# Descrierea SPICE a surselor comandate şi comutatoarelor

## I. Descrierea SPICE a surselor comandate

La modelarea circuitelor electronice pot fi folosite surse comandate, care sunt caracterizate prin una din următoarele ecuații:

$$V=f(V),\quad I=f(V),\quad V=f(I),\quad I=f(I),$$

în care funcțiile pot fi specificate într-o varietate destul de largă de moduri, argumentele funcțiilor putând fi, în unele cazuri, multidimensionale. Datorită diverselor posibilități de descriere, sursele comandate acoperă practic întregul domeniu de interes în modelare şi macromodelare.

Funcțiile se clasifică în două categorii. În prima categorie intră *funcțiile definite în domeniul timp*, care modelează dispozitive liniare sau neliniare fără memorie, instantanee, fiind descrise prin intermediul expresiilor matematice sau tabelar. În a doua categorie intră *funcțiile definite in domeniul frecvență*, care modelează funcții de transfer ale circuitelor liniare cu memorie (circuite care conțin capacități şi inductanțe). Acestea pot fi descrise prin intermediul transformatei Laplace, tabelar sau ca funcții de transfer corespunzătoare filtrelor Cebîşev.

În PSPICE pot fi definite patru tipuri de surse comandate:
– sursa de tensiune comandată în tensiune (STCT), notată cu E;
– sursa de curent comandată în tensiune (SCCT), notată cu G;
– sursa de tensiune comandată în curent (STCC), notată cu H;
– sursa de curent comandată în curent (SCCC), notată cu F.

### a) Descrierea surselor comandate în tensiune (E şi G)

Sursele comandate în tensiune (E şi G) au şapte forme generale de descriere. Primele două forme sunt acceptate în toate versiunile programului PSPICE, iar celelalte cinci forme sunt acceptate începând cu versiunea PSPICE 5.1 şi fac parte din categoria formelor extinse.

Primele două forme generale de descriere a surselor comandate în tensiune sunt următoarele:

1) [E][G]<nume> <N+> <N-> <NC+> <NC-> <câştig>
2) [E][G]<nume> <N+> <N-> POLY(<n>) <NC1+> <NC1-> [<NC2+> <NC2-> ... +<NCn+> <NCn->] <p0> <p1> <p2> <p3> <p4> <p5> …

**Prima formă** de descriere corespunde cazului surselor comandate liniar**,** în care tensiunea (curentul) sursei depinde liniar de tensiunea de comandă. Semnificația parametrilor este următoarea:
– E sau G reprezintă prefixul corespunzător surselor controlate în tensiune;
– <nume> reprezintă numele sursei, format din maxim 8 caractere;
– <N+> şi <N-> sunt nodurile (+) si (-) din circuit, între care este conectată sursa comandată;
– <NC+> şi <NC-> reprezintă nodurile (+) şi (-) corespunzătoare tensiunii de comandă;
– <câştig> reprezintă valoarea amplificării (transferului).

**A doua formă** de descriere corespunde surselor comandate neliniar, polinomial. În acest caz tensiunea (curentul) sursei depinde de una sau mai multe tensiuni de comandă, după o expresie polinomială. Parametrii din linia de descriere au următoarea semnificație:

– POLY(<n>) reprezintă specificația pentru sursele neliniare, polinomiale, unde <n> reprezintă numărul de dimensiuni ale polinomului, adică numărul tensiunilor de comandă;
– <NC1+> <NC1-> [<NC2+> <NC2-> … <NCn+> <NCn->] reprezintă cele *n* perechi de noduri corespunzătoare celor *n* tensiuni de comandă;
– <p0> <p1> <p2> <p3> … reprezintă coeficienții expresiei polinomiale. Expresiile polinomiale sunt disponibile pentru orice grad şi orice dimensiune.

*Observație:* Expresiile polinomiale pot fi implementate mult mai comod, utilizând specificația VALUE, care va fi prezentată în paragraful următor.

Considerând $V_1, V_2, ..., V_n$ tensiunile de comandă şi $V_{out}$ tensiunea comandată, expresia polinomială pentru $V_{out}$ în cazul general este:

$$V_{out}(V_1, V_2, ..., V_n) = p_0 + p_1 V_1 + ... + p_n V_n + p_{n+1} V_1^2 + p_{n+2} V_1 V_2 + ... + p_{n+n} V_1 V_n +$$
$$+ p_{2n+1} V_2^2 + p_{2n+2} V_2 V_3 + ... + p_{3n+1} V_2 V_n + ... + p_{\frac{n!}{2(n-2)!+2n}} \cdot V_n^2 + p_{\frac{n!}{2(n-2)!+2n+1}} \cdot V_1^3 + ...$$

Particularizând pentru cazul unidimensional (o tensiune de comandă), bimensional (două tensiuni de comandă), respectiv tridimensional (trei tensiuni de comandă), expresiile polinomiale sunt:

$$V_{out}(V) = p_0 + p_1 V + p_2 V^2 + p_3 V^3 + ...$$
$$V_{out}(V_1, V_2) = p_0 + p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_1^2 + p_4 V_1 V_2 + p_5 V_2^2 + p_6 V_1^3 + ...$$
$$V_{out}(V_1, V_2, V_3) = p_0 + p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3 + p_4 V_1^2 + p_5 V_1 V_2 + p_6 V_1 V_3 + p_7 V_2^2 +$$
$$+ p_8 V_2 V_3 + p_9 V_3^2 + p_{10} V_1^3 + ...$$

**Exemple:**

```
*Surse de curent controlate in tensiune
GSENSE 1 2 10 20 10 ;            GSENSE=10*(V(10)-V(20))
Gamp 13 0 POLY(1) 12 0 0 500 ;   Gamp=500*V(12)
Gneliniar 100 101 POLY(2) 1 2 3 4 0 13.6 0.2 0.005
*Gneliniar=13.6*(V(1)-V(2))+0.2*(V(3)-V(4))+0.005*(V(1)-V(2))*(V(3)-V(4))
*Surse de tensiune controlate in tensiune
E1 1 2 10 20 10 ; E1=10*(V(10)-V(20))
EAMP 13 0 POLY(1) 7 0 0 500 ;    EAMP=500*V(7)
Enel 100 101 POLY(2) 1 2 3 4 0 13.6 0.2 0.005
*Enel=13.6*(V(1,2))+0.2*(V(3,4))+0.005*(V(1,2))*(V(3,4))
```

**Formele de descriere extinse** pentru sursele comandate în tensiune E şi G apar începând cu varianta PSPICE 5.1 şi au sintaxa:

E<nume> <N+> <N-> <cuvânt_cheie_ABM>=<funcția_ABM>
G<nume> <N+> <N-> <cuvânt_cheie_ABM>=<funcția_ABM>

unde:
– <nume> este numele sursei format din maxim 8 caractere;
– <N+> şi <N-> sunt nodurile din circuit (+) si (-) între care este conectată sursa comandată;
– <cuvânt_cheie_ABM> (Analog Behavioral Modeling) specifică tipul funcției de transfer şi poate fi:

VALUE - expresie aritmetică;
TABLE - tabel puncte de frângere pentru caracteristici liniare pe porțiuni;
LAPLACE - transformată Laplace.

– <funcția_ABM> specifică funcția de transfer în formatul cerut de <cuvânt_cheie_ABM> (formulă matematică sau tabel).

Sursa de tip E (STCT) are ieşirea în tensiune, iar sursa de tip G (SCCT) are ieşirea în curent. Descrierea funcției de transfer poate conține, doar în aceste cazuri, orice combinație de tensiuni şi curenți ca argumente. Pentru aceste tipuri de surse nu mai există o diferențiere netă după tipului semnalului de comandă, iar sursele E şi G pot fi, aşadar, comandate atât de tensiuni cât şi de curenți, în acelaşi timp.

*Observație*: Sursele de tip F şi H nu admit forme extinse de descriere, însă acest lucru nu reprezint o limitare.

Pentru sursele comandate descrise prin intermediul cuvintelor cheie VALUE şi TABLE, valoarea ieşirii sursei este furnizată instantaneu, la fiecare moment de timp, această descriere fiind specifică funcțiilor de transfer ale circuitelor neliniare fără memorie.

*Observație*: Pentru analiza în domeniul frecvență (.AC), un dispozitiv neliniar este liniarizat în punctul static de funcționare şi este folosit modelul echivalent de semnal mic.

**Cele 3 forme extinse** pentru sursele comandate tip E şi G sunt prezentate pe larg în continuare.

**Descriere cu expresii matematice (VALUE)**

Sursele comandate, definite cu ajutorul opțiunii VALUE, permit ca funcția de transfer instantanee să fie introdusă sub forma unei expresii matematice.

3) [E][G]<nume> <N+> <N-> VALUE={<expresie>}

**Exemple:**

```
ESORT 5 0 VALUE={5*SQRT(V(3,2))} ;     ESQRT=5*(V(3,2))^1/2
GPSK 11 6 VALUE={15M*SIN(6.28*10K*TIME+V(3))}
*GPSK=15E-3*SIN(6.28E4*TIME+V(3))
```

În <expresie> pot fi introduse constante, parametri, tensiuni, curenți şi timp (TIME). Tensiunile pot fi tensiuni de noduri, de exemplu V(3), sau diferențe de potențial dintre două noduri, de exemplu V(2,3). Curenții de comandă trebuie să fie curenți prin surse independente de tensiune, de exemplu I(VCC).

În descrierea matematică a funcțiilor de transfer (expresiilor) se pot folosi operatorii: “+”, “-”, “*”, “/” şi paranteze: “(”, “)”. De asemenea, se pot folosi şi funcțiile matematice predefinite, cum ar fi ABS, SQRT, LOG, EXP, SIN, COS, TAN etc., precum şi funcții definite de utilizator cu ajutorul comenzii .FUNC.

**Descrierea tabelară prin puncte a caracteristicilor liniare pe porțiuni (TABLE)**

Descrierea tabelară a funcției de transfer instantanee permite introducerea datelor ridicate experimental sau a modelării liniare pe porțiuni a funcțiilor neliniare. Forma generală de descriere a unei surse comandate, care utilizează cuvântul cheie TABLE este:

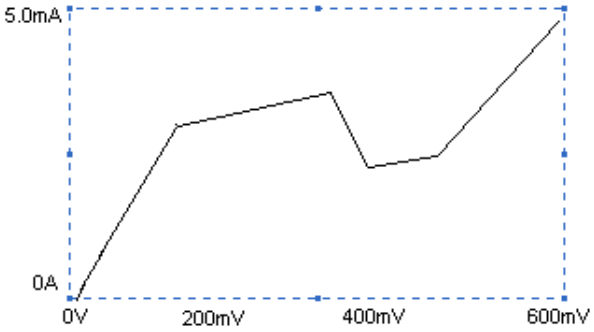
4) [E][G]<nume> <N+> <N-> TABLE {<expresie>}=<(<valoare_in>,<valoare_ieş>)>*

unde <expresie> reprezintă, în cazul general, o expresie matematică cu aceeaşi formă ca în cazul surselor definite cu ajutorul cuvântul cheie VALUE. În marea majoritatea aplicaţiilor, <expresie> se utilizează sub forma cea mai simplă şi anume se reduce doar la tensiunea de comandă {V(<NC+>,<NC->)}.
<(<valoare_in>,<valoare_ieş>)>* reprezintă coordonatele punctelor de frângere ale caracteristicii de transfer.

**Exemplu:**

```
*Functia de transfer TABLE
GRES 1 0 TABLE {V(1)}=(0,0)(0.1,3m)(0.25,3.5m)(0.3,2m)(0.4,2.2m)(0.6,5m)
Vin 1 0 0.1
.DC Vin 0 0.6 10m
.PROBE
.END
```

În figura alăturată este prezentată caracteristica statică I-V a unei diode tunel, care este modelată liniar pe porţiuni de sursa comandată GTUNEL din exemplul precedent. Sursa GTUNEL este comandată de tensiunea de la bornele sale. Exemplul evidenţiază facilitatea de modelare liniară pe porţiuni, pe baza datelor experimentale.




Din punct de vedere matematic, pe baza punctelor definite în tabel, se face o interpolare liniară cu ajutorul căreia, după evaluarea <expresie>, se calculează valoarea de ieşire. Cuvântul TABLE trebuie urmat de blanc (spaţiu). Pentru valorile <expresie> în afara domeniului definit în tabel, valoarea ieşirii este constantă şi egală cu prima ieşire din tabel când intrarea este mai mică decât prima intrare din tabel, respectiv este constantă şi egală cu ultima ieşire din tabel când intrarea este mai mare decât ultima intrare din tabel.

*Observaţie*: TABLE poate fi privită ca o extensie pentru VALUE dacă se ţine cont că intrarea poate fi o expresie matematică.

În afară de implementarea funcţiilor obţinute experimental, prin puncte, TABLE este împreună cu VALUE deosebit de utilă la implementarea unor modele instantanee ale unor dispozitive neliniare, care nu sunt implementate standard.

**Funcţii de transfer liniare, cu memorie (modelarea în domeniul frecvenţă)**

Relaţiile care definesc astfel de dispozitive nu sunt instantanee, valoarea de ieşire a unei astfel de funcţii de transfer depinzând atât de valorile instantanee ale intrărilor, cât şi de memoria acestora. În domeniul timp, această comportare se traduce matematic prin modelarea sistemului cu un set de ecuaţii diferenţiale liniare, ceea ce, prin intermediul unei transformări integrală de tip Laplace sau Fourier, conduce în domeniul frecvenţă la o expresie algebrică. Din acest motiv se preferă pentru această clasă de funcţii de transfer definirea lor în domeniul frecvenţă.

*Observaţie*: În timpul analizei .AC se evaluează valoarea ieşirii la fiecare frecvenţă de lucru. În timpul analizei .DC se evaluează valoarea ieşirii la frecvenţa 0 Hz (curent continuu). În timpul analizei .TRAN se evaluează răspunsul la impuls în domeniul timp pentru funcţia de transfer definită în frecvenţă, după care se calculează valoarea ieşirii ca produs de convoluţie în domeniul timp dintre intrare şi răspunsul la impuls al funcţiei de transfer. Trecerea din domeniul timp în domeniul frecvenţă şi invers poate cauza erori serioase dacă nu se face cu mare atenţie.

**Transformata Laplace (LAPLACE)**

Descrierea prin intermediul transformatei Laplace a funcţiei de transfer implică folosirea în cadrul expresiei a variabilei complexe laplaciene "s". Cuvântul cheie LAPLACE indică faptul că sursa comandată are o funcţie de transfer descrisă prin intermediul transformatei Laplace. Intrarea pentru funcţia de transfer este dată de <expresie>, construită identic ca în cazul VALUE. Forma de descriere a surselor comandate, ce utilizează cuvântul cheie LAPLACE este următoarea:

5) [E][G]<nume> <N+> <N-> LAPLACE {<expresie>}={<transformata>}

**Exemplu:**
```
ERC 5 0 LAPLACE {V(10)}={1/(1+0.001*s)}
*ERC=1/(1+0.001*s)*V(10)
```

*Observaţie*: În cadrul transformatei Laplace nu pot apărea tensiuni, curenţi sau TIME. <transformata> reprezintă expresia în variabila "s" a funcţiei de transfer, aşa cum se poate observa în exemplu.

Pentru analiza .AC, valoarea <expresie> va fi liniarizată în punctul static de funcţionare. <expresie> din linia de descriere a sursei reprezintă intrarea pentru funcţia de transfer. În cazul cel mai simplu şi cel mai utilizat de altfel, <expresie> se poate reduce la o singură tensiune, care va fi tensiunea de comandă a sursei (de exemplu V(3,8)). Apariţia <expresie> ca intrare pentru funcţia de transfer poate, într-un anumit context, să permită o exprimare condensată a unor modele de dispozitive neliniare cu memorie. Modelarea acestor dispozitive se face prin cascadarea unei funcţii de transfer neliniare, fără memorie (echivalentă VALUE), cu o funcţie de transfer liniară, cu memorie (pur LAPLACE).

**Exemplu:**
```
ELAPL_NL 1 0 LAPLACE {V(10)*I(VIN)}={1/(1+0.001*s)}
*ELAPL_NL=1/(1+0.001*s)*(V(10)*I(VIN))
```

**b) Descrierea surselor comandate în curent (H şi F)**

Pentru sursele comandate în curent există numai două forme generale de descriere, aceste forme fiind similare cu primele două forme de descriere a surselor comandate în tensiune:

1) [F][H]<nume> <N+> <N-> <nume_V_control> <câştig>
2) [F][H]<nume> <N+> <N-> POLY(<n>) <nume_V_control>* <p0> <p1> <p2> …

unde:

– F şi H reprezintă prefixul care specifică tipul sursei (H pentru STCC şi F pentru SCCC);
– <nume> este numele sursei format din maxim 8 caractere;
– <N+> şi <N-> sunt nodurile (+) si (-) între care este conectată sursa comandată;
– <nume_V_control> este numele sursei independente de tensiune (posibil cu valoare nulă), prin care circulă curentul de comandă;
– <câştig> este valoarea amplificării (transferului) şi corespunde cazului surselor liniare;
– POLY(<n>) reprezintă specificaţia pentru sursele neliniare, polinomiale, unde *n* reprezintă numărul de dimensiuni ale polinomului (numărul de curentenţi de comandă);
– <nume_V_control>* reprezintă în acest caz numele celor *n* surse independente de tensiune, prin care circulă cei *n* curenţi de comandă;
– <p0> <p1> <p2> <p3> … reprezintă valorile coeficienţilor expresiei polinomiale. Expresiile polinomiale sunt aceleaşi cu cele prezentate la sursele comandate în tensiune.

**Exemple:**

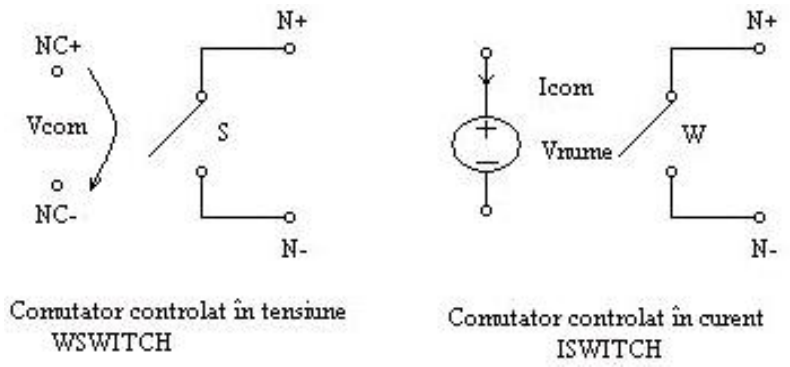
```
*SURSE DE CURENT CONTROLATE IN CURENT
Fs 1 2 VSENSE 10 ; Fs=10*I(VSENSE)
FAMP 13 0 POLY(1) VIN 0 500 ; FAMP=500*I(VIN)
Fnel 100 101 POLY(2) V1 V2 0 13.6 0.2 0.005
*Fnel=13.6*I(V1)+0.2* I(V2)+0.005* I(V1)* I(V2)
* SURSE DE TENSIUNE CONTROLATE IN CURENT
H1 1 2 VSENSE 10 ; H1=10*I(VSENSE)
HAMP 13 0 POLY(1) VIN 0 500 ; HAMP=500*I(VIN)
Hnel 100 101 POLY(2) Vcon1 Vcon2 0 13.6 0.2 0.005
*Hnel=13.6*I(Vcon1)+0.2* I(Vcon2)+0.005* I(Vcon1)* I(Vcon2)
```

*Observaţii*: Dacă pe latura prin care circulă curentul de comandă nu se află nici o sursă independentă de tensiune, atunci pe latura respectivă se va introduce o sursă independentă de tensiune de valoare nulă (V=0).

Sursele comandate în curent nu au forme extinse de descriere, dar acest lucru nu constituie oproblemă deoarece se pot folosi formele extinse de descriere a surselor E şi G.

## II. Descrierea SPICE a comutatoarelor

Un comutator ideal are în starea ON (închis) o rezistență nulă, iar în starea OFF (deschis) o rezistență infinită. Această comportare poate fi aproximată satisfăcător prin rezistențe RON şi ROFF, care sunt semnificativ mai mici, respectiv mai mari decât toate celelalte rezistențe din circuit. Ca urmare, comutatorul este un tip special de rezistor controlat în tensiune sau în curent, a cărui rezistență variază continuu între RON şi ROFF.




Forma generală de descriere a comutatorului comandat în tensiune (S), respectiv în curent (W) este următoarea:

S<nume> <N+> <N-> <NC+> <NC-> <nume_model>
W<nume> <N+> <N-> V<nume> <nume_model>

unde:
– S, W identifică un comutator comandat în tensiune, respectiv în curent;
– <N+>,< N-> indică nodurile (+) şi (-) între care este contectat comutatorul;
– <NC+>, <NC-> indică nodurile (+) şi (-) între care se află conectată tensiunea de comandă (în cazul comutatorului controlat în tensiune);
– V<nume> este numele sursei de tensiune prin care circulă curentul de comanda (în cazul comutatorului controlat în curent);
– <nume_model> este numele modelului care conține parametrii comutatorului.

Modelul unui comutator controlat în tensiune, respectiv în curent se defineşte cu ajutorul comenzii .MODEL astfel:

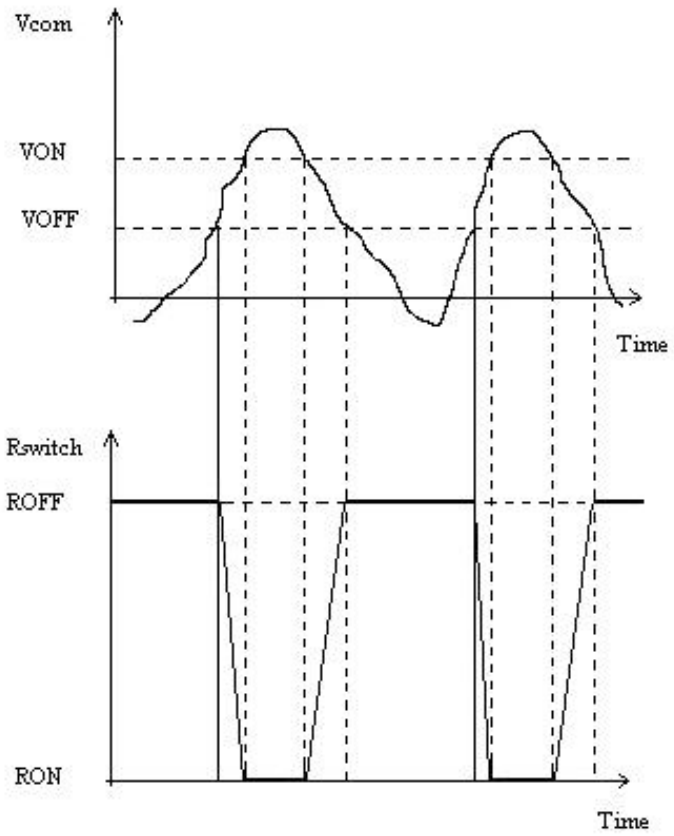
.MODEL <nume_model> VSWITCH [parametri_model]
.MODEL <nume_model> ISWITCH [parametri_model]

Parametrii de model ai comutatoarelor sunt:

| Parametru de model | Descriere | Unitate măsură | Valoare predefinită | Tip model |
|---|---|---|---|---|
| VON | Tensiunea de control pentru starea ON | Volt | 1 | VSWITCH |
| VOFF | Tensiunea de control pentru starea OFF | Volt | 0 | VSWITCH |
| ION | Curentul de control pentru starea ON | Amper | 1E-3 | ISWITCH |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| IOFF | Curentul de control pentru starea OFF | Amper | 0 | ISWITCH |
| RON | Rezistența ON | Ohm | 1.0 | VSWITCH, ISWITCH |
| ROFF | Rezistența OFF | Ohm | 1E+6 | VSWITCH, ISWITCH |

În figura de mai jos este prezentată dependența rezistenței comutatorului controlat în tensiune în funcție de tensiunea de comandă:




**Exemple:**

```
S1 3 4 1 2 SMOD
W2 10 11 V1 WMOD
.MODEL SMOD VSWITCH (RON=0.1 ROFF=100MEG VON=0.1 VOFF=0)
.MODEL WMOD ISWITCH (RON=0.1 ROFF=100MEG ION=1mA IOFF=1uA)
```

## Aplicaţia 1

Să se scrie fişierul de intrare PSPICE pentru circuitul cu surse comandate de mai jos.

– Sursele independente V1, V2, V3 furnizează formele de undă prezentate în Figura 2;
– Sursa E4 se va descrie utilizând forma de descriere polinomială (POLY), iar sursa E5 se va descrie folosind forma de descriere cu VALUE;
– Tensiunea furnizată de sursa E7 depinde de sursa V1 după caracteristica din Figura 1;
– Circuitul va fi analizat în domeniul timp folosind următoarea comandă:

```
.TRAN 30u 2m 0 10u
```

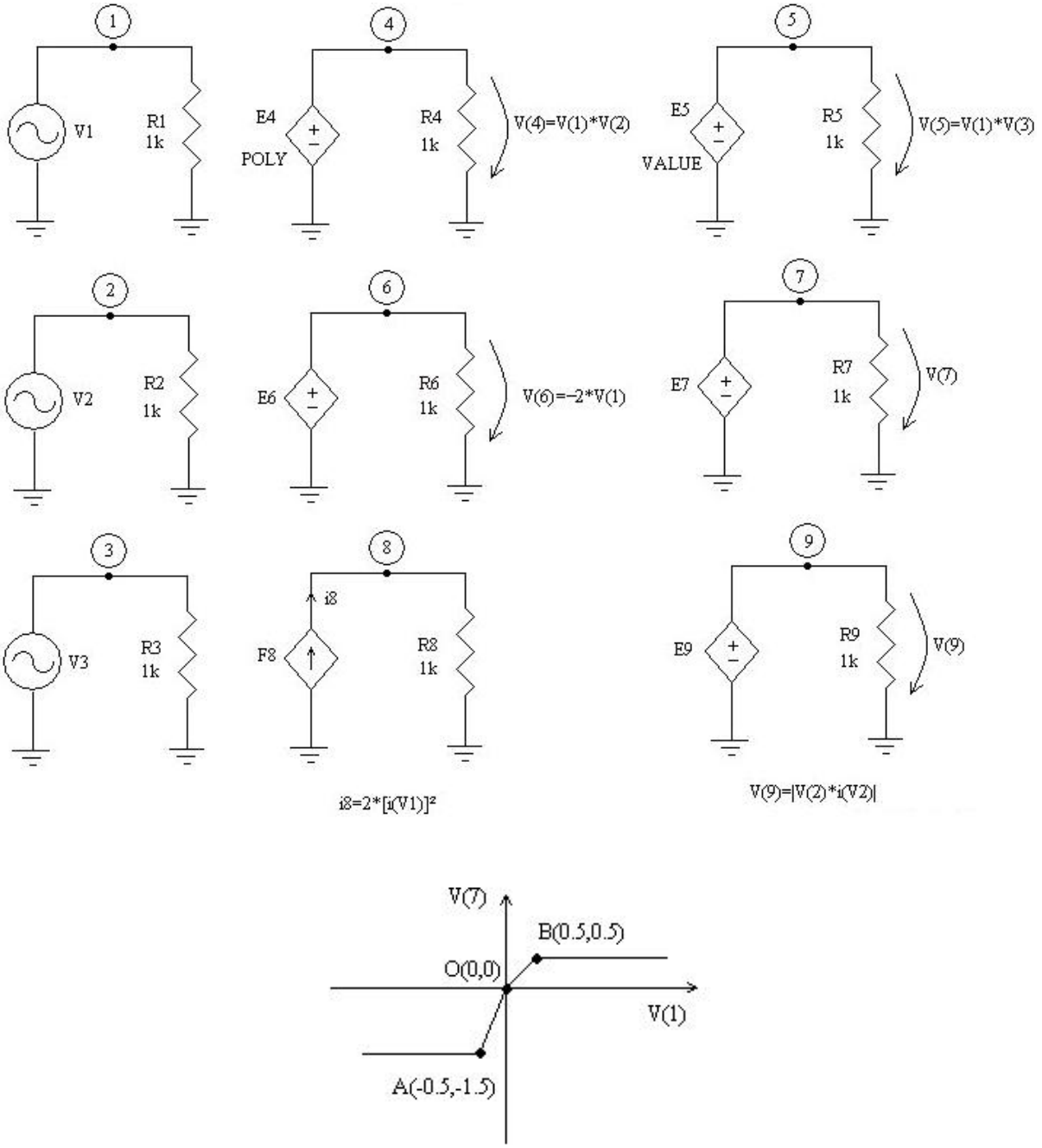



**Figura 1** – Circuitul cu surse comandate şi caracteristica de transfer a sursei E7.

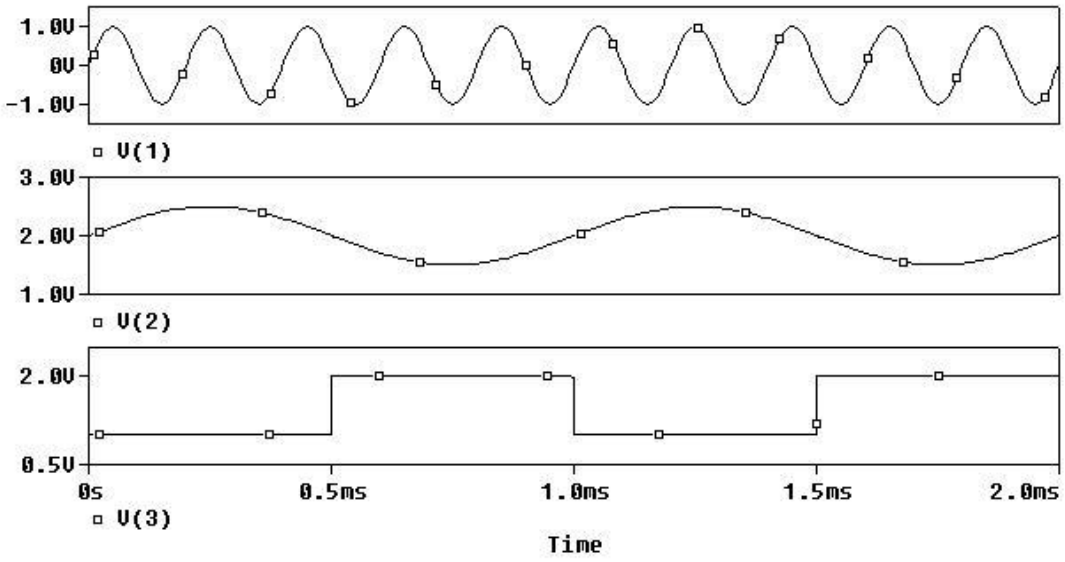



**Figura 2** – Formele de undă a tensiunilor surselor independente

În urma descrierii circuitului, efectuați simularea şi vizualizați formele de undă a tensiunilor furnizate de sursele independente precum şi cele furnizate de sursele comandate.

## Aplicația 2

Să se scrie fişierul de intrare PSPICE pentru circuitul din Figura 3, în care sursa Erc este comandată de sursa Vin după expresia: $V_{Erc} = \mathrm{H(s)} * \mathrm{V_{in}}$, unde H(s) este funcția de transfer a filtrului RC: $H(s) = \alpha/(s+\alpha)$, $\alpha = 1/(R1 * C1)$.

Sursei Vin i se va specifica numai valoarea de semnal mic (AC 1). Circuitul va fi analizat în domeniul frecvență folosind următoarea comandă:

```
.AC DEC 10 1 10MEG
```

În urma analizei vizualizați caracteristicile de transfer în frecvență (diagramele Bodé) ale filtrului şi ale sursei Erc: VDB(2), VDB(3), VP(2), VP(3). Verificați dacă aceste caracteristici se suprapun.

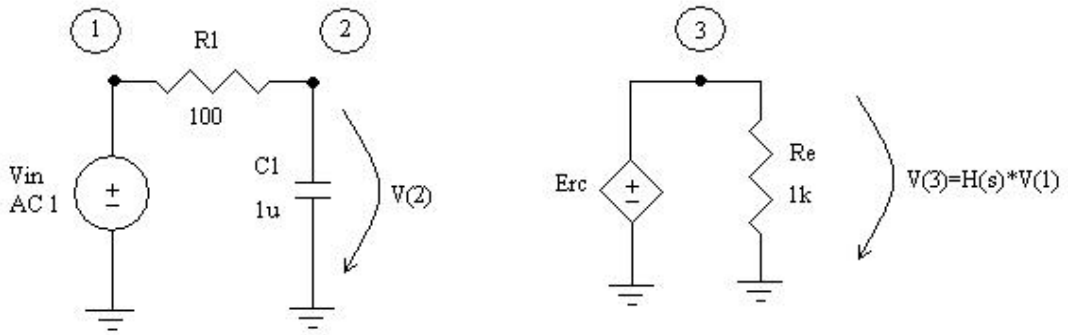



**Figura 3** – Circuit RC şi sursă comandată definită în frecvență