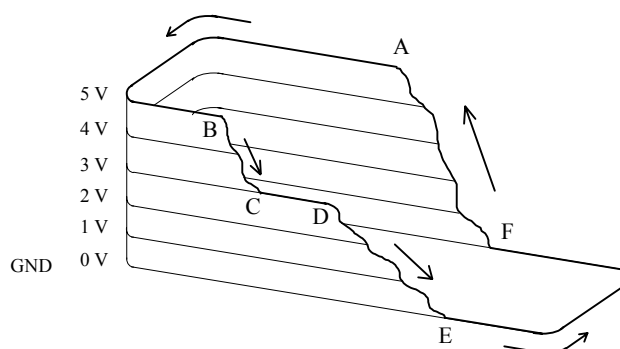
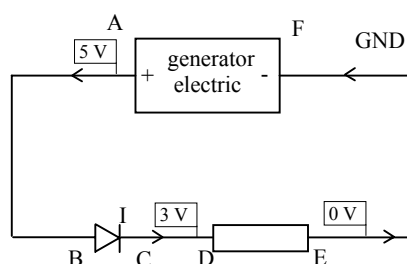


## CAPITOLUL

# 1

## Noțiuni introductive



A. Elemente de circuit, reale și ideale	2	
B. Intensitatea curentului	3	
C. Tensiunea electrică	5	
D. Legea lui Ohm; rezistoare	8	
E. Analiza circuitelor	10	
F. Măsurarea intensităților de regim continuu	12	
G. Măsurarea tensiunilor continue	14	
H. Măsurarea curenților și tensiunilor alternative (regim sinusoidal)	17	
I. Măsurarea curenților și tensiunilor alternative de formă oarecare	18	
Probleme rezolvate	25, probleme propuse	27
Lucrare experimentală	31	

## A. Elemente de circuit, reale și ideale

Electronica utilizează multe concepte cu care sunteți familiarizați de la studiul capitolului de Electricitate din fizica predată la liceu și de la cursul de Electricitate și Magnetism. Cu toate acestea, în electronică semnificația unora dintre ele este ușor diferită iar, pentru calculul circuitelor, este mai avantajos să utilizați alte metode decât cele folosite acolo. Ne propunem, în acest capitol, să trecem în revistă câteva concepte și metode de calcul, așa cum sunt ele utilizate în electronică.

Întreaga fizică utilizează **modele** pentru a surprinde **caracteristicile esențiale** ale comportării lumii reale. Legile sunt formulate pentru aceste modele și ceea ce putem spera este ca modelarea să fi păstrat ceea ce este important în comportarea sistemului fizic real; dacă avem suficiente informații și nu greșim în aplicarea legilor sau la efectuarea calculelor, putem prezice, cu precizie satisfăcătoare, rezultatul unui experiment.

Același lucru se întâmplă și în electronică. Firul conductor (numit, pentru simplificare, **conductor**) ce leagă două elemente de circuit este modelat cu un **conductor ideal**, fără rezistență, și desenat pe scheme ca o linie continuă. Corespondentul său fizic are, însă, întodeauna o rezistență electrică diferită de zero, prezintă acumulări de sarcini electrice care, prin câmpul electrostatic creat, interacționează cu celelalte conductoare din apropiere, și, în plus, prin câmpul magnetic creat, interacționează cu ceilalți curenți electrici din circuit. Continuăm să utilizăm modelul conductorului ideal nu pentru că nu cunoaștem aceste fenomene ci pentru că **știm că în problema de care ne ocupăm ele produc efecte neglijabile**.

Nici atunci când mărimea acestor efecte contează, nu renunțăm la modelul conductorului ideal ci adăugăm în circuit modelele unor alte elemente de circuit, **modele la fel de ideale**: de exemplu, interacțiunea unui conductor cu un alt conductor învecinat, prin câmp electrostatic, este modelată prin adăugarea unui condensator ideal, al cărui câmp electric nu se extinde în afara armăturilor. Regula jocului este simplă: utilizând elemente de circuit ideale modelăm elemente și interacțiuni reale. Nu trebuie să uităm, însă, că simbolurile pe care le vedem pe scheme reprezintă modele idealizate, chiar dacă poartă aceleași nume cu dispozitivele fizice reale, și că legile pe care le vom formula se referă la aceste modele.

Elementul de circuit ideal este, deci, un model care descrie un sistem fizic ce schimbă energie și informație cu restul lumii (reprezentat de circuitul exterior lui) **numai prin curenții și tensiunile de la bornele sale**. Legăturile între aceste elemente de circuit se realizează prin conductoare ideale.

Schemele circuitelor cu care veți lucra trebuie desenate în așa fel încât să faciliteze înțelegerea funcționării, să conțină suficiente informații pentru construirea circuitelor și, de asemenea, să ajute la depanarea acestora; o schemă desenată prost sau căreia îi lipsesc informații importante produce numai confuzii. Singurul mod în care puteți învăța să desenați bine scheme electronice este chiar desenarea acestora, **cu mâna liberă**, eventual pe hârtie cu caroiaj orizontal și vertical. Utilizați numai creionul și pregătiți-vă guma, nici cei cu multă experiență nu pot desena întodeauna o schemă "bună" din prima încercare. Mult mai mult decât din seturi de reguli complicat formulate puteți învăța prin desenarea pe caiet a schemelor circuitelor pe care le găsiți în manual. Completați-le întodeauna cu informații care vă ajută la înțelegerea funcționării, cum sunt **sensurile curenților** și **polaritățile tensiunilor** pe ramurile importante, precum și cele legate de desfășurarea concretă a experimentului: tipul aparatelor de măsură folosite, polaritatea legării lor în circuit, scala pe care au fost utilizate și rezistențele lor interne.

Există mai multe principii, reguli și trucuri care vă ajută să desenați corect o schemă electronică; enunțăm în continuare câteva dintre acestea.

- Schemele nu trebuie să conțină ambiguități; simbolurile componentelor, valorile parametrilor lor (inclusiv unitățile de măsură), polaritățile, etc., trebuie să fie trecute cu claritate pentru evitarea confuziilor.

- O schemă bună sugerează limpede funcționarea circuitului; din acest motiv desenați distinct regiunile cu funcționare diferită, fără să vă temeți că lăsați zone libere. Pentru multe tipuri de circuite există **moduri convenționale** de a le desena, care permit recunoașterea lor imediată; le puteți învăța numai desenându-le așa cum le găsiți în manuale.

- Interconectarea conductoarelor este bine să fie figurată prin cercuri pline, ca în Fig. 1.1. a). Uneori vom uita și noi acest lucru pentru că respectarea altor reguli elimină pericolul unei confuzii.


- Deși mulți consideră aceasta demodat, noi vă sfătuim să desenați două conductoare care se intersectează fără conexiune cu un mic semicerc, ca în desenul b al figurii; fiți pregătiți, totuși, să găsiți în scheme această situație reprezentată ca în desenul c).

- Pentru a evita orice posibilitate de confuzie **nu desenați niciodată** patru conductoare conectate într-un singur punct, ca în Fig. 1.1 d) ci folosiți reprezentarea din desenul e) al figurii.

- Încercați, pe cât posibil, să aliniați orizontal și vertical componentele, astfel încât conductoarele de legătură să fie și ele orizontale sau verticale.

- Puneți linia de alimentare cu tensiune pozitivă în partea superioară a desenului și cea negativă în partea inferioară, astfel încât curenții să curgă (pe desen) de sus în jos.

-Circuitele prelucrează semnale; în general, acestea trebuie să "meargă" de la stînga la dreapta, intrarea fiind în stînga iar ieșirea în partea dreaptă a schemei.

-Dacă schema se complică, nu insistați să strîngeți toate firele care merg la masă într-un singur punct ci utilizați local simbolul de masă ; același lucru este valabil și pentru firele care merg la alimentare, pentru care puteți scrie, pur și simplu, valoarea tensiunii de alimentare (față de masă).

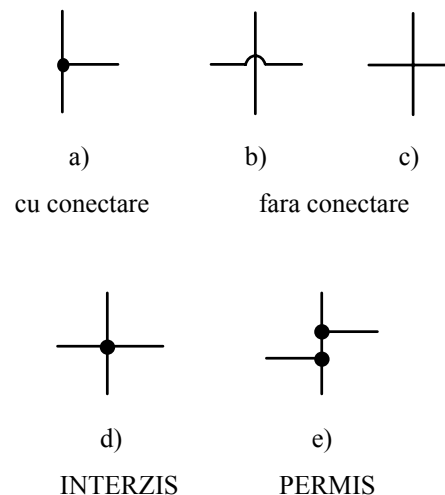


Fig. 1.1. Reprezentarea pe scheme a conductoarelor

## B. Intensitatea curentului

Mărimile fizice care descriu starea unui circuit sunt intensitățile curenților și tensiunile electrice între diferitele puncte ale circuitului. Să ne ocupăm puțin de aceste mărimi. **Intensitatea curentului electric într-un punct** al unui conductor (mai corect ar fi într-o secțiune a sa, dar noi vom neglija grosimea sa fizică) este, prin definiție "debitul" de sarcină electrică transportată prin acel punct

$$\boxed{I(t) = dq/dt} \quad (1.1)$$

Unitatea de măsură este amperul, care corespunde trecerii unui coulomb (aproximativ  $6 \cdot 10^{18}$  sarcini elementare) în timp de o secundă. Chiar și la curenții foarte slabi de ordinul nanoamperilor (produși de unele traductoare cu care măsurăm diferite mărimi fizice) numărul de sarcini elementare transportate într-o secundă este imens, de ordinul a câteva miliarde.

Cum transportul poate avea loc în oricare dintre cele două sensuri, **este obligatoriu** să atribuim acestei mărimi un sens. A spune că prin punctul M al conductorului intensitatea este de 3 A este o informație utilă, dar cu siguranță incompletă. Pentru a simplifica exprimarea, vom spune adesea "un curent de 2 A" în loc de un "curent cu intensitatea de 2 A", pentru că acest lucru nu poate duce la nici o confuzie.

Putem măsura intensitatea, la un moment dat, în orice punct al conductorului dorim. Cum vor fi valorile obținute ? În majoritatea textelor introductive găsiți afirmația că din conservarea sarcinii decurge faptul că intensitatea este aceeași pe un circuit neramificat. Adevărul este că legea conservării sarcinii electrice (lege fundamentală a fizicii) **nu este suficientă** pentru a justifica o astfel de proprietate.

Să presupunem, în plus, că avem stabilit un **regim de curent continuu**, adică toate intensitățile și potențialele din circuit au încetat să mai depindă de timp. Aceasta înseamnă și că sarcina electrică totală a conductorului dintre punctele M și N de pe Fig. 1.2 a), trebuie să rămână constantă. Cum ea nu poate fi creată sau distrusă, "debitul" de sarcină care intră prin punctul M trebuie să fie exact egal cu debitul de sarcină care iese prin punctul N

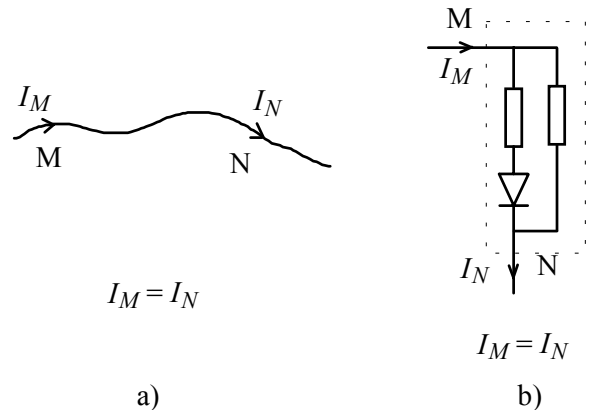


Fig. 1.2. La curent continuu, intensitatea este aceeași în orice punct al unui circuit neramificat.

$$I_M = I_N; \quad (1.2)$$

aceasta proprietate poate fi generalizată și în cazul în care între punctele M și N sunt legate alte elemente de circuit, cu condiția ca să le putem închide imaginar cu o suprafață netraversată de alte conductoare (desenul b al figurii).

Electronica operează însă, cel mai adesea, cu tensiuni și curenți variabili în timp. Revenind la situația simplă din Fig. 1.2 a) putem spune acum că la orice moment de timp avem egalitatea  $I_M(t) = I_N(t)$  ? Numai dacă o perturbație în distribuția de sarcină de pe întregul circuit se deplasează instantaneu. O asemenea perturbație se deplasează, însă, **cu viteză finită**, aproape egală cu viteza luminii în mediul respectiv (atenție, nu este vorba de viteza de drift a unui purtător de sarcină individual). Ajungem, astfel, la concluzia că putem considera intensitățile egale

$$I_M(t) = I_N(t) \quad (1.3)$$

numai dacă privim fenomenele la o scară de timp mult mai mare decât  $d_{MN}/c'$  unde  $d_{MN}$  este distanța între punctele M și N iar  $c'$  viteza luminii în mediul respectiv. Pentru semnale sinusoidale, condiția anterioară conduce la

$$d_{MN} \ll c'T = \lambda \quad (1.4)$$

adică **dimensiunile circuitului trebuie să fie mult mai mici decât lungimea de undă**. Pentru circuite de dimensiuni obișnuite, aceasta înseamnă frecvențe pînă în domeniul sutelor de MHz (pînă în domeniul unde radio ultrascurte și a emițătoarelor de televiziune). Peste aceste frecvențe, modelarea circuitelor se face complet diferit, **cu parametri distribuiți**, ecuațiile care le descriu fiind cu derivate parțiale. Așa este

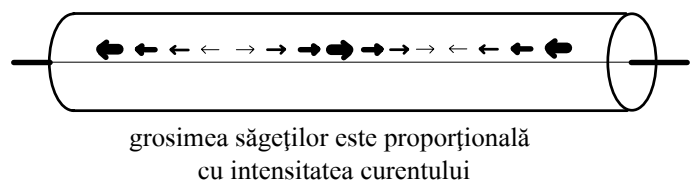


Fig. 1.3. Intensitatea instantanee a curenților pe o porțiune din conductorul central al unui cablu CATV.

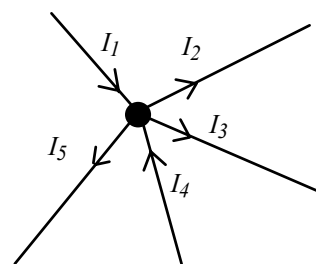
cazul cablului pe care primiți semnalul de televiziune CATV (CABle TeleVision): lungimea de undă este de ordinul a câțiva metri și, la un moment dat curenții prin firul central arată ca în Fig. 1.3. Noi nu vom aborda acest domeniu, așa că relația (1.3) va fi întodeauna respectată.

*Circuitele de mari dimensiuni nu respectă relația (1.3) nici la frecvențele joase; așa sunt, de exemplu, cablurile telefonice transcontinentale sau rețelele de distribuție a energiei electrice. Considerând  $c' \cong 3 \cdot 10^8$  m/s, estimați până la ce frecvență este respectată relația (1.3) în cazul unui conductor de dimensiunile "diametrului" țării noastre.*

Dacă relațiile (1.2-1.3) sunt îndeplinite, **asa cum va fi întodeauna cazul în circuitele cu care vom lucra**, la punctul de conexiune a mai multor conductoare, numit **nod**, suma intensităților curenților care intră este egală cu suma intensităților curenților care ies din nodul respectiv (Fig. 1.4). De multe ori este comod să tratăm identic aceste intensități, acordându-le **semne algebrice**, după o anumită convenție, de exemplu considerând pozitivi curenții care intră și negativi pe cei care ies. În acest mod, proprietatea anterioară se scrie

$$\sum_{\text{nod}} I_k = 0 \quad (1.5)$$

sumarea efectuându-se peste **toți curenții care ajung la nodul respectiv**. Relația anterioară este esențială în circuitele electronice și este cunoscută sub numele de legea (sau teorema) I a lui Kirchhoff sau legea curenților. Deși acum intensitatea este reprezentată printr-un număr pozitiv sau negativ, nu trebuie să uităm că, în spatele acestei convenții, **curentul are un sens, intrând sau ieșind din nodul respectiv**. Ori de câte ori analizăm un circuit este mult mai bine să figurăm printr-o săgeată sensul curentului decât să spunem că "intensitatea este negativă", deoarece caracterul negativ i-a fost acordat de convenția noastră, care putea, la fel de bine, să fie aleasă exact pe dos.



$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

suma algebrică a curenților este nula

Fig. 1.4. Legea curenților.

### C. Tensiunea electrică

Între bornele elementelor de circuit parcurse de curent electric există **tensiuni electrice**, ele neavând același potențial. Cum la efectuarea diferenței de potențial ordinea este esențială, va trebui să spunem întodeauna ce înțelegem prin tensiunea  $U$  între punctele A și B, diferența  $V_A - V_B$  sau diferența  $V_B - V_A$ . Există mai multe variante de a reprezenta pe desen convenția pe care am ales-o; nouă ni se pare că cea mai simplă și sigură este trecerea semnelor + și - la capetele unui arc de cerc, desenat între punctele respective, ca în Fig. 1.5. Aceste semne ne spun **modul în care efectuăm diferența între potențiale și nu faptul că potențialele respective sunt ele însele pozitive sau negative**.

În electronică, regula generală este **măsurarea potențialelor nodurilor față de un nod anumit, numit masă** și să se lucreze, pe cât posibil numai cu potențialele nodurilor. Rațiunea este simplă: este mult mai ușor să vorbești despre altitudinea față de nivelul mării a fiecăruia dintre cinci orașe decât despre cele 10 diferențe de nivel dintre aceste orașe; oricând o anumită diferență poate fi calculată rapid din altitudinile celor două orașe. Vom utiliza pentru nodul de masă simbolul din Fig. 1.5 și, uneori, prescurtarea GND, ca în limba engleză (de la ground).

Astfel, ori de câte ori veți întâlni potențiale (sau tensiuni) care au un singur indice inferior ( $V_A, U_{IR}$ , etc) este vorba despre potențialul nodului respectiv (tensiunea sa măsurată față de masă). Când va trebui să vorbim despre tensiunea între două puncte oarecare, vom utiliza doi indici inferiori, care să se referă la nodurile respective ( $V_{AB}$ ) sau vom trece ca indice inferior elementul de circuit la bornele căruia măsurăm tensiunea ( $U_{R1}$ ).

Tensiunea electrică se măsoară în volți; prescurtarea acestei unități de măsură, V, poate să producă confuzii, deoarece și potențialele se notează, de regulă tot cu litera V. Pentru evitarea confuziilor, este bine să se respecte regula încetățenită în literatura științifică și anume ca **variabilele corespunzătoare mărimilor fizice să fie notate cu litere italice (cursive)**. Astfel, 3V înseamnă trei volți, pe când 3V este produsul dintre constanta trei și potențialul notat cu litera V.

În fenomenele întâlnite în natură și tehnică, atât curentul cât și tensiunea pot avea valori pe o gamă foarte largă. Diagrama prezentată în Fig. 1.5 b) se referă la câteva fenomene mai cunoscute; faptul că pentru supraconductori tensiunile sunt mult mai mici decât cele figurate iar pentru acceleratoarele de particule ele sunt mult mai mari a fost reprezentat pe diagramă prin săgeți. Același lucru se întâmplă în cazul "loviturilor" de trăsnet, pentru care și tensiunea și curentul pot fi mai mari decât valorile reprezentate pe diagramă.

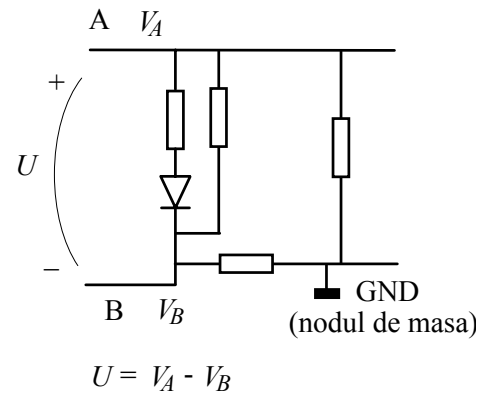


Fig. 1.5 a). Convenția grafică pentru tensiunea între două puncte ale unui circuit.

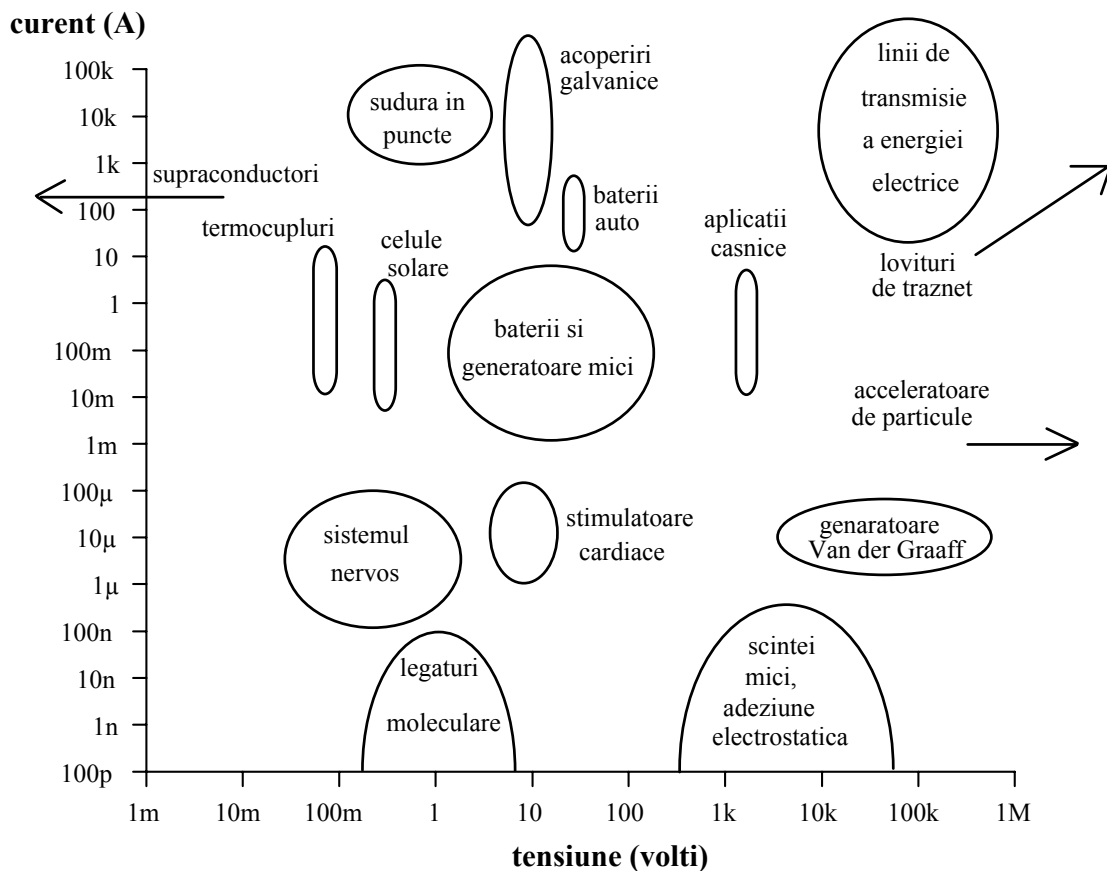


Fig. 1.5. b). Diagrama valorilor curent-tensiune pentru câteva fenomene din natură și tehnică.

Tensiunea electrică între două puncte se definește prin lucrul mecanic efectuat de câmpul electrostatic la deplasarea unei sarcini de valoare unitară. Aceasta înseamnă că, fiind parcurs de un curent electric, un

element de circuit transferă sarcinilor energie (este un **generator electric**) sau primește de la acestea energie (este un **consumator electric**). Consumatoarele sunt numite elemente **pasive**, pe când generatoarele sunt elemente **active**.

Cînd curentul electric intră în elementul de circuit pe la borna de potențial ridicat (la borna pozitivă vom spune, adesea, prin abuz de limbaj), sarcinile electrice sunt accelerate de cîmpul electrostatic și "frîmate" prin interacția cu structura internă a elementului de circuit. În acest caz, elementul de circuit este un consumator de energie electrică, așa cum este cazul porțiunilor BC și DE din Fig. 1.6.

**Într-un consumator de energie electrică, curentul curge de la borna cu potențial ridicat la borna cu potențial coborît.**

Pe de altă parte, există elemente de circuit care furnizează energie electrică, fie primind-o din exterior sub o altă formă (lumină în cazul fotoelementelor, mecanică în cazul generatoarelor hidrocentralelor, etc), fie avînd-o stocată sub o formă diferită (chimică în cazul elementelor galvanice). După cum se poate observa în Fig. 1.6,

**într-un generator de energie electrică, curentul curge de la borna cu potențial coborît la borna cu potențial ridicat.**

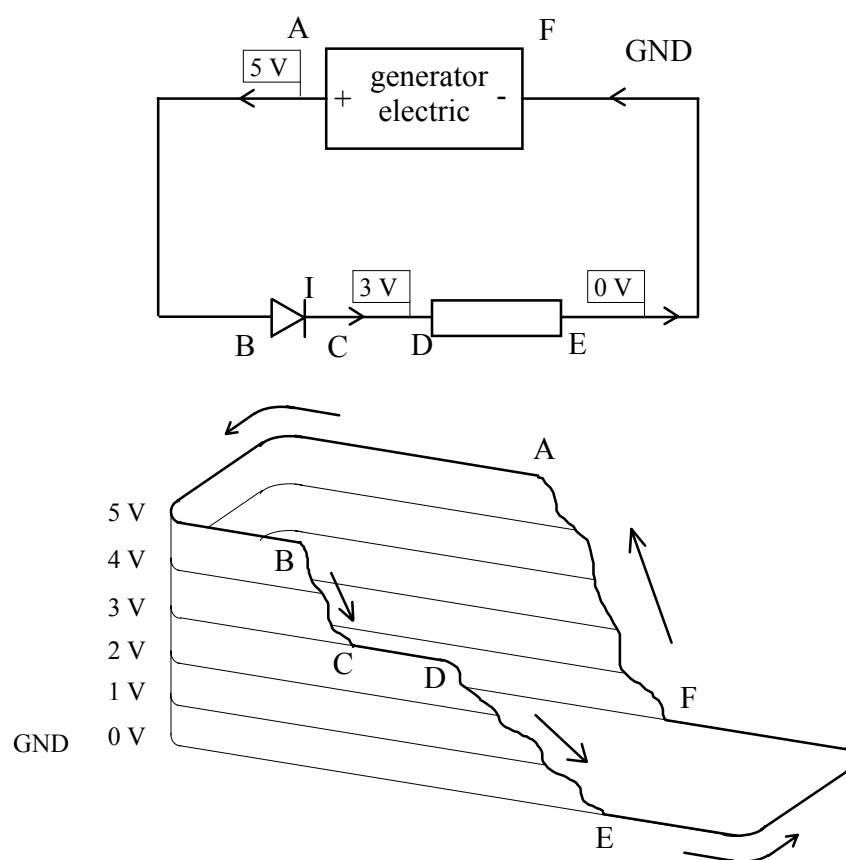


Fig. 1.6. Evoluția potențialului de-a lungul unui circuit electric.

Enunțurile anterioare, sintetizate în Fig. 1.7, pot fi memorate ușor prin analogie cu mișcarea unor corpuri în câmp gravitațional: generatorul le transportă de la înălțime mică la înălțime mare, iar ele coboară, transferînd energia, prin frecare, corpurilor cu care vin în contact.

După cum vă amintiți, introducerea potențialului electrostatic a fost posibilă deoarece într-un astfel de câmp **lucrul mecanic efectuat de câmp nu depinde de drum**. Aceasta afirmație este echivalentă cu aceea că **pe orice contur închis lucrul mecanic este nul**. În circuitele electrice, orice contur închis înseamnă "orice ochi (bucă) a circuitului"; cum lucrul mecanic este proporțional cu tensiunea electrică

$$L_{AB} = qV_{AB} \quad (1.6)$$

rezultă imediat că

**pe orice ochi al circuitului, suma algebrică a variațiilor de potențial este nulă**

$$\sum_{\text{ochi}} \Delta V = 0 \quad (1.7)$$

așa cum se poate vedea în Fig. 1.8.

Accasta implică parcurgerea ochiului într-un sens oarecare și considerarea ca pozitive a variațiilor care duc la creșterea potențialului și negative a celor care coboară potențialul. Relația anterioară este cunoscută ca a doua lege a lui Kirchhoff sau legea tensiunilor. Astfel, pe circuitul din Fig. 1.6, parcurgînd circuitul în sensul ABCDEFA avem

$$-2 - 3 + 5 = 0$$

iar parcurgîndu-l în sens invers, AFEDCBA ajungem la relația echivalentă

$$-5 + 3 + 2 = 0.$$

#### D. Legea lui Ohm; rezistoare

Un element de circuit cu două borne de acces se numește **dipol**. Conform cu cele discutate anterior, intensitățile la cele două borne trebuie să fie egale (Fig. 1.9). În plus, mai avem pentru descrierea stării sale electrice **tensiunea la bornele sale**. Vom adopta o convenție care este naturală pentru dipolii consumatori de energie: curentul intră în dipol pe la borna cu potențial ridicat. Cu acestea,

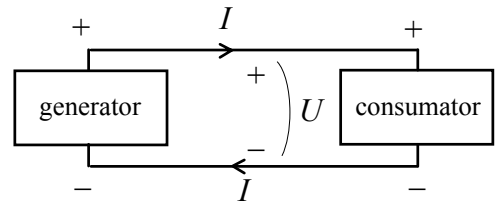
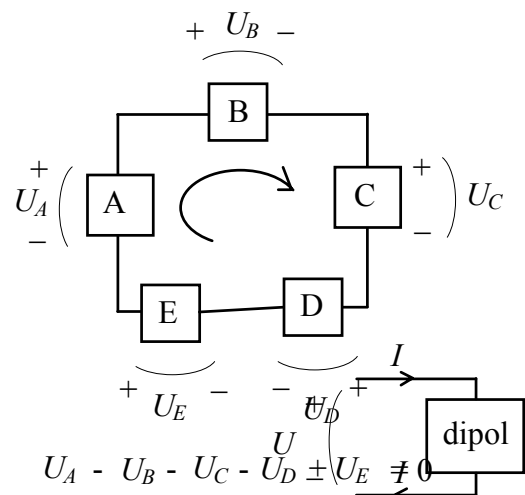


Fig. 1.7. Identificarea generatoarelor și consumatoarelor de energie electrică.



suma algebrică a variațiilor de potențial este nulă

Fig. 1.9. Dipol.

Fig. 1.8. Legea tensiunilor.



comportarea dipolului **în regim de curent continuu** este complet descrisă de relația funcțională  $I = f(U)$ , numită **caracteristică statică a dipolului**.

Pentru conductoarele reale confecționate din metale sau multe alte tipuri de materiale, relația funcțională este una de proporționalitate

$$I = \frac{1}{R} U, \quad (1.8)$$

cunoscută ca legea lui Ohm. **Constanta**  $R$  caracterizează conductorul respectiv și poartă numele de **rezistență electrică**. Deși multe materiale o respectă, relația de mai sus nu este altceva decât **o relație de material**. Nu toți dipolii respectă, deci, legea lui Ohm, "dacă legea lui Ohm ar fi general valabilă, electronica n-ar mai exista"<sup>1</sup>. Elementele de circuit care respectă legea lui Ohm cu destulă acuratețe sunt numite **rezistoare** și sunt utilizate pe scară largă în circuitele electronice.

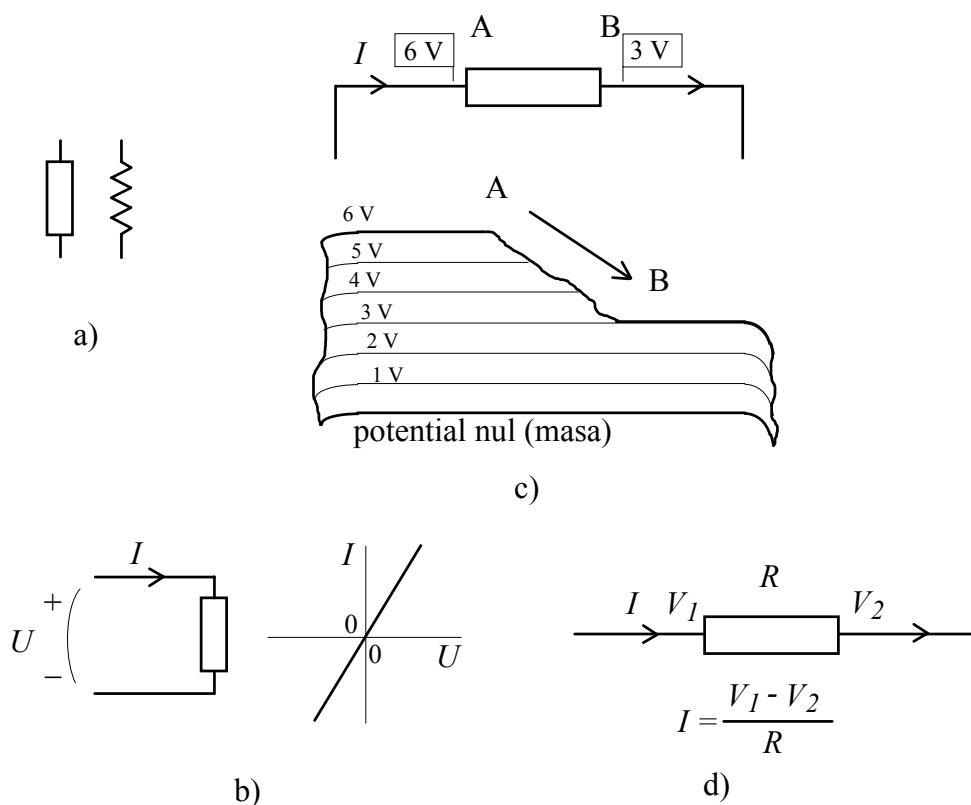


Fig. 1.10. Rezistorul: simboluri recomandate (a), caracteristica sa statică (b) și scrierea legii lui Ohm (c și d).

Rezistorul ideal respectă cu exactitate legea lui Ohm. Simbolurile recomandate pentru el sunt cele din Fig. 1.10 a). Caracteristica sa statică este o linie dreaptă (desenul b al figurii) și, din acest motiv, el este un dispozitiv de circuit **liniar**. Dacă în relația (1.8) schimbați simultan semnele intensității și tensiunii, relația continuă să rămână valabilă. Aceasta înseamnă că, de fapt, puteți inversa rezistorul la borne fără ca restul circuitului să sesizeze modificarea: rezistorul este un dispozitiv **simetric**. În aplicarea legii lui Ohm trebuie să acordați întodeauna atenție convenției de sensuri: dacă ați stabilit sensul curentului, atunci relația trebuie scrisă

<sup>1</sup>Edward M. Purcell, "Electricitate și magnetism, Cursul de fizică Berkeley, vol. II", Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982.

$$I = \frac{V_{amonte} - V_{ava.}}{R}$$

(1.9)

așa cum este exemplificat în desenele c) și d) ale figurii.

Chiar atunci când sunt fabricate în condiții foarte bine controlate, rezistoarele au valoarea împrăștiată statistic; astfel producătorii de dispozitive electronice oferă rezistoare în mai multe game de toleranță. Cele mai puțin precise au o toleranță de +/- 20 % în jurul **valorii nominale** (valoarea marcată pe rezistor). Cu această toleranță, valorile nominale standardizate pentru o decadă de valori sunt cele din seria E6, prezentată în Fig. 1.10 e). Se observă că aceste valori sunt aproximativ echidistante pe scara logaritmică; cu linie subțire au fost trasate intervalele de toleranță pentru fiecare din valori. Pentru celelalte decade, valorile nominale se înmulțesc cu puteri ale lui 10, ca de exemplu 33 Ω, 330 Ω, 3.3 kΩ, ...etc.

Seria E12, prezentată și ea în figură, este utilizată pentru valorile nominale în cazul rezistoarelor cu toleranța +/- 10 % iar pentru toleranța de +/- 5% valorile sunt cele din Tabelul 1.1 (seria E24). Aceste serii se găsesc și în Anexa 1 și întodeauna când veți rezolva probleme va trebui să le folosiți la alegerea valorile rezistoarelor, ținând seama de precizia necesară.

Tabelul 1.1. Seria de valori E24 (+/- 5%)

1.00	1.10	1.20	1.30	1.50	1.60
1.80	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
3.30	3.60	3.90	4.30	4.70	5.1
5.6	6.2	6.8	7.6	8.2	9.1

## E. Analiza circuitelor

Cele două legi ale lui Kirchhoff, împreună cu caracteristicile statice ale elementelor de circuit, furnizează întodeauna numărul necesar de ecuații din care rezultă starea de curent continuu a circuitului, numită și punct static de funcționare. Această operație este numită **analiza circuitului**. Cu toate acestea, în analiza circuitelor efectuată "manual" legea a II este rar utilizată în forma "suma algebrică a variațiilor de potențial este nulă pe orice ochi al circuitului" deoarece, în primul rând, conductorul de masă nu mai conectează explicit pe scheme diversele elemente de circuit și, din acest motiv, ochiurile de circuit nu mai sunt evidente. În al doilea rând, în multe cazuri, scrierea legii tensiunilor pe întregul ochi complică problema mărinind inutil numărul de ecuații. Chiar în cazul efectuării automate a analizei, de către calculator, metoda preferată este, de obicei, aceea a potențialelor nodurilor.

De exemplu, va trebui să calculați frecvent potențialul unui nod al unui circuit cunoscând potențialele altora și anumite tensiuni; în această situație legea a II a lui Kirchhoff este o alegere proastă pentru că vă obligă să parcurgeți un întreg ochi de circuit și să **introduceți necunoscute suplimentare**. Atunci va trebui să vă aduceți aminte că variația totală de potențial între două puncte nu depinde de drumul ales și să porniți

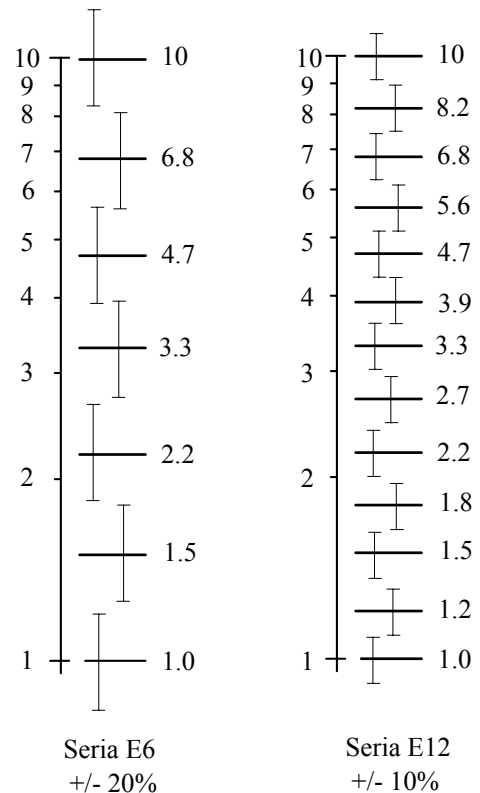


Fig. 1.10.e) Seriile de valori standardizate E6 (+/- 20%) și E12 (+/- 10%).

de la un nod cu potențial cunoscut, mergînd pe ramuri de circuit cu tensiuni cunoscute, ca în exemplul din Fig. 1.11, unde va trebui să calculăm potențialele nodurilor C și E, folosind informațiile existente pe schemă.

*În această figură apare un simbol care vă este, poate, necunoscut, tranzistorul bipolar, dar aveți suficiente informații ca să rezolvați problema propusă fără să știți modul în care funcționează tranzistorul (adică relațiile între curenții și tensiunile la bornele sale).*

Nodul A are potențialul de +10 V, cunoaștem curențul prin rezistența  $R_C$  și valoarea acestei rezistențe; trebuie să calculăm potențialul nodului C. Cum rezistența este un consumator, curențul circulă prin ea "de la + la -" adică de la potențial ridicat la potențial coborât. Pornim de la nodul A și avem imediat potențialul nodului C

$$V_C = V_A - 4.7 \text{ V} = 10 \text{ V} - 4.7 \text{ V} = 5.3 \text{ V}.$$

Pentru potențialul nodului E pornim de la nodul de masă și avem

$$V_E = 0 + 1 \text{ V} = 1 \text{ V}.$$

Cînd vom fi interesați de valoarea tensiunii între nodurile C și E, nu trebuie decît să scădem potențialele

$$V_{CE} = V_C - V_E = 4.3 \text{ V};$$

știm însă, în plus, **un lucru care nu depinde de convenția de definiție a tensiunii: potențialul nodului C este mai ridicat decît al nodului E.**

Dacă doriți să vă complicați și să creșteți șansele de a greși la calcul, vă sfătuim să utilizați legea a II a lui Kirchhof, așa cum ați învățat-o în liceu. Mai întîi va trebui să presupuneți că între nodul A și masă este legat un "generator cu tensiunea electromotoare  $E = 10 \text{ V}$ ". Am spus să presupuneți pentru că nu aceasta este situația reală, în circuit între nodul A și masă fiind legat cu totul altceva. Apoi, să definiți tensiunea între C și E, **cu o anumită convenție**; să zicem că ați ales să fie pozitivă dacă  $V_C > V_E$ . Veți ajunge, după oarecare trudă cu regulile mnemotehnice învățate, la ecuația

$$E = 4.7 \text{ V} + V_{CE} + 1.0 \text{ V}$$

care nu vă va rezolva imediat problema : cît este potențialul nodului C (față de masă) ?

Alteori, nodul al cărui potențial trebuie să-l calculați este legat **numai prin rezistoare** de noduri cu potențiale cunoscute, ca în Fig. 1.12 a).

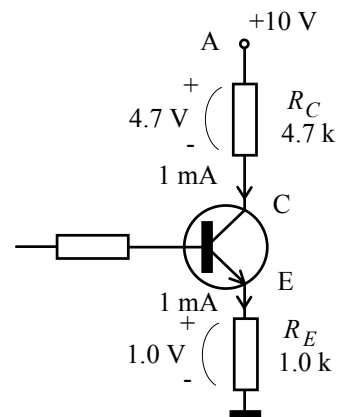


Fig. 1.11. Circuit cu tranzistor.

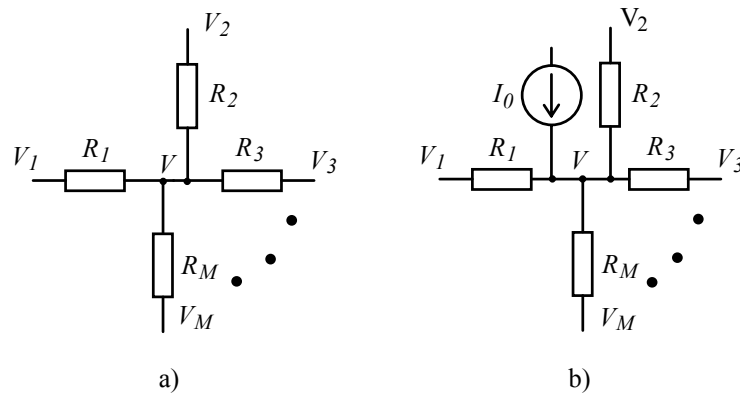


Fig. 1.12. Exemple de moduri în care poate fi legat un nod de circuit.

Dacă scrieți că suma algebrică a curenților la nodul de potențial  $V$  este nulă, exprimați curenții prin legea lui Ohm și rearanjați puțin ecuația, obțineți că

$$V = \frac{\sum_{k=1}^M \frac{V_k}{R_k}}{\sum_{k=1}^M \frac{1}{R_k}} \quad (1.10)$$

relație pe care merită să o țineți minte, pentru că **leagă direct potențialele nodurilor**. Teorema pe care tocmai ați demonstrat-o se numește **teorema Milman** și este frecvent utilizată în electronică. Din relația (1.10) se poate arăta imediat că potențialul  $V$  al nodului de care ne ocupăm este cuprins întodeauna între valorile minimă și maximă ale potențialelor  $V_k$ . Veți descoperi într-una din problemele de la sfârșitul capitolului că această proprietate se păstrează și dacă rezistoarele sunt înlocuite cu alte dispozitive, **neliniare**, cu condiția ca acestea să fie consumatoare de energie. Din aceeași relație se poate vedea de asemenea că, dacă una dintre rezistențe, să zicem  $R_3$ , tinde la zero, atunci potențialul  $V$  este tras către potențialul nodului respectiv ( $V_3$  în exemplul nostru).

S-ar putea ca una din ramurile care sunt legate la nod să nu fie rezistivă dar să cunoașteți curentul prin ea, ca în desenul b) al Fig. 1.12. Legea curenților și legea lui Ohm vă conduc imediat la relația

$$I_0 + \sum_{k=1}^M \frac{V_k - V}{R_k} = I_0 + \sum_{k=1}^M \frac{V_k}{R_k} - V \sum_{k=1}^M \frac{1}{R_k} = 0 \quad (1.11)$$

din care se obține ușor potențialul necunoscut  $V$ .

## F. Măsurarea intensităților de regim continuu

Așa cum am spus, intensitatea curentului se definește într-un punct dar rămâne aceeași de-a lungul unui circuit neramificat. Pentru măsurarea sa, **conductorul trebuie secționat** într-un anumit punct, ca în Fig. 1.13 a), și trebuie introdus în circuit un aparat de măsură numit **ampermetru** (desenul b). Bornele sale **nu sunt echivalente**, fiind marcate cu semnele + și -; ținând seama că el este un consumator de energie,

**curentul intră în ampermetru pe la borna marcată cu +.**

Ampermetrul "clasic" măsoară intensitatea prin deflexia unui ac indicator, deflexie datorată forțelor de interacție dintre un magnet permanent și o bobină mobilă parcursă de curentul pe care îl măsurăm. Este un instrument **analogic** deoarece poziția acului este o funcție continuă care poate lua orice valoare dintr-un anumit interval cuprins între zero și **capătul de scală**.

Aparatele disponibile au mai multe scale de sensibilitate, selectabile cu un comutator rotativ, ca în Fig. 1.14. Pentru măsurarea curenților și a tensiunilor, poziția comutatorului arată întodeauna **valoarea corespunzătoare capătului de scală**

, 10 mA în exemplul din figură. Scala este gradată, însă, într-un număr convenabil de diviziuni, 100 în exemplul nostru, așa că valoarea măsurată se calculează cu regula de trei simplă. Noi vă sfătuim să calculați, mai întâi cât reprezintă o diviziune pe scala respectivă și să înmulțiți valoarea citită cu această constantă:  $65 \text{ diviziuni} \times 0.1 \text{ mA/diviziune} = 6.5 \text{ mA}$ .

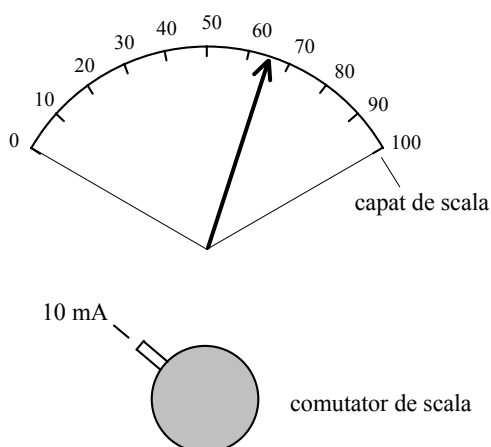


Fig. 1.14. Scala și comutatorul de scală ale unui miliampermetru "clasic".

aparaturii, rezistența dintre noduri va crește, devenind  $R + R_a$ . Intensitatea citită se apropie de cea existentă inițial numai dacă

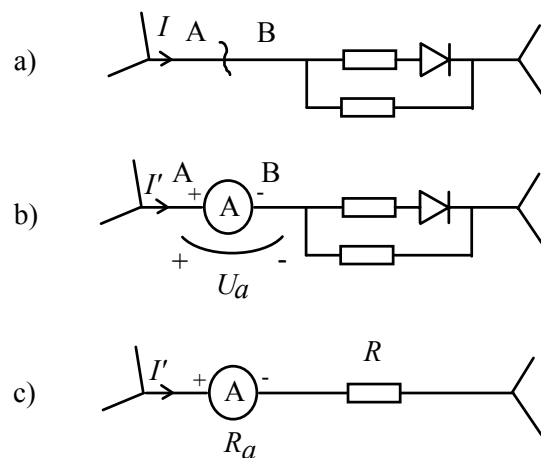


Fig. 1.13. Conectarea ampermetrului în circuit.

Cele mai sensibile ampermetre clasice au capătul de scală la câteva zeci de  $\mu\text{A}$ , uzual la  $50 \mu\text{A}$  și, din acest motiv se numesc **microampermetre** (uneori "instrumente"). Pentru a putea măsura asemenea intensități mici, bobina trebuie să fie ușoară și, deci, sîrma bobinajului să fie subțire. Astfel, rezistența internă a microampermetrului nu poate fi redusă prea mult, ea fiind de  $600 \Omega - 2 \text{ k}\Omega$ . Vom considera, pentru fixarea ideilor, că ea are o rezistență "tipică" de  $2 \text{ k}\Omega$ . Rezultă că, pentru ca microampermetrul să ne arate că prin circuit trece curentul de  $50 \mu\text{A}$ , între bornele sale va trebui să existe o tensiune de  $100 \text{ mV}$  ! Or, înainte de introducerea sa, tensiunea între punctele A și B era nulă, întreaga funcționare a circuitului a fost perturbată și ceea ce măsurăm **nu este intensitatea curentului care trecea înainte de conectarea aparatului**. Acest lucru poate fi înțeles mai ușor

pentru cazul particular din Fig. 1.13 c), unde între cele două noduri avem un rezistor de rezistență  $R$ . După legarea

$$R_a \ll R \quad (1.12)$$

adică **rezistența ampermetrului este mult mai mică decît aceea a porțiunii de circuit neramificat unde se măsoară intensitatea**. Mai mult, în această situație putem estima și eroarea relativă, ea fiind de ordinul  $R_a/R$ : cu  $R_a = R/10$  ne așteptăm la o eroare de  $10 \%$  dar cu  $R_a = R/100$  eroarea scade la  $1 \%$ . Există, însă, situații cînd nu ne interesează decît intensitatea curentului **cu ampermetrul montat**. În aceste situații, nu mai vorbim despre o eroare de măsură datorată rezistenței sale interne.

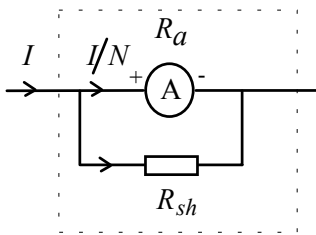


Fig. 1.15. Montarea rezistenței de shunt.

Cînd dorim să măsurăm intensități de  $N$  ori mai mari decît cei  $50\ \mu\text{A}$  ai instrumentului, soluția este ca  $(N-1)/N$  din curent să fie deviat printr-un rezistor numit **shunt** și numai  $1/N$  din curent să treacă prin instrument, ca în Fig. 1.15. Rezultă imediat rezistența de shunt  $R_{sh} = R_a/(N-1)$  și noua rezistență a aparatului de măsură

$$\boxed{R'_a = R_a/N} \quad (1.13)$$

Rezistența ampermetrului a scăzut exact cu factorul cu care a fost desensibilizat. Nu trebuie să ne amăgim, însă: pentru ca acul să ajungă la capătul de scală, la bornele aparatului trebuie să avem aceeași tensiune de  $100\ \text{mV}$  !

Ea este o măsură a perturbației introdusă de ampermetru **independentă de mărimea curentului** pe care trebuie să-l măsurăm.

Chiar dacă relația (1.12) este îndeplinită, precizia măsurării rămîne limitată de **modul de afișare a rezultatului**. Într-adevăr, pe o scală de dimensiunea a  $10\ \text{cm}$  putem, în cel mai bun caz, efectua citiri cu precizia de  $1$  la sută. Dacă avem ghinionul ca poziția acului să fie în prima treime, imprecizia relativă ajunge la  $3\%$ ; din acest motiv această situație trebuie evitată prin trecerea aparatului pe o scară mai sensibilă. La aparatele profesionale, secvența în care merg capetele de scală este  $1, 3, 10, 30$ , ș.a.m.d., tocmai pentru a evita această situație.

Aparatele de măsură moderne sunt **electronice** și cu **afișaj digital**. Curentul măsurat nu mai este utilizat pentru a deplasa corpuri ci informația sa este prelucrată electronic, prin **amplificare**. Deși primele aparate de măsură electronice utilizau tot un sistem de afișaj analogic cu ac indicator, datorită preciziei limitate de citire a poziției acului ele au fost înlocuite complet de cele cu afișare **digitală (numerică)**. Dacă aparatul este unul cu  $2000$  de puncte se pot afișa numere între  $0000$  și  $2000$ ; **ultima cifra poate fi afectată de o eroare egală cu o unitate** și precizia relativă de citire este la capătul de scală  $0.05\%$ , de  $20$  de ori mai bună decît la afișarea analogică. Un astfel de aparat se mai numește cu "trei cifre și  $1/4$ ", deoarece cifra cea mai semnificativă nu acoperă decît aproximativ un sfert din domeniul posibil ( $0.9$ ).

Ampermetrele electronice cu afișaj digital pot măsura, deci, cu precizie relativă mult mai bună decît cele clasice. Cu toate acestea, **ele nu oferă o rezistență internă mult mai mică decît cele clasice**, deoarece, în general, ele măsoară (electronic) căderea de tensiune pe un rezistor prin care curentul de măsurat este obligat să treacă. De exemplu, pentru scala de  $200.0\ \mu\text{A}$  (rezoluție  $0.1\ \mu\text{A}$ ), un asemenea aparat măsoară căderea de tensiune pe un domeniu de  $200.0\ \text{mV}$ ; rezultă, de aici, că rezistența microampermetrului este de  $1\ \text{k}\Omega$ , numai de două ori mai mică decît a microampermetrului clasic.

Chiar dacă ampermetrele electronice pot fi parcurse de curent în ambele sensuri, ele afișînd și **semnul**, bornele lor trebuie să fie marcate în continuare cu  $+$  și  $-$ , în absența acestei convenții informația  $-10\ \text{mA}$  neavînd nici un sens logic.

## G. Măsurarea tensiunilor continue

Tensiunea electrică se definește întodeauna între două puncte. Chiar dacă, pentru comoditate, vorbim uneori despre "tensiunea unui punct", înțelegem că este vorba despre **tensiunea față de masă** a aceluia punct. Aparatul care măsoară tensiuni electrice, numit **voltmetru**, trebuie legat, deci, între aceste puncte, ca în Fig.1.16 b).

Voltmetrul "clasic" măsoară tensiunea **indirect**: el conectează între punctele respective o rezistență cunoscută, măsoară **intensitatea** curentului prin acea rezistență și, utilizînd legea lui Ohm, ne anunță victorios că "tensiunea între bornele voltmetrului este de...". Așa se face că cel mai sensibil voltmetru clasic, numit **milivoltmetru**, este tocmai microampermetrul (instrumentul), care măsoara la capăt de scală  $50\ \mu\text{A}$  și avea o rezistență de  $2\ \text{k}\Omega$ ; nu mai trebuie decît să desenăm o altă scală pe care să scrie la capăt  $100\ \text{mV}$  !

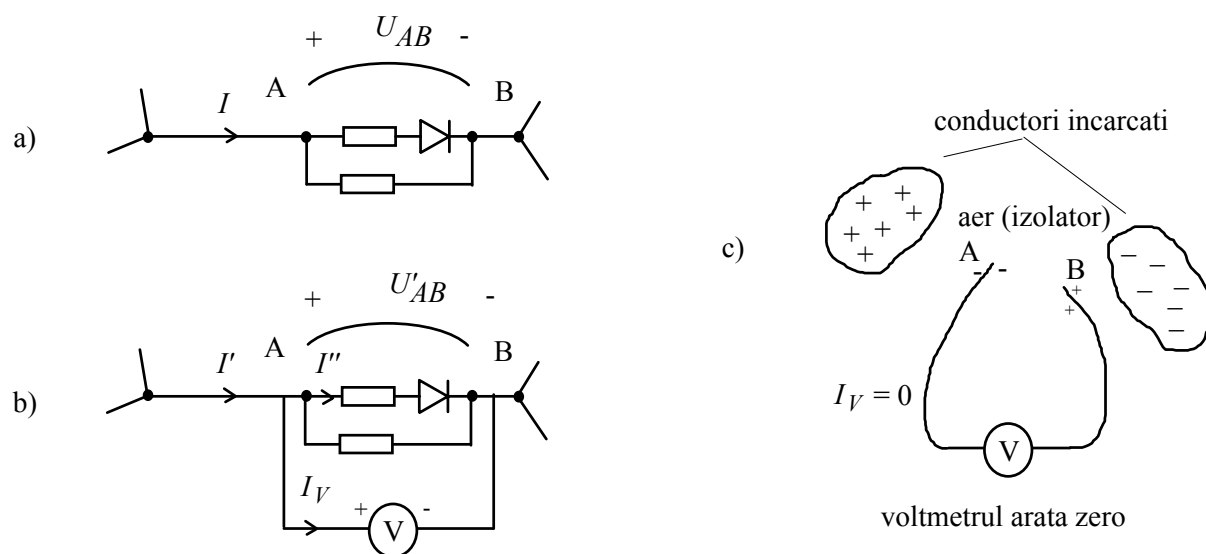


Fig. 1.16. Legarea voltmetrului într-un circuit electric (desenele a și b); în câmp electrostatic firele de măsură ale voltmetrului forțează la zero tensiunea între punctele A și B.

Ceea ce am scris în paragraful precedent poate fi citit însă și altfel: pentru a putea măsura o tensiune de 100 mV, milivoltmetrul nostru trebuie să "extragă" din circuitul pe care îl măsoară un curent de 50  $\mu$ A. Din acest motiv, cu el nu putem măsura tensiuni într-un câmp electrostatic într-o regiune unde nu există curenți electrici, așa cum se vede în Fig. 1.16 c); mai mult, sarcinile mobile din conductoarele legate la voltmetru se deplasează puțin sub influența câmpului electrostatic și **egalează potențialele punctelor între care doream să măsurăm tensiunea**. Chiar în circuitele electronice parcurse de curenți, cei câțiva microamperi ceruți de milivoltmetru pot reprezenta o perturbație care să afecteze funcționarea circuitului: la conectarea milivoltmetrului în baza tranzistorului din Fig. 1.17 punctul său de funcționare se modifică într-atât încât circuitul încetează să mai funcționeze ca amplificator.

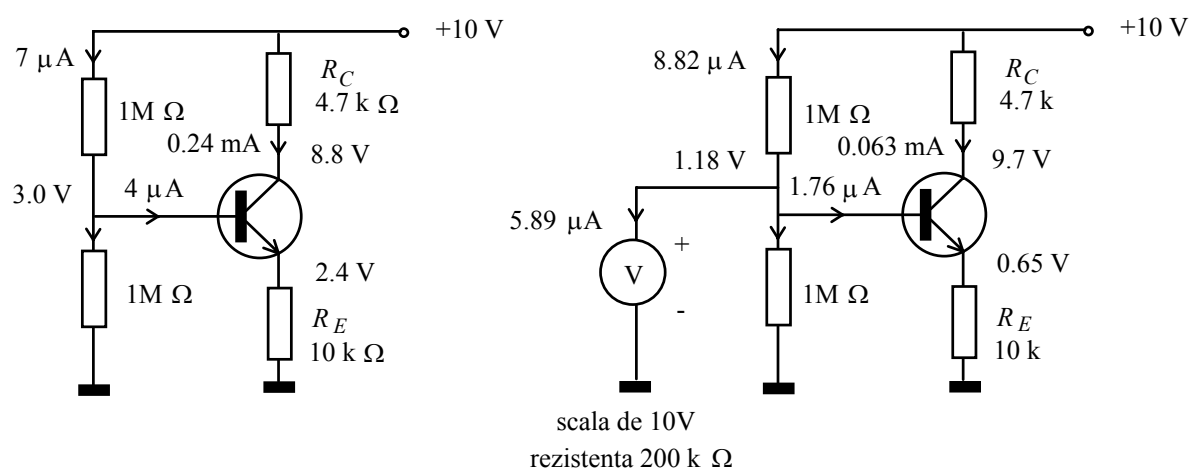


Fig. 1.17. Conectarea voltmetrului în baza unui tranzistor îi poate modifica puternic punctul de funcționare, scoțînd amplificatorul din funcțiune.

Dacă între punctele între care măsurăm tensiunea există o rezistență de valoare  $R$ , iar rezistența voltmetrului verifică relația

$$R_V \gg R, \quad (1.14)$$

atunci perturbația introdusă de voltmetru poate fi neglijată. Prin rezistența  $R$  trebuie înțeleasă **rezistența echivalentă** dintre aceste puncte; conceptul de rezistență echivalentă va fi clarificat în capitolul următor, aici este suficient să știm că aceasta este totdeauna mai mică sau egală cu cea conectată direct între punctele de măsură, datorită celorlalte drumuri posibile prin circuit, care apar în paralel.

În practică, dacă  $R_V \geq 10R$  putem conta pe o precizie de măsurare de 10 %; în cazul în care  $R_V \geq 100R$ , precizia ajunge la 1 %. Ca și la măsurarea intensității, perturbația produsă constituie o eroare numai dacă ne interesează valoarea tensiunii **înainte de conectare aparatului de măsură**, dacă nu dorim să știm decât valoarea tensiunii cu voltmetrul conectat nu mai avem despre ce eroare să vorbim.

Atunci când tensiunea de măsurat are valori de  $N$  ori mai mari decât cele cuprinse pe scala milivoltmetrului nostru, soluția este intercalarea în serie cu el a unei **rezistențe adiționale**, astfel încât pe instrument să cadă numai a  $N$ -a parte din tensiunea de măsurat (Fig. 1.18). Rezistența adițională trebuie să aibă, deci, valoarea,  $(N - 1)R_V$  iar rezistența "noului" aparat este

$$R'_V = NR_V, \quad (1.15)$$

multiplicată cu același factor cu care a fost multiplicat capătul de scală. Din acest motiv, indiferent de noua valoare  $V_{\max}$  a capătului de scală obținută, raportul  $R_{\text{aparat}}/V_{\max}$  rămâne constant și **caracterizează aparatul**. Astfel, în exemplul nostru instrumentul măsoară la capătul de scală 100 mV și 50  $\mu$ A, având rezistența de 2 k $\Omega$ , fiind caracterizat de raportul 20  $\Omega/V$ ; acest raport ne permite să calculăm imediat rezistența pe orice scală, de exemplu pe scala de 30 V aparatul va avea o rezistență de 600 k $\Omega$ .

*Arătați că raportul  $R_{\text{aparat}}/V_{\max}$  ce caracterizează voltmetrul este inversul valorii  $I_{\max}$  de capăt scală a instrumentului propriu-zis (50  $\mu$ A în exemplul nostru) independent de valoarea rezistenței instrumentului.*

Pe măsură ce desensibilizăm voltmetrul, rezistența sa crește apropiindu-se de un voltmetru ideal. Cu toate acestea, **indiferent de scala utilizată, pentru o deviație completă (capăt de scală) aparatul va cere să primească același curent de 50  $\mu$ A !** Această valoare de curent reprezintă o caracteristică a modului în care el va perturba circuitul, indiferent de mărimea tensiunii măsurate.

Microampermetrul (instrumentul), împreună cu rezistențele de shunt care îi modifică sensibilitatea ca ampermetru și cu rezistențele adiționale care îl fac să funcționeze ca voltmetru cu diferite sensibilități, formează un aparat complex, căruia i se mai adaugă, de regulă, și funcția de ohmetru. El se numește, atunci, avohmetru sau aparat universal de măsură sau multimetru (volt-ohm-meter, prescurtat VOM, în limba engleză).

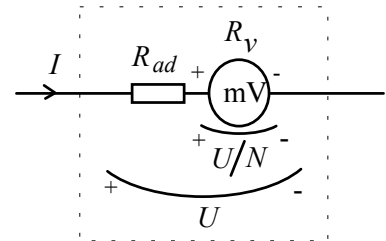


Fig. 1.18. Montarea rezistenței adiționale.

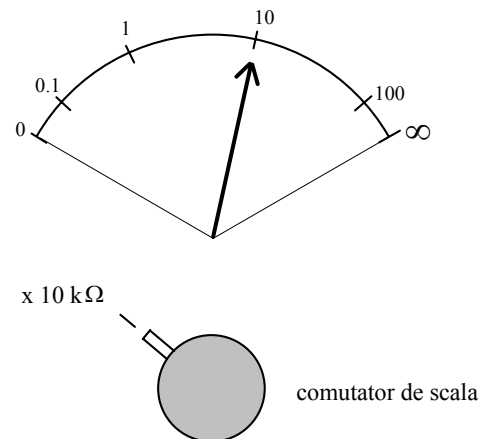


Fig. 1.19. Scala și comutatorul de scală la un ohmetru clasic.



Pentru funcționarea ca **ohmetru**, marcarea scalelor și citirea valorilor se face complet diferit: indiferent de sensibilitate, scala de ohmetru are zero la unul din capete și **infinit** la celălalt capăt. Din acest motiv, la pozițiile comutatorului nu se mai trece valoarea corespunzătoare capătului de scală ci un factor cu care trebuie multiplicat numărul citit. Pentru evitarea confuziilor, înaintea factorului este scris întodeauna semnul operației de înmulțire ( $\times$ ,  $\cdot$ , sau  $*$ ), așa cum se vede în Fig. 1.19, unde ohmetrul ne spune ca avem o rezistență de 100 k $\Omega$ .

Ca și la ampermetre, voltmetrele electronice cu afișaj digital permit citirea rezultatului cu o precizie mult mai bună decât cele clasice. Dar, spre deosebire de cazul ampermetrelor, voltmetrele electronice aduc îmbunătățiri semnificative în ceea ce privește **rezistența internă**.

În primul rând, **voltmetrele electronice au aceeași rezistență pe oricare scală de sensibilitate**, nemaifiind nevoie să recalculăm rezistența internă ori de câte ori schimbăm scala. Dar, ceea ce este mai important, **această rezistență este foarte mare în comparație cu aceea a voltmetrelor clasice**. Dacă un voltmetru clasic avea 2 k $\Omega$  pe scala de 100 mV și abia ajungea la 2 M $\Omega$  pe scala de 100 V, un voltmetru electronic are o rezistență tipică de 10 M $\Omega$  pe toate scalele. Modificarea cea mai spectaculoasă se produce pe scala cea mai sensibilă (100 mV cap de scală) unde rezistența voltmetrului electronic este de cinci mii de ori mai mare; dacă cel clasic cerea întodeauna curenți de ordinul 50  $\mu$ A, voltmetrul electronic are nevoie, pe această scală, de numai 10 nA !

## H. Măsurarea curenților și tensiunilor alternative (regim sinusoidal)

Dacă un circuit conținând numai elemente liniare (rezistoare, condensatoare, inductanțe, etc.) este excitat sinusoidal, atunci, **după stingerea regimului tranzitoriu toate potențialele și toți curenții evoluează sinusoidal cu frecvența de excitație**. Ceea ce diferă sunt numai amplitudinile și fazele acestor mărimi. Exemplul tipic îl constituie circuitele alimentate direct sau prin transformatoare de la rețeaua de distribuție a energiei electric. Această rețea furnizează între cele două borne o tensiune care evoluează sinusoidal în timp, cu frecvența de 50 Hz (perioada de 20 ms), între - 311 V și + 311 V; **311 V este, deci, amplitudinea tensiunii sinusoidale a rețelei**.

În electronică trebuie să fim prudenți cu noțiunea de amplitudine pentru că ea este utilizată într-un sens mai general decât în fizică. Astfel, pentru tensiunea rețelei, 311 este **valoarea de vîrf (de pic, din englezescul peak)** dar, cum vom vedea imediat, de multe ori este mai comod de măsurat **amplitudinea vîrf la vîrf**, care în cazul rețelei este de 622 V<sub>pp</sub> (pentru a evita orice confuzie este bine să adăugați indicele inferior "pp" sau "vv" la unitatea de măsură).

După cum știți, puterea instantanee comunicată unui rezistor, prin efect Joule, este

$$P(t) = U^2(t)/R = I^2(t)R \quad (1.16)$$

adică depinde de **pătratul** valorii instantanee a curentului sau tensiunii. Curentul și tensiunea modificându-se periodic, este interesant să știm puterea medie pe o perioadă, aceasta fiind practic egală cu puterea medie calculată pe un interval de timp mult mai mare decât o perioadă. Conform ecuației precedente, puterea medie va depinde de media pătratului tensiunii sau curentului. Este, însă, mai comod, să se lucreze cu niște mărimi echivalente, care sunt cele efective sau eficace

$$\langle P(t) \rangle = \langle U^2(t) \rangle / R = U_{ef}^2(t) / R \quad (1.17)$$

definite ca **radical din media pătratului** mărimii respective

$$U_{ef} = \sqrt{\langle U^2(t) \rangle}; \quad (1.18)$$

în limba engleză această operație este notată prescurtat **RMS (Root Mean Square)** iar valorile respective se numesc "valori RMS"); este bine să adăugați indicele inferior "ef" sau "RMS" la unitatea de măsură.

Pentru o dependență sinusoidală, operația de radical din media pătratului produce valoarea  $amplitudine/\sqrt{2} = 0.707 \cdot amplitudine$ ; rețeaua de alimentare are tensiunea efectivă de 220 V. Trebuie reținut, însă, că **aceasta este valabil numai pentru o dependență sinusoidală**. De exemplu, pentru forma de undă din Fig. 1.19 b, tensiunea efectivă nu este  $0.707 \cdot amplitudine$  ci este egală chiar cu amplitudinea.

Atât aparatele de măsură clasice cât și cele electronice pot măsura și tensiuni și curenți sinusoidali (pentru aceste funcții se efectuează o redresare cu diode). Pentru comoditatea utilizatorului, **ele afișează valoarea efectivă**, dar nu o măsoară, de fapt, de-adevăratelea, conform definiției (1.18). Ce măsoară, ele de fapt? Ele măsoară **amplitudinea** (sau ceva proporțional cu aceasta, media valorii absolute), aplică un factor de corecție adecvat și ne comunică "valoarea efectivă". Aceasta funcționează **numai pentru forme de undă sinusoidale**. Dacă ați măsura tensiunea formei de undă din Fig. 1.20 b), aparatul va spune că tensiunea efectivă este 0.707 V, când de fapt, valoarea efectivă adevărată este de 1 V. Pentru măsurarea tensiunilor efective ale formelor de undă care nu sunt sinusoidale se utilizează aparate de măsură care chiar măsoară valoarea efectivă, efectuând radicalul din media pătratului; ele se numesc aparate de **valoarea efectivă adevărată (true RMS)** și pot realiza acest lucru, de exemplu, prin măsurarea puterii disipate pe o rezistență etalon.

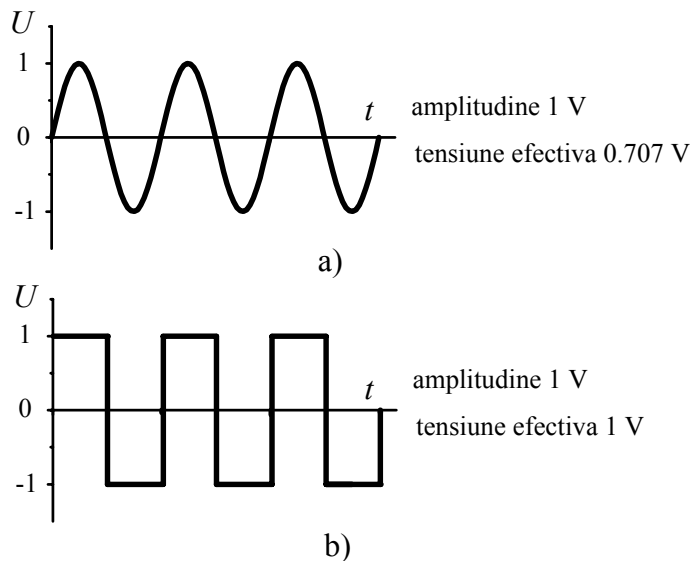


Fig. 1.20. Amplitudinea și valoarea efectivă pentru două forme de undă: sinusoidală (a) și una rectangulară (b).

## I. Măsurarea curenților și tensiunilor alternative de formă oarecare

Deși foarte important, regimul sinusoidal nu este utilizat în practică **decît la transmiterea energiei electrice** și **testarea în laborator** a unor anumite circuite; **imensa majoritate a formelor de undă** produse, amplificate și măsurate **în electronică nu sunt sinusoidale**. Ajunge să vă gândiți la evoluția tensiunii pe difuzorul cu care ascultați muzica, ea nu este sinusoidală, sinusoidal (pe durată scurtă) este semnalul cu care radiodifuziunea punctează secunde atunci când transmite ora exactă; nu credem că ați dori să-l ascultați mai mult de cîteva fracțiuni de secundă.

În cazul semnalelor nesinusoidale, informația este codificată în întreaga evoluție a lor, nereducîndu-se la trei numere reale (frecvență, amplitudine și fază) ca în cazul celor sinusoidale. Din acest motiv, **este esențială vizualizarea formei lor de undă**. Pentru tensiunile care variază în timp, acest lucru poate fi realizat cu un aparat numit **osciloscop** (prescurtat uneori **scope** în limba engleză). El este, esențialmente, un **voltmetru**, lucru arătat, de altfel, și de rezistența sa de intrare, care are valoarea tipică de 1 MΩ. Afișarea este efectuată de către un punct luminos (**spot**, din limba engleză) care traversează (**baleiază**, din limba franceză) ecranul de la stînga la dreapta, se stinge și apoi se deplasează rapid în stînga ecranului pentru o nouă cursă. Linia luminoasă lăsată de trecerea spotului este numită, uneori, **trasă** (din limba franceză).

Osciloscoapele clasice, **analogice**, nu fac decât să afișeze forma de undă pe un ecran cu dimensiunile laturii de ordinul a 10 cm și precizia de citire nu este mai bună de câteva procente. În schimb, osciloscoapele moderne, **digitale** (eventual cuplate la calculator), memorează valorile consecutive ale semnalului, măsurate cu un voltmetru digital foarte rapid, și permit obținerea de precizii mai bune, sub 0.1 %.

Tensiunea a cărei evoluție trebuie vizualizată este afișată pe verticală (axa Y) și, de aceea, blocul care o prelucrează se numește amplificator Y iar mufa de intrare este notată cu "Y input". Osciloscopul permite vizualizarea tensiunilor foarte mici (chiar de ordinul a 1 mV) iar rezistența sa internă este mare (1 M $\Omega$ ); în această situație el este sensibil la curenți de intrare infimi (1 mV/1M  $\Omega$  = 1 nA). Pentru a preîntâmpina influența perturbatoare a câmpurilor electrice și magnetice generate de rețeaua de alimentare sau de alte aparate electrice, amplificatoarele sale sunt ecranate, iar ecranul este legat, prin cablul tip "shuko", la "nulul de protecție" adică la pământ. Astfel, **masa osciloscoapelor este legată constructiv la pământ**, ceea ce impune o atenție deosebită la conectarea sa în circuite la care sursa de alimentare are și ea o bornă legată la pământ. Acesta este cazul **rețelei de alimentare**, unde firul de "nul" este legat la pământ iar cel de "fază" se află la o tensiune de 220 V<sub>ef</sub> față de pământ.

De la borna de intrare pînă la circuitul care trebuie măsurat, legătura se face cu o **sondă (probe** în limba engleză) care constă într-o bucată de cablu coaxial, care continuă ecranul, și niste elemente mecanice de prindere, așa cum se poate vedea în Fig. 1.21. Intrarea poate fi legată la amplificator **în curent continuu (DC)**, permițînd vizualizarea tuturor frecvențelor între 0 Hz (nivel constant de tensiune) și o frecvență limită (tipic 30 MHz pentru oscilosoapele de joasă și medie frecvență). În acest mod, dacă tensiunea nu evoluează cu o viteză prea mare, **ea apare pe ecran așa cum este în realitate**.

Pentru a ști unde este **linia de zero**, există lînga mufa de intrare un comutator care, prin trecerea lui pe poziția **ground (GND sau GD)**, pune la masă intrarea amplificatorului Y (manevra nu este periculoasă, semnalul de intrare nu este pus la masă ci decuplat de la intrarea amplificatorului). După aceasta, din butonul "Y POSITION" aducem linia într-o poziție convenabilă pe ecran (uzual la mijlocul lui) și nu uităm să trecem din nou comutatorul de la intrare pe poziția **DC**, altfel vom continua să vedem pe ecran doar linia de zero. De exemplu, în Fig. 1.22, linia de zero a fost stabilită la jumătatea ecranului de unde rezultă că tensiunea afișată are numai valori nule sau pozitive.

Scala cu care osciloscopul afișează tensiunea pe axa Y se modifică de la un comutator rotativ; pozițiile sale sunt marcate în V/divizi sau mV/divizi; diviziunea este pătratul de pe ecran, întregul ecran avînd, după tipul osciloscopului, între opt și zece diviziuni. Pe exemplul din figura precedentă, tensiunea maximă corespunde la trei diviziuni.

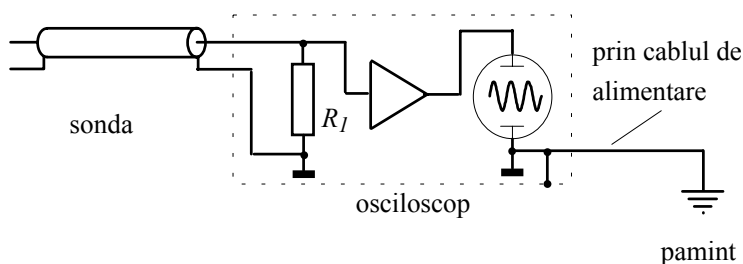


Fig. 1.21. Osciloscopul.

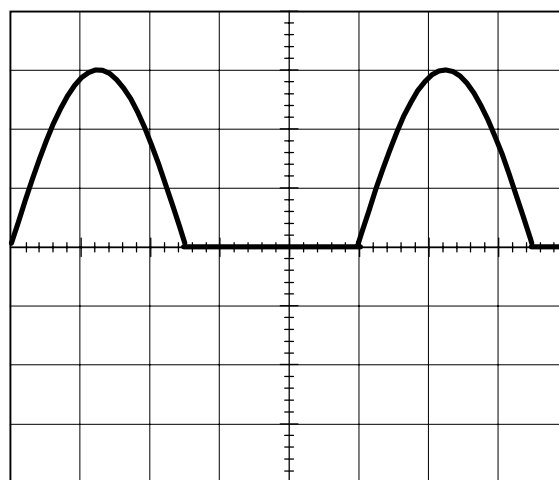


Fig. 1.22. Formă de undă pe ecranul osciloscopului.

Atenție, în afara comutatorului rotativ mai există (pe axul lui) un potențiomtru care reglează continuu sensibilitatea pe Y; dacă acest potențiomtru nu este adus în poziția "calibrat" indicația de sensibilitate de la comutatorul rotativ nu este valabilă. Dacă vrei să și măsoarăți o tensiune, nu numai să vedeți forma de undă, asigurați-vă că acest potențiomtru este în poziția calibrat. Unele osciloscopae vă atrag atenția când amplificatorul nu este calibrat, aprinzând un becul, cele mai multe nu o fac.

Uneori, însă, urmărim vizualizarea **doar a unor mici variații**, care sunt "suprapuse" peste un nivel continuu (ca în Fig. 1.23) și am dori să amplificăm doar aceste variații pentru că, altfel, imaginea nu ar mai încăpea în ecran. Pentru aceasta, osciloscopul are la comutatorul intrării, pe lângă poziția **DC**, și o poziție **AC** care înseamnă cuplarea semnalului în curent alternativ; în această situație între intrare și amplificator este conectat un **condensator** care "blochează" componenta de curent continuu. Aceasta înseamnă că, **indiferent de forma de undă**, semnalul afișat va avea media zero, adică osciloscopul va "trage" întodeuna semnalul pe verticală, astfel încât aria de deasupra liniei de zero ("pozitivă") să fie egală cu cea de sub această linie ("negativă"); dacă tensiunea din Fig. 1.22, având frecvența de 50 Hz, este vizualizată în acest mod, forma afișată pe ecran va fi cea din Fig. 1.24.

Semnalele sinusoidale vor rămâne sinusoidale, dar cele de frecvență mică (sub 10 Hz) vor apărea cu atât mai mici cu cât frecvența lor va fi mai mică. Vestea cea proastă este, însă, aceea că **semnalele care nu sunt sinusoidale vor fi deformate**. De fapt, vor fi deformate acele porțiuni din ele care se încapăținează să evolueze prea lent sau să rămână constante, așa cum se poate vedea în Fig. 1.24. Din acest motiv, la semnalele periodice de frecvență mică, cuplarea în curent alternativ trebuie folosită cu prudență. Întodeuana este bine să vizualizați semnalul **mai întâi** cu un cuplaj în curent continuu.

Aproape toate osciloscopaele au două canale Y (notate, de obicei, cu  $Y_A$  și  $Y_B$ ) care permit vizualizarea simultană a două tensiuni diferite. Cele două canale pot fi afișate separat câte unul, **alternat** (cele două semnale sunt afișate consecutiv la trecerile succesive ale punctului luminos de la stînga la dreapta) sau **choppat** (din **chopped** în limba engleză), când punctul luminos sare înainte și înapoi rapid (0.1- 1 MHz) între cele două curbe pe care le desenează.

Deplasarea punctului luminos pe axa X este controlată de blocul de amplificare X. Pentru a vizualiza evoluția **în timp** a tensiunilor, acest bloc primește un semnal în dinți de fierăstrău care comandă deplasarea punctului luminos cu viteză constantă de la stînga la dreapta și, apoi, întoarcerea rapidă la capătul din stînga.

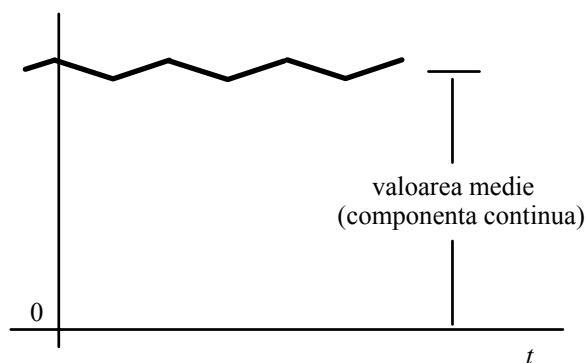


Fig. 1.23. Variații mici "suprapuse" peste o valoare medie.

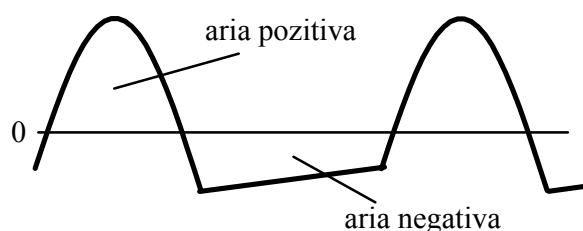
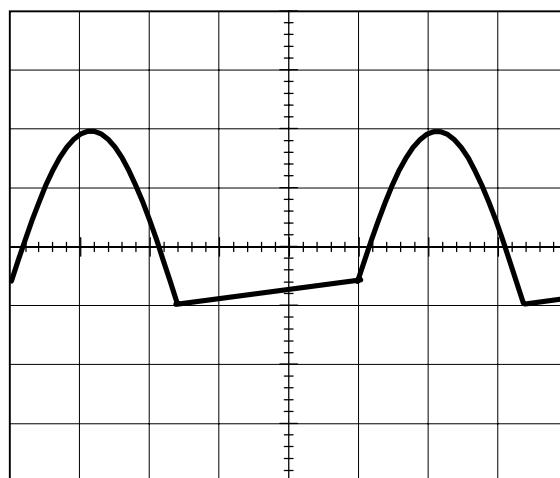


Fig. 1.24. Forma de undă afișată pentru semnalul din Fig. 1.22, cu intrarea osciloscopului cuplată în "curent alternativ".

Blocul care produce semnalul în dinți de fierăstrău se numește **bază de timp**. Viteza de deplasare stabilește scala de timp a axei X, care se poate modifica de la comutatorul rotativ al bazei de timp; pozițiile sale sunt marcate în timp/diviziune. Ca și la amplificatorul pe axa X, și aici **există un potențiomtru care vă poate păcăli: dacă doriți să măsurați intervale de timp, va trebui să-l treceți în poziția "calibrat"**.

Ceea ce vedem pe ecran, la osciloscopia analogică, nu este rezultatul unei singure treceri a punctului luminos ci o mediere a unui mare număr de "desene", fiecare decupînd din semnalul original un segment de aceeași durată (dacă vizualizați, de exemplu, patru perioade ale unui semnal de 1 MHz, aveți peste 200 de mii de "desene" pe secundă). **Figura văzută va fi inteligibilă numai dacă toate desenele mediate** (de inerția ecranului și de inerția ochiului) **vor fi identice**. Nu putem să vizualizăm decît **forme de undă periodice** și, în plus, **fiecare desen trebuie să înceapă exact din același punct al perioadei semnalului**. Cu alte cuvinte, pornirea punctului luminos în cursa lui de traversare a ecranului trebuie **sincronizată** cu semnalul care trebuie vizualizat (trigherată de acest semnal, în jargon). În exemplul din Fig. 1.25 a) au fost reprezentate cinci "desene" efectuate de spot la cinci treceri consecutive. Pentru că aceste desene încep exact din același punct al perioadei semnalului, medierea lor, reprezentată în Fig. 1.25 b) tridimensional, ca și cum ar fi așezate unul sub altul produce o imagine clară, care va fi stabilă pe ecranul osciloscopului.

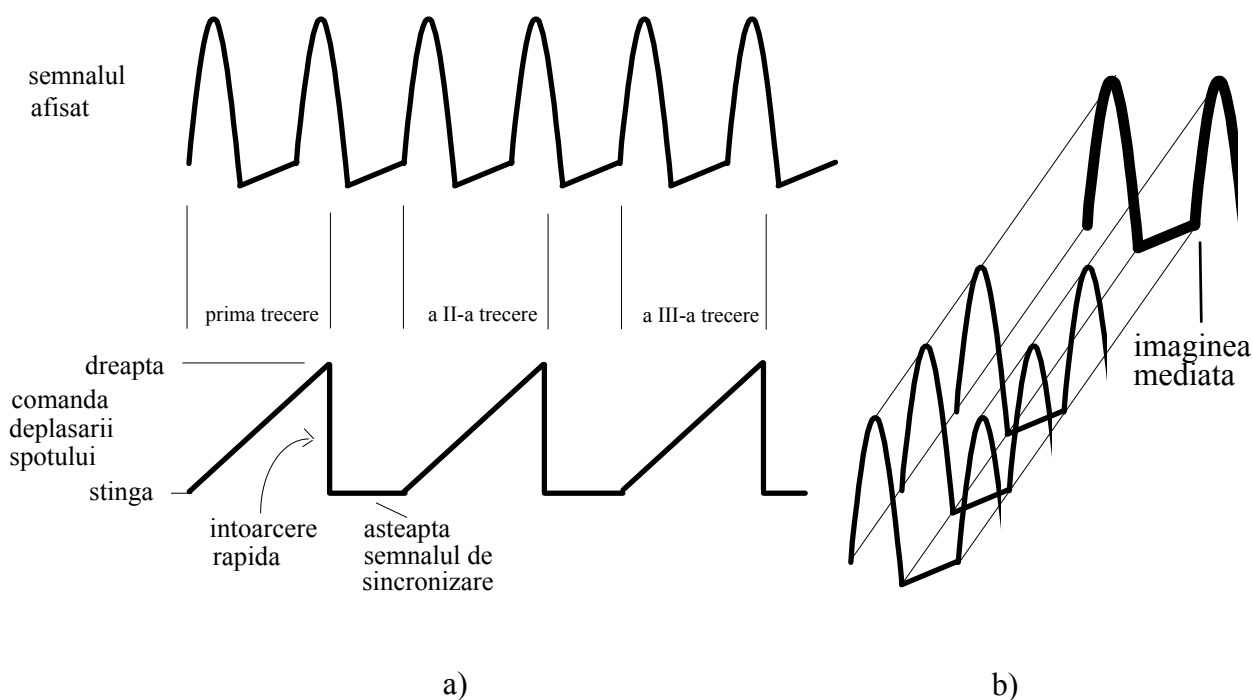


Fig. 1.25. Principiul sincronizării baleierii osciloscopului (a) și medierea traselor diferitelor treceri ale spotului (b).

Sincronizarea se face prin compararea unei copii a semnalului afișat cu un nivel de referință și pornirea baleierii exact în acel moment (dacă spotul a ajuns mai devreme în stînga ecranului, va trebui să aștepte cuminte acest moment). Poziția acestui nivel poate fi modificată de utilizator cu un potențiomtru (în mod de funcționare trigherat) sau este stabilită de osciloscop în modul de lucru automat. Cum trecerea peste nivelul de referință (prag) poate să se facă fie în sus, fie în jos, avem două posibilități de selecție, pe front crescător (up) sau pe front descrescător (down).

*Atenție: la unele osciloscop, pe modul de funcționare trigerat, **dacă semnalul nu traversează nivelul stabilit, baleierea este oprită și spotul este invizibil**; la altele, este utilizat un oscilator nesincronizat și imaginea, chiar dacă este instabilă, este afișată. Acesta poate fi unul dintre motivele pentru care nu găsiți spotul.*

Înainte de a fi utilizată la sincronizare, copia semnalului care trebuie afișată poate fi prelucrată prin îndepărtarea nivelului continuu (sincronizare în curent alternativ) sau prin îndepărtarea unor frecvențe pe care nu dorim să facem sincronizarea (frecvențe joase, **LF - low frequency** sau frecvențe înalte, **HF -high frequency**). Modul de sincronizare descris până acum utilizează chiar semnalul care a fost aplicat canalului Y, este o sincronizare **internă** și, dacă avem două canale Y, va trebui să alegem după care facem sincronizare. Osciloscopul oferă și posibilitatea sincronizării cu un semnal extern, introdus la o mufă specială.

Pentru vizualizarea unor pulsuri care apar neperiodic, au fost produse osciloscop analogice **cu memorie**, la care ecranul poate menține vizibilă urma unei singure treceri a spotului pe durate de timp de ordinul minutelor, pentru a putea fi fotografiată; și în acest caz sincronizarea este esențială, cursa spotului trebuind să înceapă odată cu apariția pulsului de tensiune. Odată cu apariția oscilosoapelor digitale, la care memorarea face parte din principiul de funcționare, memoria analogică ecranului a încetat să mai fie utilizată.

Deși este un voltmetru, osciloscopul poate permite și vizualizarea evoluției intensității unui curent, dacă se utilizează un truc: informația de curent este convertită în informație de tensiune, **trecând curentul pe care dorim să-l vizualizăm printr-o rezistență de valoare cunoscută**. Cum o bornă de intrare este obligatoriu masa circuitului, **rezistența trebuie montată cu un capăt la masă**, ca în Fig. 1.26. Pentru a nu modifica funcționarea inițială a circuitului, valoarea rezistenței trebuie aleasă atât de mică încât **căderea de tensiune pe ea să fie neglijabilă față de tensiunea pe ramura de circuit unde este intercalată**. Deoarece osciloscopul poate vizualiza chiar tensiuni de ordinul 1 mV - 10 mV, aceasta nu constituie o problemă.

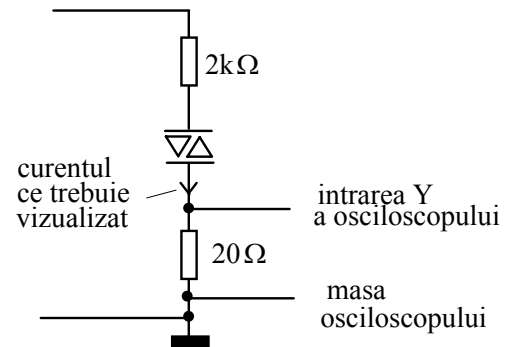


Fig. 1.26. Vizualizarea cu osciloscopul a evoluției unui curent.

## Enunțuri frecvent utilizate

(aflut de frecvent încît merită să le memorați)

- Într-un generator de energie electrică, curentul curge de la borna cu potențial coborît la borna cu potențial ridicat.
- Într-un consumator de energie electrică, curentul curge de la borna cu potențial ridicat la borna cu potențial coborît.
- Suma intensităților curenților care intră într-un nod este egală cu suma intensităților curenților care ies din nodul respectiv (legea curenților); considerînd pozitivi curenții care intră și negativi pe cei care ies, suma lor algebrică este nulă

$$\sum_{nod} I_k = 0.$$

- Pe orice ochi al circuitului, suma algebrică a variațiilor de potențial este nulă (legea tensiunilor)

$$\sum_{ochi} \Delta V = 0.$$

- Potențialul unui nod oarecare poate fi obținut plecînd de la un nod cu potențialul cunoscut și adunînd (algebric) variațiile de potențial (tensiunile) porțiunilor de drum parcurse.
- Rezistoarele respectă legea lui Ohm

$$I = \frac{V_{amonte} - V_{avaj}}{R}.$$

- Potențialul unui nod legat numai prin rezistoare la noduri cu potențialele  $V_1, \dots, V_M$  poate fi exprimat prin teorema Milman

$$V = \frac{\sum_{k=1}^M \frac{V_k}{R_k}}{\sum_{k=1}^M \frac{1}{R_k}}.$$

- Pentru ca intensitatea "citită" să fie pozitivă, curentul trebuie să intre în ampermetru pe la borna marcată cu +.

- Rezistența unui ampermetru clasic este invers proporțională cu valoarea corespunzătoare a capătului de scală; totuși, pe orice scală, la deviația maximă, tensiunea pe aparat are aceeași valoare.

- Rezistența unui voltmetru clasic este direct proporțională cu valoarea corespunzătoare capătului de scală; totuși, pe orice scală, la deviația maximă, curentul prin aparat are aceeași valoare.

- Rezistența unui voltmetru electronic nu depinde de scala pe care se măsoară și are valoare foarte mare (1-10 MΩ).

- Valoarea efectivă (RMS) a unei mărimi care variază periodic este egală cu radicalul din media pătratului ei; numai pentru o mărime care variază sinusoidal valoarea efectivă este *amplitudine* $\sqrt{2}$ .

- Osciloscopul este, în esență, un voltmetru electronic; el permite vizualizarea evoluției în timp a tensiunii.

## Termeni noi

<b>-conductor ideal</b>	(fir) conductor cu rezistență electrică nulă, fără inductanță sau capacitate;
<b>-rezistor ideal</b>	dispozitiv de circuit care respectă exact legea lui Ohm;
<b>-masă (ground)</b>	nod al unui circuit la care potențialul este considerat zero, prin convenție;
<b>-generator (element activ)</b>	element de circuit care, în cazul considerat, convertește o energie neelectrică în energie electrică, transferată circuitului;
<b>- consumator (element pasiv)</b>	element de circuit care, în cazul considerat, convertește energia electrică primită de la circuit în altă formă de energie (de multe ori termică);
<b>-dipol</b>	element de circuit cu două borne de acces;
<b>-regim de curent continuu (DC)</b>	starea unui circuit în care potențialele și curenții nu mai variază în timp;
<b>-caracteristică statică</b>	dependența funcțională curent-tensiune, pentru diferitele regimuri de curent continuu;
<b>-ampermetre (voltmetre) clasice</b>	aparate de măsură cu ac indicator, bazate pe interacția curentului cu un câmp magnetic;
<b>-aparat de măsură analogic</b>	aparat de măsură la care informația este afișată prin deplasarea continuă, proporțională cu valoarea măsurată a unui ac sau altui element indicator (de exemplu, spot luminos);
<b>-multimetru (avohmetru) clasic</b>	aparat de măsură clasic, care permite măsurarea, pe diferite scale de sensibilitate, a tensiunilor, curenților și rezistențelor;
<b>-voltmetru electronic</b>	aparat de măsură, de rezistență foarte mare, bazat pe amplificarea electronică a tensiunii măsurate;
<b>- multimetru digital</b>	aparat de măsură electronic, cu afișaj digital (numeric), care permite măsurarea, pe diferite scale de sensibilitate, a tensiunilor, curenților și rezistențelor;
<b>-regim sinusoidal (AC)</b>	starea unui circuit în care toate potențialele și toți curenții variază sinusoidal în timp, cu diferite amplitudini și faze;
<b>-bază de timp</b>	bloc funcțional al unui osciloscop care comandă baleierea automată a spotului, pentru a afișa evoluția temporală a tensiunii investigate;
<b>-sincronizare (trigerare)</b>	începerea baleierii la un anumit moment, cu poziție fixă în cadrul perioadei semnalului afișat, pentru ca diferitele treceri ale spotului, prin mediere, să conducă la o imagine stabilă;
<b>-cuplaj în curent continuu (DC)</b>	conectare printr-un conductor (ideal) care permite să treacă componentele de orice frecvență, inclusiv componenta de curent continuu;
<b>- cuplaj în curent alternativ (AC)</b>	conectare printr-un condensator care "blochează" componenta continuă (de frecvență nulă) dar permite să treacă toate celelalte frecvențe; semnalele sinusoidale cu frecvența mai mică decât frecvența de tăiere sunt atenuate, cu atât mai mult cu cât frecvența lor e mai mică.



## Probleme rezolvate

**Problema 1.** Pentru un anumit dipol (diodă semiconductoare) trebuie să se traseze experimental caracteristica statică  $I = f(U)$ . Curentul va fi modificat în domeniul 0, ... ,10 mA și se știe că, în aceste condiții, tensiunea pe dispozitiv va fi între zero și 0.8 V. Curentul și tensiunea vor fi măsurate cu multimetre clasice identice, care au marcată pe cea mai sensibilă scală indicația 50  $\mu\text{A}$  / 100 mV. Să se discute, din punctul de vedere al erorii de măsură, cele două configurații posibile, "amonte" și "aval" din Fig. 1.27 și să se decidă care trebuie utilizată.

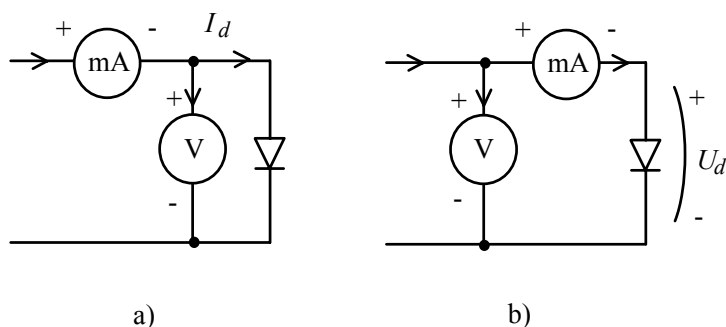


Fig. 1.27. Montarea aparatelor de măsură pentru trasarea caracteristicii statice a unei diode.

### Rezolvare

Este evident că în circuitul din desenul a) miliampermetrul nu măsoară ceea ce dorim noi ci **suma dintre curentul prin diodă și curentul prin voltmetru** pe când în circuitul din desenul b) voltmetrul este cel care se păcălește, indicând **suma dintre tensiunea pe diodă și tensiunea pe miliampermetru**. În care din cele două situații eroarea relativă este mai mică ?

Pentru a răspunde la această întrebare prima tentație ar fi să calculăm rezistențele aparatelor de măsură pe scalele pe care le utilizăm și să le comparăm cu ...., cu ce ? Dioda nu respectă legea lui Ohm și **nu este caracterizată de o rezistență**. Ne amintim însă că, pe orice scală ar fi, pentru o deviație completă, voltmetrul necesită aceeași valoare de curent (rezistențele adiționale i-au fost adăugate **în serie** !). Rezultă că dacă vrem să citim ceva pe cadranul voltmetrului din desenul a) (dacă nu vrem, trecem voltmetrul pe scala de 100 V și acul nu se va mișca practic de la zero), prin el va trebui să treacă un curent ordinul a 50  $\mu\text{A}$  (capătul de scală). Este mult față de curentul prin diodă pe care vrem, de fapt, să-l măsurăm ? Acesta, ne spune textul problemei, va fi între 0 și 10 mA. Chiar dacă dorim să desenăm un grafic excepțional, scala sa verticală va fi tot între zero și 10 mA; eroarea de 50  $\mu\text{A}$  reprezintă 0.5 % din valoarea sa; la un desen de 10 cm veți avea o eroare de 0.5 mm, de grosimea minei de creion cu care desenați graficul.

Să vedem ce se întâmplă în cazul circuitului din desenul b); dacă dorim să citim ceva pe scala miliampermetrului acul trebuie să devieze iar pe miliampermetru să cadă o tensiune de ordinul a 100 mV (exact 100 mV la capătul de scală). Tensiunea pe diodă este însă de cel mult 0.8 V, aceasta înseamnă că la măsurarea făcută la curentul maxim de 10 mA, vom avea o eroare relativă asupra tensiunii de  $0.1 \text{ V} / 0.8 \text{ V}$  adică de 12.5 % !

Concluzia este evidentă: în această situație concretă trebuie să preferăm montajul din desenul a) cu voltmetrul montat "în aval", acesta asigurându-ne o eroare de metodă mai mică de 0.5 % din valoarea capătului de scală al graficului, cu siguranță mai mică chiar decât eroarea de măsură pe care fabricantul o garantează pentru multimetrul (uzual 1 % pentru cele profesionale). Numai dacă vom dori să investigăm comportarea diodei la valori mult mai mici ale curentului, trecând miliampermetrul pe scala corespunzătoare, va trebui să efectuăm **corecția de voltmetru**, scăzând din valoarea indicată de miliampermetru curentul  $U_d / R_v$  prin voltmetru; această corecție va fi sigur  $\leq 50 \mu\text{A}$ .

**Problema 2.** Un circuit electronic este alimentat de la o singură sursă de tensiune continuă, de valoare  $V_{alim}$ , legată cu minusul la masă și în el se stabilește un regim de curent continuu (potențialele și curenții nu variază în timp). Arătați că, **în absența altor generatoare de energie, nici un nod nu poate avea potențialul mai mic decât zero (potențialul masei) sau mai mare decât  $V_{alim}$** .

### Rezolvare

Alegem un nod oarecare A, care este legat de alte  $N$  noduri, cu potențialele  $V_1, \dots, V_N$ , prin elemente de circuit cu două borne (dipoli), așa cum se vede în Fig. 1.28. Presupunem, mai întâi, că potențialul  $V_A$  este mai mare decât cel mai mare dintre potențialele  $V_1, \dots, V_N$ , pe care îl vom numi  $V_{max}$ . Cum toți dipolii sunt **consumatori de energie**, curenții circulă prin ei de la potențial ridicat la potențial coborât, adică **toți curenții ies din nodul A**. Aceasta este o situație imposibilă pentru că încalcă legea I a lui Kirchhoff: suma curenților care ies trebuie să fie egală cu suma curenților care intră. Rezultă, în consecință, că **potențialul nodului A este obligatoriu mai mic decât  $V_{max}$** . (prin condiția ca toți dipolii să fie consumatori de energie am eliminat și posibilitatea ca nodul A să fie scurtcircuitat la nodul cu potențialul  $V_{max}$ ).

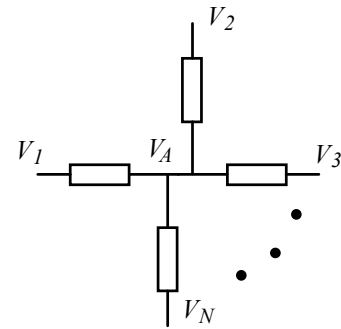


Fig. 1.28.

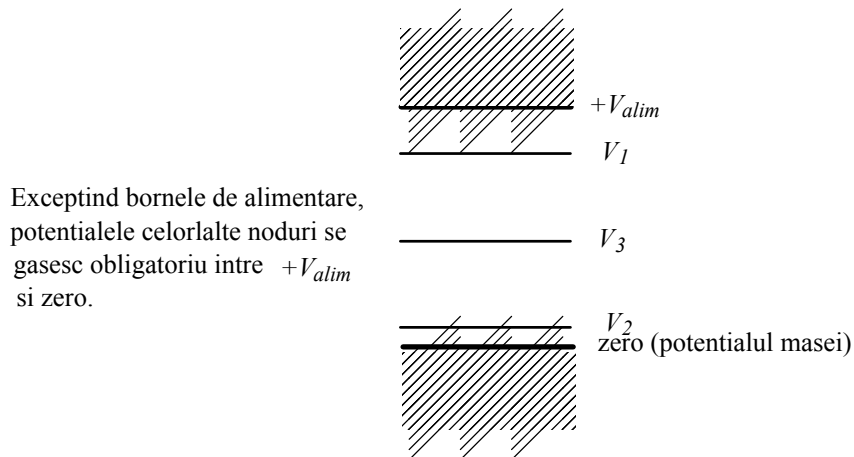


Fig. 1. 29. Diagrama potențialelor într-un circuit alimentat de la o singură sursă de tensiune continuă, conectată cu borna minus la masă.

În mod asemănător, se arată că potențialul nodului A este mai mare decât  $V_{min}$ , cel mai mic dintre potențialele  $V_1, \dots, V_N$ . Avem în circuit două noduri speciale: masa, cu potențialul zero, și linia de alimentare cu potențialul  $V_{alim}$ ; între ele este conectat singurul generator de energie disponibil. Orice alt nod (care nu este scurtcircuitat la masă sau alimentare) este conectat **numai prin consumatoare de energie**. El nu poate avea, conform rezultatului anterior, decât un potențial cuprins în intervalul  $(0; V_{alim})$ , așa cum se poate observa pe diagrama potențialelor din Fig. 1.29.

## Probleme propuse

**P 1.1.** În circuitul din Fig. 1.30, stabiliți, acolo unde se poate, sensurile curenților și polaritățile tensiunilor pe rezistoare. Pentru aceasta, utilizați rezultatul problemei rezolvate de la Cap. 1 și faptul că tranzistorul este un consumator de energie.

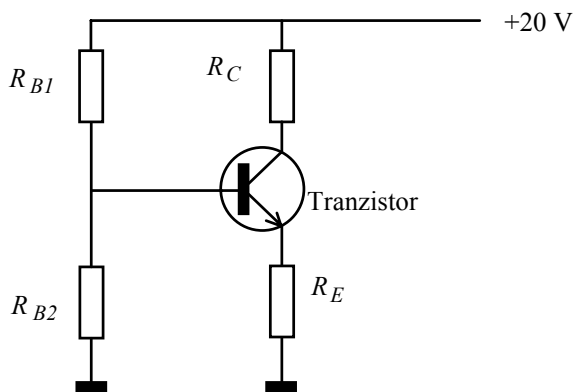


Fig. 1.30

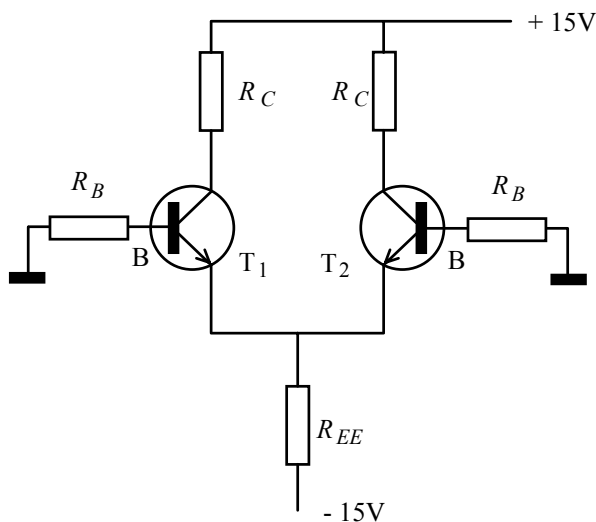


Fig. 1.31

**P 1.2.** Efectuați aceeași operație pentru circuitul din Fig. 1.31.

**P 1.3.** În circuitul din Fig. 1.32 potențialele (de curent continuu) ale nodurilor sunt încadrate în dreptunghiuri, așa cum le veți găsi și în schemele profesioniștilor; tot ca acolo, la valorile rezistențelor s-a omis simbolul  $\Omega$ . Aveți suficiente informații ca să calculați intensitățile tuturor curenților și, în plus, valoarea rezistenței necunoscute. Nu uitați să treceți pe schemă **sensurile** curenților, altfel valorile calculate nu au nici o semnificație.

**P 1.4.** Subcircuitul din Fig. 1.33 este conectat cu exteriorul **doar prin conductoarele numerotate 1...N** și în el se stabilește un regim de curent continuu. Cunoașteți toate potențialele față de masă ale acestor conductoare,  $V_1...V_N$ , precum și intensitățile curenților  $I_1...I_N$ .

a) Calculați puterea electrică totală pe care o primește

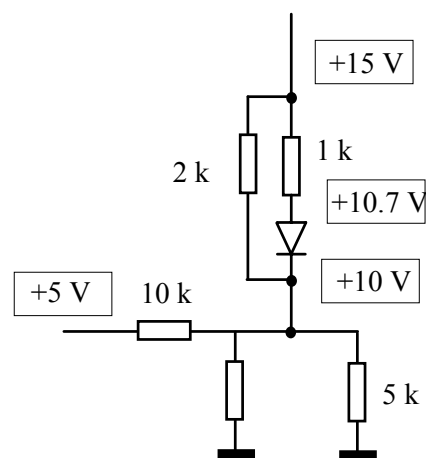


Fig. 1.32.

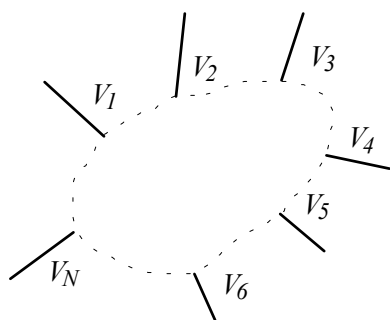


Fig. 1.33.

subcircuitul din exterior, prin curenții  $I_1...I_N$ . Sugestie: separați curenții în două categorii (care intră în subcircuit și care ies din subcircuit) și gândiți-vă că sarcinile electrice au o anumită energie potențială într-un câmp electrostatic.

b) Reformulați expresia puterii primite de subcircuit considerând intensitățile mărimi algebrice, pozitive când curentul intră în subcircuit.

c) Verificați că expresia pe care ați găsit-o produce aceeași valoare a puterii primite și dacă măsurați potențialele față de alt punct de referință.

**P 1.5.** Expresia pe care ați găsit-o la problema precedentă reprezintă puterea primită de subcircuit sau puterea totală disipată de componentele subcircuitului? Când sunt egale aceste puteri? Verificați pe cazul particular al unui subcircuit constituit dintr-un rezistor legat în serie cu o sursă ideală de tensiune.

**P 1.6.** Calculați puterea disipată de tranzistorul din Fig. 1.34, utilizând expresia dedusă la problema P 1.4 (tranzistorul nu conține generatoare de energie electrică). Nu uitați de legea I a lui Kirchhoff.

**P 1.7.** Utilizați teorema Milman pentru calcularea potențialului produs de **divizorul rezistiv**, prezentat în Fig. 1.35, în punctul A.

**P 1.8.** Demonstrați teorema Milman folosind **teorema superpoziției**, valabilă pentru **circuite liniare**:

-alegeți un nod oarecare " $k$ " din cele  $1..N$  noduri adiacente și considerați că potențialele tuturor celorlalte noduri adiacente sunt nule (acele noduri sunt legate la masă);

-redesenați circuitul calculând rezistența echivalentă a grupării serie și descoperiți un divizor rezistiv;

-calculați potențialul nodului în această situație

- considerați că ați aplicat acest procedeu de  $N$  ori, pentru fiecare nod adiacent, și

**adunați** rezultatele individuale.

**P 1.9.** Dacă aveți **două surse de tensiune** și doriți ca potențialul unui punct să fie proporțional cu **suma celor două tensiuni ale surselor**, cel mai simplu este să le conectați **în serie** (Fig. 1.36 a). De multe ori trebuie să rezolvăm această problemă în electronică (sumarea a două tensiuni) dar sursele care le produc **nu pot fi legate în serie** deoarece **ambele au câte o bornă legată la masă**, ca în desenul b al figurii (în jargon se spune că nu sunt **flotante**).

Imaginați-vă un circuit la care potențialul unui nod să fie proporțional cu suma celor două tensiuni.

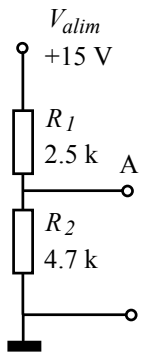


Fig. 1.35.

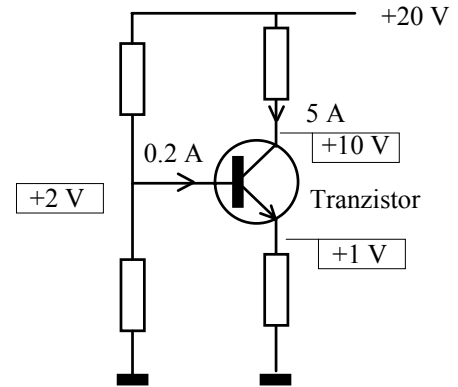


Fig. 1.34.

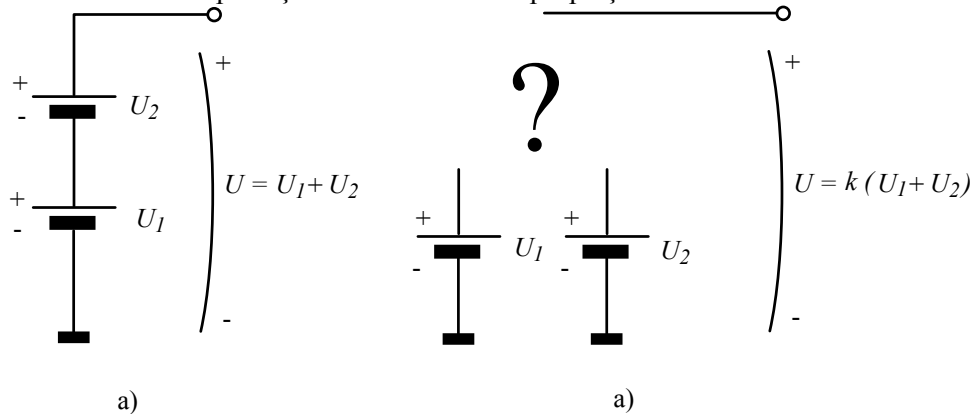


Fig. 1.36.

**P 1.10.** În circuitul din Fig. 1.37 aveți două surse de tensiune: una de tensiune continuă  $U_1 = \text{consta}$  și una de tensiune sinusoidală  $U_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t)$ , condensatorul  $C$  avînd la frecvența  $\omega$  o reactanță neglijabilă față de rezistența  $R$  (se comportă ca un **scurtcircuit** la această frecvență). Calculați potențialul nodului A. Indicație: utilizați teorema superpoziției, anulînd pe rînd cîte una dintre tensiunile surselor, și calculați potențialul cu teorema Milman.

*Observație:* Merită să rețineți rezultatul acestei probleme deoarece **în acest mod este aplicat semnalul care trebuie amplificat (tensiunea variabilă) la majoritatea amplificatoarelor utilizate în electronică.**

**P 1.11.** Determinați potențialul nodului B din Fig. 1.38 (baza tranzistorului) considerînd neglijabil curentul bazei (amintiți-vă teorema Milman). Apoi recalculați același potențial pentru un curent de bază de  $50 \mu\text{A}$ . Comparați rezultatele și decideți dacă prima aproximație era rezonabilă.

**P 1.12.** În problema precedentă ați investigat precizia aproximației  $I_B \cong 0$  prin comparația valorilor potențialului bazei, calculat cu și fără această aproximație. Ați putea decide dacă este bună aproximația **fără să calculați potențialul bazei**? Gîndiți-vă că un curent nu poate fi comparat decît cu un alt curent. Cu care ?

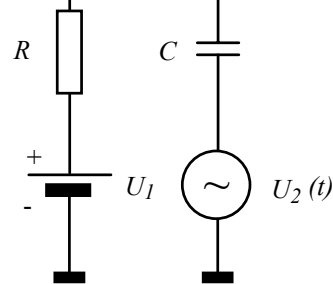


Fig. 1.37.

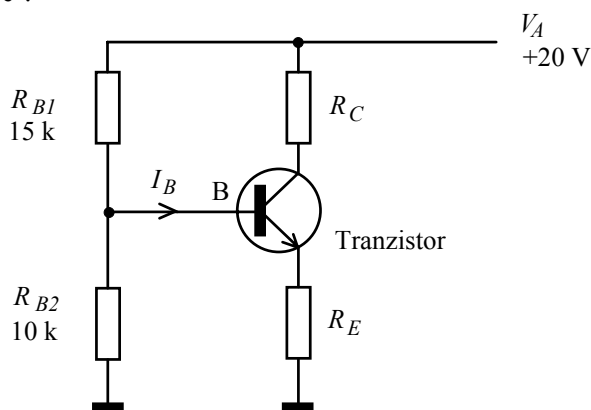


Fig. 1.38.

**P 1.13.** Comutatorul unui multimetru clasic este pe poziția 0.3 V DC (curent continuu) iar cea mai sensibilă scală a sa poartă inscripția  $50 \mu\text{A} / 30 \text{ mV}$ . Cînd acul are poziția din Fig. 1.39

- care este tensiunea la bornele voltmetrului ?
- estimați curentul prin voltmetru;
- cît este rezistența voltmetrului pe această scală ?

**P 1.14.** Forma de undă a unei tensiuni, așa cum apare ea pe ecranul unui osciloscop, este cea din Fig. 1.40. Comutatoarele osciloscopului sunt pe pozițiile 0.2 V/div și 5 ms/div iar linia de zero a fost reglată în prealabil să coincidă cu axa orizontală de la mijlocul ecranului. Determinați:

- valoarea vîrf la vîrf a tensiunii;
- amplitudinea ei (valoarea de vîrf);
- perioada semnalului;
- frecvența sa.

În final, arătați dacă **valoarea efectivă** este, în acest caz,  $\text{amplitudinea} / \sqrt{2}$ .

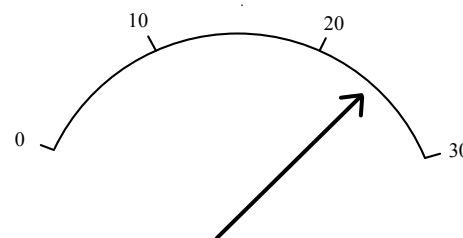


Fig. 1.39.

**P 1.15.** Intensitatea unui curent electric este o funcție periodică și are forma de undă din Fig. 1.41. Valoarea perioadei  $T$  este fixă dar se poate modifica raportul  $\delta = T_1/T$ , numit **factor de umplere (duty cycle)**.

a) calculați, în funcție de valoarea de vîrf  $I_m$  și factorul de umplere, **valoarea medie a curentului**  $I_{med}$ .

b) calculați, în funcție de aceleași variabile, **valoarea efectivă a curentului**.

c) acum încercați ceva mai complicat: modificați valoarea factorului de umplere menținînd constantă valoarea medie a curentului și calculați cum depinde intensitatea efectivă de factorul de umplere.

Ultimul punct al problemei se referă la un caz întâlnit în practică la redresoarele alimentare:

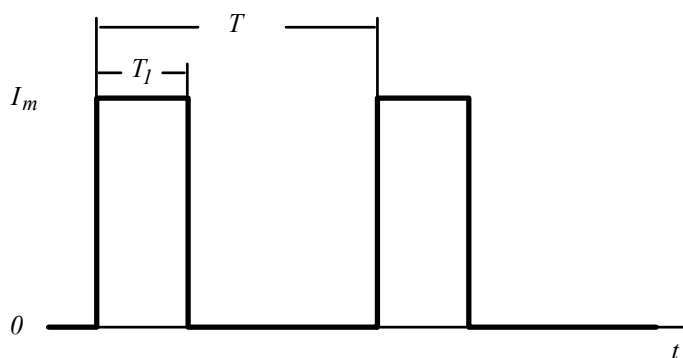


Fig. 1.41.

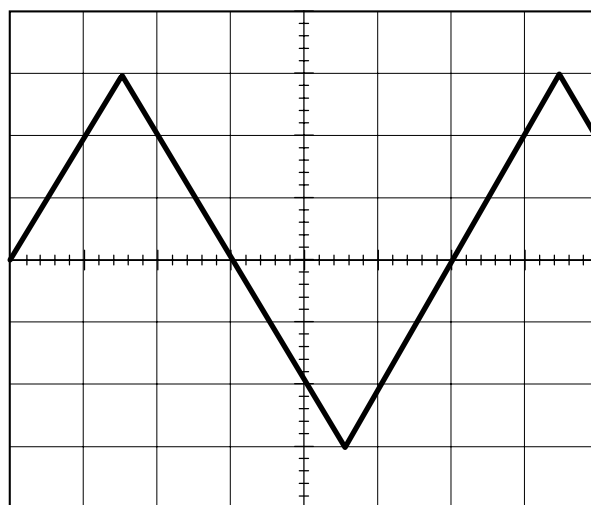


Fig. 1.40.

curentul mediu este constant (cel necesar consumatorului) dar este "extras" din secundarul transformatorului în pulsuri mai scurte sau mai lungi, dar care se repetă cu o frecvență fixă, dictată de frecvența rețelei.

## Lucrare experimentală

Scopul acestor experimente este familiarizarea dumneavoastră cu modul de utilizare a aparatelor de măsură pe care le veți folosi sistematic în experimentele ulterioare. Din acest motiv, trebuie să citiți cu atenție, **înainte de a vă prezenta în laborator**, descrierea **principiului lor de funcționare**, prezentată în paginile anterioare, să înțelegeți **problemele rezolvate** și să rezolvați cu forțe proprii **problemele propuse**. Altfel, orele petrecute în laborator vor fi ore pierdute în care răsuciți niște butoane și scrieți niște numere a căror semnificație vă scapă. Ca în gluma cu milițienii care învățau tabla înmulțirii cîntînd, veți rămîne, în cel mai bun caz, cu amintirea unei melodii.

**Acest mod de pregătire prealabilă a experimentelor din laborator este valabil pentru toate temele pe care le vom aborda în acest manual și el va trebui să devină o obișnuință. Profesorii cu care veți efectua lucrările practice vă vor ajuta în acest sens, acceptînd-vă în laborator numai dacă v-ați pregătit corespunzător.**

### Experimentul 1. Măsurarea schimbului de putere electrică între două subcircuite (în curent continuu).

Va trebui să alimentați planșeta de la o sursă de alimentare cu tensiune continuă. Această sursă are o mulțime de borne, comutatoare, potențiometre și instrumente indicatoare. Scrieți pe caiet tipul ei și desenați panoul frontal cu toate elementele de control și afișare. Întrebați, apoi, profesorul despre funcția fiecărui element și treceți aceste informații pe caiet; veți avea nevoie de ele la toate experimentele viitoare. În plus, trebuie să știți că informațiile de acest tip sunt nelipsite din orice manual de utilizare a unui aparat.

Alimentați acum planșeta, cu o tensiune între 10 și 12 V, **respectînd polaritatea indicată pe planșetă**. Circuitul de pe planșetă constă din două subcircuite (blocuri) conectate între ele cu două conductoare ca în Fig. 1.42; unul dintre ele conține și sursa de alimentare pe care ați conectat-o. Cele două noduri ale conductoarelor au fost notate cu A și B; unul din conductoare este legat fix, celălalt trebuie să-l conectați dumneavoastră, între două bornele A' și A". Desenați-vă pe caiet schema din figura anterioară.

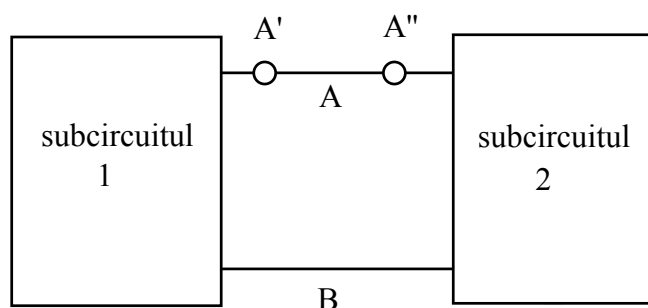


Fig. 1.42.

Aparatul de măsură pe care îl veți folosi este un multimetru clasic (analogic), care poate fi utilizat atât ca voltmetru cît și ca ampermetru; nu ne vom pune, deocamdată, problema modului în care el perturbă starea circuitului care trebuie investigat, lăsînd acest lucru pentru experimentul următor.

Determinați, mai întîi, **polaritatea tensiunii** dintre nodurile A și B. Pentru a nu deteriora voltmetrul în cazul în care îl conectați invers și acul se deplasează spre stînga, alegeți la început o scală puțin sensibilă, să zicem 100 V. Conectați voltmetrul cu polaritatea la îndeplinire, observați sensul deviației acului și **stabiliți polaritatea tensiunii**. Notați acest lucru pe schema desenată pe caiet, punînd semnele + și -.

Conectați acum voltmetrul cu polaritatea corectă. Măriți sensibilitatea trecînd pe scale cu valori de capăt de scală mai mici, pînă cînd poziția acului poate fi citită comod. Dacă măriți prea mult sensibilitatea voltmetrului, acul va ieși din scală în partea dreaptă și aparatul se va deteriora. Notați-vă **pe schemă** valoarea tensiunii măsurate.

Trebuie acum să aflăm **sensul și valoarea curentului** care circulă între cele două blocuri prin conductorul A. Pentru aceasta deconectăm aparatul de măsură de la circuit (fiind conectat ca voltmetru, deci

în paralel, deconectarea lui **nu afectează funcționarea circuitului**. Apoi îl trecem pe funcția de ampermetru, curent continuu, alegînd o scală puțin sensibilă (1 A capăt de scală). Pentru conectarea lui în circuit va trebui **să întrerupem circuitul** între bornele A' și A'', și să intercalăm acolo ampermetrul. Desenați-vă pe caiet schema modificată, cu ampermetrul conectat. Dacă ați nimerit polaritatea corectă acul va devia spre dreapta, dacă nu, va trebui să inversați legăturile la ampermetru. După ce l-ați legat corect, treceți pe simbolul său din schema pe care tocmai ați desenat-o polaritățile bornelor. Din această informație, deduceți **sensul curentului** și desenați **săgeata** corespunzătoare pe schemă. În sfîrșit, alegeți o scală adecvată pentru a măsura valoarea intensității și notați-vă valoarea obținută **pe schemă**. **Nu uitați niciodată unitatea de măsură, fără ea rezultatul nu are nici o semnificație**; utilizați **obligatoriu submultipli** ( $\mu\text{A}$  sau  $\text{mA}$ ) în locul notației exponențiale ( $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ A}$ ) sau a unora de genul  $0.015 \text{ A}$  sau  $1200 \mu\text{A}$ . Cei care chiar lucrează electronică nu măsoară niciodată în  $10^{-4}$  sau  $10^5$  ci în pico, micro, mili, kilo, mega și giga (după care urmează ohm, amper, watt sau volt).

Aveți acum informațiile necesare pentru a decide care bloc furnizează energie electrică și care bloc primește energie electrică. Scrieți această concluzie pe caiet. Calculați valoarea puterii electrice care este schimbată între cele două blocuri. Atenție la **rezultatul calculului**, el **nu trebuie să aibă mai multe cifre semnificative decît valorile care au fost introduse în formulă**.

*Cifrele semnificative se numără începînd cu prima cifră diferită de zero: 0.0120 are trei cifre semnificative, ca și 34.5. Numărul lor determină precizia relativă cu care este dat rezultatul, de exemplu cu trei cifre semnificative nu puteți avea o precizie mai bună de  $1/999 \approx 0.1\%$  dar nici mai proastă de  $1/100 = 1\%$ .*

## Experimentul 2. Efectul rezistenței interne a voltmetrului

Vom investiga, în acest experiment, modul în care un voltmetru perturbă starea circuitului în care este conectat. Pentru aceasta, alimentați, mai întîi, planșeta la o tensiune continuă cu valoarea undeva între 8 și 10 V. Apoi vom conecta pe circuitul din Fig. 1.43, pe care îl găsiți realizat pe planșetă, un voltmetru electronic, astfel încît să măsurăm tensiunea pe rezistența  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ . Cum voltmetrul electronic are o rezistență internă de cel puțin  $5 \text{ M}\Omega$  (de 50 de ori mai mare decît valoarea lui  $R_2$ ), putem considera că el nu perturbă starea circuitului.

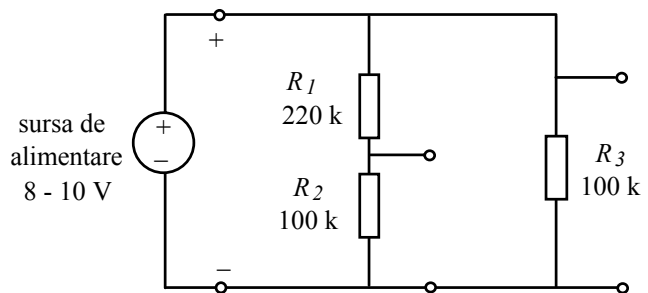


Fig. 1.43.

*Dacă sunteți foarte pretențioși, puteți spune că valoarea tensiunii măsurate nu este mai mică decît cea existentă înainte de conectarea voltmetrului cu mai mult de  $1/50 = 2\%$ .*

Citiți valoarea tensiunii și notați-o pe caiet. Alegeți, apoi, pentru voltmetrul analogic (cu care ați efectuat experimentul precedent) o scală adecvată pentru măsurarea acestei tensiuni și **calculați valoarea rezistenței sale** pe **această scală**. Utilizați fie inscripțiile de pe cea mai sensibilă scală a sa (curent și tensiune), fie constanta aparatului (în  $\text{k}\Omega$  pe volt capăt de scală) care trebuie, de asemenea, să fie inscripționată pe aparat. Estimați, acum, cît de mult va modifica tensiunea voltmetrul analogic cînd îl vom conecta la bornele rezistenței  $R_2$ . Și după ce ați estimat și ați trecut rezultatul estimării pe caiet, legați



voltmetrul analogic în circuit, fără să-l deconectați pe cel electronic. Notați-vă cu cât a scăzut indicația **voltmetrului electronic** din cauza conectării celui analogic. Corespunde cu estimarea dumneavoastră ?

Aveți acum două voltmetre care măsoară **exact aceeași tensiune**. Citiți și indicația celui analogic. Care dintre ele vă oferă o informație cu precizie mai bună ? Formulați concluzia în scris.

Vom repeta acum experimentul, măsurînd tensiunea pe rezistența  $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ , **de aceeași valoare** cu rezistența pe care am măsurat anterior tensiunea. Ce observați la conectarea voltmetrului analogic ? Încercați să găsiți o explicație; dacă nu reușiți, întrebați profesorul. În orice caz, nu uitați s-o treceți pe caiet.

### Experimentul 3. Măsurarea tensiunilor periodice

Vom măsura acum tensiuni periodice, sinusoidale și nesinusoidale, încercînd să utilizăm voltmetrul clasic (analogic), voltmetrul electronic și osciloscopul.

Începem cu o tensiune sinusoidală. Alimentați planșeta introducînd ștecherul în priza; pe planșetă (Fig. 1.44) există un transformator care oferă între bornele A și B o tensiune sinusoidală cu valoarea sub 50 V, deci nepericuloasă. Treceți multimetrul clasic pe funcția de tensiuni sinusoidale (**AC**) și scala de 100 V și determinați valoarea acestei tensiuni. Amintiți-vă că, pentru tensiuni sinusoidale, aparatele indică **valoarea efectivă**; arătați acest lucru utilizînd unitatea de măsură  $V_{ef}$ . Măsurați acum aceeași tensiune cu voltmetrul electronic și convingeți-vă că și el afișează tot valoarea efectivă.

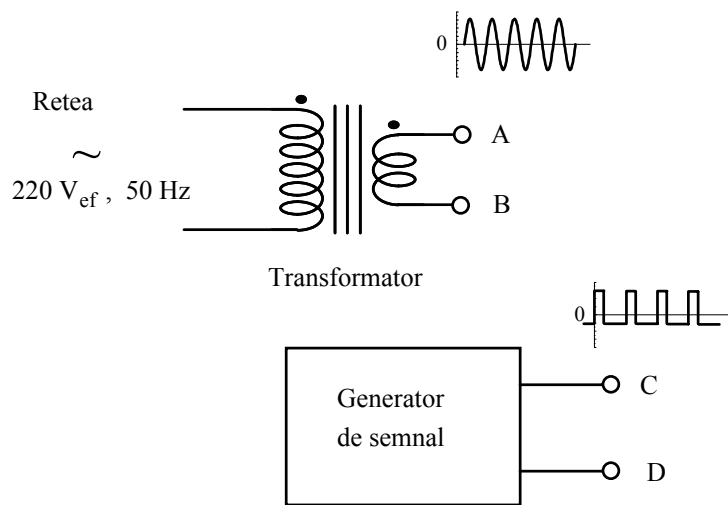


Fig. 1.44.

Vom măsura acum tensiunea între bornele A și B cu osciloscopul (secundarul transformatorului, fiind izolat față de primar, este flotant față de pământ și, deci, puteți conecta masa osciloscopului la oricare din borne). Porniți aparatul, treceți amplificatorul Y pe o poziție puțin sensibilă (de exemplu, 1 V pe diviziune) sincronizarea pe modul automat și din potențiometrul "Y position" încercați să aduceți trasa pe ecran. Stabiliți linia de zero la mijlocul ecranului și **verificați funcționarea canalului Y**, atingînd cu degetul firul central al sondei (**firul cald**, în jargon). Pe ecran va trebui să apară o formă de undă aproximativ sinusoidală cu frecvența de 50 Hz.

*Ați devenit, astfel, cel mai ieftin generator de semnal, generator cu care puteți verifica osciloscopul (inclusiv continuitatea firului cald). Explicația stă în faptul că, fiind conductor împreună cu corpul dumneavoastră formează armătura unui condensator, cealaltă armătură fiind firul de "fază" al rețelei; deși capacitatea acestuia este mică (cel mult câțiva pF), curentul ( $220 V_{ef}/reacta$ ) este suficient pentru a produce deflexia spotului, deoarece rezistența de intrare a amplificatorului Y este foarte mare. Același lucru se întâmplă și dacă atingeți intrarea unui voltmetru electronic; numai că atunci, în loc să vedeți o sinusoidă care va aduce aminte de cauza ei, veți vedea niște numere care pot să vă provoace confuzie. **Din acest motiv, firul cald este ecranat în interiorul sondei iar capătul său neecranat este foarte scurt.***

Conectați intrarea Y la bornele A și B și găsiți pozițiile optime ale comutatoarelor de sensibilitate și bază de timp, astfel încît să aveți pe ecran imaginea a 2-3 perioade. Dacă nu reușiți, nu dezarmați imediat,

osciloscopul este un aparat complex și obișnuința de a lucra cu el se capătă în timp. În cazul în care impulsul se prelungește, cereți ajutorul profesorului și încercați să rețineți modul în care procedează el.

După ce ați obținut o imagine stabilă, încercați să măsurați **valoarea vîrf la vîrf**; asigurați-vă, mai întâi, că potențiometrul este pe poziția "calibrat". Notați-vă valoarea măsurată, în unități  $V_{VV}$ . De aici calculați valoarea de vîrf (amplitudinea) și, apoi, prin împărțire la  $\sqrt{2}$ , valoarea efectivă. Comparați-o cu valoarea obținută cu ajutorul voltmetrelor.

Vom pune voltmetrele, în ceea ce urmează, la o încercare mai dură, încercînd să măsurăm o tensiune care este periodică dar **nu este sinusoidală**. Aceasta este una aproximativ dreptunghiulară, de medie nulă; este produsă de un **generator de semnal** care este construit pe planșetă și alimentat din secundarul transformatorului. Tensiunea furnizată de acesta este disponibilă între bornele C și D. Mai întâi vizualizați-o cu osciloscopul și desenați-vă pe caiet forma ei (o idee bună este să faceți mai întâi un carioaj similar cu acela al ecranului). Apoi măsurați valoarea vîrf la vîrf, valoarea vîrfului negativ și valoarea vîrfului pozitiv (verificați în prealabil poziția liniei de zero). Din forma ei și valorile măsurate, calculați valoarea efectivă ca radical din media pătratului. Cum forma este una dreptunghiulară, media se face ușor.

Acum să "măsurăm" aceeași tensiune (repetăm, de medie zero, deci fără componentă continuă) cu voltmetrul clasic, pe poziția AC (curent alternativ). Este valoarea pe care o afișează voltmetrul clasic **tensiunea efectivă**, așa cum se întîmplă în cazul tensiunii sinusoidale ? Sau poate este valoarea vîrfului pozitiv ? Sau a vîrfului negativ ? Sau a valorii vîrf la vîrf ?

Dezamăgiți de voltmetrul clasic, ne punem speranțele în cel electronic. Este indicația lui egală cu a celui clasic ? Este indicația lui egală cu tensiunea efectivă, valoarea vîrfului pozitiv, a vîrfului negativ sau a valorii vîrf la vîrf ? Formulați o concluzie, notați-o pe caiet și discutați-o cu profesorul. S-ar putea ca el să vă lămurească cum au ajuns voltmetrele la valorile pe care le afișează.

#### Experimentul 4. Adunarea unei tensiuni periodice cu o tensiune continuă

Rezolvînd problema P 1.10, ați aflat cum putem aduna peste un nivel de tensiune continuă o tensiune alternativă sinusoidală. Același principiu îl putem aplica pentru o tensiune variabilă **nesinusoidală** dacă variază suficient de rapid (chiar și cea mai mică frecvență din spectrul său trebuie să "vadă" condensatorul ca un scurtcircuit. Pe planșetă aveți realizată o sursă de tensiune continuă a cărei valoare o puteți regla de la un potențiometru. Tensiunea produsă de ea este adunată cu tensiunea periodică dreptunghiulară pe care tocmai ați studiat-o, ca în Fig. 1.45: sursa de tensiune continuă este legată prin rezistența  $R$  iar sursa de tensiune variabilă prin condensatorul  $C$ . Mai apare în plus rezistența  $R_s$  care reprezintă "consumatorul" sau **sarcina** (**load** în limba engleză), care beneficiază de suma celor două tensiuni.

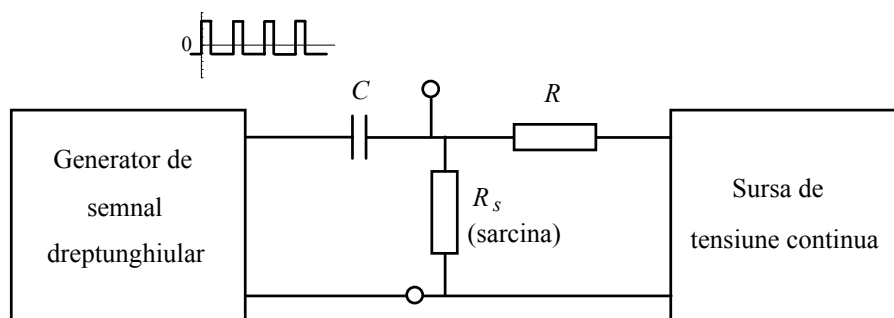


Fig. 1.45.

Verificați dacă intrarea Y a osciloscopului este cuplată în **curent continuu (DC)** și vizualizați, pe rînd, tensiunile celor două surse, desenîndu-vă pe caiet formele de undă. Conectați apoi sonda la rezistența de

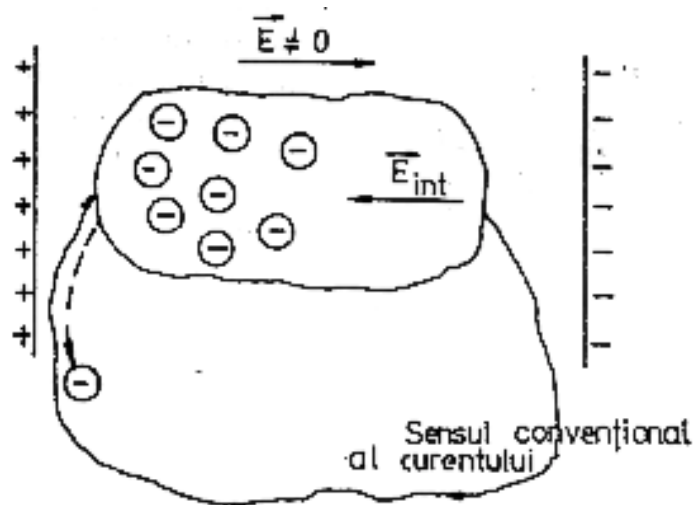
sarcină și verificați că acolo tensiunea este suma tensiunilor celor două surse. Modificați apoi poziția potențiometrului sursei de tensiune continuă și observați ce se întâmplă.

Ce s-ar fi întâmplat dacă am fi lăsat, din greșeală, intrarea Y a osciloscopului cuplată în "curent alternativ" (AC) ? Treceți comutatorul pe această poziție și observați modificarea formei de undă la modificarea valorii sursei de tensiune continuă. Formulați, în scris, o concluzie.

## Pagină distractivă

Deși în câteva cărți excelente traduse în limba română<sup>2,3</sup> generatorul electric este prezentat într-o manieră corectă și foarte intuitivă, în majoritatea manualelor de liceu sau universitare apărute la noi elementul central în descrierea funcționării acestui dispozitiv continuă să fie "**cîmpul imprimat** (de accelerație, galvanic, termoelectric, fotovoltaic)"<sup>4</sup>. Am putea să ne întrebăm cam ce este cîmpul imprimat fotovoltaic, dar nu o facem. Deși cîmpul imprimat este un concept corect pentru anumite tipuri de generatoare, utilizarea sa fără discernămint poate conduce la confuzii, mai ales cînd se introduce "tensiunea electromotoare", deoarece **acest cîmp nu derivă dintr-un potențial (nu este conservativ)**. Din acest motiv, "tensiunea electromotoare" nu este o tensiune între două puncte (o diferență de potențial) ci depinde de drumul particular parcurs.

Această formalizare excesivă poate ameți chiar autori cu pretenții, care în efortul lor de a ne explica cum funcționează un generator electric, scriu lucruri absolut năzdrăvane, ca în "Compendiu de Fizică", Ed. Științifică și Enciclopedică, 1988. Astfel, putem citi acolo că "... pe circuitul volum cu sarcini-conductor exterior se stabilește un curent electric continuu....Pentru a-l menține avem nevoie, în primul rînd, de un rezervor de sarcină, iar în al doilea rînd, de un cîmp electric aplicat din exterior." De ce fel de cîmp electric aplicat din exterior (adică de unul care să aibă nenulă integrala de drum pe conturul închis al circuitului) nu ni se spune. Ni se oferă, însă, desenul edificator prezentat mai jos. **Cîmpul exterior (imprimat) este produs cu un condensator încărcat !** Toți ar trebui să știm că un asemenea cîmp este conservativ.



h1  
Fig. III.2.2.

Un așa generator ne-am dori fiecare. Din păcate există un mic impediment: legea conservării energiei.

<sup>2</sup>Edward M. Purcell, "Electricitate și magnetism, Cursul de fizică Berkeley, vol. II", Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982.

<sup>3</sup>F.W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young, "Fizică", Ed. Didactică și Pedagogică, 1983.

<sup>4</sup>Fizică, Manual pentru clasa a X-a, Ed. Niculescu, 2000, Aprobare de Ministerul Educației Naționale.