Dan Ovidiu Micu

Dumitru Toader

Emil Cazacu

Iosif Nemoianu

Electrotehnică aplicată

Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România

Bucureşti

2011

PREFAȚĂ

Cursul de "Electrotehnică aplicată" a fost elaborat în cadrul proiectului "Rețea Națională de Formare Continuă a Cadrelor Didactice din Învățământul Preuniversitar Profesional şi Tehnic-CONCORD"

Având în vedere destinatarii, cursul a fost conceput astfel încât să acopere subiectele de electrotehnică cele mai des întâlnite în activitatea practică: circuitele de curent continuu, cele de curent alternativ şi circuitele trifazate.

Primul capitol este intitulat "Circuite liniare de curent continuu" şi prezintă elementele de circuit, conexiuni între aceste elemente precum şi metodele de rezolvare ale circuitelor. Autorii acestui capitol sunt conf. dr. ing. Emil Cazacu şi şef lucrări dr. ing. Iosif Vasile Nemoianu.

Al doilea capitol, intitulat "Studiul intuitiv al unor circuite de curent permanent sinusoidal"prezintă o metodă prea puțin aplicată în învățământul preuniversitar, metoda inversiunii geometrice, o metodă cu care înțelegerea acestor circuite devine extrem de simplă. Autorul este prof. dr. ing. Dan Micu care este şi coordonatorul celor trei capitole.

Al treilea şi ultimul capitol se referă la circuitele cele mai folosite în practică şi se intitulează "Studiul circuitelor trifazate. Aplicații industriale". Autor este prof. dr. ing. Dumitru Toader.

Autorii sunt cadre didactice universitare, cu experiență în elaborarea cursurilor, din trei centre cu tradiție în ceea ce priveşte învățământul politehnic.

Prof. dr. ing. Claudia Popescu

CUPRINS

1. Circuite liniare de curent continuu

2. Studiul intuitiv al unor circuite în regim permanent sinusoidal

3. Studiul circuitelor trifazate. Aplicații industriale

1. CIRCUITE ELECTRICE LINIARE DE CURENT CONTINUU

Circuitele de curent continuu sunt acele circuite în care sursele de tensiune şi de curent furnizează la bornele lor mărimi invariabile în timp [1.1-1.6]. În aceste condiții, după stingerea regimurilor tranzitorii, datorate unor eventuale procese de comutație, toate mărimile de circuit (curenți, tensiuni, potențiale) sunt de asemenea invariabile în timp. Aceste mărimi vor fi notate în prezentul capitol cu majuscule.

1.1 REȚELE ELECTRICE LINIARE – GENERALITĂȚI

Vom înțelege prin ***rețea electrică*** o mulțime de elemente de circuite interconectate la borne.

Un element de circuit este un domeniu ce are legătură electrică cu exteriorul doar printr-un număr finit de puncte numite borne. Un element se numeşte ***dipolar*** doar dacă are două borne.

Mărimile electrice ce caracterizează rețelele electrice sunt:

- ***Intensitatea curentului electric*** – mărime fizică scalară (pozitivă sau negativă) asociată unei secțiuni orientate printr-un conductor.
- ***Tensiunea electrică*** – mărime fizică scalară (pozitivă sau negativă) asociată unei perechi orientate de borne.

Pentru a marca faptul că aceste mărimi sunt orientate se utilizează săgeți atât pentru intensitate, cât şi pentru tensiune (numite sensuri de referință).

- Vom utiliza noțiunea de ***nod*** al circuitului pentru punctul în care se întâlnesc cel puțin trei conductoare.
- ***Latura*** va fi porțiunea de circuit cuprinsă între două noduri, iar ***ochiul de circuit*** este o succesiune continuă de laturi care formează un contur poligonal închis.

Relațiile fundamentale ale teoriei circuitelor în general şi a teoriei circuitelor electrice în particular sunt date de teoremele (relațiile) lui Kirchhoff [1.7-1.13].

Relația (teorema) întâi a lui Kirchhoff:

"*Suma algebrică a intensităților curenților ce concură la un nod al unui circuit electric este nulă*".

$$\sum_k I_k = 0 \qquad (1.1)$$

Caracterul algebric al sumei este impus de atribuirea semnului plus pentru curenții care ies din nodul *(n)* şi, respectiv, semnul minus pentru curenții care intră în acel nod.

Relația (teorema) a doua a lui Kirchhoff:

“*Suma tensiunilor electrice orientate în același sens pe un ochi este nulă*”.

$$\sum_{k} U_k = 0 \tag{1.2}$$

În cazul particular al unei bucle [b], cea de-a doua teoremă a lui Kirchhoff ia forma:

$$\sum_{k\in[b]} R_k \cdot I_k + \sum_{k\in[b]} U_{J_k} = \sum_{k\in[b]} E_k \tag{1.2'}$$

Relație care arată ca suma algebrică a tensiunilor la bornele rezistoarelor şi surselor ideale de curent este egală cu suma algebrică a tensiunilor electromotoare ale surselor ideale de tensiune.

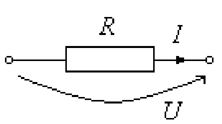
Caracterul algebric al celor trei sume din relația (1.2’) este impus de necesitatea parcurgerii buclei [*b*] într-un anumit sens (arbitrar) şi atribuirea semnului plus tensiunilor $R_k \cdot I_k$ la bornele tuturor rezistoarelor de rezistențe R_k străbătute de curenții I_k în sensul de parcurgere, tensiunilor U_{J_k} (la bornele tuturor surselor de curent) al căror sens coincide cu sensul de parcurgere şi tensiunilor electromotoare E_k (ale tuturor surselor de tensiune) ale căror săgeți sunt orientate în sensul de parcurgere (respectiv minus în caz contrar).

Pentru rezolvarea rețelelor electrice (determinarea tensiunilor şi intensităților), la ecuațiile lui Kirchhoff sub forma generală se adaugă şi relațiile impuse tensiunii şi intensității de către fiecare element de circuit în parte.

Aceste relații (numite şi *ecuații de funcționare*) sunt specifice fiecărui element real.

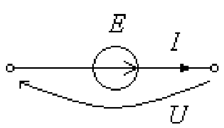
Pentru a uşura studiul rețelelor electrice se introduc un număr de elemente cu proprietăți idealizate numite *elemente ideale*.

1. ***Rezistorul*** – simbolul acestui element şi ecuația sa de funcționare sunt date în Fig.1.1.
2. ***Generatorul ideal de tensiune*** – simbolul acestui element şi ecuația sa de funcționare sunt date în Fig.1. 2.
3. ***Generatorul ideal de curent*** – simbolul acestui element şi ecuația sa de funcționare sunt date în Fig.1. 3.



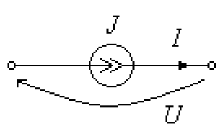
$U = RI \qquad P = RI^2$

Fig.1.1 Rezistorul ideal.



$U = E \qquad P = EI$

Fig.1.2 Generatorul ideal de tensiune.



$I = J \qquad P = UJ$

Fig.1.3 Generatorul ideal de curent.

Sursa ideală de tensiune (vezi figura 1.4-a) are ecuația de funcționare

$$U = E \tag{1.3}$$

oricare ar fi valoarea şi sensul curentului I care o străbate. Cele două situații posibile pentru **sensul real al curentului care străbate sursa** (şi, corespunzător, pentru **sensul real al puterii transferate pe la borne**, sens evidențiat cu ajutorul săgeților haşurate) sunt prezentate în fig. 1.1.4,b şi 1.1.4,c

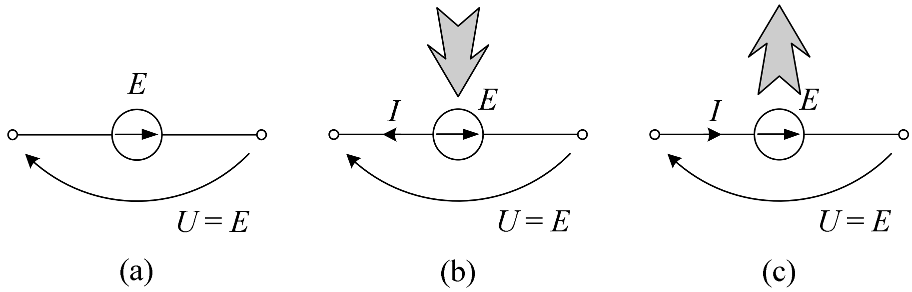


Fig.1.4 Sursa ideală de tensiune sau generatorul ideal de tensiune.

Sursa ideală de curent (vezi figura 1.5, a) are ecuația de funcționare:

$$I = J \tag{1.4}$$

oricare ar fi valoarea şi sensul tensiunii U_J la bornele sale. Cele două situații posibile pentru **sensul real al tensiunii la bornele sursei** (şi, corespunzător, pentru **sensul real al puterii transferate pe la borne**, sens evidențiat şi de această dată cu ajutorul săgeților haşurate) sunt prezentate în figurile 1.5,b şi 1.5,c.

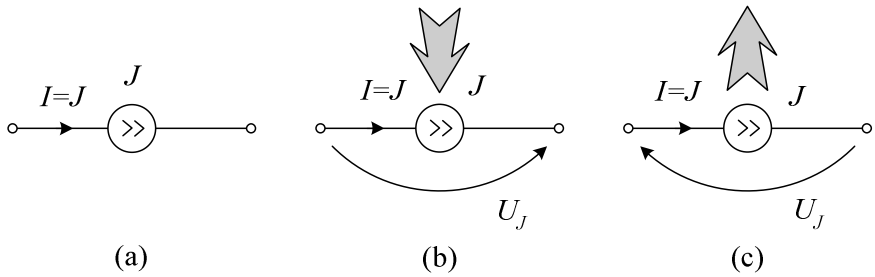
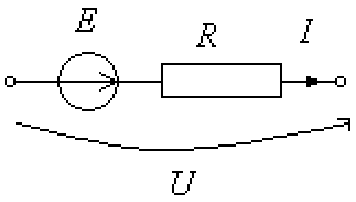
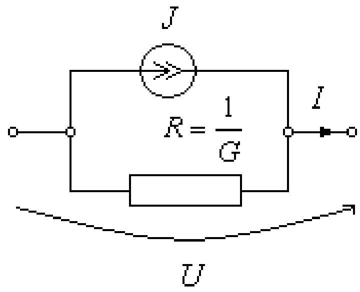


Fig.1.5 Sursa ideală de curent sau generatorul ideal de curent.

În cazul generatoarelor reale de tensiune şi curent, descrise în Fig.1.6, ecuațiile de funcționare ale acestora se vor modifica în acord cu teoremele lui Kirchhoff:



$U = RI - E$



$I = J + UG$

Fig.1.6 Generatoarele reale de tensiune şi curent.

Din punct de vedere energetic, elementele de circuit sunt caracterizate cu ajutorul puterii transferate pe la borne, mărime ce se calculează la elementele dipolare cu ajutorul relației:

$$P = UI \tag{1.5}$$

Şi această mărime este orientată (poate fi absorbită sau cedată), interpretarea sensului efectuându-se cu ajutorul a două reguli:

a) **Regula de la receptoare** (la care tensiunea la borne şi curentul prin element au acelaşi sens).
   - Dacă $P > 0$ puterea P este absorbită.
   - Dacă $P < 0$, atunci puterea $|P|$ este cedată de elementul respectiv.

b) **Regula de la generatoare** (la care tensiunea la borne şi curentul prin element au sensuri opuse).
   - Dacă $P > 0$, puterea P este cedată.
   - Dacă $P < 0$, atunci puterea $|P|$ este absorbită de elementul respectiv.

Teorema conservării puterilor precizează că, pentru un circuit electric alcătuit din componente dipolare, „*suma puterilor algebrice primite la borne de elementele sale componente este egală cu zero*”.

$$\sum_k U_k I_k = 0 \tag{1.6}$$

În relația (1.6), sensul de referință pentru tensiunea U_k şi intensitatea curentului I_k este la fel orientat pentru fiecare element dipolar de circuit.

O consecință importantă a teoremei conservării puterilor o constituie ***bilanțul puterilor*** care arată că *„suma puterilor consumate prin efect electrocaloric ireversibil (Joule) în rezistențele unui circuit electric complet este egală cu suma algebrică a puterilor cedate de sursele de energie electrică (sursele de tensiune şi injecțiile de curent)”*.

$$\sum_k R_k I_k^2 = \sum_k E_k I_k + \sum_k U_{J_k} J_k \tag{1.7}$$

Bilanțul puterilor este un instrument deosebit de util în verificarea rezolvării unui circuit electric. Dacă acesta este verificat din punct de vedere numeric, atunci valorile determinate pentru intensitățile curentului electric, respectiv tensiunile la bornele elementelor de circuit, sunt cele adevărate [1.14-1.19].

1.2 TEOREME DE ECHIVALENȚĂ PENTRU CIRCUITE DE CURENT CONTINUU

Vom spune că două elemente de circuit sunt echivalente dacă, având aceleaşi tensiuni (arbitrare) la borne, curenții absorbiți pe la borne sunt aceiaşi.

Remarcăm că într-o rețea putem substitui o parte de rețea (subrețea) cu un circuit echivalent, iar curenții şi tensiunile în restul rețelei rămân nemodificați.

Această observație permite rezolvarea rețelelor reducându-le printr-o succesiune de echivalări la rețele mai simple.

1.2.1 TEOREMA DE ECHIVALENȚĂ DINTRE SURSA REALĂ DE TENSIUNE ŞI SURSA REALĂ DE CURENT

Această teoremă precizează că *o sursă reală de tensiune poate fi substituită de o sursă reală de curent şi reciproc, dacă avem următoarele relații între parametrii surselor de energie*:

$$J = \frac{E}{R} \qquad\qquad G = \frac{1}{R}$$

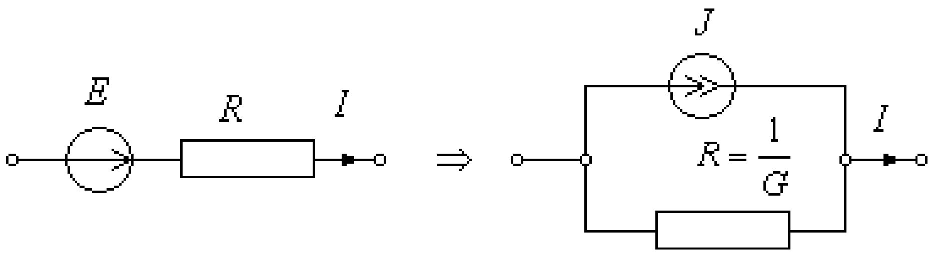


Fig.1.7 Echivalența dintre sursa reală de tensiune şi sursa reală de curent.

1.2.2 CONEXIUNEA SURSELOR REALE DE TENSIUNE

- **Conexiunea serie**

Spunem că mai multe surse de tensiune sunt conectate în serie dacă acestea sunt parcurse de aceeaşi valoare a intensităţii curentului electric.

În acest caz, relaţiile de echivalenţă sunt următoarele:

$$E = \sum_{k=1}^{n} E_k \qquad\qquad R = \sum_{k=1}^{n} R_k$$

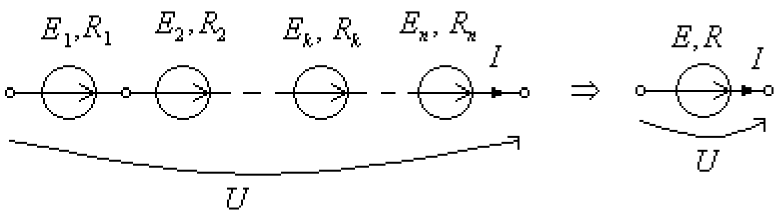


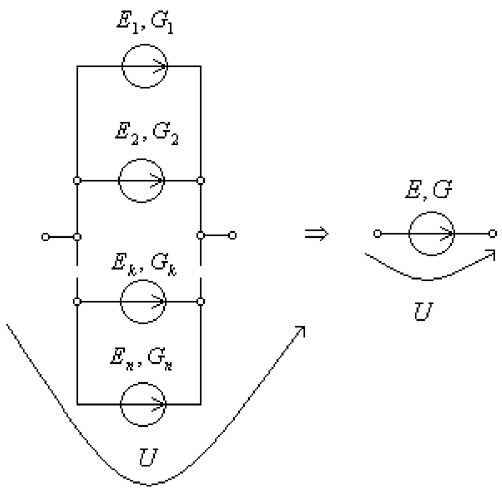
Fig. 1.8 Surse de tensiune reale conectate în serie.

În Fig.1.8 nu s-a mai reprezentat şi simbolul de rezistenţă pentru fiecare sursă în parte şi nici pentru sursa echivalentă.

- **Conexiunea paralel**

Vom spune că mai multe surse reale sunt în paralel dacă la bornele acestora vom avea aceeaşi tensiune.

În această situaţie este mult mai comod de lucrat cu conductanţe (inversul rezistenţelor), iar relaţiile de echivalenţă vor deveni:



$$E = \frac{\sum_{k=1}^{n} G_k E_k}{\sum_{k=1}^{n} G_k} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \frac{E_k}{R_k}}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}}$$

$$G = \sum_{k=1}^{n} G_k\,; \qquad \frac{1}{R} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}$$

Fig.1.9 Conexiunea paralel a surselor de tensiune.

La fel ca şi în cazul figurii anterioare, în Fig.1.9 nu s-a mai reprezentat şi simbolul de conductanță pentru fiecare sursă în parte şi nici pentru sursa echivalentă.

1.2.3 CONEXIUNEA REZISTENȚELOR ELECTRICE

1. Conexiunea serie – Divizorul de tensiune.

Ca şi în cazul surselor de tensiune vom spune că un număr de rezistoare electrice sunt conectate în serie dacă acestea sunt parcurse de aceeaşi intensitate a curentului electric.

Relațiile de echivalență rezultă imediat din teorema a doua a lui Kirchhoff.

$$R = \sum_{k=1}^{n} R_k$$

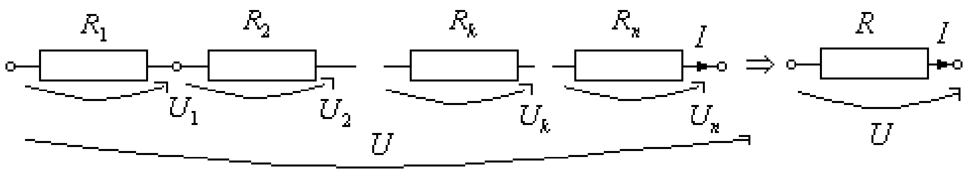
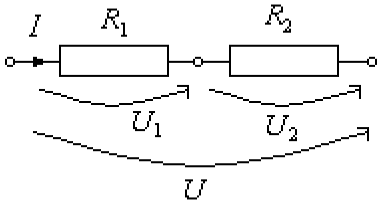


Fig.1.10 Conectarea serie a rezistoarelor.

Divizorul de tensiune este compus din două rezistente electrice conectate în serie.

El prezintă o importanță practică în calculului direct al tensiunilor pentru cele două rezistențe dacă se cunoaşte tensiunea ce se aplică ansamblului format de cele două rezistoare.



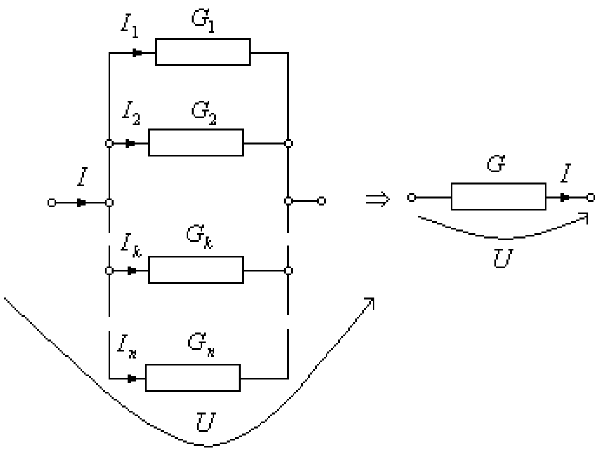
$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Fig.1.11 Divizorul de tensiune.

1. Conexiunea paralel – Divizorul de curent.

Rezistențele vor fi conectate în paralel dacă acestea vor fi supuse la aceeaşi valoare a tensiunii. În acest caz relațiile de echivalență pot fi scrise din nou mult mai uşor folosind conductanțele.



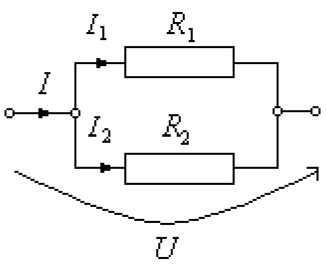
$$G = \sum_{k=1}^{n} G_k$$

$$\frac{1}{R_k} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}$$

Fig.1.12 Conectarea în paralel a rezistențelor.

Divizorul de curent este compus din două rezistente conectate în paralel.

Din această configurație se poate determina, (folosind teoremele lui Kirchhoff) în mod direct, curentul prin fiecare rezistor I_1, I_2, în funcție de curentul de la intrarea în divizor I .



$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Fig.1.13 Divizorul de curent.

1.2.4. TRANSFIGURAREA TRIUNGHI-STEA ŞI STEA-TRIUNGHI

Deseori, pentru o simplificare a rezolvării circuitelor este util să se modifice schema de conexiune a unor rezistențe din conexiunea triunghi în conexiunea stea, sau invers.

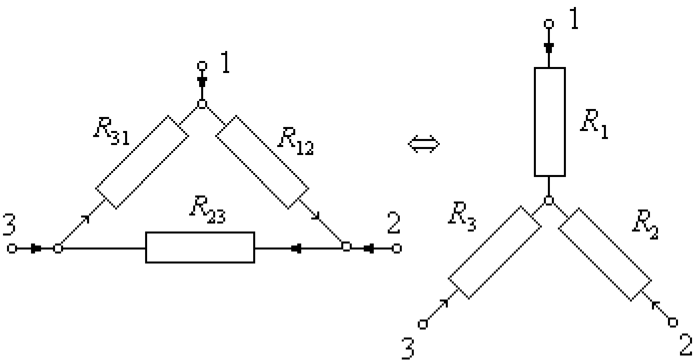


Fig1.14 .Transfigurarea stea - triunghi.

Relațiile de transfigurare sunt:

Transfigurarea triunghi - stea

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$

$$R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$

$$R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$

Transfigurarea stea - triunghi

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1} \qquad (1.8)$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3R_1}{R_2}$$

1.2.5 TEOREMA SUPERPOZIȚIEI – TEOREMELE LUI VASHY

Teorema superpoziției în rețelele liniare de curent continuu poate fi formulată astfel: *”Intensitatea curentului electric prin orice latură a unei rețele* ***liniare şi active*** *(rețea conținând rezistoare liniare şi surse ideale de tensiune şi de curent) este suma algebrică a intensităților curenților pe care i-ar stabili în acea latură fiecare dintre surse dacă s-ar găsi doar ea în circuit, celelalte surse fiind* ***pasivizate****”*.

Operațiunea de pasivizare a unei surse constă în substituirea acesteia cu un rezistor având rezistența egală cu rezistența internă a sursei. Întrucât rezistența internă a unei surse ideale de tensiune este zero, iar rezistența internă a unei surse ideale de curent este infinită, operațiunea de pasivizare a unei surse ideale de tensiune constă în substituirea acesteia cu un scurtcircuit, în timp ce operațiunea de pasivizare a unei surse ideale de curent constă în substituirea acesteia cu un gol.

Prin pasivizarea surselor de energie vom înțelege suprimarea acțiunii acestora în funcție de caracteristicile acestora aşa cum sunt prezentate în Fig.1.15.

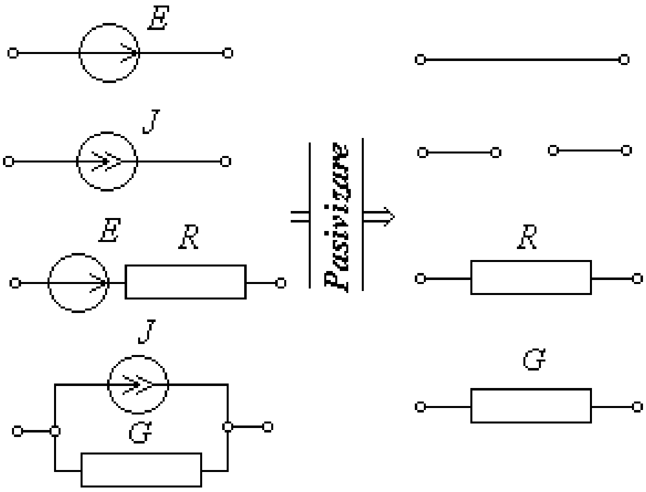


Fig.1.15 Pasivizarea elementelor de circuit.

Teorema lui Vashy pentru surse de tensiune (prima teoremă a lui Vashy): *"Distribuția de curenți si de tensiuni pentru toate elementele dipolare ale unui circuit nu se modifică dacă se introduc în serie cu toate elementele conectate la un nod, oricare, al circuitului, surse ideale de tensiune având tensiuni electromotoare egale şi la fel orientate față de nodul respectiv."*

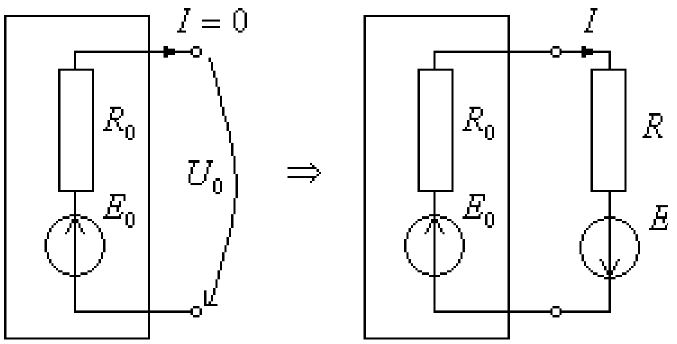
Teorema lui Vashy pentru surse de curent (a doua teoremă a lui Vashy): *"Distribuția de curenți si de tensiuni pentru toate elementele dipolare ale unui circuit nu se modifică dacă se introduc în paralel cu toate laturile ce alcătuiesc un ochi, oricare, al circuitului, surse ideale de curent injectând curenți egali şi la fel orientați în raport cu un sens arbitrar de parcurgere al ochiului respectiv."*

Subliniem însă faptul că prin utilizarea primei teoreme a lui Vashy **se modifică tensiunile laturilor** afectate de sursele ideale de tensiune nou introduse, iar prin utilizarea celei de-a doua teoreme a lui Vashy **se modifică curenții laturilor** afectate de sursele ideale de curent nou introduse.

1.2.6 TEOREMELE SURSELOR ECHIVALENTE – THÉVENIN ŞI NORTON

- **Teorema lui Thévenin**

Un dipol liniar activ poate fi echivalat în raport cu bornele sale cu o sursă reală de tensiune având o tensiune electromotoare egală cu tensiunea la bornele dipolului de mers în gol şi o rezistență egală cu rezistența echivalentă a dipolului pasivizat în raport cu aceleaşi borne.



$$I = \frac{E_0 \pm E}{R_0 + R}$$

dacă $E = 0$

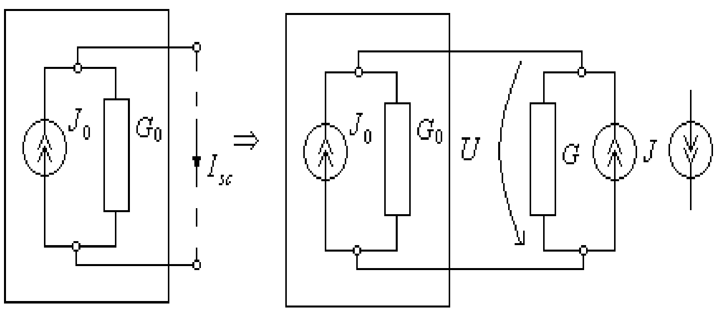
$$I = \frac{E_0}{R_0 + R}$$

Fig.1.16 Teorema lui Thévenin.

O teoremă asemănătoare ce are acelaşi scop este *teorema lui Norton*.

- **Teorema lui Norton.**

  Un dipol liniar activ poate fi echivalat în raport cu bornele sale cu o sursă reală de curent, de intensitate egală cu cea a curentului de scurt-circuit la bornele dipolului şi o conductanță egală cu conductanța echivalentă a dipolului pasivizat în raport cu bornele sale.



$$U = \frac{J_0 \pm J}{G_0 + G}$$

dacă $J = 0$

$$U = \frac{J_0}{G_0 + G}$$

Fig.1.17 Teorema lui Norton.

Teoremele lui Thévenin şi Norton se aplică atunci când se urmăreşte determinarea intensității curentului sau a tensiunii la bornele unei singure laturi a unui circuit electric, eventual variația acestor mărimi odată cu parametrii laturii considerate, restul circuitului rămânând neschimbat [1.20-1.24].

1.2.7 TEOREMA SUBSTITUȚIEI

Această teoremă poate fi exprimată astfel: “Orice element dipolar de circuit, străbătut de un curent *I* şi având la borne o tensiune *U* cu valori şi sensuri precizate, poate fi **substituit** fie cu o sursă ideală de tensiune, fie cu o sursă ideală de curent (fig.1.18) care să asigure ecuațiile de funcționare $E = U$ şi, respectiv, $J = I$ şi să nu modifice regimul energetic al acestuia.”

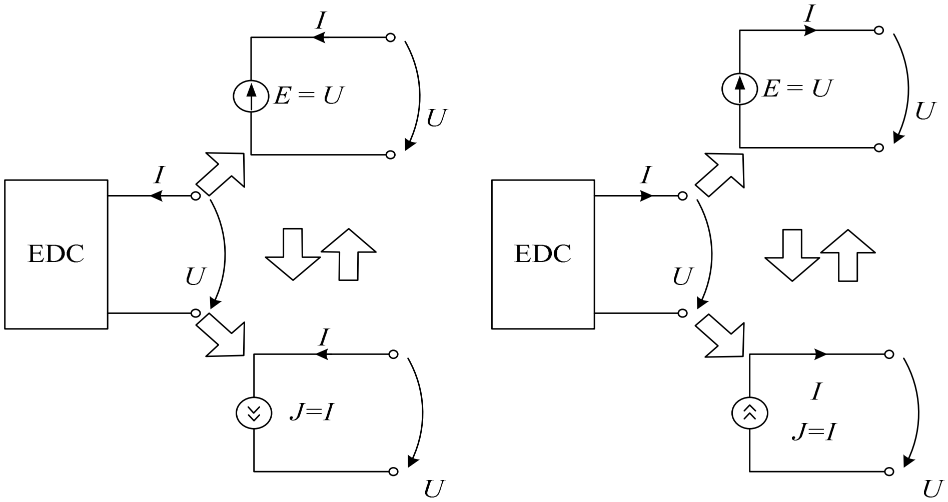


Fig.1.18 Teorema substitiției

Se remarcă faptul că această teoremă dă posibilitatea substituirii surselor ideale de tensiune şi de curent între ele, însă **substituția nu se poate efectua decât într-o rețea dată şi pentru un punct de funcționare (*I, U*) precizat**.

1.2.8 TEOREMA TRANSFERULUI MAXIM DE PUTERE

Pentru un dipol activ, transferul maxim de putere de la acesta la o rezistență de sarcină R, se realizează în momentul în care valoarea rezistenței de sarcină este egală cu rezistența internă a dipolului R_0. Spunem în acest caz că sarcina exterioară este *adaptată* dipolului.

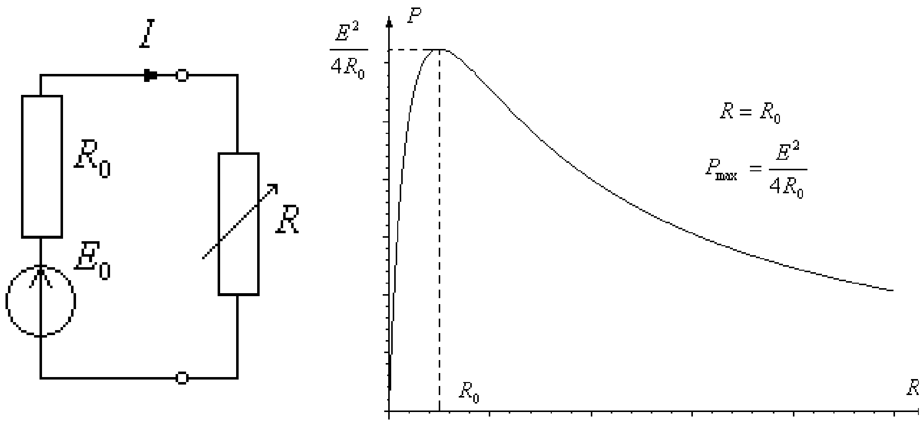


Fig.1.19 Teorema tranferului maxim de putere.

În acest caz, *randamentul transferului de putere* de la dipol la sarcină este :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_g} = \frac{R}{R+R_0} = \frac{R_0}{2R_0} = 0.5 \tag{1.9}$$

Se observă că în acest caz randamentul transmisiei de putere este inadmisibil de mic.

Cu toate acestea, sunt aplicații în care se doreşte o sarcină adaptată sursei; acesta este cazul demarorului de pornire a autovehiculelor alimentate de la bateria de acumulatoare.

Este necesară transferarea unei puteri maxime pentru un timp relativ scurt, randamentul putând avea valori destul de mici.

1.3 METODE SISTEMATICE DE REZOLVARE A CIRCUITELOR DE CURENT CONTINUU

Metodele de rezolvare utilizate în paragraful anterior, bazate pe teoremele de echivalență (generatoare şi rezistențe echivalente) pot fi aplicate unor clase reduse de probleme (ce pot fi reduse prin grupări serie sau paralel la un singur ochi).

Metodele sistematice vor fi metode ce se pot aplica la orice tip de rețea şi permit calculul tuturor curenților şi tensiunilor din rețea.

Presupunând că avem de-a face cu o rețea izolată cu *L* laturi (dintre care L_j conțin surse ideale de curent) şi *N* noduri, printr-o metodă sistematică de analiză a acestei rețele se înțelege o metodă aplicabilă oricare ar fi configurația sa topologică şi oricare ar fi valorile şi orientările săgeților tensiunilor electromotoare E_k ale surselor ideale de tensiune, valorile şi orientările săgeților curenților electromotori J_k ai surselor ideale de curent şi valorile rezistențelor R_k ale rezistoarelor, în scopul determinării curenților I_k ai laturilor şi tensiunilor U_{J_k} la bornele surselor ideale de curent.

Numărul mărimilor necunoscute este *L*; dintre acestea $L - L_j$ sunt curenții I_k ai laturilor care nu conțin surse de curent, iar L_j sunt tensiunile U_{J_k} la bornele surselor de curent.

Prin problema directă vom înțelege problema în care *datele problemei* sunt: *structura topologica a rețelei, parametrii elementelor de circuit din rețea,* E_k, J_k, R_k, iar *necunoscutele* vor fi *tensiunile* la bornele elementelor şi *curenții* prin acestea.

Pentru rezolvarea problemei directe se pot utiliza teoremele generale ale lui Kirchhoff, completate cu relațiile de funcționare (relațiile dintre tensiune şi curent) pentru fiecare element, metoda curenților ciclici sau metoda potențialelor la noduri.

1.3.1 ELEMENTE DE TOPOLOGIE A CIRCUITELOR ELECTRICE

Se numeşte **element multipolar de circuit** (sau **multipol**) **de ordinul** *m* un domeniu spațial a cărui conexiune cu exteriorul se realizează prin intermediul a *m* borne de acces. Elementul multipolar în care *m* = 2 se numeşte **dipol**, elementul multipolar în care *m* = 3 se numeşte **tripol**, iar elementul multipolar în care *m* = 4 se numeşte **cuadripol**.

Prin **circuit electric** (sau **rețea electrică**) se înțelege un ansamblu de elemente multipolare de circuit, interconectate prin intermediul bornelor lor de acces, într-un anumit mod, în vederea realizării unui anumit scop. O rețea care nu posedă conexiuni cu exteriorul se numeşte **izolată**.

Se numeşte **nod** o bornă comună a cel puțin trei elemente multipolare de circuit. Se numeşte **latură** o cale conductoare între două noduri, cale conținând elemente dipolare de circuit. Se numeşte **buclă** o mulțime de laturi împreună cu nodurile aferente lor în care **mulțimea laturilor alcătuieşte un contur închis** şi în care fiecare latură şi fiecare nod sunt conținute o singură dată în conturul respectiv.

Pentru o rețea izolată cu *L* laturi şi *N* noduri, o mulțime de noduri în număr de $N_f = N - 1$ formează **sistemul de noduri fundamentale** (**independente**), iar o mulțime de bucle în număr de $B_f = L - N + 1$ care acoperă toate laturile rețelei formează **sistemul de bucle fundamentale** (**independente**) ale acesteia. Remarcăm că pentru o rețea dată **alegerea nodurilor independente şi a buclelor independente este opțională**, fapt care va fi utilizat în rezolvarea problemelor.

Se numeşte **graf neorientat** (pe scurt **graf**) al unui circuit o reprezentare grafică *G* a acestuia, în care nodurile sunt simbolizate prin puncte, iar laturile sunt simbolizate prin arce de curbă (făcându-se abstracție de elementele de circuit de pe laturi).

Un graf S se numeşte **subgraf** al grafului G dacă mulţimea laturilor şi a nodurilor grafului S este inclusă în mulţimea laturilor şi nodurilor grafului G.

Pentru o reţea izolată cu L laturi şi N noduri, de graf G, un subgraf A al grafului G care conţine $R = N – 1$ laturi împreună cu nodurile aferente acestora, cele $N – 1$ laturi **neformând un contur închis**, poartă numele de **arbore**. Cele R laturi ale arborelui se numesc **ramuri**.

Subgraful C al grafului G care conţine mulţimea laturilor, numite **corzi**, care nu intră în componenţa arborelui, se numeşte **coarbore**.

Graful orientat al curenţilor se obţine din graful neorientat al circuitului pe care se orientează laturile conform unor sensuri de referinţă (alese arbitrar) pentru curenţii ce străbat laturile.

Graful orientat al tensiunilor se obţine din graful neorientat al circuitului pe care se orientează laturile conform unor sensuri de referinţă (alese arbitrar) pentru tensiunile la bornele laturilor. Pe acest graf pot fi evidenţiate şi tensiunile la bornele diverselor elemente de circuit, precum şi tensiunile între **oricare** două puncte ale reţelei.

1.3.2 METODA ECUAŢIILOR KIRCHHOFF

Metoda ecuaţiilor lui Kirchhoff presupune scrierea a $N\text{-}1$ ecuaţii din teorema întâia (N fiind numărul de noduri), iar a $L\text{-}N\text{+}1$ ecuaţii date de a doua teoremă (L fiind numărul de laturi).

Rezultă astfel un sistem compatibil determinat ce are ca necunoscute curenţii prin laturile circuitului.

Aceasta metodă prezintă următorul algoritm:

1. Se aleg sensurile de referinţă şi se aleg cei L curenţi din reţea. Se aleg sensurile de referinţă şi se notează tensiunile la bornele generatoarelor ideale de curent.

2. Se scrie prima teoremă a lui Kirchhoff de $N\text{-}1$ ori pentru $N\text{-}1$ noduri.

$$\sum_k I_k = 0 \tag{1.10}$$

În relaţia (1.10), suma este considerată algebrică (se trec cu plus curenţii care ies şi cu minus curenţii care intră în nod).

3. Se scrie teorema a doua a lui Kirchhoff pe $L\text{-}N\text{+}1$ ochiuri independente pentru care s-au marcat în prealabil sensurile de parcurs:

$$\sum_k R_k I_k + \sum_k U_{J_k} = \sum_k E_k \tag{1.11}$$

În relația (1.11) toate cele trei sume sunt algebrice (termenii se trec cu minus dacă sensul de parcurs este opus sensului lui I_k, U_{J_k} sau E_k).

Pentru a scrie o ecuație pe un ochi trebuie să-l parcurgem de două ori prima dată, să urmărim rezistoarele, generatoarele ideale de curent şi tensiunile la borne, iar a doua oară numai generatoarele ideale de tensiune.

Ochiurile pe care scriem aceste ecuații sunt de preferabil alese astfel încât să aibă un număr minim de rezistoare.

4. Se rezolvă sistemul format din L ecuații cu L necunoscute (curenții prin laturi şi tensiunile la bornele generatoarelor ideale de curent) cu una din metodele matematice cunoscute de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare (substituție, reducere, determinanți sau prin inversare de matrici).
5. Se verifică rezultatele obținute prin verificarea teoremelor lui Kirchhoff în nodul în care nu a fost utilizat sau pe alte ochiuri neutilizate.
6. Se verifică bilanțul puterilor pe rețea cu relația:

$$\sum_{k=1}^{L} R_k I_k^2 = \sum_{k=1}^{L} E_k I_k + \sum_{k=1}^{Lj} U_{J_k} J_k \tag{1.12}$$

În relația (1.12), suma din stânga este aritmetică, sumele din dreapta sunt algebrice ($E_k I_k$ se trec cu minus doar dacă E_k şi I_k au semne opuse, iar $U_{J_k} J_k$ se trece cu semnul minus doar dacă U_{J_k} şi J_k au sensuri de referință similare)

1.3.3 METODA CURENȚILOR CICLICI

O alta metodă sistematică de rezolvare a circuitelor de curent continuu este metoda curenților ciclici.

Metoda curenților ciclici utilizează un set de necunoscute primare auxiliare – **curenții ciclic**i (care se mai numesc şi curenți de buclă sau de contur) care sunt nişte curenți de calcul (fictivi) ataşați câte unul pentru fiecare dintre cele $B_f = L - N + 1$ bucle fundamentale ale rețelei. Ei sunt definiți ca având proprietatea de a străbate cu o aceeaşi valoare toate laturile care alcătuiesc bucla respectivă. În acest fel, prin superpoziție, un curent prin oricare dintre laturile circuitului este suma algebrică a curenților ciclici care trec prin acea latură şi, ca atare, în cazul particular în care o latură este parcursă de un singur curent ciclic acesta este egal cu curentul acelei laturi.

Pentru rezolvarea unei probleme directe cu ajutorul acestei metode se parcurg următoarele etape:

1. Se numără nodurile (două noduri unite printr-un conductor le vom numi "*pseudo-noduri*" şi le vom considera ca alcătuind un singur nod). Se numără laturile. Se calculează numărul de ochiuri fundamentale cu relația $O = L - N + 1$.

2. Se aleg *O* ochiuri independente care se consideră parcurse de curenți ciclici marcându-se pe figură sensurile de referință şi valorile acestor curenți. Dacă problema conține generatoare ideale de curent se aleg ochiurile astfel încât fiecare curent ciclic să nu parcurgă decât maxim un singur generator de curent.
3. Se scriu *O* ecuații liniare sub forma standard:

$$\begin{cases} R_{11}I_1^{'} + R_{12}I_{21}^{'} + \cdots R_{10}I_0^{'} = E_1^{'} \\ R_{21}I_1^{'} + R_{22}I_{21}^{'} + \cdots R_{20}I_0^{'} = E_2^{'} \\ \vdots \\ R_{01}I_1^{'} + R_{02}I_{21}^{'} + \cdots R_{00}I_0^{'} = E_0^{'} \end{cases} \tag{1.13}$$

4. Se calculează R_{ii} (elementele de pe diagonala sistemului) ca suma aritmetică a rezistențelor de pe ochiul i. Dacă pe ochiul i se afla un generator ideal de curent atunci $R_{ii} = \infty$, deci ecuația i nu are sens şi ea se elimină din sistem. Se calculează apoi $R_{ij} = R_{ji}$, ca fiind rezistența laturilor comune i cu ochiul j; ea se trece cu plus dacă cei doi curenți ciclici au acelaşi sens şi cu minus dacă au sensuri opuse prin latura comună.
5. Se calculează tensiunile $E_i^{'}$ ca suma algebrică a tensiunilor electromotoare ale generatoarelor ideale de tensiune pe ochiul i (la fel ca membrul drept din metoda ecuațiilor lui Kirchhoff).
6. Se completează sistemul obținut cu valorile curenților ciclici ce trec prin generatoarele ideale de curent (care sunt tocmai curenții de scurt-circuit ai generatoarelor).
7. Sistemul astfel obținut se rezolvă cu una din metodele cunoscute în matematică.
8. Se aleg sensurile de referință ale curenților din laturi şi se calculează aceşti curenți ca sume algebrice de curenți ciclici.
9. Se calculează tensiunea la bornele elementelor aplicând ecuațiile de funcționare sau teorema a doua a lui Kirchhoff.
10. Verificările ce se pot face se bazează pe teorema a doua a lui Kirchhoff, sau bilanțul puterilor.

Dacă rețeaua conține şi L_j laturi cu surse de curent atunci se va alege sistemul de bucle independente astfel încât nici una dintre aceste bucle să nu conțină mai mult decât o latură cu sursă de curent. În acest fel oricare dintre cele $B_f = L - N + 1$ bucle fundamentale se va încadra în una dintre următoarele două categorii: categoria buclelor care nu conțin laturi cu surse de curent (numărul acestora fiind $L - L_j - N + 1$) şi categoria buclelor care conțin câte o singură latură cu sursă de curent (numărul acestora fiind L_j).

Ecuația corespunzătoare unei bucle cu numărul de ordine k din prima categorie va fi de tipul (1.13), adică

$$R_{k,1} \cdot I'_1 + R_{k,2} \cdot I'_2 + \ldots + R_{k,L-N+1} \cdot I'_{L-N+1} = E'_k, \tag{1.14}$$

în timp ce ecuația corespunzătoare unei bucle cu numărul de ordine j din cea de-a doua categorie va fi

$$I'_j = J_k \tag{1.15}$$

dacă se alege curentul ciclic I'_j cu sensul coincizând prin latura cu numărul de ordine h cu sensul curentului electromotor J_k.

După determinarea curenților ciclici se calculează prin superpoziție curenții tuturor laturilor, iar apoi se găsesc cele L_j tensiuni U_{J_k} la bornele surselor de curent cu ajutorul celei de-a doua teoreme a lui Kirchhoff: ecuațiile de tip Kirchhoff II vor fi scrise pe rând pentru cele L_j bucle din cea de-a doua categorie şi vor conține fiecare numai câte una dintre tensiunile U_{J_k}.

1.3.4 METODA POTENȚIALELOR LA NODURI

Metoda potențialelor nodurilor utilizează şi ea un set de necunoscute primare auxiliare – **potențialele** V_1, V_2, …, V_{N-1} **ale celor** $N_f = N - 1$ **noduri independente ale rețelei**, potențiale raportate la cel de-al N-lea nod al rețelei ales ca referință ($V_N = 0$). Odată aflate aceste potențiale, se determină mai întâi tensiunile la bornele laturilor având ca extremități nodurile (n_k) şi (n_j) cu relațiile

$$U_{kj} = V_k - V_j, \tag{1.16}$$

iar apoi curenții laturilor şi tensiunile la bornele surselor de curent într-o succesiune dictată de configurația concretă a circuitului studiat.

Această metodă presupune următoarele etape:

1. Se urmăresc laturile rețelei ce conțin numai generatoare ideale de tensiune (laturi de rezistență nulă). Unul din nodurile rețelei (de preferință cel în care converg cele mai multe laturi de rezistență nulă), se alege ca nod de referință (de potențial nul). Laturile de rezistență nulă care nu converg în nodul de referință se pasivizează cu ajutorul teoremei lui Vaschy, pentru generatoarele de tensiune obținându-se o rețea echivalentă din punct de vedere al curenților cu rețeaua inițială.

2. Se numără nodurile şi se numerotează potențialele lor (pseudo-nodurile se vor considera ca un singur nod): $V_0, V_1 \cdots V_{n-1}$.
3. Se scriu $n-1$ ecuații liniare sub forma standard:

$$\begin{cases} G_{11}V_1 + G_{12}V_2 + \cdots G_{1n-1}V_{n-1} = I_{sc1} \\ G_{12}V_1 + G_{22}V_2 + \cdots G_{21n-1}V_{n-1} = I_{sc2} \\ \vdots \\ G_{n-11}V_1 + G_{n-12}V_2 + \cdots G_{n-1n-1}V_{n-1} = I_{scn-1} \end{cases} \tag{1.17}$$

4. Se calculează G_{ii} (elementele de pe diagonala sistemului) ca suma aritmetică a conductanțelor laturilor ce concură la nodul i. Dacă între aceste laturi este una de rezistență nulă $G_{ii} = \infty$, ecuația respectivă se elimină din sistem ca fiind lipsită de sens. Se calculează apoi $G_{ij} = G_{ji}$ ca fiind suma aritmetică a conductanțelor laturilor ce leagă nodul i cu nodul j **luată cu sens schimbat.**
5. Se calculează "injecțiile" de curent în noduri I_{sci}, ca suma algebrică a curenților de scurt-circuit ai laturilor ce concură în nodul i. Curenții de scurt-circuit ai laturilor se calculează eliminând latura respectivă din circuit şi unind bornele ei extreme. Aceşti curenți se trec cu plus dacă săgeata generatorului înțeapă (injectează) nodul şi cu minus dacă pleacă din nod.
6. Se completează sistemul obținut cu valorile potențialelor de la extremitățile laturilor de rezistență nulă (ele sunt $\pm$ tensiunile electromotoare ale generatoarelor ideale de tensiune de pe acele laturi).
7. Sistemul obținut se rezolvă cu una din metodele cunoscute din matematică.
8. Se aleg sensurile de referință ale curenților din laturi şi ale tensiunilor la bornele laturilor, făcându-se notațiile corespunzătoare.
9. Se calculează tensiunile la bornele laturilor ca diferențe de potențial.
10. Se calculează intensitățile curenților prin laturi aplicând teorema a doua a lui Kirchhoff pe ochiul format de latură şi sensul de referință al tensiunii.
11. Se calculează tensiunile din rețeaua inițială utilizând teorema a doua a lui Kirchhoff.
12. Se verifică rezultatele obținute cu ajutorul teoremei întâi a lui Kirchhoff şi prin bilanțul puterilor.

Dacă rețeaua studiată are una sau mai multe laturi conținând numai câte o sursă ideală de tensiune şi toate aceste laturi converg într-un acelaşi nod, atunci se alege ca referință a potențialelor acel nod comun. În acest fel potențialele celorlalte noduri extremități ale acelor laturi vor fi cunoscute, fiind dictate de ecuațiile de funcționare ale surselor.

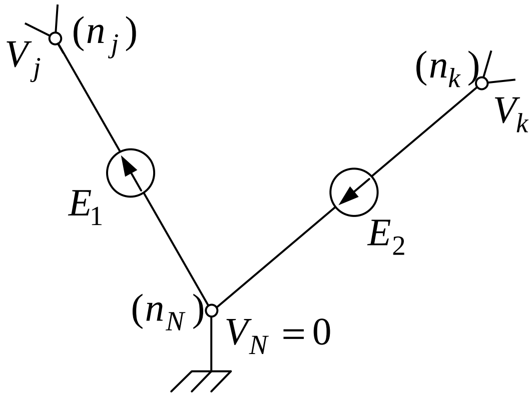


Fig.1.20 Teorema lui Thévenin.

În exemplul ilustrat în figura 1.20

$$V_j = +E_1 \tag{1.18}$$

iar

$$V_k = -E_2 \, . \tag{1.19}$$

Ca atare, în sistemul (1.17) ecuațiile corespunzătoare nodurilor cu numerele de ordine *j* şi *k* vor fi înlocuite cu ecuațiile (1.18) şi, respectiv, (1.19).

Dacă rețeaua analizată are două sau mai multe laturi conținând numai câte o sursă ideală de tensiune, dar nu toate converg într-un acelaşi nod, atunci pentru rezolvarea problemei se utilizează alte metode.

În finalul prezentării metodelor sistematice de analiză a circuitelor de curent continuu vom reține că, pentru o rețea cu L laturi şi N noduri, numărul de necunoscute cu care lucrează metoda teoremelor lui Kirchhoff (şi, în consecință, ordinul sistemului liniar care trebuie rezolvat) este L, în timp ce metoda curenților de buclă lucrează cu $B_\mathrm{f} = L - N + 1$ necunoscute, iar metoda potențialelor nodurilor lucrează cu $N_\mathrm{f} = N - 1$ necunoscute. Numerele naturale L, B_f şi N_f satisfac relația:

$$L = B_\mathrm{f} + N_\mathrm{f} \, . \tag{1.20}$$

ceea ce arată că metoda curenților ciclici şi metoda potențialelor nodurilor sunt mai comode decât metoda teoremelor lui Kirchhoff întrucât sistemele liniare care trebuie rezolvate au grade mai mici decât L.

Mai mult, aşa după cum s-a arătat anterior, dacă rețeaua studiată conține laturi cu surse ideale de curent şi/sau laturi având în componență numai surse ideale de tensiune, o parte dintre necunoscutele aferente acestor două metode se găsesc direct, celelalte rămânând de determinat prin rezolvarea unor sisteme liniare: de ordinul $\nu_{\mathrm{c.b.}}$ (cu $\nu_{\mathrm{c.b.}} \le B_\mathrm{f}$) în metoda curenților de buclă şi, respectiv, de ordinul $\nu_{\mathrm{p.n.}}$ (cu $\nu_{\mathrm{p.n.}} \le N_\mathrm{f}$) în metoda potențialelor nodurilor.

Pentru o rețea dată, o comparație între cele două metode din punct de vedere al efortului de calcul se poate face așadar prin calcularea numerelor naturale $\nu_{\text{c.b.}}$ și $\nu_{\text{p.n.}}$, apreciindu-se ca fiind mai eficientă metoda care necesită rezolvarea unui sistem liniar de ordinul:

$$\nu = \min\{\nu_{\text{c.b.}}; \nu_{\text{p.n.}}\}. \qquad (1.21)$$

1.3.5. REZOLVAREA CIRCUITELOR PRIN TEOREMA LUI THÉVENIN ŞI NORTON

Teorema lui Thévenin permite calculul intensității curentului într-o singură latură din circuit.

Pentru aplicarea acesteia trebuie parcurse următoarele etape:

1. Se aleg bornele A şi B de pe latura în care ne interesează curentul astfel încât între ele să nu se afle nici un generator (la extremitățile unui rezistor R_{AB} sau de-a lungul unui conductor $R_{AB} = 0$).
2. Se pasivizează rețeaua înlocuindu-se generatoarele cu rezistențele lor interne (generatoarele ideale de tensiune cu $R = 0$, şi generatoarele ideale de curent cu $R = \infty$). Se elimină rezistența dintre bornele A şi B. Pentru rețeaua astfel obținută se calculează rezistența R_{AB0}, rezistența echivalentă între bornele A şi B.
3. În rețeaua nepasivizată se elimină rezistența dintre bornele A şi B şi se calculează tensiunea între aceste puncte (tensiunea de mers în gol U_{AB0}). Această tensiune se calculează cu una din metodele prezentate anterior (avantajul metodei Thévenin este că rețeaua ce trebuie rezolvată la acest punct este mai simplă decât cea inițială având o latură mai puțin).
4. Se calculează intensitatea $I_{AB} = \dfrac{U_{AB0}}{R_{AB0} + R_{AB}}$ şi tensiunea $U_{AB} = R_{AB} I_{AB}$.

O altă metodă de calcul a unei singure mărimi (tensiune de astă data) este *teorema lui Norton.* Pentru aplicarea acestei metode trebuie parcurse următoarele etape:

1. Se aleg bornele A şi B astfel încât între ele să se afle doar un rezistor (chiar de conductanță nulă).
2. Se calculează conductanța echivalentă a rețelei pasivizate (pasivizarea se face ca şi la metoda Thévenin):

$$G_{AB0} = \frac{1}{R_{AB0}}$$

3. În rețeaua inițială se scurt-circuitează punctele AB şi se calculează intensitatea curentului ce parcurge conductorul de scurt-circuit I_{scAB}. Calculul acestui curent se face cu una din metodele prezentate anterior. (Este remarcabil că rețeaua de rezolvat la acest punct are o latură mai puțin decât rețeaua inițială, lucru ce simplifică în unele cazuri foarte mult rețeaua).
4. Se calculează tensiunea între bornele A şi B cu ajutorul rețelei $U_{AB} = \dfrac{I_{scAB}}{G_{AB0} + G_{AB}}$ şi intensitatea $I_{AB} = U_{AB} G_{AB}$.

1.3.6. METODA SUPERPOZIȚIEI

Este o metodă de rezolvare a circuitelor electrice valabilă pentru circuitele liniare şi se poate sublima în următoarea afirmație:

"*Intensitatea curentului electric din orice latură a unei rețele electrice liniare este suma algebrică a intensităților curenților pe care i-ar stabili în acea latură fiecare dintre sursele independente dacă s-ar găsi singură în rețea*".

Trebuie spus că suprimarea acțiunii celorlalte surse de energie din circuit se face prin pasivizare (vezi figura 15).

Mai trebuie menționat că trebuie ținută seama de semnul fiecărui curent ales prin latura în care dorim să determinăm intensitatea curentului.

1.4. SURSE COMANDATE - ELEMENTE DE BAZĂ

Sursele comandate sunt acele surse la care mărimile furnizate de acestea **depind** (**sunt comandate**) de alte mărimi – curenți sau tensiuni – din circuit.

Din acest motiv o sursă comandată admite ca model un multipol cu patru borne de acces, numit **cuadripol diport** (notat CD în figura 1.21). Cele patru borne sunt grupate în două porți: **poarta de intrare**, la care mărimile la borne U_1 şi I_1 sunt asociate ca sensuri de referință conform convenției de la receptoare, şi **poarta de ieşire**, la care mărimile la borne U_2 şi I_2 sunt asociate ca sensuri de referință conform convenției de la generatoare.

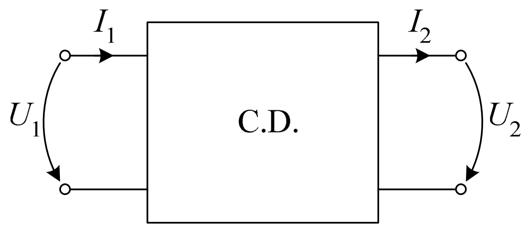


Fig.1.21 Cuadripol diport.

După cum poarta de intrare este un scurtcircuit (U_1 = 0) sau un gol (I_1 = 0), iar poarta de ieşire este un generator ideal de tensiune sau un generator ideal de curent, sursele comandate se clasifică în următoarele patru categorii (vezi figura 1.22):

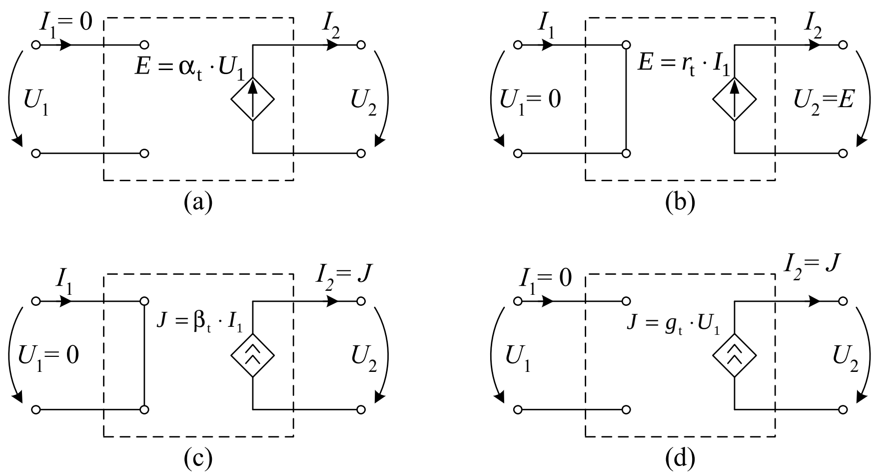


Fig.1.22 Categorii de surse comandate.

(a) **Sursa de tensiune comandată în tensiune**, care are ecuaţiile de funcţionare

$$U_2 = E = \alpha_t \cdot U_1;\; I_1 = 0 \tag{1.22}$$

(b) **Sursa de tensiune comandată în curent**, care are ecuaţiile de funcţionare

$$U_2 = E = r_t \cdot I_1;\; U_1 = 0 \tag{1.23}$$

(c) **Sursa de curent comandată în curent**, care are ecuaţiile de funcţionare

$$I_2 = J = \beta \cdot I_1;\; U_1 = 0 \tag{1.24}$$

(d) **Sursa de curent comandată în tensiune**, care are ecuaţiile de funcţionare

$$I_2 = J = g_t \cdot U_1;\; I_1 = 0 \tag{1.25}$$

Constantele α_t, r_t, β_t şi g_t sunt **mărimi de transfer între poarta de intrare şi poarta de ieşire** şi au următoarele semnificaţii:

- $\alpha_t = \left.\dfrac{U_2}{U_1}\right|_{I_1=0}$ se numeşte **factor** (adimensional) **de transfer în tensiune**
- $r_t = \left.\dfrac{U_2}{I_1}\right|_{U_1=0}$ se numeşte **rezistenţă de transfer**
- $\beta_t = \left.\dfrac{I_2}{I_1}\right|_{U_1=0}$ se numeşte **factor** (adimensional) **de transfer în curent**
- $g_t = \left.\dfrac{I_2}{U_1}\right|_{I_1=0}$ se numeşte **conductanţă de transfer**.

Sunt de reţinut următoarele chestiuni în legătură cu sursele comandate:

- Sursele comandate sunt surse ideale;

- Sursele comandate modelează existenţa unor fenomene de cuplaj electromagnetic între mărimile ce caracterizează poarta de intrare şi mărimile ce caracterizează poarta de ieşire, care pot conduce la scheme echivalente rezistive neconexe;

- Rezolvarea circuitelor cu surse comandate cu ajutorul teoremelor lui Kirchhoff, metodei curenţilor ciclici şi metodei potenţialelor nodurilor se face la fel ca în cazul în care nu există surse comandate. Ecuaţiilor corespunzătoare fiecărei metode li se adaugă relaţiile care exprimă mărimile care comandă în funcţie de necunoscutele metodei, iar apoi aceste relaţii se înlocuiesc în expresiile surselor comandate.

În acest fel, în cazul rezolvării circuitelor cu surse comandate cu ajutorul metodei curenţilor ciclici sau a metodei potenţialelor nodurilor, matricile coeficienţilor necunoscutelor nu vor mai fi simetrice după rescrierea ecuaţiilor.

- Generatoarele comandate se comportă diferit faţă de generatoarele independente referitor la teoremele Thévenin, Norton şi superpoziţiei, în sensul că **sursele comandate nu se pasivizează** întrucât ele nu pot exista în absenţa unei mărimi (curent sau tensiune) de comandă.

• Calculul parametrilor R_{AB_0} şi G_{AB_0} (necesari în teoremele generatoarelor echivalente) se poate face prin una din următoarele metode:

– Se determină mai întâi mărimile $U_{AB_{gol}}$ şi $I_{AB_{sc}}$, iar apoi se calculează R_{AB_0} şi, respectiv, G_{AB_0} cu relaţiile

$$R_{AB_0} = \frac{U_{AB_{gol}}}{I_{AB_{sc}}}; \; G_{AB_0} = \frac{1}{R_{AB_0}} = \frac{I_{AB_{sc}}}{U_{AB_{gol}}} \tag{1.26}$$

– Se utilizează metoda de determinare a rezistenţei (conductanţei) de intrare a unui circuit electric **fără a pasiviza sursele comandate**.

Atragem atenţia că, pentru circuitele care conţin generatoare comandate, **mărimile R_{AB_0} şi G_{AB_0} pot rezulta şi negative**.

• În cazul reţelelor cu generatoare comandate, teorema superpoziţiei afirmă că un curent printr-o latură, oricare, a unui circuit liniar este suma algebrică a curenţilor pe care îi stabileşte în acea latură fiecare dintre sursele independente, **dar de fiecare dată în prezenţa surselor comandate** (care nu se pasivizează).

1.5 Bibliografie la cap.1

1.1. R. Răduleţ, *Bazele teoretice ale electrotehnicii*, vol. I, II, III, IV, Tipografia Ministerului Educaţiei şi Învăţământului, Bucureşti, 1954 – 1956.

1.2. A. Timotin, V. Hortopan, A. Ifrim, M. Preda, *Lecţii de bazele electrotehnicii*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1970.

1.3. C. I. Mocanu, *Teoria circuitelor electrice*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1979.

1.4. I. S. Antoniu, *Bazele electrotehnicii*, vol. I, II, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1974.

1.5. Pl. Andronescu, *Bazele electrotehnicii*, vol. I, II, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1972.

1.6. M. Preda, P. Cristea, *Bazele electrotehnicii*, vol. 2, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1980.

1.7. A. Moraru, V. Hortopan, I. Ciric, *Electrotehnică măsuri şi maşini electrice,* Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1976

1.8. F. Manea, M. Preda, H. Gavrilă, *Electrotehnică şi maşini electrice*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1976.

1.9. C. Şora, *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1982.

1.10. H. Gavrilă, *Electrotehnică şi echipamente electrice*, vol. 1+2, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1994.

1.11. A. Moraru, *Bazele electrotehnicii Teoria circuitelor electrice*, Editura Matrix Rom, Bucureşti, 2002

1.12. E. Simion, *Electrotehnică*, Editura didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1978.

1.13. C. Nemoianu, *Bazele Electrotehnicii- Teoria circuitelor electrice*, , Litografia I.P.B, Bucureşti, 1995.

1.14. Al. Nicolae, *Curs de bazele electrotehnicii*, vol. I, II, Litografia I.P.B., Bucureşti, 1990.

1.15. C. Flueraşu, *Bazele Electrotehnicii,* Litografia I.P.B., Bucureşti, 1990.

1.16. Gh. Frăţiloiu , A. Ţugulea, *Electrotehnică şi electronică aplicată*, Editura Didactică şi Pedagogică R. A., Bucureşti, 1998

1.17. M. Iordache, L. Dumitriu, *Teoria modernă a circuitelor* – vol 1 + 2, Editura All Educational, Bucureşti, 1998/2000.

1.18. Hănţilă I. F. şa, *Electrotehnică teoretică*, vol. I, II, III, Editura Electra, Bucureşti, 2002–2004.

1.19. A. Tomescu, F.M.G. Tomescu, *Bazele electrotehnicii, circuite electrice*, Editura Matrix Rom, Bucureşti, 2002.

1.20. E. Cazacu ş.a, *Chestiuni speciale de teoria circuitelor electrice; Elemente de teorie şi aplicaţii*, vol 1+2, Editura Matrix-Rom, 2005.

1.21. E. Cazacu, M. Stănculescu, *Bazele electrotehnicii– teoria circuitelor electrice–seminar,* Editura Matrix-Rom, Bucureşti 2004.

1.22. L. Ochiană, I. V. Nemoianu , I. F. Hănţilă, A. Anghel, *Bazele electrotehnicii-culegere de probleme-Partea I- curent continuu,*, Editura Printech, Bucureşti, 2007.

1.23. L. Ochiană, I. F. Hănţilă, I. V. Nemoianu, *Regimurile circuitelor electrice.-720 de aplicaţii*, Editura Printech, Bucureşti, 2009.

1.24. L. Ochiană, M. Covrig, V. Petre, *Electrotehnică*, Editura Printech, Bucureşti, 1998.