

# Tehnologii avansate de proiectare a circuitelor electrice și electronice

**S.I. dr. ing. Mihaela CREȚU**  
**Mihaela.Cretu@ethm.utcluj.ro**



# CURS 2

## SURSE COMANDATE

Modele matematice pentru  
circuite nereziproce în regim  
staționar

# Cuprinsul cursului

- **Elemente de bază ale circuitelor model**
  - ✓ Elemente ideale diport. Surse comandate;
- **Circuite analogice în regim staționar**
  - ✓ Modele matematice pentru circuite nereziproce în regim staționar
    - ✓ Metoda teoremelor lui Kirchhoff
    - ✓ Metoda nodală modificată
    - ✓ Metoda hibridă
  - **Exemplu**

# CAPITOLUL 3

## ELEMENTE DE BAZĂ ALE CIRCUITELOR MODEL SURSE COMANDATE

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

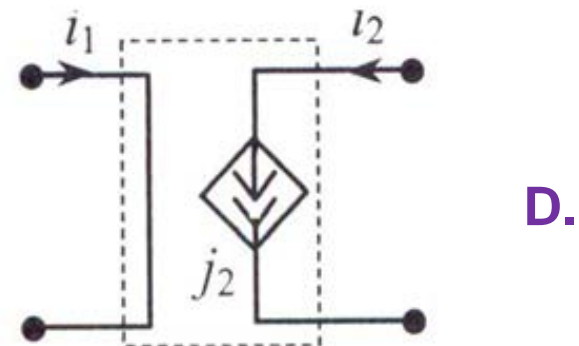
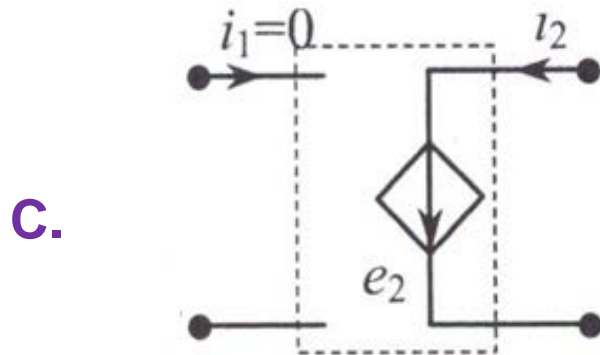
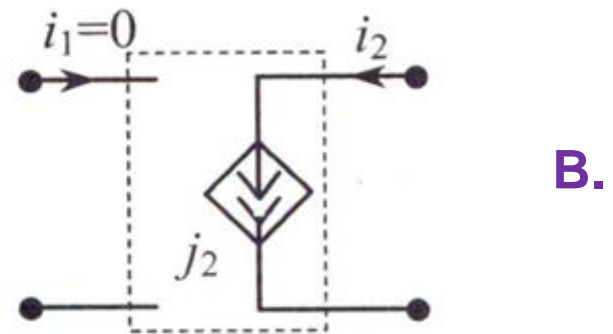
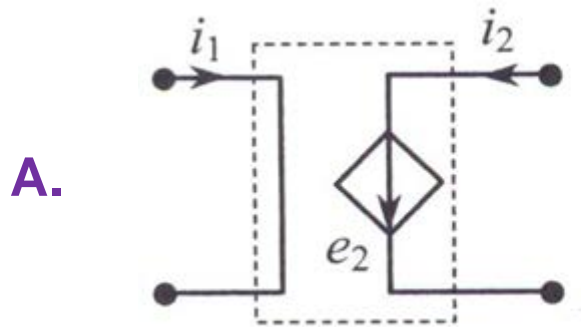
## OBIECTIVE

- Descrierea modului de funcționare a surselor comandate în curent și tensiune
- Explicarea modului în care acestea sunt tratate la analiza unui circuit în regim staționar și exemplificări

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

## 3.1. Definiții. Clasificări

-Sursele comandate (dependente, pilotate) sunt elemente active de circuit, cuadripolare, cu două laturi izolate galvanic între ele



# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model.

## Surse comandate

- Sursele comandate sunt generatoare ideale de tensiune sau de curent, ale căror tensiune electromotoare  $e$ , respectiv curent  $i_g$ , depind de un parametru asociat unei alte componente din circuit.
- În cadrul acestui curs parametri asociați se vor considera o tensiune de comandă  $u_1$  sau un curent de comandă  $i_1$  din circuit.

*Alți parametri pot fi rezistența unei componente de circuit, temperatura mediului ambiant și forțe mecanice aplicate componentei, inclusiv modificări ale presiunii atmosferice.*

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model.

## Surse comandate

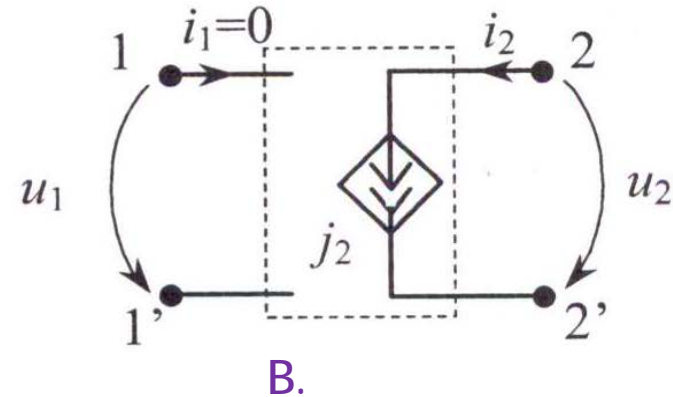
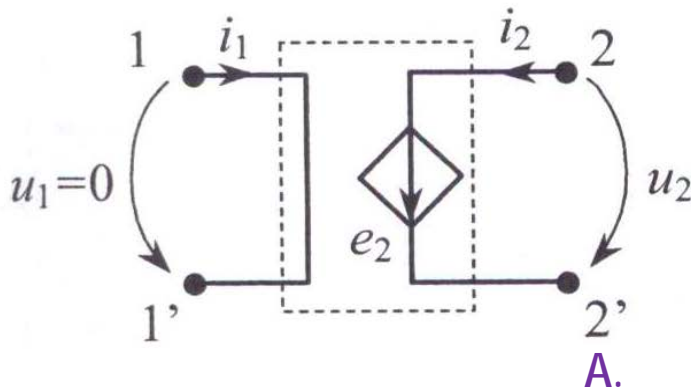
Cele patru tipuri de surse comandate sunt:

- Surse neomogene

### A. Sursa de tensiune comandată în curent ( $e_2=f(i_1)$ )

- Latura de comandă:  $u_1=0$
- Latura comandată:  $u_2= -e_2= - R_{21} i_1$

( $R_{21}$  reprezintă rezistența de transfer sau transrezistența)



### B. Sursa de curent comandată în tensiune ( $j_2=f(u_1)$ )

- Latura de comandă:  $i_1=0$  ( $G_{21}$  reprezintă conductanța de transfer sau transconductanța)
- Latura comandată:  $i_2= j_2= - G_{21} u_1$



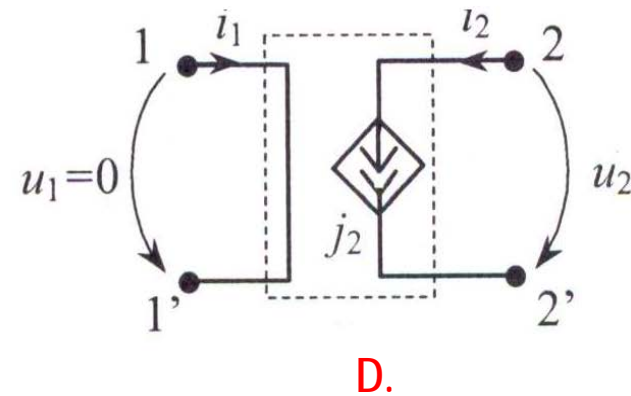
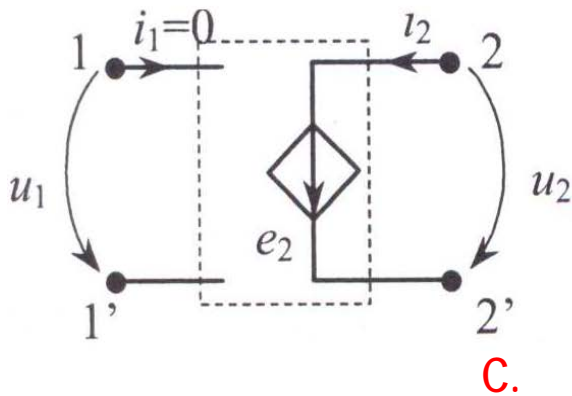
# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model.

## Surse comandate

- Surse omogene

### C. Sursa de tensiune comandată în tensiune ( $e_2=f(u_1)$ )

- Latura de comandă:  $i_1=0$
- Latura comandată:  $u_2 = -e_2 = -A_{21} u_1$   
( $A_{21}$  reprezintă factor de transfer în tensiune)



### D. Sursa de curent comandată în curent ( $j_2=f(i_1)$ )

- Latura de comandă:  $u_1=0$
- Latura comandată:  $i_2 = j_2 = B_{21} i_1$   
( $B_{21}$  reprezintă factor de transfer în curent)



# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

## OBSERVAȚII:

- 1. Porțile de comandă ale surselor comandate în curent sunt scurtcircuitate, care pot fi modelate prin surse ideale independente de tensiune nulă;**
- 2. Porțile de comandă ale surselor comandate în tensiune sunt laturi deschise, care pot fi modelate prin surse ideale independente de curent nul.**
- 3. Sursele comandate sunt extrem de utile în analiza modernă a circuitelor electronice cu tranzistoare, amplificatoare operaționale, tiristoare, etc.**
- 4. Generatoarele ideale necomandate sunt cazuri particulare ale generatoarelor comandate.**

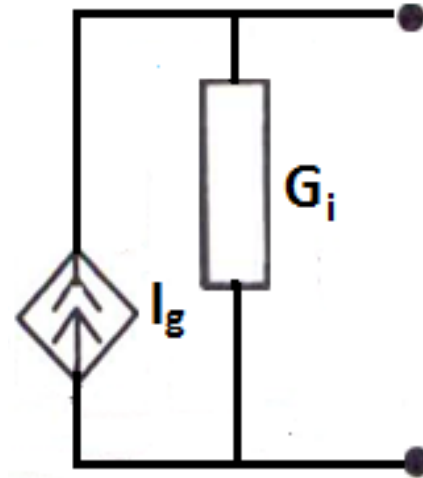
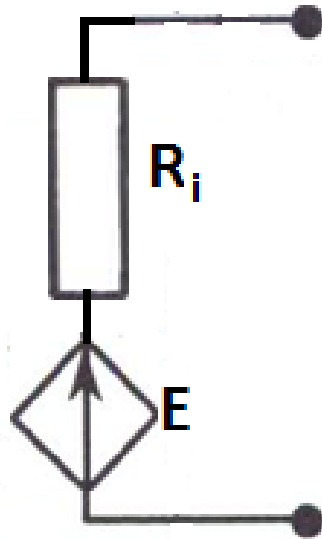
# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

## OBSERVAȚII:

5. Sursa comandată, având două laturi, este un cuadripol diport. Prima latură este fie deschisă ( $i_1=0$ ), fie în scurtcircuit ( $u_1=0$ )  puterea schimbată de prima latură este nulă:  $P_1=U_1 \cdot I_1=0$ .
6. La modelarea componentelor electronice, apare o legătură între cele două laturi ale sursei comandate  sursa definită ca și cuadripol diport va avea trei terminale.

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

## Surse comandate reale



$$I_g = \frac{E}{R_i}; \quad G_i = \frac{1}{R_i}$$

# Surse comandate întâlnite în practică

- Amplificatoare operaționale
- Tranzistoare
- Tranzistoare cu joncțiune bipolară (BJTs)
- Tranzistoare Metal-oxid-semiconductor cu efect de câmp (MOSFETs)
- Reglatoare de tensiune și curent
- Alte dispozitive:
- Fotodectectori, LED-uri și laser
- Dispozitive piezoelectrice
- Surse termovoltaiice

### 3.2. MODELE MATEMATICE PENTRU CIRCUITE NERECIPROCE ÎN REGIM STAȚIONAR

- ✓ Metoda teoremelor lui Kirchhoff
- ✓ Metoda nodală modificată
- ✓ Metoda hibridă

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

- Laturile circuitului se partiționează în:

$I_p$  – laturi pasive,

$I_E$  – laturi cu surse independente de tensiune (inclusiv porțile de comandă în curent),

$I_J$  – laturi cu surse independente de curent (inclusiv porțile de comandă în tensiune),

$I_{Ec}$  – laturi cu surse de tensiune comandate,

$I_{Jc}$  – laturi cu surse de curent comandate.

Matricile de conexiune, vectorii curenților și tensiunilor laturilor se partiționează la fel:

$$A = \begin{bmatrix} A_p & A_E & A_J & A_{Ec} & A_{Jc} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} B_p & B_E & B_J & B_{Ec} & B_{Jc} \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_p^t & I_E^t & I_J^t & I_{Ec}^t & I_{Jc}^t \end{bmatrix}^t ; \quad U = \begin{bmatrix} U_p^t & U_E^t & U_J^t & U_{Ec}^t & U_{Jc}^t \end{bmatrix}^t$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

Ecuțiile caracteristice ale surselor de tensiune și de curent comandate, scrise în formă compactă la nivelul întregului circuit, sunt:

$$\mathbf{U}_{Ec} = -\mathbf{E}_c = -[\mathbf{A}_c \quad \mathbf{R}_c] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_J \\ \mathbf{I}_E \end{bmatrix}$$

unde:  $\mathbf{A}_c$  – matricea factorilor de transfer ai surselor comandate în tensiune, de dimensiune  $I_{Ec}, I_J$

$\mathbf{R}_c$  – matricea rezistențelor de transfer ale surselor comandate în curent, de dimensiune  $I_{Ec}, I_E$

$$\mathbf{I}_{Jc} = \mathbf{J}_c = [\mathbf{G}_c \quad \mathbf{B}_c] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_J \\ \mathbf{I}_E \end{bmatrix}$$

unde:  $\mathbf{B}_c$  – matricea factorilor de transfer ai surselor comandate în curent, de dimensiune  $I_{Jc}, I_E$

$\mathbf{G}_c$  – matricea conductanțelor de transfer ale surselor comandate în tensiune, de dimensiune  $I_{Jc}, I_J$



# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

Modelul matematic general al circuitelor nereziproce este (în total 2l ecuații):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \left[ \mathbf{A}_p \quad \mathbf{A}_E \quad \mathbf{A}_J \quad \mathbf{A}_{Ec} \quad \mathbf{A}_{Jc} \right] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p \\ \mathbf{I}_E \\ \mathbf{I}_J \\ \mathbf{I}_{Ec} \\ \mathbf{I}_{Jc} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{(n-1),1} \\
 \left[ \mathbf{B}_p \quad \mathbf{B}_E \quad \mathbf{B}_J \quad \mathbf{B}_{Ec} \quad \mathbf{B}_{Jc} \right] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{U}_E \\ \mathbf{U}_J \\ \mathbf{U}_{Ec} \\ \mathbf{U}_{Jc} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{b,1} \\
 \mathbf{R} \cdot \mathbf{I}_p - \mathbf{U}_p = \mathbf{0}_{l_p,1} \text{ sau } \mathbf{I}_p - \mathbf{G} \cdot \mathbf{U}_p = \mathbf{0}_{l_p,1} \\
 \mathbf{U}_E = -\mathbf{E}_{l_E,1} \text{ si } \mathbf{I}_J = \mathbf{J}_{l_J,1} \\
 \mathbf{U}_{Ec} = -\mathbf{E}_c = -\left[ \mathbf{A}_c \quad \mathbf{R}_c \right] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_J \\ \mathbf{I}_E \end{bmatrix} \\
 \mathbf{I}_{Jc} = \mathbf{J}_c = \left[ \mathbf{G}_c \quad \mathbf{B}_c \right] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_J \\ \mathbf{I}_E \end{bmatrix}
 \end{array} \right.$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

## 3.2.1 Metoda teoremelor lui Kirchhoff

Eliminând variabilele  $U_E, I_J, U_p, U_{Ec}, I_{Jc}$  din modelul matematic general rezultă modelul matematic echivalent (în total  $l$  ecuații):

$$\begin{cases} A_p \cdot I_p + A_E \cdot I_E + A_J \cdot J + A_{Ec} \cdot I_{Ec} + A_{Jc} \cdot (G_c \cdot U_J + B_c \cdot I_E) = 0 \\ B_p \cdot R \cdot I_p - B_E \cdot E + B_J \cdot U_J + B_{Ec} \cdot (-A_c \cdot U_J - R_c \cdot I_E) + B_{Jc} \cdot U_{Jc} = 0 \end{cases}$$

Rearanjând termenii rezultă:

$$\Rightarrow \begin{cases} A_p \cdot I_p + (A_E + A_{Jc} \cdot B_c) \cdot I_E + A_{Ec} \cdot I_{Ec} + A_{Jc} \cdot G_c \cdot U_J = -A_J \cdot J \\ B_p \cdot R \cdot I_p + (B_J - B_{Ec} \cdot A_c) \cdot U_J - B_{Ec} \cdot R_c \cdot I_E + B_{Jc} \cdot U_{Jc} = B_E \cdot E \end{cases}$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

**Acesta se poate scrie sub formă matricială (compactă):**

$$\begin{bmatrix} A_p & A_E + A_{Jc} \cdot B_c & A_{Jc} \cdot G_c & A_{Ec} & 0_{(n-1), l_{Jc}} \\ B_p \cdot R & -B_{Ec} \cdot R_c & B_J - B_{Ec} \cdot A_c & 0_{b, l_{Ec}} & B_{Jc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_p \\ I_E \\ U_J \\ I_{Ec} \\ U_{Jc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_J \cdot J \\ B_E \cdot E \end{bmatrix}$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model.

## Surse comandate

### 3.2.2 Metoda nodală modificată

- Potențialul unuia dintre nodurile circuitului se consideră referință ( $V=0$ ). Nodul referință e același cu nodul lipsă din matricea  $A$  (matricea de incidență laturi-noduri).
- Se formulează prima teoremă a lui Kirchhoff pentru celelalte  $n-1$  noduri, scriind curenții laturilor în funcție de potențialele nodurilor.
- Curenții laturilor de rezistență nulă nu pot fi exprimați în funcție de potențiale. Ei rămân ca variabile independente, alături de potențialele nodurilor, reunite în vectorul  $V_{(n-1),1}$ .

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

- Tensiunile laturilor se exprimă în funcție de potențialele nodurilor):

$$\begin{bmatrix} U_p \\ U_E \\ U_J \\ U_{Ec} \\ U_{Jc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p^t \\ A_E^t \\ A_J^t \\ A_{Ec}^t \\ A_{Jc}^t \end{bmatrix} \cdot V = \begin{bmatrix} A_p^t \cdot V \\ A_E^t \cdot V \\ A_J^t \cdot V \\ A_{Ec}^t \cdot V \\ A_{Jc}^t \cdot V \end{bmatrix}$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

Prima teoremă a lui Kirchhoff se scrie desfășurată astfel:

$$\mathbf{A}_p \cdot \mathbf{I}_p + \mathbf{A}_E \cdot \mathbf{I}_E + \mathbf{A}_J \cdot \mathbf{I}_J + \mathbf{A}_{Ec} \cdot \mathbf{I}_{Ec} + \mathbf{A}_{Jc} \cdot \mathbf{I}_{Jc} = \mathbf{0}_{(n-1),1}$$

Curenții laturilor pasive se scriu în funcție de tensiunile laturilor pasive, astfel:

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{G} \cdot \mathbf{U}_p = \mathbf{G} \cdot \mathbf{A}_p^t \cdot \mathbf{V}$$

Curenții laturilor cu surse de curent:

$$\mathbf{I}_J = \mathbf{J}$$

Curenții laturilor cu surse de curent comandate se scriu în funcție de tensiunile laturilor cu surse de curent, astfel :

$$\mathbf{I}_{Jc} = \mathbf{G}_c \cdot \mathbf{U}_J + \mathbf{B}_c \cdot \mathbf{I}_E = \mathbf{G}_c \cdot \mathbf{A}_J^t \cdot \mathbf{V} + \mathbf{B}_c \cdot \mathbf{I}_E$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

Expresia curenților exprimați anterior se înlocuiește în prima teoremă a lui Kirchhoff:

$$A_p \cdot G \cdot A_p^t \cdot V + (A_E + A_{Jc} \cdot B_c) \cdot I_E + A_{Ec} \cdot I_{Ec} + A_{Jc} \cdot G_c \cdot A_J^t \cdot V = -A_J \cdot J$$

Rearanjând termenii în mod convenabil se obține:

$$(A_p \cdot G \cdot A_p^t + A_{Jc} \cdot G_c \cdot A_J^t) \cdot V + (A_E + A_{Jc} \cdot B_c) \cdot I_E + A_{Ec} \cdot I_{Ec} = -A_J \cdot J$$

La această ecuație se adaugă ecuațiile caracteristice ale laturilor de rezistență nulă (laturi ce conțin surse de tensiune):

$$U_E = A_E^t \cdot V = -E$$

$$U_{Ec} = -A_c \cdot U_J - R_c \cdot I_E = -A_c \cdot A_J^t \cdot V - R_c \cdot I_E = A_{Ec}^t \cdot V$$

$$\Rightarrow (A_{Ec}^t + A_c \cdot A_J^t) \cdot V + R_c \cdot I_E = 0_{I_{Ec},1}$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model.

## Surse comandate

**În final rezultă sistemul matricial ce corespunde metodei nodale modificate (conține  $n-1+l_E+l_{Ec}$  ecuații):**

$$\begin{cases} \left( A_p \cdot G \cdot A_p^t + A_{Jc} \cdot G_c \cdot A_J^t \right) \cdot V + \left( A_E + A_{Jc} \cdot B_c \right) \cdot I_E + A_{Ec} \cdot I_{Ec} = -A_J \cdot J \\ A_E^t \cdot V = -E \\ \left( A_{Ec}^t + A_c \cdot A_J^t \right) \cdot V + R_c \cdot I_E = 0_{l_{Ec},1} \end{cases}$$

**sau**

$$\begin{bmatrix} A_p \cdot G \cdot A_p^t + A_{Jc} \cdot G_c \cdot A_J^t & A_E + A_{Jc} \cdot B_c & A_{Ec} \\ & 0_{l_E, l_E} & 0_{l_E, l_{Ec}} \\ A_{Ec}^t + A_c \cdot A_J^t & R_c & 0_{l_{Ec}, l_{Ec}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I_E \\ I_{Ec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_J \cdot J \\ -E \\ 0_{l_{Ec}, 1} \end{bmatrix}$$



# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

## 3.2.3 Metoda hibridă

- Se partiționează laturile circuitului:
  - laturi pasive ale arborelui  $l_{pa}$  (sunt ramuri);
  - laturi pasive ale co-arborelui  $l_{pc}$  (sunt coarde);
  - laturi cu surse independente de tensiune  $l_E$  (sunt ramuri);
  - laturi cu surse independente de curent  $l_J$  (sunt coarde);
  - laturi cu porți comandate ale surselor de tensiune comandate  $l_{Ec}$  (sunt ramuri);
  - laturi cu porți comandate ale surselor de curent comandate  $l_{Jc}$  (sunt coarde);
- Matricea incidențelor esențiale se partiționează după aceeași logică. La fel și vectorii curenților și tensiunilor laturilor:

$$\mathbf{D} = \begin{array}{c|ccc}
 \mathbf{a} \setminus \mathbf{c} & \mathbf{l}_{pc} & \mathbf{l}_{Jc} & \mathbf{l}_J \\
 \hline
 \mathbf{l}_{pa} & \mathbf{D}_{RR} & \mathbf{D}_{RJc} & \mathbf{D}_{RJ} \\
 \mathbf{l}_{Ec} & \mathbf{D}_{EcR} & \mathbf{D}_{EcJc} & \mathbf{D}_{EcJ} \\
 \mathbf{l}_E & \mathbf{D}_{ER} & \mathbf{D}_{EJc} & \mathbf{D}_{EJ}
 \end{array}$$

$$\mathbf{I} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc}
 \mathbf{I}_{pa}^t & \mathbf{I}_{Ec}^t & \mathbf{I}_E^t & \mathbf{I}_{pc}^t & \mathbf{I}_{Jc}^t & \mathbf{I}_J^t \\
 \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{ramuri}} & \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{coarde}} & & & & 
 \end{array} \right]^t$$

$$\mathbf{U} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc}
 \mathbf{U}_{pa}^t & \mathbf{U}_{Ec}^t & \mathbf{U}_E^t & \mathbf{U}_{pc}^t & \mathbf{U}_{Jc}^t & \mathbf{U}_J^t \\
 \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{ramuri}} & \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{coarde}} & & & & 
 \end{array} \right]^t$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

Se exprimă curenții ramurilor în funcție de curenții coardelor și tensiunile coardelor în funcție de tensiunile ramurilor, matricial:

$$I_r = -D \cdot I_c : \begin{bmatrix} I_{pa} \\ I_{Ec} \\ I_E \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_{RR} & D_{RJc} & D_{RJ} \\ D_{EcR} & D_{EcJc} & D_{EcJ} \\ D_{ER} & D_{EJc} & D_{EJ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pc} \\ I_{Jc} \\ I_J \end{bmatrix} \quad (1)$$

și

$$U_c = D^t \cdot U_r : \begin{bmatrix} U_{pc} \\ U_{Jc} \\ U_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{RR}^t & D_{EcR}^t & D_{ER}^t \\ D_{RJc}^t & D_{EcJc}^t & D_{EJc}^t \\ D_{RJ}^t & D_{EcJ}^t & D_{EJ}^t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{pa} \\ U_{Ec} \\ U_E \end{bmatrix} \quad (2)$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

Se ține cont de ecuațiile:

$$I_{pa} = G_{pa} \cdot U_{pa} \quad \text{și:} \quad U_{pc} = R_{pc} \cdot I_{pc}$$

și de ecuațiile surselor comandate și ale surselor independente:

$$I_J = J$$

$$U_E = -E$$

$$I_{Jc} = G_c \cdot U_J + B_c \cdot I_E$$

$$U_{Ec} = -A_c \cdot U_J - R_c \cdot I_E$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model.

## Surse comandate

**Prima și ultima ecuație, atât din sistemul (1) cât și din sistemul (2), se scriu desfășurat (după ordonarea convenabilă a termenilor):**

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{pa} \cdot U_{pa} + D_{RR} \cdot I_{pc} + D_{RJc} \cdot G_c \cdot U_J + D_{RJc} \cdot B_c \cdot I_E = -D_{RJ} \cdot J \\ \dots \\ (1 + D_{EJc} \cdot B_c) \cdot I_E + D_{ER} \cdot I_{pc} + D_{EJc} \cdot G_c \cdot U_J = -D_{EJ} \cdot J \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{pc} \cdot I_{pc} - D_{RR}^t \cdot U_{pa} + D_{EcR}^t \cdot A_c \cdot U_J + D_{EcR}^t \cdot R_c \cdot I_E = -D_{ER}^t \cdot E \\ \dots \\ (1 + D_{EcJ}^t \cdot A_c) \cdot U_J + D_{EcJ}^t \cdot R_c \cdot I_E - D_{RJ}^t \cdot U_{pa} = -D_{EJ}^t \cdot E \end{array} \right.$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model. Surse comandate

**Modelul matematic compact rezultă după asamblarea ecuațiilor matriciale corespunzătoare :**

$$\begin{bmatrix} D_{RR} & G_{pa} & D_{RJc} \cdot B_c & D_{RJc} \cdot G_c \\ R_{pc} & -D_{RR}^t & D_{EcR}^t \cdot R_c & D_{EcR}^t \cdot A_c \\ D_{ER} & 0 & (1 + D_{EJc} \cdot B_c) & D_{EJc} \cdot G_c \\ 0 & -D_{RJ}^t & D_{EcJ}^t \cdot R_c & (1 + D_{EcJ}^t \cdot A_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pc} \\ U_{pa} \\ I_E \\ U_J \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_{RJ} & 0 \\ 0 & D_{ER}^t \\ D_{EJ} & 0 \\ 0 & D_{EJ}^t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J \\ E \end{bmatrix}$$

**Mărimile complementare ale surselor comandate se calculează :**

$$\begin{aligned} I_{Ec} &= -D_{EcR} \cdot I_{pc} - D_{EcJc} \cdot G_c \cdot U_J - D_{EcJc} \cdot B_c \cdot I_E - D_{EcJ} \cdot J \\ U_{Jc} &= D_{RJc}^t \cdot U_{pa} - D_{EcJc}^t \cdot A_c \cdot U_J - D_{EcJc}^t \cdot J_c \cdot R_c \cdot I_E - D_{EJc}^t \cdot E \end{aligned}$$

# Capitolul 3. Elemente de bază ale circuitelor model.

## Surse comandate

**Metoda poate fi adaptată pentru circuite reciproce, caz în care variabilele aferente surselor comandate nu mai sunt necesare, iar modelul matematic devine:**

$$\begin{bmatrix} D_{RR} & G_{pa} \\ R_{pc} & -D_{RR}^t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pc} \\ U_{pa} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_{RJ} & 0 \\ 0 & D_{ER}^t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J \\ E \end{bmatrix}$$

# BIBLIOGRAFIE

- [1] Iordache M., Mandache L., “Analiza asistată de calculator a circuitelor analogice neliniare”, Ed. Politehnica Press, București 2004, ISBN 973-8449-36-7.
- [2] Mandache L., Topan D., “Simularea circuitelor electrice. Algoritmi și programe de calcul”. Ed. Universitaria, Craiova, 2009.