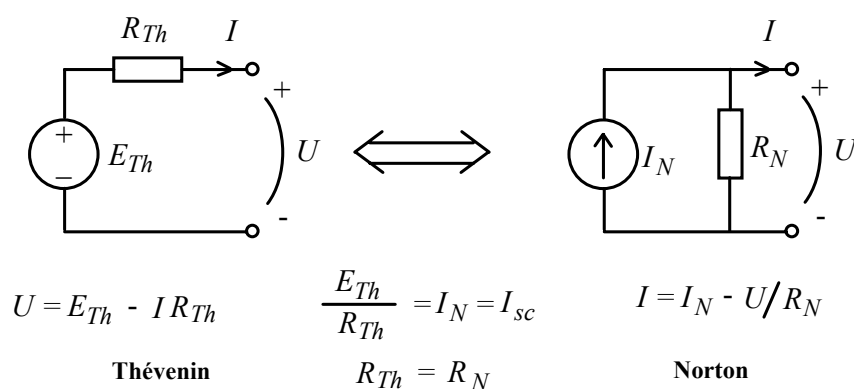


Surse de tensiune și surse de curent



- A. Surse de tensiune 38
- B. Reprezentarea Thévenin 41
- C. Sursa ideală de curent; reprezentarea Norton 42
- D. Rezistența echivalentă 45
- E. Divizorul rezistiv 46
- Problemă rezolvată 50, probleme propuse 52
- Lucrare experimentală 55

A. Surse de tensiune

Un generator de energie electrică determină existența unui curent electric staționar pentru că menține la bornele sale o diferență de potențial, în interiorul său curentul fiind "forțat" să treacă de la potențial coborât la potențial ridicat, așa cum se vede în desenul din Fig. 2.1. Ce se întâmplă însă cu tensiunea de la bornele sale dacă se schimbă intensitatea curentului prin circuit datorită modificării circuitului extern ?

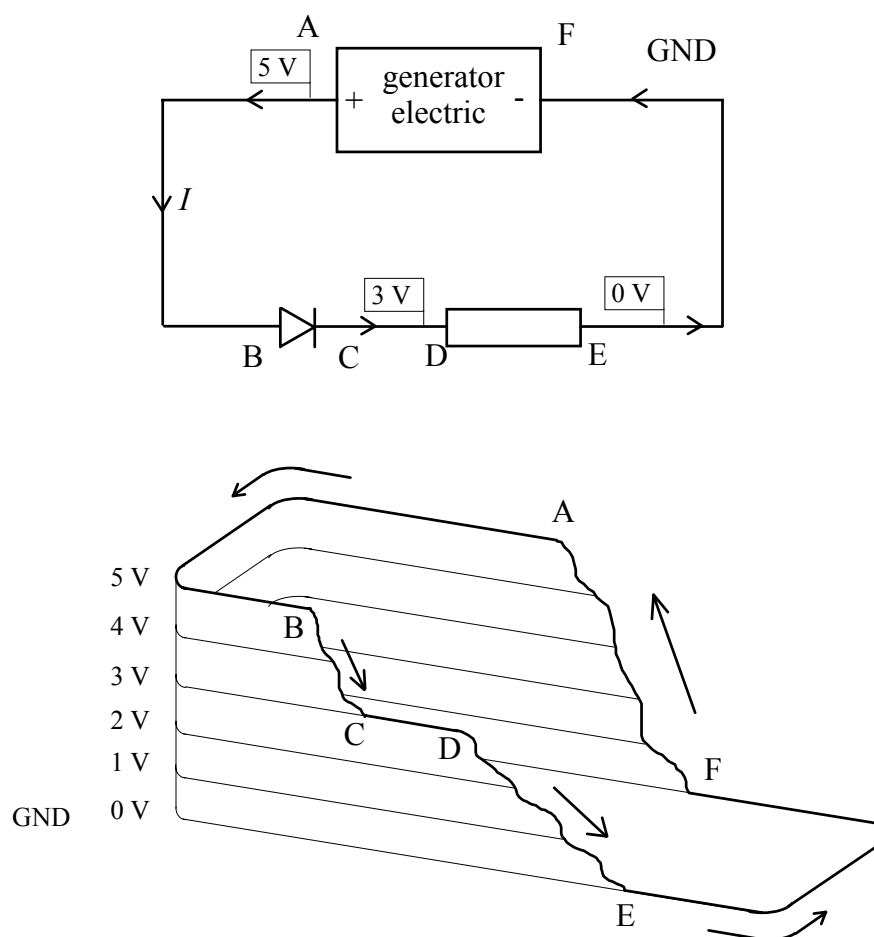


Fig. 2.1. Evoluția potențialului de-a lungul unui circuit electric.

Generatoarele reale se comportă în moduri diferite, după structura lor internă, principiul de funcționare și condițiile externe în care operează. La unele dintre ele, modificarea tensiunii la borne este neglijabilă pentru variații mari ale curentului furnizat. Aceasta a condus la introducerea unui element de circuit (model ideal), numit sursă ideală de tensiune:

tensiunea la bornele unei surse ideale de tensiune este independentă de curentul care o străbate

(adică de circuitul extern). În particular, dacă se face un scurtcircuit (rezistență nulă) la bornele sale, curentul debitat devine infinit.

Pentru sursa ideală de tensiune se utilizează simbolurile din Fig. 2.2; în lucrările de teoria modernă a circuitelor și majoritatea manualelor și articolelor contemporane se folosește simbolul din desenul a). Un alt simbol des utilizat este cel din desenul b), care amintește de o baterie de elemente galvanice. Simbolul din desenul c) este cel recomandat de standardul european DIN dar este extrem de rar utilizat. De cele mai multe ori, pentru simplitate, în schemele electronice se obișnuiește să nu se mai deseneze sursele de alimentare, așa cum sunt ele legate, cu o bornă la masă, ci se desenează simbolul din Fig. 2.2 d) la nodurile unde sunt legate aceste surse, arătându-se astfel că potențialul acestora este menținut constant la valoarea $+V$ (față de masă); frecvent, nici cerculețul nu se mai desenează, scriindu-se doar potențialul la care este menținut nodul respectiv. Noi vom utiliza sistematic simbolurile din desenele a) și d).

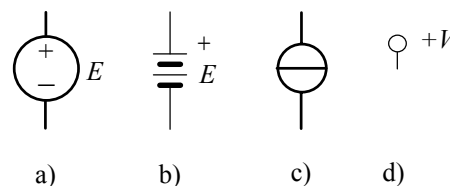


Fig. 2.2. Simboluri pentru sursa ideală de tensiune.

Faptul că tensiunea la bornele sursei de alimentare nu depinde de intensitatea curentului este o proprietate esențială în aplicațiile practice. O treime din apartamentele unui cartier sunt alimentate de la aceeași sursă; imaginați-vă ce s-ar întâmpla dacă tensiunea de la priză ar scădea chiar și numai cu o zecime de volt pentru o variație de 1 A a curentului total (fiecare apartament poate contribui la aceasta variație cu cantitate între zero și câteva zeci de amperi).

*Deși conceptul de sursă ideală de tensiune a apărut la început pentru modelarea generatoarelor galvanice, **nu trebuie să numiți tensiunea de la bornele sale tensiune electromotoare**. Sursa ideală de tensiune este un concept mult mai general și este utilizat, de exemplu, pentru modelarea unei diode semiconductoare în zona de străpungere inversă unde, oricât ne-am strădui, nu putem găsi nici urmă de tensiune electromotoare sau contraelectromotoare. Nici măcar la sursele de alimentare profesionale, care se apropie foarte mult de sursa ideală de tensiune, nu puteți vorbi de valoarea tensiunii **electromotoare** de la borne, factura de la compania de electricitate va arăta cu totul altceva.*

*Sursa ideală de tensiune controlează numai **tensiunea la bornele sale**, curentul este determinat de restul circuitului și poate avea oricare dintre cele două sensuri posibile. Sursa ideală de tensiune poate funcționa, astfel, atât ca **generator de energie electrică** cât și ca un **consumator de energie electrică**. Faptul că o numim în continuare sursă nu trebuie să vă mire, trebuie să aibă și ea un nume, așa cum ascensorului îi spuneți ascensor și când coboriți cu el.*

Electronica modernă poate realiza aparate numite **surse de alimentare (power supply** în limba engleză) a căror tensiune la borne să sufere variații fracționare infime (10^{-5} este o valoare obișnuită), apropiindu-se astfel de aceea a sursei ideale de tensiune. Această comportare este, însă, întodeauna limitată la un anumit domeniu de intensități. Există, astfel, un **curent maxim** admis, dincolo de care sursa de alimentare încetează să mai păstreze constantă tensiunea, fie limitând curentul, fie întrerupându-l, pentru a se proteja. În Fig. 2.3 puteți vedea comportarea unei astfel de surse de alimentare, desenată cu linie groasă, în comparație cu cea a unei surse ideale, trasată cu linie subțire.

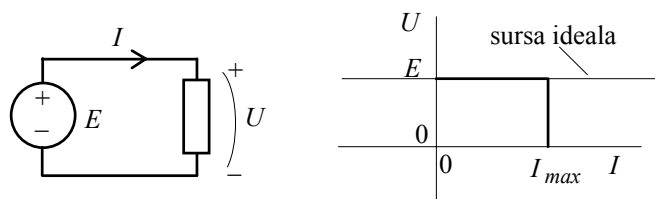


Fig. 2.3. Caracteristica tensiune-curent a unui alimentator electronic.

Un alt aspect important la o sursă de alimentare este comportarea la schimbarea sensului curentului, atunci când se leagă în circuitul extern o altă sursă cu tensiunea mai mare, în opoziție cu ea. De exemplu, în această situație, sursele de alimentare electronice, dacă nu se distrug, încetează să se mai comporte ca surse ideale, cel mai adesea nepermițând trecerea curentului.

Comportarea multor surse de alimentare reale nu se apropie de aceea a sursei ideale de tensiune și, adesea, acest lucru nici nu este necesar. Tensiunea la bornele lor are o valoare maximă atunci când sunt operate **în gol** (curent nul) și dar valoarea tensiunii scade la creșterea curentului. De cele mai multe ori, această dependență este **liniară** (de gradul întâi)

$$\boxed{U = U_{gol} - R_{int} \cdot I} \quad (2.1)$$

unde constanta R_{int} trebuie să aibă dimensiune de rezistență electrică. Relația precedentă, reprezentată grafic în Fig. 2.4 a), permite modelarea unei astfel de surse **liniare** cu o sursă ideală de tensiune în serie cu un rezistor a cărui valoare se spune că este **rezistența internă** a sursei (Fig. 2.4 b). Acest rezistor **nu există fizic în interiorul sursei**, el doar modelează scăderea tensiunii la borne care poate avea și alte cauze decât rezistența electrică a circuitului intern.

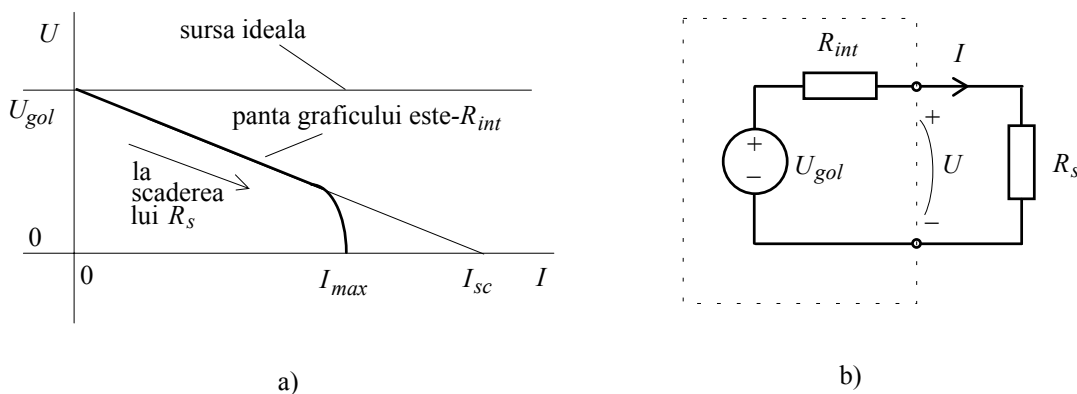


Fig. 2.4. Caracteristica tensiune-curent a unui generator cu comportare liniară.

Schema din desenul b) **modelează numai dependența $U(I)$** și, corespunzător, **schimbul de energie între generator și restul circuitului**; ea nu spune nimic despre bilanțul energetic intern al generatorului, adică despre energia neelectrică ce este convertită în energie electrică; tensiunea U_{gol} **nu trebuie privită ca o tensiune electromotoare care ar rămâne constantă**, pentru că scăderea tensiunii la borne din desenul a) poate fi produsă inclusiv de scăderea tensiunii electromotoare la creșterea curentului. S-ar putea obiecta că la regimul de gol tensiunea electromotoare chiar este egală cu U_{gol} , dar acest lucru este complet neinteresant deoarece nu am cumpărat sursa de alimentare ca să o ținem în dulap în regim de gol și să putem spune fericiți "acum suntem siguri că tensiunea electromotoare este 4.5 V".

Valoarea rezistenței interne se poate determina din valoarea **curentului de scurtcircuit** (la $U = 0$)

$$\boxed{I_{sc} = \frac{U_{gol}}{R_{int}}}, \quad (2.2)$$

dar în practică acest curent este rareori măsurabil direct, deoarece **sursele reale încetează să se comporte liniar la valori mari ale curentului**.

Strict vorbind, nici un circuit electronic nu se comportă, nici măcar pe un domeniu limitat de curent, exact ca o sursă ideală de tensiune, prezentînd o anumită rezistență internă nenulă. Dacă aceasta este foarte mică, pentru **dispozitivul real** se utilizează denumirea de **sursă de tensiune**. De multe ori, acolo unde nu există pericol de confuzie, vom numi, pentru simplificarea exprimării, chiar și sursa ideală de tensiune, sursă de tensiune.

Nu trebuie să rămînem cu impresia că toate sursele de alimentare sunt liniare. În Fig. 2.5 este reprezentată dependența tensiunii pentru un generator fotoelectric (fotocelulă sau fotodiodă). Deși putem vorbi despre tensiune în gol și curent de scurtcircuit, dependența nu este liniară și dispozitivul **nu poate fi modelat** cu o rezistență internă, ca în paragrafele precedente.

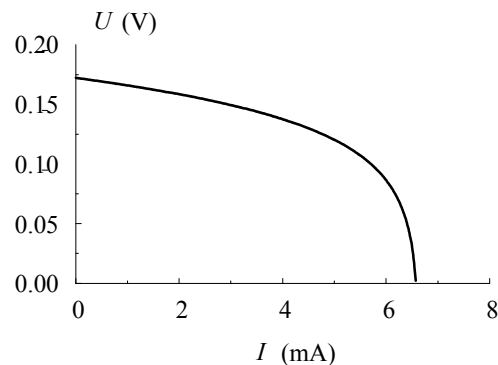


Fig. 2.5. Caracteristica tensiune-curent a unui fotoelement.

B. Reprezentarea Thévenin

În scrierea relației (2.1) nu a intervenit în nici un fel faptul că circuitul pe care îl descrie era o sursă de alimentare. Singura condiție impusă a fost ca circuitul să se comporte **liniar**: aceasta înseamnă că reprezentarea printr-o sursă ideală de tensiune în serie cu un rezistor este valabilă pentru orice circuit liniar accesibil la două borne (Fig. 2.6), rezultat ce este cunoscut ca **teorema Thévenin**.

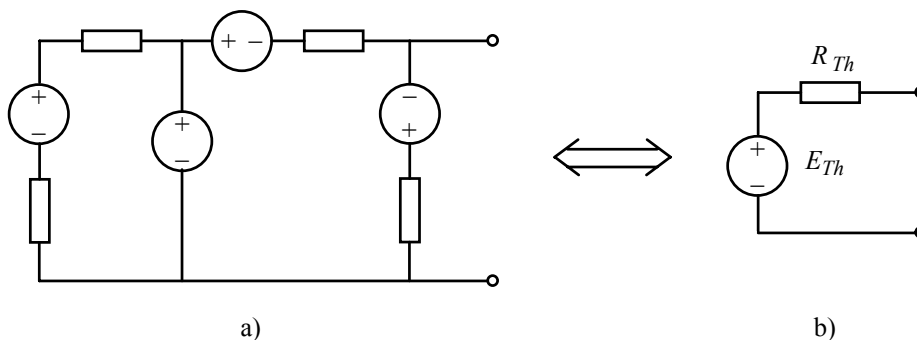


Fig. 2.6. Reprezentarea Thévenin a unui circuit liniar, accesibil la două borne.

Formulată mai întâi în 1853 de către Hermann von Helmholtz într-un articol despre "electricitatea animală", teorema a fost redesoperită 30 de ani mai târziu, în 1893, de către inginerul francez Leon Charles Thévenin care lucra în domeniul telegrafiei. Demonstrația simplă dată de Thévenin și utilizarea ei de către acesta în descrierea circuitelor complicate pe care începea să le utilizeze telegraful electric a făcut ca teorema să poarte numelui lui.

Utilitatea teoremei este dată de faptul că **un circuit**, oricît de complex, **alcătuit numai din elemente liniare, este la rîndul său liniar**, deci poate fi echivalat cu o sursă ideală de tensiune și un rezistor. Într-adevăr, oricît am complica circuitul din Fig. 2.6 a), prin adăugarea de surse ideale de tensiune și rezistoare, el nu poate face **în exteriorul său** decît ceea ce face circuitul său echivalent din desenul b) al

aceleiași figuri; orice efort de modificare a circuitului nu produce decât schimbarea celor două mărimi fizice care îi descriu funcționarea, tensiunea și rezistența Thévenin.

Conform celor spuse anterior, **tensiunea Thévenin E_{Th} este chiar tensiunea în gol** iar curentul de scurtcircuit între borne este E_{Th}/R_{Th} . Vom vedea mai târziu cum se determină în practică rezistența Thévenin. Acum să ne întrebăm de ce este util să cunoaștem această rezistență. Răspunsul este simplu: pentru că circuitul nu este operat niciodată în regim de gol, ci prin conectarea unei rezistențe de sarcină, a cărei valoare se poate modifica în timpul funcționării. În acest caz, tensiunea la borne nu va fi tensiunea E_{Th} (de mers în gol) ci

$$U = E_{Th} \frac{R_S}{R_S + R_{Th}} \quad (2.3)$$

Dacă, de exemplu, rezistența de sarcină este egală chiar cu rezistența Thévenin, vom obținem la borne numai jumătate din tensiunea măsurată în gol iar, la variația sarcinii, variația relativă a tensiunii pe sarcină va fi $\frac{dU}{U} \cong \frac{dR_S}{R_S}$. În cazul în care rezistența de sarcină va fi de zece ori mai mare decât rezistența Thévenin, tensiunea la borne va fi aproximativ egală cu tensiunea în gol (de fapt $1/1.1 \cong 0.91$ din aceasta). La variația rezistenței de sarcină, variația relativă a tensiunii la borne va fi acum $\frac{dU}{U} \cong \frac{1}{10} \frac{dR_S}{R_S}$, de zece ori mai mică decât înainte.

C. Sursa ideală de curent; reprezentarea Norton

Există, însă, anumite circuite pentru care echivalarea Thévenin, deși posibilă, este incomodă. De exemplu, pentru circuitul cu tranzistor din Fig. 2.7 a), dependența tensiunii pe rezistența de sarcină arată ca în desenul b) al figurii. Circuitul se comportă liniar în condiții apropiate de scurtcircuit (regiunea din caracteristică încadrată în dreptunghiul hașurat) dar încetează să facă asta când tensiunea la bornele sale crește (prin creșterea rezistenței din circuitul extern). Tensiunea echivalentă Thévenin, obținută prin extrapolarea dependenței liniare, are o valoare de sute de volți, pe când comportarea liniară încetează deja la 10 V. Astfel, pentru utilizatorul circuitului, tensiunea Thévenin își pierde semnificația de tensiune care se măsoară în gol.

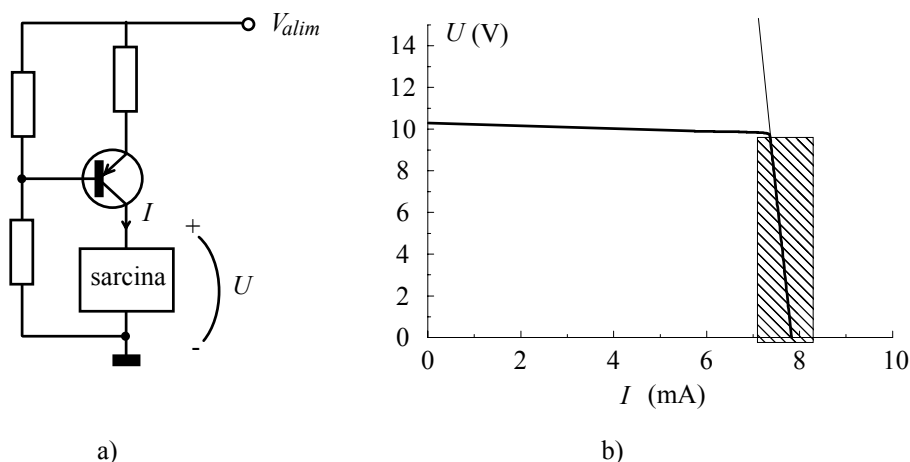


Fig. 2.7. Caracteristica tensiune-curent a sursei de curent cu tranzistor.

Din acest motiv, în regiunea specificată a caracteristicii, se utilizează o echivalare duală a celei Thévenin, justificată de **teorema Norton**. Ea a apărut în anul 1926, într-un raport tehnic intern al inginerului Edward Lawry Norton de la Bell Laboratory și, aproape simultan, într-un articol al fizicianului german Hans Ferdinand Mayer de la firma Siemens. Teorema se bazează pe un alt element ideal de circuit, **sursa ideală de curent** :

sursa ideală de curent debitează un curent cu intensitatea independentă de tensiunea la bornele sale

adică de circuitul extern conectat la bornele sale.

Sursa ideală de curent nu este un concept așa de straniu cum pare multor încropitori de capitolare sau manuale de electricitate de pe la noi, autori care cred că "orice generator electric este caracterizat de tensiunea electromotoare și rezistența sa internă". La viteză constantă a benzii transportoare și cu un rezistor conectat între poli, binecunoscutul generator Van der Graaf este o sursă de curent aproape ideală.

Pentru sursa ideală de curent sunt utilizate simbolurile din Fig. 2.8. Cărțile de teoria modernă a circuitelor, ca și imensa majoritatea a lucrărilor contemporane, folosesc simbolul din desenul a). În unele lucrări mai puteți întâlni și simbolul din desenul b) care seamănă cu un transformator. Standardul european DIN recomandă simbolul din desenul c), dar acesta este extrem de rar utilizat. Noi vom folosi sistematic numai simbolul din desenul a).

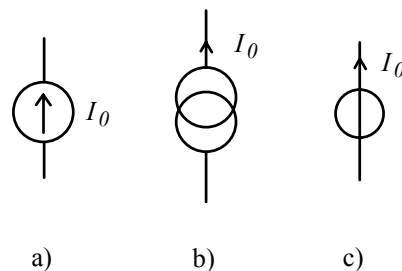


Fig. 2.8. Simboluri acceptate pentru sursa ideală de curent

*Pentru dumneavoastră, care ați făcut liceul în România, simbolul din Fig. 2.8 a) este o veche cunoștință; l-ați întâlnit în manualele de fizică sub numele de "generator" și avînd scrise lîngă el tensiunea electromotoare și rezistența internă. Această năzdrăvănie se datorează originalității unor corifei ai școlii de ingineri de pe Dîmbovița care, în ciuda unor lucrări clasice traduse în română și a unor cărți excelente ale unor profesori români¹, au adoptat acest simbol pentru sursa ideală de **tensiune**. Probabil că acești autori, după ce își cumpără baterii pentru telecomandă, șterg cu înverșunare semnele + și -, desenează pe ele săgeata și apoi se gîndesc la "sensul tensiunii electromotoare" care ar face telecomanda să funcționeze. Și cum cei cîțiva fizicieni, autori ai capitolelor de electricitate din manualele preuniversitare, nu au citit decît electronică de Dîmbovița, simbolul a ajuns repede în școlile generale și licee, odată cu pudoarea care le-a interzis să mai deseneze explicit rezistența internă în serie cu sursa ideală de tensiune. Astfel, pălăvrăgeala de acolo despre "tensiunea internă" și "tensiunea externă" începe să semene cu literatura absurdului.*

*Sursa ideală de curent nu controlează decît intensitatea curentului, tensiunea la bornele sale este determinată de restul circuitului. Astfel, această tensiune poate avea oricare din cele două polarități, sursa ideală de curent putînd funcționa atît ca **generator de energie electrică** cît și ca un **consumator de energie electrică**.*

*Dacă am fi acceptat să numim **tensiune electromotoare** tensiunea de la bornele sursei ideale de tensiune, ar fi fost acum natural să vorbim despre **curentul electromotor** al sursei ideale de curent ?*

¹ De exemplu Gh. Cartianu, M. Săvescu, I. Constantin, D. Statimir, "Semnale, circuite și sisteme", Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1980.

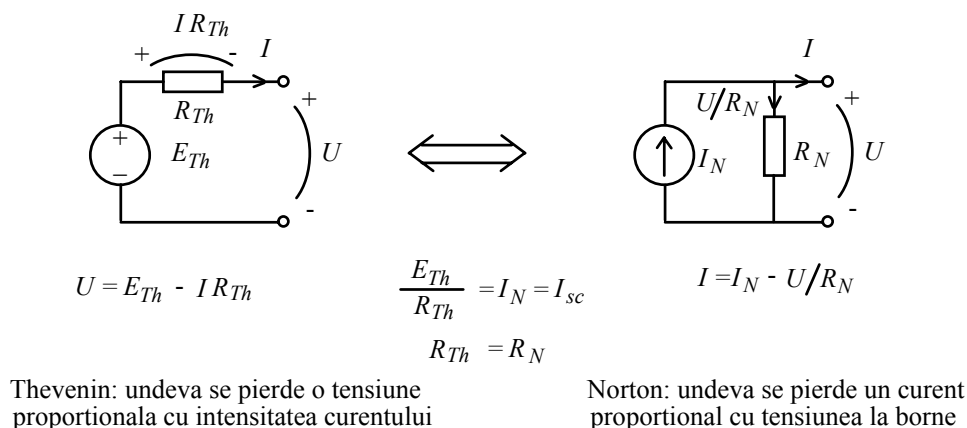


Fig. 2.9. Reprezentările Thévenin și Norton.

Teorema Norton afirmă că orice circuit liniar accesibil la două borne este echivalent cu o sursă ideală de curent I_N în paralel cu o rezistență R_N , așa cum se poate vedea în Fig. 2.9. Trecerea între reprezentarea Thévenin și reprezentarea Norton este extrem de simplă : valoarea rezistenței interne este aceeași (diferă numai modul de conectare, serie sau paralel) iar sursa ideală de curent are o valoare egală cu aceea a curentului de scurtcircuit.

Pentru circuitele practice, reprezentarea Thévenin trebuie preferată atunci când **rezistența internă este mică în comparație cu cea externă**, când funcționarea liniară se păstrează și la regimul de gol; în această situație tensiunile prezente în circuitul extern au valori de ordinul de mărime al tensiunii Thévenin. (mai mici decât aceasta) Reprezentarea Norton e de preferat atunci când **rezistența internă este mare în comparație cu cea externă** sau atunci când funcționarea liniară se păstrează la scurtcircuit dar încetează la tensiuni mai mari; în acest caz curenții din circuitul extern sunt de ordinul de mărime al curentului Norton (de scurtcircuit).

În calcule însă, unde criteriul suprem este comoditatea, pentru circuitele care se vor lega în serie trebuie preferată echivalarea Thévenin (pentru că se adună pur și simplu tensiunile și rezistențele echivalente) iar pentru circuitele care se leagă în paralel e de preferat reprezentarea Norton, pentru că, din nou, nu avem decât de adunat curenții Norton și **conductanțele** echivalente. Trecerea repetată între cele două tipuri de reprezentări, combinată cu echivalări serie și paralel, poate să rezolve simplu probleme care, altfel, conduc la sisteme cu un număr mare de ecuații.

Anumite dispozitive reale se pot apropia foarte mult de comportarea unei surse ideale de curent; atunci când rezistența lor internă este foarte mare ele sunt numite, simplu, **surse de curent**. Pentru simplitate, atunci când nu există pericol de confuzie, și sursele ideale de curent vor fi numite tot surse de curent.

Spuneam mai înainte că sursa ideală de tensiune și sursa ideală de curent sunt concepute mult mai generale decât dispozitivele fizice care le-au inspirat apariția. În primul rând, **nu este de loc necesar ca valorile lor să fie constante în timp**, ele trebuie să fie doar independente de circuitul extern. Cu alte cuvinte, o sursă de tensiune va debita sau absorbi la un moment dat atîta curent cît este necesar pentru a stabili la bornele sale exact valoarea de tensiune pe care a fost "programată" să o realizeze la acel moment. De exemplu, priza rețelei de alimentare cu energie electrică, la care a fost conectată o inductanță L va debita sau va absorbi curent astfel încît tensiunea la borne să-și păstreze dependența $U = 311 \text{ V} \cdot \sin(2\pi t/20 \text{ ms})$ pe care ar fi avut-o și în absența inductanței. Știți că, spre deosebire de un banal rezistor, inductanța va cere un curent defazat cu 90° în urma tensiunii.

Mai mult, valorile surselor ideale de tensiune sau curent pot înceta să mai fie **independente** de restul circuitului; ajungem, astfel, la **sursele comandate (sau controlate)**, care se împart în patru categorii:

- a) surse ideale de tensiune comandate de o tensiune electrică între două puncte oarecare ale circuitului (**VCVS - Voltage Controlled Voltage Source** în limba engleză);
- a) surse ideale de tensiune comandate de intensitatea unui curent electric din circuit (**ICVS - Intensity Controlled Voltage Source** în limba engleză);
- a) surse ideale de curent comandate de o tensiune electrică între două puncte oarecare ale circuitului (**VCIS**);
- a) surse ideale de tensiune comandate de intensitatea unui curent electric din circuit (**ICIS**).

Deși lucrările pretențioase utilizează pentru sursele controlate alte simboluri decât pentru cele independente, noi vom proceda ca în multe lucrări (la fel de serioase ca primele), folosind aceleași simboluri pentru sursele constante, cu variație independentă sau surse controlate. Textul va elimina orice posibilitate de confuzie.

D. Rezistența echivalentă

Am văzut că un circuit liniar accesibil la două borne poate fi echivalat atât cu un circuit serie Thévenin cât și cu unul paralel Norton. În ambele reprezentări, **valoarea rezistenței utilizate pentru modelare este aceeași**; din acest motiv nu o vom mai numi rezistență Thévenin sau Norton ci, pur și simplu **rezistența echivalentă**.

Cum se poate determina aceasta pentru un circuit real sau unul pentru care avem schema ? Prima soluție este legată direct de dependența **tensiunii la borne de intensitatea curentului** (Fig. 2.4). Dacă avem un circuit real, modificăm valoarea rezistenței de sarcină, trasăm experimental graficul $U = f(I)$, identificăm regiunea de funcționare liniară și calculăm acolo panta graficului

$$\boxed{R_{echiv} = -\Delta U / \Delta I} \quad (2.4)$$

Dacă avem schema unui circuit, lăsăm rezistența de sarcină ca variabilă și calculăm **teoretic (analiza circuitului)** dependența tensiunii la borne în funcție de intensitate $U = f(I)$: va trebui să obținem o dependență liniară de tipul $U = U_{gol} - R_{echiv} I$. Această procedură este destul de laborioasă și, din acest motiv, vom căuta altele mai simple.

O a doua variantă este utilizarea relației $R_{echiv} = U_{gol} / I_{sc}$, tensiunea în gol și curentul de scurtcircuit putând fi calculate teoretic. Sunt două calcule, spre deosebire de unul singur implicat de găsirea relației $U = f(I)$, dar acestea sunt efectuate în regimuri particulare și **analiza este mai simplă**. Aceeași relație $R_{echiv} = U_{gol} / I_{sc}$ poate fi utilizată pentru un circuit real, **dacă acesta se comportă liniar pe toată regiunea de la regimul de gol la cel de scurtcircuit**; determinarea experimentală a tensiunii în gol și a curentului de scurtcircuit sunt operații simple și rapide.

Pentru a descoperi ultima variantă, să ne întrebăm cum măsoară un ohmetru valoarea unei rezistențe. El are o sursă de alimentare proprie și stabilește prin rezistența care trebuie măsurată un **regim de curent continuu**; determină apoi valorile tensiunii pe rezistență și a curentului și face raportul $R = U / I$. Să privim acum la cele două circuite echivalente, Thévenin și Norton. Am putea să utilizăm aceeași metodă, legând un ohmetru la borne ? Evident că nu, deoarece **ele sunt active**, în afara curentului produs de ohmetru ar circula și curenții produși de sursa Thévenin sau sursa Norton. Dar dacă aceste surse ar avea câte un buton de un am putea regla $E_{Th} = 0$ și $I_N = 0$? Ne putem da seama imediat că acum metoda funcționează. Ceea ce am făcut noi se numește **pasivizarea surselor** (Fig. 2.10): sursa ideală de tensiune are tensiune nulă la borne, deci poate fi înlocuită cu un scurtcircuit (conductor fără rezistență) iar sursa ideală de curent are curentul nul,

deci poate fi înlăturată pur și simplu. Pentru schemele circuitelor, pasivizarea surselor conduce adesea la grupări serie și paralel de rezistențe, astfel încât o simplă privire conduce la expresia rezistenței echivalente; în exemplul din Fig. 2.10 aceasta este R_4 în paralel cu $(R_1 + R_2 + R_3)$. În jargonul electroniștilor se spune că la aceste borne se "vede" rezistența R_{echiv} , cu semnificația că, după pasivizare, ohmetrul chiar măsoară această rezistență între bornele respective. Simbolul utilizat pentru a arăta bornele între care se vede această rezistență echivalentă este prezentat în desenul c) al figurii.

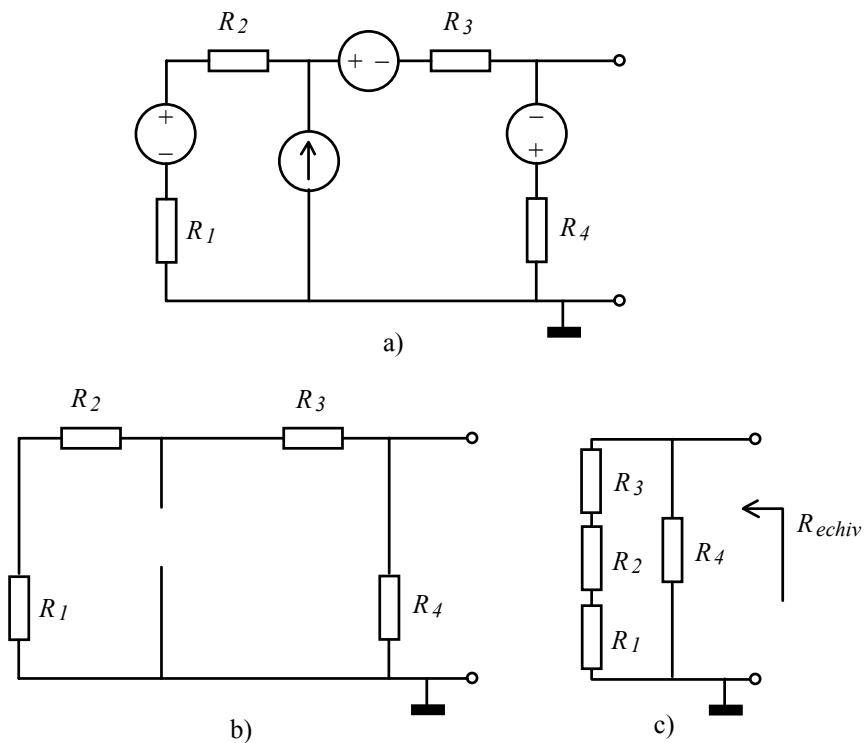


Fig. 2.10. Pasivizarea surselor pentru calculul rezistenței echivalente.

E. Divizorul rezistiv

Un circuit electronic este alimentat, de regulă, de la una sau două surse de alimentare cu tensiune continuă, cel mai adesea de la una singură. Diferitele componente au însă nevoie de tensiuni de valori diferite și este total neeconomic să utilizăm câte o sursă de alimentare pentru fiecare. **Divizorul rezistiv** ne permite realizarea, pornind de la o sursă de alimentare cu tensiunea V_{alim} , a unei surse echivalente, cu orice tensiune Thévenin dorim, între zero și V_{alim} . Vom vedea însă că noua sursă **nu mai este una ideală de tensiune**; putem, însă, micșora rezistența ei echivalentă plătiind un anumit preț: trecerea unui curent de intensitate mare prin rezistențele divizorului.

Divizorul rezistiv din Fig. 2.11 a), **conectat la sursa de alimentare**, poate fi echivalat Thévenin între bornele sale de acces masa și nodul A, ca în desenul b) al figurii. În gol, același curent străbate rezistențele și regula de trei simplă conduce la valoarea tensiunii Thévenin

$$U_{gol} = V_{alim} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.5)$$

cu valori între zero și tensiunea de alimentare.

Rezistența echivalentă se calculează ușor prin pasivizare, dacă nu uităm că, deși nu este desenat explicit, sursa ideală de tensiune **este legată cu un capăt la masă** (desenul c). Astfel,

rezistența echivalentă a divizorului rezistiv este egală cu **combinația paralel** a celor două rezistențe

$$R_{echiv} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

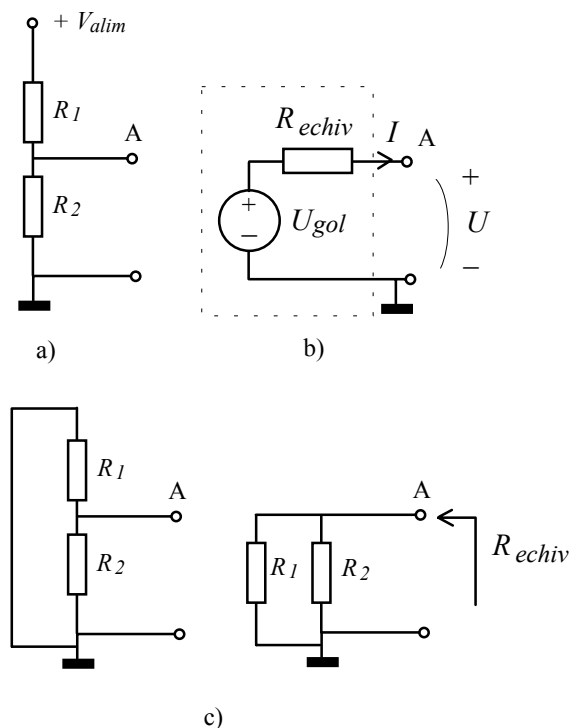


Fig. 2.11. Divizorul rezistiv.

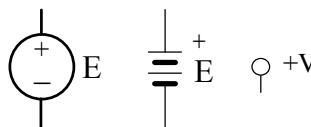
Presupunem că într-o aplicație dorim să obținem o anumită tensiune în gol U_{gol} ; atunci, conform ecuației (2.5), între cele două rezistențe trebuie să existe relația $R_1 = mR_2$ cu $m = V_{alim}/U_{gol} - 1$. Rezistența echivalentă se obține ca $R_{echiv} = R_2 \frac{m}{m+1}$ și, dacă dorim micșorarea ei de un număr de N ori pentru a ne apropia de o sursă ideală de tensiune, păstrând însă valoarea tensiunii Thévenin, trebuie să micșorăm ambele rezistențe în aceeași proporție. Din acest motiv, **curentul care va circula prin divizor** (în condiții de gol) **va fi și el de N ori mai mare**. Aceasta poate constitui un impediment atât pentru sursa de alimentare cât și prin faptul că va trebui să utilizăm rezistoare capabile să disipe o putere mai mare. În practică se realizează, de obicei, următorul compromis: rezistența echivalentă a divizorului se ia cel mult egală cu o zecime din rezistența sarcinii care va fi alimentată. În acest mod, tensiunea obținută nu diferă cu mai mult de o zecime de tensiunea în gol, ceea ce este un rezultat adesea mulțumitor și divizorul lucrează practic "neîncărcat". Atunci când sarcina nu este rezistivă

dar se cunoaște curentul pe care îl va absorbi ea când va fi alimentată, curentul prin divizor se alege să fie suficient de mare (cel puțin de zece ori mai mare) decât curentul prin sarcină.

Enunțuri frecvent utilizate

(atât de frecvent încât merită să le memorați)

-Tensiunea la bornele unei surse ideale de tensiune este independentă de curentul care o străbate.



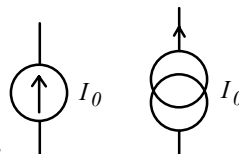
- Pentru sursa ideală de tensiune se utilizează simbolurile
- La un generator electric liniar, tensiunea la borne are dependența

$$U = U_{gol} - R_{int} \cdot I$$

- Orice dipol liniar poate fi echivalat (Thévenin) cu o sursă ideală de tensiune legată în serie cu o rezistență; valoarea sursei este egală cu tensiunea în gol iar valoarea rezistenței este legată de curentul de scurtcircuit prin relația

$$R_{echiv} = U_{gol} / I_{sc}.$$

-Sursa ideală de curent debitează un curent cu intensitatea independentă de tensiunea la bornele sale.



- Pentru sursa ideală de curent se utilizează simbolurile
- Orice dipol liniar poate fi echivalat (Norton) cu o sursă de ideală de curent legată în paralel cu o rezistență; valoarea sursei este egală cu intensitatea curentului de scurtcircuit iar valoarea rezistenței este aceeași de la reprezentarea Thévenin.
- Dacă avem dependența funcțională $U = f(I)$ de la bornele unui dipol, rezistența echivalentă (aceeași în ambele reprezentări, Thévenin și Norton) se determină din relația

$$R_{echiv} = -\Delta U / \Delta I.$$

- Tensiunea de ieșire a unui divizor rezistiv, fără sarcină, se obține cu regula de trei simplă.
- Rezistența echivalentă a unui divizor (la bornele de ieșire) este egală cu combinația paralel a rezistențelor ce alcătuiesc divizorul.
- Dacă rezistența de sarcină este mult mai mare decât rezistența echivalentă a divizorului, atunci conectarea acesteia nu modifică semnificativ tensiunea de ieșire a divizorului; el funcționează practic "neîncărcat", furnizând aproximativ tensiunea de mers în gol.

Termeni noi

-sursă ideală de tensiune	dipol a cărui tensiune la borne este independentă de curent
-sursă de tensiune	dispozitiv real de circuit a cărui funcționare se apropie de aceea a sursei ideale de tensiune;
-generator liniar	generator electric a cărui tensiune la borne scade liniar la creșterea curentului;
-sursă ideală de curent	dipol prin care curentul are o intensitate independentă de tensiunea la borne;
- sursă de curent	dispozitiv real de circuit a cărui funcționare se apropie de aceea a sursei ideale de curent;
-rezistență echivalentă	valoarea rezistenței care apare în reprezentările Thévenin și Norton ale unui circuit liniar accesibil la două borne;
-rezistență văzută la două borne	rezistența echivalentă a circuitului, considerat accesibil numai la acele borne;
- divizor rezistiv	subcircuit format din două rezistențe și alimentat la o sursă de tensiune; potențialul (față de masă) al punctului median este cuprins între zero și potențialul alimentării, fiind dictat de raportul celor două rezistențe; divizorul rezistiv este utilizat pentru a produce, pornind de la o sursă de alimentare, "surse de tensiune" cu valori mai mici.

Problemă rezolvată

Un circuit electronic este alimentat la tensiunea $V_{alim} = +12\text{ V}$. Un anumit dispozitiv, legat cu o bornă la masă are nevoie la cealaltă bornă (notată cu A) de un potențial $V_A = 4\text{ V}$ și va absorbi din acel nod un curent de cel mult 0.1 mA . Proiectați un divizor rezistiv care să realizeze acest lucru. Vom fi mulțumiți dacă potențialul aceluia nod va fi predictibil cu o precizie de 10% .

Rezolvare

Potențialul la borna A este măsurat față de masă; vom monta și noi divizorul cu un capăt la masă și unul la tensiunea de alimentare, ca în Fig. 2.12. Știm că putem obține la borna sa de ieșire orice valoare între zero și V_{alim} . Îl vom proiecta astfel încât tensiunea sa în gol să aibă valoarea cerută de 4 V . Pe rezistența R_1 trebuie să cadă diferența până la $V_{alim} = +12\text{ V}$, adică 8 V ; regula de trei simplă ne conduce la raportul $R_1/R_2 = 2$. Mai rămâne să stabilim valorile acestor rezistențe. Cum precizia cerută este de 10% , vom trimite prin divizorul în gol un curent cel puțin de zece ori mai mare decât valoarea maximă ce se va extrage de la borna sa de ieșire, adică vom trimite cel puțin 1 mA . Aceasta înseamnă că suma $R_1 + R_2$ va trebui să fie mai mică decât $12\text{ V}/1\text{ mA} = 12\text{ k}\Omega$.

Avem, pentru cele două rezistențe constrângerile

$$\begin{aligned} R_1 &= 2R_2 \\ R_1 + R_2 &= 3R_2 < 12\text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (9)$$

care conduc la $R_2 < 4\text{ k}\Omega$. Rezistoarele oferite de producătorii de componente sunt disponibile în anumite game de toleranță, pentru fiecare gamă valorile centrale fiind standardizate (vezi Anexa 1). Astfel, pentru gama de toleranță $\pm 10\%$, avem disponibilă seria de valori E12

1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2

Dacă avem un rezistor pe care scrie $2.2\text{ k}\Omega$, aceasta nu înseamnă că **valoarea lui este cunoscută cu precizie de $0.1\text{ k}\Omega$, fiind undeva între $2.1\text{ k}\Omega$ și $2.3\text{ k}\Omega$** . Puteți să vă întrebați, pe bună dreptate, de ce nu se respectă regula cifrelor semnificative. Răspunsul e simplu, pentru că producătorul nu ne spune că $2.2\text{ k}\Omega$ este **valoarea măsurată** a exemplarului pe care îl deținem ci că trebuie să ne așteptăm la o distribuție întâmplătoare a valorilor, distribuție **centrată pe $2.2\text{ k}\Omega$ și cu lărgimea de $\pm 10\%$** . Rezistorul pe care îl avem are **cu siguranță** valoarea între $2.0\text{ k}\Omega$ și $2.4\text{ k}\Omega$.

Pentru economie, vom proiecta mai întâi cu rezistoare în această toleranță. Încercăm să găsim două valori care să se apropie cât mai mult de raportul 2 și să îndeplinească și condiția $R_2 < 4\text{ k}\Omega$. Alegem $R_2 = 3.3\text{ k}\Omega$ și $R_1 = 6.8\text{ k}\Omega$. Să vedem la ce putem să ne așteptăm datorită împrăștierii valorilor. Expresia valorii tensiunii în gol este

$$U_{gol} = V_{alim} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

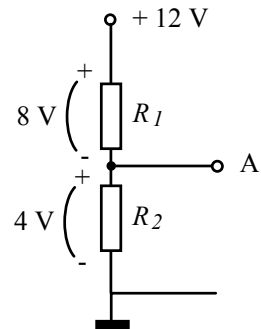


Fig. 2.12.

și are valoarea maximă când R_2 atinge limita superioară și, simultan, R_1 atinge limita sa inferioară; astfel, cea mai mică valoare în gol va fi

$$U_{gol\ max} = 12\ V \cdot \frac{3.6}{6.1 + 3.6} = 4.5\ V;$$

Pe de altă parte, tensiunea în gol atinge valoarea minimă când R_2 atinge limita inferioară și, simultan, R_1 atinge limita sa superioară

$$U_{gol\ min} = 12\ V \cdot \frac{3.0}{7.5 + 3.0} = 3.4\ V.$$

Ceea ce am făcut acum se numește **analiza cazurilor cele mai defavorabile (worst case analysis)** și ea arată că luând rezistoare la întâmplare dintre cele cumpărate, obținem valori ale tensiunii în gol împrăstiate între 3.4 V și 4.5 V.

Dacă nu suntem mulțumiți cu asta, avem două posibilități:

- în cazul în care construim unul sau câteva circuite, putem să sortăm, în prealabil, rezistoarele, dacă am avut grijă să cumpărăm mai multe;

- în cazul unei producții de serie va trebui să utilizăm rezistoare cu gamă de toleranță mai strânsă, de exemplu $\pm 5\%$, $\pm 2\%$ sau $\pm 1\%$; ele vor fi, însă, din ce în ce mai scumpe.

Dacă ne-am hotărât pentru gama de $\pm 5\%$, din seria de valori E24, aferentă ei, alegem $R_2 = 1.1\ k\Omega$ și $R_1 = 2.2\ k\Omega$ (pentru a avea un raport de doi); analiza cazurilor cele mai defavorabile conduce acum la

$$U_{gol\ max} = 12\ V \cdot \frac{1.16}{2.09 + 1.16} = 4.28\ V$$

și

$$U_{gol\ min} = 12\ V \cdot \frac{1.045}{2.31 + 1.045} = 3.74\ V.$$

Ultimul aspect care trebuie luat în considerație în proiectare este disiparea de putere. Curentul de $12\ V / 3.3\ k\Omega = 3.6\ mA$, va disipa pe întregul divizor o putere de $12\ V \cdot 3.6\ mA = 43\ mW$. Putem utiliza, astfel, chiar rezistoare miniatură care disipă cel puțin 250 mW.

Probleme propuse

P 2.1. Deși datorită randamentului mic nu sunt utilizate în practică, există sisteme fizice care pot transforma energia mecanică **direct** în energie electrică de curent continuu nepulsatoriu. Unul din acestea (reprezentat în Fig. 2.13) l-ați întâlnit în problemele de inducție electromagnetică: un disc metallic de rază

l este rotit cu viteza unghiulară ω într-un câmp magnetic omogen și constant în timp de inducție B . Tensiunea electrică este culeasă cu două contacte alunecătoare, unul pe ax iar celălalt la circumferința discului. Calculând tensiunea electromotoare produsă, obțineți relația $E = \frac{1}{2} B l^2 \cdot \omega = \alpha \cdot \omega$. Pe de altă

parte, dacă circuitul extern este închis și parcurs de curentul I , momentul mecanic de "rezistență" la rotație

este $M_{em} = \frac{1}{2} B l^2 \cdot I = \beta \cdot I$. Momentul forțelor de

frecare, care se opune și el mișcării, are expresia $M_f = \gamma \cdot \omega$, cu γ o constantă. Presupunem că forța externă care învîrte discul are momentul M_0 constant. Calculați:

- tensiunea electromotoare de mers în gol (numai frecarea limitează viteza de rotație);
- tensiunea electromotoare produsă atunci cînd de la generator se "extrage" curentul de intensitate I ;
- reprezentați grafic dependența $E = f(I)$;
- se comportă generatorul în condițiile din problemă liniar ?
- ce semnificație are aici "rezistența internă a generatorului" ?
- calculați valoarea acestei rezistențe interne dacă $B = 0.1 \text{ T}$, $l = 0.1 \text{ m}$.
- ce ar trebui să facem ca tensiunea electromotoare să rămînă constantă ?

P 2.2. Un circuit de curent continuu conține numai surse ideale de tensiune, surse ideale de curent și rezistoare. Una din rezistențe este reglabilă. Puteți argumenta că dependența între curentul prin acea rezistență și tensiunea la bornele ei trebuie să fie obligatoriu o funcție de gradul întâi (liniară) ? Gîndiți-vă la ecuațiile ce trebuie scrise pentru a alcătui un sistem care să conducă la valorile tuturor curenților (legea Ohm, ecuațiile ce descriu funcționarea surselor, legile lui Kirchhoff).

P 2.3. La bornele unei surse ideale de tensiune se leagă un dipol (liniar sau neliniar). Cu ce este echivalentă această grupare paralel ? Ce puteți spune, însă, despre aceeași situație în care este implicat un dispozitiv real, care numai pentru $I \in (0; 5 \text{ A})$ se comportă ca o sursă ideală de tensiune.

P 2.4. Revenind la problema precedentă, ce ar trebui să fie dipolul pentru ca legea lui de funcționare să conducă la un conflict cu sursa ideală de tensiune ?

P 2.5. În serie cu o sursă ideală de curent se leagă un dipol. Cu ce este echivalentă combinație serie a acestor elemente ? Ce se poate întîmpla, însă, în cazul real al unui dipol care se comportă ca sursă de curent numai dacă tensiunea la bornele sale este cuprinsă într-un anumit interval ?

P 2.6. Ce fel de dipol este interzis să legăm în serie cu o sursă ideală de curent ?

P 2.7. Caracteristica statică a unei fotodiode, în condiții constante de iluminare, arată ca în Fig. 2.14, unde sunt date și sensurile de referință pentru curent și tensiune, utilizate la desenarea caracteristicii.

a) Identificați porțiunea de caracteristică unde fotodiodea poate fi modelată (aproximativ) cu o sursă ideală de tensiune. Stabiliți valorile curentului pentru care acest model este corect și desenați alături fotodiodea și modelul ei echivalent.

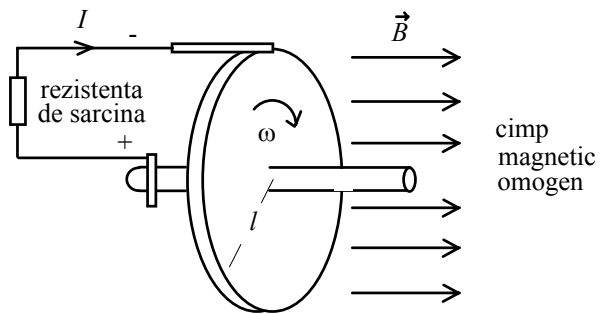
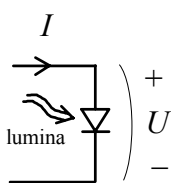
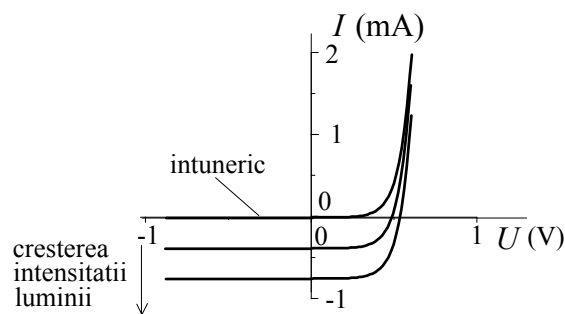


Fig. 2.13.

b) Identificați porțiunea de caracteristică unde fotodioda poate fi modelată cu o sursă ideală de curent. Stabiliți valorile tensiunii pentru care acest model este corect și desenați alăturat fotodioda și modelul ei echivalent.



a)



b)

Fig. 2.14

c) Pe porțiunea unde fotodioda se comportă ca o sursă ideală de curent, intensitatea curentului este proporțională cu iluminarea și, pe această regiune a caracteristicii, ea este utilizată ca

traductor. Osciloscopul, cu care vrem să vizualizăm evoluția intensității luminii, este, însă, **un voltmetru**. Desenați un circuit (conținând o sursă de tensiune, fotodioda și un rezistor) în care o tensiune electrică să fie proporțională cu intensitatea luminii. În foaia de catalog a fotodiodei este specificată o sensibilitate de $100 \frac{\mu A}{\mu W/m^2}$. Stabiliți valoarea rezistenței pentru ca osciloscopul să măsoare o tensiune de 1 V dacă fotodioda este supusă unei iluminări de $5 \mu W/m^2$..

P 2.8. Fabricanții de componente semiconductoare oferă niște dispozitive cu două borne, numite **diode stabilizatoare de curent (current-regulator diodes)** care nu sunt altceva decât niște **tranzistoare JFET** (vom vedea mai târziu ce sunt acestea) cu două dintre cele trei terminale scurtcircuitate între ele. Cu o tensiune aplicată avînd polaritatea din Fig. 2.15 a) și valoarea între 2 V și 100 V, ele se comportă ca niște **surse de curent**. Totuși, funcționarea lor nu este identică cu a unor surse ideale, pentru echivalarea lor Norton fiind nevoie și de o rezistență de ordinul a 1 MΩ. Dacă un astfel de dispozitiv, cu o intensitate nominală de 1 mA, este legat într-un circuit ca în Fig. 2.15 b), iar sarcina își modifică în timp caracteristica astfel încît tensiunea pe stabilizatorul de curent nu variază cu mai mult de 10 V, calculați cu ce precizie relativă rămîne constant curentul prin sarcină.

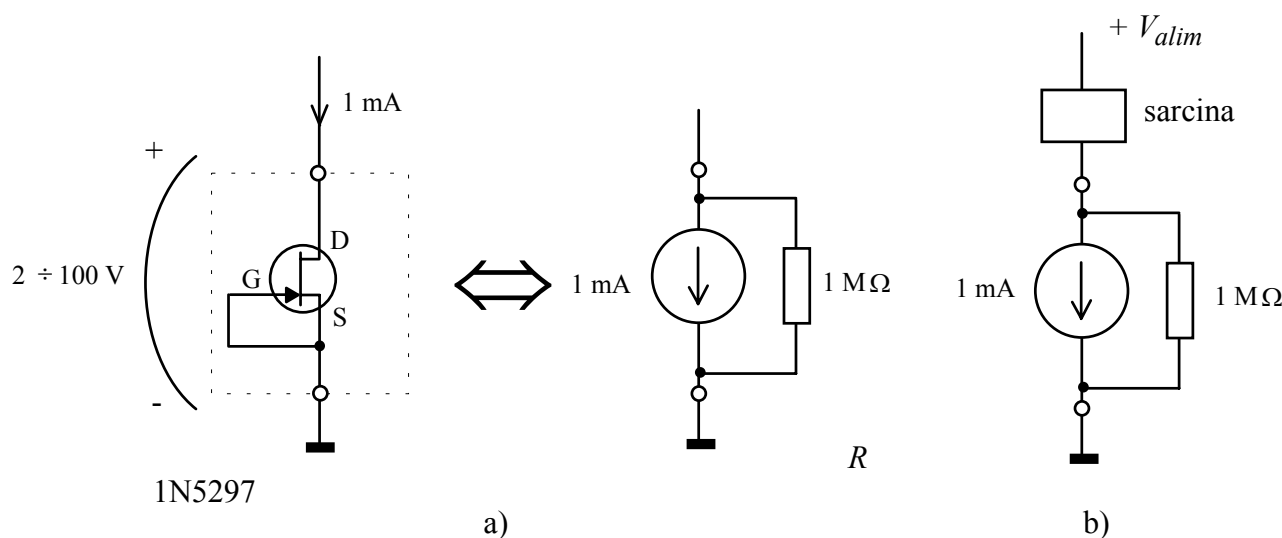


Fig. 2.15.

P 2.9. Pentru măsurarea temperaturii se poate utiliza, ca **senzor**, circuitul integrat AD590. El este un dispozitiv cu două borne, care funcționează ca o **sursă de curent**, intensitatea (în μA) fiind numeric egală cu temperatura măsurată în K (sensibilitatea sa este de $1\mu\text{A/K}$). Pentru a se comporta ca sursă de curent, tensiunea la bornele sale trebuie să fie cuprinsă între 4 și 30 V. Precizia lui de conversie temperatură-curent este, pe domeniul (-55°C ; $+150^\circ\text{C}$), mai bună de un grad. Cum informația care se poate prelucra comod este **tensiunea**, proiectați un circuit care să producă o tensiune proporțională cu temperatura (în K), cu o sensibilitate de 10 mV/K . Utilizați, pentru aceasta, un circuit integrat AD590, o sursă de tensiune și un rezistor. Care ar trebui să fie toleranța rezistorului astfel încât să nu deterioreze precizia de 1 grad a senzorului? Ce soluție practică propuneți, având în vedere valoarea necesară a acestei toleranțe?

P 2.10. Utilizați legea curenților și legea lui Ohm și calculați, pentru circuitul din Fig. 2.16, dependența curentului I în funcție de tensiunea U , atunci când rezistența R este modificată. Indicație: dacă pe o porțiune neramificată schimbați ordinea componentelor, potențialele nodurilor și curenții din circuit nu își modifică valoarea; folosiți acest truc pentru a avea sursele de tensiune cu o bornă la masă.

P 2.11. Construiți o reprezentare Thévenin pentru porțiunea de circuit încadrată într-un dreptunghi, din exemplul de la problema precedentă (desenați schema echivalentă și treceți valorile componentelor).

P 2.12. Pentru aceeași porțiune de circuit, construiți o reprezentare Norton (desenați schema echivalentă și treceți valorile componentelor).

P 2.13. Așa cum vă așteptați, în cele două reprezentări rezistența echivalentă este aceeași. Încercați să găsiți valoarea ei pe o cale mai directă: pasivizați sursele de tensiune și de curent și priviți circuitul dinspre cele două borne de acces.

P 2.14. Un aparat electronic are o singură sursă de alimentare, de 15 V, legată cu borna - la masă. Un anumit nod al circuitului trebuie adus la potențialul de 5 V, cu precizie $\pm 10\%$. Se estimează că acel nod va absorbi de la "sursa" care îl va alimenta un curent între zero și 0.2 mA . Proiectați un divizor rezistiv care să rezolve această problemă.

P 2.15. La cuplarea unei rezistențe de sarcină de valoare R_s la bornele unui circuit liniar, tensiunea la borne (egală inițial cu cea în gol) a scăzut la jumătate. Cât este rezistența echivalentă (de ieșire) a aceluia circuit?

P 2.16. Utilizând rezultatul problemei precedente, propuneți o metodă pentru măsurarea rezistenței de ieșire a unui **generator de semnal** (un aparat care furnizează la borne o tensiune dependentă de timp după o anumită lege, sinusoidală, dreptunghiulară, dinți de fierăstrău, etc.). Arătați când metoda nu este aplicabilă.

P 2.17. Echivalările Thévenin și Norton sunt valabile și pentru regimul sinusoidal, înlocuind rezistențele cu impedanțe. O doză piezoelectrică de pick-up poate fi considerată un generator de semnal cu o impedanță "rezistivă" în jur de $1\text{ M}\Omega$ și o tensiune în gol de 1 V. Discutați ce se întâmplă dacă ea este legată la un amplificator a cărui intrare este echivalentă cu o rezistență de

- $10\text{ k}\Omega$;
- $1\text{ M}\Omega$;
- $10\text{ M}\Omega$;

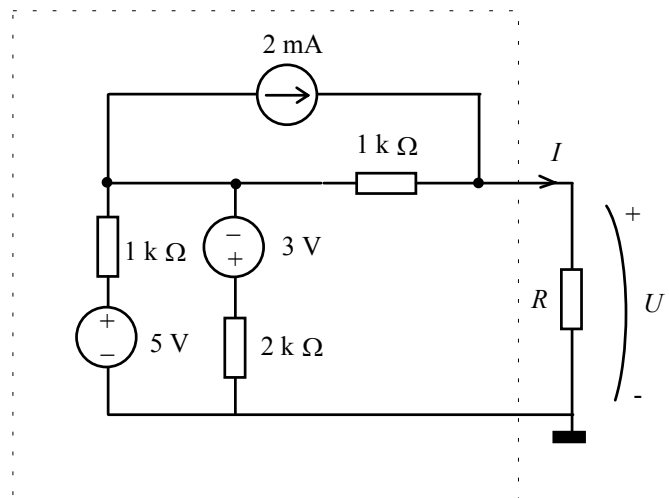


Fig. 2.16.

Lucrare experimentală

Experimentul 1. Sursa de tensiune (aproape ideală)

Un alimentator utilizează, de obicei, tensiunea **alternativă** (cu valoarea efectivă de 220 V și frecvența 50 Hz) a **rețelei de distribuție a energiei electrice** (numită, simplu, rețea). Mai întâi, printr-un **transformator**, tensiunea (rămânând alternativă) este adusă la o valoare convenabilă, apoi ea este convertită în **tensiune continuă** cu un **redresor** (rectifier în lb. engleză) și în final prelucrată de un **stabilizator de tensiune** (voltage regulator în lb. engleză).

Pe planșetă aveți un **stabilizator integrat** cu trei borne, ca în Fig. 2.17. La intrarea sa este aplicată o tensiune continuă nestabilizată, obținută de la un **adaptor** extern (transformator plus redresor), alimentat la rețea. Scopul experimentului este să investigați funcționarea acestui montaj (care este o sursă de alimentare stabilizată) la bornele sale de ieșire. Pentru aceasta, montați la bornele de ieșire ale stabilizatorului un voltmetru electronic **digital** care vă va permite citirea tensiunii cu rezoluție de cel puțin 0.01 V. Notați-vă, mai întâi, valoarea tensiunii în gol (fără sarcină).

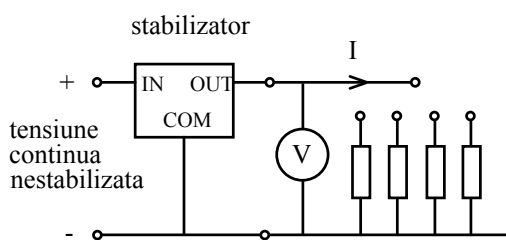


Fig. 2.17.

Conectați, apoi, pe rând, ca sarcină, rezistoarele de pe planșetă și notați-vă valoarea tensiunii la borne. Cum intensitatea curentului nu trebuie cunoscută cu precizie deosebită, determinați-o din legea lui Ohm (rezistențele au toleranța de $\pm 5\%$). Reprezentați grafic tensiunea la borne, în funcție de curent, cu ambele scale pornind de la valoarea zero (nu uitați să treceți și tensiunea în gol). Identificați porțiunea pe care sursa se comportă practic ca o sursă ideală de tensiune.

Reprezentați grafic în detaliu această regiune, și estimați variația maximă a tensiunii în interiorul ei. De aici, trageți o concluzie asupra valorii rezistenței interne a sursei stabilizate. Estimați, de asemenea, curentul maxim pînă la care sursa de alimentare studiată menține tensiunea constantă.

Experimentul 2 (imaginar). Sursa ideală de tensiune comandată

În experimentul precedent tensiunea la bornele sursei nu depindea de valoarea curentului (adică de dispozitivul care era conectat ca sarcină). În plus, această tensiune **nu depindea nici de timp**. Această ultimă proprietate nu este obligatorie pentru o sursă ideală de tensiune; valoarea ei poate fi programată să depindă de timp conform unei anumite funcții sau să depindă de altă mărime electrică din circuit.

Un exemplu extrem de frecvent întâlnit este **rețeaua de distribuție de energie electrică**. Aici **tensiunea evoluează sinusoidal**, cu o frecvență de 50 Hz și o amplitudine de 311 V, corespunzătoare unei tensiuni efective de 220 V. Presupuneți că ea nu s-ar comporta ca o sursă ideală de tensiune ci ca una care are rezistența internă de $1\ \Omega$. Calculați cu cât s-ar micșora tensiunea efectivă la priză la cuplarea unui calorifer electric ce consumă o putere de 2 kW.

Experimentul 3. Divizorul rezistiv

Pe planșetă aveți un divizor rezistiv care este deja conectat la o anumită tensiune de alimentare. Măsurati valoarea acesteia și, utilizând valorile rezistențelor, calculați cât ar trebui să fie tensiunea de ieșire **în gol** a divizorului și rezistența sa internă.

Legeți acum voltmetrul la bornele de ieșire ale divizorului și măsurati tensiunea în gol. Comparați-o cu valoarea calculată. Legați, apoi, pe rând, rezistoarele de sarcină și măsurati tensiunile corespunzătoare, ca la experimentul precedent. Ca și acolo, reprezentați rezultatele în formă grafică. Se apropie funcționarea divizorului rezistiv de aceea a unei surse ideale de tensiune? Estimați, din grafic, rezistența echivalentă (de ieșire) a divizorului și comparați-o cu valoarea calculată. Desenați reprezentarea Thévenin a divizorului rezistiv, trecând valorile determinate experimentale pentru tensiune și rezistență

Dacă suntem interesați în păstrarea tensiunii de ieșire cu o precizie de numai 10 %, cum trebuie să fie rezistența de sarcină față de aceea de ieșire a divizorului? Dar dacă suntem mai pretențioși și dorim o precizie de 1 %?

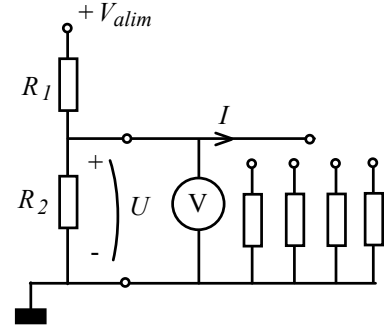


Fig. 2.17.

Experimentul 4. Sursa de curent (aproape ideală)

Vom studia acum un circuit a cărui funcționare se apropie de aceea a unei **surse ideale de curent**: intensitatea curentului nu depinde de tensiunea la borne, deci de circuitul extern. Este evident că acest model nu poate funcționa "în gol", sursa ar produce o tensiune infinită dar curentul ar rămâne nul.

Aveți pe planșetă un astfel de circuit, realizat cu un tranzistor bipolar (Fig. 2.18). El este deja legat la borna de alimentare, așa că, dacă nu ați decuplat alimentarea de la rețea, totul e în ordine. Înainte să începeți investigarea funcționării sa la bornele de ieșire, asigurați-vă că aveți comutatorul K pe poziția "curent constant". Pentru a evita măsurarea directă a curentului cu un miliampermetru digital (unul analogic nu ar fi avut rezoluția necesară) veți folosi un truc frecvent întâlnit: intercalați în calea curentului rezistorul R_{ref} de valoare foarte mică (1 Ω) și măsurati căderea de tensiune U_1 pe acest rezistor. (veți realiza un "miliampermetru" cu rezistența internă de 1 Ω).

Măsurati mai întâi curentul de scurtcircuit și notați valoarea sa. Apoi, înlocuiți scurtcircuitul cu rezistoare de diferite valori, determinând, pentru fiecare din ele, intensitatea

Reprezentați grafic, tensiunea U în funcție de curent, cu ambele scale pornind de la zero. Identificați regiunea în care circuitul investigat se comportă aproximativ ca o sursă de curent.

Estimați **compliance sa de tensiune** (tensiunea maximă la borne pînă la care se observă aceasta comportare). Reprezentați apoi, în detaliu, această regiune și estimați **rezistența** echivalentă. Cu aceasta și cu valoarea curentului de scurtcircuit, desenați circuitul echivalent Norton. Notați pe desen pînă la ce valoare a tensiunii de ieșire este valabilă această echivalență.

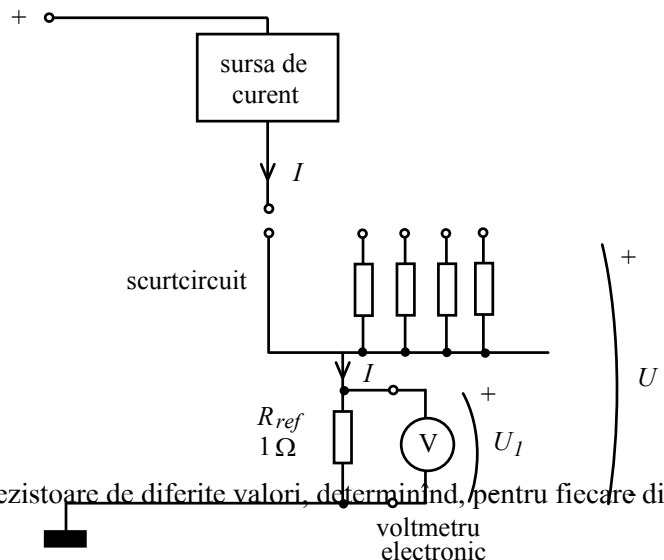


Fig. 2.18.

După cum știți, un circuit liniar accesibil la două borne poate fi echivalat atât cu un circuit Norton cât și cu unul Thévenin. Pornind de la circuitul Norton desenat anterior, propuneți un circuit echivalent Thévenin. Cât este valoarea tensiunii Thévenin ? Cum este ea în comparație cu tensiunile existente în circuitul studiat ? Care dintre reprezentări vi se pare mai comodă pentru un utilizator ?

Experimentul 5. Sursa de curent comandată

La sursele ideale, tensiunea (sau, respectiv, curentul) sunt independente de circuitul extern. Aceasta nu înseamnă că ele sunt obligatoriu **constant în timp**. Așa cum am văzut, rețeaua de alimentare cu energie electrică poate fi privită ca o sursă ideală de tensiune a carei valoare evoluează **sinusoidal** în timp. De asemenea, valoarea unei surse de curent poate să evolueze în timp după o anumită lege.

În acest experiment veți relua investigarea sursei de curent studiată anterior, dar de data aceasta ea va fi comandată de un circuit care va impune ca valoarea intensității să urmeze o anumită dependență temporală. Pentru aceasta, va trebui să treceți comutatorul K pe poziția "semnal" și să legați în locul voltmetrului electronic intrarea unui osciloscop. Desenați-vă pe caiet forma de undă și notați-vă valoarea tensiunii **vîrf la vîrf**. Modificați apoi valoarea rezistenței de sarcină, urmărind tot timpul forma de undă și valoarea sa vîrf la vîrf. Notați modificările formei de undă vizualizate.

De multe ori, în practică, nu avem conectat un rezistor "spion" pe care să urmărim evoluția intensității ci avem accesibile **doar bornele sursei de curent**. Ce vă așteptați să observați acolo la variația rezistenței de sarcină ? Conectați și dumneavoastră osciloscopul cu firul cald la ieșirea sursei de curent și conectați diferitele rezistențe de sarcină. Formulați o concluzie.

Pagină distractivă

1. Nimic nu poate sta în calea autorilor zeloși atunci când aceștia vor să complice lucrurile, teoretizând pînă nu se mai înțelege nimic. Nemulțumiți cu simplitatea cărților de referință de Teoria Modernă a Circuitelor (pe care le trec, de altfel, la bibliografie), doi autori "profesori-doctori-ingineri" ², cum nu scapă ocazia să ne anunțe pe coperta interioară, ne învață că

"sursa **independentă** de curent este un caz particular de **rezistor neliniar controlat în tensiune**, deoarece, conform ecuației caracteristice, pentru orice tensiune curentul este unic specificat".

Că autorii numesc rezistor **orice dipol** care forțează o legătură funcțională curent-tensiune, am mai putea înțelege, chiar dacă mai devreme cu 16 pagini rezistorul era clasificat, la 1.2.4.1 în categoria elementelor pasive. 16 pagini înseamnă mult și pe parcursul lor multe se pot uita. Dar să consideri sursa independentă ca fiind controlată în tensiune și să crezi despre ea că este neliniară îți trebuie o logică cu totul și cu totul originală. Și dacă stăpînești această logică poți scrie liniștit că "Ecuația $u(t) = e(t)$, $\forall t$ poate fi dedusă pe baza teoriei câmpului electromagnetic".

2. Lucruri și mai vesele găsim în deja citatul Compediu de fizică ³ despre "generatorul Thévenin și generatorul Norton". Auziți numai : "...e vorba de două montaje diferite în care **o sursă de tensiune** poate alimenta un circuit exterior (rezistență de sarcină)". Și ca nu cumva să credem din greșeală că sursele ideale din cele două reprezentări sunt lucruri diferite, autorul are grijă să le reprezinte **cu același simbol** și fără nici o indicație care le-ar diferenția. Ca să ne lămurim la ce folosesc aceste generatoare, citim mai jos: "dipolul constituie un generator Thévenin și el servește la alimentarea unei rezistențe de sarcină mică...". Cu totul altfel stau lucrurile cu "generatorul Norton" care "servește la alimentarea unei rezistențe de sarcină mare R_s (mare)". Mare... e răbdarea hîrtiei tipărite, am comenta noi.

3. Când se aventurează să explice lucruri cu care nu sunt familiari, chiar autori foarte serioși produc minunății. Iată ce găsim în excelenta carte a lui Richard Dorf ⁴:

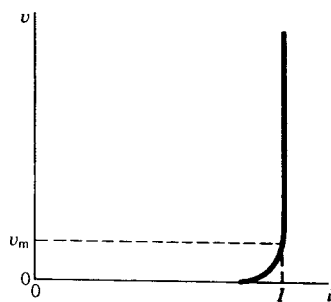


Figure 2-11 Independent current source providing a constant current for any voltage greater than v_m .

Din text reiese indubitabil că tensiunea notată cu v pe grafic este tensiunea la bornele sursei de curent. Astfel, graficul ne comunică faptul că sursa de curent se abate de la idealitate la scurtcircuit, adică acolo unde orice practician știe că sursa de curent se simte în elementul său, necazurile apărînd, din contra, la tensiuni mari.

² Lucia Dumitriu, Mihai Iordache, "Teoria modernă a circuitelor electrice", Ed. All Educațional, București, 1998.

³ ***, "Compediu de Fizică", Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1988.

⁴ Richard C. Dorf, "Introduction to Electric Circuits", John Wiley & Sons, Inc., 1989.