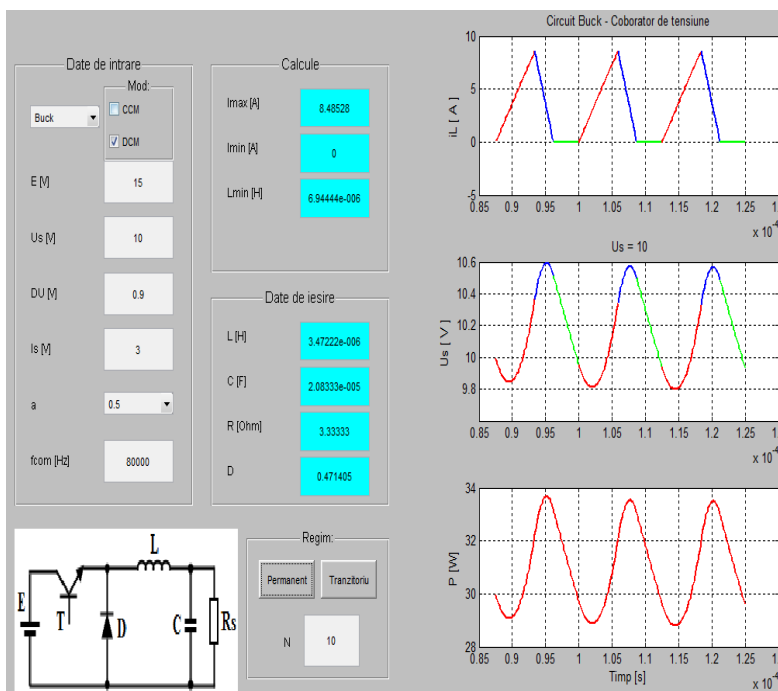


Figura 4.13 Analiza convertorului buck, DCM, regim permanent

## 4.4 Convertorul Forward

Convertorul Forward este un convertor dc-dc. ce oferă o izolare între intrarea și ieșirea sa, fiind format dintr-un etaj de izolare cu transformator și un convertor Buck, din care este derivat. Schema de principiu a convertorului forward este prezentată în figura 4.14, unde se evidențiază cele două componente inductive, transformatorul cu rol de separare galvanică între intrarea și ieșirea convertorului forward, permițând totodată și obținerea unor tensiuni mai mari decât tensiunea de alimentare a convertorului și bobina  $L$  pentru stocarea energiei ce urmează să fie transmisă sarcinii.

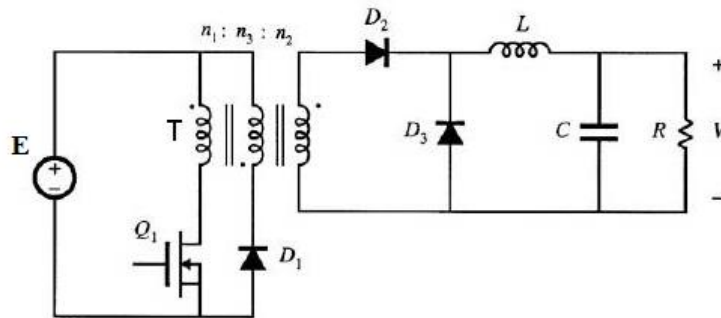


Figura 4.14 Schema de principiu a convertorului Forward

Principiul de funcționare a convertorului Forward este foarte asemănător cu convertorul buck din care este derivat. Pe durata de conducție a tranzistorului, curentul de magnetizare crește liniar stocându-se astfel energie în miezul transformatorului. Când tranzistorul se blochează, trebuie asigurată o cale pentru scurgerea curentului de magnetizare, altfel apar vârfuri de tensiune ce pot distruge tranzistorul. Una din cele mai utilizate soluții pentru eliminarea acestei probleme constă în includerea unei înfășurări suplimentare  $n_3$  ca în figura 4.14. Această înfășurare trebuie să fie strâns cuplată cu înfășurarea primară pentru a elimina vârfurile de tensiune ce apar pe tranzistor când acesta se blochează, astfel limitând tensiunea pe tranzistor la o valoare dublă față de tensiunea de intrare atunci când numărul de spire al înfășurării unu este egal cu numărul de spire al înfășurării trei. Aceste ipoteze fac ca factorul de umplere al tensiunii de comandă să se limitează la o valoare ce nu poate depăși 50%, pentru a preveni saturația miezului transformatorului.

Pentru simularea și reprezentarea grafică a formelor de undă caracteristice acestui convertor cu ajutorul unei platforme Matlab, este necesară scrierea

unor ecuații de stare / ecuațiilor diferențiale care descriu funcționarea convertorului. Schema convertorului Forward modelat în platforma Matlab este prezentată în figura 4.15, iar intervalele de funcționare au fost alese în funcție de stările de conducție și blocare ale tranzistorului. Pentru un model cât mai apropiat de sistemul real, modelul matematic al transformatorului evidențiat și cea de-a treia înfășurare precum și bobina de magnetizare  $L_M$  care apare în paralel cu acesta.

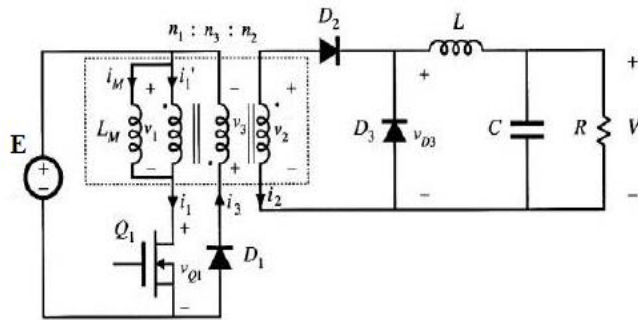


Figura 4.15. Schema convertorului Forward implementată în platforma Matlab

Un prim interval de funcționare a convertorului este descris de conducția tranzistorului. Când tranzistorul conduce dioda D1 fiind polarizată invers este blocată, astfel curentul de magnetizare crește liniar. Dioda D2 este polarizată direct și conduce, curentul prin bobină crește liniar iar dioda D3 fiind polarizată invers este blocată. Schema echivalentă a circuitului pentru acest interval este prezentată în figura alăturată, iar ecuațiile matematice sunt date de relația de mai jos.

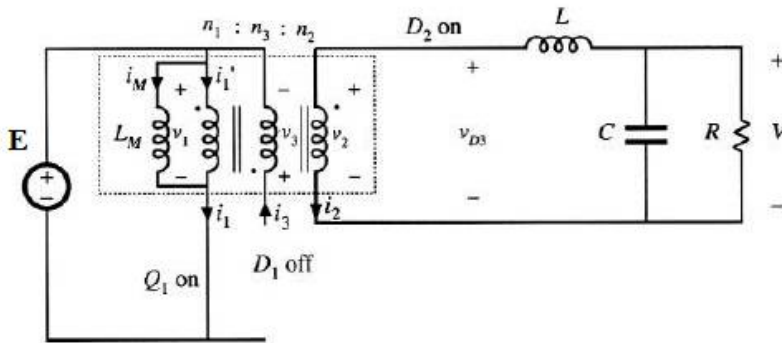


Figura 4.16 Schema echivalentă a convertorului Forward pentru primul interval de funcționare

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_1}{dt} = \frac{M \cdot (u_s + R_s \cdot i_2) - (L_p \cdot (L + L_s)) \cdot (E - R_p \cdot i_1)}{-L_p \cdot (L_s + L) \cdot M^2} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_p \cdot (u_s + R_s \cdot i_2) - M \cdot (E - R_p \cdot i_1)}{-L_p \cdot (L_s + L) \cdot M^2} \\ \frac{di_M}{dt} = \frac{E}{L_M} \\ \frac{di_L}{dt} = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \cdot \frac{E}{L} - L_M \cdot i_M - \frac{u_s}{L} \\ \frac{du_s}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{u_s}{R \cdot C} \end{array} \right. \quad 4.89$$

, unde cu  $i_1$  s-a notat curentul din primarul transformatorului, cu  $i_2$  curentul din secundarul transformatorului,  $i_M$  curentul de magnetizare ce străbate bobina  $L_M$ ,  $L_p$ ,  $R_p$  reprezintă valoarea inductanței și a rezistenței primarului,  $L_s$ ,  $R_s$  reprezintă valoarea inductanței și a rezistenței secundarului,  $i_L$  reprezintă curentul prin bobina  $L$  a convertorului,  $u_s$  este tensiunea de ieșire, iar inductanța mutuală  $M$  și inductanța de magnetizare sunt date de:

$$\left\{ \begin{array}{l} M = k \cdot \sqrt{L_p \cdot L_s} \\ L_M = M \cdot \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \end{array} \right. \quad 4.90$$

Când tranzistorul se blochează, tensiunile pe înfășurările transformatorului își schimbă polaritatea. Dioda  $D_1$  se deschide și curentul de magnetizare circulă prin înfășurarea auxiliară asigurând astfel demagnetizarea transformatorului și totodată transferul de energie înspre intrare. Dioda  $D_2$  este blocată datorită polarității tensiunii din secundar iar dioda  $D_3$  se deschide asigurând astfel o cale pentru curentului acumulat în bobina  $L$ . Schema echivalentă a convertorului caracteristică acestui interval de funcționare devine precum schema ilustrată în figura 4.17. Setul de ecuații matematice diferențiale ce pot fi deduse pentru acest interval de funcționare se pot scrie precum în sistemul de ecuații 4.58.

Un al treilea interval de funcționare al convertorului Forward apare atunci când curentul de magnetizare atinge valoarea zero înainte ca tranzistorul să



intre din nou în starea de conducție. Acest interval este caracterizat prin faptul ca tranzistorul, dioda D2 și dioda D1 sunt blocate. Dioda D3 ramâne deschisă asigurând calea de închidere a curentului din bobina L, iar curentul de magnetizare  $i_M$  rămâne la valoarea zero pentru a compensa perioada de comutație. Schema echivalentă a convertorului pentru acest interval este prezentată în figura 4.18, iar relațiile matematice în (4.59).

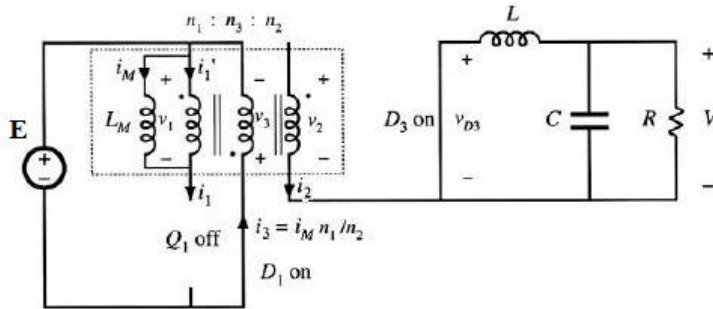


Figura 4.17 Schema echivalentă a convertorului Forward pentru al doilea interval de funcționare

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{E - R_p \cdot i_1}{L_p} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_p \cdot (u_s + R_s \cdot i_2) - M \cdot (E - R_p \cdot i_1)}{-L_p \cdot (L_s + L) \cdot M^2} \\ \frac{di_M}{dt} = -\frac{E}{L_M} \\ \frac{di_L}{dt} = -\frac{u_s}{L} \\ \frac{du_s}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{u_s}{R \cdot C} \end{cases} \quad 4.91$$

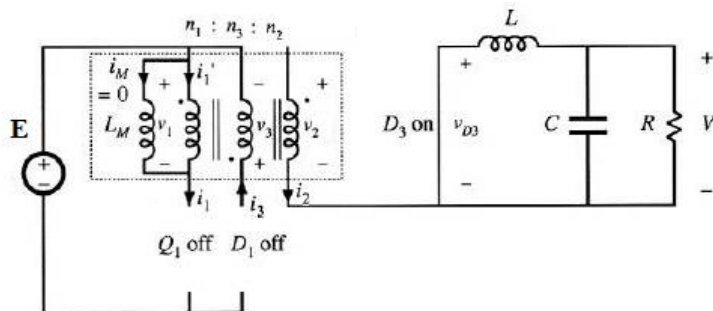


Figura 4.18.2 Schema echivalentă a convertorului Forward pentru intervalul al treilea de funcționare

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = 0 \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_p \cdot (u_s + R_s \cdot i_2) - M \cdot (E - R_p \cdot i_1)}{-L_p \cdot (L_s + L) \cdot M^2} \\ \frac{di_M}{dt} = 0 \\ \frac{di_L}{dt} = -\frac{u_s}{L} \\ \frac{du_s}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{u_s}{R \cdot C} \end{cases} \quad 4.92$$

Pe baza ecuațiilor diferențiale prezentate anterior s-a implementat o platformă Matlab de simulare a convertorului, ce permite utilizatorului introducerea parametrilor convertorului și returnează formele de undă caracteristice valorilor introduse. Parametri ce pot fi modificați în această platformă sunt împărțiți în trei casete după cum urmează: Date de intrare, unde se introduc valorile tensiunii de alimentare, frecvența de lucru a tranzistorului, factorul de umplere sau numărul de perioade de vizualizare; Transformator, caseta de editare a valorilor transformatorului ce permite modificarea inductanței și rezistenței primarului  $L_p$ ,  $R_p$ , inductanței și rezistenței secundarului  $L_s$ ,  $R_s$ , inductanței înfășurării trei  $L_3$  și factorul de cuplaj între primar și secundar  $k$ ; Parametri circuit, unde utilizatorul modifică valoarea rezistenței de sarcină, a bobinei de lucru sau a condensatorului de filtraj. Formele de undă pe care platforma le returnează sunt tensiunea de ieșire, curentul de sarcină, puterea totală, tensiunea pe tranzistor, curentul de drenă și curentul de magnetizare și calculează inductanța mutuală, inductanța de magnetizare și raportul de transformare al transformatorului. Structura proiectului Matlab are la baza 3 fișiere funcție care conțin atât partea de interfațare cu utilizatorul, cât și modelul matematic implementat în vederea calculării și reprezentării grafice a formelor de undă de interes ale convertorului forward. Fișierul `apel_forward` este fișierul de start în care sunt definite valorile predefinite de simulare. Acest fișier apelează fișierul `forward_project`, fișier în interiorul căruia sunt definite obiectele grafice de interfațare cu utilizatorul precum și algoritmul de calcul împărțit în intervalele de lucru caracteristice stărilor de conducție sau blocare ale tranzistorului. Fișierul ecuații forward, conține ecuațiile de stare definite sub o forma diferențială pentru a putea fi rezolvate utilizând `ode45`.

### Fișierul APEL FORWARD

```

close all;
clc;
clear all;
% Primar
L1=0.095;
R1=0.5;
L3=L1;
% -----
% Secundar 1
L2=0.005;
R2=0.1;
%-----
f=40000;
k=0.98; % coeficientul de cuplaj
%-----
%nn=Raportul nr de spire
%ns=sqrt(L1./L2); % ns=N1./N2=sqrt(L1./L2)
M=k.*sqrt(L1.*L2);
E=100;
L=0.0008;
C=0.000001;
R=10;
T=1/f;
D=0.4;
N=30;
p=1;
forward_project2(E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C,R,D,N,p); % ecuatii
forward

```

### Fișierul FORWARD PROJECT

```

function forward_project2(E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C,R,D,N,p)
%creaza o figura; % clear vouto % clear itransistoro
% clear vtransistoro % clear t % clear y % clear imo
% clear iso; % clear to
fig=figure('Name',' Convertor cc-cc cu izolare galvanica
forward',...
    'Units','normalized',...
    'Position', [0.05 0.05 0.88 0.88],...
    'Numbertitle','off',...
    'Color', [0.75, 0.75, 0.75]);
%=====
%L3=L1;
N1=3;
intrare=uipanel('BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...
    'ForegroundColor','black',...
    'Title','Date de intrare',...

```

```

        'FontSize',11,...
        'TitlePosition','centertop',...
        'Position',[0.02 0.72 0.2 0.25]);
xc=
'str2num(get(gcf,'String'));close;forward_project2(E,L1,L2,L3,R1,
R2,f,k,L,C,R,D,N,p)';
BEt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.7 0.4 0.2],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','E [V]',...
    'FontSize',9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',intrare);
BEe=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.73 0.4 0.2],...
    'String',E,...
    'Callback',['E=',xc],...
    'Parent',intrare);
Bft=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.47 0.4 0.2],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','f [Hz]',...
    'FontSize',9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',intrare);
Bfe=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.50 0.4 0.2],...
    'String',f,...
    'Callback',['f=',xc],...
    'Parent',intrare);
Bnt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.24 0.4 0.2],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','N ',...
    'FontSize',9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'parent',intrare);

```

```

BNe=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.27 0.4 0.2],...
    'String', N,...
    'Tag','tempN',...
    'Callback',['N=',xc],...
    'parent',intrare);
BDt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.01 0.4 0.2],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','D',...
    'FontSize', 9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'parent',intrare);
BDe=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.03 0.4 0.2],...
    'String', D,...
    'Tag','tempN',...
    'Callback',['D=',xc],...
    'parent',intrare);
%---Transformator ---%
iesire=uipanel('BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'Title','Transformator',...
    'FontSize',11,...
    'TitlePosition','centertop',...
    'Position',[0.02 0.31 0.2 0.4]);
BLpt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.80 0.4 0.15],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','Lp [H]',...
    'FontSize', 9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',iesire);
BLpe=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.83 0.4 0.15],...
    'String', L1,...
    'Callback',['L1=',xc],...
    'Parent',iesire);

```

```

BRpt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.64 0.4 0.15],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],... 'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','Rp [Ohm]',...
    'FontSize',9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',iesire);
BRpe=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.67 0.4 0.15],...
    'String',R1,...
    'Callback',['R1=',xc],...
    'Parent',iesire);
BL3t=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.48 0.4 0.15],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],... 'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','L3 [H]',...
    'FontSize',9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',iesire);
BL3e=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.51 0.4 0.15],...
    'String',L3,...
    'Callback',['L3=',xc],...
    'Parent',iesire);
BLst=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.32 0.4 0.15],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],... 'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','Ls [H]',...
    'FontSize',9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',iesire);
BLse=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.35 0.4 0.15],...
    'String',L2,...
    'Callback',['L2=',xc],...
    'Parent',iesire);

```

```
BRst=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.16 0.4 0.15],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],... 'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','Rs [Ohm] ',...
    'FontSize', 9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',iesire);
BRse=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.19 0.4 0.15],...
    'String', R2,...
    'Callback',['R2=',xc],...
    'Parent',iesire);
Bkt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.005 0.4 0.15],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],... 'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','k ',...
    'FontSize', 11,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',iesire);
Bke=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.03 0.4 0.15],...
    'String', k,...
    'Callback',['k=',xc],...
    'Parent',iesire);
%--- Parametri circuit ---%
calc=uipanel('BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],... 'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'Title','Parametri circuit',...
    'FontSize',11,...
    'TitlePosition','centertop',...
    'Position',[0.02 0.09 0.2 0.2]);
BRdt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.59 0.4 0.25],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],... 'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String','R [Ohm] ',...
    'FontSize', 9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left','Parent',calc);
```

```

BRde=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.62 0.4 0.25],...
    'String', R,...
    'Callback',['R=',xc],...
    'Parent',calc);
BLt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.3 0.4 0.25],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String', 'L [H]',...
    'FontSize', 9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',calc);
BLE=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.33 0.4 0.25],...
    'String', L,...
    'Callback',['L=',xc],...
    'Parent',calc);
BCt=uicontrol('Style','text',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.08 0.01 0.4 0.25],...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...'white'
    'ForegroundColor','black',...
    'String', 'C [F]',...
    'FontSize', 9,...
    'FontWeight','demi',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'Parent',calc);
BCe=uicontrol('Style','edit',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[0.5 0.04 0.4 0.25],...
    'String', C,...
    'Callback',['C=',xc],...
    'Parent',calc);
% =====Reprezentari Grafice ===== %
BR1=uicontrol('Style','push',...
    'Units','normalized',...
    'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...
    'ForegroundColor','black',...
    'Position',[0.02 0.02 0.08 0.05],...
    'String','Permanent',...
    'Callback','p=0;close,forward_project2(E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C,R,D
,N,p)');

```



```

BR2=uicontrol('Style','push',...
              'Units','normalized',...
              'BackgroundColor',[0.75,0.75,0.75],...
              'ForegroundColor','black',...
              'Position',[0.14 0.02 0.08 0.05],...
              'String','Tranzitoriu',...

'Callback','p=1;close;forward_project2(E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C,R,D
,N,p)');
% -----
M=k.*sqrt(L1.*L2); % inductanta mutuala
Lm=M*sqrt(L1/L2); % inductanta de magnetizare
% -----
zzz=sqrt(L2/L1);
%-----
D2=sqrt(L3./L1)*D;
Dprim=1-D;
if(Dprim<D2)
    D2=Dprim;
end
D3=1-D-D2;
if(D3<0)
    D3=0;
end
%-----
t0=0;
tf=0;
y=[0 0 0 0 0]; % Iprimar Isecundar Im Is Vout
to=[];
t=0;
T=1/f;
Vtr1=[];
Itr1=[];
for i=1:N
    nt=length(t);
    t0=tf;
    tf=t0+D*T;
    ci=y(nt,:);
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,1);
nt=length(y);
subplot('position',[0.3 0.7 0.3 0.22]) %(332)
plot(t,y(:,5),'r'); grid on; hold on; axis tight;
subplot('position',[0.3 0.4 0.3 0.22]) %(333)
plot(t,y(:,4),'r'); grid on; hold on; axis tight ;
subplot('position',[0.3 0.1 0.3 0.22]) %(335)
plot(t,(y(:,4).*y(:,5)),'r');grid on;hold on; axis tight ;

```

```

subplot ('position',[0.65 0.1 0.3 0.22]) %(339)
plot(t,y(:,3),'r');grid on;hold on; axis tight ;
    if (p==0)&&(i<=N-N1)
%
        subplot ('position',[0.3 0.7 0.3 0.22]) %(332)
        grid on; hold off; axis tight;
%
        subplot ('position',[0.3 0.4 0.3 0.22]) %(333)
        grid on; hold off; axis tight ;
%
        subplot ('position',[0.3 0.1 0.3 0.22]) %(335)
        grid on;hold off; axis tight ;

        subplot ('position',[0.65 0.1 0.3 0.22]) %(339)
        grid on;hold off; axis tight ;
%
    end
% ----- interval=2;
t0=tf;
tf=t0+D2*(1/f);
ci=y(nt,:);
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,2);
nt=length(y);
subplot ('position',[0.3 0.7 0.3 0.22]) %(332)
plot(t,y(:,5),'b'); grid on; hold on; axis tight;
subplot ('position',[0.3 0.4 0.3 0.22]) %(333)
plot(t,y(:,4),'b'); grid on; hold on; axis tight ;
subplot ('position',[0.3 0.1 0.3 0.22]) %(335)
plot(t,(y(:,4).*y(:,5)),'b');grid on;hold on; axis tight ;
subplot ('position',[0.65 0.1 0.3 0.22]) %(339)
plot(t,y(:,3),'b');grid on;hold on; axis tight ;
    if (p==0)&&(i<=N-N1)

        subplot ('position',[0.3 0.7 0.3 0.22]) %(332)
        grid on; hold off; axis tight;
%
        subplot ('position',[0.3 0.4 0.3 0.22]) %(333)
        grid on; hold off; axis tight ;
%
        subplot ('position',[0.3 0.1 0.3 0.22]) %(335)
        grid on;hold off; axis tight ;
        subplot ('position',[0.65 0.1 0.3 0.22]) %(339)
        grid on;hold off; axis tight ;
%
    end

```

```

%% % ----- interval=3
ci=y(nt,:);
if(D3~=0)
t0=tf;
tf=t0+D3*(1/f);
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,3);
nt=length(y);
subplot ('position',[0.3 0.7 0.3 0.22])   %(332)
plot(t,y(:,5),'g'); grid on; hold on; axis tight;
subplot ('position',[0.3 0.4 0.3 0.22])   %(333)
plot(t,y(:,4),'g'); grid on; hold on; axis tight ;
subplot ('position',[0.3 0.1 0.3 0.22])   %(335)
plot(t,(y(:,4).*y(:,5)),'g');grid on;hold on; axis tight ;
subplot ('position',[0.65 0.1 0.3 0.22])   %(339)
plot(t,y(:,3),'g');grid on;hold on; axis tight ;
    if (p==0)&&(i<=N-N1)
        subplot ('position',[0.3 0.7 0.3 0.22])   %(332)
        grid on; hold off; axis tight;
        subplot ('position',[0.3 0.4 0.3 0.22])   %(333)
        grid on; hold off; axis tight ;
        subplot ('position',[0.3 0.1 0.3 0.22])   %(335)
        grid on;hold off; axis tight ;
        subplot ('position',[0.65 0.1 0.3 0.22])   %(339)
        grid on;hold off; axis tight ;
%
    end

end
end
if p==1
tf=0;
t=0;
    for i=1:N
nt=length(t);
t0=tf;
tf=t0+D*T;
ci=y(nt,:);
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,1);
nt=length(y);
to=[to;t(2:nt)];
Itr=y(:,3)+y(:,4).*sqrt(L2./L1);
Vtr=0.*ones(nt,1);
Vtr1=[Vtr1;Vtr(2:nt)];
Itr1=[Itr1;Itr(2:nt)];

```

```

t0=tf;
tf=t0+D2*T;
ci=y(nt,:);
%-----interval=2;
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,2);
nt=length(y);
to=[to;t(2:nt)];
Itr=0.*ones(nt,1);
Vtr=ones(nt,1).*E*(1+sqrt(L1/L3));
Vtr1=[Vtr1;Vtr(2:nt)];
Itr1=[Itr1;Itr(2:nt)];
ci=y(nt,:);
    if(D3~=0)
t0=tf;
tf=t0+D3*T;
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,3);
nt=length(y);
to=[to;t(2:nt)];
Itr=0.*ones(nt,1);
Vtr=ones(nt,1).*E;
Vtr1=[Vtr1;Vtr(2:nt)];
Itr1=[Itr1;Itr(2:nt)];
        end
        end
    else
tf=0;
t=0;
        for i=1:N

nt=length(t);
t0=tf;
tf=t0+D*T;
ci=y(nt,:);
%-----interval 1
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,1);
nt=length(y);
if((N-i)<3)
to=[to;t(2:nt)];
Itr=y(:,3)+y(:,4).*sqrt(L2./L1);
Vtr=0.*ones(nt,1);
Vtr1=[Vtr1;Vtr(2:nt)];
Itr1=[Itr1;Itr(2:nt)];

```

```

end
% ----- interval=2;
t0=tf;
tf=t0+D2*T;
ci=y(nt,:);
%-----interval 2;
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,2);
nt=length(y);
if((N-i)<3)

    to=[to;t(2:nt)];
    Itr=0.*ones(nt,1);
    Vtr=ones(nt,1).*E*(1+sqrt(L1/L3));
    Vtr1=[Vtr1;Vtr(2:nt)];
    Itr1=[Itr1;Itr(2:nt)];
end
% ----- interval 3
ci=y(nt,:);
if(D3~=0)
t0=tf;
tf=t0+D3*T;
[t
y]=ode45(@ecuatii_forward2,[t0,tf],[ci],[],E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C
,R,D,N,p,Lm,3);
nt=length(y);
if((N-i)<3)

    to=[to;t(2:nt)];
    Itr=0.*ones(nt,1);
    Vtr=ones(nt,1).*E;
    Vtr1=[Vtr1;Vtr(2:nt)];
    Itr1=[Itr1;Itr(2:nt)];
end
end%if(D3~=0)
    end%for i=1:N
        end%if(p==1)
Vtr1=Vtr1(1:end-3);
Itr1=Itr1(1:end-3);
subplot ('position',[0.65 0.7 0.3 0.22]) %(336)
plot(to(1:length(Vtr1)),Vtr1,'r');
title([' Raportul de Transformare Ns/Np = ', num2str(zzz)]);
grid on;hold on; axis tight ;
ylabel('Utr [ V ]');
subplot ('position',[0.65 0.4 0.3 0.22]) %(338)
plot(to(1:length(Itr1)),Itr1,'r');
title([' Inductanta mutuala M= ', num2str(M)]);

```

```

grid on;hold on; axis tight ;
ylabel('Id [ A ]');
subplot ('position',[0.3 0.7 0.3 0.22])   %(332)
ylabel ('Us [ V ]');
subplot ('position',[0.3 0.4 0.3 0.22])   %(333)
ylabel ('Is [ A ]');
subplot ('position',[0.3 0.1 0.3 0.22])   %(335)
ylabel ('Ps [ W ]');
xlabel('timp [ s ]')
subplot ('position',[0.65 0.1 0.3 0.22])  %(339)
ylabel ('Imag [ A ]');
title (['Inductanta de magnetizare    Lm = ' , num2str(Lm)]);
xlabel('timp [ s ]')

```

### Fișierul ECUATII FORWARD

```

function
dy=ecuatii_forward2(t,y,E,L1,L2,L3,R1,R2,f,k,L,C,R,D,N,p,Lm,interva
l)
dy=zeros(5,1);
M=k*sqrt(L1*L2);
Det=(-L1.*(L2+L))+M.^2;
%-----
switch interval
    case 1
        dy(1)=(M.*(y(5)+R2*y(2))-(L1*(L+L2)*(E-y(1)*R1)))./Det;      % i1
        dy(2)=(L1.*(R2.*y(2)+y(5))-M.*(E-R1.*y(1)))./Det;           % i2
        dy(3)=E./Lm;                                                  % im
        dy(4)=sqrt(L2/L1)*(E./L)-(Lm.*y(3))-y(5)./L;                 % iL
        dy(5)=(y(4)./C)-y(5)./(R*C);                                  % uc=u
    case 2
        dy(1)=(E-R1.*y(1))./L1;                                       % i1(Lm*(E-R.*y(1)))
        dy(2)=(L1.*(R2.*y(2)+y(5))+Lm.*(E-R1.*y(1)))./Det;
        dy(3)=-E*sqrt(L1/L3)./Lm;
        dy(4)=-y(5)./L;
        dy(5)=(y(4)./C)-y(5)./(R*C);
    case 3
        dy(1)=0;
        dy(2)=(L1.*(R2.*y(2)+y(5))-Lm.*(E-R1.*y(1)))./Det;
        dy(3)=0;
        dy(4)=-y(5)./L;
        dy(5)=(y(4)./C)-y(5)./(R*C);
end

```

Rezultatele ce se obțin în urma rulării fișierelor prezentate anterior sunt ilustrate în figura următoare. Așa cum reiese și din imagine platforma de simulare acceptă un set de date de intrare referitoare la tensiunea de alimentare, frecvența de lucru precum și valorile transformatorului și

returnează formele de undă caracteristice pentru tensiunea de ieșire, curentul de sarcină, tensiunea pe tranzistorul de comutație ori curentul prin dioda convertorului. În același timp se calculează și raportul de transformare al transformatorului precum și inductanța mutuală sau inductanța de magnetizare ce apare pe înfășurările transformatorului.

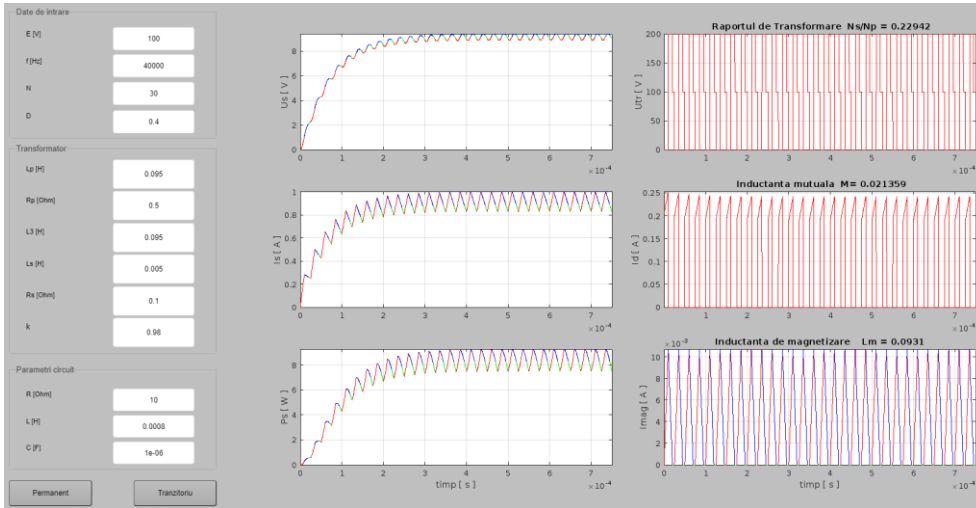


Figura 4.19 Rezultatele obținute în urma simulării convertorului Forward în regim tranzitoriu

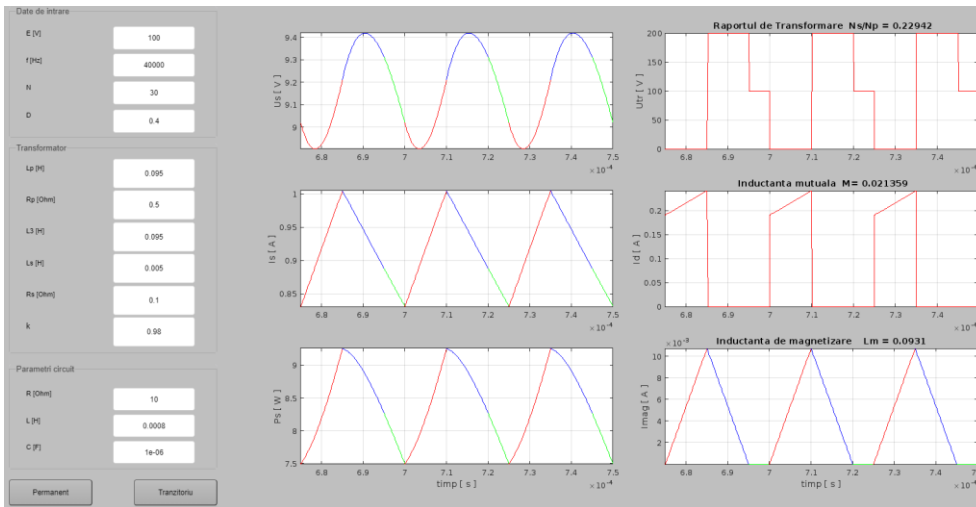


Figura 4.20 Rezultatele obținute în urma simulării convertorului Forward în regim tranzitoriu

## 4.5 Convertorul Flyback

La fel ca și convertorul Forward, convertorul Flyback este un convertor dc-dc ce oferă izolare între intrare și ieșire și funcționează în mod asemănător convertorului Buck-Boost, cu deosebirea că circuitul magnetic este format dintr-un transformator cu înfășurarea secundară bobinată în sens opus față de înfășurarea primară, folosit în general la puteri relativ mici până la 200W (datorită volumului mare al transformatorului necesar la puteri mari). Schema de principiu a convertorului Flyback este prezentată în figura 4.21, unde se evidențiază prezența transformatorului ce îndeplinește funcția de dispozitiv de înmagazinare a energiei, iar ca un avantaj asupra convertorului Forward am putea preciza prezența unui singur element inductiv.

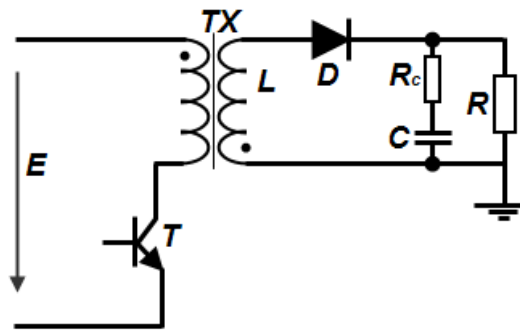


Figura 4.21 Schema de principiu a convertorului Flyback

Analiza convertorului Flyback pornește de la stările de conducție și blocare ale tranzistorului și la fel ca convertoarele prezentate anterior permite funcționarea atât în regim de conducție neîntrerupt, cât și în regim de conducție întrerupt. Dacă privim circuitul dinspre secundar înspre sarcină acesta este similar cu convertorul Buck-Boost și analiza se poate reduce asupra convertorului fără transformator prin simpla înlocuire a tensiunii de alimentare cu valoarea acesteia raportată la raportul de transformare primar-secundar al transformatorului. Astfel pe durata de conducției tranzistorului, dioda este blocată și întreaga energie este stocată în primarul transformatorului. Relațiile matematice ale curentului prin bobina  $L$  și ale tensiunii pe condensator, ce se pot deduce pentru acest interval de funcționare sunt date de relația 4.60.



$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{E}{rap \cdot L} \\ \frac{du_c}{dt} = -\frac{u_c}{(R + R_c) \cdot C} \end{cases} \quad 4.93$$

, unde cu  $rap$  s-a notat raportul de transformare, iar cu  $R_c$  rezistența serie a condensatorului.

În momentul în care tranzistorul se blochează, tensiunea pe înfășurările transformatorului se inversează și astfel dioda intră în conducție, energia stocată în intervalul anterior în primar fiind acum transmisă sarcinii. Ecuațiile matematice ale curentului prin bobină și a tensiunii pe condensator, ce se pot deduce pentru acest interval de funcționare sunt exprimate în relația (4.61).

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R}{R + R_c} \cdot \frac{u_c + R_c \cdot i_L}{L} \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{R \cdot i_L - u_c}{(R + R_c) \cdot C} \end{cases} \quad 4.94$$

Cele două situații prezentate anterior caracterizează regimul CCM de funcționare în care valoarea curentului în secundarul transformatorului nu atinge valoarea zero. Tensiunea la ieșirea convertorului se poate exprima ca fiind:

$$u_0 = \frac{E}{rap} \cdot \frac{D}{1 - D} \quad 4.95$$

, iar curentul de sarcină care reprezintă valoarea medie a curentului prin diodă este dat de:

$$I_s = \frac{I_{Lmax} + I_{Lmin}}{2} \cdot \frac{1 - D}{T} \quad 4.96$$

Funcționare în regim de conducție întrerupt duce la apariția unui nou interval de funcționare a convertorului caracterizat de atingerea valorii de zero a curentului prin bobină. În acest interval cele două comutatoare, tranzistorul și dioda sunt blocate, astfel curentul din secundarul transformatorului este zero. Ecuațiile matematice ce se pot deduce pentru acest interval sunt:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = 0 \\ \frac{du_c}{dt} = -\frac{u_c}{(R + R_c) \cdot C} \end{cases} \quad 4.97$$

Valoarea tensiunii de ieșire a convertorului Flyback, în regim DCM de funcționare se poate exprima ca fiind:

$$\begin{cases} v = D \cdot \sqrt{0.5 \cdot T \cdot \frac{R}{L}} \\ u_0 = v \cdot \frac{E}{rap} \end{cases} \quad 4.98$$

### 2.3. Convertorul Push-Pull

Convertorul dc-dc în contratimp e alcătuit din două comutatoare active care funcționează în antifază. O schemă de principiu a acestui convertor este prezentată în figura 4.22.

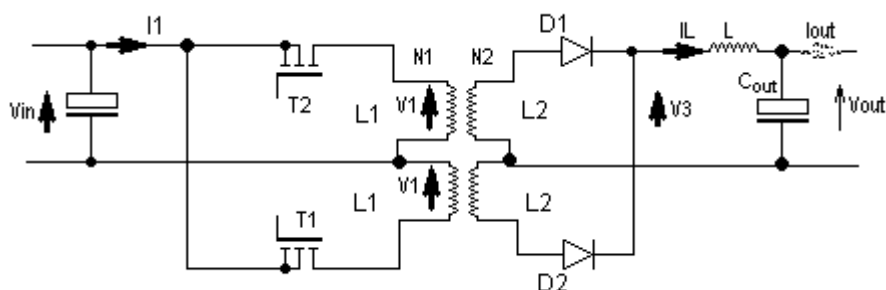


Figura 4.22 Schema de principiu a convertorului Push-Pull

Principiul de funcționare al acestui convertor implică deținerea unor secvențe de lucru. Astfel, în prima secvență de funcționare putem considera tranzistorul T1 deschis și tranzistorul T2 închis, ceea ce implică conducția diodei D2 și blocarea diodei D1. Următoarea secvență T1 este închis și T2 este deschis, ceea ce presupune conducția diodei D1 și blocarea diodei D2. Diodele D1 și D2 redresează tensiunea din secundarul transformatorului și energia este livrată o parte sarcinii  $R_s$  iar o parte este stocată în bobina L. Pe durata intervalului când cele două tranzistoare T1 și T2 sunt blocate, secundarul transformatorului este scurtcircuitat de cele două diode D1 și D2

aflăte ambele în stare de conducție pe baza energiei acumulate în bobina L. Putem exprima tensiunea pe bobina L a convertorului în funcție de conducția sau blocarea tranzistorului ca în relațiile următoare.

Durata de conducție a tranzistorului:

$$U_L = \frac{U_i}{n} - U_s = L \cdot \frac{\Delta I_L}{T_C} = L \cdot \frac{I_{L\max} - I_{L\min}}{T_C} \quad 4.99$$

Durata de blocare a tranzistorului:

$$U_L = -U_s = -L \cdot \frac{\Delta I_L}{T_B} = -L \cdot \frac{I_{L\max} - I_{L\min}}{T_B} \quad 4.100$$

De unde rezultă:

$$U_s = \frac{U_i}{n} \cdot \frac{T_C}{T_C + T_B} = \frac{U_i}{n} \cdot 2 \cdot \delta \quad 4.101$$

Unde  $T_C$  și  $T_B$  reprezintă perioada de conducție respectiv perioada de blocare a celor două tranzistoare, iar  $\delta = \frac{T_C}{T}$  reprezintă factorul de umplere al semnalului de comandă. Pentru a evita conducția simultană a tranzistoarelor T1 și T2 se impune condiția  $\delta_{\max} \leq 0,5$ . Deoarece în regim staționar, valoarea medie a curentului prin condensator este zero, curentul de sarcină va fi egal cu valoarea medie a curentului prin bobină

Valoarea minimă a curentului prin bobină:

$$I_{L\min} = I_s - \frac{\Delta I_L}{2} = I_s - \frac{U_i \cdot T}{2 \cdot n \cdot L} \cdot \delta \cdot (1 - 2 \cdot \delta) \quad 4.102$$

Valoarea maximă a curentului prin bobină:

$$I_{L\max} = I_s + \frac{\Delta I_L}{2} = I_s + \frac{U_i \cdot T}{2 \cdot n \cdot L} \cdot \delta \cdot (1 - 2 \cdot \delta) \quad 4.103$$

Pe durata conducției unui tranzistor , curentul de magnetizare crește liniar de

$$\text{la } -\frac{\delta \cdot U_i \cdot T}{2 \cdot L_1} \text{ la } +\frac{\delta \cdot U_i \cdot T}{2 \cdot L_1} .$$

Când acesta se blochează, curentul de magnetizare este forțat să circule prin diodele D1 și D2 . Astfel, curentul de sarcină și curentul de magnetizare se adună într-o diodă și se scad în cealaltă . Pentru a determina curenții prin diode , scriem legea conservării fluxului magnetic. Considerăm momentul  $\theta_-$ , momentul dinaintea blocării tranzistorului T1, conduc simultan în acest interval tranzistorul T1 și dioda D2, iar după terminarea intervalului , la momentul  $\theta_+$  ambele tranzistoare fiind blocate ca urmare a limitării factorului de umplere, intră în conducție ambele diode. Putem scrie așa:

$$\phi_{L2}(0_-) = L_2 \cdot i_{L2} - M_{12} \cdot i_{T1} \quad 4.104$$

$$\phi_{L2}(0_+) = L_2 \cdot i_{D2} - M_{22} \cdot i_{D1} \quad 4.105$$

M12- este inductivitatea mutuală între L1 si L2

M22- este inductivitatea mutuală între L2 și L2

$$M_{12} = \sqrt{L_1 \cdot L_2} , M_{22} = \sqrt{L_2 \cdot L_2} , \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad 4.106$$

Dacă curentul de sarcină scade sub o anumită valoare limită , curentul prin diode este insuficient să poată transporta și curentul de magnetizare (de sens opus). Prin urmare apare fenomenul de conducție întreruptă al convertorului.

$$I_{M \max} = \frac{U_i \cdot T_C}{L_1 \cdot 2} = \frac{U_i \cdot \delta \cdot T}{2 \cdot n^2 \cdot \lambda \cdot L} \quad 4.107$$

Valoarea minimă a bobinei L , necesară pentru evitarea conducerii întrerupte, pentru o valoare a curentului minim se poate calcula cu ajutorul relației :

$$L = \frac{U_{i \max} \cdot T}{n \cdot I_{SL}} \cdot \frac{\delta_{\min}}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\lambda} - 2 \cdot \delta_{\min} \right) \quad 4.108$$

Dacă în cazul convertoarelor flyback și forward se utilizează doar jumătate din curba B-H, pentru proiectarea convertoarele în contratimp este considerată toata curba de magnetizare. Deși ne-am aștepta ca volumul de miez să fie înjumătățit pentru acest convertor nu se întâmplă acest fapt deoarece crește curentul de magnetizare la curent mic de sarcină iar magnetizarea este asimetrică datorită timpilor de conducție inegali ai tranzistoarelor. O dimensionare a transformatorului de lucru este prezentată în relațiile următoare.

Volumul miezului transformatorului:

$$V_{CT} = 4 \cdot \mu_o \cdot \mu_a \cdot \frac{I_{M \max}^2 \cdot L_1}{B_{\max}^2} \quad 4.109$$

Raportul de transformare:

$$n = \frac{U_{i \min} \cdot 2 \cdot \delta_{\max}}{U_S} \quad 4.110$$

Numărul de spire din primar se poate calcula cu relația:

$$N_1 = \frac{2 \cdot U_{i \max} \cdot \delta_{\max} \cdot T}{A_e \cdot B_{\max}} \quad 4.111$$

Numărul de spire din secundar va fi:

$$N_2 = \frac{N_1}{n} \quad 4.112$$

Curentul maxim prin tranzistor

$$I_{T \max} = \frac{I_{L \max}}{n} + \frac{n \cdot U_S \cdot T}{4 \cdot L_1} \quad 4.113$$

Tensiunea maximă pe tranzistor

$$U_{T \max} = 2 \cdot U_{i \max} \quad 4.114$$

## 4.6 Platformă Matlab de simulare a convertoarelor cu separare galvanică flyback, push pull, half/full-bridge

Pornind de la modelele matematice prezentate anterior în continuare se prezintă o implementare a unui platforme de simulare și proiectare a unor convertoare ce prezintă un transformator de izolare în componența lor. Această platformă este realizată pentru a permite utilizatorului să selecteze tipul convertorului ce urmează a fi analizat și să returneze pe baza calculelor date de ieșire caracteristice unei proiectări a convertorului analizat.

Platforma este structurată în 3 fișiere de tip funcție care se apelează între ele pentru a combina atât partea de calcule a mărimilor de interes precum și a returna utilizatorului formele de undă ale variației tensiunii ori curentului caracteristice valorilor de intrare introduse.

### FISIERUL START

```
close all
clear all
%comments
%declaram si initializam variabile de intrare pentru convertoarele
cu separare galvanica
    Duty_cycle=50           ; %factorul de umplere
    Duty_cycle_min=10      ; %factor de umplere min
    Duty_cycle_max=50      ; %factor de umplere max
    n=1                    ; %raportul dintre numarul de spire
    Ns=10                  ; %numarul de spire in secundar
    Ns_aux=10              ; %numarul de spire al infasurarii
auxiliare
    Np=100                 ; %numarul de spire in primar
    Bmax=0.3               ; %inductia maxima
    uE = 50                ; %permeabilitatea efectiva
    uA = 1000              ; %permeabilitatea de amplitudine
    u0 =4*pi*10^(-7)      ; %permeabilitatea vidului
    Ve = 1                 ; %Volumul miezului transofmatorului
    Veb= 1                 ; %Volumul miezului bobinei
    AL=140                 ; %inductivitatea specifica
    epsilon=12             ; %multiplicator Lagrange
    lambda=3               ; %raportul dintre inductivitati

%declaram variabilele intermediare
    selectare_circuit=4 ; %variabila folosita pentru determinarea
circuitului ales
```

```
    setari_default=0 ; %variabila folosita pentru a introduce
    valorile initiale pentru fiecare circuit in parte
%declaram variabilele de iesire
    Urp = 1 ; %caderea de tensiune pe rezistenta de
pierderi
    Vout_prim=1 ; %Vout
    Lmin =1 ; %inductanta minima
    ILmin=1 ; %curentul minim prin bobina
    ILmax=1 ; %curentul maxim prin bobina
    deltaIL=1 ; %diferenta dintre curentul maxim si minim
prin bobina
    UTmax =1 ; %tensiunea maxima prin tranzistor
    ITmax=1 ; %curentul maxim prin tranzistor
    UDmax =1 ; %caderea de tensiune maxima pe dioda
    IDmax =1 ; %curentul maxim prin dioda
    IDmed=1 ; %curentul mediu prin dioda
    C=1 ; %valoarea condensatorului
    Ic_ef=1 ; %valoarea efectiva a curentului prin
condensator
    tr=1 ; %raspunsul convertorului la variatia brusca
a sarcinii
    deltaUs=1 ; %variatia de tensiune pe sarcina
    Vin_med =1 ; %tensiunea medie la intrare
    T =1 ; %perioada
    L1=10 ; %inductivitatea L1
    L2=20 ; %inductivitatea L2
    IMmax=10 ; %curentul de magnetizare maxim
    IDmax1=10 ; %intensitatea maxima a curentului pe dioda1
    IDmax2=10 ; %intensitatea maxima a curentului pe dioda2
    IDmax3=10 ; %intensitatea maxima a curentului pe dioda3
    UDmax1=10 ; %tensiunea maxima pe dioda1
    UDmax2=10 ; %tensiunea maxima pe dioda2
    UDmax3=10 ; %tensiunea maxima pe dioda3
%apelarea fisierului interfata
interfata(selectare_circuit,Vin_min,Vin_max,Vout,Iout_max,Iout_min,
f,Vf,Rpl,Rpc,Duty_cycle,Urp,Vout_prim,Lmin,ILmin,ILmax,deltaIL,UTma
x,ITmax,UDmax,IDmax,IDmed,C,Ic_ef,tr,deltaUs,Vin_med,T,setari_defau
lt,Duty_cycle_min,Duty_cycle_max,n,Np,Ns,Bmax,uE,u0,Ve,AL,epsilon,l
ambda,L1,L2,IMmax,Ns_aux,IDmax1,IDmax2,IDmax3,UDmax1,UDmax2,UDmax3,
uA,Veb);
```

## FISIERUL INTERFATA

### function

```
interfata(selectare_circuit,Vin_min,Vin_max,Vout,Iout_max,Iout_min,
f,Vf,Rpl,Rpc,Duty_cycle,Urp,Vout_prim,Lmin,ILmin,ILmax,deltaIL,UTma
x,ITmax,UDmax,IDmax,IDmed,C,Ic_ef,tr,deltaUs,Vin_med,T,setari_defau
lt,Duty_cycle_min,Duty_cycle_max,n,Np,Ns,Bmax,uE,u0,Ve,AL,epsilon,l
```

```
ambda,L1,L2,IMmax,Ns_aux,IDmax1,IDmax2,IDmax3,UDmax1,UDmax2,UDmax3,  
uA,Veb);
```

```
%-----Afisarea parametrilor de start-----
```

```
if setari_default==0  
    switch selectare_circuit  
        case 4  
            Vin_min=48        ; %tensiunea minima de intrare  
            Vin_max=80        ; %tensiunea maxima de intrare  
            Vout = 12         ; %tensiunea la iesire  
            Iout_max= 25      ; %intensitatea curentului la iesire  
            Iout_min= 2       ; %intensitatea curentului la iesire  
            f= 80             ; %frecventa de comutatie a  
tranzistoarelor  
            Vf= 0.6           ; %caderea de tensiune pe dioda  
            Rpl=0.008         ; %rezistenta parazita pe bobina  
            Rpc=0.03          ; %rezistenta parazita pe bobina  
            deltaUs=0.4       ; %variatia tensiunii pe sarcina  
            Bmax=0.3          ;  
            AL=140            ;  
        case 5  
            Vin_min=213       ; %tensiunea minima de intrare  
            Vin_max=340       ; %tensiunea maxima de intrare  
            Vout = 5          ; %tensiunea la iesire  
            Iout_max= 60      ; %intensitatea curentului la iesire  
            Iout_min= 2       ; %intensitatea curentului la iesire  
            f= 40             ; %frecventa de comutatie a  
tranzistoarelor  
            Vf= 0.5           ; %caderea de tensiune pe dioda  
            Rpl=0.003         ; %rezistenta parazita pe bobina  
            Rpc=0.025         ; %rezistenta parazita pe bobina  
            deltaUs=0.4       ; %variatia tensiunii pe sarcina  
            Bmax =0.2         ;  
            AL=349            ;  
            lambda=3          ;  
            epsilon=10        ;  
        case 6  
            Vin_min=213       ; %tensiunea minima de intrare  
            Vin_max=340       ; %tensiunea maxima de intrare  
            Vout = 5          ; %tensiunea la iesire  
            Iout_max= 60      ; %intensitatea curentului la iesire  
            Iout_min= 2       ; %intensitatea curentului la iesire  
            f= 40             ; %frecventa de comutatie a  
tranzistoarelor  
            Vf= 0.5           ; %caderea de tensiune pe dioda  
            Rpl=0.003         ; %rezistenta parazita pe bobina  
            Rpc=0.025         ; %rezistenta parazita pe bobina
```



```
deltaUs=0.4      ; %variatia tensiunii pe sarcina
Bmax =0.2        ;
AL=349           ;
lambda=3         ;
epsilon=10       ;
Duty_cycle_max=50;
case 7
  Vin_min=300    ; %tensiunea minima de intrare
  Vin_max=340    ; %tensiunea maxima de intrare
  Vout = 24      ; %tensiunea la iesire
  Iout_max= 10   ; %intensitatea curentului la iesire
  Iout_min= 1    ; %intensitatea curentului la iesire
  f= 100         ; %frecventa de comutatie a
tranzistoarelor
  Vf= 0.5        ; %caderea de tensiune pe dioda
  Rpl=0.020      ; %rezistenta parazita pe bobina
  Rpc=0.280      ; %rezistenta parazita pe bobina
  deltaUs=0.4    ; %variatia tensiunii pe sarcina
  Bmax =0.3      ;
  AL=349         ;
  lambda=3       ;
  epsilon=10     ;
  Duty_cycle_max=40;
case 8
  Vin_min=300    ; %tensiunea minima de intrare
  Vin_max=340    ; %tensiunea maxima de intrare
  Vout = 24      ; %tensiunea la iesire
  Iout_max= 10   ; %intensitatea curentului la iesire
  Iout_min= 1    ; %intensitatea curentului la iesire
  f= 100         ; %frecventa de comutatie a
tranzistoarelor
  Vf= 0.5        ; %caderea de tensiune pe dioda
  Rpl=0.020      ; %rezistenta parazita pe bobina
  Rpc=0.280      ; %rezistenta parazita pe bobina
  deltaUs=0.4    ; %variatia tensiunii pe sarcina
  Bmax =0.3      ;
  AL=349         ;
  lambda=3       ;
  epsilon=10     ;
  Duty_cycle_max=50;
case 9
  Vin_min=220    ; %tensiunea minima de intrare
  Vin_max=340    ; %tensiunea maxima de intrare
  Vout = 12      ; %tensiunea la iesire
  Iout_max= 15   ; %intensitatea curentului la iesire
  Iout_min= 1.5  ; %intensitatea curentului la iesire
```

```
f= 50 ; %frecventa de comutatie a
tranzistoarelor
Vf= 0.5 ; %caderea de tensiune pe dioda
Rpl=0.020 ; %rezistenta parazita pe bobina
Rpc=0.280 ; %rezistenta parazita pe bobina
deltaUs=0.4 ; %variatiia tensiunii pe sarcina
Bmax =0.3 ;
AL=279 ;
lambda=3 ;
epsilon=10 ;
Duty_cycle_max=50;
end
end

%-----Limitari parametrui-----
%limitari valabile la toate convertoarele
if Iout_min>10
    Iout_min=10;
end
if Iout_max>100
    Iout_max=100;
end
if Iout_min<0
    Iout_min=1;
end
if Iout_max<0
    Iout_max=1;
end
if Iout_min>Iout_max
    Iout_min=Iout_max-1 ;
end
if Vin_min>Vin_max
    Vin_min=Vin_max-1;
end
if Vin_min>400
    Vin_min=400;
end
if Vin_max>400
    Vin_max=400;
end
if Vout>400
    Vout=400
end
if f>300
    f=300;
end
if Rpl>10
    Rpl=9
end
end
```

```

if Rpc>10
    Rpc=10
end

%----- Calcule -> ecuatii -----
f=1000*f;
T=1/f;
Urp=Rpl*Iout_max;
Vin_med=(Vin_min+Vin_max)/2;
Duty_cycle_max=Duty_cycle_max/100;

switch selectare_circuit
    case 4 %flyback
        Vin_max=Vin_max-Urp-1 ;%consideram Vce sat=1V
        Vin_min=Vin_min-Urp-1 ;%consideram Vce sat=1V
        Vout_prim=Vout+Vf+Urp ;
        UTmax=Vin_min+Vin_max;
        Duty_cycle_min=1-Vin_max/UTmax;
        n=Vin_max*Duty_cycle_min/(Vout*(1-Duty_cycle_min));

Lmin=(Vout*Vin_max/(n*Vout+Vin_max))^2*1/(f*2*Vout*Iout_min);
    Duty_cycle_max=n*Vout/(Vin_min+n*Vout);

ILmax=Iout_max*(1+n*Vout/Vin_min)+10*Vin_min*n*Vout/(f*2*Lmin*n*Vout*Vin_min);
    ILmin=Iout_max*(1+n*Vout/Vin_min)-
10*Vin_min*n*Vout/(f*2*Lmin*n*Vout*Vin_min);
    deltaIL=ILmax-ILmin;
    ITmax=ILmax/n;
    UDmax=Vin_max/(n*(1-Duty_cycle_min));
    IDmax=ITmax*n;
    IDmed=Iout_max;
    deltaUS=Rpc*ILmax;
    C=T*10^6*Iout_max/deltaUS*n*Vout/(Vin_min+n*Vout);
    Ic_ef=sqrt(Iout_max^2/1-
Duty_cycle_min*(Duty_cycle_min+Iout_min/(Iout_min/sqrt(2))^2));
    %pentru transformator
    Ns=sqrt(Lmin*10^9/AL);
    Np=Ns*n ;
    Ve=(u0*10^6*uE*ILmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;
    case 5 %forward ST
        Vout=Vout+Vf+Urp ;
        Duty_cycle_max=0.45;
        Duty_cycle_min=Duty_cycle_max*Vin_min/Vin_max;
        n=Duty_cycle_max*Vin_max/Vout;
        Lmin=epsilon*Vin_max*(1-
Duty_cycle_min)*Duty_cycle_min*T/(2*n*Iout_max);

```

```

        ILmax=Iout_max+Vin_max*T/(2*n*Lmin)*Duty_cycle_min*(1-
Duty_cycle_min);
        ILmin=Iout_max-Vin_max*T/(2*n*Lmin)*Duty_cycle_min*(1-
Duty_cycle_min);
        deltaIL=ILmax-ILmin;
        UTmax=2.2*Vin_max;
        UDmax=2*Vin_max ;
        L1=lambda*n^2*Lmin*10^6;
        L2=lambda*Lmin*10^6;
        IMmax=n*Vout*T*10^6/L1;
        ITmax=Iout_max/n+IMmax;
        Np=Vin_max*Duty_cycle_max*T*10^6/(AL*Bmax);
        Ns=Np/n;
        Ns_aux=Ns;
        IDmax=IMmax;
        Ve=(u0*10^6*uA*IMmax^2*L1/Bmax^2)/10^6 ;
        Veb=(u0*10^6*uE*ILmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;
        deltaUS=Rpc*ILmax;
        T=T*10^6;
        C=Vin_max*(1-
Duty_cycle_min)*Duty_cycle_min*T^2/(8*n*Lmin*10^6*deltaUs);
        Ic_ef=Iout_max/(epsilon*sqrt(3));
        %diode
        UDmax3=UDmax;
        IDmax3=IDmax;
        UDmax1=Vout/Duty_cycle_min;
        UDmax2=UDmax1 ;
        IDmax1=Iout_max*(1+1/epsilon);
    case 6 %forward DT
        Vout=Vout+Vf+Urp ;
        Duty_cycle_max=0.45;
        Duty_cycle_min=Duty_cycle_max*Vin_min/Vin_max;
        n=Duty_cycle_max*Vin_max/Vout;
        Lmin=epsilon*Vin_max*(1-
Duty_cycle_min)*Duty_cycle_min*T/(2*n*Iout_max);
        ILmax=Iout_max+Vin_max*T/(2*n*Lmin)*Duty_cycle_min*(1-
Duty_cycle_min);
        ILmin=Iout_max-Vin_max*T/(2*n*Lmin)*Duty_cycle_min*(1-
Duty_cycle_min);
        deltaIL=ILmax-ILmin;
        UTmax=Vin_max;
        UDmax=2*Vin_max ;
        L1=lambda*n^2*Lmin*10^6;
        L2=lambda*Lmin*10^6;
        IMmax=n*Vout*T*10^6/L1;
        ITmax=ILmax/n+IMmax;
        Np=Vin_max*Duty_cycle_max*T*10^6/(AL*Bmax);
        Ns=Np/n;

```

```

Ns_aux=Ns;
IDmax=IMmax;
Ve=(u0*10^6*uE*ILmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;
deltaUS=Rpc*ILmax;
T=T*10^6;
C=Vin_max*(1-
Duty_cycle_min)*Duty_cycle_min*T^2/(8*n*Lmin*10^6*deltaUs);
Ic_ef=Iout_max/(epsilon*sqrt(3));
%diode
UDmax3=Vin_max;
IDmax3=IMmax;
UDmax1=Vout/Duty_cycle_min;
UDmax2=UDmax1 ;
IDmax1=Iout_max*(1+1/epsilon);
Ve=(u0*10^6*uA*IMmax^2*L1/Bmax^2)/10^6 ;
Veb=(u0*10^6*uE*ILmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;

case 7 %half-bridge
Vout=Vout+Urp+Vf ;
n=(Vin_min*Duty_cycle_max)/Vout;
Duty_cycle_min=n*Vout/(2*Vin_max);
Lmin=Vin_max*T/(n*Iout_min)*Duty_cycle_min/4*(1+1/lambda-
2*Duty_cycle_min);

ILmax=Iout_max+Vin_max*T*10^6/(4*n*Lmin*10^6)*Duty_cycle_min*(1-
2*Duty_cycle_min);
ILmin=Iout_max-
Vin_max*T*10^6/(4*n*Lmin*10^6)*Duty_cycle_min*(1-2*Duty_cycle_min);
deltaIL=ILmax-ILmin;
L1=lambda*n^2*Lmin*10^6;
L2=lambda*Lmin*10^6;
IMmax=Vin_max*Duty_cycle_max*T/2*10^6/(2*L1);
Np=2*Vin_max*Duty_cycle_max*T*10^6/(Bmax*AL);
Ns=Np/n;
ITmax=ILmax/n+n*Vout*T*10^6/(4*L1);
UTmax=Vin_max;
IDmax=ILmax;
UDmax=Vin_max/(2*n);
IDmed=(T/2*10^6*Duty_cycle_max+T/2*10^6*Duty_cycle_max*(1-
Duty_cycle_max)/Duty_cycle_max);
C=deltaIL*T*10^6/(16*deltaUs);
Ic_ef=Iout_min/sqrt(3);
Ve=4*(u0*10^6*uA*IMmax^2*L1/Bmax^2)/10^6;
Veb=(u0*10^6*uE*ILmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;
case 8 %full-bridge
Vout=Vout+Vf+Urp ;
n=Vin_min*2*Duty_cycle_max/Vout ;
Duty_cycle_min=n*Vout/(2*Vin_max);

```

```

Lmin=(Vin_max*T*10^6*Duty_cycle_min/(n*Iout_min^2)*(1+1/lambda-
2*Duty_cycle_min))/10^6 ;

ILmax=Iout_max+Vin_max*T*10^6/(2*n*Lmin*10^6)*Duty_cycle_min*(1-
2*Duty_cycle_min);
ILmin=Iout_max-
Vin_max*T*10^6/(2*n*Lmin*10^6)*Duty_cycle_min*(1-2*Duty_cycle_min);
deltaIL=ILmax-ILmin;
L1=n^2*lambda*Lmin*10^6;
L2=lambda*Lmin*10^6;
IMmax=Vin_max*Duty_cycle_min*T*10^6/(2*n^2*lambda*L1/10^3);
Np=2*Vin_max*Duty_cycle_max*T*10^6/(Bmax*AL);
Ns=Np/n;
Ve=4*(u0*10^6*uE*IMmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;
ITmax=ILmax/n+n*Vout*T*10^6/(4*L1);
UTmax=Vin_max;
IDmax=ILmax;
UDmax=Vin_max/n+Vout;
IDmed=(T/2*10^6*Duty_cycle_max+T/2*10^6*Duty_cycle_max*(1-
Duty_cycle_max)/Duty_cycle_max);
C=deltaIL*T*10^6/(16*deltaUs);
Ic_ef=Iout_max*0.6;
Ve=4*(u0*10^6*uA*IMmax^2*L1/Bmax^2)/10^6;
Veb=(u0*10^6*uE*ILmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;
case 9 %push-pull
Vout=Vout+Vf+Urp ;
n=Vin_min*2*Duty_cycle_max/Vout ;
Duty_cycle_min=n*Vout/(2*Vin_max);

Lmin=(Vin_max*T*10^6*Duty_cycle_min/(n*Iout_min^2)*(1+1/lambda-
2*Duty_cycle_min))/10^6 ;

ILmax=Iout_max+Vin_max*T*10^6/(2*n*Lmin*10^6)*Duty_cycle_min*(1-
2*Duty_cycle_min);
ILmin=Iout_max-
Vin_max*T*10^6/(2*n*Lmin*10^6)*Duty_cycle_min*(1-2*Duty_cycle_min);
deltaIL=ILmax-ILmin;
L1=n^2*lambda*Lmin*10^6;
L2=lambda*Lmin*10^6;
IMmax=Vin_max*Duty_cycle_min*T*10^6/(2*n^2*lambda*L1/10^3);
Np=2*Vin_max*Duty_cycle_max*T*10^6/(Bmax*AL);
Ns=Np/n;
ITmax=ILmax/n+n*Vout*T*10^6/(4*L1);
UTmax=1.2*2*Vin_max;
IDmax=ILmax;
UDmax=Vin_max/n+Vout;

```

```
        IDmed=(T/2*10^6*Duty_cycle_max+T/2*10^6*Duty_cycle_max*(1-
Duty_cycle_max)/Duty_cycle_max);
        C=deltaIL*T*10^6/(16*deltaUs);
        Ic_ef=Iout_max*0.6;
        Ve=4*(u0*10^6*uA*IMmax^2*L1/Bmax^2)/10^6;
        Veb=(u0*10^6*uE*ILmax^2*Lmin*10^6/Bmax^2)/10^6 ;

end

%----- Ploturi -> grafice -----

ploturi(selectare_circuit,Vin_min,Vin_max,Vout,Iout_max,Iout_min,f,
Vf,Rp1,Rpc,Duty_cycle,Urp,Vout_prim,Lmin,ILmin,ILmax,deltaIL,UTmax,
ITmax,UDmax,IDmax,IDmed,C,Ic_ef,tr,deltaUs,Vin_med,T,setari_default
,Duty_cycle_min,Duty_cycle_max,n,Np,Ns,Bmax,uE,u0,Ve,AL,epsilon,lam
bda,L1,L2,IMmax,Ns_aux,IDmax1,IDmax2,IDmax3,UDmax1,UDmax2,UDmax3,uA
,Veb);

FISIERUL PLOTURI
function
ploturi(selectare_circuit,Vin_min,Vin_max,Vout,Iout_max,Iout_min,f,
Vf,Rp1,Rpc,Duty_cycle,Urp,Vout_prim,Lmin,ILmin,ILmax,deltaIL,UTmax,
ITmax,UDmax,IDmax,IDmed,C,Ic_ef,tr,deltaUs,Vin_med,T,setari_default
,Duty_cycle_min,Duty_cycle_max,n,Np,Ns,Bmax,uE,u0,Ve,AL,epsilon,lam
bda,L1,L2,IMmax,Ns_aux,IDmax1,IDmax2,IDmax3,UDmax1,UDmax2,UDmax3,uA
,Veb);

T=T*10^6;
if (selectare_circuit==4) | (selectare_circuit==5) |
(selectare_circuit==6)
Tc=T*Duty_cycle_max
Tb=Tc*(1-Duty_cycle_max)/Duty_cycle_max
end

if (selectare_circuit==7) | (selectare_circuit==8) |
(selectare_circuit==9)
Tc=T/2*Duty_cycle_max
Tb=Tc*(1-Duty_cycle_max)/Duty_cycle_max
Tc2=Tc;
Tb2=Tb;
end

pas=T/1000;
t=0:pas:(3*T-pas);

%----- PLOT 1 -----
switch selectare_circuit
```

```

    case 4
        y = [Vin_max*ones(1,round(Tc)*1000/round(T-0.0001)) -
1*Vin_max*ones(1,round(Tb-0.0001)*1000/round(T-0.0001))];
        y=[y y y];
    case 5
        y = [Vin_max*ones(1,round(Tc)*1000/T) -
1*Vin_max*ones(1,round(Tb-0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
    case 6
        y = [Vin_max*ones(1,round(Tc)*1000/T) -
1*Vin_max*ones(1,round(Tb-0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
    case 7
        y = [Vin_max/2*ones(1,round(Tc)*1000/round(T))
zeros(1,round(Tb-0.0001)*1000/T) -
1*Vin_max/2*ones(1,round(Tc2)*1000/round(T)) zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
    case 8
        y = [Vin_max*ones(1,round(Tc)*1000/round(T))
zeros(1,round(Tb-0.0001)*1000/T) -
1*Vin_max*ones(1,round(Tc2)*1000/round(T)) zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
    case 9
        y = [Vin_max*ones(1,round(Tc)*1000/round(T))
zeros(1,round(Tb-0.0001)*1000/T) -
1*Vin_max*ones(1,round(Tc2)*1000/round(T)) zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
end

p=subplot('Position',[0.65 0.70 0.30 0.15]);
plot(t,y,'b','LineWidth',2);

switch selectare_circuit
    case 4
        axis([0 3*T -1*Vin_max-Vin_max/10 Vin_max+Vin_max/10]);
        title('Variatia de tensiune pe primarul
transformator','FontSize',14,'Color','w','FontWeight','demi');
        ylabel('UL[V]');
    case 5
        axis([0 3*T -1*Vin_max-Vin_max/10 Vin_max+Vin_max/10]);
        title('Variatia de tensiune pe
bobina','FontSize',14,'Color','w','FontWeight','demi');
        ylabel('UL[V]');
    case 6
        axis([0 3*T -1*Vin_max-Vin_max/10 Vin_max+Vin_max/10]);

```



```

        title('Variatia de tensiune pe
bobina', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
        ylabel('UL[V]');

        case 7
            axis([0 3*T -1*Vin_max/2-Vin_max/2/10
Vin_max/2+Vin_max/2/10]);
            title('Variatia de tensiune pe
bobina', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
            ylabel('UL[V]');
        case 8
            axis([0 3*T -1*Vin_max-Vin_max/10 Vin_max+Vin_max/10]);
            title('Variatia de tensiune pe
bobina', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
            ylabel('UL[V]');
        case 9
            axis([0 3*T -1*Vin_max-Vin_max/10 Vin_max+Vin_max/10]);
            title('Variatia de tensiune pe
bobina', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
            ylabel('UL[V]');

end

        grid on ;
        hold on ;

%----- PLOT 2 -----
t1=0:pas:Tc-pas;
t2=0:pas:Tb-pas;
y=[ILmin+deltaIL*t1/Tc ILmax-deltaIL*t2/Tb];
y=[y y y];

if selectare_circuit==4
    y=[zeros(1,round(Tc-0.0001)*1000/round(T-0.0001))
ILmin+(ILmax-ILmin)*(Tb-t2)/Tb];
    y=[y y y];
end
if selectare_circuit==7 | selectare_circuit==8 |
selectare_circuit==9
    y=[ILmin+deltaIL*t1/Tc ILmax-deltaIL*t2/Tb
ILmin+deltaIL*t1/Tc2 ILmax-deltaIL*t2/Tb2];
    y=[y y y];
end

i
p=subplot('Position',[0.65 0.50 0.30 0.15]);
plot(t,y,'b','LineWidth',2);

```

```

if selectare_circuit==4 | selectare_circuit==5 |
selectare_circuit==6 | selectare_circuit==7 | selectare_circuit==8
| selectare_circuit==9
axis([0 3*T ILmin-ILmin/10 ILmax+ILmin/10]);
end
title('Variatia curentului prin
bobina','FontSize',14,'Color','w','FontWeight','demi');

if selectare_circuit==4
axis([0 3*T -ILmin/10 ILmax+ILmin/10]);
title('Curentul prin Secundarul
trafo','FontSize',14,'Color','w','FontWeight','demi');
end

ylabel('IL[A]');
grid on ;
hold on ;
%-----
%-----
%----- PLOT 3 -----
%-----
%-----
switch selectare_circuit
case 4
t1=0:pas:Tc-pas;
t2=0:pas:Tb-pas;
y=[ILmin/n+(ITmax-ILmin/n)*t1/Tc zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/round(T-0.0001))];
y=[y y y];
case 5
t1=0:pas:Tc-pas;
t2=0:pas:Tb-pas;
y=[ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/T)];
ym=[ILmin/n+(IMmax+ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/T)];
y=[y y y];
ym=[ym ym ym];
case 6
t1=0:pas:Tc-pas;
t2=0:pas:Tb-pas;
y=[ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/T)];
ym=[ILmin/n+(IMmax+ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc zeros(1,round(Tb-
0.0001)*1000/T)];
y=[y y y];

```

```

        ym=[ym ym ym];
    case 7
        t1=0:pas:Tc-pas;
        t2=0:pas:Tb-pas;
        y=[ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc
zeros(1,round(Tb+0.0001)*1000/T) ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc2
zeros(1,round(Tb2-0.0001)*1000/T)];
        ym=[ILmin/n-IMmax+(ILmax/n-ILmin/n+2*IMmax)*t1/Tc
zeros(1,round(Tb+0.0001)*1000/T) ILmin/n-IMmax+(ILmax/n-
ILmin/n+2*IMmax)*t1/Tc2 zeros(1,round(Tb2-0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
        ym=[ym ym ym];
    case 8
        t1=0:pas:Tc-pas;
        t2=0:pas:Tb-pas;
        y=[ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc
zeros(1,round(Tb+0.0001)*1000/T) ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc2
zeros(1,round(Tb2-0.0001)*1000/T)];
        ym=[ILmin/n-IMmax+(ILmax/n-ILmin/n+2*IMmax)*t1/Tc
zeros(1,round(Tb+0.0001)*1000/T) ILmin/n-IMmax+(ILmax/n-
ILmin/n+2*IMmax)*t1/Tc2 zeros(1,round(Tb2-0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
        ym=[ym ym ym];
    case 9
        t1=0:pas:Tc-pas;
        t2=0:pas:Tb-pas;
        y=[ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc
zeros(1,round(Tb+0.0001)*1000/T) ILmin/n+(ILmax/n-ILmin/n)*t1/Tc2
zeros(1,round(Tb2-0.0001)*1000/T)];
        ym=[ILmin/n-IMmax+(ILmax/n-ILmin/n+2*IMmax)*t1/Tc
zeros(1,round(Tb+0.0001)*1000/T) ILmin/n-IMmax+(ILmax/n-
ILmin/n+2*IMmax)*t1/Tc2 zeros(1,round(Tb2-0.0001)*1000/T)];
        y=[y y y];
        ym=[ym ym ym];
end
p=subplot('Position',[0.65 0.30 0.30 0.15]);
if (selectare_circuit==5) |
(selectare_circuit==6)|(selectare_circuit==7)|
(selectare_circuit==8)|(selectare_circuit==9)
plot(t,ym,'r','LineWidth',2);
hold on ;
end
plot(t,y,'b','LineWidth',2);
switch selectare_circuit
    case 4
        axis([0 3*T -2 ITmax+2]);
        title('Variatia curentului prin
Tranzistor','FontSize',14,'Color','w','FontWeight','demi');

```

```

case 5
    axis([0 3*T -2 ITmax+IMmax+2]);
    title('Variatia curentului prin
Tranzistor', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
case 6
    axis([0 3*T -2 ITmax+IMmax+2]);
    title('Variatia curentului prin
Tranzistor', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
case 7
    axis([0 3*T -ITmax/10 ITmax+ITmax/10]);
    title('Variatia curentului prin
Tranzistor', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
case 8
    axis([0 3*T -ITmax/10 ITmax+ITmax/10]);
    title('Variatia curentului prin
Tranzistor', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
case 9
    axis([0 3*T -ITmax/10 ITmax+ITmax/10]);
    title('Variatia curentului prin
Tranzistor', 'FontSize',14, 'Color', 'w', 'FontWeight', 'demi');
end

grid on ;
hold on ;
ylabel('IT[A]');
xlabel('T[ms]');
    
```

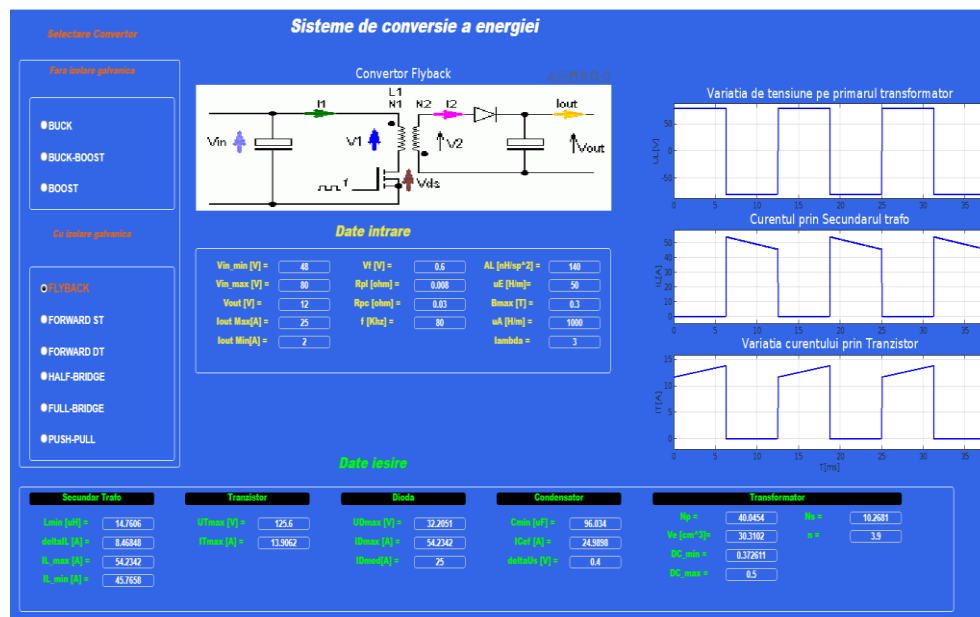


Figura 4.23 Simulare asupra convertorului Flyback

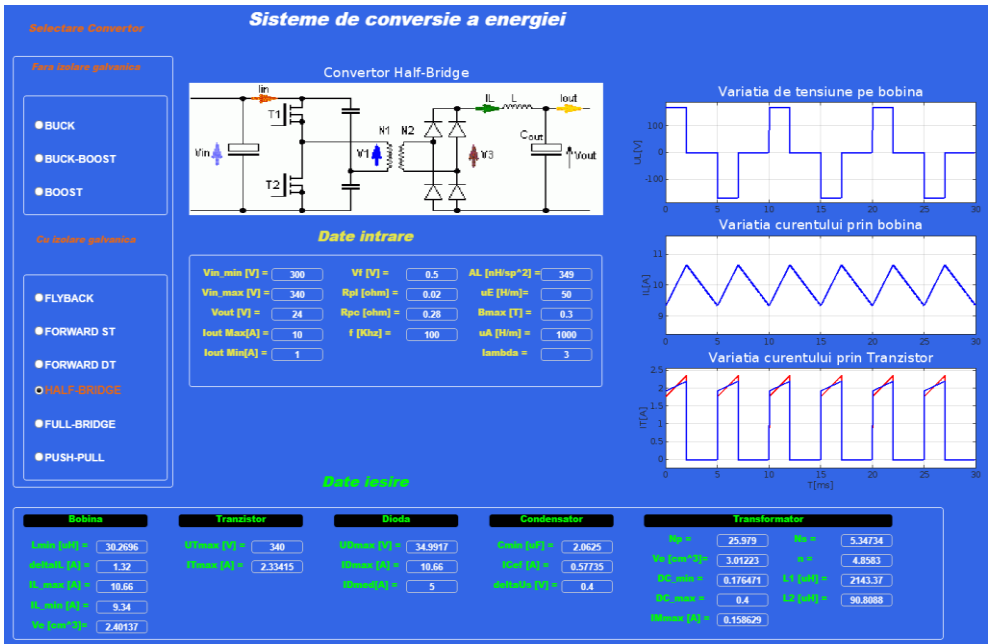


Figura 4.24 Simulare asupra convertorului Half-Bridge

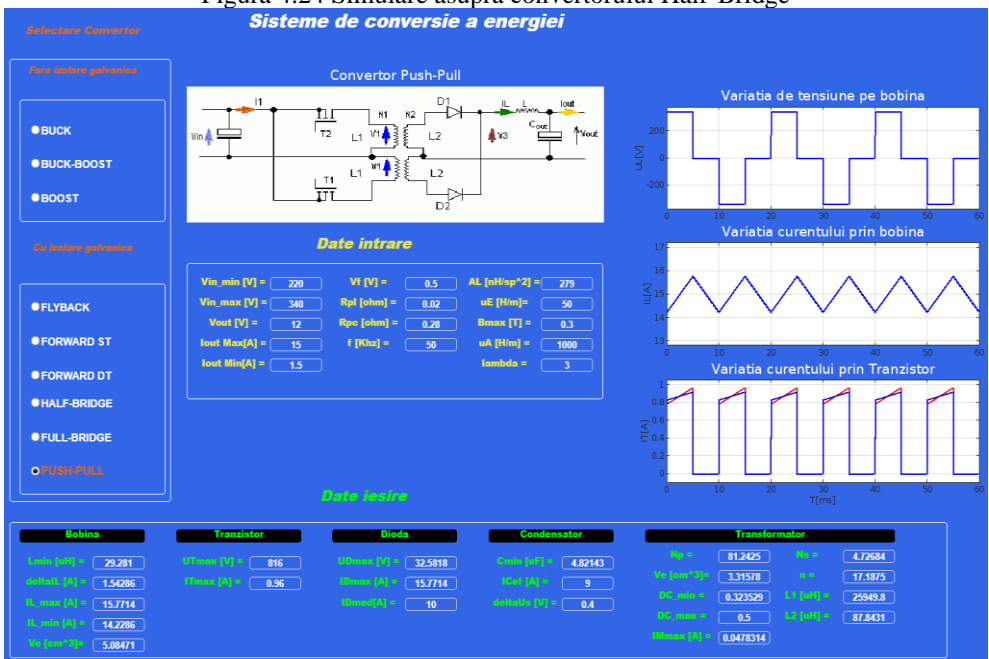


Figura 4.24 Simulare asupra convertorului Half-Bridge

Așa cum reiese din figurile anterioare liniile de cod prezentate returnează formele de undă caracteristice convertorului analizat precum și rezultatele unor valori de interes în tabul date de ieșire.

## Bibliografie

1. J.Attia- Electronics and Circuit Analysis Using Matlab, ISBN 0-8493-1176-4
2. Șerban Lungu, Ovidiu Pop, Modelarea circuitelor electronice, Casa Cartii de știință, ISBN9789736869754,2006, Cluj-Napoca
3. M. Ghinea, V. Fireșteanu, *MATLAB-calcul numeric, grafică, aplicații*, Teora 2003
4. MathWorks, 2D Plots of ODE Solutions, [http://www.mathworks.com/help/symbolic/mupad\\_ref/plot-ode2d.html](http://www.mathworks.com/help/symbolic/mupad_ref/plot-ode2d.html)
5. Gehrs K., Postel F., MuPAD, A Practical Guide, Mathematics Made Anew: Tools and Texts for Computer Aided Learning, Vol. 1, SciFace Software, Paderborn, 2003
6. The MathWorks, Inc., MATLAB – The Language of Technical Computing, Getting Started with MATLAB, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
7. Stearn, S.D., David, R.A., "Signal Processing Algorithms in Matlab", Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey 07458