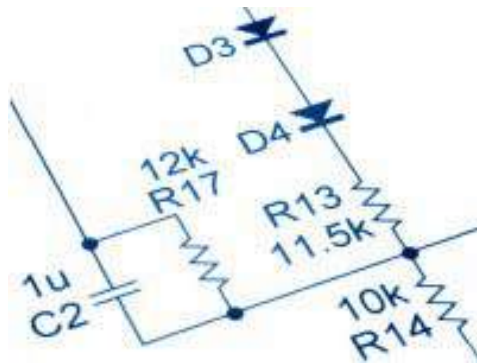


Tony R. Kuphaldt

# Introducere în circuite electrice și electronice

---

## Vol. 3 – Electronică analogică



V 2.0

## Prefață

Cartea de față reprezintă varianta românească a volumului de „Electronică analogică”, al treilea din seria lucrărilor „Lessons in Electric Circuits” scrise de Tony R. Kuphaldt sub licența „DESIGN SCIENCE LICENSE”.

Prezenta versiune se distribuie **gratuit** prin intermediul site-ului oficial. Ultimele noutăți și varianta online se găsesc la adresa [www.circuiteelectrice.ro](http://www.circuiteelectrice.ro). Orice comentarii sau sugestii de îmbunătățire sunt binevenite și pot fi trimise pe adresa [contact@circuiteelectrice.ro](mailto:contact@circuiteelectrice.ro). Puteți utiliza conținutul de față în orice scop doriți respectând condițiile impuse de licența DSL, în principal, menționarea sursei originale.

**Atenție**, pe tot parcursul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, și anume, dinspre borna negativă (-) spre borna pozitivă (+) !

### Modificări față de versiunea precedentă

Au fost adăugate următoarele capitole și subcapitole:

05 – Dispozitive multijoncțiune (integral)

# CUPRINS

<b>01 - INTRODUCERE .....</b>	<b>2</b>
1. CIRCUITE ELECTRICE ȘI CIRCUITE ELECTRONICE .....	2
2. ELEMENTE ACTIVE ȘI ELEMENTE PASIVE .....	3
3. AMPLIFICATORUL .....	4
4. FACTORUL DE AMPLIFICARE .....	6
5. DECIBELUL .....	8
<b>02 - FIZICA DISPOZITIVELOR SEMICONDUCTOARE.....</b>	<b>10</b>
01. FIZICA CUANTICĂ.....	10
02. VALENȚA ȘI STRUCTURA CRISTALINĂ.....	20
03. BENZI DE ENERGIE .....	22
04. ELECTRONI ȘI GOLURI .....	25
05. JONȚIUNEA P-N .....	28
06. DIODA .....	31
07. TRANZISTORUL BIPOLAR CU JONȚIUNE (BJT) .....	33
08. TRANZISTORUL CU EFECT DE CÂMP (FET).....	38
09. TRANZISTORUL CU EFECT DE CÂMP CU POARTĂ IZOLATĂ (MOSFET) .....	42
10. TIRISTORUL .....	44
<b>03 - DIODA ȘI REDRESORUL.....</b>	<b>46</b>
1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL DIODEI .....	46
2. VERIFICAREA DIODEI CU OHMMETRUL .....	51
3. PARAMETRII CARACTERISTICI AI DIODEI .....	52
4. CIRCUITE REDRESOARE .....	54
5. DIODA ZENER - PRINCIPII ȘI APLICAȚII .....	60
<b>04 - TRANZISTORUL.....</b>	<b>68</b>
01. TRANZISTORUL - INTRODUCERE .....	68
02. TRANZISTORULUI CA ȘI ÎNTRERUPĂTOR .....	69
03. VERIFICAREA TRANZISTORULUI CU OHMMETRUL .....	72
04. ZONA ACTIVĂ DE FUNCȚIONARE A TRANZISTORULUI .....	74
05. PUNCTUL STATIC DE FUNCȚIONARE AL TRANZISTORULUI .....	79
06. CONEXIUNEA EMITOR COMUN .....	83
07. CONEXIUNEA COLECTOR COMUN .....	91
08. CONEXIUNEA BAZĂ COMUNĂ .....	97
09. AMPLIFICATOARE CLASA A, B, AB, C ȘI D .....	101
10. METODE DE POLARIZARE ALE TRANZISTORULUI.....	105
11. CUPLAJUL DE INTRARE ȘI DE IEȘIRE .....	109
12. AMPLIFICATOARE CU REACȚIE .....	113
<b>05 - DISPOZITIVE MULTIJONȚIUNE .....</b>	<b>120</b>
1 - HISTEREZA .....	120
2 - TUBURI ELECTRONICE CU DESCĂRCARE ÎN GAZE.....	120
3 - DIODA SHOCKLEY .....	124
4 - DIACUL .....	129
5 - TIRISTORUL .....	130
6 - TRIACUL .....	139
7 - OPTOTIRISTORUL .....	142
<b>06 - AMPLIFICATORUL OPERAȚIONAL .....</b>	<b>143</b>

01. AMPLIFICATORUL CU POTENȚIAL DE REFERINȚĂ ȘI AMPLIFICATORUL DIFERENȚIAL .....	143
02. AMPLIFICATORUL OPERAȚIONAL.....	146
03. REACȚIA NEGATIVĂ.....	151
04. REACȚIA NEGATIVĂ PRIN DIVIZOR DE TENSIUNE.....	154
05. AMPLIFICATORUL TENSIUNE-CURENT.....	157
06. CIRCUITE SUMATOARE ȘI DE MEDIERE.....	159
07. REALIZAREA UNUI AMPLIFICATOR DIFERENȚIAL .....	161
08. AMPLIFICATORUL DE INSTRUMENTAȚIE .....	162
9. CIRCUITE DE DERIVARE ȘI INTEGRARE .....	163
10. REACȚIA POZITIVĂ .....	166

# 01 - Introducere

## 1. Circuite electrice și circuite electronice

- Într-un circuit electronic, curentul este controlat de curent

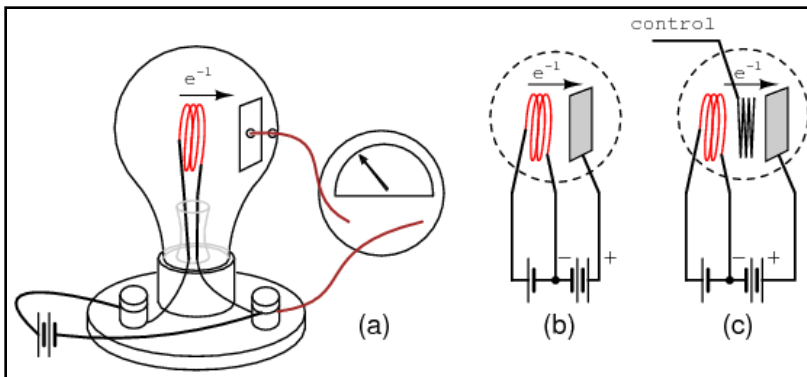
### Definiția circuitelor electronice

Circuitele electrice reprezintă conexiuni ale conductorilor electrici cu elemente de circuit, în cadrul cărora are loc o deplasare uniformă de electroni. Circuitele electronice adaugă o nouă dimensiune circuitelor electrice, prin faptul că deplasarea electronilor este controlată, într-o oarecare măsură, de un semnal electric adițional, fie sub formă de curent, fie sub formă de tensiune.

Controlul curentului nu este neapărat specific electronicii. Întrerupătoarele și potențiometrele controlează și ele deplasarea electronilor. Prin urmare, diferența dintre electric și electronic este dată de modul în care acest control este exercitat în circuit, și nu neapărat de existența sau absența acestuia. Întrerupătoarele și potențiometrele controlează curentul mecanic, printr-un element acționat de o anumită forță fizică externă circuitului. În electronică, pe de altă parte, avem de a face cu elemente speciale, capabile să controleze curentul cu ajutorul unui alt curent, sau prin aplicarea unei tensiuni statice. Cu alte cuvinte, într-un circuit electronic, curentul controlează curentul.

### Efectul Edison

Din punct de vedere istoric, precursorul electronicii moderne a fost inventat de Thomas Edison în 1880, pe când acesta lucra la dezvoltarea becului cu incandescență.



Edison a descoperit că există un curent electric între filamentul becului și o placă metalică instalată în interiorul învelișului vidat (figura alăturată (b)). Astăzi, acest comportament este cunoscut sub numele de „efectul Edison”. De menționat că bateria este necesară doar pentru încălzirea filamentului. Dacă am folosi orice altă

modalitate de încălzire a filamentului, efectul ar fi același.

## **Dioda și trioda cu vid**

În 1904, John Fleming a descoperit că introducerea în circuit a unui curent extern (bateria atașată plăcii, figura de mai sus (b)) se poate realiza doar într-o singură direcție, de la filament la placă, dar nu și invers. Această invenție este cunoscută sub numele de „dioda cu vid”, folosită pentru transformarea (redresarea) curentului alternativ în curent continuu. Adăugarea celui de al treilea electrod de către Lee De Forest (figura de mai sus (c)), a făcut posibil controlul curentului de la filament la placă cu ajutorul unui semnal mai mic. Invenția triodei cu vid de către De Forest a marcat practic începutul erei electronice.

## **Tranzistorul**

Tehnologia electronici a cunoscut o revoluție în anul 1948, odată cu invenția tranzistorului. Acest component electronic minuscul joacă același rol ca și un tub cu vid, dar ocupă un loc mult mai mic și este mult mai ieftin. Tranzistorii realizează controlul curentului cu ajutorul materialelor semiconductoare și nu prin vid.

## **2. Elemente active și elemente pasive**

- Elementele active de circuit sunt acele dispozitive ce pot controla curentul prin intermediul curentului
- Elementele pasive de circuit nu pot controla curentul la bornele lor cu ajutorul unui alt curent

### **Elemente active**

Un element de circuit activ este orice tip de component ce poate controla deplasarea electronilor (curentul) pe cale electrică. Pentru ca un circuit să poarte numele de circuit electronic, acesta trebuie să conțină cel puțin un astfel de element activ.

Elementele active includ, printre altele, tuburile cu vid, tranzistoarele, redresoarele cu semiconductoare, și triacurile.

Toate dispozitivele active controlează curentul prin ele. Unele dispozitive active realizează acest lucru prin intermediul unei tensiuni, iar altele prin intermediul curentului. Cele care utilizează o tensiune statică ca și semnal de control, sunt denumite dispozitive controlate în tensiune. Cele care folosesc un alt curent pentru controlul curentului în cauză sunt cunoscute sub numele de dispozitive controlate în curent. Tuburile cu vid sunt dispozitive controlate în tensiune iar tranzistoarele pot fi de ambele tipuri.

### **Elemente pasive**

Componentele ce nu pot controla curentul prin intermediul unui alt semnal electric, sunt denumite elemente de circuit pasive. Rezistorii, condensatoarele, bobinele, transformatoarele și chiar și diodele, toate sunt considerate elemente de circuit pasive.

### 3. Amplificatorul

- Comanda unei cantități mari de putere prin intermediul unei alte puteri, mai mici, poartă numele de amplificare
- Dispozitivul ce realizează o asemenea amplificare de putere, poartă numele de amplificator

#### Definiția amplificării

Practic, elementele active sunt folosite pentru proprietatea lor de amplificare. Indiferent dacă dispozitivul în cauză este controlat în tensiune sau în curent, puterea necesară pentru semnalul de control este de obicei mult mai mică decât puterea disponibilă în curentul controlat. Cu alte cuvinte, un element activ nu permite pur și simplu controlul curentului de către curent, ci, face posibil controlul unui curent mare de către un curent mic.

Datorită acestei diferențe dintre puterea controlată și puterea de control, elementele active de circuit pot fi folosite pentru comanda unei cantități mari de putere (putere controlată) de către o cantitate mică de putere (putere de control). Acest comportament poartă numele de amplificare.

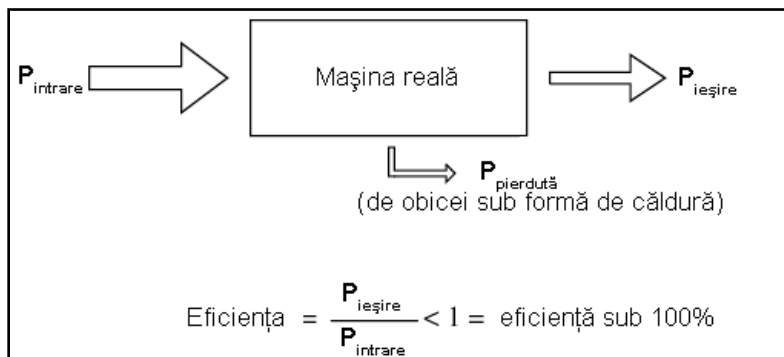
#### Mașina perfectă

O lege fundamentală a fizicii, cea a conservării energiei, spune că energia nu poate fi creată dar nici distrusă. Dacă această lege este adevărată, atunci construirea unui dispozitiv care să ia o cantitate mică de energie și să o transforme într-o cantitate mare de energie, pe cale magică, nu este posibilă.



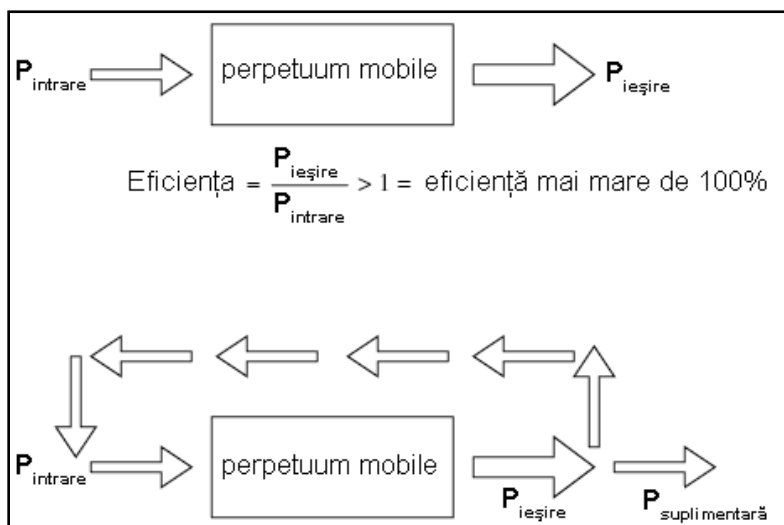
Toate mașinile, incluzând circuitele electrice și electronice, au o eficiență maximă de 100%. În cele mai fericite cazuri, puterea de intrare este egală cu puterea de ieșire.

#### Mașina reală



În realitate însă, de cele mai multe ori, mașinile nu ating nici măcar această limită superioară, deoarece o parte din energia de intrare se pierde sub formă de căldură radiată în spațiul din jur, iar această energie pierdută nu se regăsește în valoarea energiei de ieșire.

# Perpetuum mobile



Au existat numeroase încercări, fără succes însă, de a proiecta și construi o mașină a cărei putere de ieșire să fie mai mare decât puterea de intrare. Acest lucru nu doar că ar viola legea conservării energiei, dar ar duce lumea într-o revoluție tehnologică fără precedent, deoarece acest tip de mașină s-ar putea alimenta singură, într-o buclă circulară, și ar putea genera putere „gratuită”. Această mașină este cunoscută sub numele de perpetuum mobile.

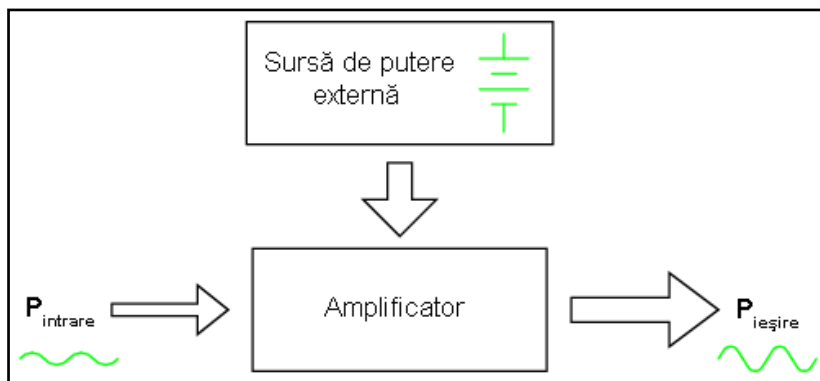
Deși au existat multe încercări în acest domeniu, până acum nu s-a reușit construirea unei mașini capabile să se alimenteze singură, cu propria ei energie plus generarea unei energii suplimentare.

## Amplificatorul

Totuși, există o gamă de mașini denumite amplificatoare, în cadrul cărora, semnalele de putere mică de la intrare sunt „transformate” (cu ajutorul unei surse externe de putere) în semnale de ieșire de o putere mult mai mare. Pentru a înțelege cum pot amplificatoarele să existe fără a viola legea conservării energiei, trebuie să înțelegem modul de funcționare al dispozitivelor active.

## Principiul de functionare al amplificatoarelor





Pentru că elementele active de circuit pot controla cantități mari de putere electrică cu ajutorul unei cantități mici de putere electrică, acestea pot fi utilizate în circuite pentru duplicarea formei semnalului de intrare cu ajutorul unei surse externe de putere electrică.

Rezultatul este un dispozitiv ce pare a transforma pe cale magică un semnal electric de putere mică într-un semnal identic, dar de o putere/amplitudine mai mare. Legea conservării energiei nu este violată, deoarece puterea adițională este introdusă în circuit de o sursă externă, de obicei o baterie de curent continuu sau o sursă echivalentă. Amplificatorul nu crează și nici nu distruge energie, ci doar o „remodelează” într-o formă de undă dorită.

Cu alte cuvinte, abilitatea de control al curentului pe care elementele active le posedă, este folosită pentru „transformarea” puterii de curent continuu dintr-o sursă externă în aceeași formă de undă precum a semnalului de intrare, forma semnalului produs la ieșire fiind în acest caz identică cu cea de la intrare, dar de o amplitudine mult mai mare. Tranzistorul, sau alte dispozitive active conținute într-un amplificator, formează pur și simplu o *copie* a formei de undă a semnalului de intrare cu ajutorul sursei externe de curent continuu „brute”.

### **Eficiența amplificatoarelor**

Eficiența amplificatoarelor, precum este cazul tuturor mașinilor, este limitată la un maxim de 100%. De obicei, amplificatoarele electronice au o eficiență mult sub acest nivel, datorită pierderilor considerabile de energie sub formă de căldură.

## **4. Factorul de amplificare**

- Raportul dintre valoarea de ieșire și cea de intrare a amplificatoarelor poartă numele de factor de amplificare

### **Definiție**

Deoarece amplificatoarele pot să mărească amplitudinea semnalului de intrare, ar fi foarte util dacă am descrie această proprietate a lor printr-un raport ieșire/intrare, raport ce poartă numele de factor de amplificare, sau

amplificare. Acest factor nu are unitate de măsură, fiind un raport dintre două mărimi cu aceeași unitate de măsură. Matematic, simbolul amplificării este „A”.

## Exemplu

De exemplu, dacă la intrarea unui amplificator avem un semnal de tensiune alternativă efectivă de 2 V, iar la ieșire avem o tensiune alternativă efectivă de 30 V, spunem că factorul de amplificare în tensiune al amplificatorului este de 15, adică 30 împărțit la 2.

$$A_V = \frac{V_{ieșire}}{V_{intrare}}$$

Prin aceeași metodă, dacă știm factorul de amplificare și amplitudinea semnalului de intrare, putem calcula amplitudinea semnalului de ieșire. De exemplu, dacă un amplificator cu un factor de amplificare în curent alternativ de 3,5, are la intrare un semnal de 28 mA efectiv, semnalul de ieșire va fi 98 mA efectiv, sau  $3,5 \cdot 28 \text{ mA}$ :

$$I_{ieșire} = A_I I_{intrare}$$

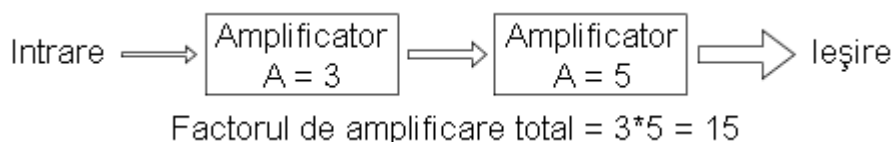
$$I_{ieșire} = 3,5 \cdot 2,8 \text{ mA}$$

$$I_{ieșire} = 98 \text{ mA}$$

În exemplele de mai sus, toate semnalele și amplificările au fost considerate în curent alternativ. Trebuie menționat un principiu important: amplificatoarele electronice răspund diferit semnalelor de intrare în curent alternativ și curent continuu, iar amplificarea celor două poate să fie diferită. Înainte de a putea face calculele amplificărilor, trebuie să înțelegem cu ce semnale avem de a face în primul rând, alternative sau de curent continuu.

## Conectarea în serie a amplificatoarelor

Dacă conectăm mai multe amplificatoare în etaje, factorul de amplificare total va fi egal cu produsul amplificărilor individuale.



În figura de sus, un semnal de 1 V este aplicat intrării unui amplificator cu factorul de amplificare 3. Ieșirea acestuia, de 3 V, este introdusă la intrarea unui amplificator cu factorul de amplificare 5, semnalul de la ieșire fiind 15 V.

## 5. Decibelul

- Factorul de amplificare se poate exprima cu ajutorul decibelului

### Definiție

În cea mai simplă formă, factorul de amplificare al amplificatorului este un raport dintre semnalul de ieșire și cel de intrare, fiind o mărime fără unitate de măsură. Totuși, există o unitate de măsură pentru reprezentarea amplificării, și anume, bel-ul.

Ca și unitate, bel-ul a fost folosit pentru reprezentarea pierderilor de putere din liniile telefonice, și nu pentru reprezentarea amplificărilor. Unitatea poartă numele inventatorului scoțian, Alexander Graham Bell, a cărui muncă fundamentală a dus la dezvoltarea sistemelor telefonice. Sub forma sa originală, bel-ul reprezenta cantitatea de semnal pierdută datorită rezistenței pe o anumită lungime de conductor electric. Acum, acesta este definit ca logaritm din baza zece a raportului dintre semnalul de ieșire și cel de intrare:

$$A_{P(\text{raport})} = \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$$

$$A_{P(\text{bel})} = \log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$$

### Comparație

Deoarece bel-ul este o unitate logaritmică, acesta este ne-liniar. Să considerăm următorul tabel, ca și o comparație între pierderile de putere exprimate sub formă de raport și aceleași pierderi exprimate sub formă de bel:

Comparație amplificări / pierderi exprimate sub formă de raport și bel

$\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$	$\log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$	$\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$	$\log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$
1000	3 B	0.1	-1 B
100	2 B	0.01	-2 B
10	1 B	0.001	-3 B
1	0 B	0.0001	-4 B

Mai târziu a fost realizat faptul că bel-ul este o unitate de măsură prea mare pentru a fi utilizată direct; prin urmare, a început să fie folosit tot mai des prefixul metric *deci* ( $1/10$ , sau  $10^{-1}$ ), și anume *decibel*-ul, sau dB. Astăzi, expresia „dB” este atât de răspândită încât majoritatea nu realizează că aceasta este o combinație dintre „deci” și „bel”, sau că măcar există o unitate de măsură numită „bel”. Următorul tabel este asemănător celui precedent, dar de data aceasta valorile sunt exprimate în dB:

Comparație amplificări / pierderi exprimate sub formă de raport și decibel

$\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$	$10 \log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$	$\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$	$10 \log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$
1000	30 dB	0.1	-10 dB
100	20 dB	0.01	-20 dB
10	10 dB	0.001	-30 dB
1	0 dB	0.0001	-40 dB

## 02 - Fizica dispozitivelor semiconductoare

### 01. Fizica cuantică

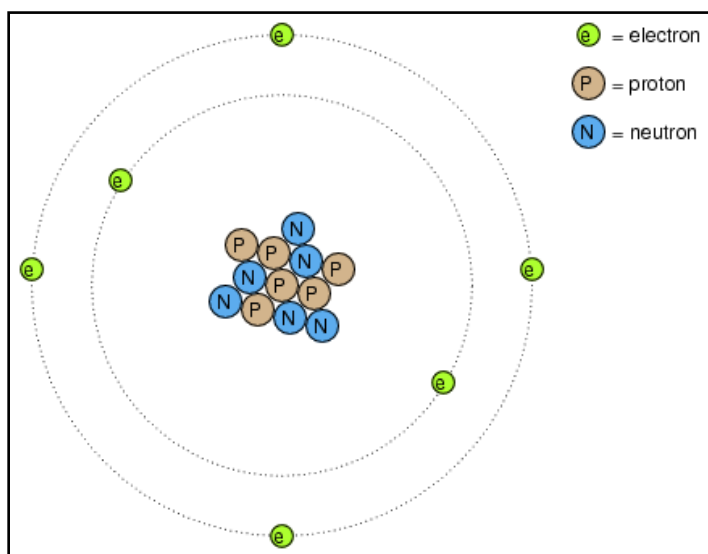
- Electronii există în atomi sub formă de „nori” ai probabilităților distribuite, și nu sub forma unor corpuri discrete ce orbitează în jurul nucleului precum sateliții în jurul planetelor
- Fiecare electron din jurul nucleului atomului are o „stare” unică descrisă de patru numere cuantice: numărul cuantic principal, cunoscut sub numele de strat; numărul cuantic orbital, cunoscut sub numele de substrat; numărul cuantic magnetic, ce descrie orbitalul (orientarea stratului); numărul cuantic de spin, sau pur și simplu spin. Aceste stări sunt cuantificate, adică electronul nu poate exista „între” aceste stări ce sunt definite de numerotația cuantică
- Numărul cuantic principal ( $n$ ) descrie stratul pe care se află electronul. Cu cât acest număr este mai mare, cu atât raza norului electronic este mai mare față de nucleul atomului, și cu atât este mai mare energia electronului. Aceste numere sunt numere întregi pozitive
- Numărul cuantic orbital ( $l$ ) descrie forma norului electronic dintr-un anumit strat și este cunoscut adesea sub numele de substrat. Numărul substraturilor (formelor norilor electronici) din oricare strat este egal cu numărul cuantic orbital. Acestea sunt numere întregi pozitive ce încep de la zero și se termină la  $n-1$  ( $n$  - numărul cuantic principal)
- Numărul cuantic magnetic  $m_l$  descrie orientarea substraturii (forma norului electronic). Numărul orientărilor substraturilor este de  $2l + 1$  ( $l$  - numărul cuantic orbital). Fiecare orientare unică poartă numele de orbital. Aceste numere sunt întregi, cu valori între  $-l$  și  $l$
- Numărul cuantic de spin  $m_s$  descrie o altă proprietate a electronului, iar valoarea acestuia poate să fie  $+1/2$  sau  $-1/2$
- Principiul de excludere al lui Pauli spune că, într-un atom, nu există doi electroni cu același set de numere cuantice. Prin urmare, numărul maxim de electroni pe fiecare orbital este de 2 ( $\text{spin}=1/2$  și  $\text{spin}=-1/2$ ), de exemplu
- Notăția spectroscopică este o convenție folosită pentru descrierea configurației electronilor dintr-un atom. Straturile sunt descrise de numere întregi, urmate de substraturi, descrise cu ajutorul literelor (s, p, d, f), iar un indice superior este folosit pentru indicarea numărului total de electroni de pe fiecare substrat în parte
- Comportamentul chimic al unui atom este complet determinat de electronii din straturile neocupate complet. Straturile inferioare ocupate complet nu au aproape niciun efect asupra formării legăturilor chimice ale elementelor

## Importanța fizicii cuantice

Invenția dispozitivelor semiconductoare a constituit cu siguranță o nouă revoluție industrială. Aceste dispozitive au făcut posibilă miniaturizarea aparatelor electronice, incluzând calculatoarele personale, dezvoltarea echipamentelor medicale de diagnostic și tratament, apariția dispozitivelor de telecomunicații moderne și multe altele.

Dar în spatele acestor realizări remarcabile se află o altă revoluție a științei în general: fizica cuantică. Fără această nouă înțelegere a lumii, dezvoltarea dispozitivelor semiconductoare nu ar fi fost posibilă. Fizica cuantică este însă un domeniu al științei extrem de complicat, iar acest capitol reprezintă doar o mică introducere. Fără o înțelegere de bază a fizicii cuantice, sau cel puțin o înțelegere a descoperirilor științifice ce au dus la formularea acestora, este imposibilă înțelegerea funcționării dispozitivelor electronice semiconductoare. Majoritatea textelor de electronică încearcă să explice semiconductorii cu ajutorul fizicii „clasice”, lucru ce duce la o confuzie și mai mare, nu la înțelegerea subiectului.

### Modelul clasic al atomului (Rutherford)



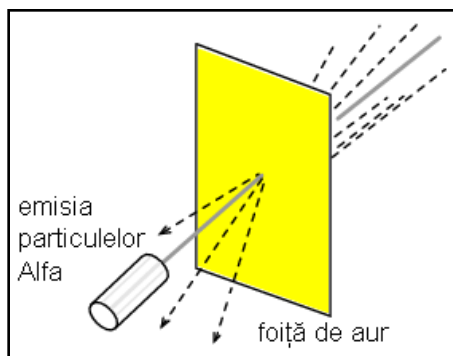
Majoritatea dintre noi am văzut modele ale atomului care arată aproximativ precum în figura alăturată (vezi subiectul discutat în volumul I).

Acesta este cunoscut sub numele de „modelul lui Rutherford”. Centrul atomului este format din particule de materie minuscule denumite protoni și neutroni; electronii orbitează în jurul nucleului precum planetele în jurul Soarelui. Nucleul prezintă o sarcină electrică pozitivă datorită prezenței protonilor, neutronii neavând sarcină electrică, iar electronii ce orbitează în jurul nucleului poartă o

sarcină negativă, întreg ansamblul fiind astfel echilibrat din punct de vedere al sarcinilor electrice.

Electronii sunt atrași de protoni la fel cum planetele sunt atrase prin intermediul gravitației de Soare, dar orbitele sunt stabile datorită mișcării electronilor. Acest model extrem de popular al atomului a fost prezentat pentru prima dată de Ernest Rutherford, ce a determinat pe cale experimentală, în jurul anului 1911, că sarcinile pozitive ale atomului sunt concentrate într-un nucleu dens și de dimensiuni reduse, în contradicție cu modelul propus de J.J. Thompson, care susținea că aceste sarcini sunt distribuite egal în interiorul atomului.

## Experimentul de împrăștiere al lui Rutherford



Acest experiment a presupus bombardarea unei folii subțiri de aur cu particule Alfa, încărcate pozitiv. Rezultatele au fost neașteptate. O mică parte din particule au fost deviate la unghiuri foarte mari. Câteva dintre particulele Alfa au fost deviate înapoi, la aproape  $180^\circ$ , dar majoritatea particulelor au trecut pur și simplu prin folia de aur nedeviate, indicând faptul că cea mai mare parte a foliei era compusă din aer. Faptul că o mică parte a particulelor Alfa au fost deviate la unghiuri foarte mari nu se putea

explica decât prin prezența unui nucleu minuscul, încărcat cu sarcină pozitivă.

Cu toate că acest model al atomului era mai precis decât cel al lui Thompson, totuși, nici acesta nu era perfect. Au fost întreprinse, prin urmare, noi experimente pentru determinarea structurii atomice corecte, iar aceste eforturi au dus la descoperirile bizare ale fizicii cuantice. Astăzi, modelul atomului, așa cum este el înțeles cel puțin, este destul de complex.

### „Moștenirea” modelului lui Rutherford

Totuși, comparația atomului „lui Rutherford” cu sistemul solar continuă să domine chiar și în mediile academice.

De exemplu, următoarea descriere este luată dintr-o carte de electronică:

*Electronii negativi ce orbitează în jurul nucleului pozitiv sunt atrași de acesta, ceea ce ne face să ne întrebăm: de ce electronii nu cad pe nucleul atomului? Răspunsul este că electronii rămân pe orbitele lor stabile datorită existenței celor două forțe egale și de sens contrar: forța centrifugă exercitată asupra electronilor aflați în mișcare pe orbite ce anulează forța centripetă ce atrage electronii spre nucleu datorită sarcinilor opuse.*

Urmând modelul lui Rutherford, autorul consideră electronii ca fiind bucăți solide de materie ce se deplasează pe orbite circulare, atracția față de nucleul încărcat cu o sarcină de semn contrar fiind balansată de mișcarea lor. Referirea la „forța centrifugă” nu este corectă din punct de vedere tehnic (nici chiar pentru planete), dar este ușor de trecut cu vederea datorită popularității ei. În realitate, nu există nicio forță care să împingă un corp, orice corp, departe de centrul orbitei acestuia. „Iluzia” este dată de faptul că un corp ce are inerție tinde să se deplaseze în linie dreaptă, iar din moment ce o orbită este o deviație (acelerație) a deplasării în linie dreaptă, există tot timpul o opoziție față de forța de atracție a corpului spre centrul orbitei, fie că este forță gravitațională, atracție electrostatică, sau orice altă forță.

Însă, adevărata problemă a acestei explicații este ideea că orbitele electronilor sunt circulare. Faptul că sarcinile electrice accelerate emit radiație electromagnetică se știe încă de pe vremea lui Rutherford, iar acest lucru se poate dovedi pe cale experimentală. Din moment ce mișcarea orbitală este o formă de accelerație (corpul ce orbitează este într-o accelerație constantă față de mișcarea normală, liniară), electronii aflați în stare de orbitare ar trebui să „arunce” radiație precum o roată aflată în noroi. Dacă electronii ar pierde energie în acest mod, aceștia s-ar

aproxia din ce în ce mai mult de nucleu, rezultatul fiind o coliziune cu nucleul pozitiv. Totuși, acest lucru nu se întâmplă în general în atomi. Într-adevăr, orbitele electronilor sunt extrem de stabile.

### **Spectrul luminii emis de către atomi**

Mai mult decât atât, experimentele cu atomi „excitați” au demonstrat că energia electromagnetică emisă de un atom posedă doar anumite frecvențe specifice. Atomii excitați de influențe externe, precum lumina, absorb această energie și emit unde electromagnetice de frecvențe specifice. Când energia emisă de un atom este descompusă în frecvențele sale (culori) cu ajutorul unei prisme, spectrul culorilor este compus din linii distincte, acestea fiind unice elementului respectiv. Acest fenomen este în general folosit pentru identificarea elementelor atomice, și chiar și pentru determinarea proporțiilor fiecărui element dintr-o compoziție chimică. Conform modelului lui Rutherford și a legilor fizicii clasice, domeniul frecvențelor acestor atomi excitați ar trebui să fie practic nelimitat. Cu alte cuvinte, dacă modelul lui Rutherford ar fi fost corect, spectrul luminii emise de oricare atom ar apărea ca o bandă continuă de culori și nu doar sub forma câtorva linii distincte.

### **Orbitalii**

Niels Bohr a încercat să îmbunătățească modelului lui Rutherford după ce a studiat o perioadă de câteva luni în laboratorul acestuia în 1912. Încercând să armonizeze și descoperirile celorlalți fizicieni, precum Max Planck și Albert Einstein, Bohr a sugerat că fiecare electron posedă o anumită energie specifică, iar orbitele lor sunt cuantificate, astfel că fiecare dintre electroni poate ocupa doar anumite locuri în jurul nucleului. Pentru a scăpa de implicațiile mișcării electronilor datorită legilor electromagnetismului și a particulelor accelerate, Bohr a considerat aceste orbite (orbitali) ca fiind staționare.

Cu toate că încercarea lui Bohr de reconstruire a structurii atomului în termeni cât mai apropiați de rezultatele experimentale, a constituit un pas foarte important pentru fizică, acesta nu a fost totuși complet. Analizele sale matematice au condus la predicții mult mai bune a evenimentelor experimentale decât modelele precedente ale atomului, dar câteva întrebări despre modul ciudat al comportamentului electronilor încă nu își găsiseră răspunsul. Susținerea faptului că electronii existau în stări staționare și cuantificate în jurul nucleului era un pas înainte, dar motivul pentru care electronii se comportau astfel nu era încă cunoscut. Răspunsul acestor întrebări avea să-l dea un alt fizician, Louis de Broglie, cu aproximativ zece ani mai târziu.

### **Dualismul corpuscul-undă**

De Broglie a propus că electronii, precum fotonii (particule de lumină), manifestă atât proprietăți ale particulelor cât și proprietăți ale undelor. Bazându-se pe această interpretare, acesta a sugerat că o analiză a



orbitalilor electronilor din punct de vedere al undelor și nu al particulelor, ar răspunde mai multor întrebări legate de natura lor. Într-adevăr, acesta a reprezentat un nou pas în dezvoltarea unui model al atomului.

Ipoteza lui de Broglie a făcut posibilă introducerea suportului matematic și analogiilor fizice pentru stările cuantificate ale electronilor dintr-un atom, dar nici modelul acestuia nu era complet. În decurs de câțiva ani însă, fizicienii Werner Heisenberg și Erwin Schrödinger, fiecare lucrând individual, au creat un model matematic mult mai riguros pentru particulele subatomice, plecând de la conceptul dualității undă-particulă a lui de Broglie.

## **Principiul incertitudinii al lui Heisenberg**

Avansul teoretic de la modelul staționar al undei propus de de Broglie la modelul matricial al lui Heisenberg la ecuațiile diferențiale ale lui Schrödinger, este cunoscut sub numele de mecanică cuantică și introduce o caracteristică aparent șocantă a lumii particulelor subatomice, și anume probabilitatea sau incertitudinea. Conform teoriei mecanicii cuantice, poziția exactă și momentul exact al particulelor sunt imposibil de determinat în același timp. Explicația acestui „principiu al incertitudinii” constă într-o eroare de măsură cauzată de obicei de procesul de măsurare, și anume, prin încercarea de măsurare exactă a poziției unui electron, are loc o interferență cu momentul acestuia și prin urmare nu putem ști care a fost momentul acestuia înainte de efectuarea măsurătorii, și invers. Implicația surprinzătoare a mecanicii cuantice este că particulele nu au de fapt o poziție și un moment precis, ci aceste două cantități sunt echilibrate astfel încât incertitudinea lor combinată nu scade niciodată sub o anumită valoare minimă.

## **Norii electronici**

Valoarea minimă a incertitudinii poziției și momentului unei particule, exprimată de Heisenberg și Schrödinger, nu are nimic de a face cu aparatele de măsură „neperformante”, ci este o proprietate intrinsecă a dualității undă-particulă. Prin urmare, electronii nu există în orbitele lor ca și „bucăți” de materie precis delimitate, și nici măcar sub formă de unde bine delimitate, ci sub formă de nori cu o distribuție de probabilități, ca și cum fiecare electron ar fi „împrăștiat” pe o suprafață mare de poziții și momente.

## **Numerele cuantice**

Poziția radicală conform căreia, electronii existau sub formă de nori, părea să vină în contradicție cu principiile originale ale stărilor cuantificate ale electronilor: faptul că electronii există sub forma „orbitelor” discrete și bine definite în jurul nucleului atomului. Această din urmă explicație a fost cea care a constituit, până la urmă, punctul de plecare al mecanicii cuantice. Totuși, comportamentul „cuantic” al electronilor nu depinde de o anumită poziție și moment, ci depinde de cu totul altă proprietate, numerele cuantice. Pe scurt, mecanica cuantică înlătură

noțiunile „clasice” de poziție și moment absolut înlocuindu-le pe acestea cu noțiuni ce nu au nicio analogie în viața reală.

Cu toate că electronii există sub formă de „nori” cu probabilități distribuite și nu sub formă de materie discretă, acești nori au unele caracteristici ce sunt discrete. Oricare electron dintr-un atom poate fi descris de patru numere cuantice, și anume: număr cuantic principal, orbital, magnetic și de spin. Toate aceste numere luate împreună determină starea unui electron la un moment dat.

## Numărul cuantic principal

Simbolizat prin litera „n”, acest număr descrie stratul pe care se află un electron. Învelișul electronic este un spațiu din jurul nucleului atomului, format din straturi, ce determină pozițiile în care electronii pot exista. Electronii se pot deplasa de pe un strat pe altul, dar nu pot exista în regiunile dintre straturi.

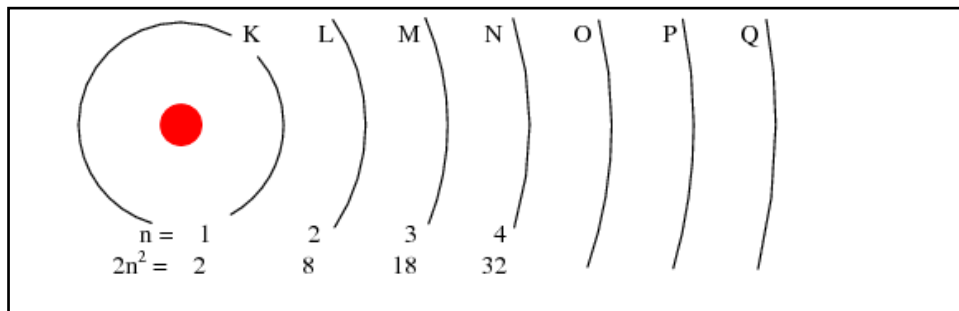
Numărul cuantic principal al electronului este un număr întreg pozitiv (1, 2, 3, 4...). astfel, fiecare electron poate exista pe unul dintre aceste straturi, în funcția de componența atomului. Aceste valori nu au fost alese arbitrar, ci ca urmare a experimentelor cu spectre de lumină: diferitele frecvențe ale luminii emise de atomii de hidrogen excitați, urmează o secvență matematică ce depinde de anumite valori întregi.

Fiecare strat poate susține mai mulți electroni. O analogie a acestei așezări poate fi imaginată dacă luăm în considerare un amfiteatru. Fiecare persoană trebuie să aleagă un rând în care să se așeze (nu se poate așeza între rânduri); la fel, fiecare electron trebuie să „aleagă” un anumit strat în care să se „așeze”. Ca și în cazul amfiteatrelor, stratul exterior poate susține mai mulți electroni decât stratul interior, din apropierea nucleului. De asemenea, electronii tind să se „așeze” pe cel mai de jos strat disponibil, la fel cum într-un amfiteatru, oamenii caută să se așeze cât mai aproape de scenă (în primul rând). Cu cât numărul stratului (numărul cuantic principal, n) este mai mare, cu atât energia electronilor ce-l ocupă este mai mare.

Numărul maxim de electroni dintr-un strat este descris de următoarea ecuație:

$$2n^2$$

Astfel, primul strat (n=1) poate fi ocupat de doar 2 electroni, cel de al doilea strat (n=2) de 8 electroni, al treilea (n=3) de 18 electroni.

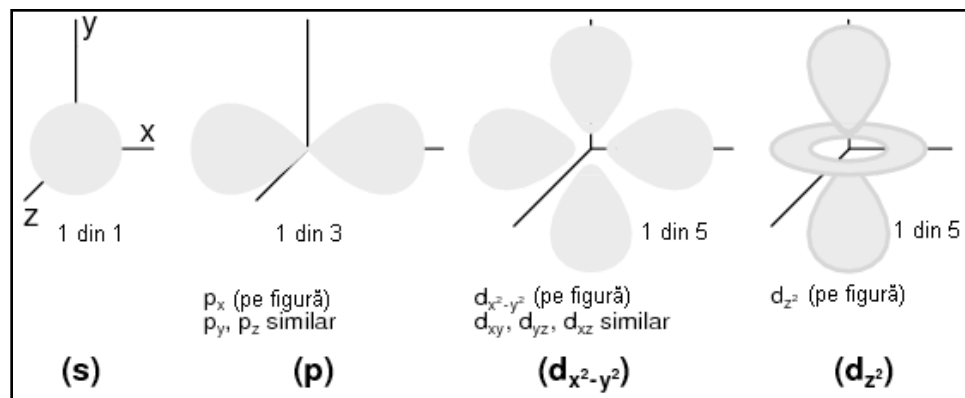


Straturile electronice (de la electron) ale unui atom au fost notate cu litere nu cu cifre. Primul strat (n=1) se notează cu litera K, al doilea (n=2) cu L, al treilea (n=3) cu M, al patrulea (n=4) cu N, al cincilea

( $n=5$ ) cu O, al șaselea ( $n=6$ ) cu P și al șaptelea ( $n=7$ ) cu Q.

## Numărul cuantic orbital

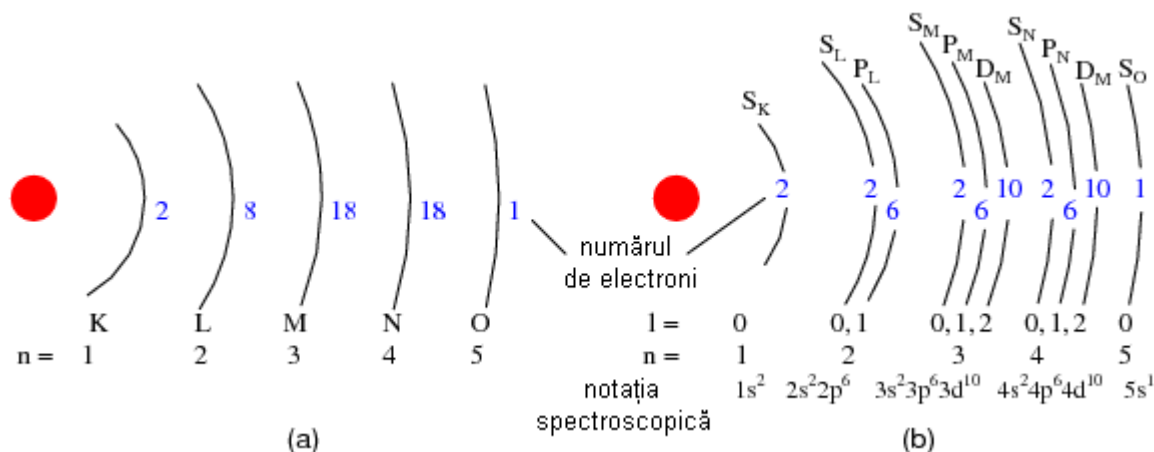
Fiecare strat este compus din substraturi. Substraturile sunt regiuni spațiale ce descriu locul în care pot exista „nori” electronici iar forma lor este diferită de la un substrat la altul.



Primul substrat are forma unei sfere, dacă îl privim sub forma unui nor de electroni ce „învelește” tridimensional nucleul atomic. Cel de al doilea substrat însă, este compus din doi „lobi” conectați împreună într-un singur punct în

apropierea centrului atomului. Al treilea substrat este format dintr-un set de patru „lobi” aranjați în jurul nucleului.

Numărul orbital este un număr întreg, la fel ca și numărul principal, doar că include și zero. Aceste numere sunt simbolizate prin intermediul literei  $l$ . Numărul substraturilor dintr-un strat este egal cu numărul cuantic orbital.



Astfel, primul strat ( $n=1$ ) are un substrat, numerotat cu 0; al doilea strat ( $n=2$ ) are două substraturi, 0 și 1; al treilea strat ( $n=3$ ) are trei substraturi, 0, 1 și 2. O altă convenție, foarte des întâlnită, este numerotarea substraturilor prin  $s$  ( $l=0$ ),  $p$  ( $l=1$ ),  $d$  ( $l=2$ ) și  $f$  ( $l=3$ )

## Numărul cuantic magnetic

Numărul cuantic magnetic al unui electron determină orientarea formei substratului. „Lobii” substraturilor pot fi orientați în mai multe direcții. Aceste orientări diferite poartă numele de orbitali. Primul substrat ( $s$ ;  $l=0$ ) este

o sferă fără posibilitatea de existență a unei direcții, prin urmare, în acest caz, avem doar un orbital. Pentru al doilea strat ( $l=1$ ) din fiecare strat, „lobii” acestora pot avea trei direcții diferite.

Simbolul numărului magnetic este  $m_l$ . Pentru a calcula numărul de orbitali din fiecare strat, utilizăm următoarea formulă:

$$2l + 1$$

De exemplu, primul strat ( $l=0$ ) al oricărui strat, conține un singur orbital, numerotat cu 0; al doilea strat ( $l=1$ ) al oricărui strat conține trei orbitali, -1, 0, 1; al treilea strat ( $l=2$ ) conține cinci orbitali, numerotați cu -2, -1, 0, 1 și 2; etc.

## Numărul cuantic de spin

Proprietatea de „spin” a electronilor a fost descoperită pe cale experimentală. O observație mai atentă a liniilor spectrale a reliefat faptul că fiecare linie este de fapt o pereche de linii foarte apropiate una de cealaltă, ipoteza fiind că această structură este rezultatul spin-ului fiecărui electron în jurul propriei sale axe. Atunci când sunt excitați, electronii cu spin diferit vor emite energie sub frecvențe diferite.

Numărul de spin este simbolizat prin  $m_s$ . În fiecare orbital, din fiecare strat al fiecărui strat, pot exista doi electroni, unul cu spin  $+1/2$ , iar celălalt cu spin  $-1/2$ .

## Principiul de excluziune al lui Pauli

Explicarea așezării electronilor în atom cu ajutorul acestor numere cuantice poartă numele de principiul de excluziune al lui Pauli. Acest principiu spune că, în același atom, nu pot exista doi electroni care să ocupe exact aceleași stări cuantice. Cu alte cuvinte, fiecare electron al unui atom posedă un set unic de numere cuantice. Acest lucru impune o limită a numărului de electroni ce pot ocupa orice orbital, strat sau strat.

## Notăția spectroscopică

O metodă practică și des întâlnită de descriere a acestui aranjament constă în scrierea electronilor în funcție de straturile și substraturile ocupate; această convenție poartă numele de notația spectroscopică. Sub această notație, numărul stratului este un număr întreg pozitiv, substratul este o literă (s, p, d, f), iar numărul total de electroni dintr-un strat (toți orbitalii și spinii incluși) este reprezentat printr-un indice superior.

## Structura atomului de Hidrogen

	substrat ( $l$ )	orbital ( $m_l$ )	spin ( $m_s$ )	
Stratul K ( $n = 1$ )	0	0	$1/2$	← 1 electron
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Hidrogen</b>            Numărul atomic (<math>Z</math>) = 1            (nucleul conține un proton)         </div>				
Notăția spectroscopică : $1s^1$				

electronului). Acest electron ocupă stratul cel mai de jos ( $n=1$ ), primul substrat ( $l=1$ ), în singurul orbital (orientarea spațială) al acelui substrat ( $m_l=0$ ), cu un spin de  $1/2$ . Folosind notația spectroscopică, hidrogenul, având doar un singur electron în stratul inferior, se poate descrie prin notația  $1s^1$ .

### Structura atomului de Heliu

	substrat ( $l$ )	orbital ( $m_l$ )	spin ( $m_s$ )	
stratul K ( $n = 1$ )	0	0	$-1/2$	← 1 electron
	0	0	$1/2$	← 1 electron
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Heliu</b>            Numărul atomic (<math>Z</math>) = 2            (nucleul conține doi protoni)         </div>				
Notăția spectroscopică : $1s^2$				

Alăturat prezentat aranjamentul electronic al atomului de hidrogen.

Cu nucleul format dintr-un singur proton, este suficient un electron pentru ca atomul să atingă echilibrul electrostatic (sarcina electrică pozitivă a protonului este în echilibru cu sarcina electrică negativă a

Trecând la următorul atom (în ordinea numărului atomic), avem elementul heliu.

Nucleul unui atom de heliu are în compoziția sa doi protoni, iar acest lucru necesită existența a doi electroni pentru a echilibra sarcina electrică totală a atomului. Din moment ce ambii electroni, unul cu spin  $1/2$ , celălalt cu spin  $-1/2$ , „încap” pe un singur orbital, configurația atomului de Heliu nu

necesită substraturi sau straturi suplimentare pentru cel de al doilea electron.

Totuși, un atom ce conține trei sau mai mulți electroni, va necesita substraturi adiționale pentru toți acei electroni, din moment ce pe stratul inferior ( $n=1$ ) încap doar doi electroni.

### Structura atomului de Litiu

	substrat ( $l$ )	orbital ( $m_l$ )	spin ( $m_s$ )	
stratul L ( $n = 2$ )	0	0	$1/2$	← 1 electron
stratul K ( $n = 1$ )	0	0	$-1/2$	← 1 electron
	0	0	$1/2$	← 1 electron
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Litiu</b>            Numărul atomic (<math>Z</math>) = 3         </div>				
Notăția spectroscopică : $1s^2 2s^1$				

Să considerăm următorul atom, cel de litiu.

Un atom de litiu folosește doar o fracțiune din capacitatea stratului L ( $n=2$ ), capacitatea totală a acestuia fiind de opt electroni (capacitatea maximă a stratului =  $2n^2$ , unde  $n$  este numărul stratului).

## Structura atomului de Neon

	substrat ( $l$ )	orbital ( $m_l$ )	spin ( $m_s$ )	
Stratul L ( $n = 2$ )	1	1	$-1/2$	substratul p ( $l = 1$ ) 6 electroni
	1	1	$1/2$	
	1	0	$-1/2$	
	1	0	$1/2$	
	1	-1	$-1/2$	
	1	-1	$1/2$	
Stratul K ( $n = 1$ )	0	0	$-1/2$	substratul s ( $l = 0$ ) 2 electroni
	0	0	$1/2$	
	0	0	$-1/2$	substratul s ( $l = 0$ ) 2 electroni
	0	0	$1/2$	
<div>Neon</div> <div>Numărul atomic (<math>Z</math>) = 10</div>				
Notăția spectroscopică : $1s^2 2s^2 2p^6$				

Dacă examinăm aranjamentul electronic al unui atom cu stratul L completat, putem vedea cum toate combinațiile de substraturi, orbitali și spini sunt ocupate de electroni. Elementul ce corespunde acestei configurații este Neonul.

## Observații

Adesea, atunci când se folosește notația spectroscopică a unui atom, toate straturile ce sunt ocupate complet sunt ignorate, fiind scrise doar straturile neocupate sau stratul ocupat superior. De exemplu, neonul (prezentat mai sus), ce are două straturi complet ocupate, poate fi descris pur și simplu prin  $2p^6$  în loc de  $1s^2 2s^2 2p^6$ . Litiul, având stratul K complet ocupat, și doar un singur electron în stratul L, poate fi descris prin notația  $2s^1$  în loc de  $1s^2 2s^1$ .

„Ignorarea” straturilor inferioare, complet ocupate, nu este doar o convenție de scriere, ci ilustrează foarte bine un principiu de bază al chimiei: comportamentul chimic al unui element este determinat în primul rând de straturile sale neocupate. Atât hidrogenul cât și litiul posedă un singur electron în straturile superioare ( $1s^1$  și  $2s^1$ ), iar acest lucru se traduce printr-un comportament similar al celor două elemente. Ambele elemente sunt reactive, și au o reactivitate similară. Contează mai puțin faptul că litiul posedă un strat complet (K) în plus față de hidrogen. Comportamentul său chimic este determinat de stratul său neocupat, L.

## Elemente nobile

Elementele a căror straturi superioare sunt ocupate complet, sunt clasificate ca elemente nobile, fiind aproape non-reactive față de celelalte elemente. Aceste elemente au fost clasificate în trecut ca inerte, crezându-se că sunt complet non-reactive, dar acestea pot forma compuși cu alte elemente în condiții specifice.

## 02. Valența și structura cristalină

- Atomii încearcă să-și completeze stratul exterior, de valență, cu toți cei 8 electroni (2 electroni pentru stratul inferior). Atomii pot dona, accepta sau împărți electroni pentru a completa un strat
- Atomii formează adesea structuri ordonate și rigide denumite cristale
- Un ion pozitiv se formează prin cedarea unui electron de către un atom neutru
- Un ion negativ se formează prin acceptarea unui electron de către un atom neutru
- Elementele semiconductoare din grupa IVA, C, Si și Ge au o structură cristalină de tip diamant. Fiecare atom al cristalului este parte a unei molecule gigantice, formând legături cu alți patru atomi
- Majoritatea dispozitivelor semiconductoare sunt confecționate din monocristale

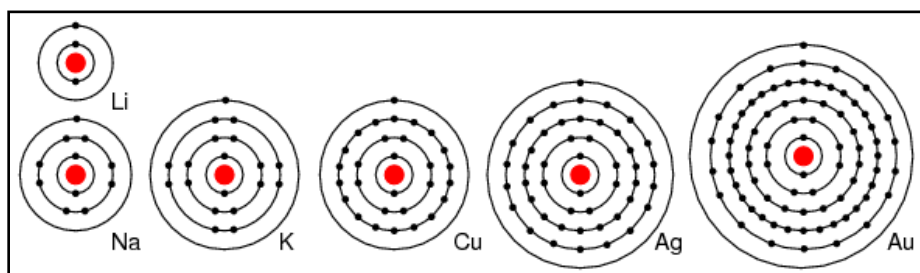
### Electronii de valență

Electronii din stratul exterior, sau stratul de valență, sunt cunoscuți sub numele de electroni de valență. Acești electroni sunt responsabili de proprietățile chimice ale elementelor. Aceștia sunt electronii ce participă la reacțiile chimice cu celelalte elemente.

### Formarea ionilor și a moleculelor

Conform unei reguli chimice simplificate, aplicabilă reacțiilor simple, atomii încearcă să-și completeze toate locurile libere ale stratului exterior cu electroni. Atomii pot ceda câțiva electroni pentru a „descoperi” un strat complet, sau pot accepta câțiva electroni pentru a completa ultimul strat (stratul exterior). Ambele procese duc la formarea ionilor. Atomii pot chiar să împartă electroni între ei în încercarea de completare a stratului exterior, ducând la formarea legăturilor moleculare, adică, atomii se asociază pentru formarea unei molecule.

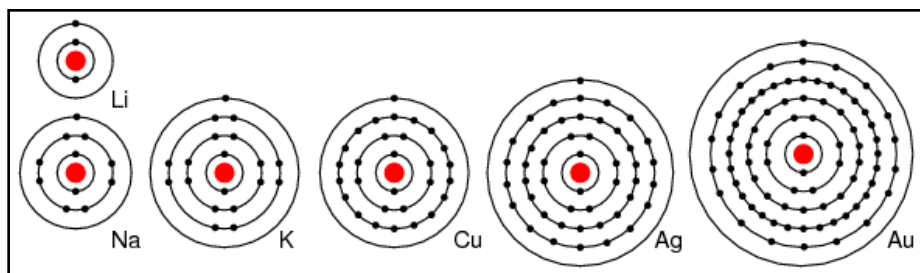
#### Ioni pozitivi



De exemplu, elementele din grupa I din tabelul periodic, Li, Na, K, Cu, Ag și Au au doar un singur electron de valență (numărul de electroni de pe ultimul strat). Toate aceste elemente posedă proprietăți

chimice similare. Acești atomi cedează un electron pentru a reacționa cu alte elemente, iar această proprietate face ca aceste elemente să fie conductoare excelente de electricitate. Cedarea electronilor de către atomi duce la formarea ionilor pozitivi

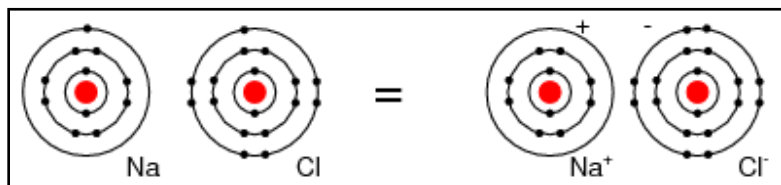
## Ioni negativi



Elementele din grupa VIIA, Fl, Cl și BR, au toate câte 7 electroni în stratul exterior (stratul de valență). Aceste elemente acceptă un electron pentru completarea stratului de valență la 8 electroni.

În cazul în care aceste elemente acceptă un electron, ele formează ioni negativi. Din moment ce nu cedează electroni, aceste elemente sunt foarte buni izolatori electrici.

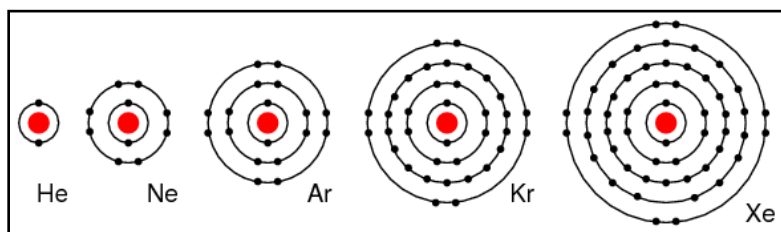
## Definiția ionului



De exemplu, un atom de Cl acceptă un electron al unui atom de Na devenind ion negativ  $\text{Cl}^-$ , iar atomul de Na devine ion pozitiv,  $\text{Na}^+$ . Un ion este un atom, moleculă

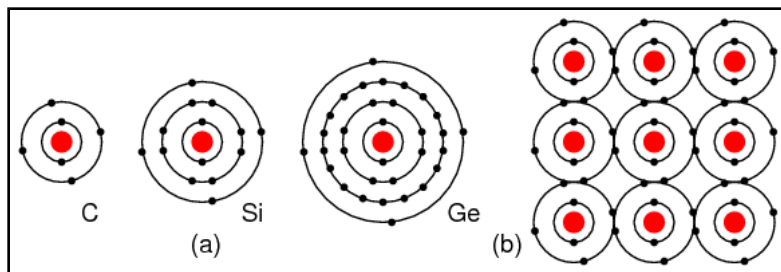
sau grupare de atomi care are un exces de sarcină electrică pozitivă sau negativă. Acesta este modul în care Na și Cl se combină pentru formarea  $\text{NaCl}$ , sarea de masă, care este de fapt o pereche de ioni,  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ . Fiindcă sarcinile celor doi ioni sunt de semn contrar, cei doi se atrag reciproc.

## Exemple



Elementele din grupa a VIIIA, He, Ne, Ar, Kr și Xe au toate câte 8 electroni pe stratul de valență. Acest lucru înseamnă că aceste elemente nici nu donează dar nici nu acceptă electroni, ne-participând la reacții chimice cu

alte elemente. Toate sunt izolatori electrici și se găsesc sub formă de gaz la temperatura camerei.



Elementele din grupa IVA, C, Si și Ge au toate câte 4 electroni în stratul de valență. Aceste elemente formează compuși cu alte elemente, dar nu formează ioni. Acest tip de legătură este cunoscută sub numele de *legătură covalentă*. Se poate observa că atomul din centru are

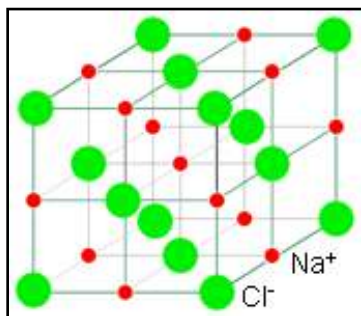


completat stratul de valență prin punerea în comun a electronilor atomilor. Figura de mai jos este o reprezentare bidimensională a unui aranjament tridimensional. Elementele din această grupă prezintă proprietățile semiconductoare pe care le vom studia în continuare.

## Structura cristalină

Majoritatea substanțelor anorganice formează o structură ordonată denumită cristal atunci când se formează legături între atomii sau ioni acestora. Chiar și metalele sunt compuse din cristale, la nivel microscopic. Practic însă, toate metalele industriale au o structură policristalină, în afară de materialele semiconductoare ce sunt monocristaline.

Majoritatea metalelor sunt moi și ușor deformabile pe cale industrială. În timpul prelucrării, microcristalele sunt deformate, iar electronii de valență sunt liberi să se deplaseze prin rețeaua cristalină, și de la cristal la cristal. Electronii de valență nu aparțin unui atom anume, ci tuturor atomilor.



Structura cristalină rigidă a NaCl prezentată în figura alăturată, este compusă dintr-o structură regulată repetitivă formată din ioni pozitivi de Na și ioni negativ de Cl. Odată ce atomii de Na și Cl formează ioni de  $\text{Na}^+$  și  $\text{Cl}^-$  prin transferul unui electron de la Na la Cl, fără existența electronilor liberi, electronii nu sunt liberi să se deplaseze prin rețeaua cristalină, o diferență mare față de metale. Nici ioni nu sunt liberi. Ioni sunt liberi să se deplaseze doar dacă NaCl este dizolvată în apă, dar în acest caz, cristalul nu mai există. Materialele ionice formează structuri cristaline datorită atracției electrostatice puternice dintre ioni încărcăți cu sarcini opuse.

## Materialele semiconductoare

Materialele semiconductoare din grupa IV (C, Si, Ge), formează de asemenea cristale. Fiecare atom formează o legătură chimică covalentă cu alți patru atomi. Cristalul format este practic o singură moleculă. Structura cristalină este relativ rigidă și rezistă deformațiilor. Există un număr relativ mic de electroni liberi prin cristal.

## 03. Benzi de energie

- Pentru îndepărtarea unui electron din banda de valență spre o bandă neocupată, superioară, denumită bandă de conducție, este nevoie de o anumită energie exterioară. Pentru deplasarea electronilor între straturi este nevoie de o energie mai mare decât pentru deplasarea lor între substraturi.

- Datorită faptului că banda de valență și cea de conducție se suprapun în cazul metalelor, energia necesară pentru deplasarea unui electron este mică. Prin urmare, metalele sunt conductori de electricitate foarte buni
- Spațiul foarte mare existent între banda de valență și cea de conducție în cazul materialelor izolatoare, necesită o energie foarte mare pentru deplasarea electronilor între aceste benzi. Din această cauză, aceste materiale sunt bune izolatoare și nu conduc electricitate
- Materialele semiconductoare au un spațiu relativ mic între banda de valență și banda de conducție. Semiconductorii puri nu sunt nici buni izolatori, nici buni conductori

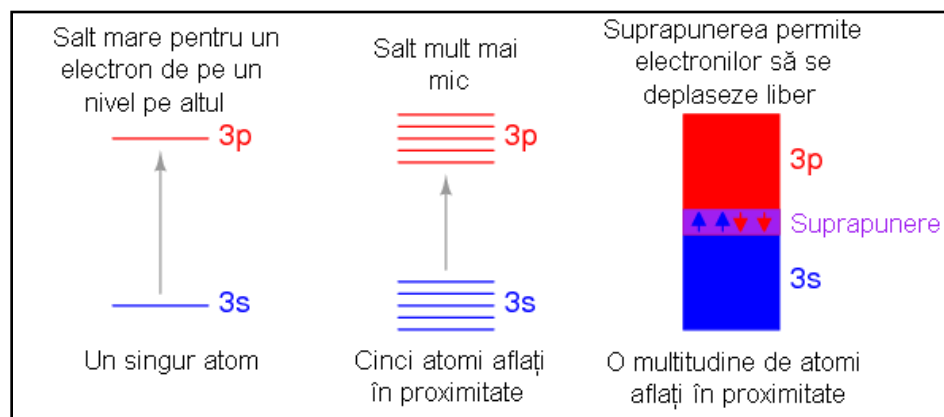
## Nivelele energetice

Fizica cuantică descrie starea electronilor dintr-un atom cu ajutorul celor patru numere cuantice. Aceste numere descriu stările permise ale electronilor dintr-un atom.

La fel ca spectatorii dintr-un amfiteatru, ce se pot deplasa liberi între scaune și rânduri, și electronii își pot modifica starea în cazul existenței unei energii suficiente și loc pentru deplasarea acestora. Din moment ce nivelul stratului este strâns legat de cantitatea de energie a unui electron, „salturile” între straturi (și chiar substraturi) necesită un transfer de energie. Pentru ca un electron să se poată deplasa pe strat mai înalt, acesta are nevoie de energie adițională dintr-o sursă externă. Folosind analogia amfiteatrului, pentru a ajunge într-un rând de scaune superior, este nevoie de o energie din ce în ce mai mare, deoarece persoana trebuie să urce la o înălțime tot mai mare ce necesită învingerea forței gravitaționale. De asemenea, dacă un electron coboară pe un strat inferior, acesta cedează energie. Aceste nivele poartă numele de nivele energetice

Nu toate „salturile” sunt însă egale, cele dintre straturi necesită cel mai mare schimb de energie, pe când salturile dintre substraturi sau dintre orbitali necesită un schimb de energie mai mic.

## Benzile de energie



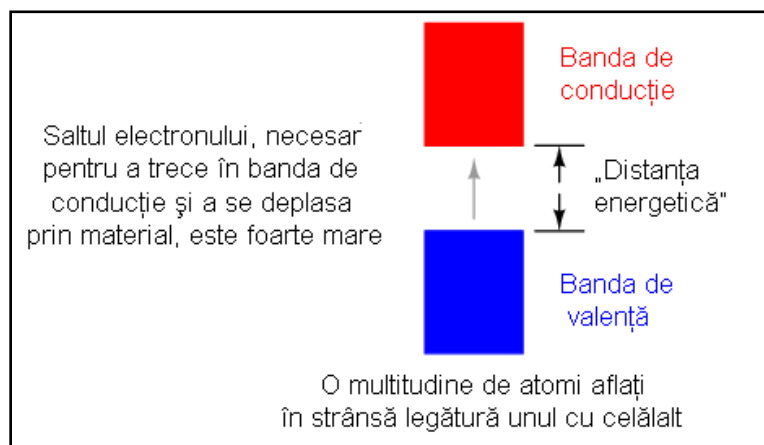
Când atomii se combină pentru formarea substanțelor, straturile, substraturile și orbitalii exteriori se combină între ei, ducând la creșterea energiei disponibile pentru electroni. Când un număr foarte mare de atomi sunt foarte aproape unul de celălalt, aceste nivele de energie disponibile

formează o bandă de electroni aproape continuă, bandă pe care electroni se pot deplasa cu ușurință.

## Electronii liberi

Lățimea acestor benzi și distanța dintre ele determină mobilitatea electronilor în cazul aplicării unui câmp electric asupra lor. În substanțele metalice, benzile libere se suprapun cu benzile ce conțin electroni, ceea ce înseamnă că electronii unui singur atom se pot deplasa la un nivel energetic mai mare necesitând foarte puțină energie externă sau chiar deloc. Astfel, electronii din stratul exterior sunt cunoscuți sub numele de electroni liberi și se pot deplasa foarte ușor dacă sunt supuși unui câmp electric exterior.

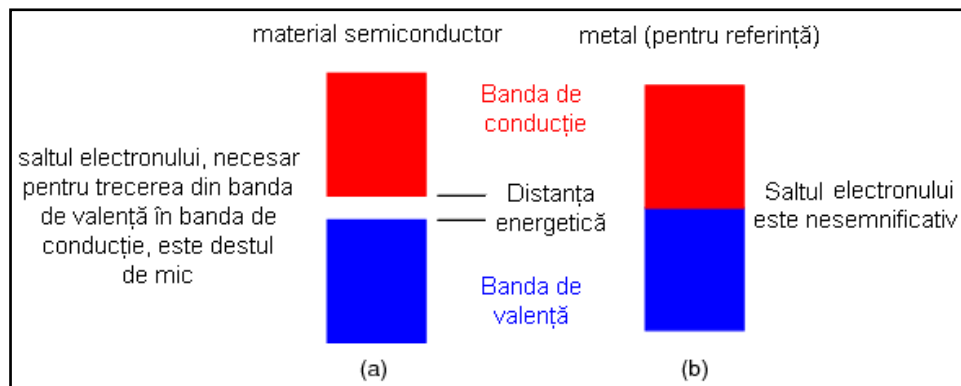
## Cazul materialelor izolatoare



Suprapunerea benzilor nu are loc însă în toate substanțele, indiferent de numărul atomilor ce se află în proximitate. În cazul unor substanțe, există o distanță considerabilă între banda de valență (nivelul energetic cel mai mare) și următoarea bandă goală, denumită banda de conducție.

Prin urmare, electronii de valență sunt „legați” de atomii lor și nu pot deveni mobili în cadrul substanțelor fără ajutorul unei energii externe considerabile. Aceste substanțe formează materialele izolatoare (dielectrice).

## Cazul materialelor semiconductoare



Însă, materialele din categoria semiconductorilor au o „distanță energetică” îngustă între benzile de valență și cele de conducție. Astfel, cantitatea de energie necesară pentru trecerea electronilor de valență în banda de conducție, de undă

devin mobili, este destul de modestă.

La temperaturi joase, energia termică disponibilă pentru „împingerea” electronilor de valență peste spațiul dintre banda de valență și cea de conducție este foarte mică, iar materialul semiconductor se comportă precum un

izolator. La temperaturi înalte însă, energia termică devine suficient de mare pentru a forța electronii peste „distanța energetică”, iar materialul se va comporta precum un material conductor.

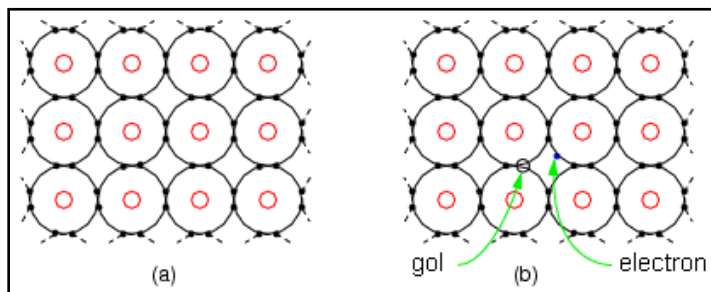
## 04. Electroni și goluri

- Golurile reprezintă absența electronilor din banda de valență
- Materialele semiconductoare pure, cu un procent de 1 parte la 10 miliarde, nu sunt bune conductoare
- Materialele semiconductoare de tip N sunt dopate cu o impuritate pentavalentă pentru crearea electronilor liberi. Un astfel de material este conductor, iar purtătorii de sarcină majoritari sunt în acest caz electronii
- Materialele semiconductoare de tip P sunt dopate cu o impuritate trivalentă și duc la crearea unei abundențe de goluri în structura semiconductorului. Un astfel de material este conductor, iar purtătorii de sarcină majoritari sunt în acest caz golurile

### Scop

Materialele semiconductoare pure sunt izolatori relativ buni, în comparație cu metalele, dar nu sunt la fel de bune precum sticla, de exemplu. Pentru a putea fi folosit în aplicații cu semiconductori, materialul semiconductor pur, nedopat, nu trebuie să conțină mai mult de o impuritate la 10 miliarde de atomi semiconductori. Acest lucru este analog unei impurități sub formă de „un fir de praful într-un sac de zahăr”. Materialele semiconductoare impure sunt conductoare mult mai bune, dar nu la fel de bune precum metalele. De ce se întâmplă acest lucru? Pentru a putea răspunde acestei întrebări, trebuie să ne uităm la structura electronică a acestor materiale.

### Structura electronică a semiconductorilor



În figura alăturată (a), cei patru electroni din stratul de valență a unui material semiconductor formează legături covalente cu alți patru atomi. Toți electronii unui atom formează legături covalente. Electronii nu se pot deplasa liberi în structura cristalului.

Prin urmare, semiconductorii puri (intrinseci) sunt izolatori relativ buni în comparație cu metalele. Energia termică poate elibera ocazional un electron din structura cristalină a semiconductorului. Acest electron se poate deplasa liber prin structura cristalului (electron liber). Când acest electron a fost eliberat cu ajutorul unei energii exterioare, a lăsat în urma lui un loc liber cu sarcină pozitivă în structura cristalului, sarcină cunoscută sub numele

de **gol**. Acest gol nu este nici el fix, ci se poate deplasa liber. Atât electronul, cât și golul contribuie la conducția electrică a cristalului. Electronul este liber până în momentul în care „cade” într-un gol, proces cunoscut sub numele de recombinare. Dacă se aplică un câmp electric extern asupra semiconductorului, electronii și golurile se vor deplasa în direcții opuse.

Creșterea temperaturii duce la creșterea numărului de electroni și goluri și la descreșterea rezistenței. Acest lucru este exact opus comportamentului metalelor, unde rezistența crește odată cu creșterea temperaturii datorită creșterii coliziunilor dintre electroni și structura cristalină. Numărul de electroni și goluri într-un semiconductor intrinsec este egal. Totuși, viteza de deplasare ai celor doi purtători de sarcină (electroni și goluri) nu este egală la aplicarea unui câmp electric extern. Cu alte cuvinte, mobilitatea celor doi purtători de sarcină nu este aceeași.

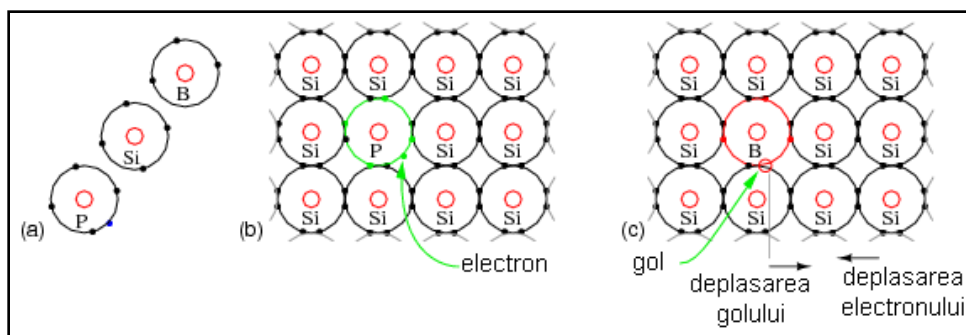
## Doparea materialelor semiconductoare

Materialele semiconductoare pure nu sunt foarte folositoare. Acestea trebuie să prezinte un nivel înalt de puritate înainte de adăugarea impurităților specifice.

Materialele semiconductoare pure (1 parte la 10 miliarde), pot fi „murdărite” cu aproximativ 1 parte la 10 milioane pentru creșterea numărului de purtători de sarcină. Adăugarea unei impurități precise unui material semiconductor este cunoscută sub numele de dopare. Doparea crește conductivitatea semiconductorului, pentru ca acesta să se comporte mai mult ca un metal decât ca un izolator.

## Impuritatea donoare de tip N

Creșterea numărului sarcinilor electrice negative din structura cristalină a unui material semiconductor se poate realiza prin doparea cu electroni a unui material donor precum fosforul. Materialele donatoare de electroni, cunoscute și sub numele de „materiale de tip N, includ elemente din grupa VA a tabelului periodic: N (azot), P (fosfor), As (arsenic) și Sb (stibiu sau antimoniu). Azotul și fosforul sunt folosite ca dopanți de tipul N pentru diamant, iar fosforul, arsenicul și stibiul sunt folosite ca și dopanți pentru siliciu.



Structura cristalină din figura alăturată conține atomi având câte patru electroni în stratul de valență, formând câte patru legături covalente cu atomii adiacenți.

Aceasta este structura anticipată a materialului semiconductor. Adăugarea unui atom de fosfor cu cinci electroni în stratul de valență introduce un electron suplimentar în structura materialului, în comparație cu atomul

de siliciu (figura alăturată (b)). Impuritatea pentavalentă formează patru legături covalente cu patru atomi de siliciu cu ajutorul a patru electroni din cei cinci disponibili. Structura astfel formată va dispune de un electron liber, rămas de la atomul de fosfor, ce nu are o legătură foarte strânsă cu cristalul la fel cum au ceilalți electroni de siliciu, fiind liber să se deplaseze în cristal.

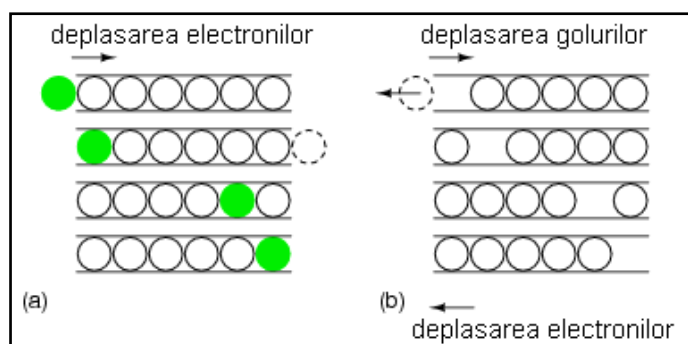
Din moment de am dopat semiconductorul cu un atom de fosfor la fiecare 10 milioane de atomi de siliciu, există relativ puțini electroni liberi creați prin dopaj, dacă facem o comparație cu numărul de atomi de siliciu prezenți în structură. Totuși, dacă facem o comparație între numărul de electroni liberi ai materialului dopat cu materialul pur, numărul de electroni liberi este relativ mare. Aplicarea unui câmp electric extern produce o conducție electrică puternică a materialului semiconductor dopat în banda de conducție. Un nivel de dopaj mai ridicat, produce o conducție și mai puternică. Astfel, un material conductor cu o conductivitate scăzută, a fost „transformat” într-un material conductor destul de bun.

## **Impuritatea acceptoare de tip P**

De asemenea, este posibilă introducerea unei purități cu trei electroni în stratul de valență, adică un electron în minus față de siliciu. Acest lucru duce la formarea unui gol, un purtător de sarcină pozitivă. Atomul de bor (B), ce are trei electroni pe stratul de valență, încearcă să realizeze patru legături covalente cu atomii de siliciu, iar pe parcursul acestui proces, cei trei electroni se vor deplasa încercând să formeze aceste legături (figura de mai sus (c)). Acesta lucru duce la impresia că golul se deplasează. Mai mult, atomul trivalent de bor poate împrumuta un electron de la un atom de siliciu adiacent (sau distant) pentru formarea celor patru legături covalente. Dar acest lucru înseamnă ca atomul de siliciu are un deficit de un electron. Cu alte cuvinte, golul s-a „deplasat” pe un atom de siliciu vecin.

Golurile se regăsesc în banda de valență, cu un nivel mai jos decât banda de conducție. Doparea cu un acceptor - un atom ce poate accepta un electron - crează o deficiență de electroni în structura materialului, sau un exces de goluri (cele două exprimări sunt echivalente). Din moment ce golurile sunt purtători de sarcină pozitivă, un dopant acceptor de electroni poartă numele de „dopant de tip P. Elementele dopante de tip P includ elementele din grupa IIIA a tabelului periodic: B (bor), Al (aluminiu), Ga (galiu) și In (indiu). Borul este folosit pe post de dopant pentru siliciu și diamant, iar indiul pentru germaniu.

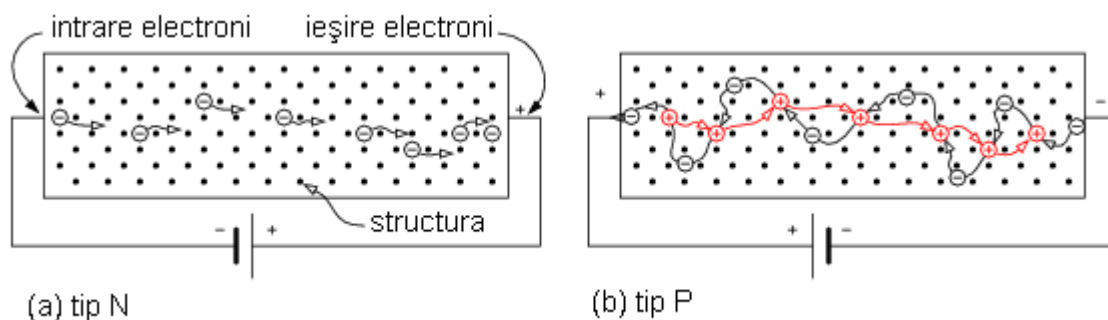
## **Deplasarea electronilor și a golurilor**



Există o strânsă legătură, în analogia „mărgelilor dintr-un tub”, între deplasarea golurilor și deplasarea electronilor. Mărgelile reprezintă electronii dintr-un conductor. Deplasarea electronilor de la stânga la dreapta într-un semiconductor de tip N se poate explica astfel: electronul intră în tub prin partea stângă și iese prin partea dreaptă. Deplasarea electronilor de tip N

are loc în banda de conducție. Putem compara această deplasare cu deplasarea golurilor în banda de valență.

Ceea ce trebuie înțeles este că electronii se deplasează în direcția contrară de deplasare a golurilor. Golurile nu sunt altceva decât absența electronilor din banda de valență, având prin urmare o sarcină pozitivă, sarcină datorată prezenței protonilor din nucleu, și de fapt aceasta este sarcina „imaginară” pe care o reprezentăm cu ajutorul golurilor.



Deplasarea electronilor (curent) într-un semiconductor de tip N este similară deplasării electronilor dintr-un conductor metalic. Atomii materialului dopant de tip N furnizează electroni pentru conducție. Acești electroni poartă numele de *purtători de sarcină majoritari*. Dacă aplicăm un câmp electric între două puncte ale unui material semiconductor, electronii intră prin partea negativă (-) a materialului, traversează structura acestuia și ies prin partea dreaptă (+), terminalul pozitiv al bateriei.

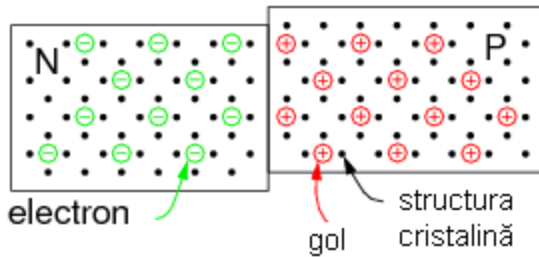
## 05. Joncțiunea P-N

- Joncțiunile PN sunt fabricate dintr-o bucată mono-cristalină de material semiconductor și conțin atât regiuni dopate cu materiale de tip P cât și regiuni dopate cu materiale de tip N, regiuni separate printr-o joncțiune
- Transferul electronilor de la materialul de tip N spre golurile materialului de tip P, produce o barieră de potențial în jurul joncțiunii. Valoarea acesteia este de 0,6-0,7 V pentru siliciu, dar poate varia în cazul altor semiconductoare
- Joncțiunea PN polarizată direct, conduce curent electric

- Joncțiunea PN polarizată invers, nu conduce aproape deloc curent

## Formarea joncțiunii PN

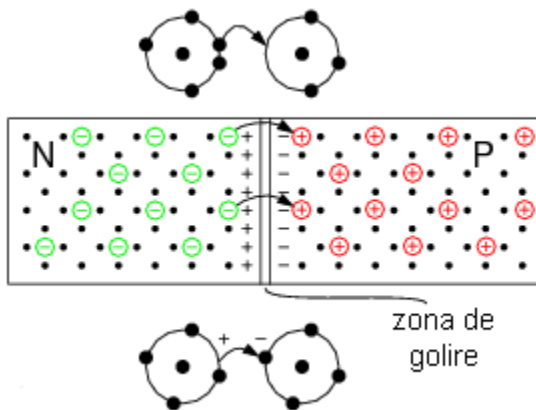
### Două blocuri distincte de material semiconductor



echilibrat de numărul de goluri în ambele blocuri. Astfel, niciunul dintre cele două blocuri nu are o sarcină netă.

Dacă un bloc de material semiconductor de tip P este adus în contact cu un bloc de material semiconductor de tip N (figura alăturată), rezultatul este nesatisfăcător. Vom avea două blocuri conductoare aflate în contact unul cu celălalt, dar fără proprietăți unice. Problema constă în existența a două corpuri cristaline distincte și separate. Numărul de electroni este

### Utilizarea unui singur cristal semiconductor



Totuși, dacă un singur cristal semiconductor este confecționat (dopat) cu un material de tip P la un capăt, și un material de tip N la celălalt capăt, combinația respectivă prezintă unele proprietăți unice. În materialul de tip P, majoritatea purtătorilor de sarcină sunt goluri, aceștia putându-se deplasa liberi prin structura cristalului. În materialul de tip N majoritatea purtătorilor de sarcină sunt electroni, și aceștia putându-se deplasa liberi prin structura cristalului. În jurul joncțiunii însă (intersecția dintre cele două tipuri de materiale), electronii

materialului N trec peste joncțiune și se combină cu golurile din materialul P (figura alăturată).

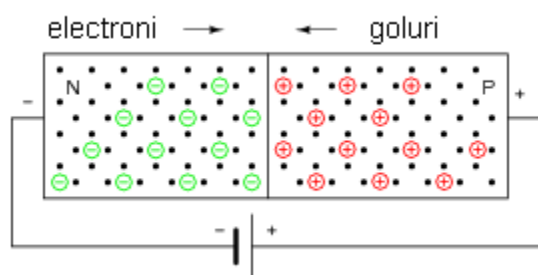
Regiunea materialului P din apropierea joncțiunii capătă o sarcină negativă datorită electronilor atrași, iar regiunea materialului N din apropierea joncțiunii capătă o sarcină pozitivă datorită electronilor cedați. Stratul subțire al acestei structuri cristaline, dintre cele două sarcini de semne contrare, va fi „golit” de majoritatea purtătorilor de sarcină, prin urmare, acesta este cunoscută sub numele de zona de golire, și devine un material semiconductor pur, non-conductor. De fapt, aproape că avem un material izolator ce separă cele două regiuni conductive P și N.

## Bariera de potențial



Această separare de sarcini în jurul joncțiunii P-N (zona de golire) constituie în fapt o barieră de potențial. Această barieră de potențial trebuie să fie „învingă” de o sursă de tensiune externă pentru a se putea comporta precum un material conductor. Formarea joncțiunii și a barierei de potențial are loc în timpul procesului de fabricație. „Înălțimea” barierei de potențial depinde de materialele folosite pentru fabricarea acestuia. Joncțiunile PN din siliciu au o barieră de potențial mai ridicată decât joncțiunile fabricate din germaniu.

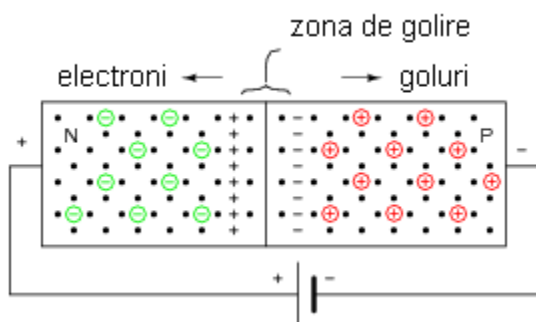
### Polarizarea directă a joncțiunii PN



În figura alăturată, bateria este poziționată astfel încât electronii să se deplaseze dinspre terminalul negativ înspre materialul de tip N. Acești electroni se adună în jurul joncțiunii. Terminalul pozitiv înlătură electronii din materialul semiconductor de tip P, ceea ce duce la crearea golurilor ce se îndreaptă și ele spre joncțiune.

Dacă tensiunea bateriei este suficient de mare pentru a depăși potențialul joncțiunii (0,6 V în cazul siliciului), electronii materialului N și golurile materialului P se combină și se anihilează reciproc. Acest lucru duce la crearea unui spațiu liber în structura materialului ce poate susține o deplasare și mai mare de purtători de sarcină spre joncțiune. Astfel, curenții purtătorilor de sarcină majoritari de tip N (electroni) și de tip P (goluri) se deplasează înspre joncțiune. Recombinarea ce are loc la joncțiune permite curentului bateriei să se „deplaseze” prin joncțiunea PN a unei astfel de diode. În acest caz, spunem că o astfel de joncțiune este polarizată direct.

### Polarizarea inversă a joncțiunii PN



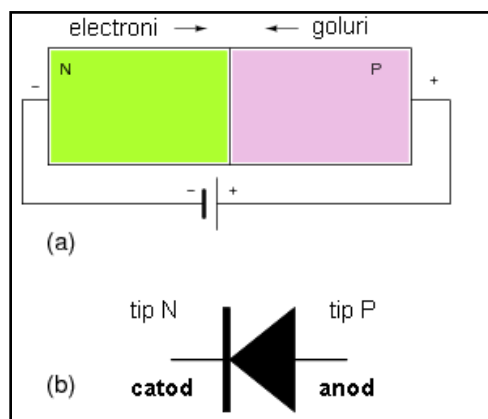
Dacă polaritatea bateriei este inversată (figura alăturată), majoritatea purtătorilor de sarcină vor fi atrași dinspre joncțiune spre terminalii bateriei. Terminalul pozitiv al bateriei atrage purtătorii de sarcină majoritari (electronii) ai materialului N, iar terminalul negativ al bateriei atrage purtătorii de sarcină majoritari (golurile) ai materialului P.

Acest fapt duce la creșterea grosimii zonei de golire non-conductive. Nu are loc nicio recombinație a purtătorilor de sarcină, prin urmare, nu are loc nicio conducție. În acest caz, spunem că joncțiunea PN este *polarizată invers*.

Ceea ce am creat mai sus prin doparea aceluiași cristal atât cu material de tip N cât și cu material de tip P, este o *diodă*.

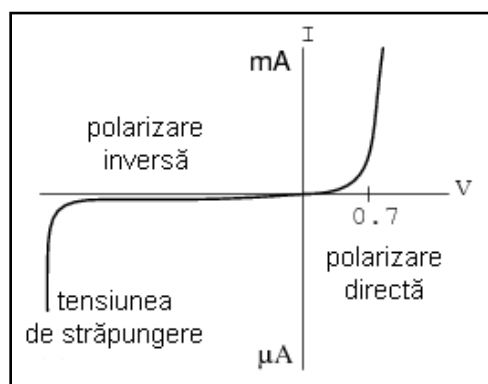
## 06. Dioda

### Definiția și simbolul diodei



După cum am precizat și în secțiunea precedentă, dioda este realizată prin introducerea de impurități de tip N și P în același cristal semiconductor. Simbolul schematic al diodei este prezentat în figura alăturată (b), și corespunde semiconductorului dopat de la (a). Dioda este un dispozitiv unidirecțional (vezi joncțiunea PN). Deplasarea electronilor se poate realiza doar într-o singură direcție, invers față de direcția săgeții, atunci când dioda (joncțiunea PN) este polarizată direct. Catodul, din reprezentarea diodei, reprezintă semiconductorului de tip N, iar anodul corespunde materialului dopat de tip P.

### Polarizarea directă a diodei



Dacă dioda este polarizată direct, curentul crește foarte puțin pe măsură ce tensiunea crește de la 0 V. În cazul în care materialul semiconductor din care este confecționată dioda este siliciu, curentul începe să crească doar după ce tensiunea atinge valoarea de 0,6 V. Dacă tensiunea crește peste valoarea de 0,6 V, valoarea curentului crește foarte rapid. O tensiune peste 0,7 V poate foarte ușor să ducă la distrugerea diodei. Această tensiune de „deschidere” a diodei în jurul valorii de 0,6 V, poartă numele de tensiune de polarizare directă a diodei. Sub această

valoare, dioda este „închisă”, și nu există curent pe la bornele acesteia.

Deși pentru siliciu tensiunea de polarizare directă este de 0,6-0,7 V, pentru germaniu aceasta este de 0,3 V, iar pentru LED-uri de câțiva volți. Curentul ce străbate dioda la polarizarea directă poartă numele de curent direct, iar acesta poate lua valori cuprinse între câțiva mA, până la sute sau mii de amperi pentru diodele de putere.

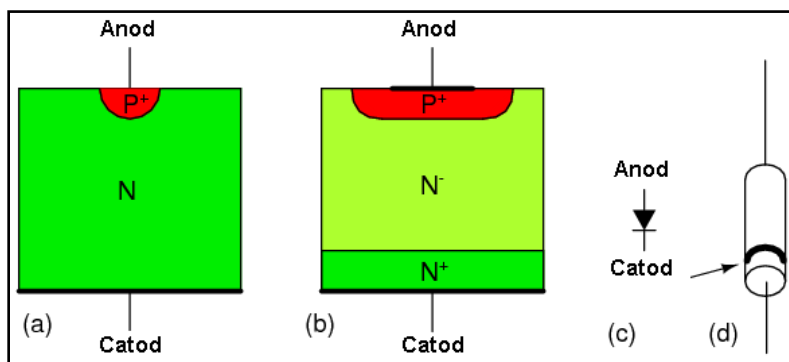
### Polarizarea inversă a diodei

Dacă dioda este polarizată invers, curentul invers va avea o valoare foarte mică, care în condițiile cele mai extreme poate ajunge la un maxim de  $1\ \mu\text{A}$  (figura de mai sus, stânga). Valoarea acestui curent nu crește semnificativ odată cu creșterea tensiunii de polarizare inversă, decât la atingerea punctului de străpungere. Când punctul de străpungere este atins, curentul prin diodă crește la o valoare atât de mare, încât poate duce la distrugerea diodei dacă nu există un rezistor serie pentru limitarea curentului prin diodă. De obicei se alege o diodă a cărei tensiune de străpungere este mai mare decât valoarea tensiunilor aplicate la bornele sale. Diodele din siliciu au de obicei tensiuni de străpungere de la 50, 100, 200, 400, 800 V sau chiar mai mare.

## Curentul de dispersie

Am menționat mai sus că există un curent de dispersie de sub un  $\mu\text{A}$ , pentru diodele de siliciu, la polarizarea inversă. Explicația constă în faptul că energia termică produce câteva perechi de electroni-găuri, ce duc la apariția unui curent de dispersie până la recombinare. Practic, acest curent previzibil este doar o parte a curentului de dispersie total. O mare parte a acestui curent se datorează conducției de suprafață datorită impurităților de la suprafața conductorului. Ambele tipuri de curenți de dispersie cresc odată cu creșterea temperaturii. În cazul germaniului, curentul de dispersie este de câteva ori mai mare decât în cazul siliciului.

## Dioda cu joncțiune



Deși la început, cea mai folosită diodă a fost dioda cu contact punctiform (figura alăturată (a)), majoritatea diodelor folosite astăzi sunt diode cu joncțiune (figura alăturată (b)). Deși joncțiunea PN din figură este puțin mai complexă decât o joncțiune normală, aceasta este tot o joncțiune PN.

Pornind de la catod,  $N^+$  indică faptul că această regiune este dopată puternic, și nu are legătură cu polaritatea. Acest lucru reduce rezistența serie a diodei. Regiunea  $N^-$  din nou, nu are nicio legătură cu polaritatea, ci indică faptul că această regiune este mai puțin dopată, ceea ce duce la o diodă a cărei tensiune de străpungere inversă este mult mai mare, lucru important pentru diodele de putere folosite în redresare.

## Observații

Diodele de puteri mai mici, chiar și redresoarele de putere de tensiuni mai mici, vor avea pierderi de polarizare directă mult mai mici datorită dopajului mai puternic. Cel mai mare nivel de dopaj este folosit pentru diodele Zener, proiectate pentru tensiuni de străpungeri mici. Totuși, un dopaj puternic duce la creșterea curentului invers de dispersie. Regiunea  $P^+$  de la anod, reprezintă un material semiconductor, puternic dopat, de tip P, o foarte bună strategie pentru realizarea contactului. Diodele de joncțiune mici, încapsulate în sticlă, pot conduce curenți de ordinul zecilor sau sutelor de mA. Diodele de putere redresoare, încapsulate în plastic sau ceramică, pot conduce curenți de ordinul miilor de amperi.

## 07. Tranzistorul bipolar cu joncțiune (BJT)

- Tranzistorii bipolari conduc curentul folosind ca purtători de sarcină atât electroni cât și goluri în cadrul aceluiași circuit. De aici și denumirea de „bipolar”
- Funcționarea corectă a unui tranzistor bipolar ca și amplificator de curent necesită polarizarea inversă a joncțiunii colector-bază și polarizarea directă a joncțiunii emitor-bază
- Amplificarea în curent a tranzistorului este exprimată prin relația  $\beta = I_C / I_B$ , iar valoarea ei este de la 100 la 300 pentru tranzistorii mici

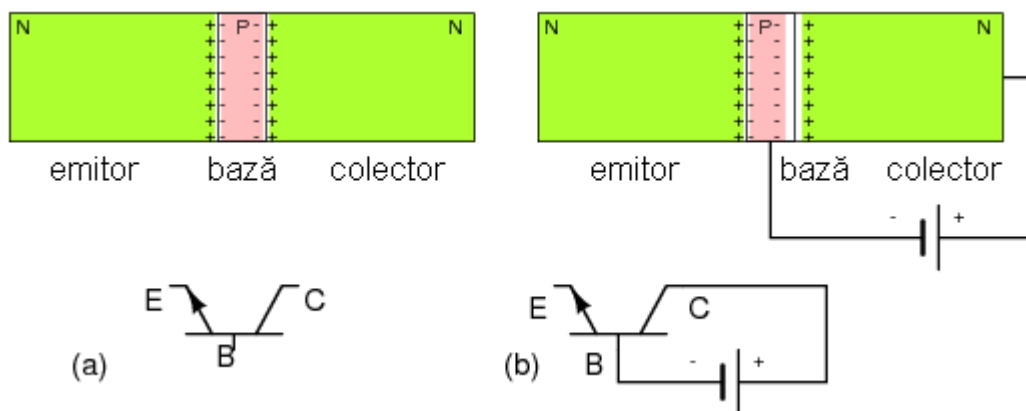
### Scurt istoric

Primul tranzistor bipolar a fost inventat la „Bell Labs” de către William Shockley, Walter Brattain, și John Bardeen în 1948 (de fapt, 1947, dar invenția a fost publicată doar în 1948). Pentru această descoperire, cei trei au fost recompensați cu premiul Nobel pentru fizică în anul 1956.

### Definiția tranzistorului

Tranzistorul bipolar cu joncțiune este un semiconductor format din trei straturi, două de tip N și unul de tip P (NPN). Contactele celor trei straturi poartă numele de *emitor* și *colector* pentru semiconductorii de tip N, și *bază* pentru semiconductorul de tip P. Configurația este asemănătoare unei diode, doar că mai există un strat N în plus. Stratul din mijloc însă, baza, trebuie să fie cât mai subțire cu putință, fără a afecta suprafețele celorlalte două straturi, emitorul și colectorul.

### Structura tranzistorului

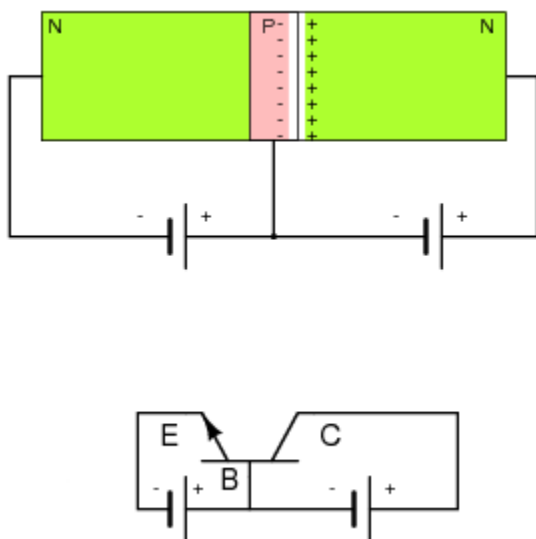


Dispozitivul din figura de sus este format din două joncțiuni, una între emitor și bază, iar cealaltă între bază și colector, aceste joncțiuni formând două zone de golire.

### Polarizarea joncțiunii bază-colector

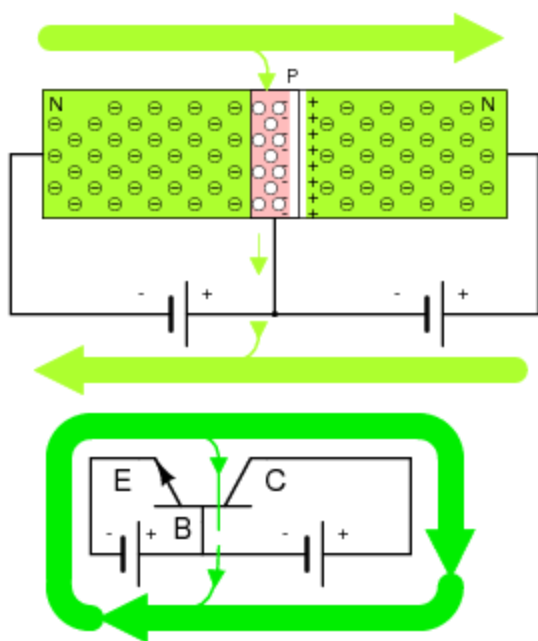
În mod normal, joncțiunea bază-colector a tranzistorului este polarizată invers (b). Acest lucru duce la creșterea regiunii de golire. Această tensiune poate fi de câțiva volți până la zeci de volți pentru majoritatea tranzistorilor. În acest caz, nu există curent în circuitul colectorului, exceptând curentul de dispersie de o valoare foarte mică.

### Polarizarea joncțiunii emitor-bază



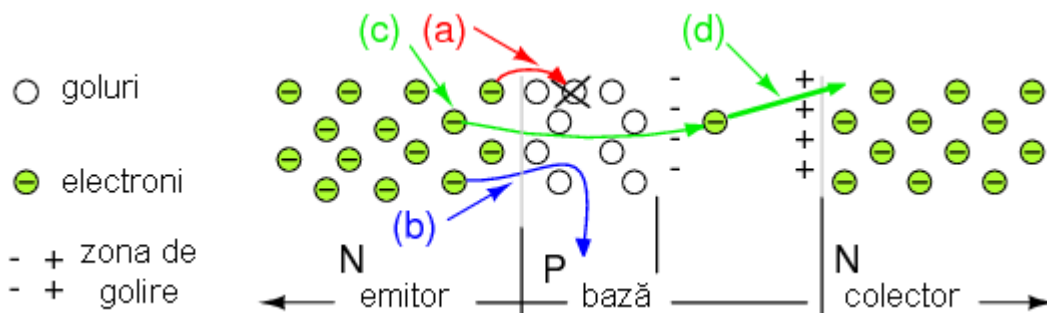
Putem adăuga o sursă de tensiune și în circuitul emitor-bază al tranzistorului (figura alăturată). În mod normal, joncțiunea emitor-bază este polarizată direct, în încercarea de depășire a barierei de potențial de aproximativ 0,6 V. Acest lucru este similar polarizării directe a joncțiunii diodei. Tensiunea acestei surse trebuie să depășească valoarea de 0,6 V pentru ca majoritatea purtătorilor de sarcină (electroni pentru NPN) să treacă din emitor spre bază, devenind purtători de sarcină minoritari în semiconductorul de tip P.

Dacă regiunea bazei ar fi mult mai mare, ca și în cazul poziționării spate-în-spate a două diode, tot curentul ce intră în bază prin emitor, ar ieși prin contactul bazei spre borna pozitivă a bateriei.



Totuși, tranzistoarele sunt confecționate cu o bază foarte subțire. O mică parte a purtătorilor de sarcină majoritari din emitor, injectați ca și purtători de sarcină minoritari în bază, se recombina cu golurile acesteia (figura alăturată). De asemenea, o mică parte a electronilor ce intră în bază pe la emitor trec direct prin bază spre borna pozitivă a bateriei. Dar majoritatea curentului din emitor trece prin suprafață subțire a bazei direct în colector. Mai mult, modificarea curentului mic al bazei duce la modificări importante ale curentului din colector. Dacă tensiunea bazei scade sub aproximativ 0.6 V, curentul emitor-colector scade la zero.

## Explicație



Să privim însă mai îndeaproape la acest mecanism de amplificare al curentului. Considerăm o joncțiune NPN mărită, cu accentul pus pe bază. Chiar dacă nu sunt prezentate în figură, presupunem că joncțiunea emitor-bază este polarizată direct de o sursă de tensiune, iar joncțiunea bază-colector este polarizată invers. Electronii, purtătorii de sarcină majoritari, intră în emitor de la borna negativă a bateriei. Deplasarea electronilor dinspre bază corespunde cu deplasarea acestor dinspre bază spre borna pozitivă a bateriei. Acesta este un curent foarte mic față de curentul din emitor.

Majoritatea purtătorilor de sarcină în emitorul de tip N sunt electronii, ce devin purtători de sarcină minoritară la intrarea în baza de tip P. Acești electroni au patru posibilități după ce intră în baza de tip P. O mică parte „cad” în goluri (figura de sus (a)), lucru ce contribuie la curentul înspre terminalul pozitiv al bateriei. Deși nu este reprezentat pe figură, golurile pot trece din bază spre emitor, unde se recombina cu electronii, contribuind și aceștia la curentul bazei. O altă mică parte din electroni (b) trec direct prin bază înspre terminalul pozitiv al bateriei, ca și cum baza ar fi un rezistor. Atât (a) cât și (b) contribuie curentului foarte mic al bazei. Curentul bazei este

aproximativ 1% din curentul emitor-colector, pentru tranzistoarele mici. Majoritatea electronilor din emitor însă (c), trec direct prin zona îngustă de golire, înspre colector.

Putem observa polaritatea zonei de golire ce înconjoară electronul (d). Câmpul electric intens „trage” electronul rapid în colector. Puterea câmpului electric este direct proporțională cu tensiunea de alimentare a bateriei. astfel, 99% din curentul emitorului trece în colector. Această „trecere” este însă controlată de curentul bazei, ce reprezintă aproximativ 1% din curentul emitorului. Acest lucru reprezintă o amplificare de curent de 99, reprezentat de raportul dintre curentul colectorului și curentul bazei ( $I_C/I_B$ ), cunoscut și ca  $\beta$ .

Difuzia electronilor emitorului prin bază și înspre colector este posibilă doar dacă baza este foarte subțire. Ce s-ar întâmpla cu acești purtători de sarcină dacă baza ar fi de 100 de ori mai groasă? Este foarte posibil ca majoritatea dintre ei, 99% în loc de 1%, să cadă în goluri, nemaiajungând la colector. Prin urmare, curentul de bază poate controla 99% din curentul emitorului, doar dacă 99% din curentul emitorului trece înspre colector. Dacă întreg curentul iese pe la bază, controlul nu este posibil.

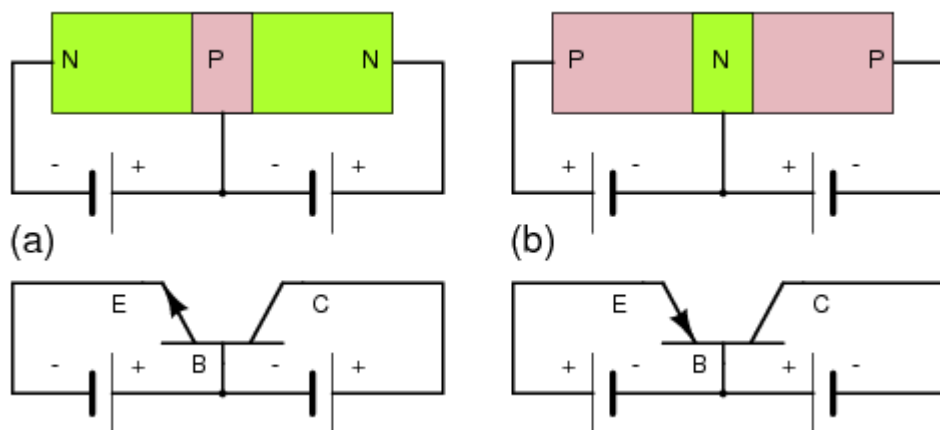
Un alt motiv pentru care 99% dintre electroni trec din emitor, peste bariera de potențial și în colector, este că joncțiunile bipolare reale folosesc un emitor mic dopat puternic. Concentrația mare a electronilor din emitor forțează trecerea acestora în bază. Concentrația mică a dopajului din bază înseamnă că există mult mai puține goluri ce trec în emitor (lucru ce doar ar crește curentul bazei). Difuzia purtătorilor de sarcină dintre emitor spre bază, este puternic favorizată.

## **Eficiența emitorului**

Faptul că baza este subțire iar emitorul puternic dopat, țin foarte sus eficiența emitorului, 99% de exemplu. Acest lucru corespunde ramificației curentului emitorului de 100% în 1% bază și 99% colector. Eficiența emitorului se exprimă astfel:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

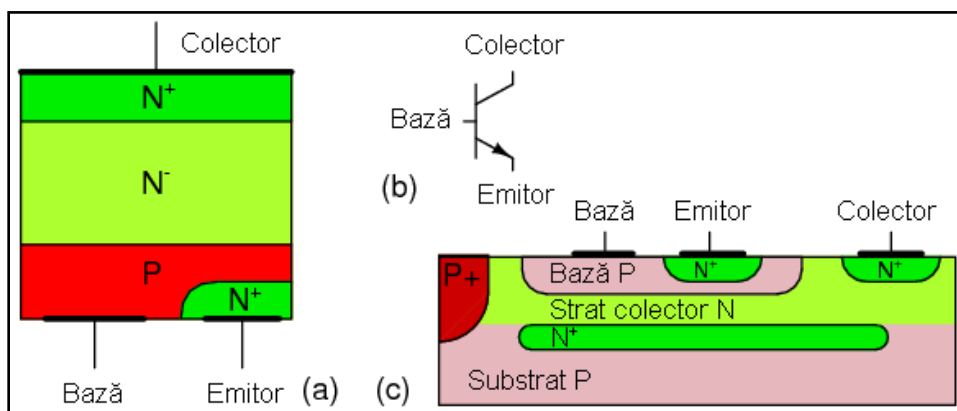
## **Joncțiunea PNP**



Tranzistoarele bipolare pot fi confecționate și sub forma PNP. Diferența dintre PNP și NPN poate fi văzută în figura de sus.

Diferența constă în polaritatea joncțiunilor bază-emitor, polaritate semnalată cu ajutorul săgeții emitorului în simbolul tranzistorului. Direcția săgeții este asemenea direcției anodului joncțiunii unei diode, împotriva sensului real de deplasare al electronilor. Pentru tranzistorii NPN, direcția săgeții este dinspre bază spre emitor, iar în cazul tranzistorilor PNP, direcția este dinspre emitor spre bază. Colectorul nu este reprezentat în niciunul dintre cazuri cu ajutorul vreunei săgeți. Totuși, polaritatea joncțiunii bază-colector este aceeași cu polaritatea joncțiunii bază-emitor în comparație cu o diodă.

## Structura



Emitorul tranzistorului bipolar cu joncțiune de mai jos este puternic dopat, după cum indică și notația  $N^+$ . Baza are un nivel de dopaj P normal, dar aceasta este mult mai subțire în realitate decât este prezentat în această figură (a).

Procentul de dopaj al colectorului este scăzut, după cum indică notația  $N^-$ , pentru ca tensiunea de străpungere a joncțiunii colector-bază să fie cât mai mare, ceea ce înseamnă că sursa de tensiune poate alimenta tranzistorul la tensiuni mai mari. Tranzistoarele de siliciu mici, au o tensiune de străpungere de 60-80 V, dar aceasta poate ajunge la sute de volți pentru tranzistoarele de tensiune înaltă. Dar, colectorul trebuie să fie în același timp dopat puternic pentru minimizarea pierderilor ohmice (datorită rezistențelor), în cazul în care tranzistorul trebuie să conducă curenți mari. Îndeplinirea acestor cerințe contradictorii se realizează prin doparea mai puternică a



colectorului spre partea de contact metalic, și doparea mai ușoară a colectorului în apropierea bazei în comparație cu emitorul. Tensiunea de străpungere a joncțiunii emitor-bază scade până la aproximativ 7 V datorită dopării puternice a emitorului, în cazul tranzistorilor mici. Și tot datorită acestei dopări puternice, joncțiunea emitor-bază se comportă precum o diodă Zener polarizată invers.

Fabricarea mai multor tranzistoare pe același cip dă naștere unui circuit integrat, o reprezentare aproximativă a acestuia este dată în figura de mai sus (c).

## **Observație**

Calitatea tranzistorilor discreți de tip PNP este aproape la fel de bună precum cea a tranzistorilor NPN. Totuși, tranzistorii PNP integrați nu sunt la fel de buni precum cei de tipul NPN, prin urmare, circuitele integrate folosesc tranzistori de tipul NPN în marea lor majoritate.

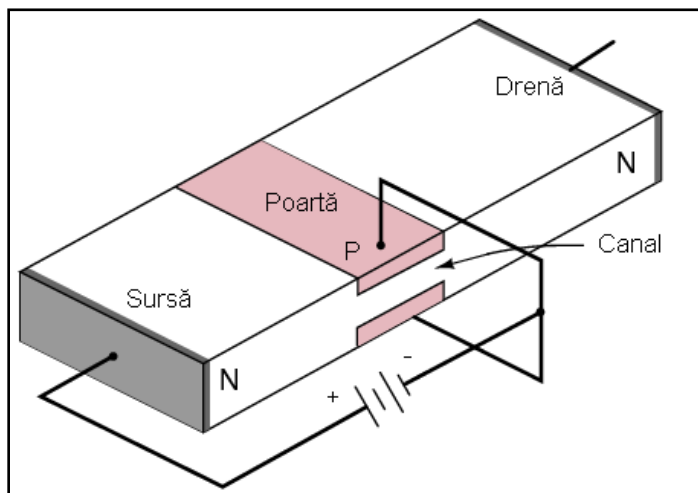
## **08. Tranzistorul cu efect de câmp (FET)**

- Conducția canalului unui tranzistor (unipolar) cu efect de câmp (FET sau JFET) se datorează unui singur tip de purtător de sarcină
- Sursa, poarta și drena unui JFET corespund emitorului, bazei și colectorului unui tranzistor bipolar
- Polarizarea inversă a porții duce la variația rezistenței canalului prin extinderea zonei de golire

## **Scurt istoric**

Tranzistorul cu efect de câmp a fost propus de Julius Liliendfel în 1926 și 1933 sub formă de patent. Shockley, Brattain și Bardeen au investigat și ei tranzistorul cu efect de câmp în 1947, dar dificultățile întâmpinate în realizarea acestuia i-au dus în schimb la dezvoltarea tranzistorului bipolar. Teoria tranzistorului cu efect de câmp a lui Shockley a fost publicată în 1952, dar tehnologia de procesare a materialelor nu era suficient de bine dezvoltată, astfel că doar în anul 1960 s-a reușit fabricarea unui dispozitiv funcțional de către John Atalla.

## **Definiție**

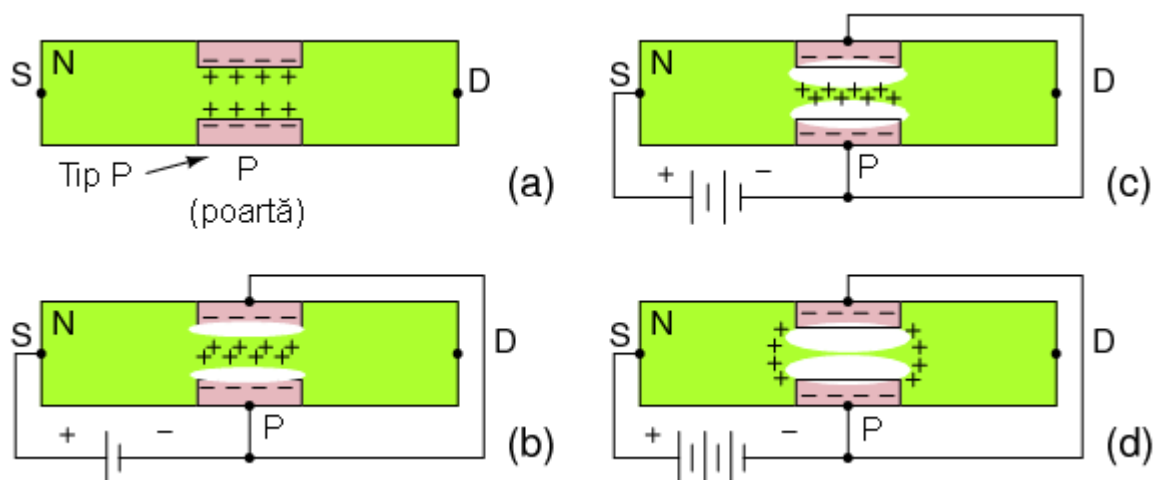


Un tranzistor cu efect de câmp (FET - field effect transistor), este un dispozitiv unipolar, ceea ce înseamnă că existența curentului depinde de un singur tip de purtători de sarcină. Dacă dispozitivul se bazează pe un material semiconductor de tip N, purtătorii de sarcină sunt electronii. Invers, pentru unul de tip P, purtătorii de sarcină sunt golurile.

## Modul de funcționare

La nivelul circuitului, funcționarea tranzistorilor cu efect de câmp este simplă. O tensiune aplicată pe poartă, elementul de intrare, controlează rezistența unei regiuni unipolare dintre sursă și drenă denumită canal; într-un dispozitiv de tip N, această regiune este reprezentată de un material semiconductor dopat de tip  $N^-$ , cu terminale la ambele capete. Sursa și drena sunt terminale echivalente cu emitorul și colectorul într-un tranzistor bipolar. Cu alte cuvinte, sursa este locul de plecare al purtătorilor de sarcină, iar drena este locul înspre care aceștia se deplasează. Poarta este echivalentă bazei tranzistorului bipolar, iar în cadrul unui dispozitiv de tip N, este reprezentată de o regiune de tip  $P^+$  (dopată puternic) prezentă pe ambele laturi și în jurul canalului din centrul semiconductorului.

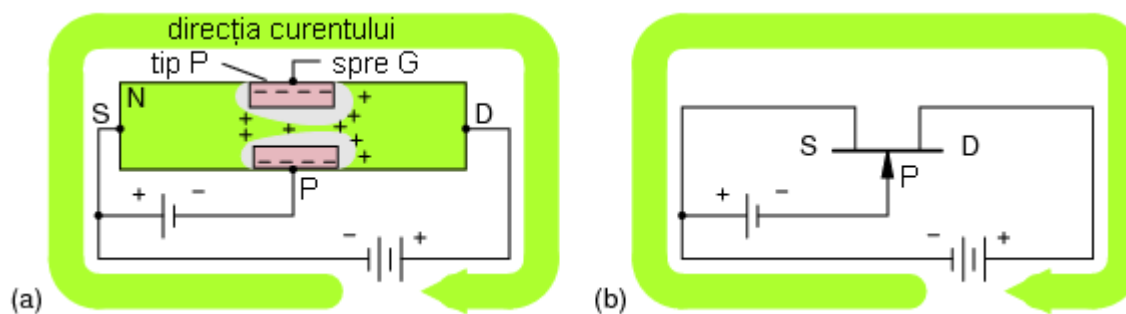
În figura de mai sus, este prezentat un tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune (JFET). Poarta constituie o joncțiune, și este polarizată invers pentru funcționarea corectă a dispozitivului. Curentul dintre sursă și drenă poate exista în ambele direcții.



În figura alăturată este reprezentată zona de golire a joncțiunii porții, datorită difuziei golurilor din regiunea de tip P (poartă) în regiunea de tip N (canal). Această difuzie duce la separarea purtătorilor de sarcină în zona joncțiunii și o zonă de golire non-conductivă la joncțiune.

Grosimea zonei de golire poate fi crescută prin aplicarea unei tensiuni moderate de polarizare inversă (figura de mai sus(b)). Acest lucru duce la creșterea rezistenței canalului sursă-drenă prin îngustarea acestuia. Creșterea în continuare a tensiunii de polarizare inversă duce la creșterea zonei de golire, scăderea grosimii canalului și creșterea rezistenței acestuia (c). Peste un anumit nivel (d), tensiunea de polarizare inversă,  $V_{GS}$  va bloca curentul prin canal, rezistența acestuia fiind foarte mare. Tensiunea de blocare,  $V_P$  este de câțiva volți în majoritatea cazurilor. Pe scurt, rezistența canalului sursă-drenă poate fi controlat cu ajutorul valorii de polarizarea inversă a porții.

Sursa și drena sunt interschimbabile, ceea ce înseamnă că există posibilitatea deplasării electronilor în oricare dintre direcții pentru o tensiune mică a bateriei drenei (0,6 V). Cu alte cuvinte, bateria drenei poate fi înlocuită cu o sursă de tensiune scăzută în curent alternativ.

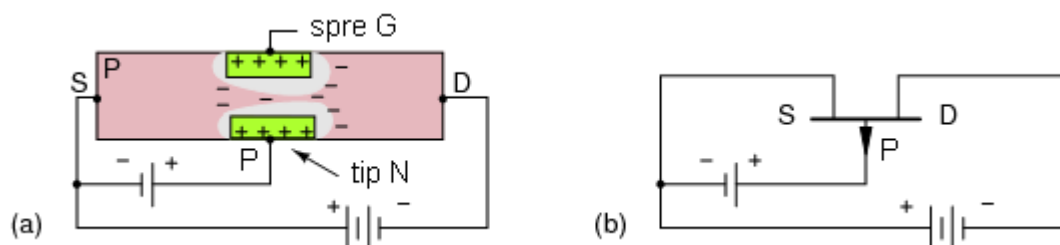


Pentru valori mai mari ale tensiunii drenei, de ordinul zecilor de volți pentru dispozitive mici, polaritatea alimentării este cea prezentată în figura alăturată (a). Atenție, în unele cărți de specialitate, poarta (P) mai este denumită și grilă (G), sau cele două notații sunt folosite chiar concomitent. Am ales în această carte să rămânem la denumirea de poartă, iar aceasta este notată corespunzător pe desene cu P. În orice caz, cele două exprimări sunt echivalente.

Această sursă de tensiune a drenei, ce nu este prezentă în figurile precedente, distorsionează zona de golire, măbind-o înspre partea drenei. Aceasta este o reprezentare mult mai corectă a tensiunilor de curent continuu ale drenei, de la câțiva volți la zeci de volți. Pe măsură ce tensiunea drenă-sursă ( $U_{DS}$ ) crește, zona de golire dinspre drenă crește spre această. Acest lucru duce și la creșterea lungimii canalului, cu efecte asupra rezistenței (crește) acestuia. Totuși, această creștere a rezistenței datorată creșterii lungimii canalului este foarte mică în comparație cu rezistența datorată polarizării inverse a porții. În figura de mai sus (b) este prezentat și simbolul schematic al unui tranzistor cu efect de câmp cu canal de tip N. Săgeata porții indică aceeași direcție ca și joncțiunea diodei, și corespunde regiunii de tip P. Celelalte două extremități (S și D), ce nu conțin nicio direcție, corespund materialului semiconductor de tip N.

În figura de mai sus este reprezentată și direcția curentului de la terminalul (-) a bateriei spre sursă (S), apoi spre drenă (D) și înspre terminalul (+) al bateriei. Acest curent poate fi controlat prin variația tensiunii de polarizare inversă a porții (P). O sarcină conectată în serie cu bateria „vede” o versiune amplificată a variației tensiunii de pe poartă.

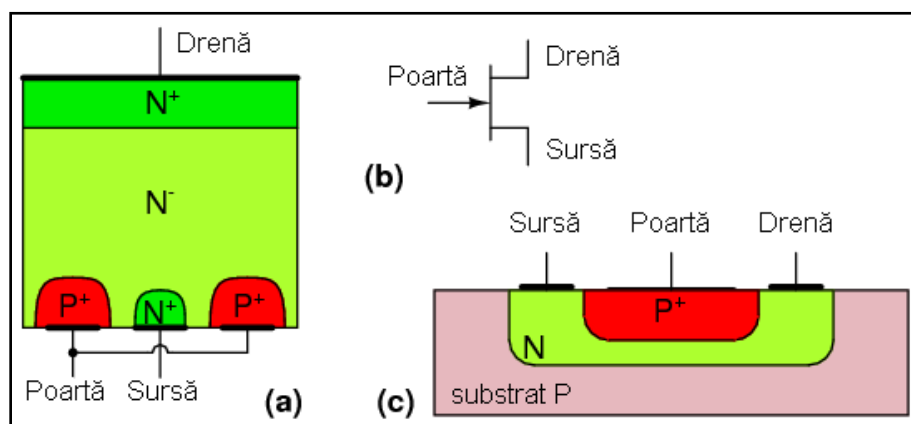
## Tranzistorul cu efect de câmp cu canal de tip P



Tranzistoarele cu efect de câmp pot fi realizate și cu canal de tip P, ceea ce înseamnă că poarta este realizată dintr-un material semiconductor dopat de tip  $N^+$  (dopat puternic). Toate sursele de tensiune sunt inversate într-un circuit cu JFET de tip P față de cel cu canal de tip N (figura alăturată (a)). Săgeata în acest caz este îndreptată dinspre poartă înspre sursa de polarizare inversă (figura alăturată (b)).

Modul de funcționare este asemănător tranzistorului cu efect de câmp cu canal de tip N prezentat mai sus.

## Confecționarea tranzistoarelor cu efect de câmp



Dispozitivele discrete sunt confecționate conform figurii alăturată (a), iar circuitele integrate cu tranzistoare cu efect de câmp, sunt confecționate conform figurii alăturate (b).

Poarta este dopată puternic,  $P^+$ , pentru obținerea unei zone de golire cât mai mari. Sursa și drenă acestui dispozitiv de tip N sunt și ele dopate puternic,  $N^+$ , pentru obținerea unei rezistențe de conexiune cât mai mici. Totuși, canalul din jurul porții este dopat ușor,  $N^-$ , pentru a permite trecerea golurilor dinspre poartă înspre canal.

## Observație

Curățenia este absolut necesară în cazul producerii tranzistorilor cu efect de câmp. Deși este posibilă producerea tranzistorilor bipolari în afara unui spațiu perfect curat, nu același lucru se poate spune și despre cei cu efect de câmp. Tranzistorul cu efect de câmp este mult mai simplu din punct de vedere conceptual decât cel bipolar, dar este foarte greu de produs.

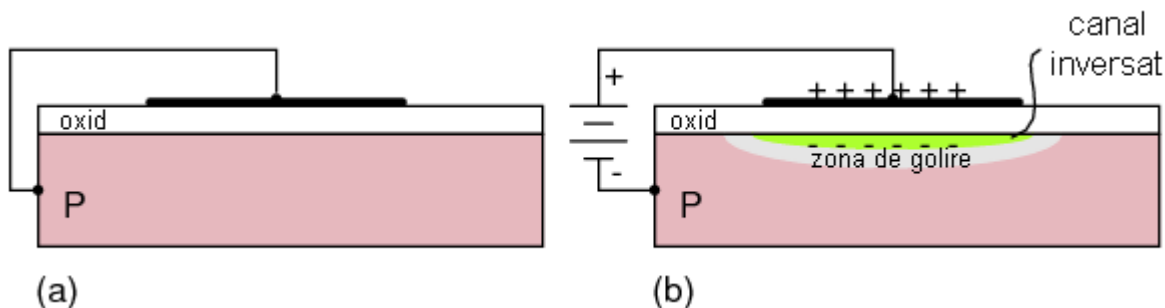
## 09. Tranzistorul cu efect de câmp cu poartă izolată (MOSFET)

- MOSFET-urile sunt dispozitive unipolare, precum FET-urile sau BJT-urile
- MOSFET-ul este un dispozitiv controlat în tensiune, precum FET-ul. O tensiune de intrare pe poartă controlează curentul dinspre sursă spre drenă
- Poarta MOSFET-ului nu necesită prezența unui curent în timpul funcționării, ci doar prezența unui curent inițial pentru încărcarea „condensatorului”

### Definiție

Tranzistorul cu efect de câmp cu poartă izolată (IGFET), cunoscut și sub numele de „tranzistor cu efect de câmp cu metal oxid” (MOSFET), este un dispozitiv derivat al tranzistorului cu efect de câmp (FET). În prezent, majoritatea tranzistorilor folosiți în circuitele integrate sunt de acest tip, cu toate că tranzistorii bipolari cu joncțiune (BJT) discreți sunt mult mai numeroși decât dispozitivele discrete de tip MOSFET. Numărul de tranzistori MOSFET dintr-un circuit integrat poate ajunge la câteva sute de milioane. Dimensiunea unui MOSFET individual este sub un micron.

### Structura și modul de funcționare

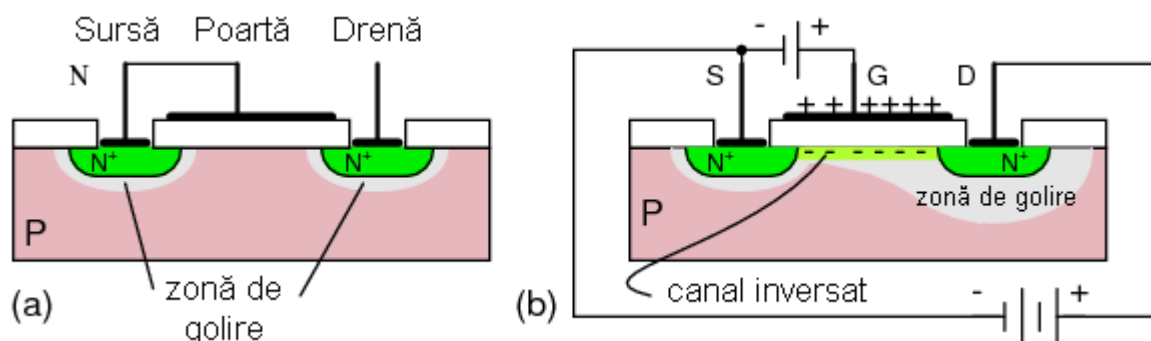


Sursa, poarta și drenea sunt asemănătoare cu cele de la FET-uri. Totuși, contactul porții nu realizează o conexiune directă cu materialul semiconductor, cum era cazul FET-urilor. Poarta unui MOSFET reprezintă un strat

metalic sau de poli-siliciu așezat peste un strat de dioxid de siliciu ( $\text{SiO}_2$ ) izolator. Poarta seamănă foarte mult cu un condensator de tip MOS.

La polarizare, polaritatea armăturilor condensatorului va deveni cea a terminalilor bateriei. Armătura inferioară, de tip P formează un canal inversat datorită excesului de electroni din apropierea oxidului format prin respingerea electronilor terminalului negativ al bateriei înspre oxid și atragerea acestora spre armătura pozitivă. Acest canal duce și la formarea unei zone de golire ce izolează canalul de restul substratului de siliciu.

## Polarizarea directă

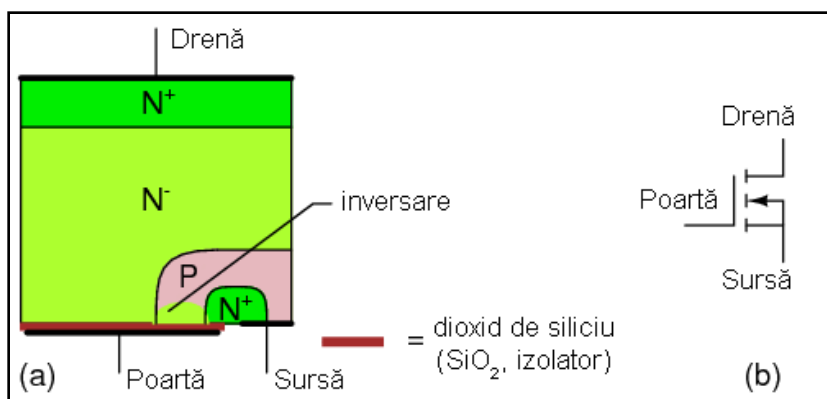


În figura alăturată, un condensator de tip MOS este plasat între o pereche de material semiconductor de tip N aflată într-un substrat de tip P. Când nu există sarcină pe condensator (a), poarta nu este polarizată, iar sursa, drenă și cele două regiuni de tip N rămân izolate din punct de vedere electric.

Aplicarea unei polarizări directe duce la încărcarea condensatorului (porții) (figura de mai sus (b)). Poarta de deasupra stratului de oxid se încarcă pozitiv de la baterie. Substratul de tip P de sub poartă se încarcă negativ. Sub poarta oxidului se va forma o regiune inversată cu un exces de electroni. Această regiune conectează sursa și drenă de tip N, formând o regiune continuă de tip N între cele două. astfel, MOSFET-ul, ca și FET-ul, este un dispozitiv unipolar. Doar un singur tip de purtător de sarcină este responsabil pentru conducție. Exemplul de mai sus este un MOSFET cu canal de tip N. Conducția unui curent mare este posibilă prin aplicarea unei tensiuni între sursă și drenă. Un circuit practic ar avea conectată o sarcină în serie cu bateria drenăi.

MOSFET-ul, ca și FET-ul, este un dispozitiv controlat în tensiune. O tensiune aplicată porții controlează curentul dinspre sursă spre drenă. Poarta nu necesită un curent permanent, ci are nevoie doar de un curent inițial pentru încărcarea condensatorului porții.

## Modul de confecționare

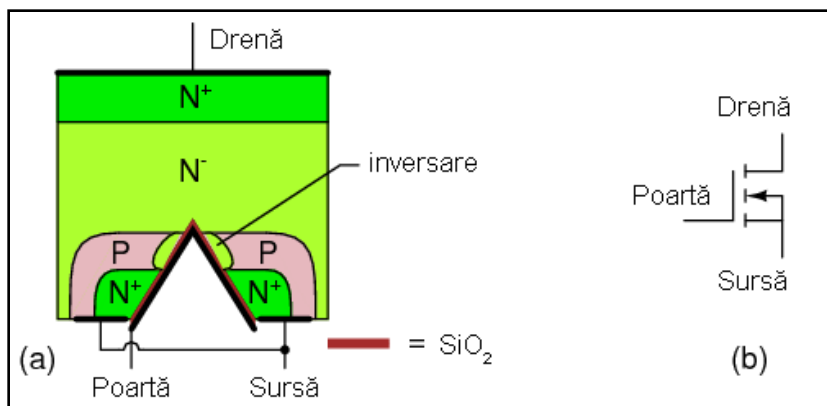


Secțiunea transversală a unui MOSFET de tip N este prezentată în figura alăturată (a). Sursa și drena sunt dopate puternic,  $N^+$ , pentru reducerea pierderilor rezistive datorită curenților dinspre sursă spre drenă.  $N^-$  indică o regiune cu dopaj scăzut. Regiunea P de sub poartă, aflată între sursă și drenă, poate fi inversată prin aplicarea

unei tensiuni de polarizare directă. Simbolul MOSFET-ului este reprezentat în figura alăturată (b).

MOSFET-urile sunt dispozitive cu patru terminale: sursă, poartă, drenă și substrat. Substratul este conectat la sursă în cazul MOSFET-urilor discrete, astfel încât dispozitivul final are doar trei terminale. MOSFET-urile realizate într-un circuit integrat au un substrat comun tuturor dispozitivelor. Această conexiune comună se regăsește de obicei la ieșirea cipului și se conectează la împământare sau la o sursă de tensiune.

### Alte variante ale MOSFET-ului



O altă variantă a MOSFET-ului, V-MOS, este de fapt un MOSFET de putere îmbunătățit, și este prezentat în figura alăturată. O altă variantă, similară, U-MOS, este mult mai ușor de produs.

## 10. Tiristorul

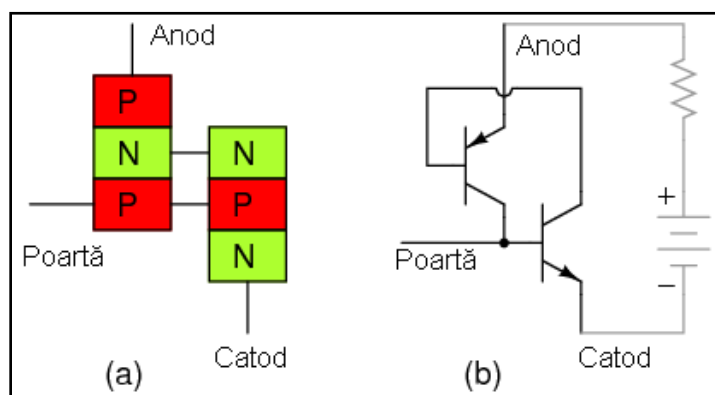
- Redresoarele controlate pe bază de siliciu (SCR) sunt cele mai des întâlnite dispozitive din familia tiristoarelor
- „Pornirea” conducției SCR-ului se realizează prin aplicarea unui impuls pozitiv porții. Conducția continuă chiar și după ce impulsul asupra porții încetează. Conducția poate fi oprită doar dacă tensiunea dintre anod și catod atinge valoarea zero
- SCR sunt folosite de obicei cu surse de tensiune de curent alternativ (sau de curent continuu pulsatoriu) datorită conducției continue
- Un dispozitiv GTO poate fi oprit prin aplicarea unui puls negativ asupra porții

## Definiție și clasificare

Tiristoarele reprezintă o plajă largă de dispozitive semiconductoare bipolare folosind patru (sau mai multe) straturi alternante N-P-N-P. În categoria tiristoarelor intră: redresoare controlate pe bază de siliciu (SCR), TRIAC-uri, DIAC-uri, tiristoare tip GTO, tranzistoare uni-joncțiune (UJT), tranzistoare uni-joncțiune programabile (PUT). Vom analiza aici doar SCR-ul, deși vom menționa și GTO-ul.

Tiristorul cu patru straturi a fost propus de Shockley în 1950, deși practic, acesta a fost construit mulți ani mai târziu de către General Electric. Puterile suportate de SCR ajung până la ordinul MW.

## Structura și modul de funcționare

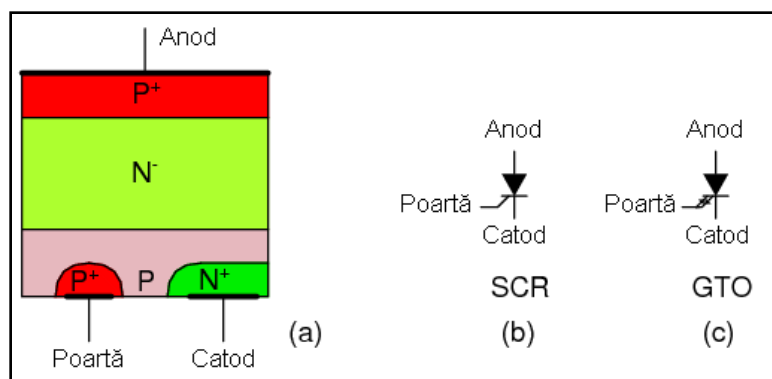


Redresorul controlat pe bază de siliciu este o diodă cu patru straturi și o poartă, asemenea figurii alăturată (a).

Dacă este „pornit”, acesta se comportă precum o diodă, pentru o singură polaritate a curentului. Dacă nu este „pornit”, nu conduce curent. Modul de funcționare poate fi explicat cu ajutorul conexiunii echivalente realizate din tranzistoare bipolare cu joncțiune din figura (b).

Un semnal de pornire pozitiv este aplicat între poartă și catod. Tranzistorul NPN echivalent va începe să conducă curent ceea ce va duce și la declanșarea conducției tranzistorului PNP. În acest moment, tranzistorul NPN va conduce curent chiar și în absența semnalului pe poartă, Odată ce un dispozitiv SCR începe să conducă, o va face atâta timp cât este prezentă o tensiune pe anod (infinat, în cazul circuitului cu baterie de mai sus).

## Modul de confecționare



Catodul unui SCR, ce corespunde emitorului echivalent al tranzistorului NPN este puternic dopat,  $N^+$ . Anodul, ce corespunde emitorului echivalent al tranzistorului PNP, este și el puternic dopat,  $P^+$ . Celelalte două regiuni din mijloc, ce corespund bazei și colectorului tranzistoarelor echivalente, sunt dopate mai ușor,  $N^-$  și  $P$  (figura alăturată (a)). Simbolurile

tiristoarelor SCR și GTO sunt prezentate de asemenea în figura alăturată ((b) respectiv (c)).



## 03 - Dioda și redresorul

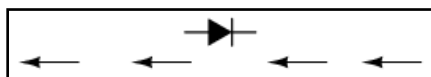
### 1. Principiul de funcționare al diodei

- Dioda este un component electric ce se comportă precum o valvă uni-direcțională de curent
- Spunem că dioda este polarizată direct atunci când aceasta permite trecerea curentului prin diodă
- Spunem că dioda este polarizată invers atunci când trecerea curentului prin diodă este blocată
- Căderea de tensiune la bornele unei diode polarizate direct poartă numele de tensiune de polarizare directă, și este de 0,7 V pentru diodele din siliciu și 0,3 V pentru cele din germaniu. Această tensiune variază foarte puțin pentru diferite valori ale curentului și temperaturii
- Tensiunea de polarizare inversă maximă pe care o poate suporta o diodă fără apariția fenomenului de „străpungere” ce duce inevitabil la distrugerea acesteia, se numește tensiune de străpungere,  $V_s$

### Definiția diodei

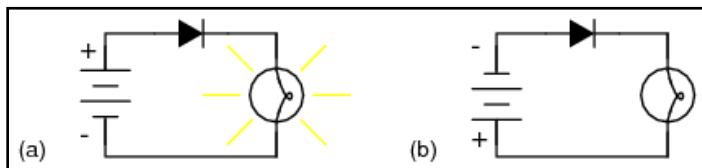
Dioda este un dispozitiv electronic ce permite trecerea curentului doar într-o singură direcție. Cea mai folosită diodă în circuitele electronice este cea semiconductoare, deși există și alte tehnologii.

### Simbolul diodei



Simbolul diodelor semiconductoare este prezentat în figura alăturată; săgețile indică deplasarea reală a electronilor prin diodă.

### Conectarea în circuit



La conectarea într-un circuit simplu, format dintr-o baterie și o lampă, dioda fie va permite trecerea curentului spre lampă, fie o va bloca, în funcție de polaritatea tensiunii aplicate.

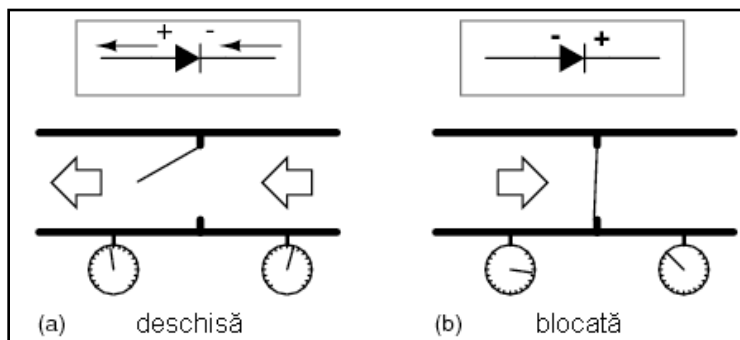
### Polarizarea directă

Atunci când polaritatea bateriei este astfel încât este permisă trecerea electronilor prin diodă, spunem că dioda este polarizată direct.

## Polarizarea inversă

Invers, când trecerea electronilor este blocată datorită inversării bateriei, spunem că dioda este polarizată invers. Putem să ne gândim la diodă ca la un întrerupător: „închisă”, când este polarizată și „deschisă” când este polarizată invers.

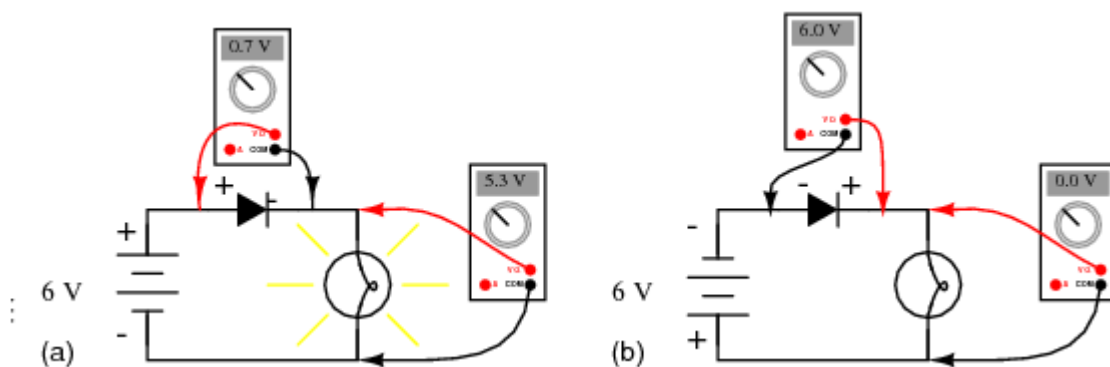
## Dioda precum o supapă de închidere (analogie)



Comportamentul diodei este analog comportamentului dispozitivului hidraulic denumit supapă de închidere. O supapă de închidere permite trecerea fluidului doar într-o singură direcție.

Supapele de închidere sunt de fapt dispozitive controlate cu ajutorul presiunii: acestea se deschid și permit trecerea fluidului dacă „polaritatea” presiunii pe suprafața lor este corectă. Dacă „polaritatea” presiunii este de sens contrar, diferența de presiune pe suprafața valvei va duce la închiderea acesteia, iar curgerea fluidului nu mai este posibilă. Același lucru este valabil și în cazul diodelor, doar că în acest caz presiunea este reprezentată de tensiune.

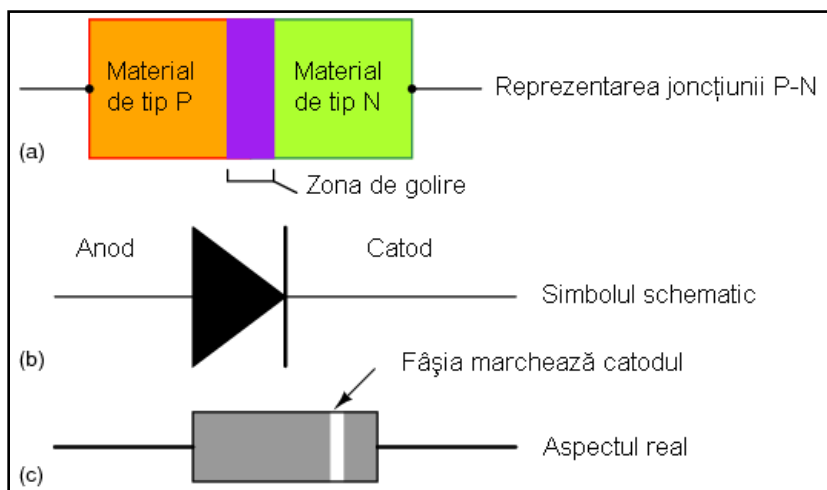
## Explicație



Să reluăm circuitul de mai sus, dar folosind de această dată un aparat de măsură pentru determinarea căderilor de tensiune pe diferite componente ale circuitului.

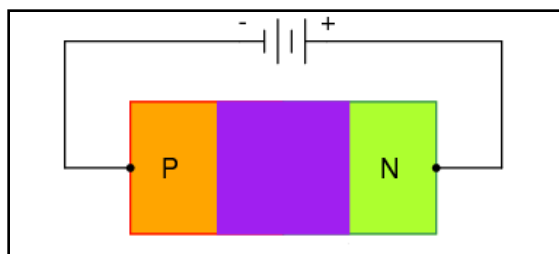
O diodă polarizată direct conduce curent și prezintă o cădere mică de tensiune la bornele sale, astfel încât majoritatea tensiunii disponibile la bornele sursei de alimentare se regăsește pe lampă (sarcină). Dacă polaritatea

bateriei este inversată, dioda devine polarizată invers, și toată tensiunea disponibilă la bornele sursei de alimentare se regăsește pe diodă, iar căderea de tensiune pe sarcină va fi egală cu zero. Putem considera dioda ca fiind un întrerupător „automat” (se închide când este polarizat direct și se deschide când este polarizat invers). Singura diferență notabilă este căderea de tensiune mult mai mare la bornele diodei (0,7 V), față de căderea de tensiune pe un întrerupător mecanic (câțiva mV).



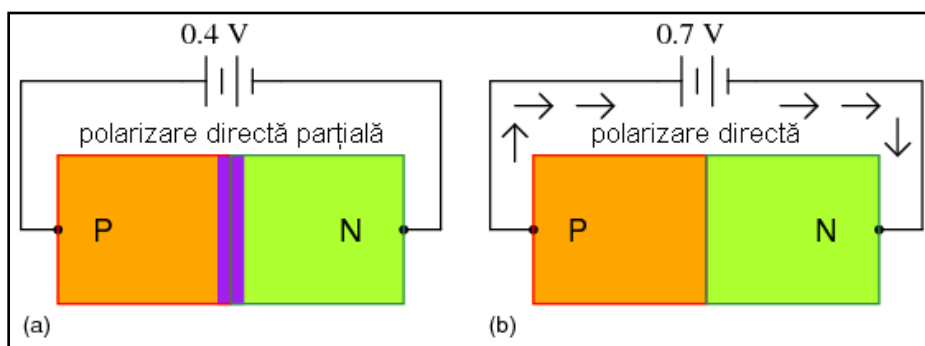
Această cădere de tensiune de polarizare directă se datorează acțiunii zonei de golire formată de joncțiunea P-N sub influența tensiunii aplicate. Dacă nu există nicio tensiune aplicată la bornele diodei semiconductoare, existența zonei de golire înguste în jurul joncțiunii P-N previne apariția curentului (figura alăturată (a)). Purtătorii de sarcină aproape că lipsesc în zona de golire, și prin urmare aceasta se

comportă precum un izolator.



Dacă dioda este polarizată invers, zona de golire se extinde și blochează și mai bine trecerea curentului prin dispozitiv.

## Tensiunea de polarizare directă



Dacă dioda este polarizată direct însă, zona de golire devine mult mai subțire (figura alăturată (a), polarizare parțială), iar rezistența față de curent scade. Pentru funcționarea corectă a diodei însă, zona de golire trebuie să dispară

complet. Acest lucru se poate realiza prin aplicarea unei anumite tensiuni minime, denumită tensiune de polarizare directă (figura alăturată (b)), care pentru diodele de siliciu este în mod normal 0,7 V, iar pentru cele de germaniu de doar 0,3 V.

Căderea de tensiune la bornele diodei rămâne aproximativ constantă pentru o gamă largă de curenți prin diodă. Pentru analiza circuitelor electronice simplificate, putem considera căderea de tensiune pe diodă ca fiind constantă (nu depinde de valoarea curentului prin diodă).

## Ecuția diodei

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{qV_D}{NkT}} - 1 \right)$$

unde,

$I_D$  = curentul diodei (A)

$I_S$  = curentul de saturație (aproximativ  $10^{-12}$  A)

$e$  = constanta lui Euler (2,718)

$q$  = sarcina electronului ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)

$V_D$  = tensiunea aplicată la bornele diodei (V)

$N$  = factor de idealitate sau coeficient de emisie (între 1 și 2)

$k$  = constanta lui Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ )

$T$  = temperatura joncțiunii (K)

Ecuția exactă ce descrie curentul printr-o diodă poartă numele de ecuația diodei. Termenul  $q/KT$  descrie tensiunea produsă în joncțiunea P-N datorită acțiunii temperaturii, și poartă numele de *tensiune termică*, sau  $V_t$ . La temperatura camerei, această temperatură este de aproximativ 26 mV.

## Ecuția simplificată a diodei

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{0,026}} - 1 \right)$$

unde,

$I_D$  = curentul diodei (A)

$I_S$  = curentul de saturație (aproximativ  $10^{-12}$  A)

$e$  = constanta lui euler (2,718)

$V_D$  = tensiunea aplicată la bornele diodei (V)

Cunoscând acest fapt, și considerând factorul de idealitate ca fiind 1, putem simplifica ecuația de mai sus și să ajungem la următoarea relație.

Aceste ecuații nu trebuie neapărat luate în considerare la analiza circuitelor simple cu diode, ci este menționată aici doar pentru a înțelege faptul că există o variație a căderii de tensiune la bornele diodei pentru diferite valori ale curenților prin diodă. Această variație este foarte mică, aceasta fiind și motivul pentru care se consideră că, la bornele diodei, căderea de tensiune rămâne constantă la 0,7 (siliciu) sau 0,3 V (germaniu). Totuși, unele circuite folosesc în mod intenționat relația curent/tensiune a joncțiunii P-N, și ele pot fi înțelese doar în contextul acestei ecuații. De asemenea, din moment ce temperatura este un factor în ecuația diodei, o joncțiune P-N polarizată direct poate fi folosită ca un dispozitiv de determinare a temperaturii, iar această utilizare poate fi înțeleasă doar dacă înțelegem în primul rând ecuația diodei de mai sus.

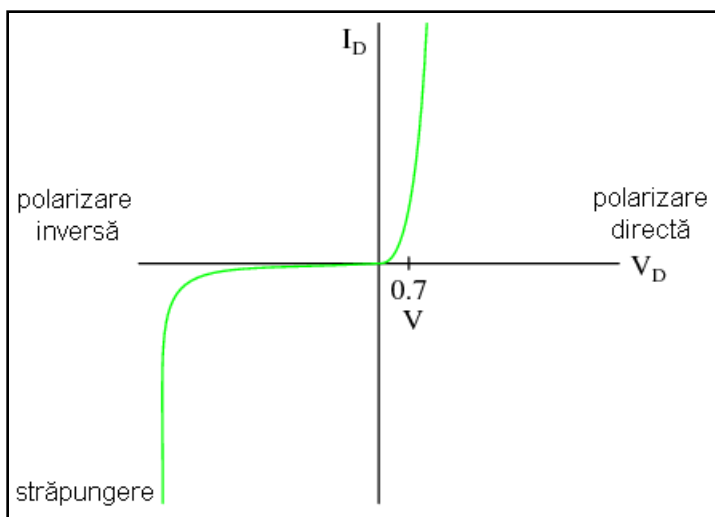
## Curentul invers

Deși o diodă polarizată invers, nu permite curentului să treacă prin ea datorită extinderii zonei de golire, în realitate există un mic curent de scurgere ce trece prin diodă chiar și la polarizarea inversă, iar acest curent poartă numele de curent invers. Curentul invers poate fi însă ignorat pentru majoritatea aplicațiilor.

## Tensiunea de străpungere

Dioda nu poate suporta o tensiune de polarizare inversă infinit de mare. Dacă această tensiune devine prea mare, dioda va fi distrusă datorită unei condiții denumită străpungere. Această tensiune inversă maximă poartă numele de tensiune de străpungere (inversă), notată cu  $V_s$ . Tensiunea de străpungere crește odată cu creșterea temperaturii și scade cu scăderea temperaturii - exact invers față de tensiunea de polarizare directă.

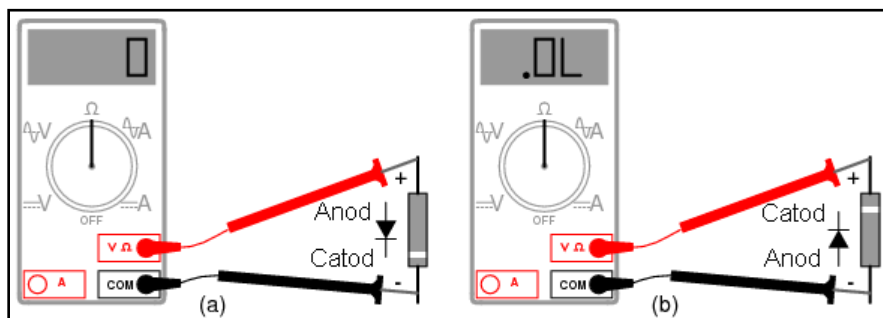
## Variația curent-tensiune a diodei



Alăturat este prezentat graficul curent-tensiune al diodei.

## 2. Verificarea diodei cu ohmmetrul

### Conectarea diodei la ohmmetru



Din moment ce o diodă nu este nimic altceva decât o valvă uni-direcțională de curent, putem verifica acest lucru folosind un ohmmetru alimentat în curent continuu (cu baterie). La conectarea diodei într-o anumită direcție, aparatul de măsură ar trebui

să indice o rezistență foarte mică (figura de alăturată (a)), iar la conectarea inversă, aparatul ar trebui să indice o rezistență foarte mare (figura alăturată (b)). („OL” reprezintă o valoare prea mare ce nu poate fi indicată de aparatul de măsură (din engl. Over-Limit); în acest caz, putem considera rezistența ca fiind infinită).

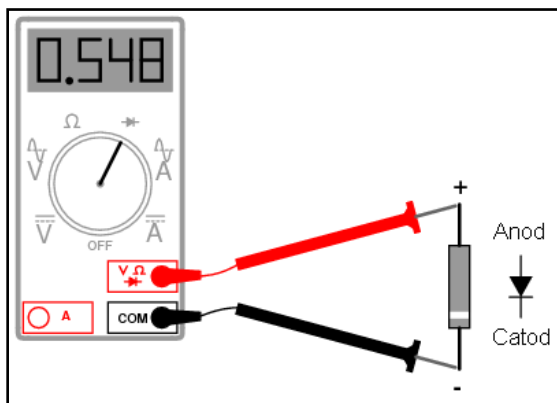
### Folosirea corectă ohmmetrului

Desigur, determinarea polarității diodei (care terminal este anodul și care catodul) necesită ca în primul rând să cunoaștem care din sondele aparatului de măsură este cea pozitivă (+) și care sondă este cea negativă (-), atunci când aparatul este trecut pe funcția  $\Omega$ . La majoritatea multimetrelor digitale, sonda roșie reprezintă terminalul pozitiv iar sonda neagră reprezintă terminalul negativ, atunci când aparatul este setat pe măsurarea rezistențelor. Totuși, acest lucru nu este valabil pentru toate multimetrele, existând posibilitatea ca sonda neagră să fie pozitivă (+) și cea roșie negativă (-).

### Neajunsuri

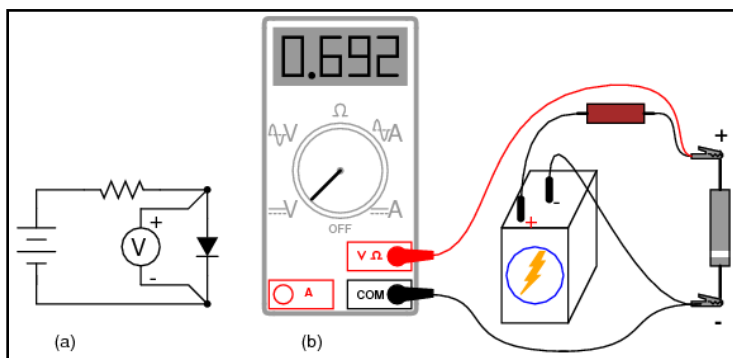
Problema folosirii unui ohmmetru pentru verificarea unei diode, este că indicația afișajului are doar valoare calitativă, nu și cantitativă. Cu alte cuvinte, un ohmmetru poate doar să ne spună dacă dioda funcționează (dacă aceasta conduce curent), dar valoarea rezistenței obținute din măsurătoare nu ne este de niciun folos. Dacă un ohmmetru indică o valoare de  $1,73\Omega$  la polarizarea directă, acea stă valoare nu este folositoare unui tehnician sau proiectantului circuitului. Această valoare nu reprezintă nici căderea de tensiune la polarizarea directă și nici rezistența materialului semiconductor din diodă, ci este o mărime dependentă de ambele cantități și variază substanțial în funcție de ohmmetrul folosit pentru efectuarea citirii.

### Utilizarea funcției speciale de „verificare diodă”



Din acest motiv, unele multimetre digitale sunt prevăzute cu o funcție specială de „verificare a diodei” ce indică tensiunea reală de polarizare directă a diodei, în volți, în loc de o rezistență în ohmi. Principiul de funcționare al acestor aparate de măsură constă în forțarea unui curent mic prin diodă și măsurarea căderii de tensiune dintre cele două borne ale diodei.

### Folosirea unui circuit special



Totuși, valoarea tensiunii de polarizare directă indicată de aceste aparate va fi de obicei mai mică decât valoarea „normală” de 0,7 V, deoarece curentul furnizat de aparatul de măsură prin diodă este foarte mic. Dacă nu avem la dispoziție un multimetru cu funcție de verificare a diodelor, sau dacă vrem să măsurăm tensiunea de polarizare directă a diodei folosind un curent mai mare,

putem realiza un circuit electric precum în figura alăturată, folosind o baterie, un rezistor și un voltmetru.

## 3. Parametrii caracteristici ai diodei

### Scop

Pe lângă tensiunea de polarizare directă ( $V_f$ ) și tensiunea de străpungere ( $V_s$ ), mai există mulți alți parametri importanți ai diodelor pentru proiectarea circuitelor și alegerea componentelor. Producătorii de dispozitive semiconductoare oferă aceste specificații ale produselor în publicații denumite cataloage. Cataloagele producătorilor de componente pot fi găsite în cărți de specialitate sau pe internet.

Pentru simplificarea explicațiilor, am folosit în unele situații „tensiunea directă” în loc de „tensiunea de polarizare directă” sau „curentul direct” în loc de „curentul de polarizare direct”. Cele două exprimări sunt însă echivalente.

## Lista parametrilor

Principalele caracteristici ale diodelor, trecute în cataloage, sunt următoarele:

**$V_{RRM}$  - tensiunea inversă repetitivă maximă**, este tensiunea maximă inversă la care poate rezista dioda, atunci când această tensiune este atinsă în mod repetat. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$V_R$  sau  $V_{DC}$  - tensiunea maximă inversă de curent continuu**, este valoarea maximă a tensiunii la care dioda poate funcționa neîntrerupt, fără distrugerea acesteia. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$V_F$  - tensiunea (de polarizare) directă maximă**, de obicei este specificată împreună cu valoarea curentului direct. Ideal, această valoare ar fi zero: ideal, dioda nu ar prezenta niciun fel de opoziție în fața deplasării electronilor. În realitate, tensiunea directă este descrisă de ecuația diodei.

**$I_{F(AV)}$  - valoarea maximă (medie) a curentului direct**, valoarea maximă medie a curentului pe care bobina o poate suporta la polarizarea directă. Această limitare este practic o limitare termică: câtă căldură poate „suporta” joncțiunea P-N, având în vedere că puterea disipată reprezintă produsul dintre curent și tensiune, iar tensiunea de polarizare directă depinde atât de curent cât și de temperatura joncțiunii. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$I_{FSM}$  sau  $i_{f(vârf)}$  - curentul de polarizare directă maxim**, reprezintă curentul de vârf maxim pe care dioda îl poate conduce la polarizare directă, fără ca acest curent să ducă la distrugerea diodei. Din nou, această valoare este limitată de capacitatea termică a joncțiunii diodei, și este de obicei mult mai mare decât valoarea curentului mediu datorită inerției termice. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$P_D$  - puterea maximă disipată totală**, reprezintă valoarea puterii (în Watt) pe care dioda o poate disipa fără ca această putere să ducă la distrugerea diodei. Această valoare este limitată de capacitatea termică a diodei. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$T_J$  - temperatura de funcționare a joncțiunii**, reprezintă temperatura maximă admisă a joncțiunii P-N a diodei, valoare dată de obicei în  $^{\circ}C$ . Căldura reprezintă punctul critic al dispozitivelor semiconductoare: acestea trebuie menținute la o temperatură cât mai apropiată de temperatura camerei pentru funcționarea lor corectă și o durată de funcționare cât mai lungă.

**$T_{STG}$  - temperatura de depozitare**, reprezintă valoarea temperaturii de stocare a diodelor (nepolarizate).

**$R(\Theta)$  - rezistența termică**, reprezintă diferența dintre temperatura joncțiunii și temperatura aerului exterior diodei ( $R(\Theta)_{JA}$ ), sau dintre joncțiune și contacte ( $R(\Theta)_{JL}$ ), pentru o anumită putere disipată. Valoarea este exprimată în  $^{\circ}C/W$ . Ideal, această valoare ar fi zero, ceea ce ar însemna că învelișul (carcasa) diodei ar fi un conductor și radiator termic perfect, fiind capabil să transfere energie sub formă de căldură dinspre joncțiune spre mediul exterior (sau spre contacte) fără nicio diferență de temperatură existentă în grosimea carcasi. O rezistență termică ridicată se traduce prin faptul că dioda va stoca o temperatură excesivă în jurul joncțiunii (punctul critic), în ciuda eforturilor susținute de răcire a mediului exterior diodei; acest lucru duce la limitarea puterii maxime disipate.

**$I_R$  - curentul maxim de polarizare inversă**, reprezintă valoarea curentului prin diodă la polarizarea inversă și aplicarea tensiunii de polarizare inversă maximă de curent continuu ( $V_{DC}$ ). Mai este cunoscut și sub



numele de **curent de scăpări**. Ideal, această valoare ar fi zero, deoarece o diodă perfectă ar bloca toți curenții atunci când este polarizată invers. În realitate, această valoare este mică în comparație cu valoarea curentului maxim de polarizare directă.

**$C_J$  - capacitatea tipică a joncțiunii**, reprezintă capacitatea intrinsecă joncțiunii, datorită comportării zonei de golire precum un dielectric între anod și catod. Această valoare este de obicei foarte mică, de ordinul picofarazilor (pF).

**$t_{rr}$  - timpul de revenire invers**, reprezintă durata de timp necesară „stingerii” diodei atunci când tensiunea la bornele sale alternează între polarizare directă și polarizare inversă. Ideal, această valoare ar fi zero: dioda se „stinge” imediat după inversarea polarității. Pentru o diodă redresoare tipică, timpul de revenire este de ordinul zecilor de microsecunde (ms); pentru o diodă de comutație rapidă, acest timp poate ajunge la doar câteva nanosecunde (ns).

## Observație

Majoritatea acestor parametri variază cu temperatura sau alte condiții de operare, prin urmare, o singură valoare nu poate descrie complet niciun parametru. Prin urmare, producătorii pun la dispoziție grafice ale variațiilor parametrilor cu temperatura (sau alte variabile).

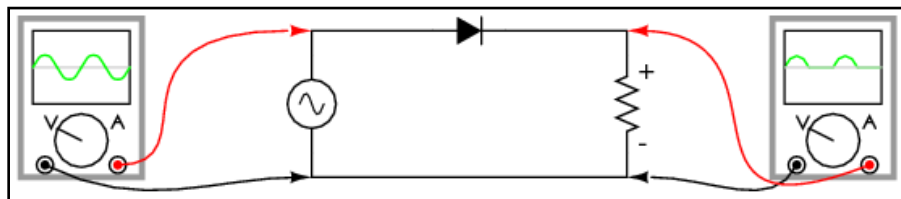
## 4. Circuite redresoare

- Redresarea este transformarea curentului alternativ în curent continuu
- Un redresor mono-alternanță este un circuit ce permite aplicarea doar a unei semi-perioade (o jumătate de perioadă) a tensiunii de curent alternativ asupra sarcinii, rezultând într-o polaritate non-alternantă a căderii de tensiune a sarcinii. Tensiunea de curent continuu rezultată prezintă o „pulsatie” semnificativă
- Un redresor dublă alternanță este un circuit ce transformă întreaga perioadă (ambele semi-perioade) a tensiunii de curent alternativ într-o serie de pulsuri neîntrerupte de tensiune de aceeași polaritate. Tensiunea de curent continuu rezultată prezintă un număr mai mic de pulsuri
- Redresarea tensiunii de curent alternativ polifazate rezultă într-o formă de undă de curent continuu mult mai „netedă” (tensiune de riplu mult mai scăzută) decât redresarea tensiunii monofazate

## Definiția redresării

Cea mai populară aplicația a diodelor este redresarea. Pe scurt, redresarea reprezintă transformarea curentului alternativ în curent continuu. Acest lucru implică folosirea unui dispozitiv ce permite trecerea electronilor doar într-o singură direcție, iar dioda realizează tocmai acest lucru.

## Redresorul mono-alternanță



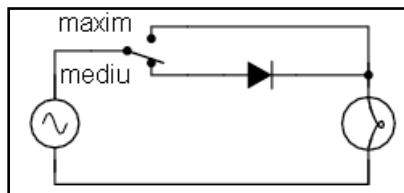
undă de curent alternativ dinspre sursă înspre sarcină.

Cel mai simplu circuit de redresare îl reprezintă redresorul mono-alternanță. Acesta permite trecerea doar a unei jumătăți a formei de

## Neajunsuri

Pentru majoritatea aplicațiilor de putere însă, redresarea mono-alternanță nu este suficientă. Conținutul **armonic** al unde de ieșire este foarte mare și prin urmare dificil de filtrat. Mai mult, sursa de tensiune alternativă este „văzută” de sarcină doar odată la fiecare jumătate de perioadă, ceea ce înseamnă că mare parte din capacitatea sursei nu este folosită.

## Utilizare

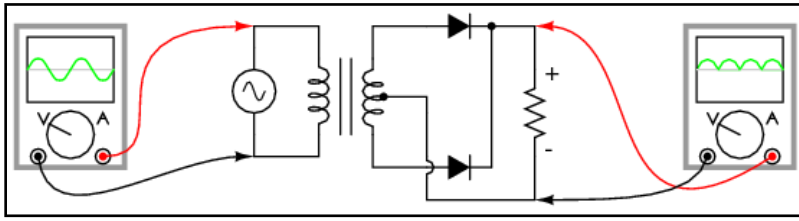


Redresarea mono-alternanță este totuși o modalitate foarte ușoară de reducere a puterii generate pe o sarcină rezistivă. Unele comutatoare cu rezistență reglabilă folosite la lămpi, aplică întreaga tensiune de curent continuu pe filamentul „lămpii” în poziția „maxim”, și doar o jumătate (folosind un redresor mono-alternanță) din tensiunea maximă disponibilă pe cealaltă poziție, pentru o intensitate luminoasă mai scăzută.

Când întrerupătorul este în poziție mediu, lampa incandescentă primește aproximativ jumătate din puterea disponibilă la sursa de curent alternativ. Datorită faptului că forma de undă mono-alternanță pulsează mult mai rapid decât timpul necesar pentru încălzirea și răcirea filamentului, lampa nu „clipește”, ci, filamentul ei pur și simplu operează la o temperatură mai mică decât temperatura normală de funcționare.

## Redresor dublă alternanță cu punct median

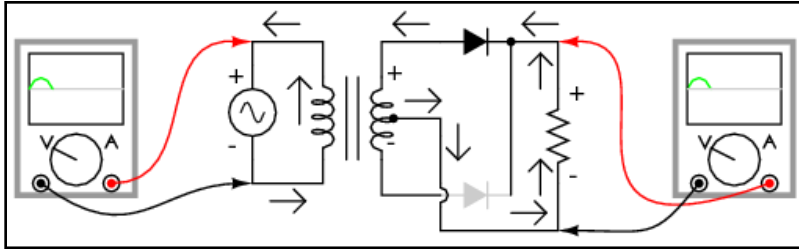
Pentru redresarea și folosirea ambelor alternanțe a undelor sinusoidale, avem nevoie de o altă configurație a circuitului redresor, și anume, un redresor dublă alternanță.



Una dintre posibilități este realizarea redresorului cu punct median, folosind un transformator cu priză mediană pe înfășurarea secundară și două diode.

Putem înțelege mult mai bine funcționarea acestui redresor dacă luăm pe rând fiecare jumătate de perioadă (semi-perioadă).

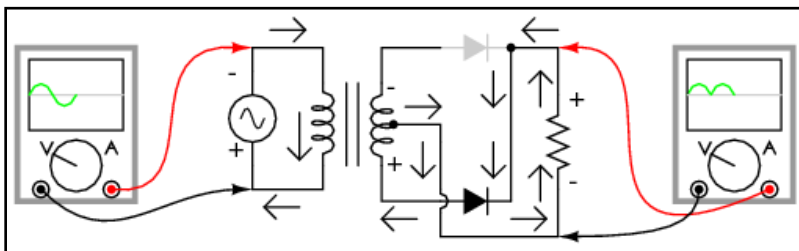
### Prima semi-perioadă



Să considerăm de exemplu prima jumătate a perioadei, când polaritatea tensiunii de alimentare este pozitivă (+) sus și negativă (-) jos. În această situație, doar dioda de sus va conduce, iar dioda de jos este blocată.

Sarcina „vede” prima jumătate a formei de undă sinusoidale, pozitiv sus și negativ jos. Doar partea de sus a înfășurării secundare a transformatorului conduce curent în acest caz.

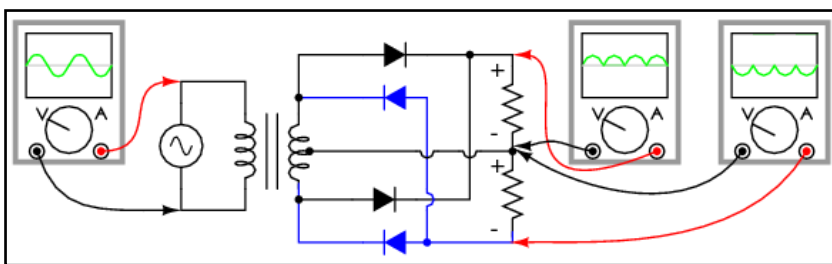
### A doua semi-perioadă



În a doua parte a perioadei, polaritatea tensiunii alternative se inversează. În acest caz, cealaltă diodă, cea de jos, și cealaltă jumătate a secundarului transformatorului, vor conduce curent, iar celelalte porțiuni ale

circuitului ce au fost active la pasul precedent, nu vor conduce curent. Sarcina „vede” și în acest caz o jumătate de formă de undă sinusoidală, de *aceeași* polaritate ca și în cazul precedent: pozitiv în partea de sus și negativ în partea de jos.

### Redresor dublă alternanță cu polaritate dublă



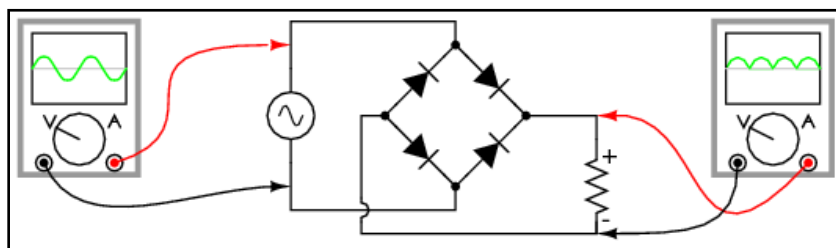
Polaritatea sarcinii poate fi inversată prin inversarea direcțiilor diodelor. Mai mult, diodele inversate pot fi conectate în paralel cu configurația pozitivă deja existentă. Rezultatul este un redresor dublă alternanță cu polaritate dublă.

Modul de conectare al diodelor este același ca și la redresorul în punte.

## Dezavantaje

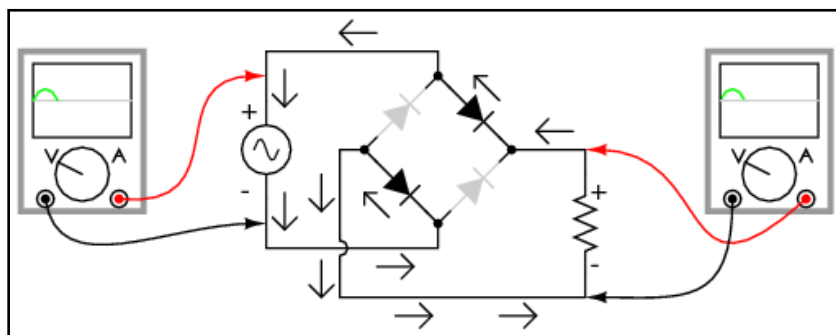
Un mare dezavantaj al acestei configurații este necesitatea folosirii unui transformator cu priză mediană pe înfășurarea secundară. Dacă circuitul în cauză este un circuit de putere mare, mărimea și costul unui astfel de transformator pot fi suficient de mari. Prin urmare, redresorul dublu alternanță cu punct median este folosit doar în aplicațiile de putere mică.

## Redresor dublă alternanță în punte (punte redresoare)



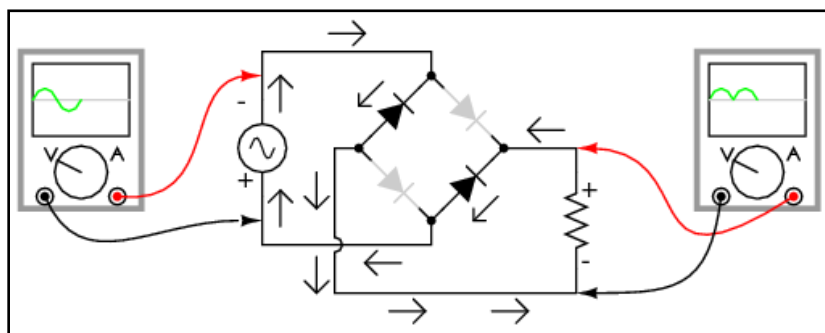
Probabil că cel mai popular redresor este cel dublă alternanță în punte. Aceste utilizează patru diode conectate în punte.

### Semi-perioadele pozitive



Direcția curentului pentru semi-perioadele pozitive este prezentată în figura alăturată.

### Semi-perioadele negative

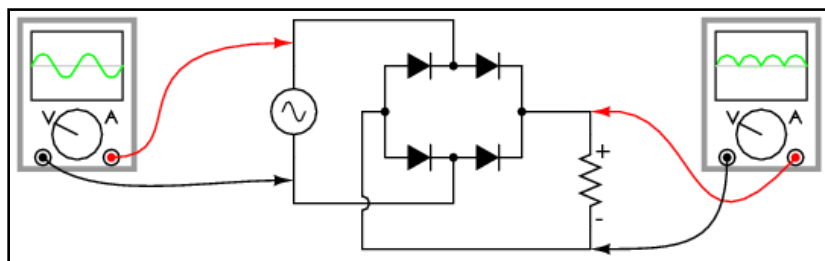


Direcția curentului pentru semi-perioadele negative este prezentată în figura alăturată.

## Avantaje și dezavantaje

Indiferent de polaritatea intrării, curentul prin sarcină are aceeași direcție de curgere. Cu alte cuvinte, o semi-perioadă negativă la sursă este o semi-perioadă pozitivă pe sarcină. Curgerea curentului are loc prin două diode serie, pentru ambele polarități. Astfel, căderea de tensiune pierdută dinspre sursă spre sarcină datorită diodelor este dublă ( $0,7 \cdot 2 = 1,4$  V pentru Si) față de redresorul dubă alternanță cu punct median. Acest dezavantaj reprezintă însă o problemă doar pentru sursele cu o tensiune de alimentare foarte scăzută.

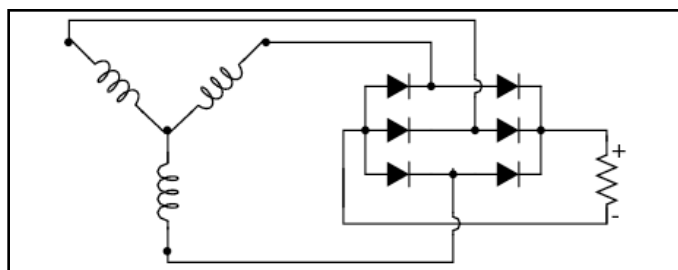
### Reprezentarea echivalentă



sunt poziționate orizontal, și toate indică în aceeași direcție.

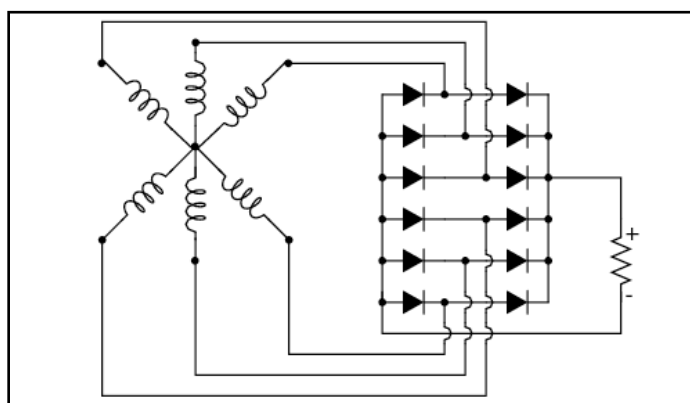
Modul corect de așezare în punte al diodelor poate prezenta pentru începători unele dificultăți. O reprezentare alternativă, dar echivalentă, a acestui circuit este mult mai ușor de ținut minte și de înțeles. Este exact același circuit, doar că toate diodele

### Configurație trifazată



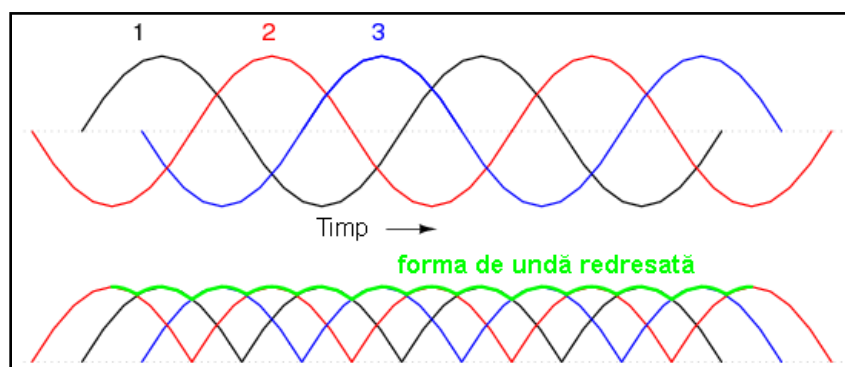
Un avantaj al acestei notații este că poate fi ușor aplicată unei versiuni trifazate a redresorului.

### Configurație polifazată



...sau oricărei configurații polifazate.

### Forma de undă a tensiunii redresate



În cazul redresării unui circuit de curent alternativ polifazat, suprapunerea pulsurilor defazate produce o tensiune de curent continuu mult mai „netedă” (cu un conținut mai mic de curent alternativ) decât cea produsă prin redresarea unei singure faze de curent alternativ. Acesta este un avantaj important în circuitele

redresoare de putere, unde doar mărimea fizică a componentelor necesare pentru realizarea filtrării ar impune unele limite.

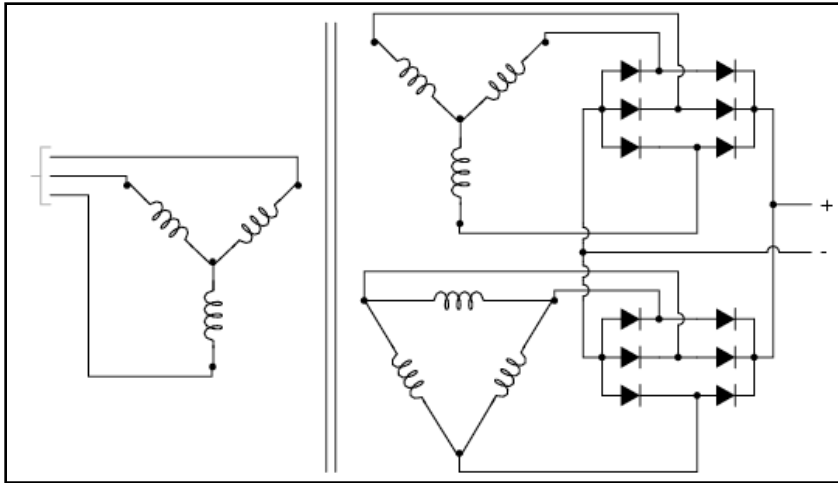
### **Tensiunea de riplu**

Indiferent de tipul redresării - monofazată sau polifazată - cantitatea de tensiunea alternativă „amestecată” cu tensiunea de curent continuu de ieșire a redresorului, poartă numele de tensiune de riplu, sau simplu *riplu*. În majoritatea cazurilor, din moment ce la ieșire dorim o tensiune de curent continuu pură, riplul reprezintă o tensiune nedorită. Dacă puterile implicate nu sunt foarte mari, se pot folosi rețele de filtrare pentru reducerea riplului tensiunii de ieșire.

### **Numărul pulsurilor semnalului redresat**

Câteodată, metoda rectificării (redresării) este descrisă numărând „pulsurile” tensiunii de curent continuu pentru fiecare  $360^\circ$  electrice. Un redresor monofazat, mono-alternanță, este prin urmare un redresor cu un puls, deoarece produce un singur puls într-o perioadă completă ( $360^\circ$ ) a formei de undă alternative. Un redresor monofazat, dublă alternanță (indiferent dacă este cu punct median sau în punte), poate fi numit redresor cu două pulsuri, deoarece produce două pulsuri de tensiune continuă într-o perioadă a tensiunii de curent alternativ. Un redresor trifazat, dublă alternanță poate fi denumit redresor cu șase pulsuri.

### **Dublarea numărului de pulsuri**



Este posibilă obținerea unui număr dublu de pulsuri față de numărul fazelor cu ajutorul unui redresor. Folosind transformatoare, putem conecta în paralel un set de redresoare dublă alternanță în punte astfel încât să rezulte mai mult de 6 pulsuri de tensiune continuă pentru cele trei faze ale curentului alternativ. Dacă se introduce un defazaj de  $30^\circ$  între primarul și secundarul transformatorului trifazat

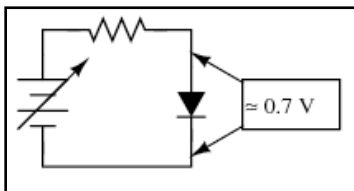
atunci înfășurările nu sunt de același tip.

Cu alte cuvinte, un transformator în configurație Y-Δ (stea-triunghi) sau Δ-Y (triunghi-stea), va prezenta acest defazaj de  $30^\circ$ , dar nu și un transformator în configurație Y-Y sau Δ-Δ. Acest fenomen poate fi exploatat prin utilizarea unui transformator în configurație Y-Y conectat la un redresor în punte, iar un alt transformator în configurație Y-Δ conectat la un al doilea redresor în punte; cele două punți redresoare le conectăm apoi în paralel. Din moment de tensiunea de riplu dintre cele două redresoare este defazată cu  $30^\circ$ , tensiunea de riplu rezultată prin superpoziția lor va fi mai mică decât tensiunea de riplu luată individual pentru cele două redresoare: 12 pulsuri pentru o perioadă ( $360^\circ$ ) în loc de 6.

## 5. Dioda Zener - principii și aplicații

- Diodele Zener sunt proiectate să funcționeze polarizate invers. Tensiunea la care aceste diode încep să conducă este denumită tensiune Zener
- Dioda Zener poate funcționa pe post de stabilizator de tensiune

### Stabilizarea tensiunii cu ajutorul diodelor



La conectarea unei diode în serie cu un rezistor într-un circuit de curent continuu, astfel încât dioda să fie polarizată direct, căderea de tensiune la bornele diodei va rămâne aproximativ constantă pentru o plajă largă de tensiuni de alimentare (figura alăturată).

Conform ecuației diodei, curentul printr-o joncțiune P-N polarizată direct este direct proporțional cu  $e$  ridicat la puterea tensiunii directe (tensiunea de polarizare directă). Deoarece ecuația este exponențială, curentul crește foarte repede pentru creșteri modeste ale căderii de tensiune. Cu alte cuvinte, căderea de tensiune la bornele

unei diode polarizate direct variază foarte puțin pentru variații mari ale curentului prin diodă. În circuitul din figura de mai sus, curentul prin diodă este limitat de tensiunea sursei de alimentare, de rezistorul conectat în serie și de căderea de tensiune la bornele diodei, care după câte știm, nu se îndepărtează foarte mult de valoarea de 0,7 V.

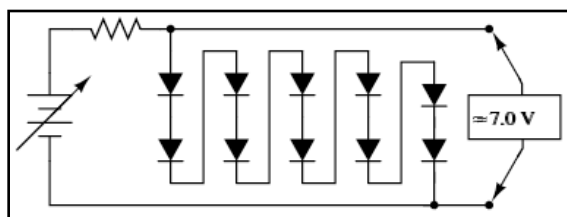
Dacă am fi să creștem tensiunea generată de sursă, căderea de tensiune pe rezistor ar crește cu aproape aceeași valoare, iar căderea de tensiune pe diodă ar crește doar foarte puțin. Invers, o scădere a tensiunii generate de sursă, rezultă într-o descreștere aproape identică a căderii de tensiune pe rezistor și doar într-o mică descreștere a căderii de tensiune pe diodă. Pe scurt, putem spune că dioda stabilizează tensiunea la valoarea de 0,7 V.

## Scopul stabilizării tensiunii

Stabilizarea tensiunii este o proprietate foarte folositoare. Să presupunem că am construi un circuit, al cărei sarcini nu ar tolera variații ale tensiunii sursei de alimentare, dar că acest circuit trebuie să fie alimentat de o baterie, a cărei tensiune, după câte se știe, variază pe durata sa de funcționare. Am putea folosi în acest caz circuitul din figura de mai sus, iar circuitul în cauză să-l conectăm la bornele diodei, astfel încât tensiunea de alimentare a noului circuit să rămână stabilă la valoarea de 0,7 V.

## Creșterea valorii tensiunii stabilizate

Majoritatea circuitelor reale necesită însă o sursă de tensiune stabilizată cu o valoare de peste 0,7 V. O modalitate de creștere a tensiunii stabilizate este conectarea mai multor diode în serie, astfel încât tensiunile de polarizare directă să se însumeze.

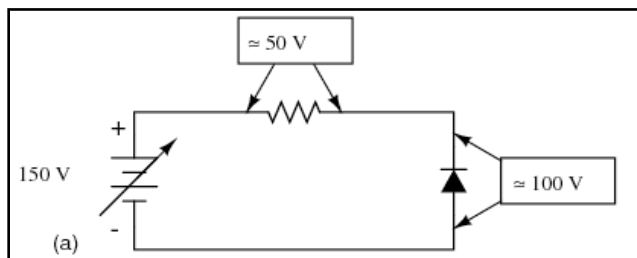


De exemplu, dacă am conecta zece diode în serie, valoarea tensiunii stabilizate ar fi de zece ori mai mare față de cazul precedent, adică 7 V.

Atâta timp cât tensiunea bateriei nu scade sub 7 V, vor exista tot timpul 7 V (tensiune stabilizată) între bornele celor diode

conectate în serie.

## Polarizarea inversă a diodei



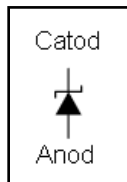
Dacă avem nevoie de tensiuni stabilizate și mai mari, putem folosi și mai multe diode în serie, sau putem încerca o metodă complet diferită, folosindu-ne tot de diode. Știm că tensiunea de polarizare a diodei este o valoare aproximativ constantă pentru o plajă largă de condiții, dar



același lucru este valabil și pentru tensiune (inversă) de străpungere, iar valoarea acestei tensiuni de străpungere este de obicei mult mai mare decât tensiunea directă.

Dacă inversăm polaritatea diodei în circuitul stabilizator de mai sus, și creștem tensiunea sursei de alimentare până în punctul de străpungere al diodei, dioda va stabili și în acest caz tensiunea la acel punct de străpungere, nepermițând tensiunii să crească peste această valoare.

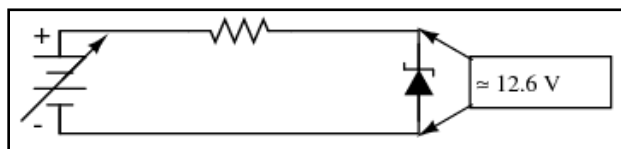
## Utilizarea diodelor Zener pentru stabilizarea tensiunii



Din păcate, când diodele redresoare normale ating punctul de străpungere, acest fapt duce și la distrugerea acestora. Totuși, se pot construi diode speciale ce pot suporta tensiunea de străpungere fără distrugerea completă a acestora. Acest tip de diodă poartă numele de *diodă Zener*, iar simbolul este cel din figura alăturată.

### Tensiunea Zener

La polarizarea directă, diodele Zener se comportă precum diodele redresoare standard: tensiunea directă are valoarea de 0,7 V, conform ecuației diodei. La polarizarea inversă însă, acestea nu conduc curentul decât peste o anumită valoare a tensiunii de alimentare, valoare denumită tensiune Zener; după atingerea acestei valori, dioda Zener va putea să conducă un curent substanțial, dar va limita căderea de tensiune la bornele sale la acea tensiune Zener. Atâta timp când puterea disipată sub formă de căldură nu depășește limita termică a diodei, aceasta nu va fi afectată în niciun fel.



Diodele Zener sunt confecționate cu tensiuni Zener de câțiva volți până la sute de volți. Tensiunea Zener variază ușor cu temperatura, dar acestea pot fi folosite cu succes ca dispozitive de stabilizare a tensiunii datorită stabilității și acurateții lor în funcționare.

### Polarizarea corectă a diodelor Zener

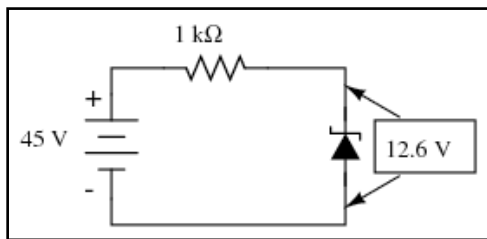
Atenție! Orientarea diodei Zener față de sursa de tensiune în circuitul de mai sus este astfel încât dioda să fie polarizată invers. Acesta este modul corect de conectare a diodelor Zener în circuit! Dacă am fi să conectăm dioda Zener invers, astfel încât să fie polarizată direct, aceasta s-ar comporta precum o diodă „normală”, iar tensiunea de polarizare directă ar avea o valoare de doar 0,7 V.

### Limita termică și distrugerea diodei Zener

Ca și oricare dispozitiv semiconductor, dioda Zener este sensibilă la temperatură. O temperatură excesivă poate duce la distrugerea diodei, astfel că va trebui să se țină seama de puterea maximă permisă a diodei la

proiectarea circuitelor. Interesant este faptul că, la distrugerea diodei Zener, datorită căldurii excesive, distrugerea rezultată duce la scurt-circuitarea diodei, nu la deschiderea. O astfel de diodă „stricată” poate fi detectată foarte ușor, întrucât se comportă precum un conductor electric: căderea de tensiune este aproape zero atât la polarizarea directă cât și la polarizarea inversă.

## Exemplu practic de utilizare a diodei Zener

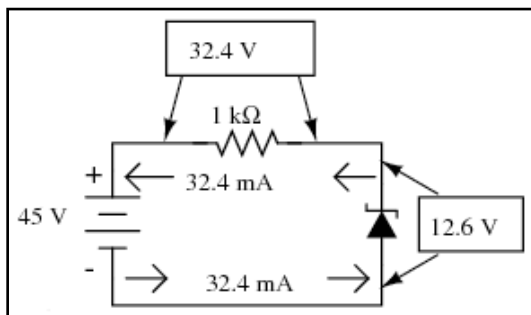


Vom rezolva matematic circuitul precedent, determinând toate tensiunile, curenții și puterile disipate, pentru o tensiune Zener de 12,6 V, o sursă de tensiune de 45 V și o valoare a rezistorului de 1.000  $\Omega$ .

Să calculăm prima dată puterile pe rezistor și pe diodă:

$$P_{\text{rezistor}} = 32,4 \text{ mA} \cdot 32,4 \text{ V} = 1,04 \text{ W}$$

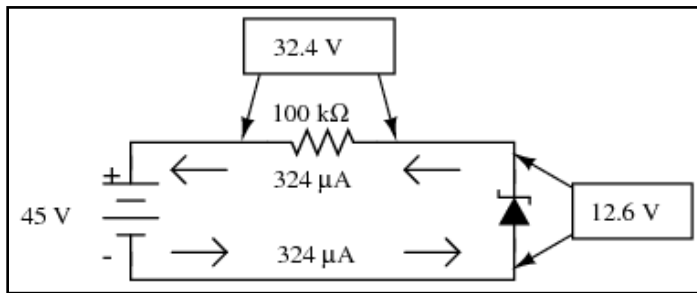
$$P_{\text{diodă}} = 32,4 \text{ mA} \cdot 12,6 \text{ V} = 408,24 \text{ mW}$$



O diodă Zener cu o putere de 0,5 W și un rezistor cu o putere de 1,5 sau 2 W sunt suficiente pentru această aplicație.

## Minimizarea puterii disipate

Dacă puterea excesivă disipată este atât de importantă, de ce nu am proiecta un circuit astfel încât să existe o putere disipată minimă? De ce nu am introduce un rezistor cu o valoare foarte mare a rezistenței, limitând prin urmare curentul și menținând puterea disipată la valori foarte scăzute?



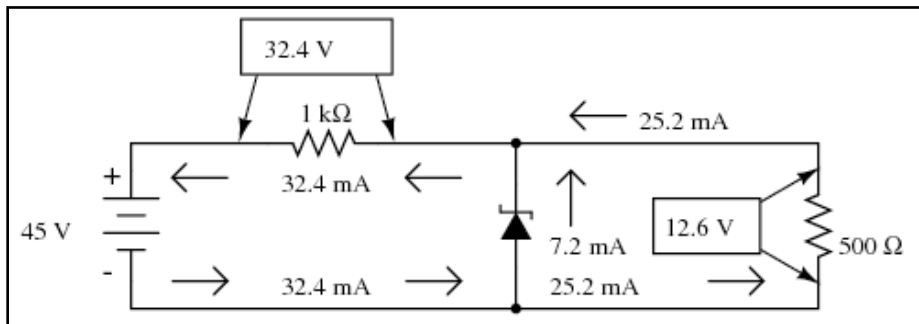
puterilor disipate ar trebui să fie de 100 de ori mai mici:

$$P_{rezistor} = 324 \mu A \cdot 32,4 V = 10,49 W$$

$$P_{diodă} = 324 \mu A \cdot 12,6 V = 4,08 mW$$

Această configurație pare ideală. O putere disipată mai mică înseamnă temperaturi de funcționare mai mici atât pentru dioda Zener cât și pentru rezistor și o pierdere de energie mai mică în sistem. Într-adevăr, o rezistență mai mare reduce puterile disipate din circuit, dar, introduce o altă problemă. Scopul unui stabilizator de tensiune este alimentarea unui circuit secundar cu o tensiune stabilă. Va trebui până la urmă să alimentăm un alt circuit cu 12,6 V, iar acest circuit legat la bornele diodei Zener va necesita și el un anumit curent.

### Modificarea sarcinii

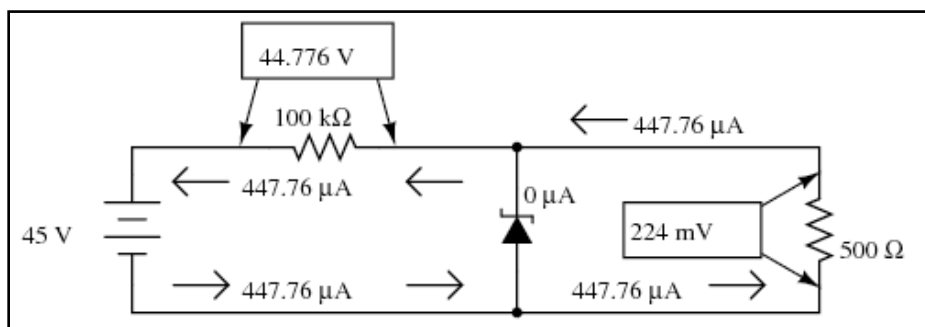


în serie cu sursa de tensiune să prezinte o cădere de tensiune de 32,4 V (45 V, tensiunea sursei - 12,6 V, căderea de tensiune pe diodă), acesta va trebui să conducă un curent de 32,4 mA. Acest lucru înseamnă ca prin dioda Zener va trece un curent de 7.2 mA.

### Modificarea rezistorului de intrare

Să considerăm primul circuit, conectat de această dată la o sarcină de 500Ω în paralel cu dioda Zener:

Dacă se menține o tensiune de 12,6 V pe sarcina de 500 Ω, aceasta va folosi un curent de 25,2 mA. Pentru ca rezistorul de 1 kΩ

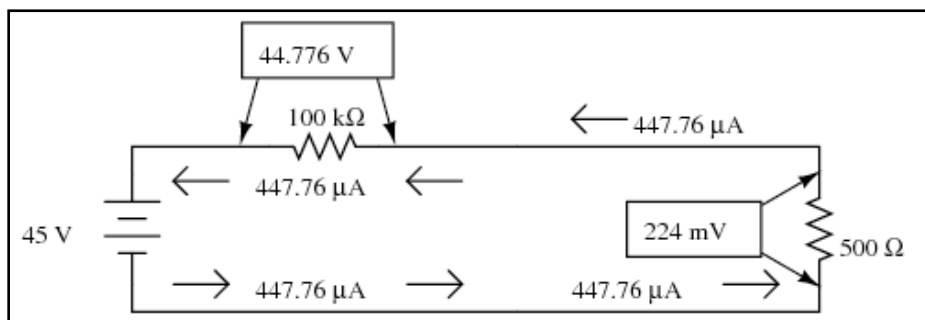


Să considerăm acum al doilea circuit de stabilizare a tensiunii cu un rezistor de  $100\text{ k}\Omega$ , alimentând aceeași sarcină de  $500\Omega$ . Ceea ce ar trebui să facă acest circuit, este să mențină o cădere de tensiune de  $12,6\text{ V}$  la bornele sarcini, la fel ca

în circuitul precedent. Dar, după cum putem vedea, circuitul stabilizator nu poate realiza acest lucru.

Datorită prezenței rezistorului foarte mare în serie cu sursa de tensiune, pe sarcină va exista o cădere de tensiune de doar  $224\text{ mV}$ , mult mai puțin decât valoarea dorită de  $12,6\text{ V}$ . De ce se întâmplă acest lucru? Dacă am fi să avem  $12,6\text{ V}$  pe sarcină, curentul prin sarcină ar fi de  $25,2\text{ mA}$ , la fel ca înainte. Acest curent de sarcină ar trebui să treacă și prin rezistorul serie de valoare mult mai mare față de cazul precedent, iar căderea de tensiune necesară pentru susținerea unui astfel de curent de  $25,2\text{ mA}$  ar trebui să fie de  $2.520\text{ V}$ ! Din moment ce nu avem o tensiune așa de mare la bornele sursei de alimentare, acest lucru nu este posibil. De asemenea, putem observa, că în circuitul de mai sus dioda este blocată.

### Îndepărtarea temporară a diodei Zener



Putem înțelege mai ușor situația de mai sus dacă îndepărtăm temporar dioda Zener din circuit și analizăm doar comportamentul celor doi rezistori.

### Realizarea calculelor

Mărimă	$R_{\text{serie}}$	$R_{\text{sarcină}}$	Total	Unitate
E		12,6	45	V
I				A
R	100k			$\Omega$

Circuitul stabilizator cu rezistorul de  $100\text{ k}\Omega$  are totuși o anumită valoare a rezistenței sarcinii pentru care tensiunea la bornele sale este de  $12,6\text{ V}$ . Putem afla această valoare făcând un mic calcul. Introducem toate valorile cunoscute într-un tabel, de forma celui alăturat.

Mărimă	$R_{\text{serie}}$	$R_{\text{sarcină}}$	Total	Unitate
E	32,4	12,6	45	V
I				A
R	100k			$\Omega$

Căderea de tensiune pe rezistorul serie de  $100\text{ k}\Omega$  este diferența căderilor de tensiune dintre sursă (coloana total) și sarcină.

Mărimă	R <sub>serie</sub>	R <sub>sarcină</sub>	Total	Unitate
E	32,4	12,6	45	V
I	324 μ			A
R	100k			Ω

Putem calcula curentul prin rezistorul serie folosind legea lui Ohm ( $I = E / R$ ).

Mărimă	R <sub>serie</sub>	R <sub>sarcină</sub>	Total	Unitate
E	32,4	12,6	45	V
I	324 μ	324 μ	324 μ	A
R	100k			Ω

Fiind un circuit serie, curentul este același prin toate componentele.

Mărimă	R <sub>serie</sub>	R <sub>sarcină</sub>	Total	Unitate
E	32,4	12,6	45	V
I	324 μ	324 μ	324 μ	A
R	100k	38,89 k		Ω

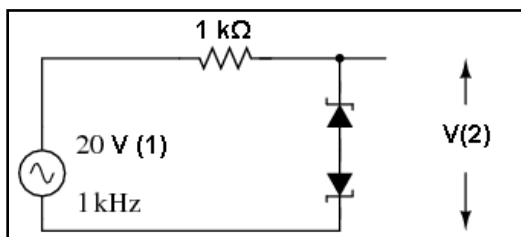
Putem acum calcula rezistența sarcinii folosind legea lui Ohm ( $R = E / I$ ).

## Concluzii

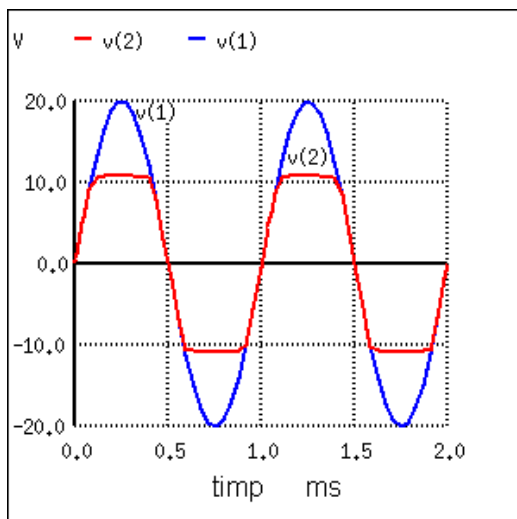
Prin urmare, dacă rezistența sarcini este exact 38,89 kΩ, vom avea o cădere de tensiune de 12,6 V la bornele sale, cu sau fără diodă. Orice rezistența de sarcină mai mică decât această valoare va duce la o cădere de tensiune mai mică de 12,6 V, cu sau fără diodă. Dacă inserăm și dioda Zener conform configurației inițiale, căderea de tensiune maximă pe sarcină va fi stabilizată la o valoare maximă de 12,6 V pentru oricare sarcină mai mare decât 38,89 kΩ.

Cu valoarea inițială a rezistorului serie de 1 Ω, circuitul putea să stabilizeze tensiunea chiar și pentru o sarcină mult mai mică, de 500 Ω. Ceea ce vedem este un compromis între puterea disipată și valoarea acceptabilă a sarcinii. Cu cât rezistorul serie este mai mare și puterea disipată este mai mică, cu atât valoarea minimă a rezistenței sarcinii trebuie să fie mai mare. Dacă vrem să stabilizăm tensiunea pentru o sarcină mică (rezistență mică), circuitul trebuie astfel conceput încât să suporte puteri mari de disipație.

## Circuit limitator cu diode Zener



Un circuit limitator ce „taie” vârfurile formei de undă aproximativ la tensiunea Zener a diodelor, este prezentat în figura alăturată. Circuitul este format din două diode Zener conectate spate-în-spate. Rolul rezistorului este de limitare a curentului prin diode, pentru protecția acestora.

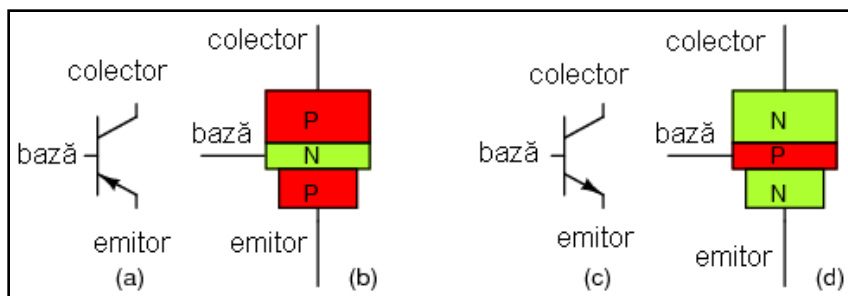


Tensiunea de străpungere pentru cele două diode este fixată la 10 V. Acest lucru duce la tăierea formei de undă la aproximativ 10 V. Diodele, puse spate-în-spate, taie ambele vârfuri. Pentru semi-alternața pozitivă, dioda de sus este polarizată invers. Căderea de tensiune pe dioda de jos este 0,7 V, fiind polarizată direct. Astfel, tăierea exactă a formei de undă se realizează în jurul valorii de 10,7 V. Același lucru este valabil și pentru semi-alternața negativă (-10.7 V).

## 04 - Tranzistorul

### 01. Tranzistorul - introducere

#### Structură și definiție

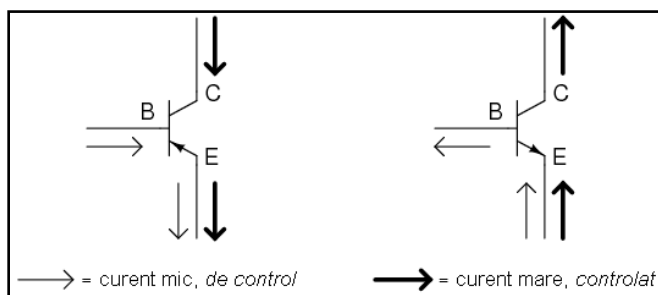


Un tranzistor bipolar cu joncțiune (BJT) este alcătuit din trei straturi de materiale semiconductoare, fie de tipul PNP, fie de tipul NPN. Fiecare strat are un nume specific și un contact pentru conexiunea în circuit.

#### Diferența dintre tranzistorul PNP și NPN

Diferența funcțională dintre tranzistorul PNP și NPN, este modul de polarizare corectă a joncțiunii. Indiferent de starea în care se află, direcțiile curenților și polaritățile tensiunii sunt exact invers la cele două tipuri de tranzistoare.

#### Utilizarea tranzistorilor



Tranzistorii sunt regulatori de curent controlați în curent. Cu alte cuvinte, tranzistorii limitează valoarea curentului prin ei cu ajutorul unui curent de control mai mic. Curentul principal, cel controlat, pleacă dinspre emitor spre colector (tipul NPN), iar curentul mai mic, de control, pleacă dinspre emitor spre bază (tipul NPN).

Pentru tranzistorul de tip PNP, direcția curenților este exact inversă. Atenție, folosim sensul real de deplasare al electronilor, prin urmare, săgețile indicate pe simbolurile elementelor semiconductoare vor indica tot timpul împotriva direcției de deplasare al electronilor.

#### Observații

Denumirea tranzistoarelor bipolare vine de la faptul că deplasarea electronilor prin ele are loc prin două tipuri de material semiconductor: P și N. Cu alte cuvinte, există două tipuri de purtători de sarcină, electroni și goluri.

După cum se poate observa, curentul de control și curentul controlat se însumează tot timpul pe emitor, iar deplasarea electronilor are loc tot timpul împotriva direcției săgeții. Aceasta este prima și cea mai importantă regulă a tranzistoarelor: toți curenții trebuie să meargă în direcțiile corecte pentru ca dispozitivul să funcționeze ca și regulator de curent. De obicei, curentul de control este denumit curent de bază, iar curentul controlat este denumit curent de colector, deoarece sunt singurii curenții ce trec pe la aceste terminale. Curentul pe emitor este suma curenților de bază și colector, în conformitatea cu legea lui Kirchhoff pentru curent.

Atunci când nu există niciun curent prin bază, tranzistorul se comportă precum un întrerupător deschis, iar trecerea curentului prin colector nu este posibilă. Un curent de bază pornește tranzistorul, acesta comportându-se precum un întrerupător închis și permițând trecerea unui curent proporțional prin colector. Curentul de colector este limitat de curentul bazei, indiferent de valoarea căderii de tensiune pe colector.

## 02. Tranzistorului ca și întrerupător

- Tranzistoarele pot fi folosite ca și întrerupătoare pentru controlul puterii de curent continuu asupra sarcinii. Curentul controlat trece prin emitor-colector; curentul de control trece prin emitor-bază
- Când curentul printr-un tranzistor este zero, spunem că acesta este *blocat*
- Când curentul printr-un tranzistor este maxim, spunem că acesta este *saturat*

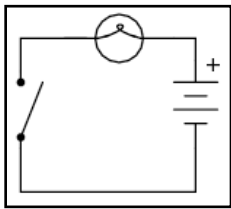
### Scop

Deoarece curentul colectorului tranzistorului este limitat proporțional de curentul bazei, acesta poate fi folosit pe post de întrerupător controlat în curent. O cantitate relativ mică de electroni, prin bază, poate exercita un control asupra unei cantități mult mai mari de electroni prin colector.

### Exemplu - controlul pornirii/opririi unei lămpi

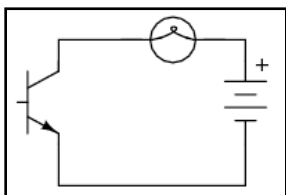
#### Întrerupător simplu





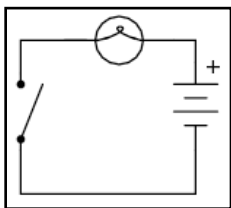
Să presupunem că avem o lampă pe care vrem să o pornim/oprim cu ajutorul unui întrerupător.

### Tranzistor NPN



Pentru exemplificare, să inserăm acum un tranzistor în locul întrerupătorului. Țineți minte, curentul controlat trebuie să treacă prin tranzistor de la colector spre emitor. Din moment ce curentul controlat este cel prin lampă, trebuie să poziționăm colectorul și emitorul tranzistorului în locul contactelor întrerupătorului. Trebuie de asemenea să ne asigurăm că direcția curentului prin tranzistor este împotriva săgeții emitorului, pentru a ne asigura că joncțiunea tranzistorului este polarizată corect.

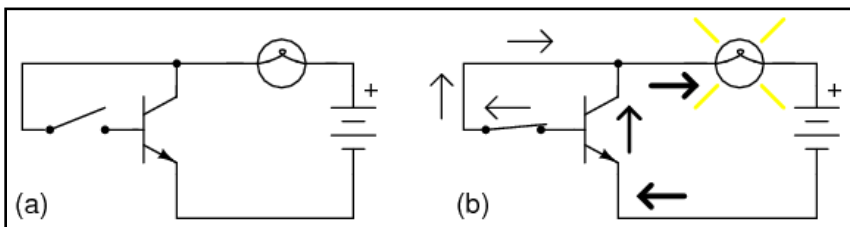
### Tranzistor PNP



Putem de asemenea să folosim și un tranzistor PNP pentru realizarea acestui circuit. Alegerea făcută între PNP și NPN este complet arbitrară, deși, pentru exemplificarea funcționării tranzistoarelor, vom folosi în continuare cele de tipul NPN.

### Adăugarea unui întrerupător între bază și colector

Întorcându-ne la exemplu cu tranzistorul NPN, ne găsim în situația în care mai trebuie să adăugăm ceva în circuit pentru a avea un curent de bază prin tranzistor. Fără o conexiune la terminalul bazei, curentul prin aceasta va fi zero, iar tranzistorul va fi închis, ceea ce înseamnă că lampa va fi tot timpul oprită. Țineți minte, că pentru un tranzistor NPN, direcția curentului de bază trebuie să fie dinspre emitor spre bază (împotriva direcției săgeții).



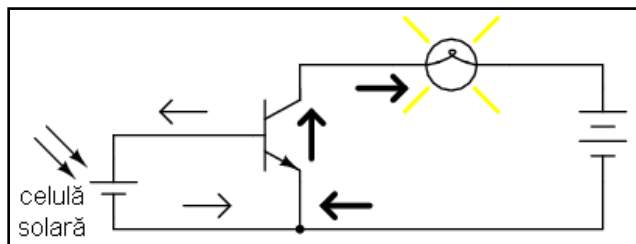
Probabil că cel mai simplu lucru ar fi să conectăm un întrerupător între baza și colector, precum în figura alăturată (a).

### Tranzistor blocat și tranzistor saturat

Dacă întrerupătorul este deschis (a), baza tranzistorului nu va fi conectată la baterie și nu va exista niciun curent prin ea. În această situație, spune că tranzistorul este blocat. Dacă întrerupătorul este închis (b), va exista un

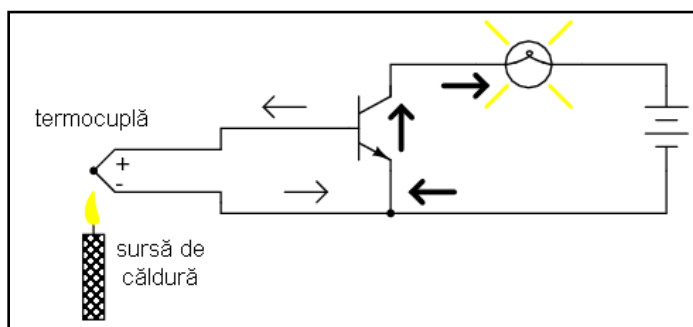
curent dinspre emitor spre bază, prin întrerupător și prin lampă (partea stângă) înapoi la terminalul pozitiv al bateriei. Acest curent de bază va permite trecerea unui curent mult mai mare dinspre emitor spre colector, iar lampa se va aprinde. În această situație, în care curentul prin circuit este maxim, spunem că tranzistorul este saturat.

## Surse de polarizare a tranzistorului

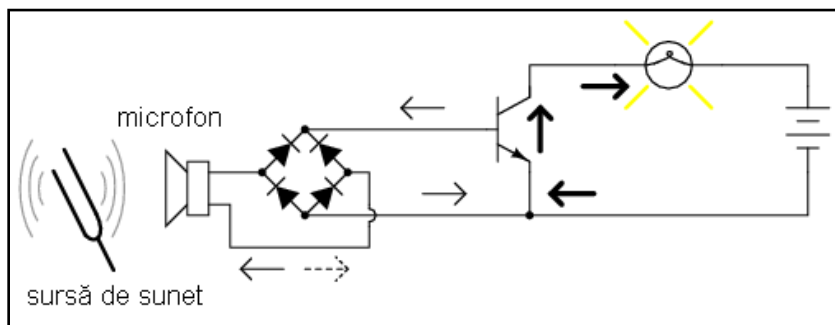


și pornirea tranzistorului.

Putem însă folosi ceva total diferit pentru a controla lampa (pornit/oprit). De exemplu, putem folosi o pereche de celule solare pentru generarea unei tensiuni de 1 V, pentru depășirea tensiunii directe de 0,7 V ( $V_{BE}$ ) între bază și emitor, tensiune necesară pentru apariția curentului de bază



Sau putem folosi mai multe termocuple conectate în serie pentru generarea curentului bazei necesar pornirii tranzistorului.



Putem folosi chiar și un microfon, care cu o tensiune și un curent (printr-un amplificator) suficient de mari, ar putea pune tranzistorul în funcțiune. Desigur, ieșirea microfonului va trebui redresată din curent alternativ în curent continuu, pentru ca joncțiunea emitor-bază să fie tot

timpul polarizată direct.

## Observații

Ceea ce vrem să demonstrăm, este că orice sursă de tensiune în curent continuu, capabilă să pornească tranzistorul, poate fi folosită pentru controlul lămpii, iar puterea acestei surse de tensiune trebuie să fie doar o fracțiune din puterea circuitului controlat. Tranzistorul în acest caz nu se comportă doar ca un întrerupător, ci și ca un amplificator: folosind un semnal de putere relativ mică pentru controlul unui semnal de putere relativ mare.

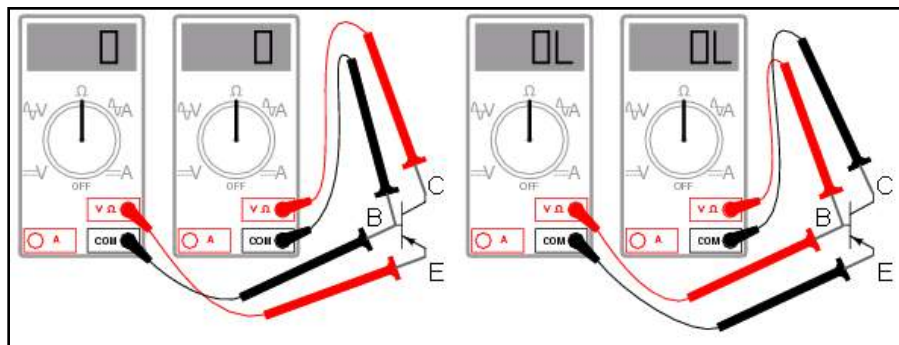
Atenție, puterea necesară aprinderii lămpii este furnizată de bateria din circuitul principal, și nu de celula solară, termocuplă sau microfon. Acestea din urmă doar controlează puterea bateriei pentru aprinderea lămpii.

### 03. Verificarea tranzistorului cu ohmmetrul

- Tranzistorul se comportă precum o pereche de diode conectate spate-în-spate atunci când este verificat cu ajutorul unui multimetru pe post de ohmmetru sau cu funcția „verificare diodă”
- Joncțiunea emitor-bază de tip P-N, are o tensiune directă puțin mai mare decât joncțiunea colector-bază de tip P-N, datorită dopajului mai puternic al emitorului. Acest lucru poate fi exploatat pentru identificarea tranzistorilor

#### Comportamentul tranzistorului

Tranzistorii se comportă precum două diode puse spate-în-spate atunci când sunt verificați cu ajutorul multimetrului pe post de ohmmetru sau cu funcția „verificare diodă”, datorită celor trei straturi PNP sau NPN.



Tranzistorul alăturat este de tip PNP; sonda neagră este terminalul negativ (-) iar cea roșie corespunde terminalului pozitiv (+)

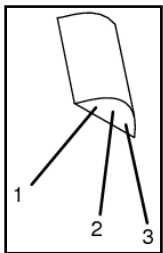
Dacă multimetrul este echipat cu funcția „verificare diodă”, putem folosi acea funcție pentru aflarea

tensiunii de polarizare directă a joncțiunii PN. În cazul unui tranzistor NPN, indicația aparatului de măsură va fi exact invers.

#### Determinarea tipului și contactelor unui tranzistor bipolar nemarcat

Dacă folosim funcția „verificare diodă”, vom vedea că joncțiunea emitor-bază are o tensiune directă mai mare decât joncțiunea colector-bază. Această diferență a tensiunii directe se datorează diferenței concentrațiilor de dopaj dintre regiunile emitorului și colectorului: emitorul este un material semiconductor dopat mult mai puternic decât colectorul, ceea ce duce la producerea unei tensiuni directe mult mai mari a joncțiunii cu baza.

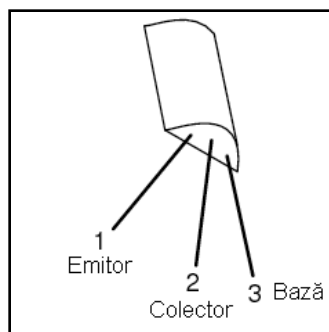
Cunoscând acest lucru, putem determina contactele unui tranzistor nemarcat. Acest lucru este important deoarece nu există un standard cu privire la modul de împachetare al tranzistorilor. Desigur, toți tranzistorii bipolari au trei contacte, dar poziție lor fizică în cadrul tranzistorului poate fi diferită de la un producător la altul.



Să presupunem că luăm un tranzistor la întâmplare, nemarcat, și începem să măsurăm cu ajutorul multimetrului setat pe funcția „verificare diodă”. După măsurarea tuturor combinațiilor de contacte, ajungem la următoarele rezultate:

între punctele 1(+) și 2(-): OL
între punctele 1(-) și 2(+): OL
între punctele 1(+) și 3(-): 0.655 V
între punctele 1(-) și 3(+): OL
între punctele 2(+) și 3(-): 0.621 V
între punctele 2(-) și 3(+): OL

Singurele combinații de contacte pe care putem măsura tensiunea sunt 1 și 3 (sonda roșie pe 1 și sonda neagră pe 3), și 2 și 3 (sonda roșie pe 2 și sonda neagră pe 3). Aceste două citiri trebuie să indice tensiunea de polarizare directă a joncțiunii emitor-bază (0,655 V) și a joncțiunii colector-bază (0,621).



Putem acum căuta contactul comun ambelor seturi de măsurători „conductive”. Acest contact trebuie să fie baza tranzistorului, deoarece acesta este singurul strat, al dispozitivului format din trei straturi, ce este comun ambelor seturi de joncțiuni PN (emitor-bază și colector-bază). În acest exemplu, contactul căutat este numărul 3, fiind comun combinațiilor 1-3 și 2-3. În ambele măsurători, sonda *neagră* (-) a aparatului de măsură a venit în contact cu contactul 3, ceea ce ne spune că baza acestui tranzistor este realizată dintr-un material semiconductor de tip N. Prin urmare,

tranzistorul în cauză este un tranzistor bipolar de tip PNP, cu baza - contactul 3, emitor - contactul 1 și colector - contactul 2.

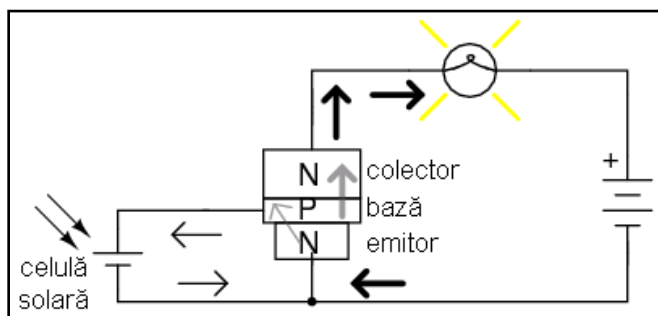
După cum putem observa, baza tranzistorului în acest caz nu este contactul din mijloc al tranzistorului, așa cum ne-am aștepta. Acest lucru se întâmplă foarte des în practică. Singura modalitate prin care ne putem asigura de corectitudinea contactelor este prin verificarea cu ajutorului unui multimetru, sau cu ajutorul catalogului producătorului.

## Determinarea integrității unui tranzistor

Știind faptul că un tranzistor se comportă precum două diode așezate spate-în-spate la testarea conductivității cu un aparat de măsură, dacă în urma măsurărilor descoperim că există continuitate în mai mult sau mai puțin de două dintre cele șase combinații de contacte, putem spune cu siguranță că tranzistorul este defect, sau ca dispozitivul aflat sub inspecție nu este un tranzistor și un cu totul alt dispozitiv!.

## Modul de funcționare al tranzistorului

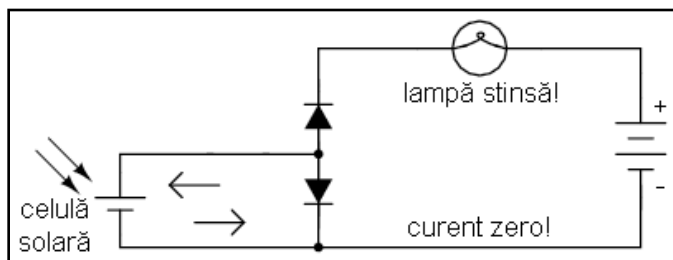
Totuși, modelul „celor două diode” nu poate explica funcționarea tranzistorului ca și dispozitiv de amplificare a semnalului.



Pentru ilustrarea acestui paradox, putem examina circuitul alăturat, folosind diagrama fizică a tranzistorului pentru ușurarea explicațiilor.

Săgeata diagonală gri are direcția deplasării electronilor prin joncțiunea emitor-bază. Acest lucru este clar, din moment ce electronii se deplasează dinspre emitorul de tip N spre baza de tip P: joncțiunea este polarizată direct. Totuși, joncțiunea bază-colector se comportă mai ciudat. Săgeata îngroșată verticală indică direcția de deplasare a electronilor dinspre bază spre colector. Din moment ce baza este realizată dintr-un material de tip P iar colectorul dintr-un semiconductor de tip N, direcția de deplasare a electronilor este inversă față de direcția normală de deplasare printr-o joncțiune P-N! În mod normal, o joncțiune P-N nu ar permite deplasarea inversă a electronilor, cel puțin nu fără a oferi o opoziție extrem de mare.

Totuși, un tranzistor saturat prezintă o opoziție foarte mică față de deplasarea electronilor de la emitor la colector, lucru demonstrat și prin faptul că lampa este aprinsă!



Prin urmare, modelul celor două diode puse spate-în-spate poate fi folosit doar pentru înțelegerea modului de verificare al tranzistorilor cu ajutorul aparatului de măsură, nu și pentru înțelegerea funcționării acestora în circuitele practice.

#### 04. Zona activă de funcționare a tranzistorului

- Tranzistorul se află în zona activă de funcționare, atunci când funcționează între starea de blocare și cea de saturație
- Curentul bazei regulează curentul colectorului. Acest lucru înseamnă că prin colector nu poate trece un curent mai mare decât valoarea permisă de către curentul bazei
- Raportul dintre curentul colectorului și curentul bazei poartă numele de *factor beta* sau *factor de amplificare în curent* al tranzistorului, și se notează cu  $\beta$  sau  $h_{fe}$
- $\beta$  variază pentru fiecare tranzistor în parte

- $\beta$  variază pentru diferite condiții de operare

## Definiții

### Tranzistor blocat

Când baza nu este polarizată, și prin urmare nu există curent între emitor și colector, spunem că tranzistorul este blocat.

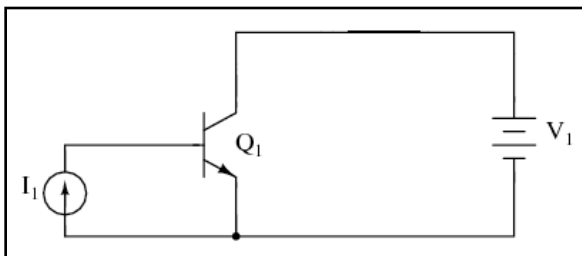
### Tranzistor saturat

Invers, când între emitor și colector trece cantitatea maximă de curent permisă de colector și de sursa de putere, spunem că tranzistorul este saturat.

### Tranzistor în zona activă de funcționare

Dar, în cazul în care curentul controlat este mai mare decât zero dar este sub valoarea maximă admisă de sursă și de circuit, tranzistorul va funcționa între zonele de blocare și saturare; în acest caz, spunem că tranzistorul funcționează în zona activă.

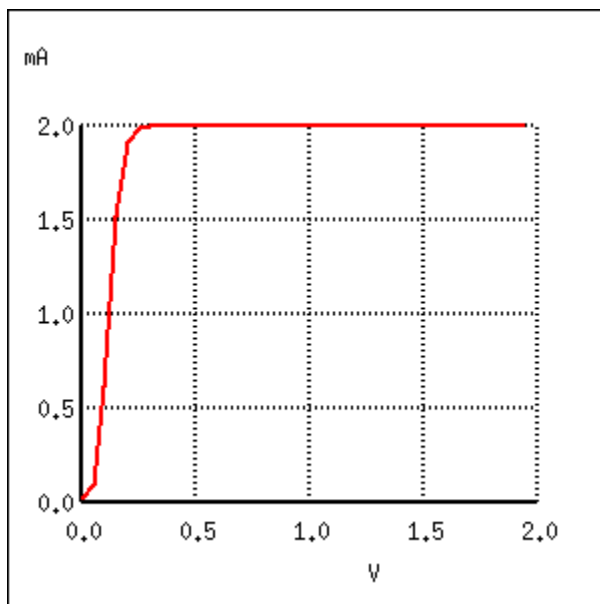
## Exemplu



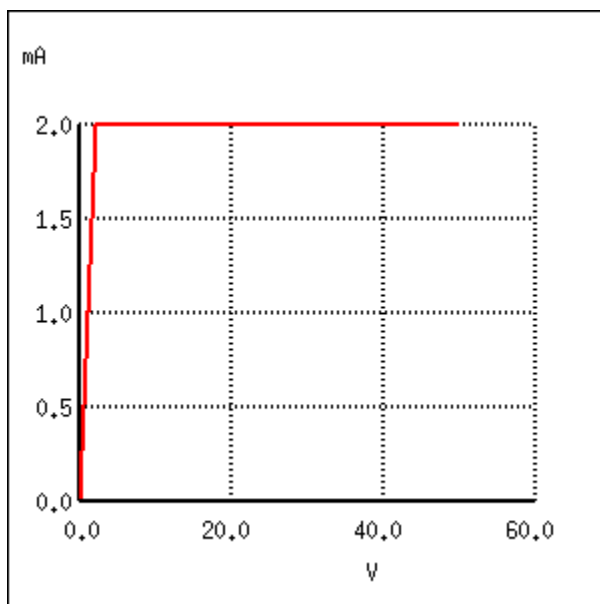
Să considerăm circuit teoretic alăturat.

Circuitul este format dintr-un tranzistor ( $Q_1$ ) de tip NPN, alimentat de o baterie ( $V_1$ ) și controlat printr-o sursă de curent ( $I_1$ ). Sursa de curent va genera un curent fix, generând o tensiune mai mică sau mai mare pentru asigurarea acestui curent prin ea.

### Variația curent-tensiune



### Creșterea tensiunii bateriei



Peste această tensiune „critică”, valoarea tensiunii nu mai are nicio importanță pentru valoarea curentului colectorului. Tranzistorul se comportă în acest caz precum un regulator de curent, permițând un curent de exact 2 mA prin colector, și nu mai mult.

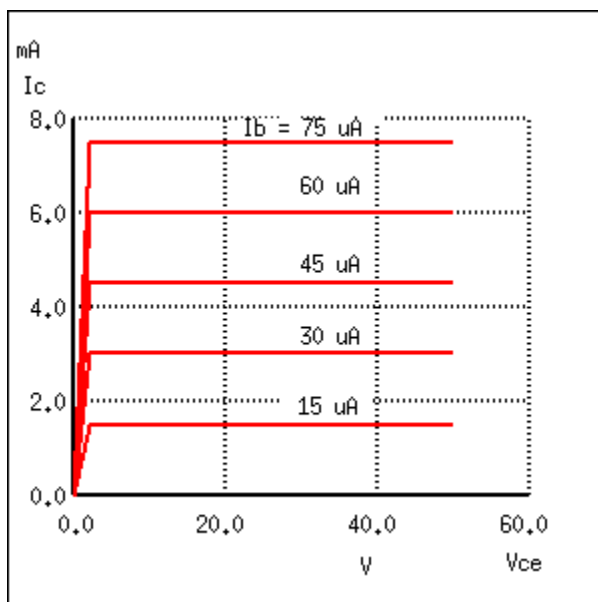
### Creșterea curentului bazei

În această simulare, vom seta valoarea sursei de curent la 20  $\mu$ A și vom varia tensiunea sursei ( $V_1$ ) între 0 V și 2 V; vom observa apoi curentul ce trece prin sursă.

Un curent de bază constant de 20  $\mu$ A controlează un curent maxim de 2 mA prin colector, de exact 100 de ori mai mare. Pentru această valoare a curentului de bază, curentul prin colector nu poate crește mai mult. Putem observa de pe grafic că forma curbei este plată în afară de prima porțiune, porțiune unde tensiunea bateriei ( $V_1$ ) crește de la 0 V la 0,25 V. În acest interval, curentul prin colector crește rapid de la 0 A la 2 mA.

Să observăm ce se întâmplă dacă lărgim plaja valorilor de tensiune a bateriei, de la intervalul 0 - 2 V, la intervalul 0 - 50 V, menținând un curent de bază constant de 20  $\mu$ A.

După cum era de așteptat, rezultatul este același. Curentul prin colector nu poate trece de 2 mA (de exact 100 de ori valoarea curentului bazei!), cu toate că tensiunea bateriei ( $V_1$ ) variază de la 0 V până la 50 V. Putem trage concluzia că tensiunea dintre colector și emitor nu are niciun efect asupra curentului din colector, decât la valori foarte mici (puțin peste 0 volți).

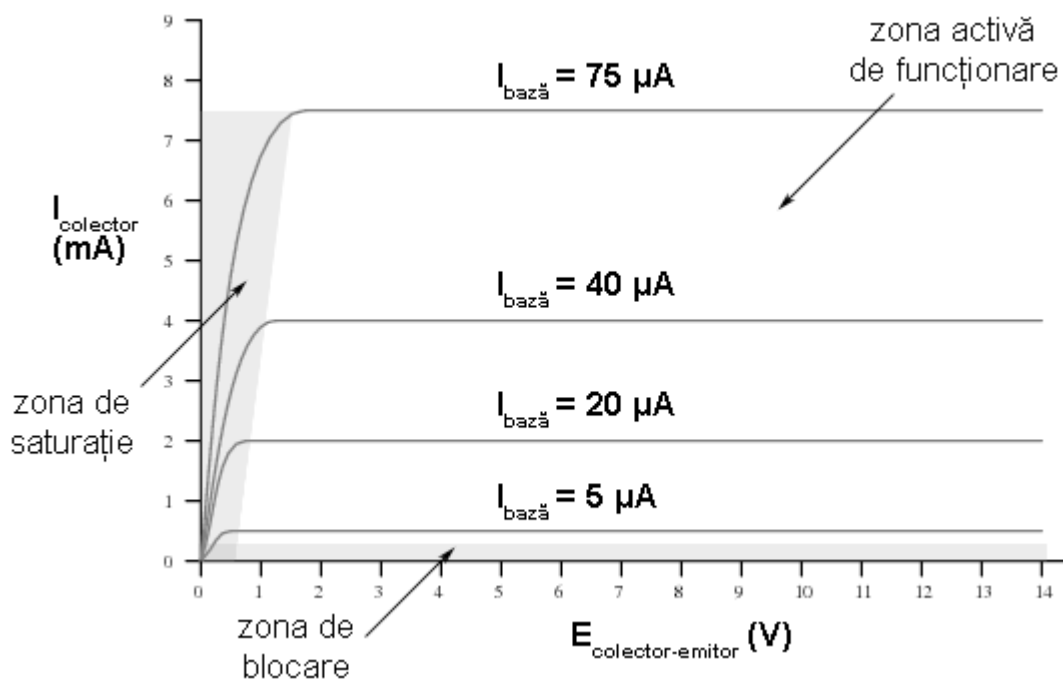


Următorul pas constă în creșterea curentului bazei, de la 20  $\mu A$  la 75  $\mu A$ , menținând tensiunea bateriei în intervalul 0 - 50 V.

Pentru curentul maxim de bază, 75  $\mu A$ , curentul prin colector este (din nou) de 100 de ori mai mare, 7,5 mA și din nou curba curent-tensiune este plată, cu excepția primei părți. Putem trage concluzia că factorul decisiv ce contribuie la valoarea curentului prin colector este curentul bazei, tensiunea bateriei ( $V_1$ ) fiind irelevantă atâta timp cât se situează peste o anumită valoare minimă.

## Curbe caracteristice

Această relație dintre curent și tensiune este fundamental diferită față de relația curent-tensiune a rezistorului. În cazul rezistorului, curentul crește liniar pe măsură ce căderea de tensiune la bornele sale crește. În cazul tranzistorului, curentul dinspre emitor spre colector are o valoare limită fixă, valoare peste care nu poate crește, indiferent de căderea de tensiune dintre emitor și colector.



O reprezentare a tuturor acestor curbe (variații) curent-tensiune pe un singur grafic, pentru un anumit tranzistor, poartă numele de curbe caracteristice.



Pentru funcționarea corectă a tranzistorului, acesta trebuie să se afle tot timpul în zona activă de funcționare (pentru amplificatoare clasa A), nu în cea de blocare și nici în cea de saturație. Țineți minte că tranzistorul este un dispozitiv controlat în curent, prin urmare, dacă ar funcționa în zona de saturație, acesta nu ar mai putea fi controlat prin intermediul curentului bazei; o creștere a curentului bazei, atunci când tranzistorul se află în zona de saturație, nu duce la o creștere a curentului colector-emitor, așa cum era de așteptat. În schimb, dacă tranzistorul se află în zona activă de funcționare, o creștere/scădere a curentului bazei duce la o creștere/scădere a curentului prin colector

### Observație

Trebuie înțeles faptul foarte important, că în graficul de mai sus, avem trei variabile: tensiunea colector-emitor ( $E_{\text{colector-emitor}}$ ), curentul de la emitor la colector ( $I_{\text{colector}}$ ) și curentul bazei ( $I_{\text{bază}}$ ). Pentru fiecare variație a curentului de bază, de la 5  $\mu\text{A}$  la 20  $\mu\text{A}$  la 40 până la 75  $\mu\text{A}$ , vom avea o altă curbă caracteristică, și practic, pot exista o infinitate de curbe între aceste valori.

### Factorul beta (factorul de amplificare în curent)

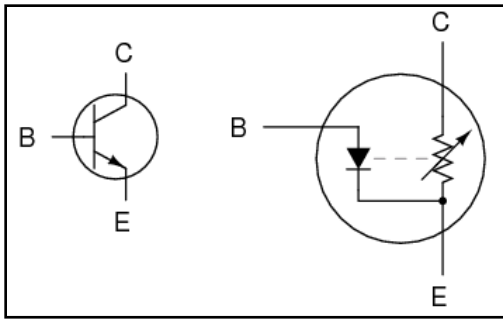
Din moment ce tranzistorul se comportă precum un regulator de curent, limitând curentul colectorului printr-o proporție fixă față de curentul bazei, putem exprima această caracteristică standard a tranzistoarelor printr-un raport, cunoscut sub numele de factor beta sau factor de amplificare în curent, și simbolizat prin litera grecească  $\beta$ , sau prin  $h_{fe}$ :

$$\beta = \frac{I_{\text{colector}}}{I_{\text{bază}}}$$

Factorul  $\beta$  al oricărui tranzistor este determinat de modul său de fabricare, și este o mărime ce nu poate fi modificată după confecționarea acestuia. Este foarte greu să găsim doi tranzistori, de același tip, care să posede un factor  $\beta$  identic, datorită variabilelor fizice ce afectează valoarea acestuia. Dacă vrem să construim un circuit în care avem nevoie de tranzistori cu  $\beta$  egali, aceștia se pot cumpăra în seturi, la un preț mai mare. Dar, construirea unor circuite electronice cu astfel de dependențe nu este indicată.

$\beta$  nu rămâne constant pentru toate condițiile de operare. Pentru un tranzistor fizic, raportul  $\beta$  poate varia cu un factor mai mare decât trei între limitele curentului de operare. De exemplu, un tranzistor marcat cu  $\beta = 50$ , poate în realitate să prezinte un raport  $I_c / I_b$  de 30 sau chiar de 100, în funcție de valoarea curentului prin colector, temperatura tranzistorului, frecvența semnalului amplificat, plus alte variabile. Deși teoretic vom considera că  $\beta$  fiind constant pentru oricare tranzistor, în realitate acest lucru nu este valabil!

### Modelul diodă-potențiometru al tranzistorului

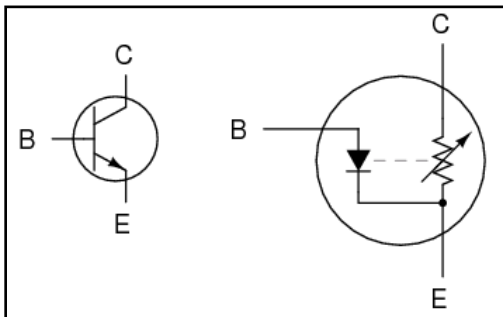


Pentru a înțelege mai ușor modul de funcționare al tranzistorului, putem considera modelul teoretic alăturat.

Conform acestui model, tranzistorul este o combinație dintre o diodă și un potențiomtru. Curentul prin dioda bază-emitor controlează rezistența potențiometrului colector-emitor, lucru evidențiat prin linia întreruptă dintre cele două componente, ceea ce duce la controlul curentului prin colector. Tranzistorul de sus este de tipul NPN.

Tranzistorul de tipul PNP, va avea dioda bază-emitor inversată.

### Modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului



Un model mult mai precis însă, este cel din figura alăturată. Conform acestui model, tranzistorul este o combinație dintre o diodă și o sursă de curent, ieșirea sursei de curent fiind un multiplu (raportul beta) al curentului de bază. Acest model descrie mult mai precis caracteristica intrare/ieșire a tranzistorului: curentul de bază stabilește o anumit curent în colector, și nu o anumită rezistență colector-emitor, precum în cazul precedent.

Din păcate, folosirea unei surse de curent îi poate induce pe cei mai ne-experimentați în eroare; un tranzistor nu este în niciun caz o sursă de energie electrică, dar pe model, faptul că sursa de energie este externă tranzistorului, nu este aparentă.

## 05. Punctul static de funcționare al tranzistorului

- Punctul static de funcționare reprezintă valoarea curentului bazei pentru care tranzistorul funcționează corect
- Pentru amplificatorul de clasă A, punctul static de funcționare se află la jumătatea distanței dintre punctul de blocare și zona de saturație a drepte de sarcină

### Definiție

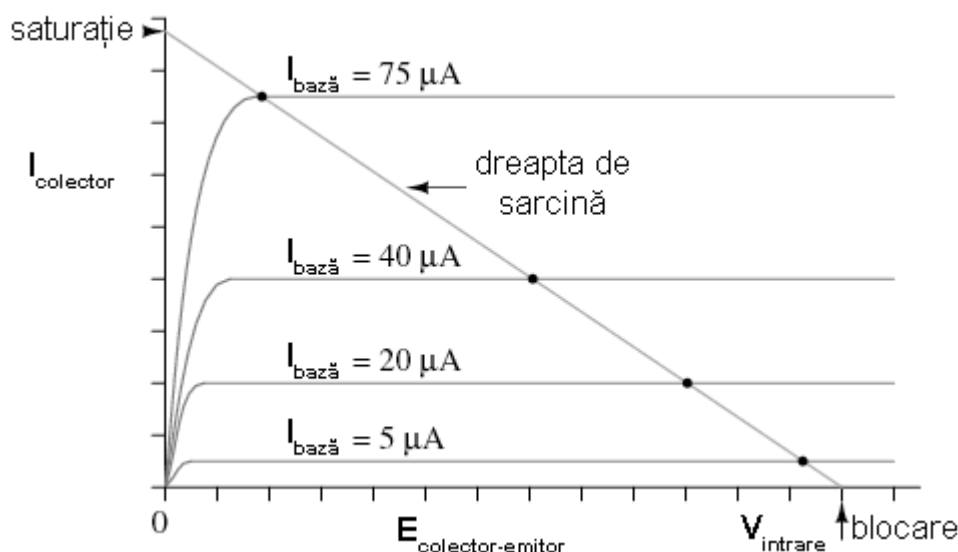
Punctul static de funcționare al unui tranzistor reprezintă coordonatele de funcționare ale tranzistorului în zona activă de funcționare.

## Starea și curentul de repaus

O stare de repaus se caracterizează prin faptul că semnalul de intrare al circuitului este zero. Curentul de repaus, de exemplu, este valoarea curentului dintr-un circuit, atunci când tensiunea aplicată la intrare este zero. Tensiunea de polarizare directă (curent continuu) forțează un nivel diferit al curentului colector-emitor prin tranzistor pentru un semnal de intrare zero, față de cazul în care tensiunea de polarizare directă nu ar exista. Prin urmare, valoarea tensiunii de polarizare într-un circuit de amplificare, determină valorile de repaus ale acestuia.

Pentru un amplificator de clasa A, curentul de repaus trebuie să fie exact între valoarea sa de saturație și valoarea sa de blocare. Amplificatoarele de clasa B și C au un curent de repaus zero, din moment ce acestea sunt proiectate pentru funcționarea în zona de blocare, atunci când nu este aplicat niciun semnal la intrare. Amplificatoarele de clasa AB, au un curent de repaus foarte mic, puțin peste zona de blocare.

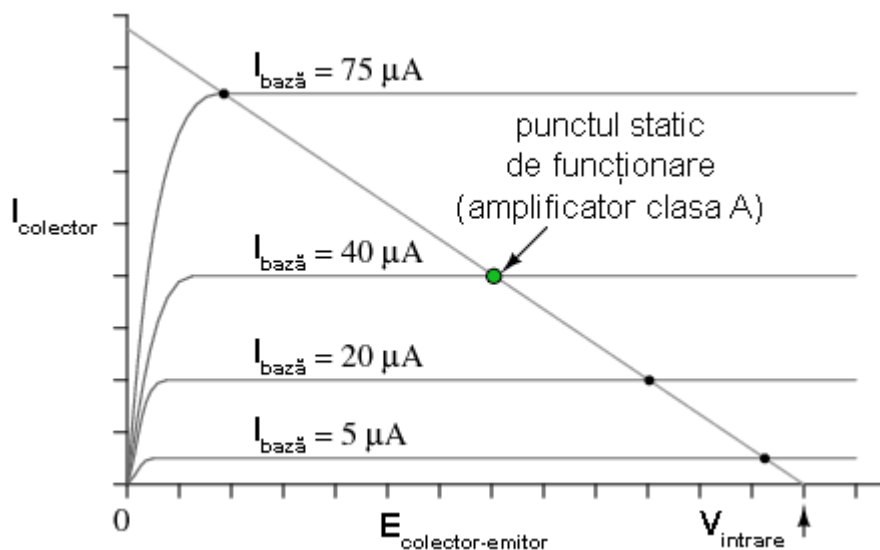
## Trasarea dreptei de sarcină



Pentru a ilustra grafic acest lucru, se trasează o dreaptă de sarcină peste curbele caracteristice ale tranzistorului, pentru ilustrarea modului de funcționare atunci când tranzistorul este conectat la o sarcină de o anumită valoare.

O dreaptă de sarcină reprezintă graficul tensiunii colector-emitor pentru un anumit domeniu al curenților de colector. În partea din dreapta jos, tensiunea este maximă și curentul este zero, reprezentând o condiție de blocare. În stânga sus, tensiunea este zero, iar curentul este maxim, reprezentând o condiție de saturație. Punctele de intersecție ale dreptei cu curbele caracteristice, reprezintă condiții de operare reale ale tranzistorului pentru acei curenți de bază.

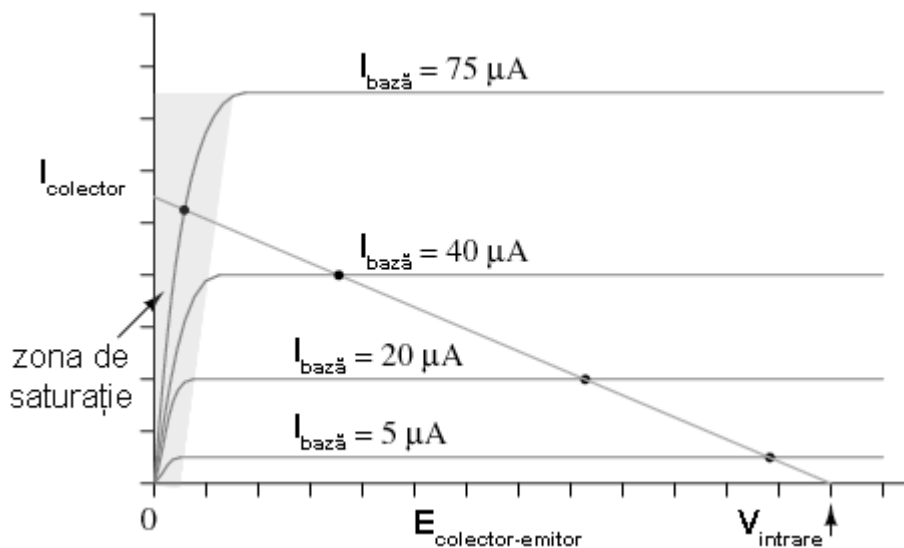
## Reprezentarea punctului static de funcționare



Punctul static de funcționare poate fi reprezentat pe acest grafic printr-un simplu punct la intersecția unei curbe caracteristice cu dreapta de sarcină. Pentru un amplificator de clasa A, punctul static de funcționare se va situa pe mijlocul dreptei de sarcină.

În acest caz particular, punctul static de funcționare se află pe curba de 40  $\mu\text{A}$  a curentului de bază.

### Modificarea rezistenței sarcinii

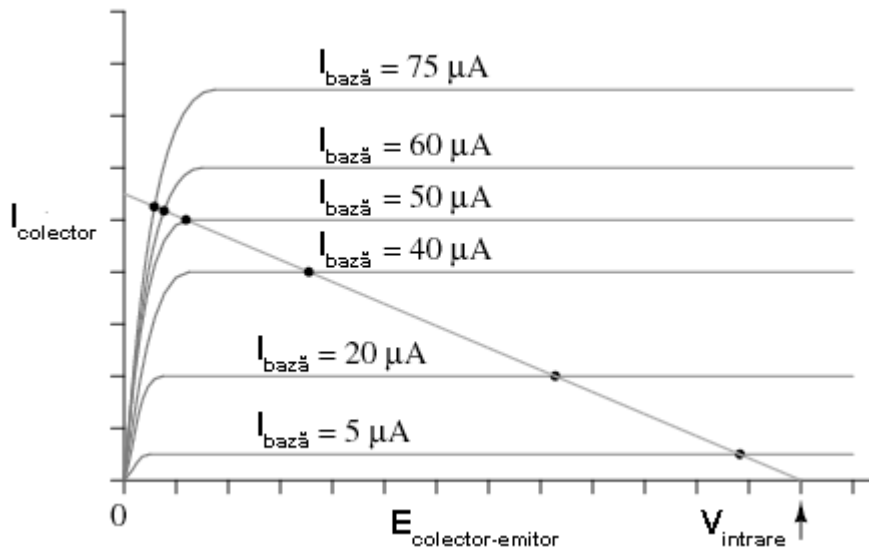


Dacă schimbăm însă rezistența sarcinii acestui circuit cu o rezistență mai mare, acest lucru va afecta panta dreptei de sarcină, întrucât o rezistență de sarcină mai mare va limita curentul maxim prin colector la saturație, dar nu va modifica tensiunea de blocare colector-emitor. Grafic, rezultatul este o dreaptă de sarcină cu un punct de saturație (stânga sus) diferit, dar cu un punct de blocare (dreapta jos) identic.

Putem observa că în această situație, dreapta de sarcină nu mai intersectează curba caracteristică de 75  $\mu\text{A}$  pe porțiunea sa orizontală. Acest lucru este foarte important de realizat, deoarece porțiunea ne-orizantală a curbei

caracteristice reprezintă, după cum am mai menționat, o condiție de saturație a tranzistorului (curentul colector-emitor nu mai poate fi controlat prin intermediul curentului bazei). Prin urmare, pentru un curent al bazei de  $75 \mu\text{A}$ , tranzistorul (amplificatorul) va fi saturat.

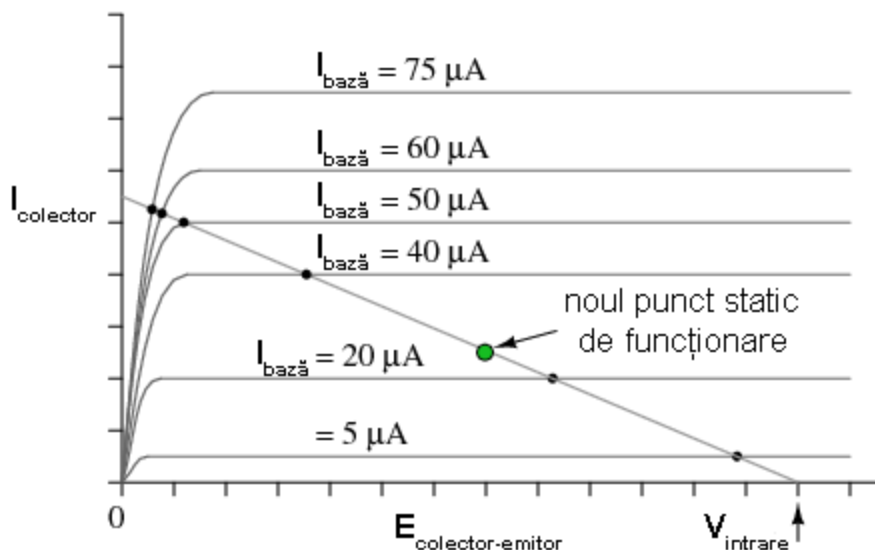
### Adăugarea de noi curbe caracteristice



Pentru menținerea funcționării liniare (fără distorsiuni), amplificatoarele cu tranzistori nu ar trebui să funcționeze în zona de saturație, adică, acolo unde dreapta de sarcină nu intersectează curbele de sarcină pe porțiunea lor orizontală. Vom mai adăuga câteva curbe caracteristice pe grafic, pentru a putea observa până unde putem „împinge” tranzistorul prin creșterea curentului bazei fără ca acesta să intre în zona de saturație.

Se poate vedea de pe grafic că cel mai înalt punct de pe dreapta de sarcină ce intersectează curbele de sarcină ale tranzistorului pe porțiunea orizontală, este pentru curba de  $50 \mu\text{A}$  (curentul de bază). Acest punct ar trebui considerat nivelul maxim al semnalului de intrare pentru funcționarea amplificatorului de clasă A.

### Alegerea unui nou punct static de funcționare



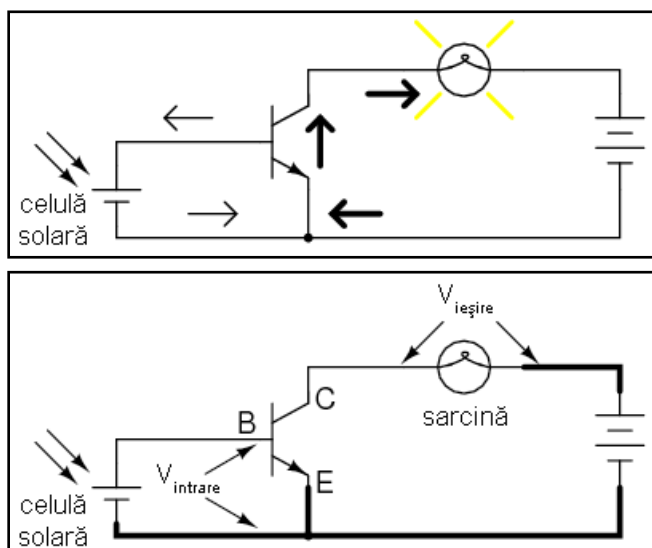
De asemenea, tot pentru funcționarea corectă a amplificatorului de clasă A, tensiunea de polarizare ar trebui să fie astfel încât punctul static de funcționare să se regăsească la mijlocul drumului între punctul maxim de funcționare și punctul de blocare:

Astfel, noul punct static de funcționare, ales pe cale grafică, ne spune că, pentru funcționarea corectă a amplificatorului de clasă A, pentru sarcina în cauză, curentul bazei trebuie să aibă o valoare de aproximativ  $25 \mu A$ . Cunoscând această valoare, putem determina mai apoi și tensiune de polarizare directă în curent continuu.

## 06. Conexiunea emitor comun

- Denumirea de *emitor-comun* vine de la faptul că tensiunile de intrare și de ieșire ale tranzistorului au ca și punct comun contactul emitorului, ne-luând în considerare alte surse de putere
- Tranzistorii sunt în principiu dispozitive de curent continuu: nu pot conduce curenți în direcție inversă la polarizarea inversă. Pentru a funcționa cu semnale de curent alternativ, semnalul de intrare (alternativ) trebuie să conțină și o componentă de curent continuu pentru menținerea tranzistorului în zona activă de funcționare pe toată durata perioadei semnalului de intrare
- Tensiunea de ieșire, între emitor și colector, a unui amplificator în conexiune emitor comun, este defazată cu  $180^\circ$  față de tensiunea de intrare. Amplificatorul emitor comun mai este cunoscut din această cauză și ca amplificator inversor
- Amplificarea în curent a tranzistorului emitor-comun, cu sarcina conectată în serie cu colectorul, este egală cu  $\beta$
- Amplificarea în tensiune a tranzistorului emitor-comun este dată de relația  $A_v = \beta (R_{ieșire} / R_{intrare})$ , unde  $R_{ieșire}$  reprezintă rezistorul conectat în serie cu colectorul, iar  $R_{intrare}$  reprezintă rezistorul conectat în serie cu baza tranzistorului

## Definiție



Să reluăm exemplu studiat în secțiunile precedente, unde tranzistorul a fost folosit pe post de întrerupător.

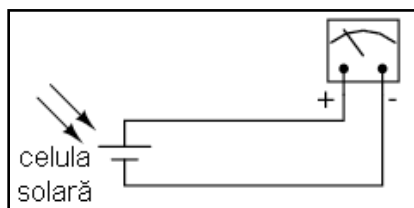
Această configurație poartă numele de conexiune emitor comun datorită faptului că, ignorând bateria de alimentare, atât pentru sursa de semnal (celula solară) cât și pentru sarcină, contactul emitorului reprezintă un punct comun celor două.

În exemplele precedente, am considerat că tranzistorul funcționează saturat (la capacitate maximă). Cunoscând faptul că, curentul prin colector poate varia în funcție de curentul bazei, putem controla luminozitatea lămpii din acest circuit în funcție de expunerea celulei solare la lumină. Când intensitatea luminoasă ce cade pe celula solară este minimă, lampa va lumina foarte slab. Pe măsură ce intensitatea luminoasă ce cade pe celula solară crește, va crește și intensitatea luminoasă a lămpii.

## Exemplu - măsurarea intensității luminoase

Să presupunem acum că am dori să măsurăm intensitatea luminoasă cu ajutorul celulei solare. Vrem să măsurăm de fapt intensitatea razei incidente pe celula solară folosind curentul său de ieșire conectat la un instrument de măsură (ampermetru).

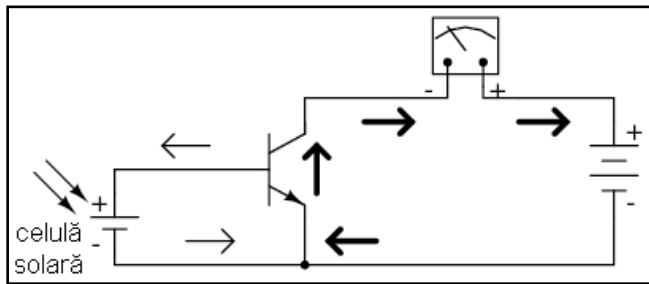
### Conectarea directă la borne a unui ampermetru



Una dintre soluții ar consta în conectarea ampermetrului direct la celula solară. Cu toate că această metodă funcționează pentru măsurători moderate ale intensităților, ea nu poate fi folosită atunci când intensitatea luminoasă scade sub o anumită valoare, datorită faptului că celula solară trebuie să alimenteze și ampermetrul iar precizia sistemului scade foarte mult în acest caz. Să

presupunem în continuare că în exemplul de mai sus, suntem interesați de măsurători extrem de scăzute ale intensităților luminoase. În acest caz, trebuie să căutăm o altă soluție.

### Utilizarea unui tranzistor

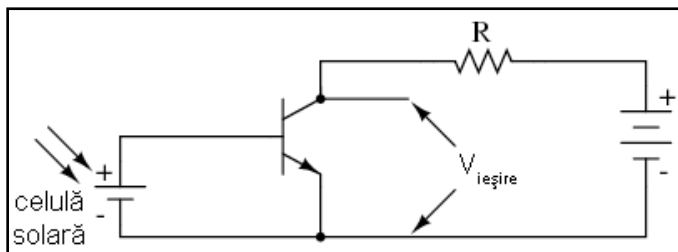


Soluția cea mai la îndemână este utilizarea unui tranzistor pentru amplificarea curentului generat de celula solară. Acest lucru înseamnă că va exista o cantitate mult mai mare de curent disponibilă pentru deviația acului indicator al aparatului de măsură, pentru o valoare mult mai mică a curentului generat de celula solară.

De această dată, curentul prin circuit (și prin aparatul de măsură) va fi de  $\beta$  ori mai mare decât curentul prin celula solară. Pentru un tranzistor cu  $\beta = 100$ , acest lucru reprezintă o creștere substanțială a preciziei măsurătorii. Atenție însă, puterea adițională necesară funcționării aparatului de măsură este „colectată” de la bateria din dreapta, nu de către celula solară. Tot ceea ce realizează celula solară este controlul curentului bateriei pentru furnizarea unei puteri mai mari necesare funcționării aparatului de măsură, puterea ce nu ar fi putut fi generată de către celula solară însăși.

Deoarece tranzistorul este un dispozitiv de regulare a curentului, iar indicația aparatului de măsură depinde doar de curentul ce trece prin bobina acestuia, indicația aparatului de măsură va depinde doar de celula solară și nu de valoarea tensiunii generate de baterie. Acest lucru înseamnă că acuratețea măsurătorii realizată de acest circuit va fi independentă de condițiile bateriei, un lucru extrem de important! Tot ceea ce trebuie bateria să facă, este să genereze o anumită tensiune minimă și un curent suficient pentru funcționarea ampermetrului.

### Înlocuirea ampermetrului cu un rezistor



Configurația emitor comun mai poate fi folosită și pentru producerea unei tensiuni dependente de semnalul de intrare, în loc de curent. Să înlocuim așadar aparatul de măsură cu un rezistor și să măsurăm tensiunea dintre colector și emitor.

Când intensitatea luminoasă pe celula solară este zero, tranzistorul va fi blocat și se va comporta precum un întrerupător deschis între colector și emitor. Acest lucru va duce la apariția unei căderi de tensiune maxime între colector și emitor,  $V_{iesire}$ , tensiune egală cu tensiunea de la bornele bateriei.

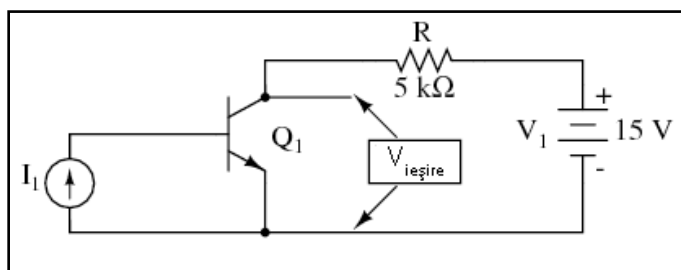
Când intensitatea luminoasă pe celula solară este maximă, celula solară va duce tranzistorul în zona de saturație; acesta se va comporta precum un întrerupător închis între colector și emitor. Rezultatul va fi o cădere de tensiune minimă între colector și emitor. Totuși, această tensiune de saturație dintre colector și emitor este destul de mică, câteva zecimi de volți, în funcție de tranzistorul folosit.

### Amplificator inversor



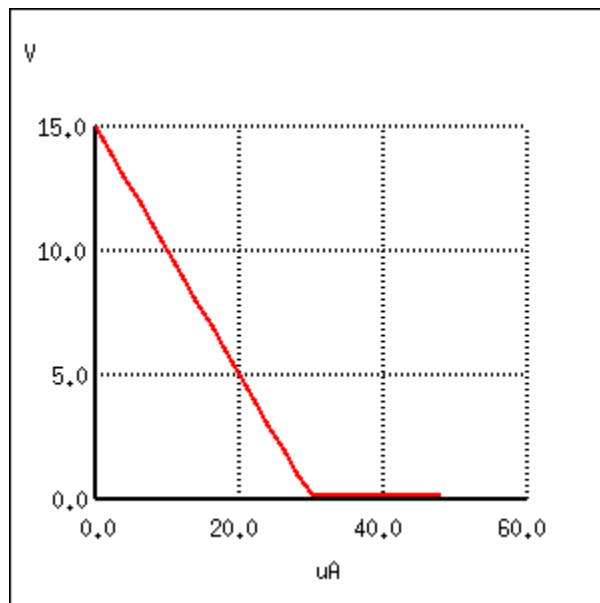
Pentru intensități luminoase ce se regăsesc între aceste valori (minim/maxim), tranzistorul va funcționa în zona activă, iar tensiunea de ieșire va fi undeva între zero volți și tensiunea bateriei. De menționat că tensiunea de ieșire a tranzistorului în configurație emitor comun este invers proporțională cu intensitatea semnalului de intrare. Cu alte cuvinte, tensiunea de ieșire scade cu creșterea semnalului de intrare. Din acest motiv, amplificatorul (cu tranzistor) în configurație emitor comun poartă numele de amplificator inversor.

### Exemplu



Să considerăm circuitul alăturat.

### Variația curent-tensiune



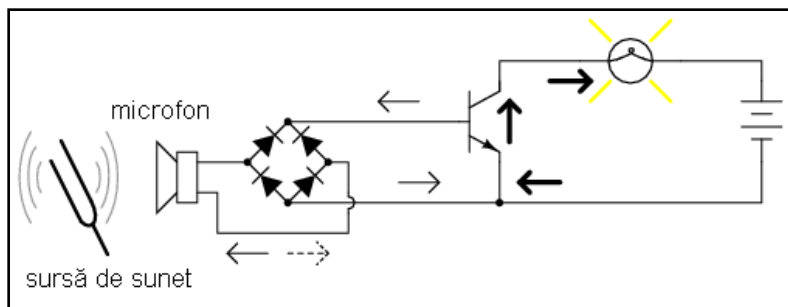
Graficul variației tensiune-curent este cel din figura alăturată (căderea de tensiune dintre colector și emitor și curentul bazei).

La începutul simulării, curentul generat de sursă (celula solară) este zero, tranzistorul este blocat iar căderea de tensiune între colector și emitor este maximă, și anume 15 V, tensiunea bateriei. Pe măsură ce curentul generat de celula solară începe să crească, tensiunea de ieșire începe să scadă proporțional, până când tranzistorul intră în starea de saturație la curentul de bază de 30  $\mu$ A. Putem observa foarte clar de pe grafic că variația tensiunii este perfect liniară, până în momentul saturării, unde nu atinge de fapt niciodată valoarea

zero. Un tranzistor saturat nu poate atinge niciodată o cădere de tensiune de exact 0 volți între colector și emitor datorită efectelor joncțiunii sale interne.

### Amplificarea semnalelor alternative

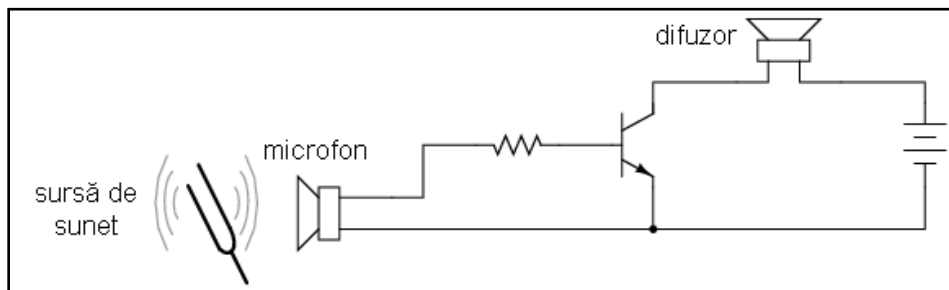
#### Circuitul original



Adesea avem nevoie însă de un amplificator în curent alternativ. O aplicația practică este utilizarea acestui tip de amplificare în sistemele audio. Să reluăm circuitul cu microfon, dar să încercăm de data aceasta să-l modificăm astfel încât să alimenteze un difuzor în loc de lampă.

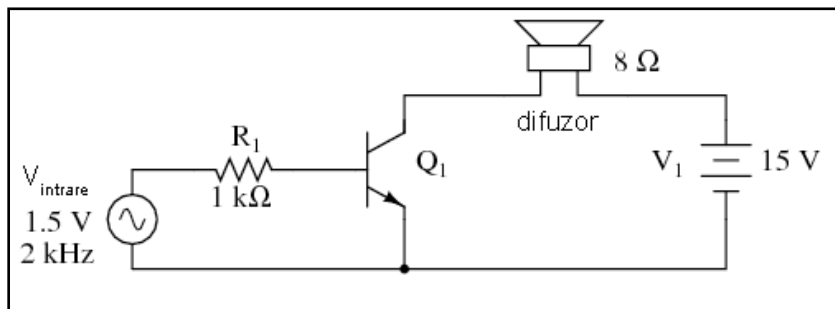
În circuitul original, am folosit o punte redresoare pentru transformarea semnalului de curent alternativ al microfonului în tensiune de curent continuu pentru polarizarea bazei tranzistorului. În acel caz ne-a interesat doar să pornim lampa cu un semnal venit din partea microfonului, iar această configurație și-a îndeplinit scopul. De data aceasta însă, vrem să reproducem un semnal de curent alternativ pe difuzor. Acest lucru înseamnă ca nu mai putem redresa semnalul de ieșire al microfonului, deoarece avem nevoie de semnalul de curent alternativ nedistorsionat la intrarea tranzistorului.

### Îndepărtarea punții redresoare



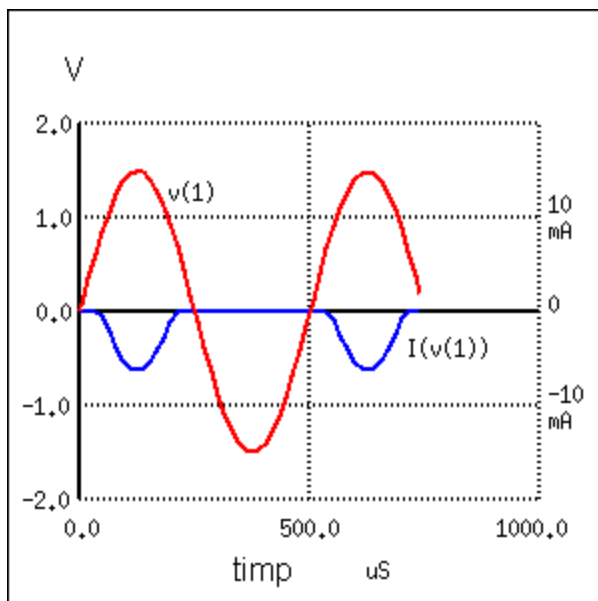
Să îndepărtăm așadar puntea redresoare din circuit și să înlocuim lampa cu un difuzor.

### Circuitul final



Fiindcă microfonul poate produce tensiuni mai mari decât tensiunea de polarizare directă a joncțiunii bază-emitor, vom conecta și un rezistor în serie cu microfonul. Circuitul practic pe care îl vom analiza este cel din figura alăturată.

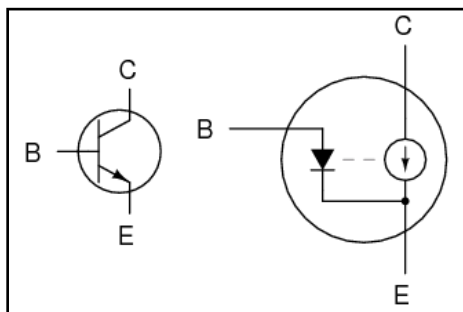
### Formele de undă ale curentului și ale tensiunii



Graficul variației tensiune-curent, tensiunea de alimentare,  $V_1$  (1,5 V,  $f = 2.000$  Hz) cu roșu, curentul prin difuzor (mai mare de 10 ori pe grafic decât curentul real, pentru observarea mai clară a acestuia), cu albastru, este prezentat alăturat.

Curentul prin difuzor este același cu cel prin baterie. Putem vedea că semnalul de tensiune de intrare este un semnal sinusoidal cu semi-perioada pozitivă și negativă, iar semnalul de curent de ieșire pulsează doar într-o singură direcție (semi-perioada negativă). Sunetul reprodus de difuzor în acest caz va fi extrem de distorsionat.

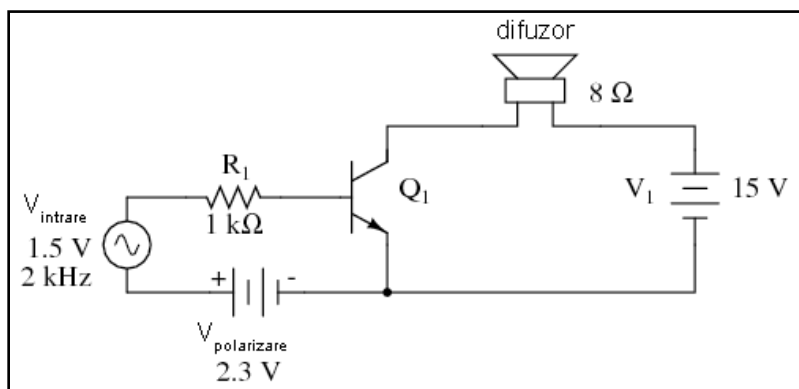
### Explicația comportamentului



Ce s-a întâmplat cu circuitul în acest caz? De ce nu reproduce în totalitate semnalul de tensiune în curent alternativ de la intrare? Să revenim la modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului pentru a încerca elucidarea problemei.

Curentul prin colector este regulat, sau controlat, printr-un mecanism de curent constant ce depinde de curentul prin dioda bază-emitor. Observați că ambele direcții ale curentului sunt uni-direcționale! În ciuda faptului că se încearcă o amplificare de semnal în curent alternativ, acesta este de fapt un dispozitiv de curent continuu, fiind capabil să conducă curenți doar într-o singură direcție. Chiar dacă aplicăm o tensiune alternativă între bază și emitor, electronii nu se pot deplasa prin circuit în semi-perioada negativă a semnalului ce polarizează invers joncțiunea bază-emitor (dioda). Prin urmare, tranzistorul va fi blocat în acea porțiune a perioadei, și va intra în conducție doar când polaritatea tensiunii de intrare este corectă, astfel încât să polarizeze direct dioda bază-emitor, și doar dacă acea tensiune este suficient de mare pentru a depăși tensiune de polarizare directă a diodei. Rețineți, tranzistorii sunt dispozitive controlate în curent: aceștia controlează curentul prin colector în funcție de existența curentului între bază și emitor (curentul de bază), și nu în funcție de tensiunea bază-emitor.

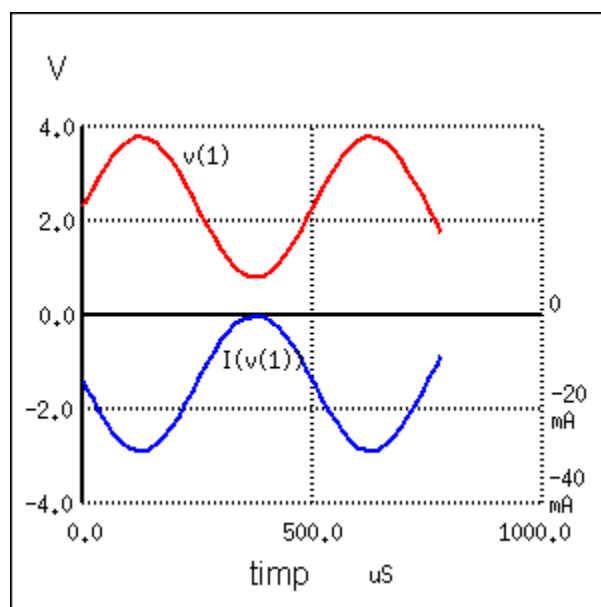
### Conectarea unei surse de curent continuu la intrare



Singura modalitate prin care tranzistorul poate reproduce întreaga formă de undă pe difuzor, este menținerea acestuia în zona activă pe întreaga perioadă a undei, adică, trebuie să menținem un curent prin bază în toată această perioadă. Prin urmare, joncțiunea bază-emitor trebuie polarizată direct tot timpul. Din fericire, acest lucru se

poate realiza prin conectarea unei surse de curent continuu în serie cu semnalul de intrare.

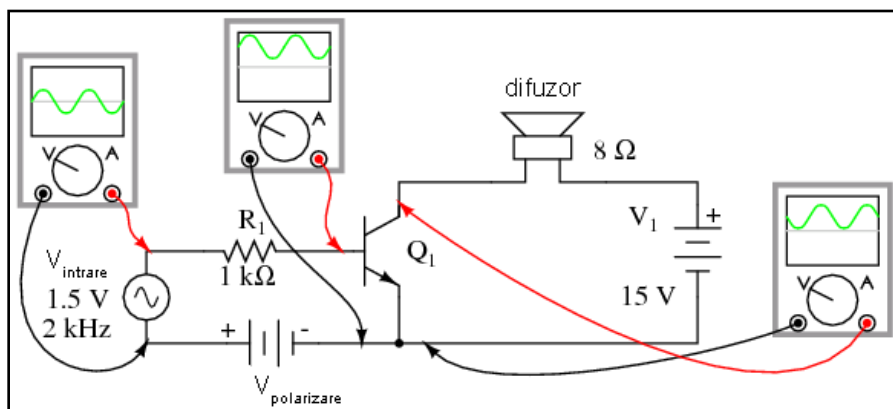
### Formele de undă ale curentului și ale tensiunii



Graficul formelor de undă arată de data această precum în figura alăturată.

Cu sursa de tensiune de polarizare ( $V_{\text{polarizare}}$ ) conectată în serie cu sursa de semnal, tranzistorul rămâne în zona activă de funcționare pe toată perioada undei, reproducând cu exactitate forma de undă de la intrare pe difuzor. Observați că tensiunea de la intrare variază între valorile de 0,8 V și 3,8 V, o amplitudine vârf-la-vârf de exact 3 volți ( $2 \cdot \text{amplitudinea de vârf a sursei} = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ V}$ ). Curentul de ieșire, pe difuzor, variază între zero și aproximativ 300 mA, fiind defazat cu  $180^\circ$  cu semnalul de intrare (al microfonului).

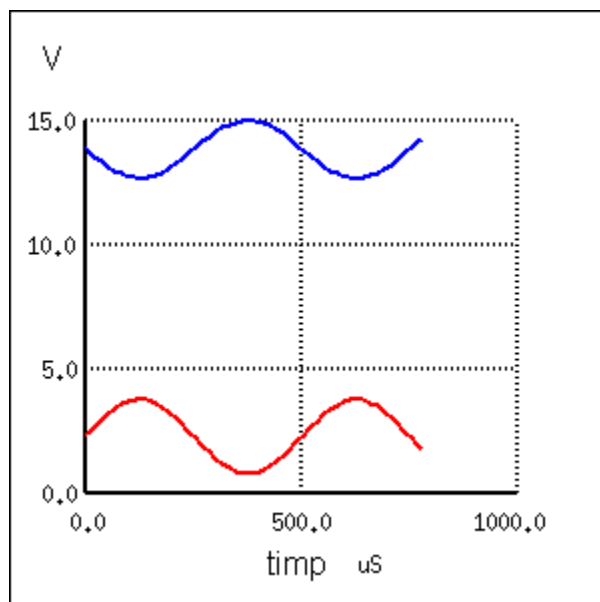
### Formele de undă în întreg circuitul



Dacă am conecta simultan mai multe osciloscopiae în circuitul de mai sus, formele de undă ale tensiunilor ar arăta astfel.

## Amplificarea în tensiune a tranzistorului în conexiune emitor comun

Amplificarea în curent al circuitului de mai sus este dată de factorul beta ( $\beta$ ) al tranzistorului, în acest caz particular, 100, sau 40 dB. Determinarea amplificării în tensiune este însă puțin mai complicată de determinat.

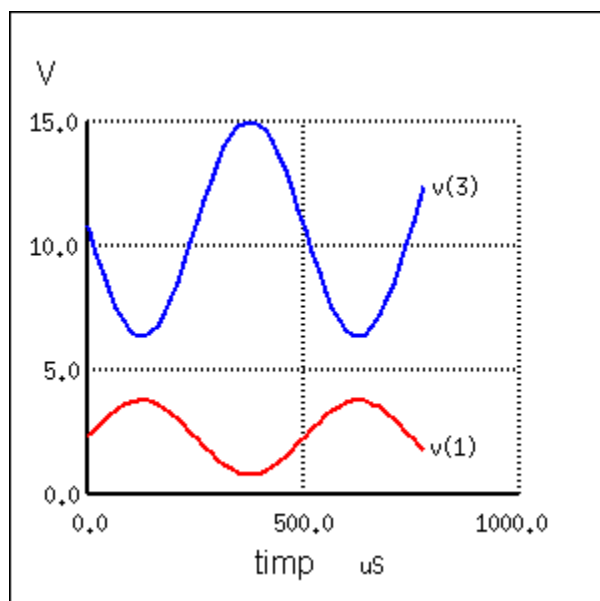


Să urmărim graficul tensiunii pe difuzor (albastru) și al tensiunii de intrare pe tranzistor (roșu, bază-emitor):

Dacă am lua aceeași scală, de la 0 la 4 V, putem vedea că forma de undă a tensiunii de ieșire are o amplitudine vârf-la-vârf mai mică decât tensiunea de intrare. Din moment ce amplificarea în tensiune a unui amplificator este definită ca și raportul dintre amplitudinile semnalelor de curent alternativ, putem ignora componenta de curent continuu ce separă cele două forme de undă. Chiar și așa, tensiunea de intrare este mai mare decât cea de ieșire, ceea ce înseamnă că amplificarea în tensiune este sub-unitară.

Această amplificare mică în tensiune nu este caracteristică tuturor amplificatoarelor emitor-comun, ci este consecința diferenței mari dintre rezistențele de intrare și ieșire. Rezistența de intrare ( $R_i$ ) în acest caz este de 1.000  $\Omega$ , iar rezistența sarcinii (difuzor) este de doar 8  $\Omega$ . Deoarece amplificarea în curent a amplificatorului este determinată doar de factorul beta ( $\beta$ ) al tranzistorului, și deoarece acest factor este fix, amplificarea în curent nu se va modifica odată cu variația niciuneia dintre cele două rezistențe. Totuși, amplificarea în tensiune depinde de aceste rezistențe.

### Mărirea rezistenței sarcinii



Dacă mărim rezistența sarcinii, căderea de tensiune pe aceasta va fi mai mare pentru aceleași valori ale curenților, rezultând o formă de undă de ieșire mai mare. Să urmărim și graficul formelor de undă pentru sarcina de 30  $\Omega$ .

De data aceasta, amplitudinea formei de undă a tensiunii de ieșire (albastru) este mult mai mare decât tensiunea de intrare. Dacă ne uităm mai atent, putem vedea că amplitudinea vârf la vârf este de 9 V, de 3 ori mai mare decât amplitudinea tensiunii de intrare. Mai exact, tensiunea de intrare este de 1,5 V, iar cea de ieșire de 4,418 V.

## Calculul amplificării în tensiune

Să calculăm așadar raportul (factorul) de amplificare în tensiune ( $A_V$ ).

$$A_V = \frac{V_{ieșire}}{V_{intrare}} = \frac{4,41 \text{ V}}{1,5 \text{ V}} = 2,94$$

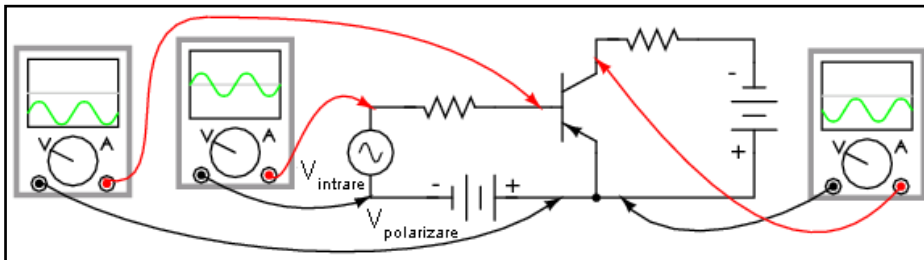
## Formula generală de calcul a amplificării în tensiune

$$A_V = \beta \frac{R_{ieșire}}{R_{intrare}} = 100 \frac{30 \Omega}{1.000 \Omega} = 3$$

Deoarece amplificarea în curent a amplificatorului emitor comun este fixată de factorul  $\beta$ , iar tensiunile de intrare și ieșire vor fi egale cu produsul dintre curenții de intrare și ieșire și rezistențele rezistorilor respectivi, putem scrie următoarea ecuație pentru aproximarea amplificării în tensiune:

Diferența dintre amplificarea reală (2,94) și cea ideală (3), se datorează imperfecțiunilor tranzistorilor în general.

## Amplificator emitor comun cu tranzistor PNP



Până acum am folosit doar tranzistori de tipul NPN, dar putem la fel de bine utiliza tranzistori NPN în orice tip de configurație, atâta timp cât

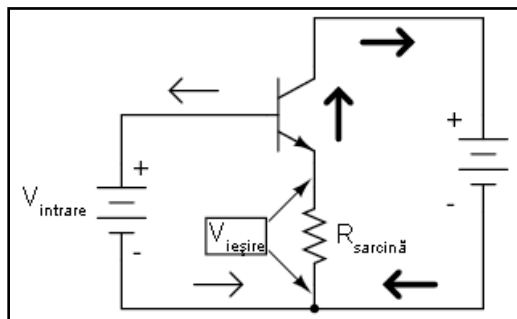
polaritatea și direcțiile curenților sunt cele corecte. Factorii de amplificare în curent și tensiune sunt aceeași și pentru amplificatorul cu tranzistor PNP, doar polaritățile bateriilor sunt diferite.

## 07. Conexiunea colector comun

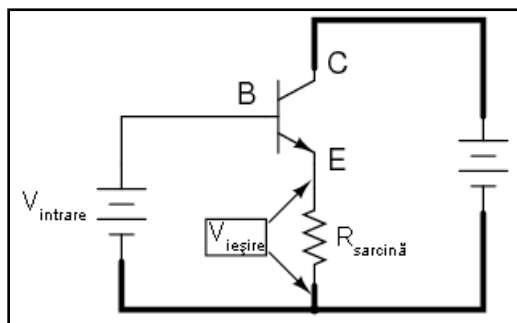
- Denumirea de colector comun vine de la faptul că tensiunea de intrare și cea de ieșire au ca și punct comun terminalul colectorului tranzistorului, ne-luând în considerare sursele de putere din circuit
- Amplificator colector comun mai este cunoscut și sub numele de repetor pe emitor
- Tensiunea de ieșire a unui amplificator în configurație colector comun este în fază cu tensiunea de intrare, ceea ce înseamnă că acest tip de amplificator este *ne-inversor*

- Factorul de amplificare în curent ( $A_I$ ) al amplificatorului colector comun este egal cu  $\beta$  plus 1, iar factorul de amplificare în tensiune ( $A_V$  este foarte aproape de 1
- Conectarea în serie a mai multor tranzistori în configurație colector comun, poartă numele de configurație Darlington. Factorul de amplificare în curent rezultat este produsul dintre factorii de amplificare al fiecărui tranzistor din configurație

## Definiție



Configurația amplificatorului colector comun arată astfel.



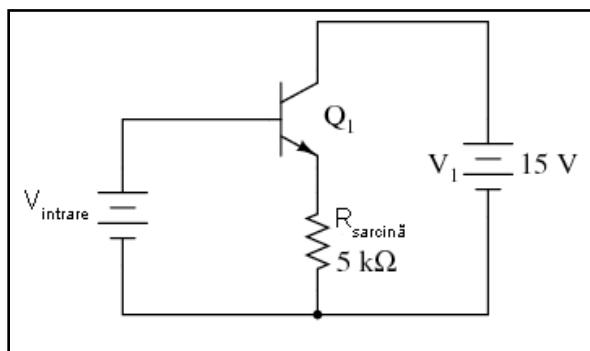
Denumirea de colector comun vine de la faptul că, ignorând sursa de alimentare (bateria), sursa de semnal și sarcina au ca punct comun contactul colectorului.

Se poate observa că prin rezistorul de sarcină trece atât curentul colectorului cât și curentul bazei, fiind conectat în serie cu emitorul. Amplificarea în curent a amplificatorului colector comun este cea mai mare dintre toate configurațiile, deoarece într-un tranzistor, cel mai

mare curent se regăsește pe emitor, fiind suma dintre curentul bazei și al colectorului.

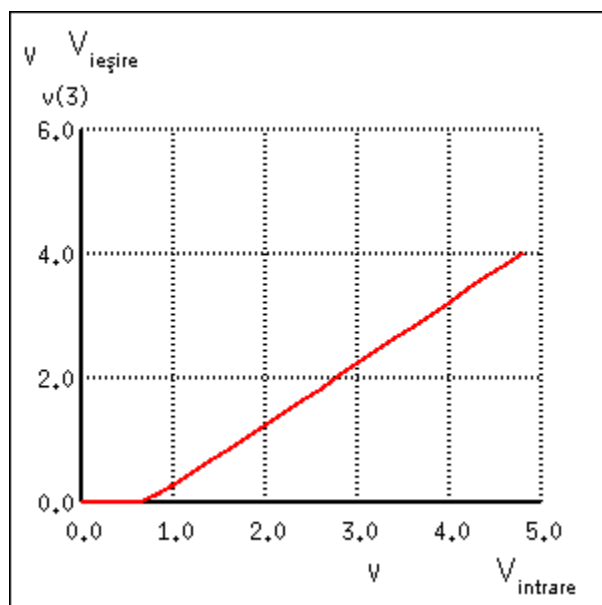
## Exemplu

### Configurația circuitului



Să analizăm însă circuitul alăturat pentru a descoperi particularitățile acestei configurații.

## Variația curent-tensiune



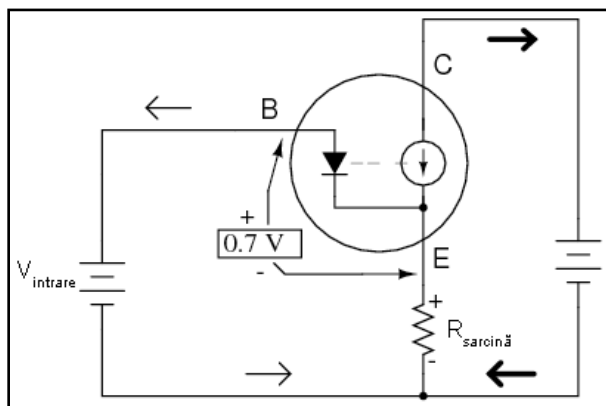
Graficul variației căderii de tensiune de ieșire - cădere de tensiune de intrare, este cel alăturat.

Fața de conexiunea emitor comun, amplificatorul colector comun produce la ieșire o cădere de tensiune de aceeași polaritate cu tensiunea de intrare. Pe măsură ce tensiunea de intrare crește, crește și cea de ieșire. Mai mult, tensiunea de ieșire, este aproape identică cu tensiunea de intrare, minus căderea de 0,7 V a joncțiunii P-N.

Indiferent de factorul beta al tranzistorului, sau de valoarea sarcinii, amplificatorul colector comun are un factor de amplificare în tensiune ( $A_V$ ) extrem de apropiat de valoarea 1. Din această cauză, conexiunea colector comun mai este denumită și repetor pe emitor.

## Explicație

Este relativ ușor de înțeles motivul pentru care căderea de tensiune pe sarcina amplificatorului în colector comun este aproximativ egală cu tensiunea de intrare.



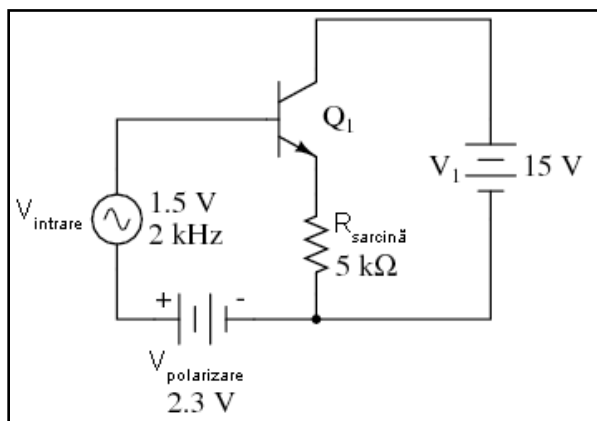
constantă.

Dacă ne referim la modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului, putem vedea că, curentul bazei trebuie să treacă prin joncțiunea P-N bază-emitor, joncțiune echivalentă unei diode redresoare. Dacă această joncțiune este polarizată direct, va exista o cădere de tensiune de aproximativ 0,7 V (siliciu) între terminalele acesteia. Această cădere de tensiune de 0,7 V nu depinde de amplitudinea curentului de bază, astfel că putem considera această cădere de tensiune ca fiind

Cunoscând polaritățile tensiunilor joncțiunii P-N bază-emitor și a rezistorului de sarcină, putem vedea că tensiunea de intrare trebuie să fie egală cu suma celor două, în conformitatea cu legea lui Kirchhoff pentru tensiune. Cu alte cuvinte, tensiunea sarcinii va fi tot timpul cu aproximativ 0,7 V mai mică decât tensiunea de intrare, atunci când tranzistorul se află în stare de conducție.

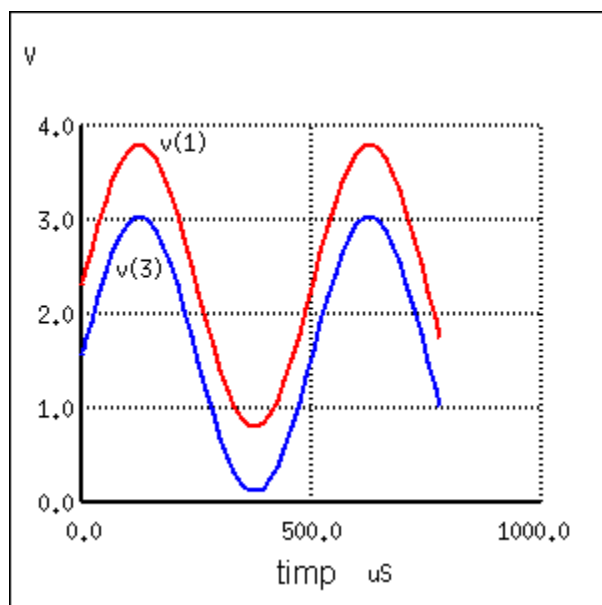


## Tensiunea de polarizare în curent continuu



Pentru amplificarea semnalelor de curent alternativ cu ajutorul configurației colector comun, este nevoie de utilizarea unei surse de tensiune în curent continuu (tensiune de polarizare), la fel cum a fost cazul configurației emitor comun. Rezultatul este însă de această dată un amplificator ne-inversor.

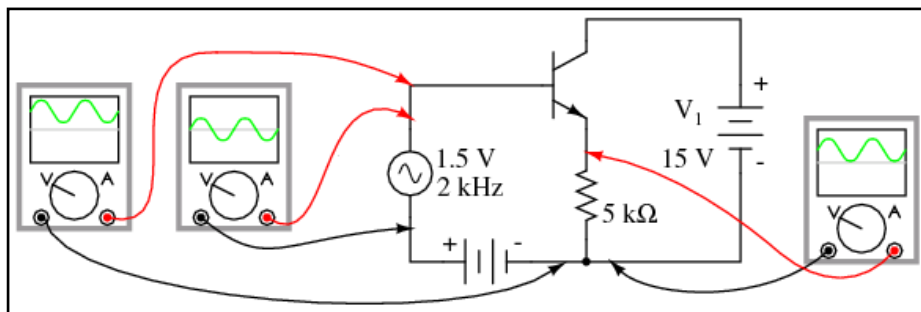
## Tensiunea de intrare și de ieșire



Formele de undă ale tensiunii de ieșire (albastru) și de intrare (roșu) sunt prezentate în graficul alăturat.

## Formele de undă în întreg circuitul

Dacă ar fi să conectăm mai multe osciloscoape în circuit, vom vedea că formele de undă ale tensiunilor arată astfel:

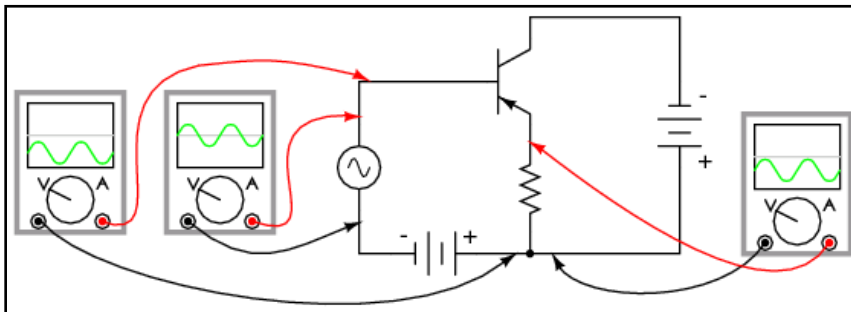


## Factorul de amplificare în curent

$$A_I = \frac{I_{emitor}}{I_{bază}} = \frac{I_{emitor} + I_{bază}}{I_{bază}} = \frac{I_{colector}}{I_{bază}} + 1 = \beta + 1$$

Din moment ce această configurație nu oferă nicio amplificare în tensiune, singura amplificare realizată este în curent. Configurația anterioară, emitor comun, oferea un factorul de amplificare în curent egal cu factorul  $\beta$  al tranzistorului, datorită faptului că, curentul de intrare trecea prin bază, iar curentul de ieșire (sarcină) trecea prin colector, iar  $\beta$  este prin definiție raportul dintre curentul de colector și curentul de bază. În configurația colector comun însă, sarcina este conectată în serie cu emitorul, prin urmare, curentul de ieșire este egal cu acest curent al emitorului. Dar curentul prin emitor este curentul colectorului *plus* curentul bazei. Acest lucru înseamnă o amplificare în curent ( $A_I$ ) egală cu  $\beta$  plus 1.

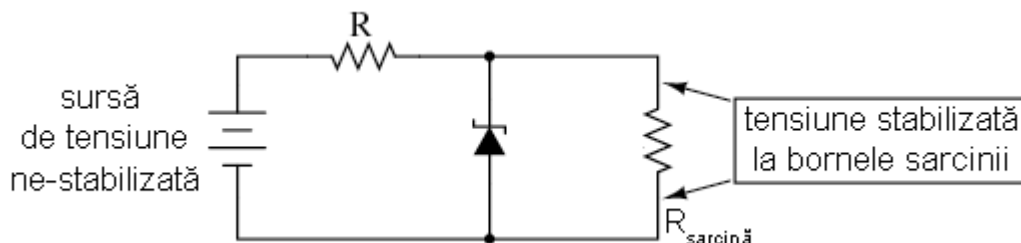
## Amplificator colector comun cu tranzistor PNP



Și în acest caz, se pot utiliza tranzistori de tip PNP pentru realizarea amplificatorului colector comun. Toate calculele sunt identice. Singura diferență este inversarea polarității tensiunilor și a direcției curenților.

## Aplicație - stabilizarea tensiunii

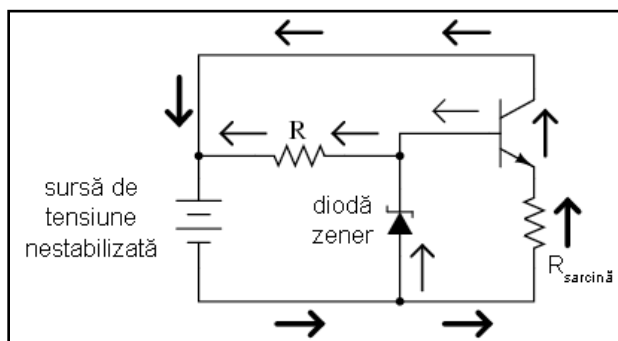
### Diode Zener



O aplicație populară a tranzistorului colector comun constă în stabilizarea surselor de putere în curent continuu. Una dintre soluții utilizează diode Zener pentru tăierea tensiunilor mai mari decât tensiunea Zener.

Totuși, curentul ce poate fi transmis sursei este destul de limitat în această situație. În principiu, acest circuit regulează tensiunea la bornele sarcinii prin menținerea curentului prin rezistorul serie la valori suficient de mari pentru ca întreaga putere în exces a sursei de tensiune să cadă pe rezistor; dioda Zener va utiliza un curent necesar menținerii unei căderi de tensiune constante la bornele sale. Pentru sarcini mari, ce necesită un curent mare pentru acționarea lor, un stabilizator de tensiune cu diodă Zener ar trebui să șunteze un curent mare prin diodă pentru a putea stabili tensiunea pe sarcină.

### Tranzistor în conexiune colector comun

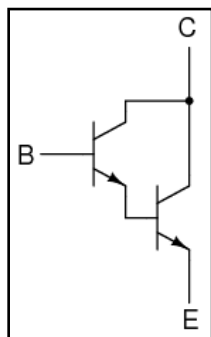


O metodă de rezolvare a acestei probleme constă în utilizarea unui tranzistor în conexiune colector comun pentru amplificarea curentului prin sarcină, astfel ca dioda Zener să nu fie nevoită să conducă decât curentul necesar bazei tranzistorului.

Singura problemă este că tensiunea pe sarcină va fi cu aproximativ 0,7 V mai mică decât căderea de tensiune pe dioda Zener. Acest lucru poate fi însă corectat prin utilizarea unei diode Zener cu o tensiune Zener mai mare cu 0,7 V decât tensiunea necesară pentru aplicația în cauză.

### Tranzistori în configurație Darlington

#### Modul de conectare



În unele aplicații, factorul de amplificare în curent al unui singur tranzistor în configurație colector comun nu este suficient. În acest caz, se pot conecta (etaja) mai mulți tranzistori într-o configurație Darlington.

#### Factorul de amplificare în curent

Configurația Darlington constă în conectarea pe sarcina unui tranzistor colector comun a unui alt tranzistor, multiplicând astfel factorii de amplificare în curent al celor doi:

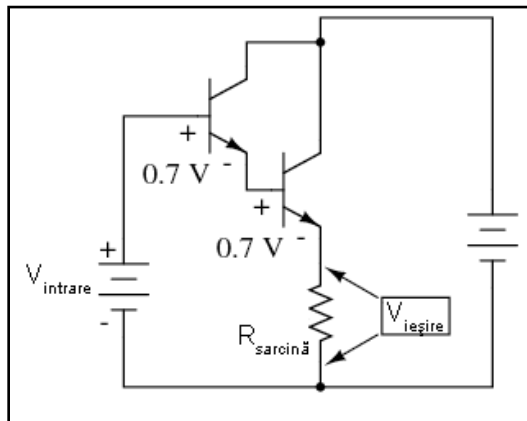
$$A_I = (\beta_1 + 1) \cdot (\beta_2 + 1)$$

unde:

$\beta_1$  - factorul beta al primului tranzistor

$\beta_2$  - factorul beta al celui de al doilea tranzistor

### Factorul de amplificare în tensiune



Amplificarea în tensiune va fi și de această dată apropiată de 1, cu toate că tensiunea de ieșire va fi mai mică cu 1,4 V decât tensiunea de intrare:

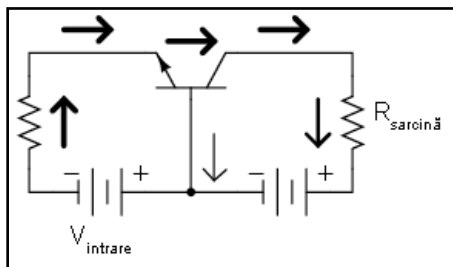
### Observații

Tranzistorii în configurație Darlington pot fi cumpărați ca și dispozitive discrete, sau pot fi construiți din tranzistori individuali. Desigur, dacă se dorește obținerea unor curenți și mai mari, se pot conecta chiar și trei sau patru tranzistori în configurație Darlington.

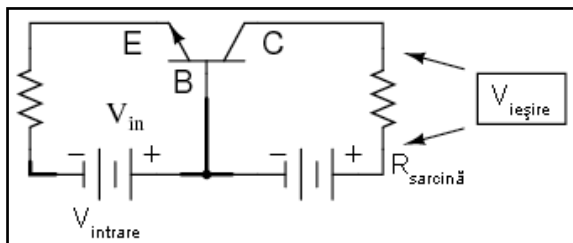
## 08. Conexiunea bază comună

- Denumirea de bază comună vine de la faptul că tensiunile de intrare și de ieșire ale amplificatorului au ca și punct comun baza tranzistorului, ne-luând în considerare sursele de putere
- Factorul de amplificare în curent al amplificatorului bază comună este tot timpul mai mic decât 1
- Factorul de amplificare în tensiune depinde de rezistențele de intrare și de ieșire, cât și de rezistența internă a joncțiunii emitor-bază a tranzistorului, rezistența ce variază cu variația tensiunii de polarizare în curent continuu. Această amplificare este însă foarte mare
- Raportul dintre curentul colectorului și curentul emitorului unui tranzistor, poartă numele de factor alfa ( $\alpha$ ). Pentru orice tranzistor, factorul alfa este subunitar (mai mic decât 1)

### Definiție



Această configurație este mai complexă decât celelalte două, emitor comun și colector comun, și este mai puțin folosită datorită caracteristicilor ciudate de funcționare.



Denumirea de bază comună vine de la faptul că semnalul sursei de alimentare și sarcina au ca și punct comun baza tranzistorului.

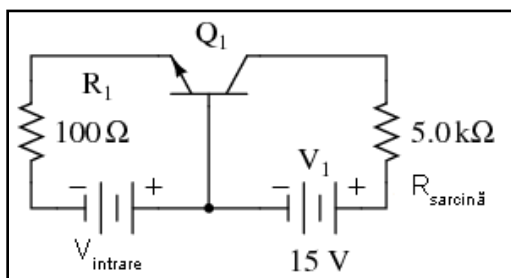
Probabil că cea mai ciudată caracteristică a acestui tip de configurație constă în faptul că sursa de semnal de intrare trebuie să conducă întreg curentul de pe emitor al tranzistorului, după cum este indicat în prima figură prin săgețile îngroșate. După câte știm, curentul emitorului este mai mare decât oricare alți curenți ai tranzistorului, fiind suma curenților de bază și de colector. În celelalte două configurații, sursa de semnal era conectată la baza tranzistorului, curentul prin sursă fiind astfel cel mai mic posibil.

## Factorul de amplificare în curent (factorul alfa)

Deoarece curentul de intrare este mai mare decât toți ceilalți curenți din circuit, inclusiv curentul de ieșire, amplificarea în curent a acestui tip de amplificator este în realitatea mai mică decât 1. Cu alte cuvinte, acest amplificator atenuează curentul, nu-l amplifică. În configurațiile emitor și colector comun, parametrul folosit pentru amplificarea în curent este  $\beta$ , dar în configurație bază comună, avem nevoie de un alt parametru de bază al tranzistorului: raportul dintre curentul colectorului și curentul emitorului, raport ce este tot timpul mai mic decât 1, și poartă numele de factorul alfa ( $\alpha$ ).

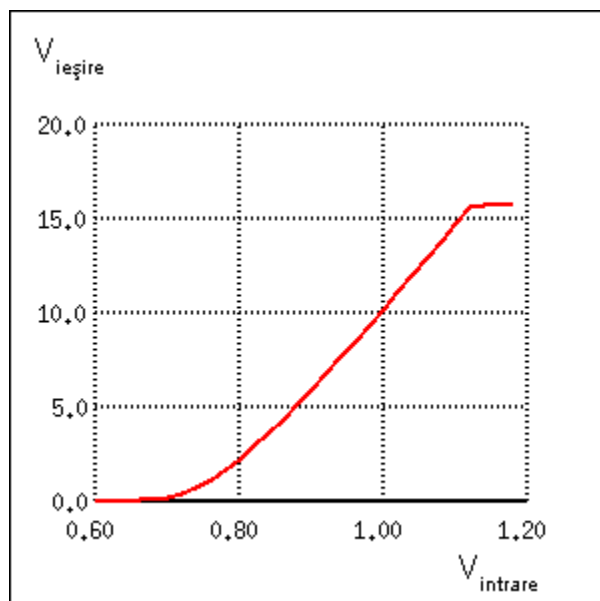
## Exemplu

### Circuitul



Circuitul practic pe care îl vom studia, este cel alăturat.

### Variația tensiunea ieșire - tensiune intrare

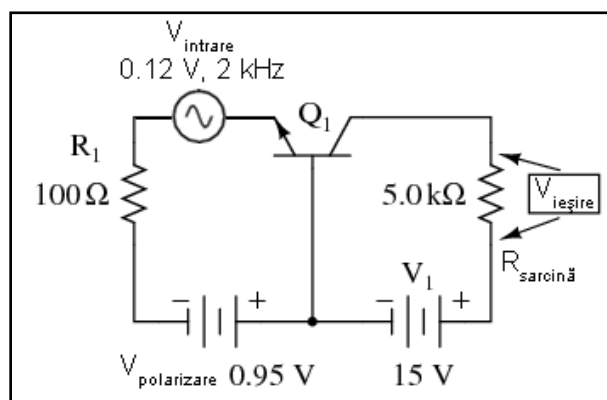


Graficul variației tensiunii de ieșire cu tensiune de intrare este cel alăturat.

Putem observa de pe grafic, că tensiune de ieșire crește de la 0 (tranzistor blocat) la 15,75 V (tranzistor saturat) pe când tensiunea de intrare crește de la 0,6 V până la doar 1,2 V. Mai precis, tensiunea de ieșire nu începe să crească decât după ce tensiunea de intrare a depășit valoarea de 0,7 V, iar nivelul de saturație este atins pentru o tensiune de intrare de 1,12 V. Acest lucru reprezintă o amplificare în tensiune destul de mare, de 37,5. Putem observa de asemenea, că tensiunea de ieșire (măsurată la bornele rezistorului de sarcină,  $R_{sarcină}$ ) crește peste valoarea sursei de tensiune (15 V) la saturație,

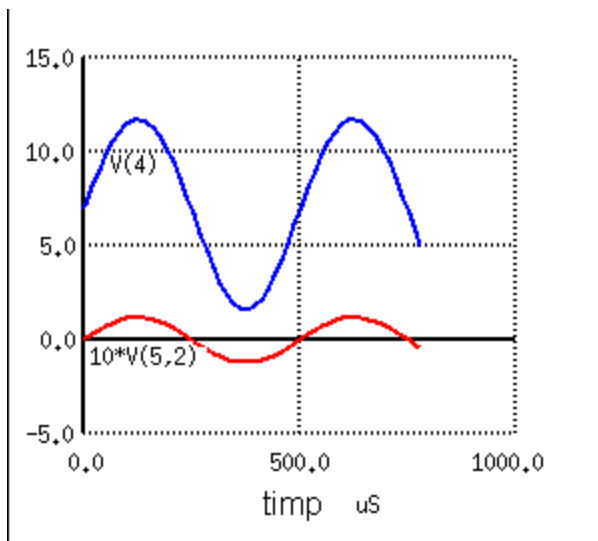
datorită conectării în serie a celor două surse de putere.

### Adăugarea unei surse de curent continuu



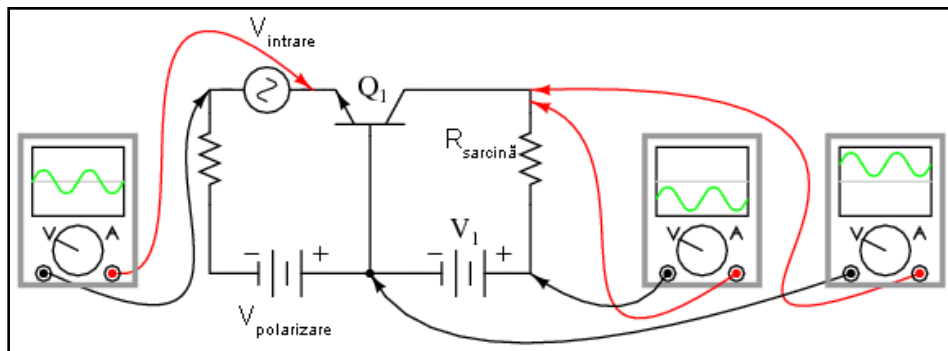
O nouă analiză a circuitului, de data aceasta cu o sursă de semnal în curent alternativ legată în serie cu o sursă de polarizare de curent continuu, dezvăluie încă odată factorul mare de amplificare în tensiune.

### Graficul tensiunilor de intrare și de ieșire



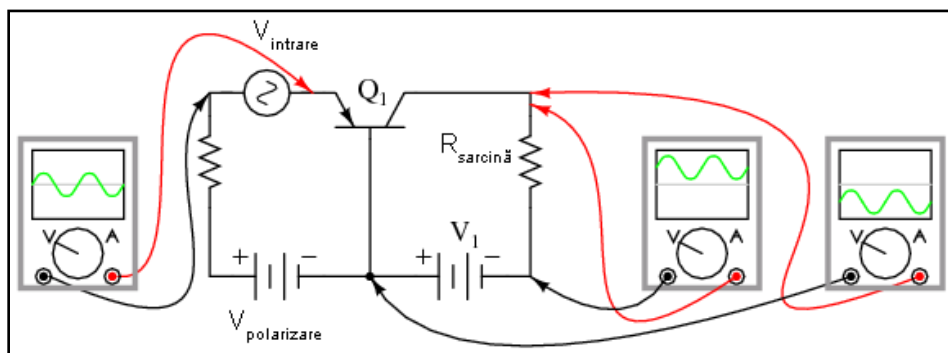
După cum se poate observa în figura alăturată, semnalul de intrare (roșu, mărit de 10 ori pentru ușurința vizualizării) este în fază cu cel de ieșire (albastru), ceea ce înseamnă că amplificatorul bază comun este non-inversor.

### Vizualizarea formelor de undă în întreg circuitul



Putem vizualiza formele de undă ale amplificatorului conectând mai multe osciloscopiae, simultan, în punctele de interes.

### Tranzistor PNP



Același lucru este valabil și pentru un tranzistor PNP.

### Factorului de amplificare în tensiune

Calcularea factorului de amplificare în tensiune pentru configurație bază comună este destul de dificilă și presupune aproximări ale comportamentului tranzistorului ce sunt greu de măsurat direct. Față de celelalte

configurații, unde amplificarea era determinată fie de raportul dintre doi rezistori (emitor comun), fie avea o valoare fixă (colector comun), în cazul de față această valoare depinde în mare măsură de valoarea tensiunii de polarizare în curent continuu a semnalului de intrare. Rezistența internă a tranzistorului între emitor și bază joacă un rol major în determinarea factorului de amplificare în tensiune, iar această rezistență variază odată cu variația curentului prin emitor.

## **Observație**

Prin urmare, un factor de amplificare în curent subunitar și un factor de amplificare în tensiune imprevizibil, fac ca această configurație să ofere puține aplicații practice.

## **09. Amplificatoare clasa A, B, AB, C și D**

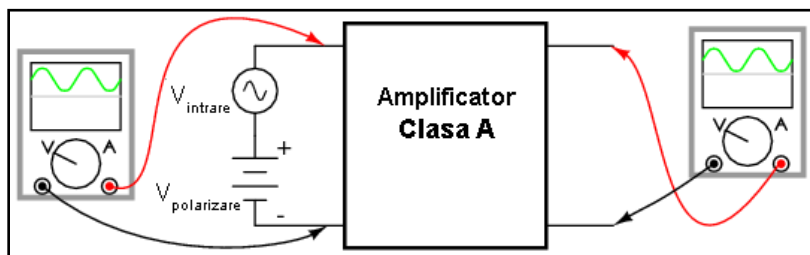
- Amplificatorul clasa A se află în zona activă de funcționare pe întreaga perioadă a formei de undă de la intrare, prin urmare, aceasta este reprodusă în totalitate la ieșire
- Amplificatorul clasa B reproduce la ieșire doar o jumătate din forma de undă de la intrare: fie jumătatea pozitivă, fie pe cea negativă. Tranzistorul se află doar o jumătate din timp în zona activă de funcționare, iar în rest este blocat
- Amplificatorul clasa AB este o configurație ce se află între amplificatorul de clasa A și cel de clasă B în ceea ce privește timpul petrecut de acesta în zona activă de funcționare
- Clasa D presupune (re)-proiectarea amplificatorului, și nu se bazează doar pe tensiunea de polarizare în curent continuu, așa cum este cazul claselor precedente. Forma semnalului de ieșire este dreptunghiulară, iar factorul de umplere al acestuia depinde de amplitudinea instantanee a semnalului de intrare. Tranzistorii unui astfel de amplificator nu se află niciodată în zona activă de funcționare, ei sunt fie blocați fie saturați. Eficiența acestui tip de amplificator este mare datorită puterii disipate sub formă de căldură foarte scăzută

## **Definiție**

După modul de reproducere la ieșire a formei de undă de la intrare, amplificatoarele pot fi împărțite pe clase. Aceste clase sunt desemnate cu literele A, B, AB, C și D.

### **Amplificator clasa A**

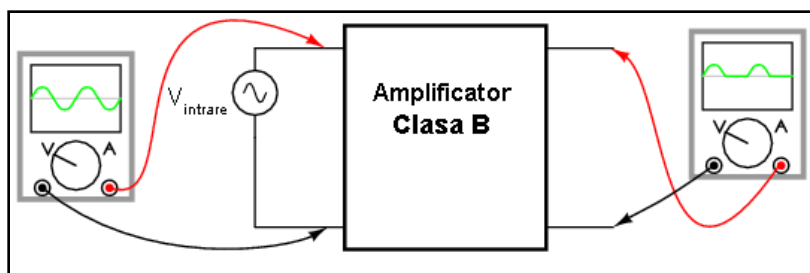




În cazul amplificatoarelor de clasă A, întreg semnalul de intrare este reprodus la ieșire. Acest mod de operare al tranzistorului poate fi atins doar atunci când acest funcționează tot timpul în zona activă, ne-atingând niciodată punctul de saturație sau de blocare.

Pentru realizarea acestui lucru, este nevoie de o tensiune de polarizare de curent continuu suficient de mare pentru funcționarea tranzistorului între zona de blocare și cea de saturație. În acest fel, semnalul de intrare în curent alternativ va fi perfect „centrat” între limita superioară și cea inferioară a nivelului de semnal al amplificatorului.

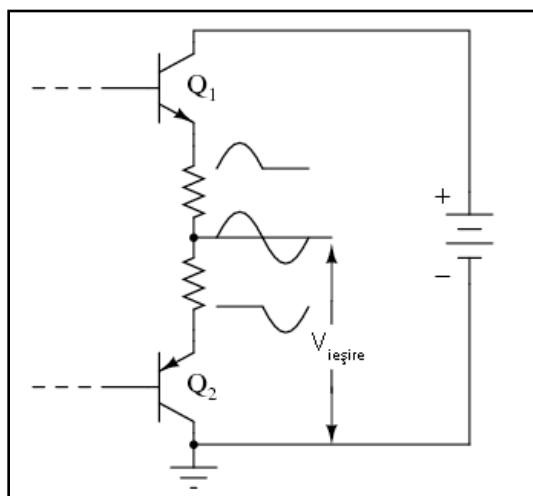
## Amplificator clasa B



Amplificatorul de clasă B este ceea ce am obținut în cazul amplificatorului emitor comun, cu semnal de intrare în curent alternativ dar fără nicio tensiune de polarizare în curent continuu conectată la intrare. În acest caz, tranzistorul petrece doar

o jumătate de timp în zona activă de funcționare, iar în cealaltă jumătate de timp este blocat, datorită faptului că tensiunea de intrare este prea mică, sau chiar de polaritate inversă, pentru a putea polariza direct joncțiunea bază-emitor.

## Configurația contratimp



Folosit individual, amplificatorul de clasă B nu este foarte folositor. De cele mai multe ori, distorsiunile foarte mari introduse în forme de undă, prin eliminarea unei semi-alternanțe, nu sunt acceptabile. Totuși, această modalitate de polarizare a amplificatoarelor este folosită dacă se folosesc două amplificatoare de clasă B în configurație contratimp (push-pull), fiecare amplificator reproducând doar o jumătate a formei de undă.

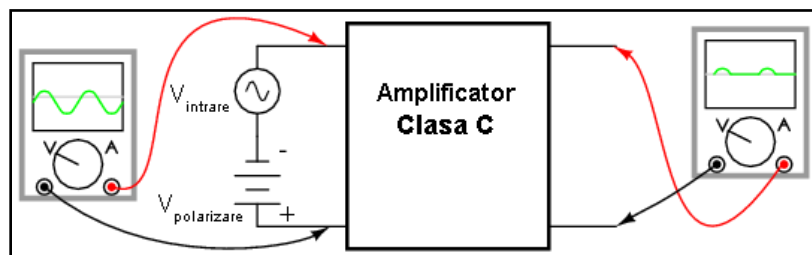
## Avantaje

Un avantaj al amplificatorului de clasă B (contratimp) față de cel de clasă A, constă într-o capacitate mai mare a puterii de ieșire. În clasa A, tranzistorul disipă o putere considerabilă sub formă de căldură datorită faptului că acesta se află tot timpul în zona activă de funcționare. În clasa B, fiecare tranzistor conduce doar jumătate din timp, iar în cealaltă jumătate este blocat, nu conduce curent electric, și prin urmare, puterea disipată sub formă de căldură este zero. Astfel, fiecare tranzistor are timp de „odihnă” și de răcire, atunci când celălalt tranzistor se află în conducție. Amplificatoarele de clasă A sunt mai simplu de construit, dar sunt limitate doar la aplicațiile de putere joasă datorită căldurii generate.

## Amplificator clasa AB

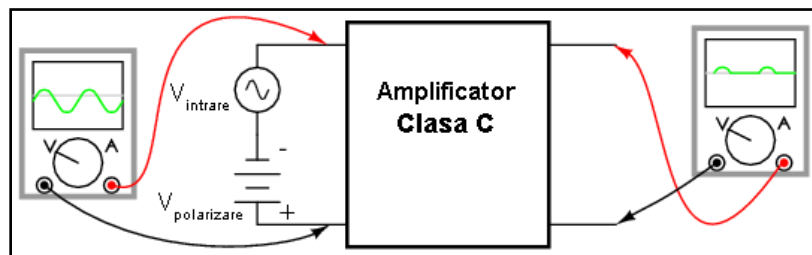
Amplificatoarele de clasă AB sunt undeva între clasa A și clasa B; tranzistorul conduce mai mult de 50% din timp, dar mai puțin de 100%.

## Amplificator clasa C



Dacă semnalul de intrare al amplificatorului este ușor negativ (sursa de tensiune în curent alternativ inversată), semnalul de ieșire va fi tăiat și mai mult față de semnalul de ieșire al amplificatorului de clasa B. Tranzistorul va petrece majoritatea timpului în stare blocată.

### Introducerea unui circuit rezonant la ieșire



a oscilatorului.

Deși această configurație nu pare practică, dacă se conectează un circuit rezonant condensator-bobină la ieșire, semnalul ocazional produs de amplificator la ieșire este suficient pentru punerea în funcționare

## Observații

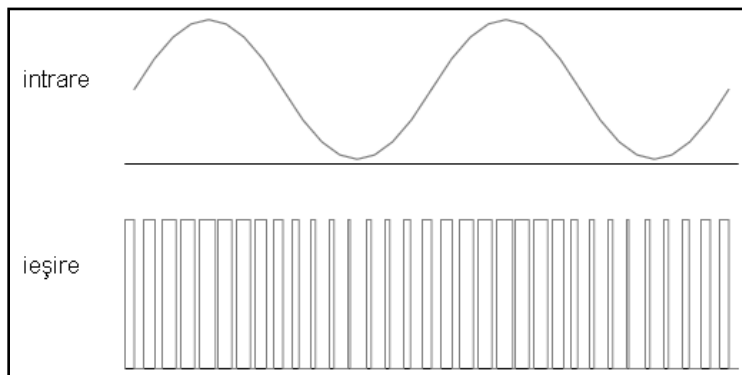
Datorită faptului că tranzistorul este în mare parte a timpului blocat, puterea la bornele sale poate fi mult mai mare decât în cazul celorlalte două configurații văzute mai sus. Datorită dependenței de circuitul rezonant de la ieșire, acest amplificator poate fi folosit doar pentru semnale de o anumită frecvență fixă.

## Factorul de umplere

Factorul de umplere reprezintă raportul dintre durata în care semnalul este maxim și durata în care semnalul este zero. Cu alte cuvinte, reprezintă durata de funcționare al unui dispozitiv, în general. Factorul de umplere variază odată cu amplitudinea instantanee a semnalului de intrare.

## Amplificator clasa D

Acest tip de amplificator este total diferit față de amplificatoarele de clasă A, B, AB sau C. Acesta nu este obținut prin aplicarea unei anumite tensiuni de polarizare, precum este cazul celorlalte clase, ci necesită o modificare a circuitului de amplificare. Nu vom intra pentru moment în detaliile construirii unui astfel de amplificator, dar vom discuta în schimb principiul său de funcționare.



Un amplificator clasa D reproduce profilul formei de undă a tensiunii de la intrare prin generarea unui semnal de ieșire dreptunghiular cu o rată de pulsație mare.

Cu cât amplitudinea instantanee a semnalului de intrare este mai mare, cu atât factorul de umplere al formei de undă dreptunghiulare este mai mare. Singurul motiv pentru folosirea amplificatorului

de clasă D, este evitarea funcționării tranzistorului în zona activă de funcționare; tranzistorul va fi tot timpul fie blocat fie saturat. Puterea disipată de tranzistor va fi foarte mică în acest caz.

## Dezavantaje

Dezavantajul metodei constă în prezența armonicilor la ieșire. Din fericire, din moment ce frecvența acestor armonici este mult mai mare decât frecvența semnalului de intrare, acestea pot fi filtrate relativ ușor cu ajutorul unui filtru trece-jos, rezultând un semnal de ieșire mult mai asemănător cu semnalul de intrare original.

## Aplicații

Amplificatoarele de clasă D sunt folosite de obicei în locurile unde este nevoie de puteri mari la frecvențe relativ joase, precum invertoarele industriale (dispozitive ce transformă curentul continuu în curent alternativ) și amplificatoarele audio de înaltă performanță.

## 10. Metode de polarizare ale tranzistorului

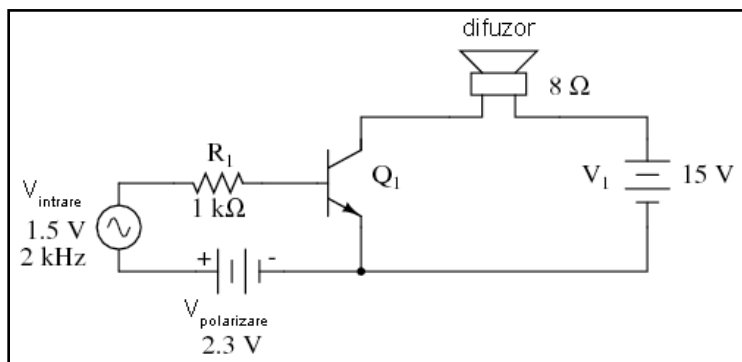
- Tensiunea de polarizare în curent continuu, necesară pentru funcționarea amplificatoarelor de clasă A și C, poate fi obținută prin utilizarea unui divizor de tensiune și un condensator de cuplaj. Această configurație este folosită practic în locul bateriei conectate în serie cu sursa de semnal de curent alternativ de la intrare
- Cuplajul capacitiv se comportă precum un filtru trece-sus față de semnalul de intrare al amplificatorului

### Scop

Până în acest moment, am folosit o sursă de tensiune de curent continuu (baterie) conectată în serie cu semnalul de intrare în curent alternativ pentru polarizarea tranzistorului, indiferent de clasa de funcționare din care făcea parte. În realitate, conectarea unei baterii cu o tensiune precisă la intrarea amplificatorului nu este o soluție deloc practică. Chiar dacă am putea găsi o baterie care să producă exact cantitatea de tensiune necesară pentru o anumită polarizare, acea tensiune nu poate fi menținută pe toată durata de funcționare a bateriei. Când aceasta începe să se descarce, tensiunea sa de ieșire scade, iar amplificatorul se va îndrepta spre clasa de funcționare B.

### Exemplu

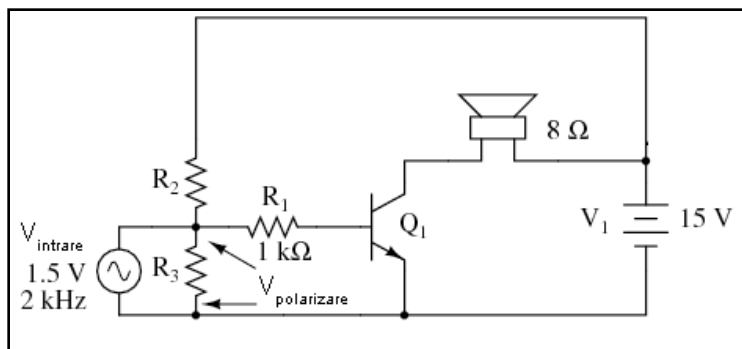
#### Circuitul inițial



Să considerăm circuitul alăturat.

Includerea unei baterii cu o tensiune de polarizare ( $V_{\text{polarizare}}$ ) într-un circuit de amplificare, nu este practică în realitate.

#### Utilizarea unui divizor de tensiune



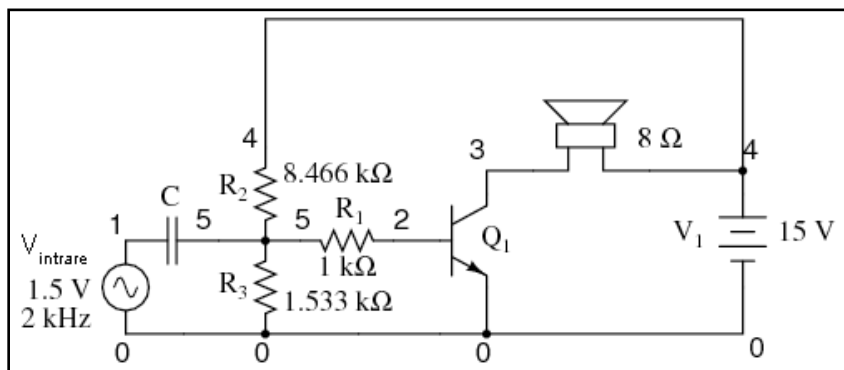
prezintă conform figurii alăturate.

O metodă mult mai practică pentru obținerea tensiunii de polarizare este folosirea unei rețele divizoare de tensiune conectată la bateria de 15 V, baterie care oricum este necesară pentru funcționarea amplificatorului. Circuitele divizoare de tensiune sunt și ele ușor de proiectat și construit, prin urmare, o astfel de configurație se

Dacă alegem o pereche de rezistori  $R_2$  și  $R_3$  a căror rezistențe să producă o tensiune de 2,3 V pe rezistorul  $R_3$  dintr-o tensiune totală disponibilă de 15 V ( $R_2 = 8,644 \Omega$ ,  $R_3 = 1,533 \Omega$ , de exemplu), vom obține o tensiune de polarizare în curent continuu de 2,3 V între baza și emitorul tranzistorului, atunci când nu există semnal de intrare. Singura problemă este că, această configurație conectează sursa de semnal de curent alternativ direct în paralel cu rezistorul  $R_3$  al divizorului de tensiune.

Acest lucru nu este acceptabil, deoarece sursa de curent alternativ va „învinge” tensiunea de curent continuu de la bornele rezistorului  $R_3$ . Componentele conectate în paralel trebuie să posede același tip de tensiune la bornele lor; prin urmare, dacă o sursă de curent alternativ este conectată direct la bornele unui rezistor dintr-un divizor de tensiune de curent continuu, sursa de curent alternativ va „învinge” tot timpul, neexistând nicio componentă de curent continuu în forma de undă a semnalului.

### Utilizarea unui condensator de cuplaj

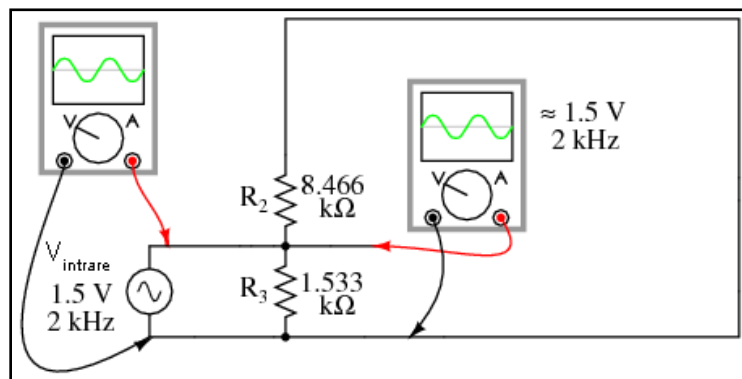


O modalitate prin care această configurație poate funcționa, deși este posibil să nu fie evident de ce, este prin conectarea unui condensator de cuplaj între sursa de curent alternativ și divizorul de tensiune, astfel.

Condensatorul formează un filtru trece-sus între sursa de tensiune în curent alternativ și divizorul de tensiune în curent continuu; întregul semnal (aproximativ) de curent alternativ va trece înspre tranzistor, iar tensiunea de curent continuu nu va putea ajunge la sursa de semnal. Acest lucru este mult mai clar dacă ne folosim de teorema superpoziției, conform căreia, orice circuit liniar poate fi analizat considerând că doar o singură sursă de alimentare funcționează în același timp în circuit. Rezultatul/efectul final poate fi aflat prin însumarea algebrică a efectelor tuturor surselor de putere luate individual. Dacă am separa condensatorul și divizorul de tensiune  $R_2$ – $R_3$

de restul amplificatorului, am înțelege mai bine cum funcționează această superpoziție între curentul continuu și cel alternativ.

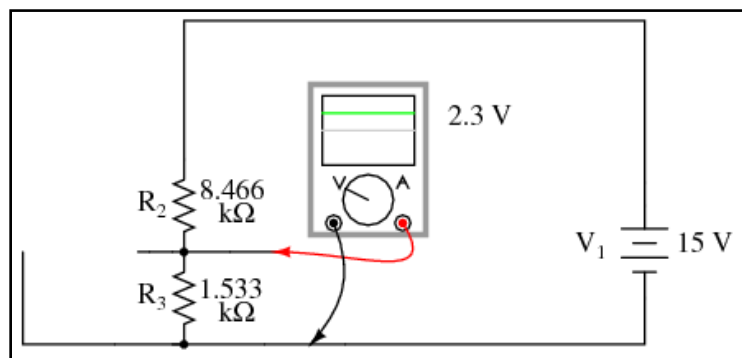
### Sursa de curent alternativ



alăturată.

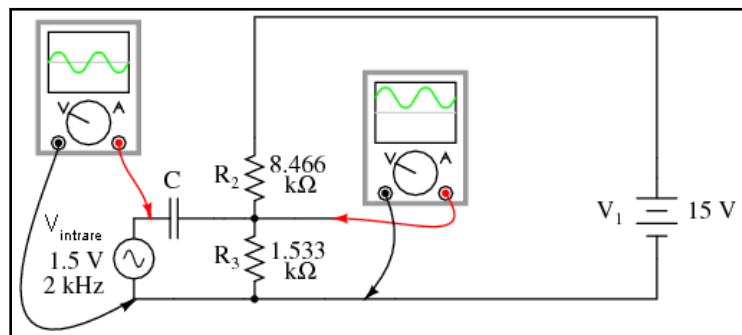
Dacă luăm în considerare doar sursa de semnal de curent alternativ și un condensator cu o impedanță arbitrară mică la frecvența semnalului, majoritatea semnalului de curent alternativ se va regăsi pe rezistorul  $R_3$ . Datorită impedanței foarte mici a condensatorului de cuplaj la frecvența de semnal, acesta se comportă precum un scurt-circuit (fir simplu), prin urmare, poate fi omis din figura

### Sursa de curent continuu

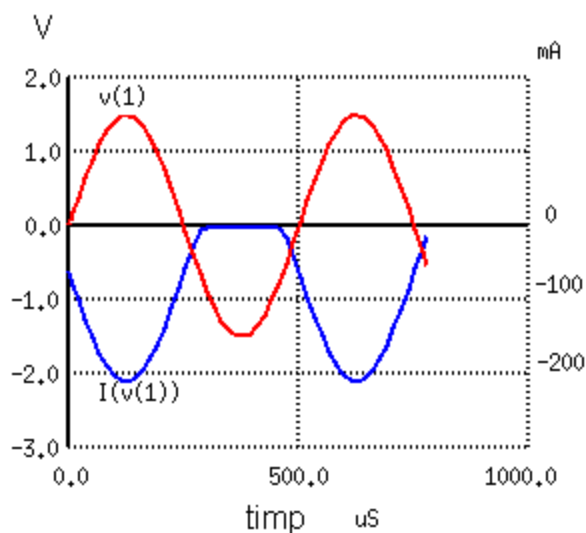


Dacă ar fi să conectăm doar sursa de tensiune de curent continuu (bateria de 15 V), condensatorul se va comporta precum un circuit deschis, prin urmare nici acesta și nici sursa de semnal de curent alternativ nu vor avea niciun efect asupra modului de funcționare al divizorului de tensiune  $R_2$ -- $R_3$ .

### Aplicarea teoremei superpoziției



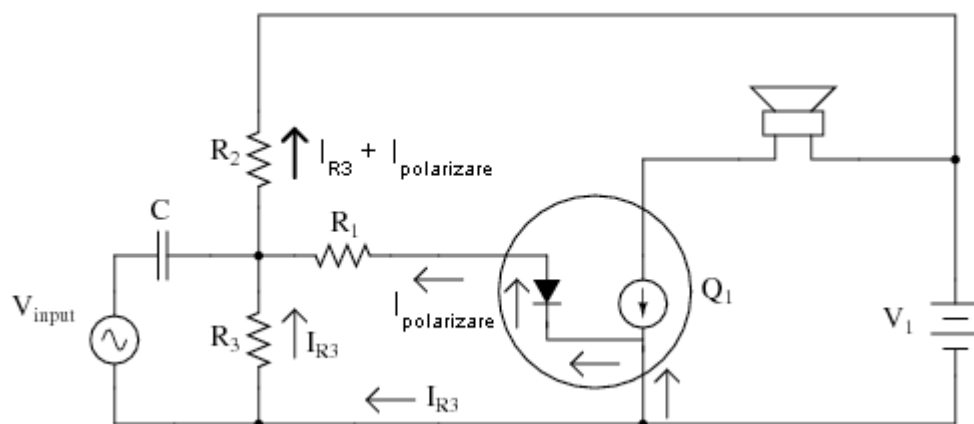
Folosind teorema superpoziției, și combinând cele două analize separate ale circuitului, obținem o tensiune (de superpoziție) de aproximativ 1,5 V curent alternativ și 2,3 V curent continuu, tensiuni ce vor fi aplicate la intrarea tranzistorului. Observați în circuitul alăturat, că tranzistorul nu a fost conectat.



Folosind un condensator de  $100\ \mu\text{F}$ , putem obține o impedanță de  $0,8\ \Omega$  la frecvența de  $2.000\ \text{Hz}$ .

Putem observa că acest circuit distorsionează puternic forma undei curentului de ieșire (albastru). Unda sinusoidală este tăiată pe majoritatea semi-alternanței negative a semnalului de tensiune de intrare (roșu). Acest lucru ne spune că tranzistorul intră în starea de blocare, deși nu ar trebui. De ce se întâmplă acest lucru? Această nouă metodă de polarizare ar trebui să genereze o tensiune de polarizare în curent continuu de  $2,3\ \text{V}$ .

### Conectarea tranzistorului în circuit



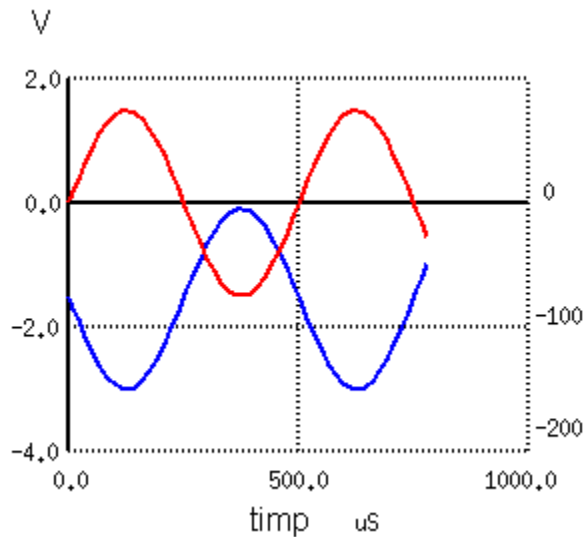
Dacă în circuit avem doar condensatorul și divizorul de tensiune format din  $R_2$ -- $R_3$ , acesta va furniza o tensiune de polarizare de exact  $2,3\ \text{V}$ . Totuși, după ce conectăm tranzistorul la acest circuit, lucrurile se schimbă. Curentul existent prin baza tranzistorului se va aduna la curentul deja existent prin divizor și va reduce tensiunea de polarizare disponibilă pentru tranzistor. Folosind modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului, problema polarizării devine mai clară.

### Modificarea rezistențelor de intrare

Ieșirea unui divizor de tensiune depinde nu doar de mărimea rezistorilor săi componenți, ci și de cantitatea de curent „divizată” de aceasta spre o sarcină. Joncțiunea P-N a tranzistorului reprezintă o sarcină datorită căreia tensiunea de curent continuu la bornele rezistorului  $R_3$  scade; curentul de polarizare se însumează cu cel de pe rezistorul  $R_3$ , modificând raportul rezistențelor calculat înainte, când am luat în considerare doar cei doi rezistori,  $R_2$  și  $R_3$ . Pentru obținerea unei tensiuni de polarizare de  $2,3\ \text{V}$ , valorile rezistorilor  $R_2$  și/sau  $R_3$  trebuiesc ajustate

pentru compensarea efectului curentului de bază. Pentru creșterea tensiunii de polarizare de pe  $R_3$ , putem scădea valoarea lui  $R_2$ , crește valoarea lui  $R_3$ , sau ambele.

### Graficul formelor de undă



Folosind noi valori pentru cei doi rezistori ( $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 4 \text{ k}\Omega$ ), graficul formelor de undă corespunde unui amplificator de clasă A, exact ceea ce urmăream.

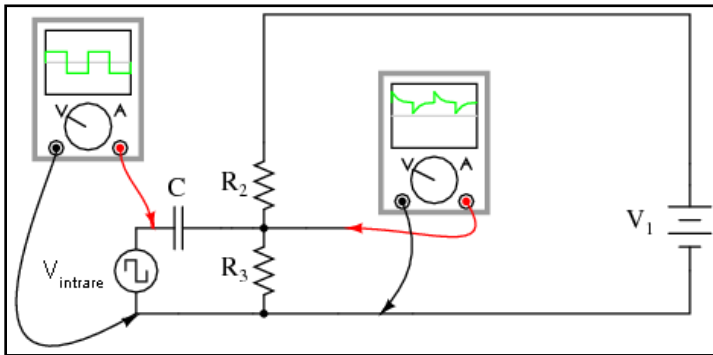
## 11. Cuplajul de intrare și de ieșire

### Cuplaj de intrare

#### Cuplaj capacitiv

Pentru a rezolva problemele de polarizare în curent continuu ale amplificatorului, fără utilizarea unei baterii conectată în serie cu sursa de semnal de curent alternativ, am folosit un divizor de tensiune conectat la sursa de tensiune de curent continuu deja existentă în circuit. Pentru a putea folosi această configurație cu semnale de curent alternativ, am „cuplat” semnalul de intrare la divizor printr-un condensator (cuplaj capacitiv), condensator ce s-a comportat precum un filtru trece-sus. Folosind acest filtru, impedanța foarte scăzută a sursei de semnal de curent alternativ nu a putut scurt-circuita căderea de tensiune de curent continuu de pe rezistorul de jos al divizorului de tensiune. O soluție simplă la prima vedere, dar care prezintă și dezavantaje.

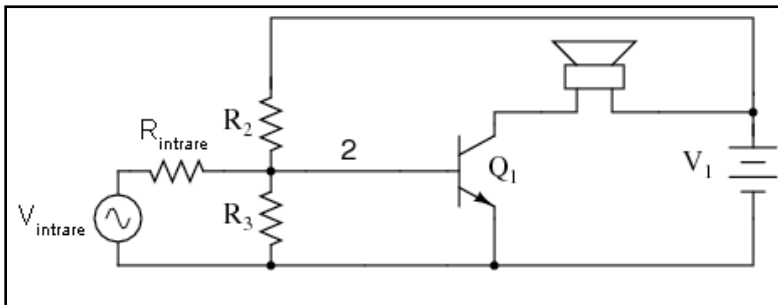




Cea mai evidentă problemă este că, amplificatorul poate acum să amplifice doar semnale de curent alternativ. O tensiune constantă de curent continuu, aplicată la intrare, va fi blocată de către condensatorul de cuplaj. Mai mult, din moment ce reactanța condensatorului este dependentă de frecvență, semnalele de curent alternativ de frecvențe joase nu vor fi amplificate la fel de mult

precum semnalele de frecvențe înalte. Semnalele ne-sinusoidale vor fi distorsionate, din moment ce condensatorul va răspunde diferit la fiecare dintre armonicile sale constituente. Un exemplu extrem ar fi un semnal dreptunghiular de frecvență joasă.

### Cuplaj direct



În situațiile în care problemele ridicate de cuplajul capacitiv nu pot fi tolerate, se poate folosi un cuplaj direct. Cuplajul direct folosește rezistori în locul condensatoarelor. Această configurație nu este dependentă de frecvență, fiindcă nu avem niciun condensator pentru filtrarea semnalului de intrare.

Dacă un cuplaj direct amplifică atât semnale de curent continuu cât și semnale de curent alternativ, de ce să folosim cuplaje capacitive în primul rând? Unul dintre motive ar fi evitarea tensiunii naturale de polarizare în curent continuu prezentă în semnalul de amplificat. Unele semnale de curent alternativ conțin și o componentă de curent continuu direct de la sursă, ce nu poate fi controlată, iar această tensiune necontrolată înseamnă că polarizarea tranzistorului este imposibilă.

Un alt motiv pentru utilizarea unui cuplaj capacitiv este lipsa atenuării semnalului de la intrare. În cazul cuplajului direct printr-un rezistor, atenuarea semnalului de intrare, astfel că doar o parte din acesta mai ajunge la baza tranzistorului, este un dezavantaj demn de luat în considerare. Unele aplicații necesită atenuarea semnalului de intrare într-o oarecare măsură, pentru prevenirea intrării tranzistorului în zona de saturație sau de blocare, astfel că o atenuare existentă pe cuplajul de intrare este oricum folositoare. În alte situații însă, nu este permisă atenuarea semnalului de intrare sub nicio formă, pentru obținerea unei amplificări în tensiunea cât mai bune; în acest caz, un cuplaj direct nu este o soluție foarte bună.

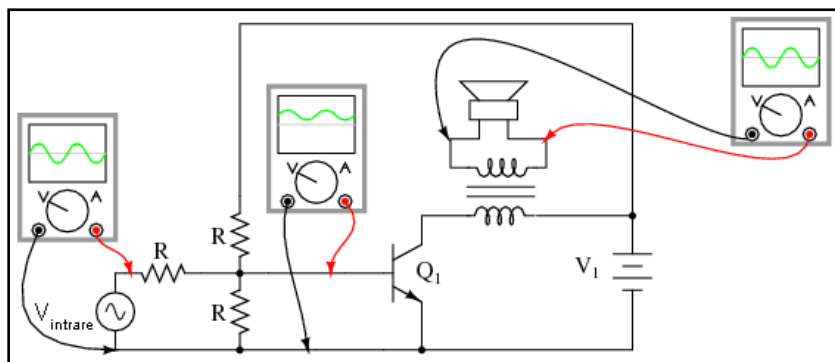
### Cuplaj de ieșire

În circuitul din exemplu, sarcina este reprezentată de un difuzor. Majoritatea difuzoarelor sunt electromagnetice: acestea folosesc forța generată de un electromagnet ușor, suspendat într-un câmp magnetic permanent, pentru deplasarea unui con de plastic sau hârtie, deplasare ce produce vibrații în aer, care mai apoi sunt interpretate de sistemul auditiv ca fiind sunete.

Aplicând o tensiune de o singură polaritate, conul se deplasează spre exterior; dacă inversăm polaritatea tensiunii, conul se deplasează spre interior. Pentru a putea utiliza întreaga libertate de mișcare a conului, difuzorul trebuie să primească o tensiune de curent alternativ pură (să nu conțină curent continuu). O componentă de curent continuu va tinde să deplaseze permanent conul de la poziția sa naturală din centru, iar deplasarea sa înainte-înapoi va fi limitată la aplicarea unei tensiuni de curent alternativ ca urmare a acestui fapt.

Dar în circuitul nostru de mai sus, tensiunea aplicată la bornele difuzorului este de o singură polaritate (tensiune alternativă + componentă de curent continuu), deoarece difuzorul este conectat în serie cu tranzistorul, iar tranzistorul nu poate conduce curent decât într-o singură direcție. Acest lucru nu este acceptabil pentru niciun amplificator audio.

### Transformator de cuplaj

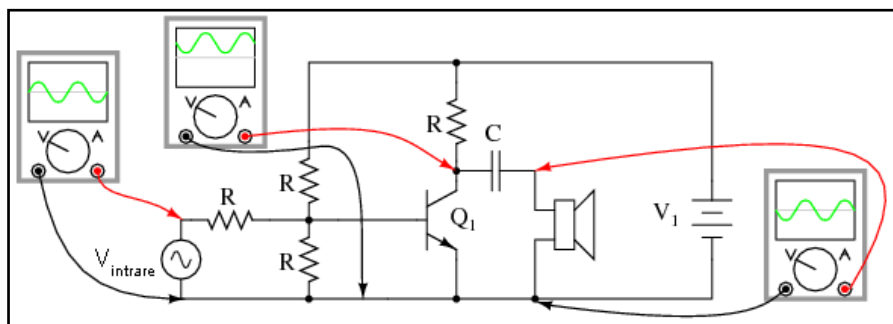


Prin urmare, trebuie să izolăm difuzorul față de componenta de curent continuu a curentului de colector, astfel încât acesta să primească doar tensiune de curent alternativ. O modalitate de realizare a acestui lucru, este cuplarea circuitului de colector al tranzistorului la difuzor prin intermediul unui transformator.

Tensiunea indusă în secundarul transformatorului (legat la difuzor) se va datora strict variațiilor curentului de colector, datorita faptului că inductanța mutuală a unui transformator funcționează doar la variațiile curentului prin înfășurare. Cu alte cuvinte, doar componenta de curent alternativ al curentul de colector va fi cuplată la secundar pentru alimentarea difuzorului.

Această metodă funcționează foarte bine, dar, transformatoarele sunt de obicei mari și grele, mai ales în aplicațiile de putere mare. De asemenea, este dificil de proiectat un transformator care să fie folosit într-o plajă largă de frecvențe, ceea ce este și cazul amplificatoarelor audio. Mai rău decât atât, curentul continuu prin înfășurarea primară duce la magnetizarea miezului doar într-o singură polaritate, ceea ce înseamnă că transformatorul se va satura mult mai ușor într-una dintre polaritățile semnalului de curent alternativ decât în cealaltă.

### Cuplaj capacitiv

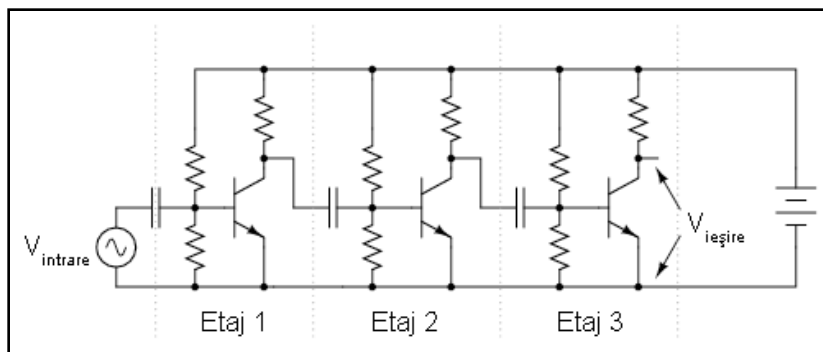


O altă metodă de izolare a componentei de curent continuu din semnalul de ieșire, este utilizarea unui condensator de cuplaj pe ieșire, într-o manieră similară cuplajului capacitiv de intrare.

Circuitul de mai sus seamănă foarte bine cu un amplificator în conexiune emitor comun, având colectorul tranzistorului conectat la baterie printr-un rezistor. Condensatorul se comportă precum un filtru trece-sus; majoritatea semnalului de curent alternativ se va regăsi pe difuzor, dar tensiunea de curent continuu va fi blocată de către filtru. Din nou, valoarea acestui condensator de cuplaj este aleasă astfel încât impedanța la frecvența semnalului să fie cât mai mică.

## Cuplarea amplificatoarelor între ele

### Cuplaj capacitiv

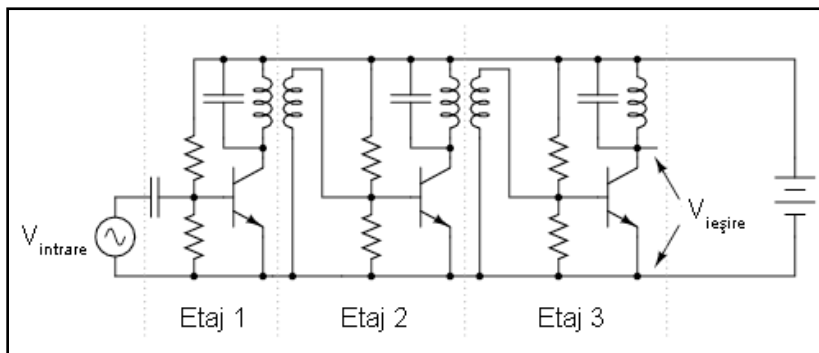


Blocarea tensiunii de c.c. de la ieșirea unui amplificator, fie prin utilizarea unui transformator sau a unui condensator, este folosită nu doar în cazul conectării unui amplificator la o sarcină, ci și la cuplarea unui amplificator la un alt amplificator. Amplificatoarele cu mai multe etaje sunt

folosite adesea pentru obținerea unor factori de amplificare mult mai mari decât este posibil utilizând un singur tranzistor.

Deși fiecare etaj se poate cupla direct cu următorul, prin intermediul unui rezistor în loc de condensator, acest lucru face ca întreg amplificatorul să fie foarte sensibil la variațiile tensiunii de polarizare în c.c., datorită faptului că această tensiune va fi amplificată în fiecare etaj odată cu semnalul de c.a. Dar, dacă etajele sunt cuplate capacitiv între ele, tensiunea de c.c. al unui etaj nu influențează tensiunea de polarizare al următorului etaj, deoarece trecerea acestuia este blocată.

### Cuplaj prin intermediul transformatoarelor



aer (fiind astfel imune la efectele de saturație), ce fac parte dintr-un circuit rezonant pentru blocarea trecerii armonicilor de frecvențe nedorite dintr-un etaj la celălalt. Circuitele rezonante se folosesc doar atunci când frecvența semnalului rămâne constantă, ceea ce este valabil în cazul circuitelor de radio frecvență.

De asemenea, etajele pot fi cuplate prin intermediul transformatoarelor, dar acest lucru nu se realizează prea des în practică, datorită problemelor menționate mai sus. O excepție o reprezintă amplificatoarele de radio-frecvență, unde se utilizează transformatoare de cuplaj mici, cu miez de

### Cuplaj direct

Trebuie menționat că este posibilă cuplarea directă a amplificatoarelor. În cazurile în care circuitul trebuie să amplifice și semnale de c.c., aceasta este singura alternativă.

## 12. Amplificatoare cu reacție

- Reacția înseamnă cuplarea ieșiri unui amplificator la intrarea acestuia
- Reacția pozitivă produce oscilații într-un circuit, astfel că acesta devine instabil
- Reacția negativă tinde să stabilizeze amplificatorul, astfel încât variația semnalului de ieșire este mai mică pentru o anumită variație a semnalului de intrare

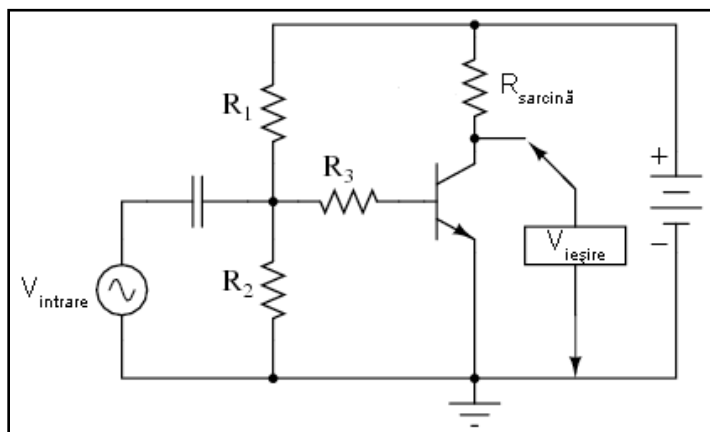
### Definiții

Dacă un anumit procent din semnalul de ieșire al amplificatorului este conectat la intrarea acestuia, astfel încât amplificatorul amplifică o parte din propriul său semnal de ieșire, rezultatul va fi un amplificator cu reacție. Prin *reacție pozitivă* se înțelege creșterea amplitudinii semnalului de intrare Prin *reacție negativă* se înțelege o scădere a amplitudinii semnalului de intrare

### Amplificator cu reacție negativă

Un amplificator echipat cu reacție negativa este mai stabil, distorsionează mai puțin semnalul de intrare și, în general, este capabil de amplificarea unor frecvențe mai largi. Dezavantajul este un factor de amplificare mai scăzut.

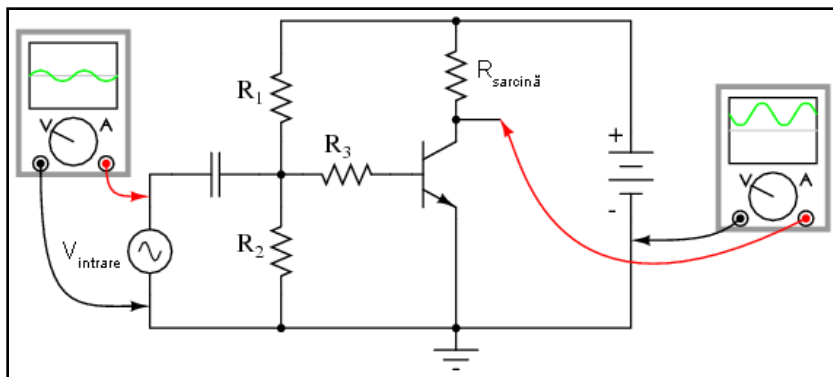
## Amplificator simplu, fără reacție



Să examinăm un amplificator simplu, inițial fără reacție.

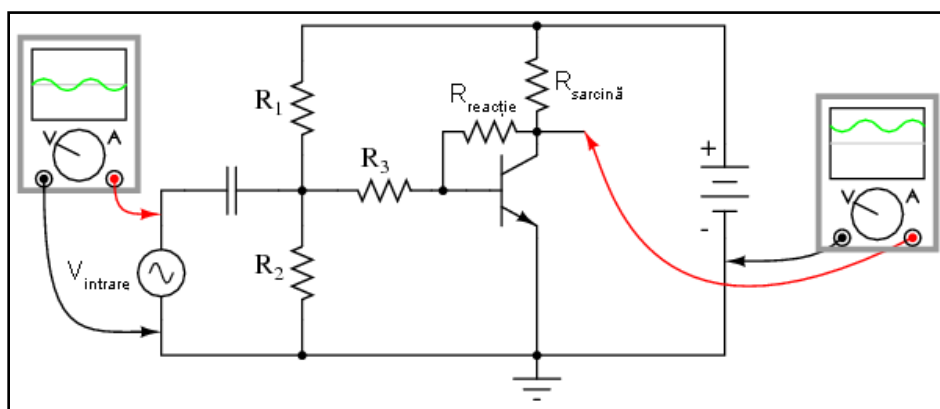
Configurația amplificatorului de mai sus este emitor comun, cu o rețea de polarizare formată din divizorul de tensiune  $R_1$ -- $R_2$ . Condensatorul cuplează semnalul de intrare în c.a., astfel încât sursa de semnal să nu conțină o componentă de c.c. datorită divizorului de tensiune  $R_1$ -- $R_2$ . Rolul rezistorului  $R_3$  este de a controla amplificarea în tensiune, și l-am putea

îndepărta pentru o amplificare în tensiune maximă.



La fel ca și în cazul tuturor amplificatoarelor emitor comun, și acesta inversează semnalul de intrare. Putem vedea alăturat formele de undă ale tensiunilor de intrare și ieșire.

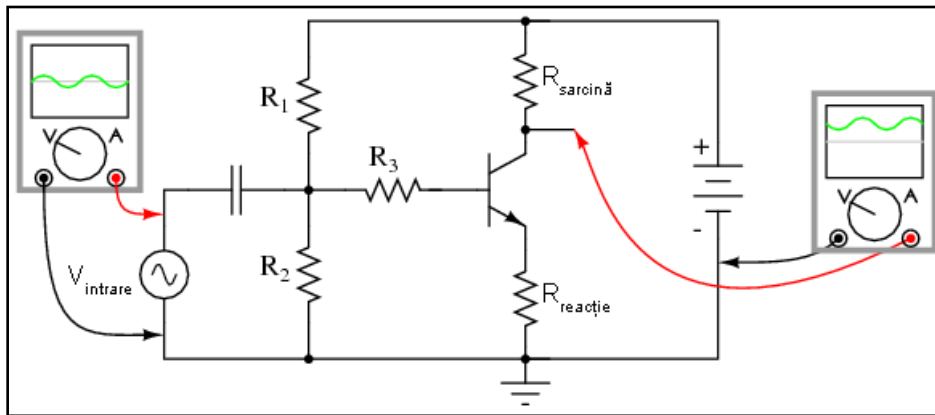
## Reacția negativă între colector și bază



Datorită faptului că semnalul de ieșire este inversat (defazat cu  $180^\circ$  (anti-fază)), orice conexiune între ieșirea (colector) și intrarea (bază) tranzistorului va duce la apariția unei reacții negative.

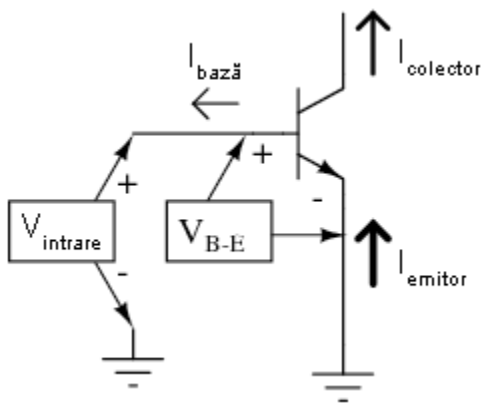
Rezistențele  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , și  $R_{\text{reacție}}$  funcționează împreună precum o rețea de semnale, astfel că tensiunea de la baza tranzistorului (față de pământ) reprezintă o medie a tensiunii de intrare și a tensiunii de reacție negativă, rezultând un semnal de o amplitudine redusă la intrarea amplificatorului. Astfel, amplificatorul de mai sus, va avea un factor de amplificare mai redus, dar o liniaritate îmbunătățită (reducerea distorsiunilor) și o bandă de frecvențe mărită.

## Reacția negativă între emitor și împământarea circuitului



Aceasta nu este însă singura modalitate de introducere a reacției negative într-un amplificator emitor comun. O altă metodă, deși mai greu de înțeles la început, constă în introducerea unui rezistor între terminalul emitorului și împământarea circuitului.

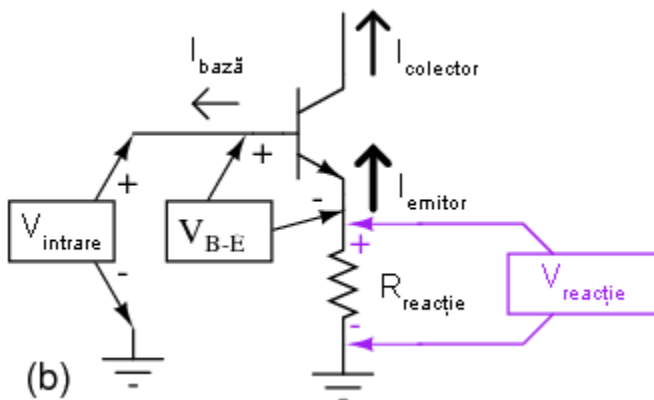
În acest caz, căderea de tensiune pe rezistorul de reacție va fi direct proporțională cu valoarea curentului prin emitorul tranzistorului, opunându-se în acest fel influenței semnalului de intrare asupra joncțiunii bază-emitor a tranzistorului.



Să ne uităm mai atent la joncțiunea emitor-bază pentru a ne da seama de efectele introducerii acestui rezistor în circuit:

Atunci când nu avem rezistorul de reacție în circuit ( $R_{\text{reacție}}$ ), tensiunea de intrare ( $V_{\text{intrare}}$ ) ce trece de condensatorul de cuplaj și de rețeaua formată din rezistorii  $R_1/R_2/R_3$ , se va regăsi în totalitate pe joncțiunea bază-emitor a tranzistorului sub forma tensiunii de intrare ( $V_{B-E}$ ). Cu alte cuvinte, fără  $R_{\text{reacție}}$ ,  $V_{B-E} = V_{\text{intrare}}$ . Prin urmare, dacă  $V_{\text{intrare}}$  crește cu 100 mV, atunci și  $V_{B-E}$  crește cu 100 mV: variația uneia este egală cu variația celeilalte, din moment ce ambele tensiunii

sunt egale.



Să examinăm acum efectele introducerii rezistorului  $R_{\text{reacție}}$  între emitor și împământare.

De data aceasta,  $V_{\text{reacție}} + V_{B-E} = V_{\text{intrare}}$ . Odată cu introducerea rezistenței de reacție în bucla ( $V_{\text{intrare}}$ ,  $V_{B-E}$ ) nu va mai fi egală cu  $V_{\text{intrare}}$ . Știm faptul că rezistorul  $R_{\text{reacție}}$  va avea o cădere de tensiune la bornele sale proporțională cu valoarea curentului prin emitor, valoare ce este controlată de curentul de bază, curent ce este la rândul lui controlat de căderea de tensiune pe

joncțiunea bază-emitor ( $V_{B-E}$ ) a tranzistorului.

Astfel, dacă tensiunea de intrare crește, acest lucru va duce la creșterea lui  $V_{B-E}$ , ce duce la creșterea curentului bazei, ce duce la creșterea curentului prin colector (sarcină), ce cauzează creșterea curentului prin emitor, care la rândul lui va determina creșterea căderii de tensiune pe rezistorul de reacție  $R_{\text{reacție}}$ . Dar această creștere a căderii de tensiune pe  $R_{\text{reacție}}$  se scade din tensiune de intrare ( $V_{\text{intrare}}$ ), lucru ce duce la reducerea căderii de tensiune între bază și emitor ( $V_{B-E}$ ); creșterea reală a lui  $V_{B-E}$  va fi de fapt mai mică decât creșterea lui  $V_{\text{intrare}}$ . O creștere de 100 mV a tensiunii de intrare nu va mai duce la o creștere de 100 mV a tensiunii de polarizare bază-emitor, întrucât cele două tensiuni nu sunt egale între ele.

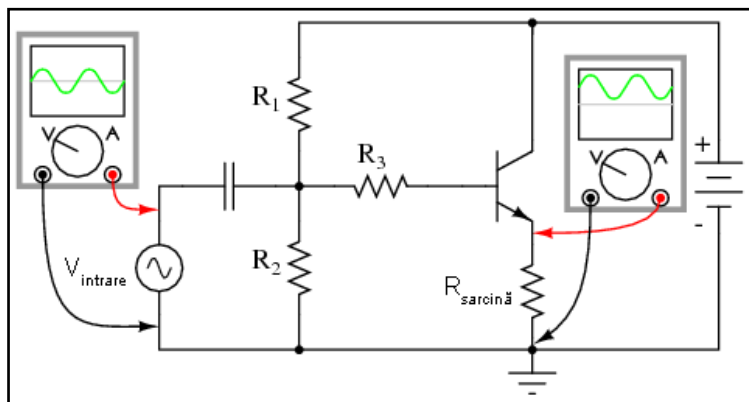
Ca urmare, tensiunea de intrare exercită un control mai redus asupra tranzistorului față de cazurile precedente, iar amplificarea în tensiune este redusă și ea ca urmare a introducerii rezistorului de reacție.

## Deriva termică

În circuitele emitor comun practice, reacția negativă nu este doar un lux, ci o necesitate pentru funcționarea stabilă a circuitului. Într-o lume perfectă, am putea construi și utiliza un amplificator emitor comun fără reacție negativă, iar acest lucru ne-ar furniza o amplificare mare în tensiune. Din păcate însă, relația dintre tensiunea bază-emitor și curentul bază-emitor variază cu temperatura, acest lucru fiind descris de ecuația diodei. Pe măsură ce tranzistorul se încălzește, căderea de tensiune pe joncțiunea bază-emitor necesară pentru aceeași valoare a curentului va fi tot mai mică.

Acest lucru nu este de dorit, întrucât divizorul de tensiune  $R_1$ -- $R_2$  este proiectat să furnizeze curentul corect pentru funcționarea tranzistorului la punctul static de funcționare. Dacă relația curent/tensiune a tranzistorului variază cu temperatura, valoarea tensiunii de polarizare în c.c, necesară pentru operarea tranzistorului în clasa dorită, se va modifica. Un tranzistor încălzit va conduce un curent și mai mare pentru aceeași valoare a tensiunii de polarizare, ducând la o încălzire și mai mare a acestuia și la un curent și mai mare de polarizare. Efectul este cunoscut sub numele de derivă termică.

## Conexiunea colector comun



Amplificatoarele colector comun nu sunt afectate de deriva termică. De ce? Răspunsul este strâns legat de reacția negativă.

Putem observa că sarcina amplificatorului colector comun este conectată în exact același loc în care am introdus  $R_{\text{reacție}}$  în circuitul precedent, și anume, între emitor și împământare. Acest lucru înseamnă că singura cădere de tensiune pe joncțiunea bază-emitor este reprezentată de diferența dintre  $V_{\text{intrare}}$  și  $V_{\text{ieșire}}$ , rezultatul fiind o amplificare în tensiune foarte mică (de obicei aproape de 1). Apariția derivei termice este imposibilă pentru acest tip de amplificator: în cazul în care curentul bazei ar crește datorită încălzirii tranzistorului, curentul emitorului va crește și el, rezultând o cădere de tensiune mai mare pe sarcină, cădere de tensiune ce se scade din tensiunea de intrare ( $V_{\text{intrare}}$ ); acest lucru duce la descreșterea căderii de tensiune între bază și emitor.

## Avantajele utilizării reacției negative

Prin adăugarea unui rezistor de reacție între emitor și împământare în cazul unui amplificator emitor comun, amplificatorul se va comporta mai puțin precum un amplificator emitor comun „pur” și puțin mai mult precum un amplificator colector comun. Valoarea acestui rezistor de reacție este în general mult mai mică decât valoarea sarcinii, minimizând cantitatea de reacție negativă și menținând amplificarea în tensiune destul de ridicată.

Un alt beneficiu al reacției negative constă în faptul că scade dependența amplificării în tensiune de caracteristicile tranzistorului. Observați că în cazul amplificatorului colector comun, amplificarea în tensiune este aproximativ egală cu 1, indiferent de factorul beta ( $\beta$ ) al amplificatorului. Acest lucru înseamnă, printre altele, că putem schimba tranzistorul din configurația colector comun cu un alt tranzistor al cărui factor beta este diferit, fără a vedea modificări semnificative față de amplificarea tensiunii. Într-un amplificator emitor comun, amplificarea în tensiune depinde foarte mult de  $\beta$ .

Dacă ar fi să înlocuim un tranzistor dintr-o configurație emitor comun, cu un tranzistor al cărui  $\beta$  este diferit, amplificarea în tensiune ar suferi modificări substanțiale. Într-un amplificator emitor comun cu reacție negativă, amplificarea în tensiune va fi de asemenea dependentă de factorul beta într-o oarecare măsură, dar nu într-o asemenea măsură precum fără reacție; circuitul va fi în acest caz mult mai previzibil, în ciuda variațiilor factorului  $\beta$  al tranzistorilor folosiți.

## Condensatorul de decuplare

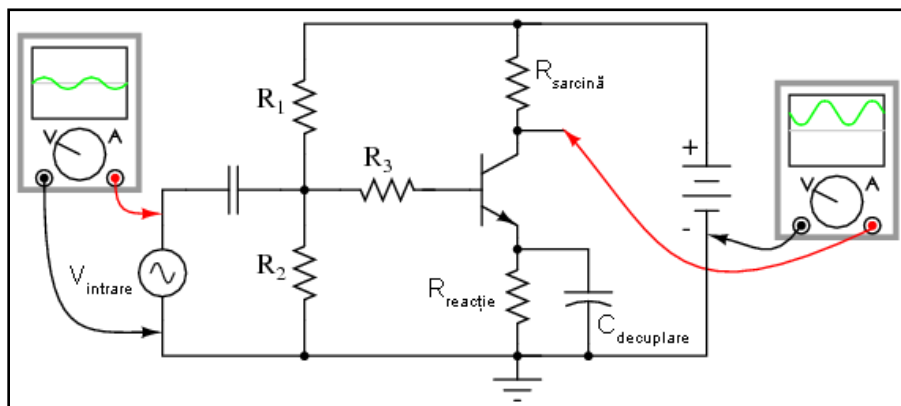
Faptul că trebuie să introducem o reacție negativă într-un amplificator emitor comun pentru evitarea derivei termice nu este o soluție satisfăcătoare. Putem evita deriva termică fără a fi nevoiți a suprima factorul de amplificare în tensiune ridicat al acestui tip de amplificator?

Putem găsi o soluție dacă analizăm îndeaproape această problemă: tensiunea amplificată care trebuie minimizată pentru evitarea derivei termice, este cea de c.c., nu cea de c.a. Nu semnalul de intrare în c.a. este cel care duce la apariția derivei termice, ci tensiunea de polarizare în c.c., tensiune necesară pentru o anumită clasă de funcționare; este acea tensiune de c.c. folosită pentru a „păcăli” tranzistorul (un dispozitiv de c.c.) să amplifice și



semnale de c.a. Putem suprima amplificarea în c.c. fără ca acest lucru să afecteze amplificarea în c.a., dacă putem găsi o cale prin care reacția negativă să funcționeze doar în c.c. Cu alte cuvinte, dacă semnalul reintrodus de la ieșire la intrare este un semnal de c.c., nu de c.a.

Dacă vrem ca reacția negativă să conțină doar semnale de c.c., dar nu și semnale de c.a., avem nevoie de o impedanță mare pentru c.c. dar mică pentru c.a. Ce tip de circuit prezintă o impedanță mare la c.c. dar o impedanță mică la c.a.? Desigur, un filtru trece-sus.

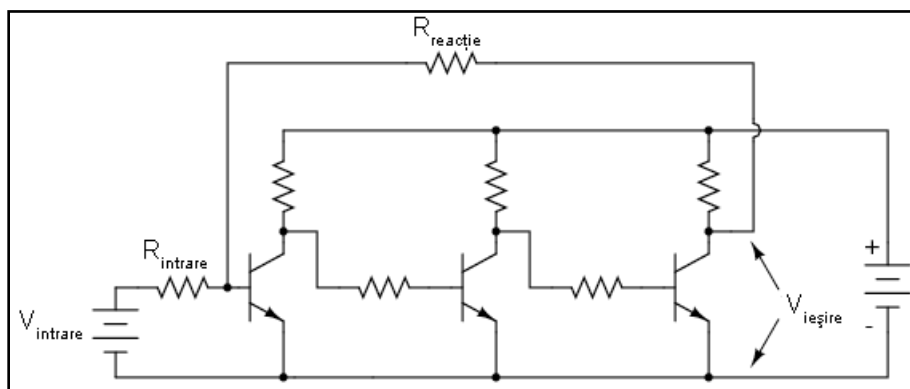


Prin conectarea unui condensator în paralel cu rezistorul de reacție, putem crea exact situația de care avem nevoie: o cale dinspre emitor spre împământare ce este mai ușor de parcurs pentru semnalele de c.a. decât cele de c.c.

Noul condensator decuplează semnalele de c.a. dinspre emitor spre împământare, astfel încât să nu existe o cădere de tensiune apreciabilă (impedanță mică, cădere de tensiune mică) între emitor și împământare, tensiunea care ar putea duce la suprimarea amplificării în tensiune a circuitului.

Curentul continuu, pe de altă parte, nu poate trece prin condensatorul de decuplare (impedanță mare în c.c.) și trebuie să treacă prin rezistorul de reacție; acest lucru duce la apariția unei căderi de tensiune între emitor și împământare ce afectează amplificarea în tensiune a circuitului și stabilizează răspunsul amplificatorului în c.c. prevenind astfel deriva termică. Deoarece vrem ca reactanța ( $X_C$ ) acestui condensator să fie cât mai mică posibilă, acesta ar trebui să fie cât mai mare. Deoarece polaritatea acestui condensator nu se va modifica niciodată, putem folosi un condensator polarizat (electrolitic) în această situație.

## Folosirea amplificatoarelor etajate



O altă abordare a problemei reducerii amplificării în tensiune datorită utilizării reacției negative, este folosirea mai multor etaje de amplificare în loc de unul singur. În cazul în care amplificarea atenuată în tensiune a unui singur tranzistor nu este suficientă pentru aplicația

respectivă, putem folosi mai mulți tranzistori pentru compensarea reducerii cauzate de reacția negativă. Circuitul alăturat constă din trei etaje de amplificare în conexiune emitor comun cu reacție negativă.

Reacția negativă de la etajul final înspre intrare se realizează prin intermediul unui singur rezistor,  $R_{\text{reacție}}$ . Din moment ce fiecare etaj este un amplificator emitor comun (inversor), numărul impar de etaje dinspre intrare spre ieșire va inversa semnalul de ieșire, iar reacția va fi negativă. Se pot folosi valori relativ mari de reacție fără a sacrifica amplificarea în tensiune, deoarece această amplificare este foarte mare de la bun început.

### **Avantaje**

La o privire de ansamblu, poate părea că această filozofie nu este elegantă și este chiar contra-productivă. Nu este adăugarea de etaje unul după altul o metodă cam grosolană de evitare a pierderilor de amplificare în tensiune, datorită utilizării reacției negative? Ce rost are să creăm o amplificare în tensiune foarte mare, folosind trei etaje de amplificare, dacă vom atenua oricum această amplificare prin intermediul reacției negative? „Rostul” acestei configurații este creșterea stabilității și a predictabilității circuitului, luat ca întreg. Dacă cele trei etaje de amplificare sunt proiectate pentru furnizarea unei amplificări în tensiune foarte mari (zeci de mii, sau chiar mai mult), fără reacție, vom descoperi că adăugarea reacției negative în circuit se traduce printr-o dependență mult mai mică a amplificării în tensiune față de amplificările fiecărui etaj în parte; amplificarea în tensiune va fi aproximativ egală cu raportul  $R_{\text{reacție}}/R_{\text{intrare}}$ . Cu cât circuitul prezintă o amplificare în tensiune mai mare (fără reacție), cu atât amplificarea în tensiune va fi mai apropiată de  $R_{\text{reacție}}/R_{\text{intrare}}$  odată ce este introdusă și reacția în circuit. Cu alte cuvinte, amplificarea în tensiune a acestui circuit depinde doar de valorile celor doi rezistori, și de nimic altceva.

Acest lucru este un avantaj imens pentru producția de serie a circuitelor electronice: dacă se pot construi amplificatoare cu o amplificare previzibilă folosind tranzistori cu factori beta diferiți între ei, selecția și înlocuirea componentelor este foarte ușoară. Înseamnă de asemenea că amplificarea variază foarte puțin cu temperatura. Acest principiu de stabilizare a amplificării este dus la extrem în cazul amplificatoarelor operaționale.

## **05 - Dispozitive multijoncțiune**

### **1 - Histereza**

Dispozitivele multijoncțiune sunt o clasă de componente semiconductoare cu histereză, o proprietate prin care un sistem nu se reîntoarce la starea sa inițială după ce acțiunea perturbatoare este îndepărtată. Un exemplu foarte simplu de histereză îl constituie un întrerupător mecanic: atunci când brațul este acționat, acesta se va poziționa pe una din cele două poziții extreme și va rămâne în această poziție chiar și după ce forța exterioară este îndepărtată.

Tranzistoarele bipolare cu joncțiune, cele cu efect de câmp și cele cu efect de câmp cu poartă izolată sunt toate dispozitive fără histereză. Acest lucru înseamnă că ele nu se „agață” într-o anumită stare după ce aplicarea tensiunii sau a curentului exterior încetează. Oricare ar fi semnalul de intrare al acestor dispozitive într-un anumit moment, acestea vor prezenta un răspuns de ieșire previzibil, așa cum este el definit de curbele lor caracteristice. Dispozitivele multijoncțiune, pe de altă parte, sunt dispozitive semiconductoare ce tind să rămână pornite odată ce au fost pornite și invers, oprite odată ce au fost oprite. O acțiune momentană poate duce la trecerea dispozitivelor dintr-o stare în alta, stare în care vor rămâne și după ce acțiunea externă încetează. Prin urmare, aceste dispozitive sunt folosite doar ca și întrerupătoare și nu pot fi folosite pe post de amplificatoare.

Dispozitivele multijoncțiune sunt construite folosind aceeași tehnologie precum a tranzistoarelor bipolare, și pot fi de fapt analizate ca și circuite compuse din perechi de tranzistoare. Cum poate atunci un dispozitiv cu histereză să fie construit din dispozitive ce nu prezintă această proprietate? Răspunsul este de data de reacția pozitivă. Această reacție tinde să satureze dispozitivul.

### **2 - Tuburi electronice cu descărcare în gaze**

Înainte de a studia însă dispozitivele multijoncțiune, este indicat să luăm în considerare și predecesorul tehnologic al acestora, și anume, tuburile electronice cu descărcare în gaze.

#### **Fulgerele și histereza**

Putem observa histereza electrică pe viu în cazul fulgerelor. Acțiunea vântului puternic și a ploii duce la acumularea de sarcini electrice imense între nori și între nori și pământ. Dezechilibrul de sarcină electrică se manifestă sub formă de diferență de potențial, sau tensiune electrică, iar când rezistența electrică a aerului nu mai

poate face față acestor tensiuni înalte, vor apărea cantități mari și de scurtă durată de curent electric între polii opuși ai sarcinilor electrice, fenomen ce poartă numele de fulger.

Acumularea tensiunilor înalte sub acțiunea vântului și a ploii este un proces aproximativ continuu, rata acumulărilor de sarcină crescând atunci când condițiile atmosferice sunt prielnice. Cu toate acestea, fulgerele nu sunt un fenomen continuu: acestea există sub forma curenților mari și de scurtă durată. De ce se întâmplă acest lucru? De ce nu vedem arcuri electrice de lungă durată dar de o intensitate mai redusă? Răspunsul se regăsește în rezistența neliniară a aerului.

### **Formarea plasmei**

În condiții normale, aerul posedă o rezistență electrică extrem de mare, atât de mare încât o considerăm de obicei ca fiind infinită iar conductivitatea prin aer aproape neglijabilă. Prezența apei și a prafului scade rezistența acestuia, dar practic, acesta rămâne tot un dielectric. Atunci când se aplică o tensiune suficient de mare între două puncte separate de aer, proprietățile electrice ale acestuia suferă unele modificări: electronii sunt „smulși” de pe pozițiile lor normale și de pe atomii lor respectivi, eliberarea lor constituind un curent. În această stare, aerul este considerat ca fiind ionizat și poartă numele de plasmă și nu de gaz, a patra stare a materiei, pe lângă cea solidă, lichidă și gazoasă. Plasma este un conductor relativ bun de electricitate, rezistivitatea acesteia fiind mult mai mică decât cea a aceleiași substanțe sub formă gazoasă.

### **Menținerea plasmei și revenirea la forma gazoasă**

Pe măsură ce curentul trece prin plasmă, va exista o energie disipată prin plasmă sub formă de căldură, la fel ca și în cazul curentului printr-un rezistor solid. În cazul fulgerelor, temperaturile sunt extrem de mari. Aceste temperaturi ridicate sunt la rândul lor suficiente pentru transformarea aerului din forma gazoasă în plasmă sau pentru menținerea plasmei în acea stare fără prezența tensiunilor înalte. Pe măsură ce diferența de potențial dintre nori sau dintre nor și pământ scade datorită echilibrării sarcinilor electrice, căldura degajată de fulger menține drumul dintre cele două acumulări de sarcină în stare de plasmă, iar rezistența este prin urmare scăzută. Fulgerul rămâne sub formă de plasmă până în momentul în care tensiunea scade suficient de mult încât să nu mai poată susține un curent necesar disipării unei călduri suficient de mari. În final, aerul se reîntoarce în starea sa gazoasă iar curentul încetează; din acest moment, va reîncepe acumularea sarcinilor.

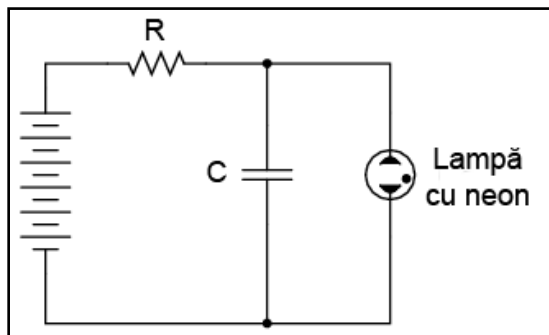
### **Histereza aerului**

Putem observa că în acest caz, aerul prezintă histereză. Atunci când nu conduce electricitate, tinde să rămână un dielectric până în momentul în care acumularea de sarcini (tensiunea) trece de un anumit prag critic. După acest punct, aerul tinde să rămână un conductor (sub formă de plasmă) până când tensiunea scade sub un anumit prag critic minim. Acest histerezis, combinat cu acumularea de tensiune datorită efectelor electrostatice ale vântului și ploii, explică în mare comportamentul de scurtă durată și intensitate mare a fulgerelor.

## Circuite oscilatoare

Din punct de vedere electronic, avem de a face cu un oscilator dinte de fierăstrău. Oscilatoarele sunt circuite electronice ce produc o tensiune alternativă dintr-o sursă de tensiune continuă. Un oscilator dinte de fierăstrău funcționează pe principiul încărcării unui condensator și descărcării bruște ale acestuia de fiecare dată când tensiunea atinge un prag critic.

Printre cele mai simple astfel de oscilatoare se numără un oscilator compus din trei componente (fără a include sursa de putere de c.c): un rezistor, un condensator și o lampă cu neon.

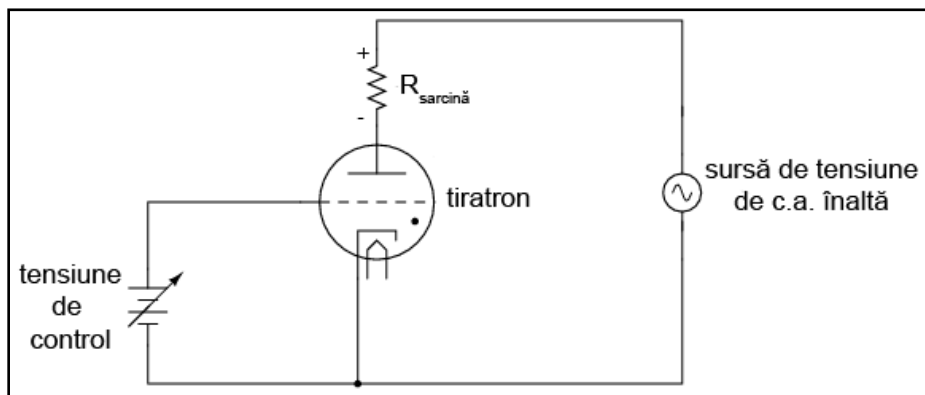


Lămpile cu neon nu sunt altceva decât doi electrozi metalici într-un tub de sticlă etanș, separați de neonul din interior. La temperatura camerei, fără existența niciunei tensiuni aplicate pe cei doi electrozi, lampa prezintă o rezistență infinită. Totuși, dacă se depășește o anumită tensiune de prag (această tensiune depinzând de presiunea gazului și de geometria tubului), neonul se va ioniza (transforma în plasmă) iar rezistența sa va scădea brusc. În

principiu, lampa cu neon prezintă aceleași caracteristici precum aerul în cazul fulgerelor.

Condensatorul din circuitul de mai sus se încarcă cu o rată exponențială inversă, rată determinată de mărimea rezistorului. Atunci când tensiunea atinge pragul critic de tensiune al lămpii, lampa se va „aprinde” brusc și va duce la descărcarea rapidă a condensatorului spre o tensiune mică. Odată descărcat, lampa se va „stinge” și va permite reîncărcarea condensatorului. Rezultatul este o serie de „fulgere” de scurtă durată pe lampă, rata acestora fiind determinată de tensiunea bateriei, rezistența rezistorului, capacitatea condensatorului și pragul critic de tensiune al lămpii.

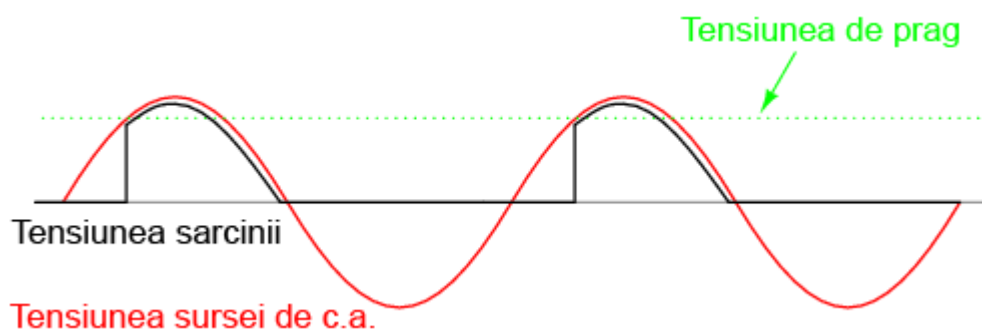
## Tiratronul



Deși lămpile cu descărcări în gaze, de genul celei de mai sus, sunt folosite de obicei ca și surse de iluminat, proprietățile lor de histereză pot fi folosite sub variante mult mai sofisticate, și anume tuburile tiratron. Fiind de fapt o triodă, tiratronul poate fi

pornit cu ajutorul unei tensiuni de control mici aplicate între grilă și catod, și poate fi oprit prin reducerea tensiunii dintre anod și catod.

În principiu, tiratroanele erau versiuni controlate ale lămpilor cu neon, proiectate special pentru comutarea curentului pe sarcină. Punctul din interiorul simbolului indică faptul că acest dispozitiv este umplut cu gaz, spre deosebire de celelalte tuburi cu vid. În circuitul de sus tiratronul permite trecerea curentului prin sarcină într-o singură direcție (observați polaritatea rezistorului) atunci când este pornit de către o tensiune de comandă de c.c. dintre grilă și catod. Sursa de putere a sarcinii este în c.a., indicând modul în care dispozitivul este oprit: din moment ce tensiunea de c.a. trece periodic printr-o condiție de 0 V, curentul prin sarcina alimentată în c.a. va atinge periodic o valoare de 0 A. Această pauză scurtă dintre semi-perioade permite tubului să se răcească și să se reîntoarcă în starea „oprit”. Conducția va reîncepe doar dacă va exista o tensiune suficient de mare aplicată de sursa de putere în c.a. și dacă sursa de c.c. o va permite.



Tensiunea de sarcină într-un astfel de circuit va arăta aproximativ precum în figura alăturată.

Pe măsură ce tensiunea de c.a. crește de la zero volți spre primul vârf, tensiunea pe sarcină rămâne de zero volți (curent de sarcină zero) până când este atinsă valoarea tensiunii de prag. În acel moment, tubul trece în starea „pornit” și începe să conducă, tensiunea de sarcină fiind aceeași cu tensiunea sursei de alimentare în c.a. pentru restul perioadei. Chiar și după ce forma de undă de c.a. scade sub valoarea tensiunii de prag, va mai exista tensiune pe sarcină, și prin urmare și curent. Acest lucru se datorează histerezei: dispozitivul rămâne în starea de conducție (pornit) dincolo de punctul de pornire inițial, continuând să conducă până în momentul în care tensiunea de alimentare scade spre aproximativ zero volți. Datorită faptului că tiratroanele sunt dispozitive uni-direcționale (precum diodele), căderea de tensiune pe sarcină în cazul semi-perioadei negative a semnalului de c.a. este zero. În circuitele practice, se vor folosi mai multe dispozitive aranjate sub forma unei punți redresoare pentru a permite trecerea întregii forme de undă spre sarcină.

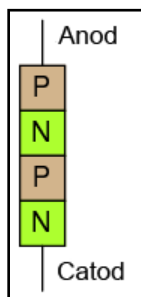
Tuburile tiratron au fost înlocuite complet de către componentele semiconductoare moderne, exceptând câteva aplicații speciale. Dispozitivele multijoncțiune moderne realizează însă același lucru precum dispozitivul prezentat mai sus: pornirea și oprirea curenților prin intermediul histerezei.

### 3 - Dioda Shockley

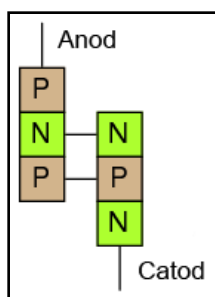
- Dioda Shockley este un dispozitiv semiconductor format din patru straturi PNPN. Aceste straturi se comportă precum o pereche de tranzistori PNP și NPN interconectați
- La fel ca toate dispozitivele multijoncțiune, diodele Shockley tind să rămână în starea de conducție odată pornite și în starea blocată odată oprite
- Pentru trecerea unei diode Shockley în starea de conducție, este necesară depășirea tensiunii de străpungere anod-catod
- Pentru blocarea unei diode Shockley, este necesară reducerea curentului prin aceasta sub un anumit prag critic

#### Reprezentarea echivalentă și simbol

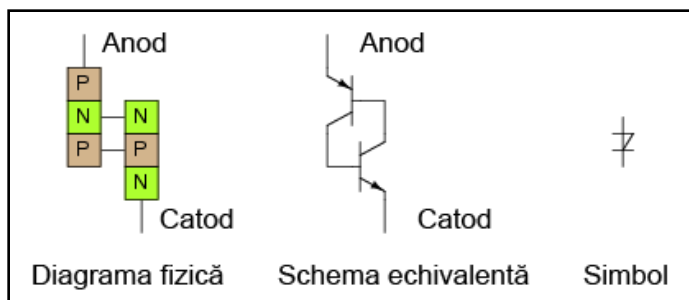
Primul dispozitiv din seria dispozitivele multijoncțiune pe care îl vom studia este o diodă cu patru straturi, cunoscută sub numele de diodă PNPN, sau dioda Shockley, după cel care a inventat-o, William Shockley. Acest dispozitiv nu trebuie confundat cu dioda Schottky, dispozitivul metal-semiconductor cunoscut pentru viteza mare de comutație.



O reprezentare brută a diodei Shockley, reprezentare întâlnită adesea în manuale, constă din patru straturi de material semiconductor P-N-P-N, unul peste altul.

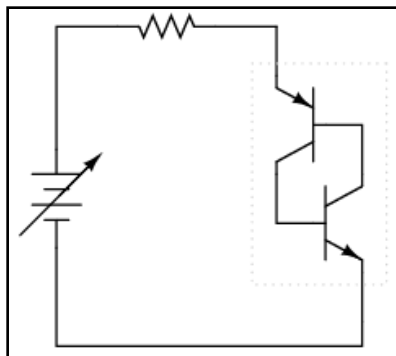


Din păcate, această reprezentare nu explică deloc modul de funcționare al acestui dispozitiv. Să considerăm așadar o reprezentare alternativă a construcției dispozitivului în figura alăturată.



Sub această reprezentare, dispozitivul pare a fi un set de tranzistori bipolari interconectați, unul de tip PNP iar celălalt de tip NPN. Utilizând simbolurile standard și respectând concentrațiile dopărilor, dioda Shockley arată conform figurii alăturate.

## Modul de funcționare



Să conectăm un astfel de dispozitiv la o sursă variabilă de tensiune pentru a observa comportamentul acestuia.

Desigur, fără nicio tensiune aplicată, nu va exista niciun curent. O creștere inițială a tensiunii nu va duce la apariția niciunui curent datorită faptului că ambii tranzistori se vor afla în stare blocată. Pentru a înțelege motivul unui astfel de comportament, trebuie să înțelegem ce anume este necesar pentru trecerea unui tranzistor în faza de conducție, și anume, existența unui curent

prin joncțiunea bază-emitor. Dar, după cum putem observa din diagramă, curentul de bază prin tranzistorul de jos este controlat de către tranzistorul de sus, iar curentul de bază al tranzistorului de sus este controlat de către tranzistorul de jos. Cu alte cuvinte, niciunul dintre tranzistori nu poate intra în starea de conducție până când celălalt nu se află și el în starea de conducție.

## Pornirea diodei Shockley

Prin urmare, cum poate o diodă Shockley să conducă curent, dacă tranzistorii săi constituenți se află tot timpul în stare blocată? Răspunsul este dat de comportamentul tranzistorilor reali, spre deosebire de tranzistorii ideali. Un tranzistor bipolar real nu va conduce niciodată curent prin colector fără existența unui curent de bază, indiferent de valoarea tensiunii aplicate între colector și emitor. Tranzistorii reali pe de altă parte, posedă limite finite ale valorilor tensiunii colector-emitor pe care aceștia le pot susține înainte de a intra în starea de conducție. Cu alte cuvinte, peste o anumită valoare a tensiunii colector-emitor, tranzistorul va intra în starea de conducție, indiferent de curentul de bază. Dacă doi tranzistori sunt conectați în acest mod pentru formarea unei diode Shockley, fiecare dintre ei va conduce dacă se va aplica o tensiune suficient de mare prin intermediul bateriei dintre anod și catod. Odată ce unul dintre tranzistori intră în starea de conducție, acesta va duce la apariția unui curent de bază prin celălalt tranzistor, ducând la funcționarea normală a acelui tranzistor, ceea ce duce la apariția unui curent de bază prin tranzistorul inițial. Rezultatul final este că ambii tranzistori se vor satura, menținându-se unul pe celălalt în conducție.

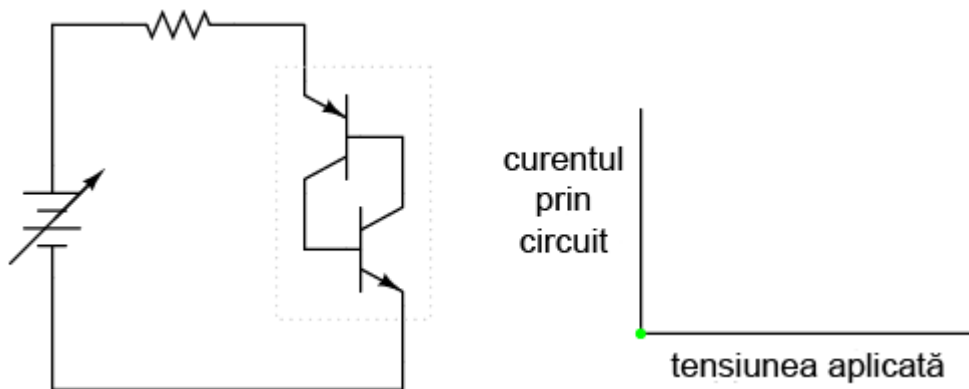
## Oprirea diodei Shockley

Prin urmare, putem forța intrarea în conducție a unei diode Shockley prin aplicarea unei tensiuni suficient de mari între anod și catod. După cum am văzut, acest lucru va duce inevitabil la pornirea unuia dintre tranzistori, ceea ce duce la rândul său și la pornirea celuilalt tranzistor și „agățarea” ambilor tranzistori în starea de conducție, acolo unde vor și rămâne. Dar cum putem opri cei doi tranzistori acum? Chiar dacă tensiunea aplicată este redusă cu mult sub punctul necesar intrării în conducție a diodei, aceasta va rămâne în starea de conducție datorită faptului

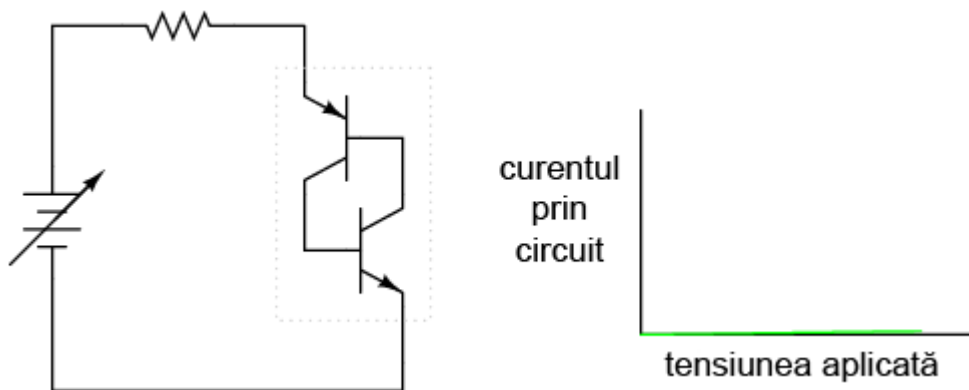


că prin ambii tranzistori există acum un curent de bază suficient pentru menținerea conducerii controlate. Răspunsul este reducerea tensiunii aplicate sub un nivel mult mai mic, astfel încât valoarea curentului să fie mai mică decât valoarea necesară polarizării directe a tranzistorilor, punct în care unul dintre tranzistori va intra în starea de blocare, ducând la oprirea curentului prin baza celui alt tranzistor și intrarea ambilor în starea de blocare inițială.

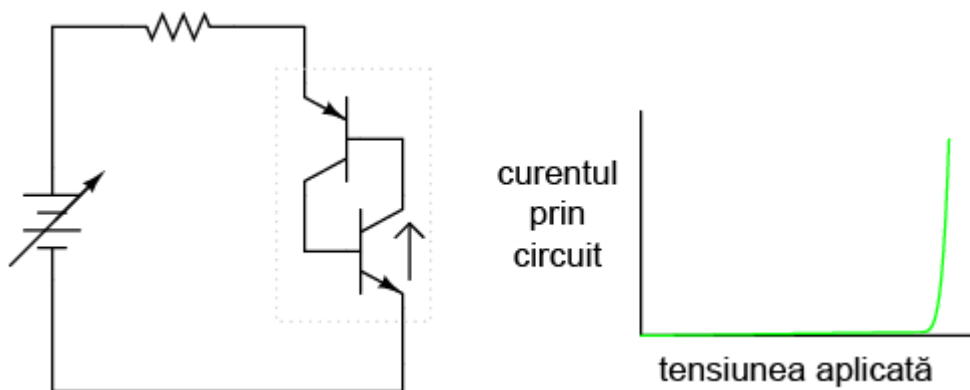
### Vizualizarea histerezei pe grafic



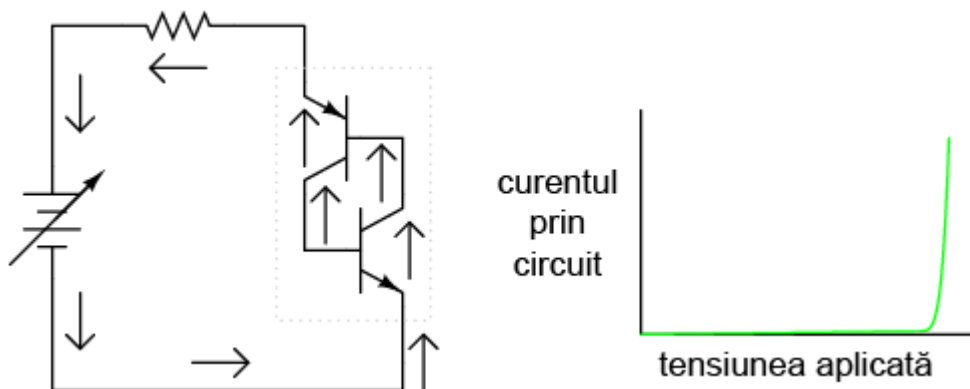
Dacă trecem această serie de evenimente pe un grafic curent-tensiune, histerezisul este evident. Inițial, observăm circuitul atunci când sursa de tensiune de c.c. (bateria) este de zero volți.



Următorul pas este creșterea treptată a tensiunii de c.c. aplicate. Curentul prin circuit este zero sau foarte apropiat de această valoare, datorită faptului că limita de intrare în conducție a tranzistorului nu a fost încă atinsă pentru niciunul din cele două dispozitive.

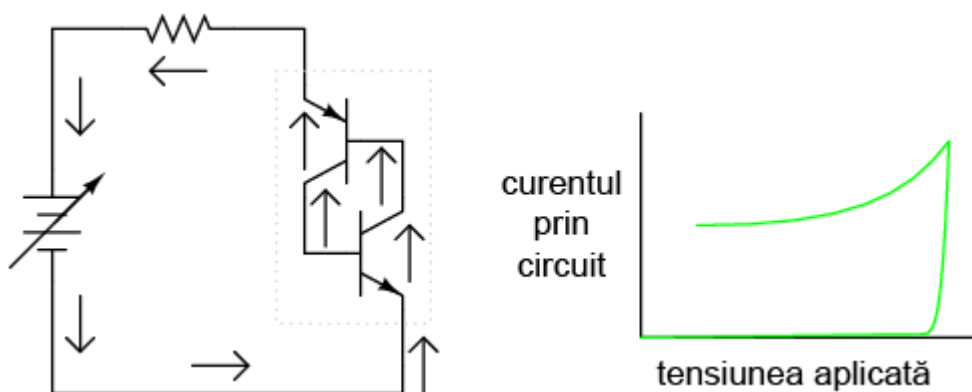


Atunci când limita de străpungere a unuia dintre tranzistori este atinsă, acest lucru va duce la apariția unui curent prin colector chiar și fără existența unui curent de bază prin acesta. În mod normal, un astfel de scenariu ar distruge un tranzistor bipolar cu joncțiune, dar joncțiunile PNP ale unei diode Shockley sunt proiectate să suporte acest tip de abuz, într-un mod similar diodelor Zener, ce suportă tensiuni de străpungere inverse fără a se distruge. De dragul exemplificării, vom presupune că tranzistorul inferior este cel care va intra prima dată în conducție, ducând la apariția unui curent de bază prin tranzistorul superior.

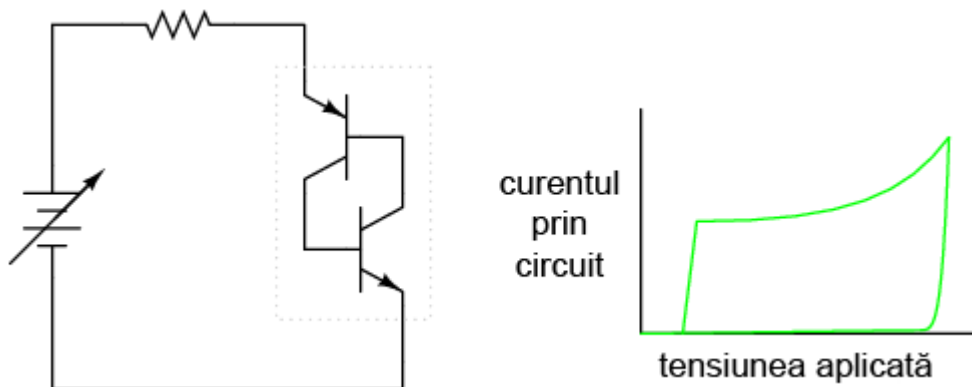


După ce tranzistorul de sus primește un curent de bază, și acesta va intra în conducție. Acest fapt duce la intrarea în conducție normală (existența curentului de bază) și a tranzistorului de jos, ambii tranzistori rămânând în starea de conducție. Curentul prin circuit trece rapid la valoarea maximă.

Reacția pozitivă este evidentă în această situație. Atunci când are loc străpungerea unuia dintre tranzistori, acest lucru duce la existența unui curent prin întreaga structură. Acest curent poate fi considerat semnalul de ieșire al dispozitivului. Odată ce s-a stabilit un curent de ieșire, acesta tinde să mențină ambii tranzistori în saturație, asigurând continuitatea unui curent de ieșire substanțial. Cu alte cuvinte, curentul de ieșire este reintrodus la intrare (curentul de bază al tranzistorului) pentru menținerea ambilor tranzistori în starea de conducție.

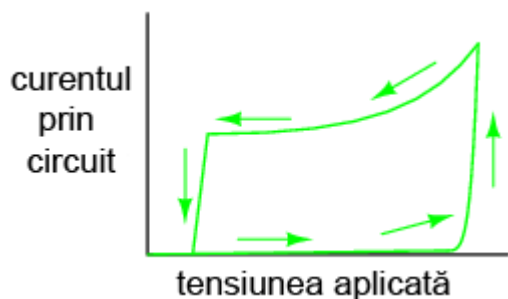


Cu ambii tranzistori menținuți într-o stare de saturație prin prezența unui curent de bază substanțial, fiecare va continua să conducă chiar și atunci când tensiunea aplicată este redusă mult sub nivelul de străpungere inițial. Efectul reacției pozitive este de menținere a ambilor tranzistori într-o stare de saturație în ciuda pierderii semnalului de intrare inițial (tensiunea necesară străpungerii unuia dintre tranzistori).



Dacă tensiunea sursei de alimentare în c.c. scade la o valoare mult prea mică, circuitul va atinge eventual un punct în care curentul nu va fi suficient pentru menținerea ambilor tranzistori în starea de conducție. Pe măsură ce curentul de colector al unuia dintre tranzistori scade tot mai mult, va duce la scăderea curentului de bază prin celălalt tranzistor, fapt ce duce la reducerea curentului de bază prin primul tranzistor. Acest cerc vicios continuă rapid până în momentul în care ambii tranzistori intră în starea de blocare.

Din nou putem observa efectele reacției pozitive: faptul că ciclul cauză-efect dintre cei doi tranzistori este „vicios” (o descreștere a curentului prin unul dintre ei duce la descreșterea curentului prin celălalt, ceea ce duce la rândul său la o nouă descreștere a curentului prin primul tranzistor) indică o relație pozitivă dintre ieșire (curent controlat) și intrare (curent de control prin baza tranzistorilor).



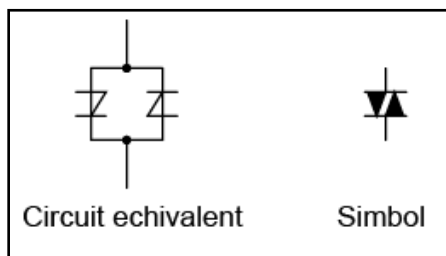
Curba graficului rezultată este un exemplu clasic de histereză: pe măsură ce semnalul de intrare (tensiune) crește și scadește, ieșirea (curent) nu urmărește aceeași cale la creșterea și descreșterea acesteia.

Pe scurt, dioda Shockley tinde să rămână în stare de conducție odată ce a fost pornită și în stare blocată o dată ce a fost oprită. Nu există un mod de operare între aceste două extreme și nu există o zonă activă de funcționare precum în cazul tranzistoarelor bipolare de exemplu: acesta este un dispozitiv pur oprit-pornit, asemenea tuturor dispozitivelor semiconductoare multijoncțiune.

## 4 - Diacul

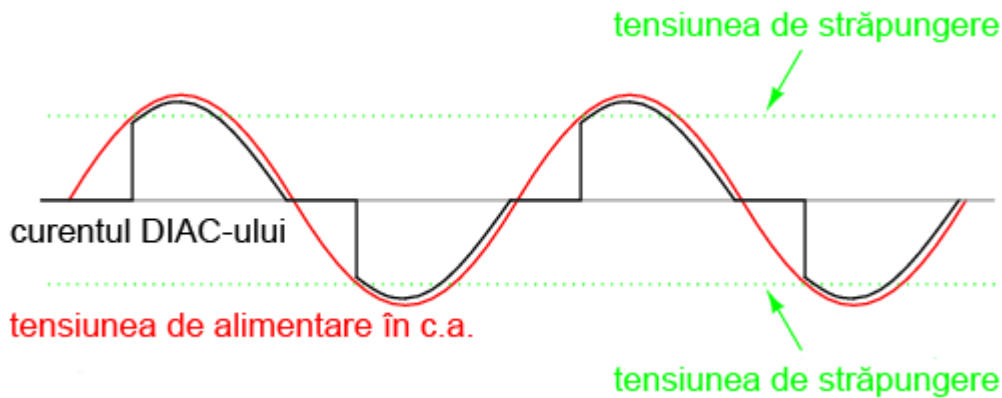
- Din punct de vedere funcțional, diacul reprezintă două diode Shockley conectate în paralel și având direcții opuse

### Reprezentarea echivalentă și simbol



Și diodele Shockley sunt dispozitive unidirecționale, la fel ca toate diodele: acestea conduc curentul doar într-o singură direcție. Dacă dorim în schimb funcționarea bidirecțională (c.a.), putem folosi două diode Shockley, conectate în paralel și având direcții opuse pentru a forma un nou tip de dispozitiv multijoncțiune, și anume, diacul.

### Modul de funcționare



Diacul se comportă asemeni unei diode Shockley atunci când tensiunea la bornele sale este o tensiune de curent continuu. Cu o tensiune de curent alternativ însă, comportamentul este puțin diferit. Datorită inversării periodice a direcției curentului alternativ, diacul nu se va agăța într-una din stările pornit/oprit mai mult de o semi-periodadă. Dacă diacul va intra în starea de conducție, acesta va continua să conducă curent atâta timp cât tensiunea disponibilă este suficientă pentru susținerea unui curent suficient de mare în acea direcție. La inversarea polarității tensiunii de c.a., diacul va intra în starea de blocare datorită unui curent insuficient pentru menținerea acestuia în starea de conducție, necesitând o nouă străpungere înainte de a putea conduce din nou. Rezultatul este o formă de undă asemănătoare cu cea din figura alăturată.

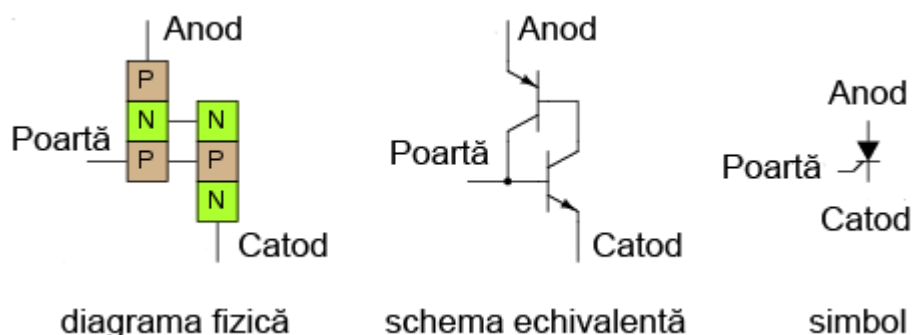
DIAC-ul nu este aproape niciodată folosit singur ci combinat cu alte dispozitive multijoncțiune.

## 5 - Tiristorul

- Tiristorul este practic o diodă Shockley cu un terminal în plus, terminal denumit poartă și folosit pentru aprinderea dispozitivului folosind o tensiune mică
- Pentru aprinderea tiristorului, tensiunea trebuie aplicată între poartă și catod, pozitivă pe poartă și negativă pe catod

Diodele Shockley sunt dispozitive interesante, dar aplicațiile lor sunt limitate. Utilitatea lor poate fi extinsă prin echiparea lor cu o altă modalitate de agățare. Dispozitivele astfel rezultate sunt dispozitive de amplificare în adevăratul sens al cuvântului, chiar dacă singurele stări existente sunt pornit și oprit. Aceste dispozitive poartă numele de tiristoare.

### Reprezentare echivalentă și simbol



Trecerea de la dioda Shockley la tiristor se realizează cu o singură modificare, și anume, adăugarea unui al treilea contact structurii PNPN existente.

## Aprinderea tiristorului

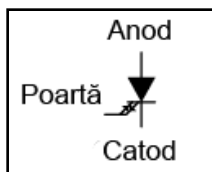
Dacă poartă unui tiristor nu este conectată în circuit, dispozitivul se comportă exact ca o diodă Shockley. Totuși, datorită faptului că poarta este conectată direct la baza tranzistorului inferior, aceasta poate fi folosită ca și alternativă la pornirea dispozitivului. Prin aplicarea unei tensiuni reduse între poartă și catod, tranzistorul inferior va fi forțat să intre în starea de conducție datorită curentului de bază rezultat, ceea ce va duce la intrarea în conducție și a tranzistorului superior ce va furniza la rândul lui un curent de bază către tranzistorul inferior, curent suficient de mare astfel încât tensiunea pe poartă să nu mai fie necesară pentru rămânerea dispozitivului în starea de conducție. Curentul necesar pentru pornirea dispozitivului va fi desigur mult mai mic decât curentul prin tiristor dinspre catod spre anod, astfel încât există un anumit nivel de amplificare existent în circuit.

Această metodă de intrare a tiristorului în conducție poartă numele de aprindere, și este cea mai folosită metodă de „agățare” a dispozitivului în practică. De fapt, tiristoarele sunt de obicei astfel alese încât tensiunea de străpungere este mult mai mare decât cea mai mare valoare a tensiunii existente în circuit, astfel încât acestea să nu poate fi pornite decât printr-o aprindere intenționată.

## Stingerea tiristorului

Trebuie menționat că în unele cazuri, stingerea tiristorului se poate realiza prin conectarea directă dintre poartă și catod, sau prin „aprinderea inversă” a porți cu o tensiune negativă (față de catod), astfel încât tranzistorul inferior este forțat să intre în starea blocată. Acest lucru este posibil doar în unele cazuri deoarece implică șuntarea întregului curent de colector al tranzistorului superior față de baza tranzistorului inferior. Acest curent poate să fie substanțial, implicând o stingere dificilă a tiristorului.

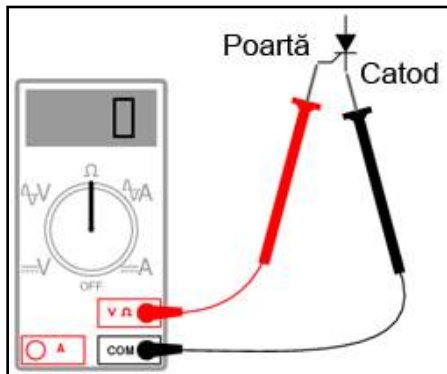
## Tiristorul GTO



O variație a tiristorului simplu o constituie tiristorul cu stingere pe poartă, sau tiristorul GTO. Dar chiar și în acest caz, curentul pe poartă necesar stingerii dispozitivului poate urca până la o valoare de 20% din curentul sarcinii. Simbolul tiristorului GTO este prezentat în figura alăturată.

Singura diferență dintre cele două tipuri de tiristoare sunt detaliile proiectării acestora. În cazul GTO-ului, tranzistorul NPN posedă un factor de amplificare în curent  $\beta$  mai mare decât tranzistorul PNP. Acest lucru permite unui curent pe poartă mult mai mic (direct sau invers) să exercite un grad de control mult mai mare asupra conducerii dintre catod și anod, agățarea tranzistorului PNP fiind mult mai dependentă de tranzistorul NPN și invers.

### Verificarea tiristorului cu ohmmetrul

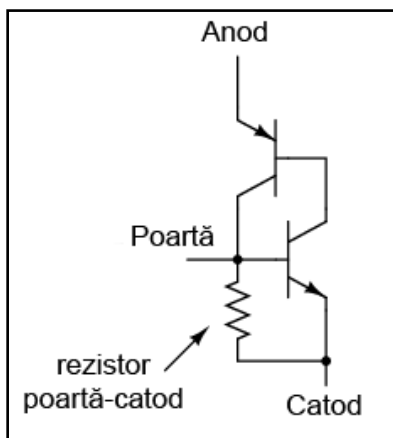


Un test rudimentar prin care se poate verifica un tiristor poate fi realizat cu ajutorul unui ohmmetru. Datorită faptului că intern, conexiunea dintre poartă și catod reprezintă o singură joncțiune PN, un aparat de măsură ar trebui să indice o continuitate între aceste terminale, atunci când sonda roșie este conectată pe poartă iar sonda neagră pe catod.

Toate celelalte măsurători de continuitate vor indica un circuit deschis („OL” pe afișajul multimetrului). Trebuie înțeles că acesta este un test foarte crud al tiristorului. Este posibil ca indicația ohmmetrului să fie bună

dar tiristorul să fie totuși defect. Până la urmă, singura modalitate de testare a unui tiristor este supunerea acestuia unui curent de sarcină.

### Rezistorul intern dintre poartă și catod

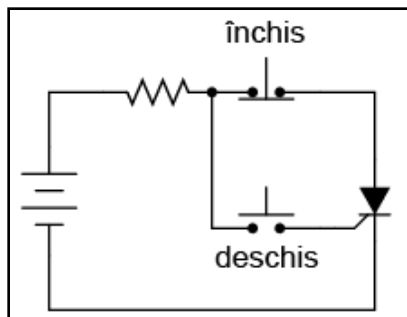


Dacă folosiți un multimetru echipat cu funcția „verificare diodă”, tensiunea joncțiunii poartă-catod s-ar putea să nu corespundă celei prevăzute de o joncțiune PN de siliciu (aproximativ 0,7 V), fiind mult mai mică. Acest lucru se datorează rezistorului intern conectat în cazul unor tiristoare între poartă și catod. Acest rezistor este introdus pentru a preveni aprinderea accidentală datorată creșterii bruște și de scurtă durată a tensiunii din cauza zgomotului prezent în circuit sau datorită descărcării sarcinilor electrice statice. Cu alte cuvinte, având un rezistor conectat între joncțiunea poartă-catod, necesită un semnal de aprindere mult mai mare (curent substanțial) pentru a porni tiristorul.

Această caracteristică se regăsește în cazul tiristoarelor mari și nu în cazul celor mici. Trebuie menționat faptul că un tiristor echipat cu un rezistor intern între poartă și catod va indica o continuitate în ambele direcții ale acestor terminale.

Tiristoarele „normale”, fără rezistor intern, poartă câteodată numele de tiristoare cu poartă sensibilă, datorită faptului că acestea pot fi foarte ușor aprinse printr-un semnal pozitiv mic pe poartă.

### Verificare tiristorului cu ajutorul unui circuit de test



Circuitul de test al tiristorului reprezintă atât un instrument de diagnosticare al tiristoarelor suspecte cât și o modalitate excelentă de înțelegere a funcționării de bază ale acestora. Se utilizează o sursă de tensiune de c.c. și două întrerupătoare folosite pentru aprinderea și stingerea tiristorului.

Acționarea întrerupătorului normal-deschis duce la conectarea porții la anod, permițând trecerea curentului dinspre terminalul negativ al bateriei, prin joncțiunea PN catod-poartă, prin întrerupător, prin rezistorul de sarcină și înapoi la baterie. Acest curent prin poartă ar trebui să forțeze aprinderea tiristorului, permițând trecerea curentului dinspre catod direct spre anod fără a mai fi nevoie de un curent prin poartă. Când întrerupătorul normal-deschis revine la poziția sa inițială (deschisă), sarcina va rămâne energizată.

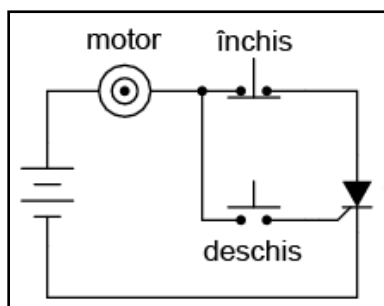
Acționarea întrerupătorului normal-închis duce la deschiderea circuitului, forțând încetarea curentului prin tiristor și implicit stingerea acestuia.

Dacă aprinderea tiristorului nu are loc, se poate ca problema să fie sarcina și nu tiristorul. Pentru menținerea tiristorului în stare de conducție este necesară o anumită valoare minimă a curentului prin acesta. Această valoare minimă poartă numele de curent de menținere. O sarcină cu o rezistența mult prea mare nu va putea permite existența unui curent suficient de mare pentru menținerea tiristorului în stare de conducție la încetarea curentului pe poartă, dând impresia unui tiristor stricat în circuitul de test. Valorile curenților de menținere pentru diferite tiristoare sunt disponibile de la producători. Valorile tipice se situează în jurul a 1 mA-50 mA, sau mai mult pentru tiristoarele mai mari.

### Limita directă a tensiunii de străpungere

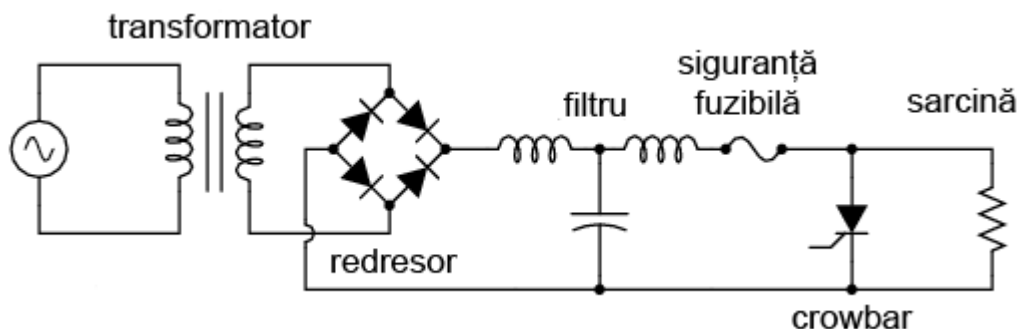
Testul nu este însă complet dacă nu se verifică și limita tensiunii de străpungere directe a tiristorului prin creșterea tensiunii sursei de c.c. (fără acționarea întrerupătorului normal-deschis) până în momentul în care tiristorul intră în conducție fără existența unui curent pe poartă. Atenție însă, un astfel de test s-ar putea să necesite o tensiune extrem de mare: majoritatea tiristoarelor de putere au o tensiune de străpungere de 600 V sau chiar mai mult !





În această formă simplă, circuitul de test al tiristorului poate fi folosit pe post de circuit de control al pornirii/opririi unui motor, lampă sau orice altă sarcină practică.

### Circuit de protecție crowbar



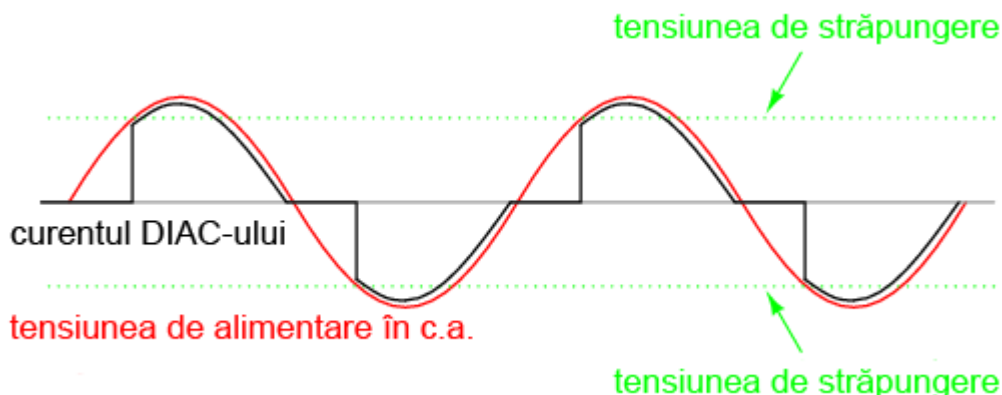
O altă utilizare practică a unui tiristor într-un circuit de c.c. o reprezintă un dispozitiv crowbar pentru protecția la supratensiune. Un circuit crowbar este compus dintr-un tiristor conectat în paralel cu ieșirea unei surse de tensiune de c.c.; scopul este plasarea unui scurt-circuit pe ieșirea sursei de tensiune pentru prevenirea unei tensiuni excesive pe sarcină. Distrugerea tiristorului și a sursei de tensiune se poate preveni prin amplasarea unei siguranțe fuzibile sau a unei rezistențe serie considerabile înaintea tiristorului pentru limitarea curentului de scurt-circuit. În figura alăturată, circuitul de aprindere al tiristorului este omis pentru simplitate.

Se poate utiliza un dispozitiv sau un circuit de detectare a tensiunii de ieșire pe poarta tiristorului, astfel încât, în momentul apariției unei supra-tensiuni, se va aplica o tensiune între poartă și catod, tensiune ce duce la aprinderea tiristorului și arderea siguranței fuzibile. Efectul este aproximativ similar cu așezarea unei răngi solide de fier (din engl. crowbar) direct între terminalele de ieșire ale sursei de tensiune, de aici și denumirea circuitului.

### Comanda circuitelor de putere

Majoritatea aplicațiilor tiristoarelor însă sunt pentru comanda circuitelor de putere în c.a., chiar dacă aceste dispozitive sunt uni-direcționale (dispozitive de c.c.). În cazul curenților bidirecționali, se pot utiliza mai multe tiristoare în același circuit. Principalul motiv pentru care tiristoarele sunt folosite pentru circuitele de putere în c.a. este răspunsul unic al acestora față de curentul alternativ. După cum am văzut și în cazul tiratronului și al diacului, aceste dispozitive intră în starea de conducție peste un anumită valoare a formei de undă alternative și rămân în această stare pentru tot restul semi-perioadei, până în momentul în care curentul scade la zero. Cu puțin înainte de

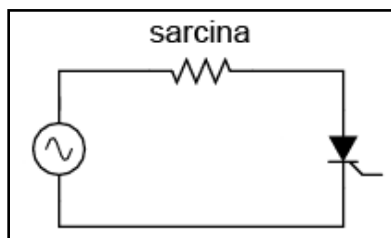
trecerea prin zero a formei de undă de curent, tiristorul va intra în starea blocată datorită curentului prea mic (acest comportament mai poartă numele și de comutație naturală) și va trebui re-pornit (re-aprins) în următoarea semi-perioadă. Rezultatul este o formă de undă a curentului echivalentă cu o undă sinusoidală „tăiată”.



Graficul formei de undă al diacului ca și răspuns la o tensiune de c.a a cărei vârf depășește tensiunea de străpungere este reluat în figura alăturată.

În cazul diacului, acea tensiune de străpungere are o valoare fixă. În cazul tiristoarelor, putem controla exact momentul în care dispozitivul intră în starea de conducție prin aprinderea porții în orice moment de-a lungul formei de undă. Prin conectarea unui circuit de control adecvat pe poarta tiristorului, putem „tăia” unda sinusoidală în orice punct; rezultatul este un tiristor comandat în timp.

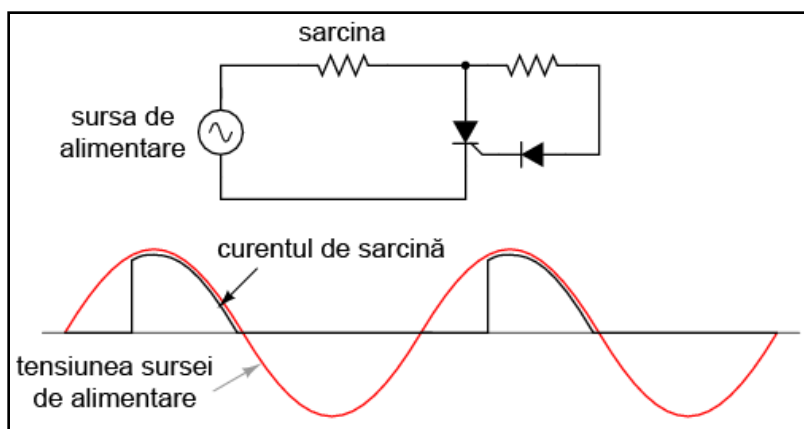
## Exemplu de utilizare



Să considerăm circuitul alăturat, de exemplu. În acest caz, un tiristor este conectat într-un circuit ce controlează puterea pe o sarcină de la o sursă de curent alternativ.

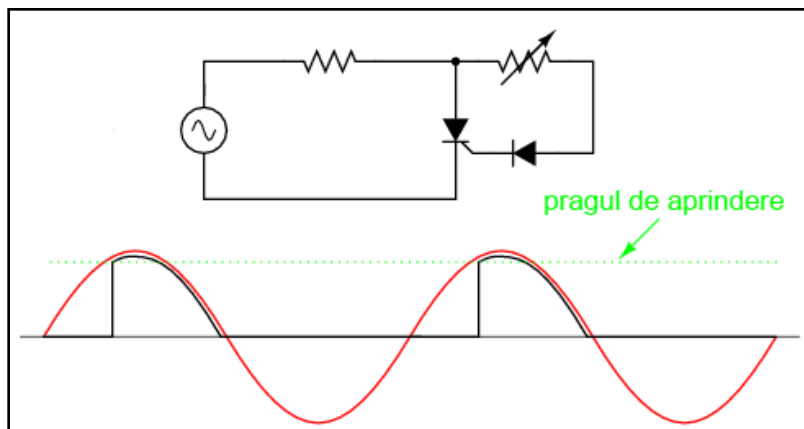
Fiind un dispozitiv uni-direcțional, tot ceea ce poată să realizeze este să transmită doar o semi-perioadă spre sarcină. Totuși, pentru a putea demonstra conceptul de comandă a tiristorului, acest circuit simplu este mai bun decât un circuit folosind două tiristoare pentru comanda întregii forme de undă.

Fără existența unui semnal pe poartă și cu valoarea tensiunii c.a. mult sub tensiunea de străpungere a tiristorului, dispozitivul nu va intra niciodată în starea de conducție.



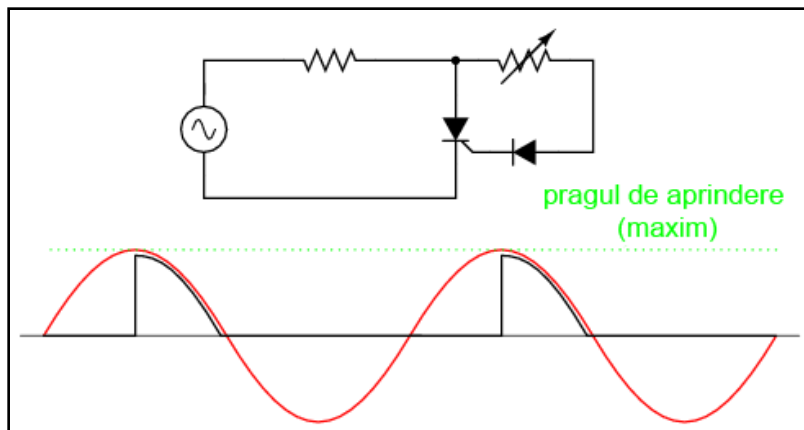
Conectând poarta tiristorului la anod prin intermediul unei diode redresoare standard (pentru prevenirea curentului invers prin poartă în cazul în care tiristorul posedă un rezistor intern între poartă și catod), pornirea tiristorului va fi posibilă aproape instant la începutul fiecărei semi-perioade pozitive.

Putem întârzia pornirea tiristorului prin introducerea unei rezistențe în circuitul porții, rezistență ce crește valoarea căderii de tensiune necesară pe poartă. Cu alte cuvinte, dacă mărim rezistența la care sunt supuși electronii în drumul lor către poartă, tensiunea de c.a. va trebui să atingă un punct mai mare în cadrul semi-alternanței pentru a crea un curent suficient de mare necesar aprinderii tiristorului.



Odată cu tăierea alternanței pozitive a unei sinusoidale la un nivel mai mare decât în cazul precedent prin întârzierea intrării în conducție a tiristorului, puterea medie pe sarcină este mai mică. Dacă înlocuim rezistorul fix din circuitul porții cu un rezistor variabil, putem controla puterea pe sarcină în timp. Creșterea rezistenței duce la creșterea pragului de aprindere, ducând la o

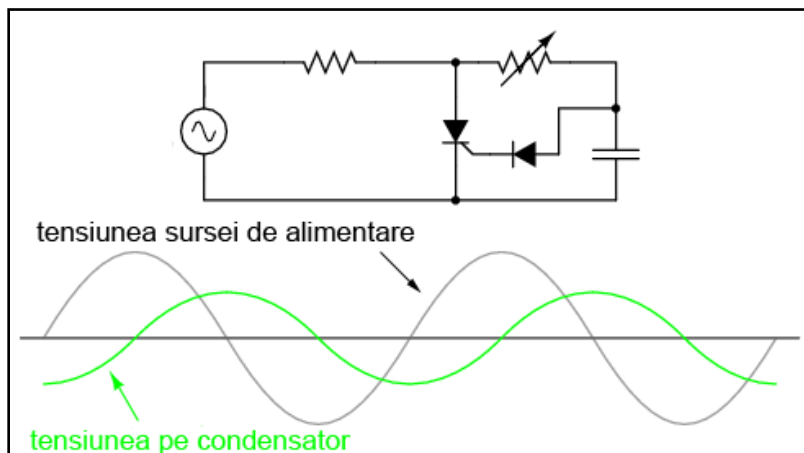
putere mai mică pe sarcină și invers.



Din păcate, acest circuit are un neajuns destul de mare. Folosind semnale de curent alternativ pentru aprinderea tiristorului, controlul asupra dispozitivului este limitat pe prima jumătate a alternanței pozitive. Cu alte cuvinte, nu putem amâna pornirea tiristorului până după atingerea vârfului formei de undă. Astfel că putem opri puterea pe sarcină doar

până în punctul maxim în care tiristorul intră în conducție, punct situat spre vârful forme de undă. În figura alăturată circuitul este setat la puterea minimă la care sarcina poate fi alimentată în această configurație.

Dacă în această situație vom continua să mărim pragul de aprindere, tiristorul nu va mai intra deloc în conducție, din moment ce nici măcar vârful forme de undă de c.a. nu va mai fi necesar pentru aprinderea tiristorului. Rezultatul este lipsa totală a puterii pe sarcină.

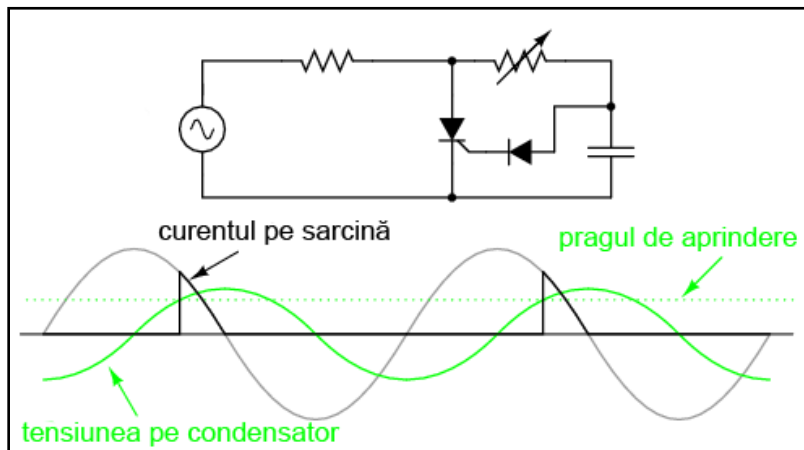


O soluție ingenioasă la această problemă constă în introducerea în circuit a unui condensator pentru modificarea fazei.

Forma de undă de amplitudine mai mică reprezintă căderea de tensiune la bornele condensatorului.

Pentru simplitatea exemplificării, presupunem o rezistență de comandă maximă, adică tiristorul nu va intra deloc în conducție iar curentul pe sarcină va fi zero

exceptând un curent foarte mic ce trece prin rezistorul de comandă și prin condensator. Căderea de tensiune pe acest condensator va fi defazată cu un unghi între  $0^\circ$  și  $90^\circ$  în urma undei de c.a. Atunci când această tensiune defazată va atinge un nivel suficient de mare, tiristorul va intra în conducție.

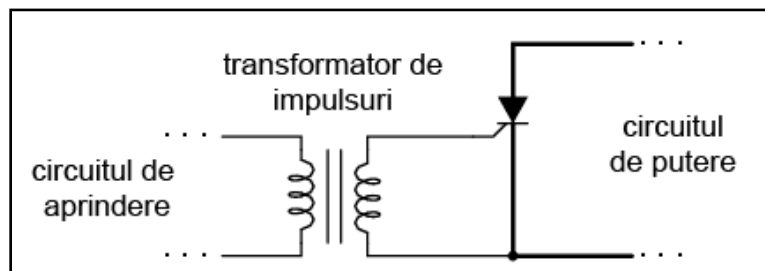


Cu o cădere de tensiune suficient de mare la bornele condensatorului pentru aprinderea periodică a tiristorului, rezultatul forme de undă a sarcinii va fi aproximativ cel alăturat.

Datorită faptului că forma de undă a condensatorului se află în creștere chiar și după ce forma de undă a c.a. și-a depășit vârful și este în scădere, aprinderea tiristorului este posibilă la un prag ce se

situează dincolo de acest vârf, reușindu-se tăierea forme de undă dincolo de limita maximă admisă de configurația precedentă. În realitate, forma de undă a tensiunii condensatorului este puțin mai complexă cea prezentată aici, forma sa sinusoidală fiind distorsionată de fiecare dată când tiristorul intră în conducție.

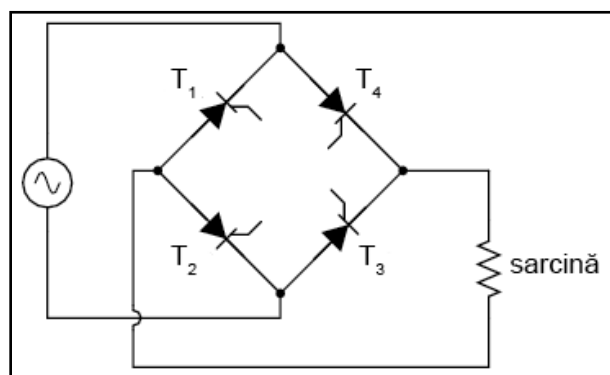
## Utilizarea transformatoarelor de impulsuri



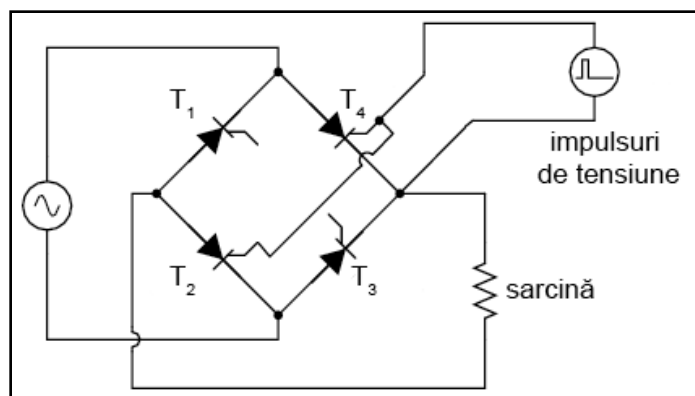
Tiristoarele pot fi aprinse cu ajutorul unor circuite mult mai complexe. Chiar dacă circuitul precedent este suficient pentru o aplicație simplă precum comanda unei lămpi, comanda motoarelor electrice industriale necesită metode mult mai sofisticate de aprindere. Câteodată se

pot folosi transformatoare de impulsuri pentru cuplarea unui circuit de aprindere pe poarta și catodul tiristorului pentru asigurarea izolației electrice dintre aprindere și circuitele de putere.

## Redresor comandat în punte cu tiristoare

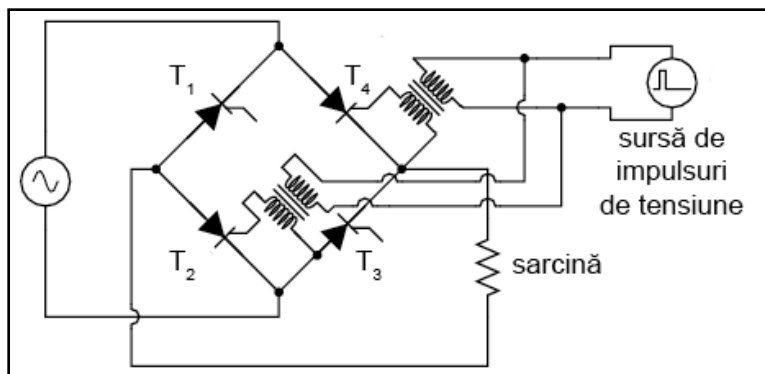


Atunci când se folosesc mai multe tiristoare pentru comanda puterii pe sarcină, adesea catodii nu sunt comuni din punct de vedere electric, făcând dificilă conectarea unui singur circuit de aprindere pentru toate tiristoarele. Un astfel de exemplu îl reprezintă un redresor în punte comandat cu tiristoare.



În oricare circuit redresor în punte, diodele redresoare (în acest caz, tiristoarele) trebuie să conducă în perechi opuse:  $T_1$  și  $T_3$  trebuie aprinse simultan; același lucru este valabil și pentru perechea  $T_2$  -  $T_4$ . După cum putem vedea însă, aceste perechi de tiristoare nu posedă aceleași conexiuni ale catodilor, ceea ce înseamnă că nu putem pur și simplu să utilizăm o singură sursă de tensiune pentru aprinderea

ambelor dispozitive, precum în figura alăturată.

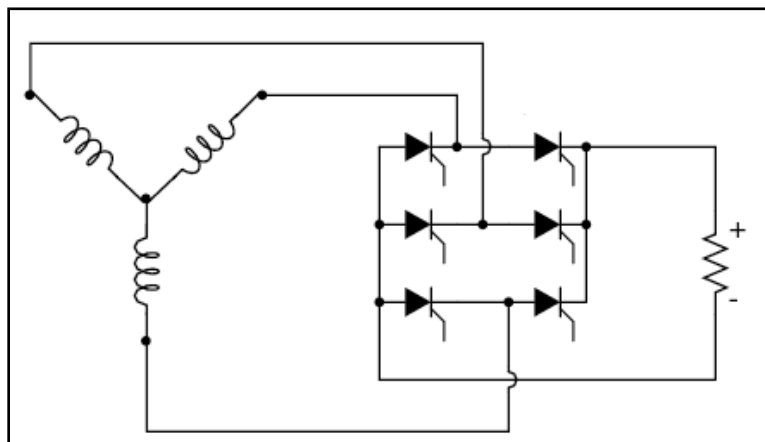


Deși sursa de impulsuri de tensiune prezentată mai sus va produce aprinderea tiristorului  $T_4$ , tiristorul  $T_2$  nu se va aprinde corespunzător datorită faptului că cele două tiristoare nu au o conexiune comună a catodilor, conexiune utilizată ca și punct de referință a tensiunii de aprindere. Folosind transformatoare de impulsuri pentru conectarea porților celor două

tiristoare la o sursă de impulsuri de tensiune continuă, vom obține rezultatul așteptat, aprinderea simultană a celor două dispozitive.

Trebuie menționat faptul că acest circuit prezintă doar conexiunile porților tiristoarelor  $T_2$  și  $T_4$ . Transformatoarele de impulsuri și sursele de tensiune pentru tiristoarele  $T_1$  și  $T_3$ , la fel și detaliile surselor de impulsuri de tensiune, au fost omise pentru simplitatea prezentării.

### Redresoare comandate trifazate



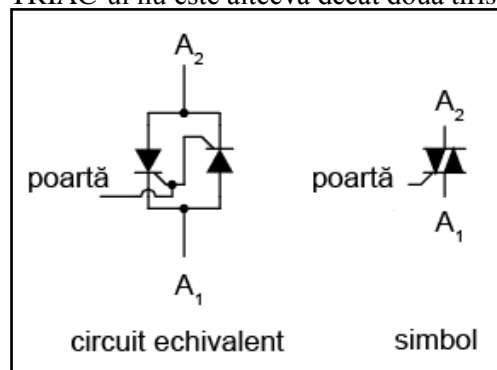
Redresoarele comandate în punte cu tiristoare pot fi folosite și pentru redresarea tensiunilor trifazate. Un astfel de redresor este prezentat în figura alăturată, fără a include și transformatoarele de impulsuri și circuitele de aprindere.

## 6 - Triacul

- Comportamentul triacului este asemănător cu două tiristoare conectate în paralel și în direcții opuse
- Triacele se folosesc adesea în circuitele simple și de puterea joasă
- Terminalii  $A_1$  și  $A_2$  nu se pot interschimba! Pentru o aprindere corectă a triacului, curentul pe poartă trebuie să treacă prin terminalul  $A_2$

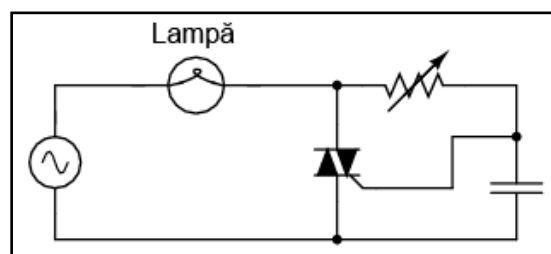
## Reprezentarea echivalentă și simbol

TRIAC-ul nu este altceva decât două tiristoare în paralel așezate spate în spate.



## Circuit dimmer cu triac

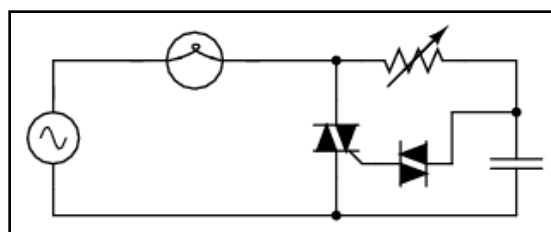
Deoarece tiristoarele individuale sunt mult mai flexibile într-un sistem de comandă, acestea sunt adesea întâlnite în



aplicațiile cu motoare electrice. triacele sunt de obicei folosite în aplicații mai simple, de putere mică, precum dimmer-ele. Un astfel de circuit simplu, pentru controlul unei lămpi, este prezentat în figura alăturată. De observat că acest circuit include și condensatorul de defazare necesar pentru aprinderea dispozitivului

dincolo de valoarea de vârf a formei de undă de c.a.

Triacele sunt recunoscute pentru aprinderea lor nesimetrică. Acest lucru înseamnă că tensiunea de străpungere este diferită pentru fiecare din cele două polarități a formei de undă. De obicei, acest lucru nu este dorit, datorită faptului că rezultatul aprinderii nesimetrice a dispozitivului înseamnă o formă de undă cu un conținut armonic mai mare. Formele de undă simetrice față de axa orizontală sunt compuse doar din armonici impare. Formele de undă nesimetrice însă, conțin armonici pare, dar care pot fi, în funcție de situație, însoțite și de armonici impare.



În interesul reducerii conținutului armonic al sistemelor de putere, cu cât numărul armonicilor este mai scăzut și mai puțin diversificat, cu atât mai bine - un motiv în plus pentru care tiristoarele sunt preferate triacelor în sistemele de control complexe de putere mare. O modalitate de aducere a formei de

undă de curent a triacului la o formă mai simetrică este utilizarea unui dispozitiv extern pentru declanșarea impulsurilor pe poartă. Acest lucru se poate realiza cu ajutorul unui diac.

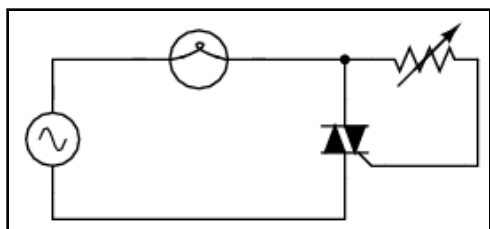
Tensiunile de străpungere ale diacurilor tind să fie mult mai simetrice (aceeași valoare pentru ambele polarități ale formei de undă) față de tensiunile triacelor. Din moment ce diacul împiedică orice curent pe poarta triacului până în momentul în care tensiunea de străpungere a atins un anumit nivel precis, repetabil în ambele

direcții, punctul de aprindere al triacului de la o semi-alternanță la alta tinde să fie mult mai consistent, simetria formei de undă rezultată fiind mult îmbunătățită față de axa orizontală.

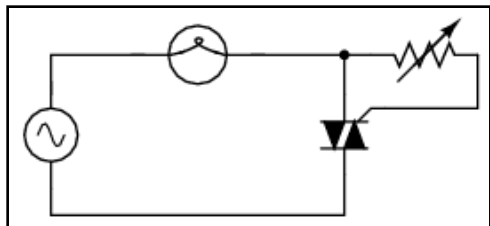
## Aprinderea corectă a triacului

Practic, toate caracteristicile tiristoarelor se aplică și triacelor, cu excepția faptului că triacele sunt dispozitive bidirecționale (pot conduce curenți în ambele direcții). Nu este necesar prin urmare să facem alte observații cu privire la acest dispozitiv, cu excepția modului de numerotare al terminalelor.

Din circuitul echivalent prezentat mai sus, s-ar putea înțelege faptul că terminalii 1 și 2 se pot interschimba între ei. Acest lucru nu este însă corect! Cu toate că ne putem imagina triacul ca fiind compus din două tiristoare, adevărul este că acest dispozitiv este construit dintr-o singură bucată de material semiconductor, cu straturi și dopaje corespunzătoare. Caracteristicile actuale de operare pot să difere ușor față de modelul echivalent format din două tiristoare.



Acest lucru poate fi scos în evidență considerând două circuite simple, unul funcțional, celălalt nefuncțional. Circuitele considerate sunt variante ușor modificate ale circuitului cu lampă prezentat mai sus, fără a lua în considerare condensatorul de defazaj. Cu toate că circuitul rezultat nu posedă același grad de control precum versiunea mai complexă (cu condensator și diac), acesta este funcțional.



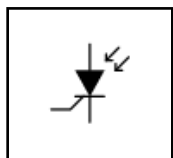
Să presupunem acum că inversăm terminalii principali ai triacului între ei. Conform circuitului echivalent cu două tiristoare de mai sus, această modificare nu ar trebui să afecteze în niciun fel funcționarea circuitului.

Presupunerea noastră nu este însă corectă! Dacă ar fi să construim acest circuit, vom observa că el nu funcționează. Puterea pe sarcină va fi zero, deoarece triacul nu va intra niciodată în starea de conducție, indiferent de valoarea rezistenței de comandă. Aprinderea corectă a triacului se realizează asigurându-ne că poarta primește curentul de comandă de la terminalul principal  $A_2$ . Identificarea terminalilor  $A_1$  și  $A_2$  se face folosind catalogul producătorului.

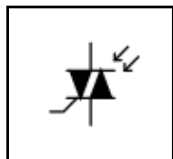


## 7 - Optotiristorul

Asemenea tranzistorilor bipolar, atât tiristoarele cât și triacele se pot construi sub forma dispozitivelor sensibile la lumină; în acest caz, tensiunea de aprindere a dispozitivelor este înlocuită de acțiunea luminii.



Tiristoarele controlate cu ajutorul luminii sunt adesea cunoscute sub acronimul LASCR (Light Activated Silicon-Controlled Rectifier). Simbolul acestora este prezentat în figura alăturată.



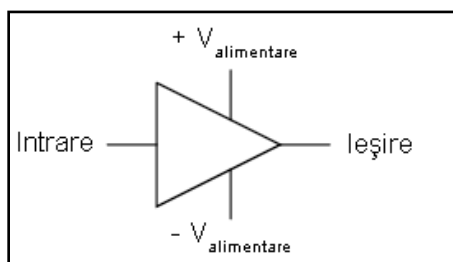
Triacele controlate cu ajutorul luminii nu au un acronim al lor, dar sunt cunoscute sub numele de opto-triace. Simbolul acestora este prezentat în figura alăturată.

## 06 - Amplificatorul operațional

### 01. Amplificatorul cu potențial de referință și amplificatorul diferențial

- Simbolul amplificatorului electronic este un triunghi, unde baza semnifică intrarea iar vârful semnifică ieșirea acestuia. Alimentarea amplificatorului este adesea omisă pentru simplificarea desenului
- Pentru amplificarea semnalelor de c.a. se poate folosi o sursă de tensiune duală, constând din două surse de c.c. conectate în serie cu punctul median conectat la masă
- Majoritatea amplificatoarelor au o singură intrare și o singură ieșire. Amplificatoarele diferențiale au două intrări și o singură ieșire, semnalul de ieșire fiind direct proporțional cu diferența dintre cele două semnale de intrare
- Tensiunea de ieșire a unui amplificator diferențial este dată de ecuația:  
$$V_{ieșire} = A_v(V_{(+)} - V_{(-)})$$

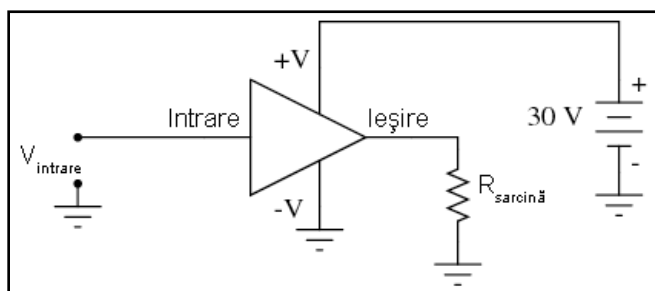
#### Simbolul amplificatorului



Pentru ușurința expunerii teoretice (desenării) a circuitelor electronice, amplificatoarele sunt adesea simbolizate printr-un simplu triunghi, iar componentele interne sunt „ascunse”. Această simplificare este foarte folositoare pentru cazurile în care construcția amplificatorului este irelevantă pentru funcționarea generală a circuitului.

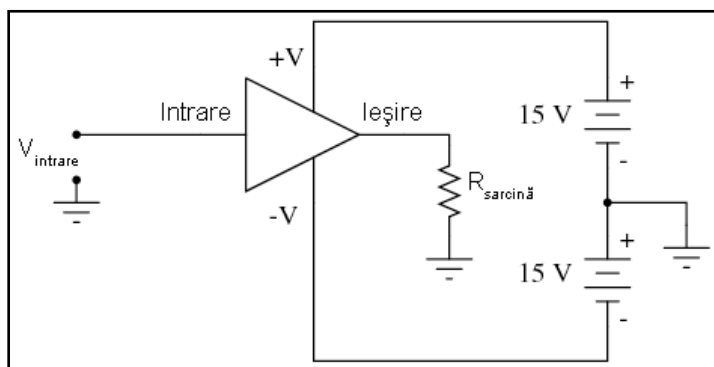
Conexiunile +V și -V simbolizează borna pozitivă, respectiv negativă, a sursei de alimentare în c.c. Tensiunile de intrare și de ieșire sunt reprezentate doar ca și conductoare individuale, deoarece se presupune că toate semnalele au ca și referință o conexiune comună din circuit, denumită masă. Adesea (dar nu tot timpul!), acest punct de referință îl reprezintă una dintre bornele sursei de alimentare în c.c., fie cea pozitivă, fie cea negativă.

#### Exemplu - amplificator cu potențial de referință



Un circuit practic cu amplificator arată astfel.

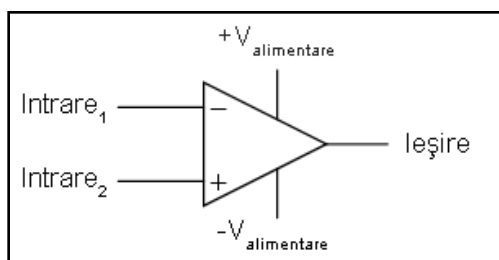
## Configurație cu sursă duală de tensiune



Dacă dorim să folosim amplificatorul și pentru semnale de c.a., va trebui să folosim două surse de c.c., iar masa să fie situată electric între +V și -V. Această configurație poartă numele de sursă de tensiune duală.

Tensiunea de alimentare a amplificatorului este tot 30 V, dar cădere de tensiune de pe sarcină poate lua acum valori teoretice între +15 V și -15V, în loc de +30 V și 0 V. Aceasta este o modalitate simplă de obținere a c.a. la ieșirea unui amplificator fără a fi nevoiți să folosim cuplaje capacitive sau cuplaje cu transformator la ieșire.

## Amplificatorul diferențial



Prin simbolizarea unui circuit complex printr-un singur triunghi, putem studia mult mai ușor amplificatoare și circuite mult mai complexe. Unul dintre aceste amplificatoare mai complexe pe care le vom studia, poartă numele de amplificator diferențial. Față de amplificatoarele „normale” ce amplifică un singur semnal de intrare (amplificatoare cu potențial de referință), cele diferențiale amplifică diferența de tensiune

dintre două semnale de intrare.

Ca și în circuitul precedent, toate tensiunile au ca și referință masa circuitului. Se poate observa că un terminal de intrare este marcat cu minus (-) iar celălalt cu plus (+). Întrucât un amplificator diferențial amplifică diferența dintre cele două semnale de la intrare, fiecare intrare influențează tensiunea de la ieșire în mod diferit (opus).

(-) Intrare <sub>1</sub>	0	0	0	0	1	2,5	7	3	-3	-2
(-) Intrare <sub>2</sub>	0	1	2,5	7	0	0	0	3	3	-7
Ieșire	0	4	10	28	-4	-10	-28	0	24	-20

Să considerăm următorul tabel alăturat cu tensiunile de intrare/ieșire pentru un amplificator diferențial cu un factor de amplificare în tensiune de 4.

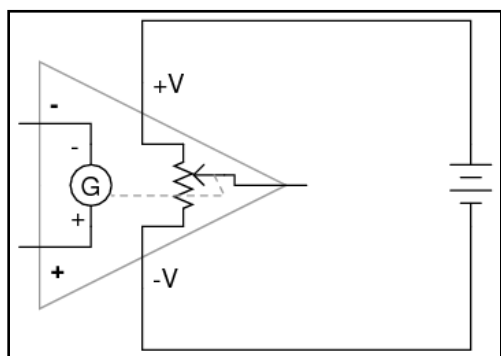
Unde ecuația tensiunii de ieșire arată astfel:

$$V_{ieșire} = A_V(Intrare_1 - Intrare_2) \text{ sau } V_{ieșire} = A_V(Intrare_+ - Intrare_-)$$

## Explicarea modului de funcționare

O creștere a tensiunii pe intrarea pozitivă (+) duce la creșterea pozitivă a amplificării, iar o creștere a tensiunii pe intrarea negativă (-) duce la o creștere negativă a amplificării. De asemenea, o scădere a tensiunii pe (+) duce la scăderea tensiunii de ieșire, iar o creștere a tensiunii pe (-) are un rezultat opus. Datorită acestei relații dintre cele două terminale de intrare, intrarea negativă (-) mai poartă numele de intrare inversoare **iar** intrarea pozitivă (+) poartă numele de intrare ne-inversoare.

## Modelul amplificatorului diferențial

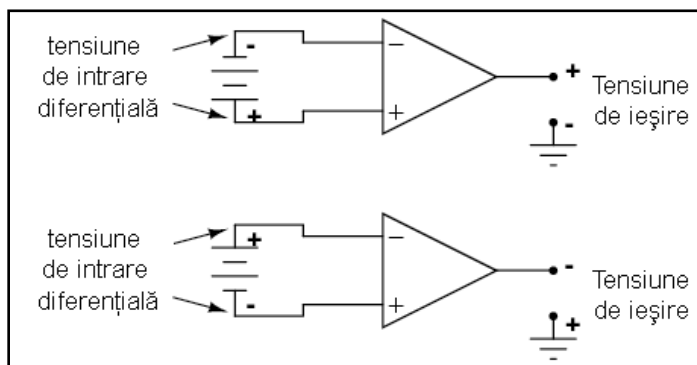


Pentru a înțelege mai bine modul de funcționare, putem reprezenta un amplificator diferențial ca și o sursă variabilă de tensiune controlată de un voltmetru sensibil.

Desigur, figura alăturată este doar un model, și nu reprezintă schema reală de construire a amplificatorului. Simbolul „G” reprezintă un galvanometru, o deplasare sensibilă a unui voltmetru. Potențiometrul conectat între +V și -V furnizează o tensiune variabilă la contactul de ieșire (ce are ca și referință una dintre bornele sursei de tensiune în

c.c.), tensiune stabilită de indicația galvanometrului. Trebuie înțeles faptul că orice sursă conectată la ieșirea unui amplificator diferențial este alimentată de sursa de tensiune de c.c. (baterie), și nu de semnalul de intrare. Semnalul de intrare (galvanometru) doar controlează ieșirea.

## Ieșirea a unui amplificator diferențial



Cu toate aceste polarități, este foarte ușor să greșim și să nu ne dăm seama care va fi ieșirea unui amplificator diferențial. Pentru evitarea acestor situații, putem observa următoarea regulă.

Când polaritatea tensiunii diferențiale de la intrare este aceeași cu polaritatea intrărilor (inversoare și ne-inversoare) amplificatorului, tensiunea de ieșire va fi pozitivă. Când polaritatea tensiunii diferențiale este

inversă față de cea a intrărilor, ieșirea amplificatorului va fi negativă.

## Utilizarea practică a amplificatoarelor diferențiale

Dacă tensiunile de intrare ale amplificatorului diferențial reprezintă cantități matematice (cum este cazul circuitelor analogice ale calculatoarelor), sau mărimi fizice de proces (cum este cazul circuitelor electronice de instrumentație), putem vedea utilitatea unui astfel de dispozitiv. Am putea folosi amplificatoare operaționale pentru a compara două cantități și a vedea care este mai mare (prin intermediul polarității tensiunii de ieșire), sau am putea face o comparație a diferenței dintre două cantități (precum nivelul apei din două bazine) și acționarea unei alarme luminoase și/sau sonore dacă diferența este prea mare (în funcție de valoarea absolută a semnalului de ieșire).

În circuitele de control automat, cantitatea controlată poartă numele de variabilă de proces și este comparată cu o valoare fixă denumită punct de referință; deciziile sistemului automat sunt luate în funcție de diferența dintre aceste două valori. Primul pas într-o astfel de schemă constă în amplificarea diferenței dintre variabila de proces și punctul de referință cu ajutorul unui amplificator diferențial. În circuitele simple, ieșirea amplificatorului poate fi utilizată pentru acționarea unui element final de control (precum o valvă) și menținerea procesului cât mai aproape de punctul de referință.

## 02. Amplificatorul operațional

- Dacă nu este specificat altcumva, toate tensiunile din circuitele folosind amplificatoare au ca și referința un punct comun, denumit masă. Acest punct este de obicei conectat la unul dintre terminalele sursei de alimentare. În acest fel, putem vorbi despre o anumită tensiune ca fiind „pe” un singur fir, dar neuitând faptul că tensiunea se măsoară tot timpul între două puncte
- Un amplificator diferențial este un dispozitiv ce amplifică diferența dintre două semnale de intrare. Una dintre intrări poartă numele de intrare inversoare(-), iar cealaltă de intrare ne-inversoare(+)
- Un amplificator operațional (AO) este un amplificator diferențial cu o amplificare în tensiune foarte mare ( $A_V = 200.000$ , sau mai mult)
- AO au de obicei impedanțe de intrare și de ieșire foarte mari, respectiv foarte mici
- AO pot fi folosite pe post de comparatoare, funcționând saturate sau blocate în funcție de care dintre intrări are o tensiune mai mare
- Una dintre aplicațiile comparatorului este modularea în durată a pulsurilor (PWM), și constă în compararea unui semnal de c.a. cu o tensiune de referință de c.c. Factorul de umplere a formei de undă de la ieșire poate fi controlat prin ajustarea tensiunii de c.c. de referință, ce controlează, sau modulează durata (lățimea) pulsului semnalului de ieșire

### Scurt istoric

Cu mult înainte de apariția tehnologiei digitale, calculatoarele erau construite electronic pentru efectuarea calculelor, folosind curenți și tensiuni pentru reprezentarea cantităților numerice. Acest lucru a fost folosit în special pentru simularea proceselor fizice. O tensiune variabilă, de exemplu, ar putea reprezenta viteza, sau forța, într-un sistem fizic. Prin utilizarea divizorilor de tensiune rezistivi și a amplificatoarelor de tensiune, operațiile matematice de înmulțire și împărțire putea să fie foarte ușor efectuate pe aceste semnale.

Proprietățile reactive ale condensatoarelor și bobinelor au fost utilizate pentru simularea variabilelor folosite în funcții ce necesitau utilizarea analizei matematice. Curentul printr-un condensator depinde de rata de variație a tensiunii, variație desemnată prin intermediul unei derivate. Prin urmare, dacă tensiunea la bornele unui condensator ar reprezenta viteza de deplasare a unui obiect, curentul prin acesta ar reprezenta forța necesară pentru accelerarea sau decelerarea acelui obiect, capacitatea condensatorului reprezentând în acest caz masa obiectului respectiv.

$$i_c = C \frac{dv}{dt}$$

unde,

$i_c$  = curentul instantaneu prin condensator

$C$  = capacitatea condensatorului(F)

$dv / dt$  = variația curentului cu timpul

$$F = m \frac{dv}{dt}$$

unde,

$F$  = forța aplicată obiectului

$m$  = masa obiectului

$dv / dt$  = variația vitezei cu timpul (acelerația)

Această operație electronică poartă numele de derivare, și este o funcție naturală a curentului prin condensator în relație cu tensiunea aplicată la bornele sale. Observați că acest circuit nu are nevoie de nicio „programare” pentru efectuarea acestei funcții matematice relativ avansate, lucru care nu se întâmplă în cazul unui calculator digital.

Circuitele electronice sunt ieftine și foarte ușor de construit în comparație cu sistemele fizice complexe, iar asemenea simulări electronice au fost folosite pe bandă largă pentru cercetarea și dezvoltarea sistemelor mecanice. Pentru simulări realiste totuși, au fost necesare circuite amplificatoare de precizie înaltă și ușor de configurat pentru aceste prime calculatoare.

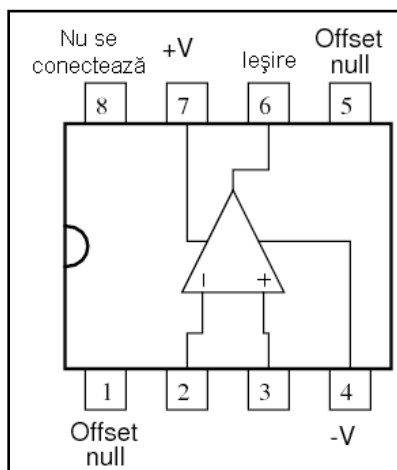
Pe parcursul dezvoltării calculatoarelor, s-a ajuns la concluzia că amplificatoarele diferențiale cu amplificări în tensiune foarte mari, erau candidații perfecți pentru aceste necesități. Folosind componente simple, conectate la intrarea și la ieșirea amplificatorului diferențial, s-a putut obține practic orice factor de amplificare era necesar și se putea calcula orice funcție matematică, fără modificarea sau ajustarea circuitului intern al amplificatorului însăși. Aceste amplificatoare diferențiale cu amplificări foarte mari, au ajuns să fie cunoscute sub

numele de amplificatoare operaționale, pe scurt AO, datorită folosirii lor în cadrul operațiilor matematice efectuate de calculatoarele analogice.

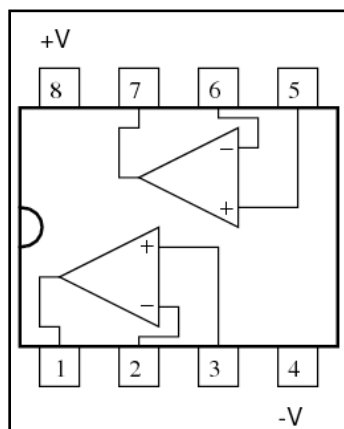
## Avantajele utilizării amplificatoarelor operaționale

Amplificatoarele operaționale moderne, precum modelul popular 741, sunt circuite integrate de o înaltă performanță și ieftine pe de altă parte. Impedanțele lor de intrare sunt foarte mari, curenții pe la bornele acestora se situează în jurul valorii de 0,5 mA pentru modelul 741, și mult mai puțin pentru AO cu tranzistori cu efect de câmp la intrare. Impedanța de ieșire este de obicei foarte mică, aproximativ  $25\ \Omega$  pentru modelul 741, multe modele având protecție integrată la scurt-circuit, ceea ce înseamnă că ieșirile acestora pot fi scurt-circuitate fără ca acest lucru să afecteze circuitul intern al amplificatorului. Cu un cuplaj direct între etajele interne cu tranzistori ale AO, acestea pot amplifica semnale de c.c., precum și de c.a. Costurile de timp și de bani pentru proiectarea unui circuit amplifcător utilizând componente discrete se ridică mult peste costului unui amplificator operațional. Din aceste motive, AO au scos aproape complet din uz amplificatoarele de semnal folosind tranzistori discreți.

## Structura unui circuit integrat



În diagrama alăturată sunt prezentate conexiunile pinilor pentru un singur AO (la fel și pentru modelul 741) dintr-un circuit integrat DIP (Dual Inline Package) cu 8 pini.



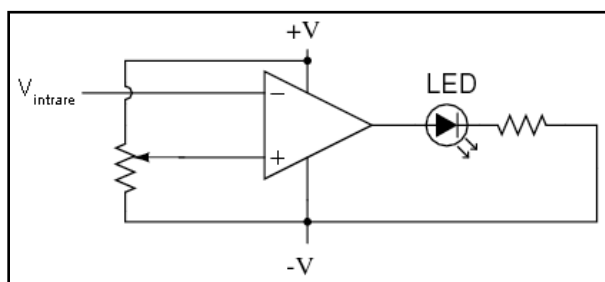
Unele circuite integrate conțin două AO într-un singur pachet, incluzând modelele populare TL082 și 1458. Aceste unități „duale” sunt împachetate tot într-un integrat DIP cu 8 pini.

## Factorul de amplificare

AO practice au un factor de amplificare în tensiune în jurul a 200.000 sau chiar mai mult, ceea ce înseamnă că sunt inutile ca și amplificatoare diferențiale în sine. Pentru un AO cu o amplificare în tensiune,  $A_v = 200.000$ , și o tensiune maximă de ieșire între +15V și -15V, o diferență de tensiune de doar 75  $\mu\text{V}$  între cele două intrări este suficientă pentru intrarea amplificatorului în saturație sau blocare!

Înainte de a examina utilizarea componentelor externe pentru reducerea amplificării la un nivel rezonabil, putem investiga mai întâi aplicațiile AO „pur”.

## Comparatorul



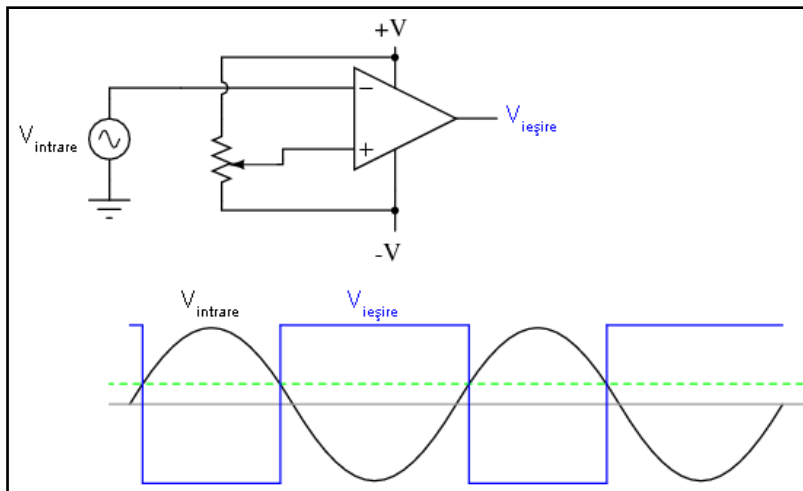
Una dintre aceste aplicații o reprezintă comparatorul. Practic, putem spune că ieșirea unui AO va fi saturată pozitiv dacă intrarea pozitivă (+) este mai pozitivă decât cea negativă (-), și saturat negativ dacă intrarea (+) este mai puțin pozitivă decât intrarea (-). Cu alte cuvinte, amplificarea foarte mare în tensiune a unui AO, înseamnă că acesta poate fi folosit pentru

a compara două tensiuni (una reprezentând o mărime de stare și alta un punct de referință), și folosirea semnalului de la ieșire pentru semnalizarea cazului în care există o diferență între cele două semnale de intrare.

Comparatorul cu AO de mai sus, compară tensiunea de la intrare cu o tensiune de referință stabilită printr-un potențiomtru ( $R_1$ ). Dacă  $V_{intrare}$  scade sub tensiunea stabilită de  $R_1$ , ieșirea AO se va satura la +V, iar LED-ul se va aprinde. Invers, dacă  $V_{intrare}$  se află sub valoarea tensiunii de referință, LED-ul va fi polarizat invers, cu -V, și nu se va aprinde. Dacă  $V_{intrare}$  este un semnal de tensiune produs de un instrument de măsură, acest circuit comparator ar putea funcționa precum o alarmă de „nivel”, nivel stabilit de  $R_1$ . În loc de LED, am putea conecta un releu, un tranzistor sau orice alt dispozitiv capabil să pună în funcțiune un mecanism de acțiune în cazul unei „alarme”.

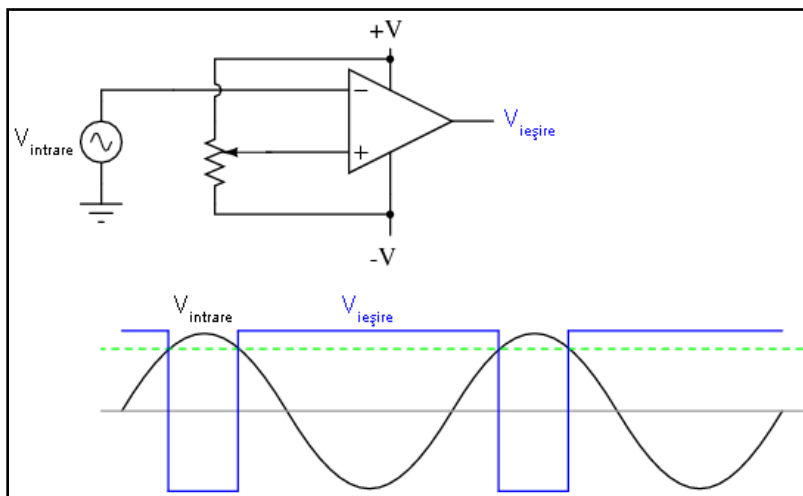
## Convertor de semnal dreptunghiular





O altă aplicația a circuitului comparator este un convertor de semnal dreptunghiular. Presupunând că tensiunea de intrare aplicată la terminalul inversor (-) al AO ar fi o undă sinusoidală de c.a. în loc de c.c., tensiunea de ieșire ar oscila între saturație pozitivă și saturație negativă de câte ori tensiunea de intrare va fi egală cu tensiunea de referință produsă de potențiometru. Rezultatul va fi un semnal dreptunghiular.

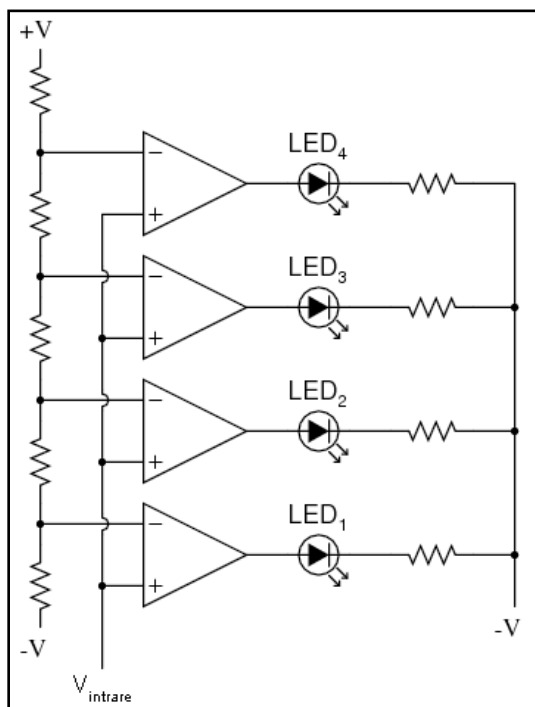
### Ajustarea potențiometrului



Ajustarea potențiometrului modifică tensiunea de referință aplicată la intrarea ne-inversoare (+), iar acest lucru modifică punctele de intersecție ale unei sinusoidale; rezultatul este o formă de undă dreptunghiulară cu un factor de umplere diferit.

Semnalul de c.a. de la intrare nu trebuie să fie neapărat un semnal sinusoidal pentru ca acest circuit să-și îndeplinească funcția. Semnalul de intrare ar putea la fel de bine să fie triunghiular, dinte de fierăstrău, sau orice alt semnal periodic cu semi-alternanțe pozitive și negative. Acest circuit comparator este foarte folositor pentru formarea undelor dreptunghiulare cu factori de umplere diferiți. Această tehnică mai este denumită și modularea în durată a pulsurilor sau PWM, adică variația, sau modularea unei forme de undă în funcție de un semnal de control, în acest caz, semnalul produs de potențiometru.

### Bargraph-ul



Bargraph-ul este o altă aplicație unde se poate folosi un comparator. Dacă am conecta mai multe AO pe post de comparatoare, fiecare având propria sa tensiune de referință conectată la intrarea ne-inversoare (+), dar fiecare primind același semnal de tensiune la intrarea inversoare (-), putem construi un bargraph de tipul celor văzute la egalizatoarele grafice sau în sistemele stereo. Pe măsură ce semnalul de tensiune (reprezentând puterea semnalului radio sau nivelul sunetului audio) crește, comparatoarele vor „porni” unul după altul și vor pune în funcțiune LED-ul lor respectiv. Cu fiecare comparator pornind la un nivel diferit al sunetului audio, numărul LED-urilor aprinse va indica puterea semnalului de intrare.

În circuitul prezentat, LED<sub>1</sub> va fi primul care se va aprinde pe măsură ce tensiunea de intrare va crește într-o direcție pozitivă. Pe măsură ce tensiunea va continua să crească, și celelalte LED-uri vor începe să pornească, unul după altul, până când toate vor fi aprinse.

## Convertor analog-digital (CAD)

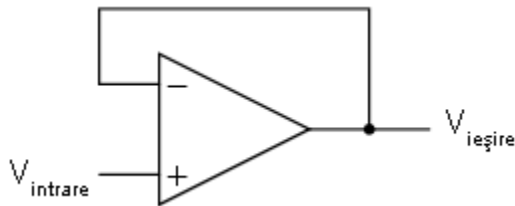
aceeași tehnologie este folosită și în cazul convertorului analog-digital (CAD), pentru „traducerea” unui semnal analog într-o serie de tensiuni pornit/oprit, reprezentând un număr digital.

## 03. Reacția negativă

- Conectarea ieșiri unui AO la intrarea sa inversoare (-) poartă numele de reacție negativă
- Când ieșirea unui AO este conectată direct la intrarea inversoare (-), configurația creată poartă numele de repetor de tensiune. Oricare ar fi semnalul de tensiune aplicat pe intrarea ne-inversoare (+), valoarea semnalului de ieșire va fi egală cu acesta
- Un AO cu reacție negativă tinde să aducă tensiunea sa de ieșire la nivelul necesar pentru ca diferența de tensiune dintre cele două intrări ale sale să fie practic zero. Cu cât amplificarea AO este mai mare, cu atât mai apropiată de zero va fi valoarea diferenței de tensiune

- Unele AO nu pot produce la ieșire o tensiune egală cu tensiunea de alimentare atunci când sunt saturate. Limita superioară și inferioară a tensiunii de saturație poartă numele de tensiunea pozitivă de saturație, respectiv tensiunea negativă de saturație

## Realizarea reacției negative

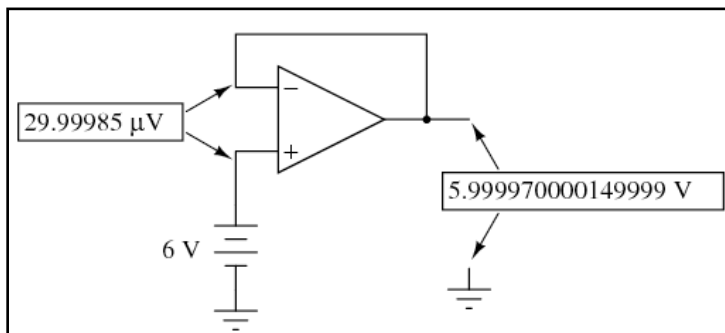


Dacă ar fi să conectăm ieșirea unui AO la intrarea sa inversoare (-) și în același timp să aplicăm un semnal de tensiune la intrarea sa ne-inversoare (+), vom vedea că tensiunea de ieșire a AO este foarte apropiată de cea de intrare (pentru simplitate, sursa de putere, circuitul +V/-V și masa nu au mai fost desenate în figură).

Pe măsură ce  $V_{intrare}$  crește,  $V_{ieșire}$  crește și ea pe măsura amplificării diferențiale. Totuși, pe măsură ce  $V_{ieșire}$  crește, această tensiune de ieșire este furnizată înapoi spre intrarea inversoare, ducând astfel la scăderea diferenței de tensiune dintre cele două intrări și scăderea tensiunii de ieșire. Rezultatul este că, pentru oricare valoare a tensiunii de intrare, tensiunea de ieșire va fi aproape egală cu  $V_{intrare}$ , dar suficientă pentru menținerea unei diferențe de tensiune între  $V_{intrare}$  și intrarea (-) a cărei amplificare generează tensiunea de ieșire.

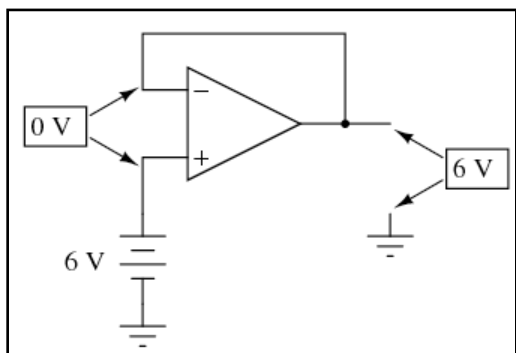
## Explicația reacției negative

Circuitul va atinge foarte repede un punct de echilibru, unde valoarea tensiunii de ieșire este astfel încât să mențină o diferență necesară de tensiune la intrare, ce produce la rândul ei o tensiune de ieșire suficientă. Introducerea la intrarea inversoare a amplificatorului a tensiunii sale de ieșire este o tehnică numită reacție negativă, și este un concept fundamental și esențial pentru stabilizarea unui sistem în general. Această stabilitate oferă amplificatorului operațional posibilitatea funcționării în zona sa liniară, și nu doar saturat sau blocat, așa cum a fost cazul comparatorului (fără reacție).



Deoarece amplificarea AO este atât de mare, tensiunea pe intrarea inversoare poate fi menținută aproximativ egală cu  $V_{intrare}$ . Să presupunem de exemplu că AO din exemplu are o amplificare de 200.000. Dacă  $V_{intrare} = 6 \text{ V}$ , tensiunea de ieșire va fi de 5,99970000149999 V. Această valoare este suficientă pentru ca tensiunea diferențială de 6 V -

5,99970000149999 V = 29,99985 μV, amplificată cu factorul de 200.000 să producă la ieșire exact 5,99970000149999 V; sistemul este astfel în echilibru, iar valoarea tensiunii de ieșire nu se (mai) modifică.

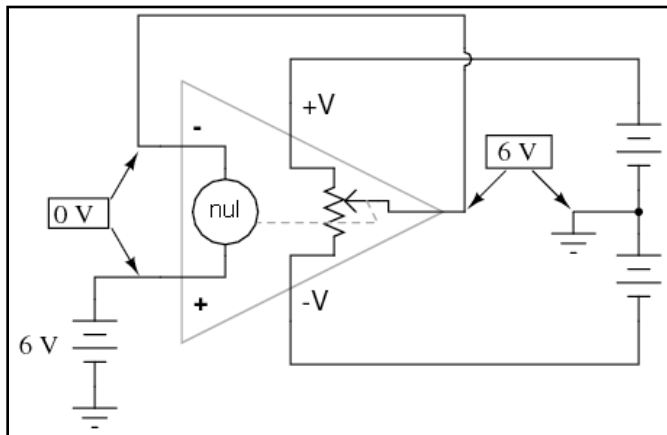


După cum se poate vedea, diferența de tensiune nu este prea mare ( $29,99985 \mu\text{V}$ ); din considerente practice, putem presupune că această diferență de tensiune dintre cele două intrări este menținută prin intermediul reacției negative la exact  $0 \text{ V}$ .

### Avantajele utilizării reacției negative

Un mare avantaj al utilizării AO cu reacție negativă este că valoarea amplificării în tensiune nu este importantă, atâta timp cât este foarte mare. Dacă amplificarea diferențială ar fi fost  $250.000$  în loc de  $200.000$ , atunci tensiunea de ieșire ar fi și mai apropiată de valoarea  $V_{\text{intrare}}$ . În circuitul prezentat însă, tensiunea de ieșire ar fi (din punct de vedere practic) și în acest caz egală cu tensiunea de la intrarea ne-inversoare. Amplificările AO, prin urmare, nu trebuie să fie foarte precise din fabricație pentru a putea fi folosite cu succes în circuitele electronice. Circuitul de mai sus va urma pur și simplu semnalul la intrare, cu o amplificare stabilă de  $1$ .

### Modelul amplificatorului operațional



Reîntorcându-ne la modelul amplificatorului operațional, putem să ne imaginăm AO ca fiind o sursă de tensiune variabilă controlată de un detector de nul extrem de sensibil. „Potențiometrul” din interiorul AO ce crează o tensiune variabilă, se va deplasa spre orice poziție este nevoie, astfel încât să „balanseze” intrările inversoare și ne-inversoare, iar căderea de tensiune pe detectorul de nul, ca urmare a acestui fapt, să fie zero (indicația detectorului de nul =  $0$ ).

Peria potențiometrului se va mișca astfel încât tensiunea de ieșire să ducă acul indicator al detectorului de nul la zero volți. Tensiune de ieșire va fi egală cu tensiunea de intrare,  $6 \text{ V}$  în acest caz. Dacă tensiunea de intrare se modifică, potențiometrul din interiorul AO își va modifica poziția astfel încât detectorul de nul să fie echilibrat ( $0 \text{ V}$ ). Rezultatul este o tensiune de ieșire aproximativ egală cu cea de intrare.

### Repetor de tensiune

Acest lucru este valabil pentru întregul domeniu de tensiuni pe care AO îl poate susține la ieșire. Cu o sursă de putere de +15V/-15V, și un amplificator ideal ce poate amplifica tensiunea de la intrare între aceste limite maxime, ieșirea AO va „urmări” tot timpul intrarea sa între -15 V și + 15 V. Din acest motiv, circuitul de mai sus poartă numele de repetor de tensiune. Amplificarea în tensiune este 1 pentru această configurație, impedanța de intrare mare, cea de ieșire mică și un factor de amplificare în curent mare.

### **Tensiunea pozitivă și negativă de saturație**

Trebuie menționat faptul că multe AO nu pot genera la ieșire căderi de tensiune exact cât tensiunea de alimentare. Tensiunea de ieșire a modelului 741, de exemplu, la saturație, este mai mică cu un volt pe partea pozitivă (+V), și cu doi volți pe partea negativă (-V). Astfel, cu o sursă de tensiune duală de +15/-15 V, ieșirea unui AO poate fi maxim +14 V și minim -13 V (cu aproximare), dar nu poate crește mai mult de atât datorită metodei de confecționare al AO. Aceste două limite sunt cunoscute sub numele de tensiunea pozitivă de saturație, respectiv tensiunea negativă de saturație. Alte AO, precum modelul 3130, ce folosesc tranzistori cu efect de câmp pe etajul de ieșire, pot urma tensiunea de alimentare cu o aproximație de câțiva milivolți, în ambele părți. Practic, tensiunile de saturație pozitivă, respectiv negativă, sunt egale cu tensiunile de alimentare.

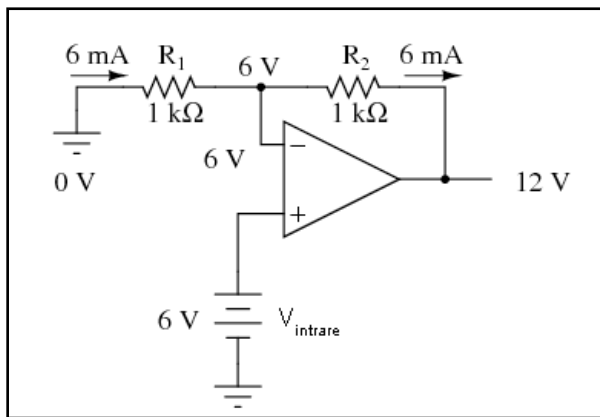
## **04. Reacția negativă prin divizor de tensiune**

- Prin conectarea reacției negative a unui AO prin intermediul unui divizor de tensiune, tensiune de ieșire devine un multiplu al tensiunii de intrare
- Un AO cu reacție negativă, a cărui semnal de intrare este conectat la intrarea non-inversoare (+), poartă numele de amplificator ne-inversor. Polaritatea tensiunii de ieșire va fi aceeași cu a tensiunii de intrare. Amplificarea în tensiune a circuitului este dată de următoarea formula:  
$$A_v = (R_2 / R_1) + 1$$

### **Adăugarea divizorului de tensiune**

Dacă adăugăm un divizor de tensiune la reacția negativă, astfel încât doar o fracțiune din tensiunea de ieșire este reintrodusă la intrarea inversoare, și nu întreaga valoare, tensiunea de ieșire va fi un multiplu al tensiunii de intrare. Din nou, pentru simplitate, conexiunile alimentării în c.c. a AO au fost omise. Toate tensiunile au ca și referință punctul de masă (0 V).

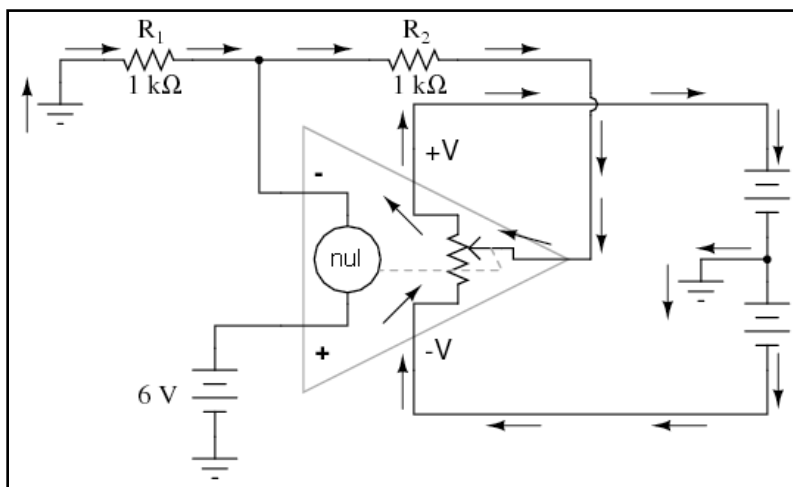
### **Sursa de semnal conectată la intrarea ne-inversoare (+)**



### Analiza circuitului

O altă metodă de analiză a acestui circuit constă în calcularea amplitudinii și direcției curentului prin  $R_1$ , cunoscând tensiunea pe fiecare parte (și prin urmare pe  $R_1$ ), și rezistența rezistorului  $R_1$ . Din moment ce partea stângă a rezistorului  $R_1$  este conectată la masă (0 V), iar partea dreaptă are un potențial de 6 V (datorită reacției negative ce menține tensiunea aceluși punct egală cu  $V_{intrare}$ ), putem vedea că avem 6 V la bornele lui  $R_1$ . Acest lucru înseamnă un curent de 6 mA prin  $R_1$ , de la stânga la dreapta. Deoarece știm că ambele intrări ale AO au impedanțe foarte mari, putem afirma că, curentul prin acestea este zero, și nu se comportă precum un divizor de curent în punctul de conectare cu divizorul de tensiune. Cu alte cuvinte, putem considera că  $R_1$  și  $R_2$  sunt conectate în serie: toți electronii ce trec prin  $R_1$  ajung în  $R_2$ . Cunoscând curentul prin  $R_2$  și rezistența lui  $R_2$ , putem calcula căderea de tensiune la bornele acestui rezistor (6 V) și polaritatea acestuia. Calculând tensiunea totală dintre punctul de masă (0 V) la dreapta rezistorului  $R_2$ , ajungem la o valoare de 12 V.

### Explicație utilizând modelul AO



Dacă ne uităm pe desenul precedent, ne putem întreba „unde anume se duce curentul de 6 mA”. Figura de mai sus nu prezintă întregul drum, dar în realitate, acest curent vine de la sursa de putere de c.c., trece prin masă,  $R_1$ ,  $R_2$ , prin ieșirea AO și înapoi la borna pozitivă a sursei. Utilizând modelul AO - potențiomtru/detector de nul, calea curentului arată astfel.

Sursa de semnal de 6 V nu trebuie să furnizeze niciun curent în circuit: aceasta doar comandă amplificatorului operațional echilibrul de tensiune dintre cele două intrări, iar ca urmare a acestui fapt, AO produce la ieșire o tensiune de două ori mai mare decât tensiunea de semnal datorită reacției divizate a celor doi rezistori de 1 kΩ.

### Factorul de amplificare

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

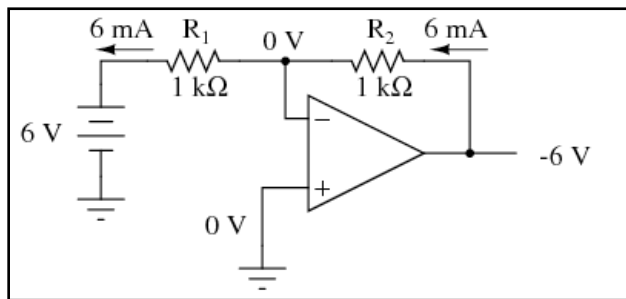
Putem modifica factorul de amplificare în tensiune al acestui circuit, prin simpla modificare a valorilor celor doi rezistori. Amplificarea poate fi calculată cu formula alăturată.

### Amplificator ne-inversor

Se poate observa că amplificarea unui astfel de amplificator nu poate să scadă sub valoarea 1. Dacă ar fi să coborâm valoarea lui  $R_2$  la zero ohmi, circuitul rezultat ar fi identic cu repetorul de tensiune, unde ieșirea este conectată direct la intrarea inversoare. Această amplificare poate fi mărită mult peste 1, prin creșterea valorii rezistorului  $R_2$  față de  $R_1$ .

Polaritatea tensiunii de ieșire este aceeași cu cea a tensiunii de intrare. O tensiune pozitivă de intrare înseamnă o tensiune pozitivă de ieșire, și invers (față de masă). Din acest motiv, acest circuit poartă numele de amplificator ne-inversor.

### Sursa de semnal conectată la intrarea inversoare (-)



Să reluăm circuitul de mai sus, dar de data aceasta să aplicăm tensiunea de intrare în altă parte.

Prin conectarea la masă a intrării ne-inversoare, reacția negativă de la ieșire va încerca să mențină tensiunea intrării inversoare la 0 V. Din acest motiv, intrarea inversoare, în acest circuit, poartă numele de masă virtuală (având un

potențial de 0 V, dar nefiind conectată direct la masă).

Tensiunea de intrare este aplicată de această dată din stânga divizorului de tensiune  $R_1$ -- $R_2$  ( $= 1 \text{ k}\Omega$ ). Prin urmare, tensiune de ieșire trebuie să ia valoarea de -6 V pentru echilibrarea punctului de mijloc la potențialul masei (0 V). Folosind metodele amplificatorului ne-inversor, putem analiza funcționarea circuitului prin determinarea amplitudinilor și direcțiilor curenților.

## Factorul de amplificare

$$A_V = \frac{-R_2}{R_1}$$

Din nou, putem modifica amplificarea în tensiune a circuitului prin modificarea valorilor rezistorilor  $R_1$  și  $R_2$ . Amplificarea poate fi calculată cu formula alăturată.

## Amplificator inversor

De această dată, amplificarea în tensiune a circuitului poate fi sub 1, depinzând doar de raportul valorilor celor doi rezistori. Polaritatea ieșirii este tot timpul opusă polarității tensiunii de intrare. O tensiune de intrare pozitivă înseamnă o tensiune de ieșire negativă, și invers (față de masă). Din acest motiv, acest circuit este cunoscut sub numele de amplificator inversor. Semnul „-” din formula de mai sus scoate în evidență această inversare a polarităților.

## Observație

Astfel de circuite studiate mai sus sunt folosite pentru efectuarea operațiilor matematice de înmulțire și împărțire în circuitele analogice ale calculatoarelor.

## 05. Amplificatorul tensiune-curent

- În industrie, semnalele de curent în c.c. sunt adesea folosite în dauna semnalelor de tensiune în c.c., pentru reprezentarea mărimilor fizice
- Semnalele de tensiune se pot produce relativ ușor direct de la dispozitivele traductoare, pe când semnalele de curent nu.
- AO pot fi folosite pentru realizarea „conversiei” unui semnal de tensiune într-un semnal de curent. În acest mod de funcționare, AO vor genera la ieșire o cădere de tensiune necesară pentru menținerea curentului prin circuitul de semnal la o valoare bine stabilită

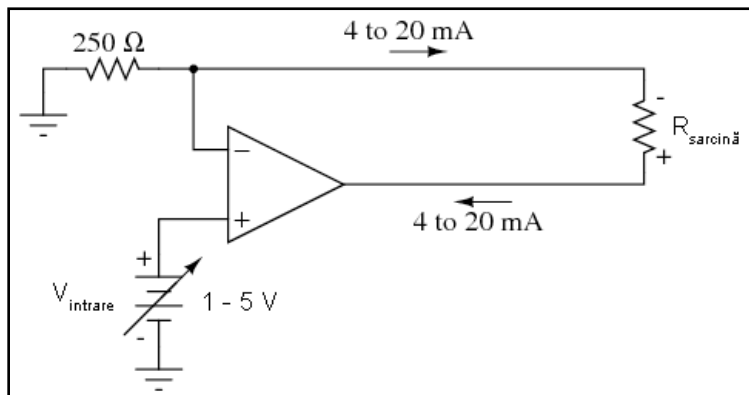
## Avantajele utilizării semnalelor de c.c.

În circuitele de instrumentație, semnalele de c.c. sunt folosite adesea pentru reprezentarea analogică a unei mărimi fizice precum temperatura, presiunea, greutatea și mișcarea. De obicei se preferă utilizarea semnalelor de curent și nu a celor de tensiune, deoarece semnalele de curent sunt egale prin întreaga buclă a circuitului serie, de la



sursă (aparatură de măsură) până la sarcină (indicator, controler), pe când semnalele de tensiune în circuitele paralele pot varia de la un capăt la celălalt datorită pierderilor rezistive din lungul conductoarelor. Mai mult, instrumentele de măsură ale curentului posedă în general o impedanță mică de intrare, pe când instrumentele de măsură ale tensiunii au impedanțe mari de intrare; acest lucru înseamnă că cele de curent au o imunitate crescută față de zgomotul electric.

## AO pe post de sursă de curent



Pentru a putea folosi curentul ca și metodă de reprezentare a mărimilor fizice, trebuie să putem genera o cantitate precisă de curent în circuitul de semnal. Dar cum putem genera o cantitate precisă de curent dacă nu cunoaștem rezistența buclei de circuit.

Răspunsul constă în utilizarea unui amplificator cu scopul menținerii curentului prin circuit la o valoare prestabilită, aplicând o cădere de tensiune mai mică sau mai mare pentru îndeplinirea acestui obiectiv. Un astfel de amplificator se comportă precum o sursă de curent. Un AO cu reacție negativă este o soluție foarte bună pentru această problemă.

## Explicație

Se presupune că tensiunea de intrare a acestui circuit este generată de un circuit traductor/amplificator, calibrat pentru producerea valorii de 1 V pentru 0% din mărimea de măsurat și 5 V pentru 100% din valoarea mărimii de măsurat. Semnalul de curent analog standard este între 4 mA (0%) și 20 mA (100%). Pentru o tensiune de intrare de 5 V, rezistorul (de precizie) de 250 Ω va avea o cădere de tensiune de 5 V la bornele sale, rezultând un curent de 20 mA prin bucla circuitului (incluzând rezistorul de sarcină,  $R_{sarcina}$ ). Nu contează rezistența rezistorului  $R_{sarcina}$ , sau valoarea rezistenței adiționale prezentă în circuit datorită conductorilor, atâta timp cât AO are o sursă de putere suficient de mare pentru generarea celor 20 mA prin  $R_{sarcina}$ . Rezistorul de 250 Ω stabilește relația dintre tensiunea de intrare și curentul de ieșire, ducând în acest caz la echivalența 1-5 V intrare / 4-20 mA ieșire.

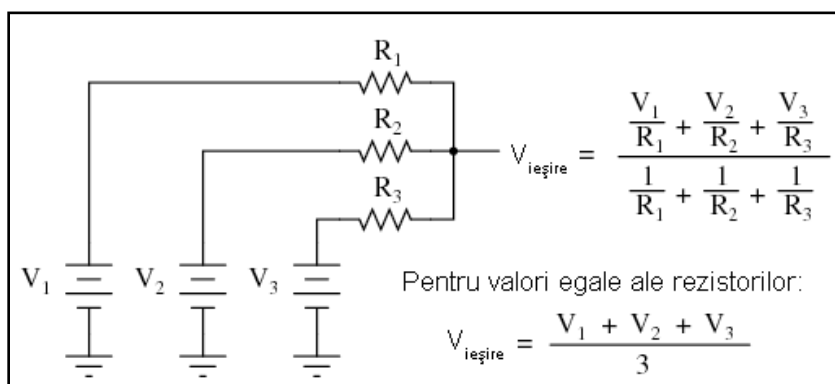
## Amplificator de transconductanță

Acest circuit mai este cunoscut și sub numele de amplificator de transconductanță. În electronică, transconductanța este raportul dintre variația curentului și variația tensiunii ( $\Delta I / \Delta V$ ), și se măsoară în Siemens, aceeași unitate de măsură pentru exprimarea conductanței, reciproca matematică a rezistenței. În acest circuit, valoarea raportului de transconductanță este fixată de către valoarea de ~~250~~ a rezistorului, asigurând o relație liniară curent-ieșire/tensiune-intrare.

## 06. Circuite sumatoare și de mediere

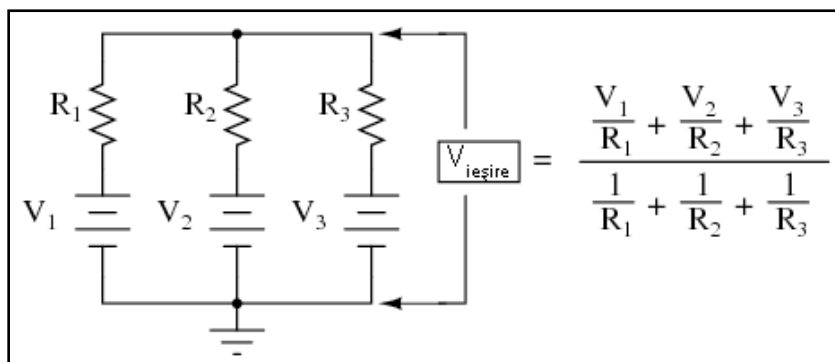
- Un circuit de mediere realizează media aritmetică a tensiunilor de intrare
- Un circuit sumator realizează suma algebrică a semnalelor de tensiune de la intrare

### Circuit de mediere



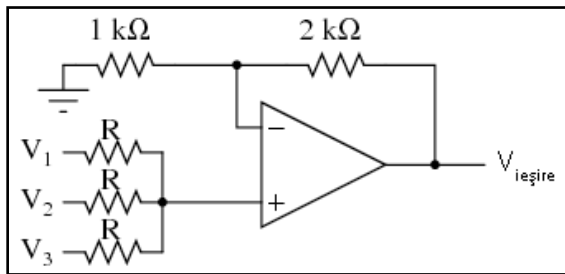
Dacă luăm trei rezistori egali și conectăm unul din capetele fiecăruia dintre ei la un punct comun și aplicăm apoi trei tensiuni de intrare, câte o tensiune pe fiecare din capetele libere ale rezistorilor, tensiunea văzută la punctul comun reprezintă media aritmetică a celor trei tensiuni de intrare.

### Teorema lui Millman



Acest circuit nu este altceva decât o aplicație practică a teoremei lui Millman.

### Circuit sumator ne-inversor

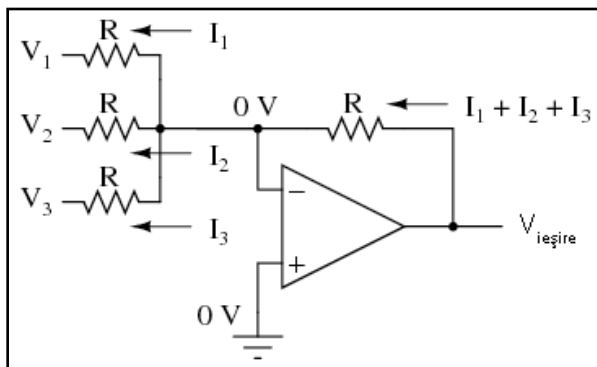


Dacă luăm un circuit de mediere pasiv și îl folosim la intrarea unui AO cu un factor de amplificare de 3, putem transforma această funcție de mediere într-o funcție de adunare. Rezultatul este un circuit sumator neinvertor.

$$V_{ieșire} = 3 \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} = V_1 + V_2 + V_3$$

Cu un divizor de tensiune a cărui raport este  $2k/1k\Omega$ , circuitul amplificator ne-invertor va avea o amplificare în tensiune de 3. Având ca și intrare media celor trei tensiuni  $((V_1 + V_2 + V_3) / 3)$ , prin circuitul de mediere pasiv, și înmulțind această medie cu 3, ajungem la o tensiune de ieșire egală cu *suma* celor trei tensiuni de intrare  $(V_1 + V_2 + V_3)$ .

### Circuit sumator inversor



Același lucru este realizabil și cu un AO inversor, folosind un circuit de mediere pasiv ca și componentă a circuitului de reacție negativă. Rezultatul este cunoscut sub numele de circuit sumator inversor.

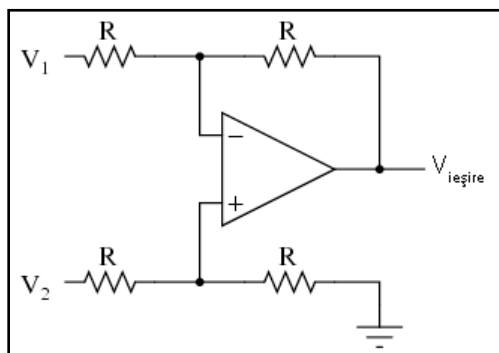
Acum, cu partea dreaptă a circuitului de mediere pasiv conectată la punctul de masă virtual al intrării inversoare, teorema lui Millman nu se mai poate aplica precum înainte. Tensiunea masei virtuale este menținută la valoarea de 0 V de către reacția negativă a AO, pe când înainte, această valoare putea să oscileze spre valoarea medie a celor trei tensiuni,  $V_1, V_2, V_3$ . Totuși, fiindcă valorile rezistorilor sunt egale între ele, curentul prin fiecare dintre cei trei va fi proporțional cu valoarea tensiunii de intrare a fiecărui rezistor. Din moment ce curentul la nodul comun va fi suma celor trei curenți, acest curent total prin rezistorul de reacție va produce o tensiune de ieșire egală cu suma celor trei tensiuni, cu polaritate inversă, de aici și denumirea de sumator inversor.

$$V_{ieșire} = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

## 07. Realizarea unui amplificator diferențial

Un amplificator fără reacție negativă este deja un amplificator diferențial, amplificând diferența de tensiune dintre cele două intrări. Totuși, factorul său de amplificare nu poate fi controlat și este de obicei prea mare pentru orice aplicație practică. Folosirea reacției negative în circuitele cu AO a dus la „pierderea” unei intrări, amplificatorul rezultat putând fi folosit doar pentru amplificarea unui singur semnal de intrare.

### Circuitul amplificatorului diferențial



Putem însă construi un circuit cu AO, menținând ambele intrări, dar cu un factor de amplificare controlat de elemente (rezistori) externe.

#### Amplificarea în tensiune unitară

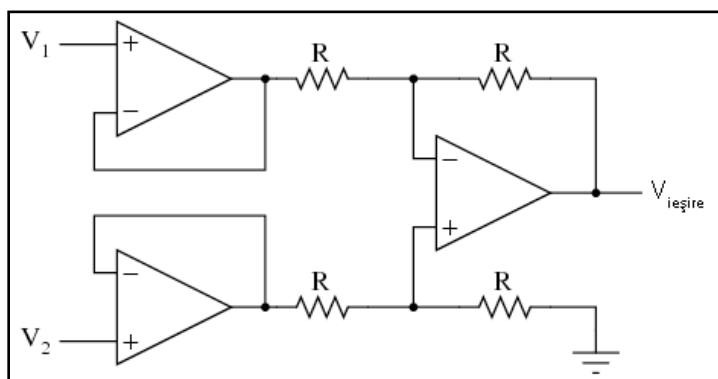
Dacă valorile tuturor rezistorilor sunt egale, acest amplificator va avea o amplificare diferențială a tensiunii de 1. Analiza acestui circuit este practic identică cu cea a unui amplificator inversor, cu diferența că tensiunea pe intrarea ne-inversoare (+) a AO este egală cu o fracțiune din  $V_2$ , și nu este conectată la masă cum era cazul amplificatorului inversor. Prin urmare,  $V_2$  reprezintă semnalul pe intrarea ne-inversoare, iar  $V_1$  reprezintă semnalul pe intrarea inversoare.

$$V_{iesire} = V_2 - V_1$$

#### Amplificarea în tensiune ne-unitară

Dacă dorim realizarea unei amplificări diferențiale de tensiune diferită de 1, va trebui să ajustăm valorile ambelor divizoare de tensiune. Acest lucru necesită multiple schimbări ale rezistorilor și echilibrarea celor doi divizori de tensiune pentru funcționarea simetrică a circuitului, ceea ce nu este foarte practic.

#### Cuplarea repetoarelor de tensiune la intrare



O altă limitare a acestui circuit este faptul că impedanțele sale de intrare sunt mici în comparație cu alte configurații cu AO, în special amplificatorul ne-inversor (cu o singură intrare). Fiecare sursă de tensiune de intrare trebuie să genereze curenți prin rezistori, ceea ce contribuie la o impedanță mult mai mică decât impedanța de intrare a unui AO „pur”. Soluția la această problemă, din fericire, este destul

de simplă. Tot ceea ce trebuie să facem este să trecem fiecare semnal de intrare printr-un repetor de tensiune.

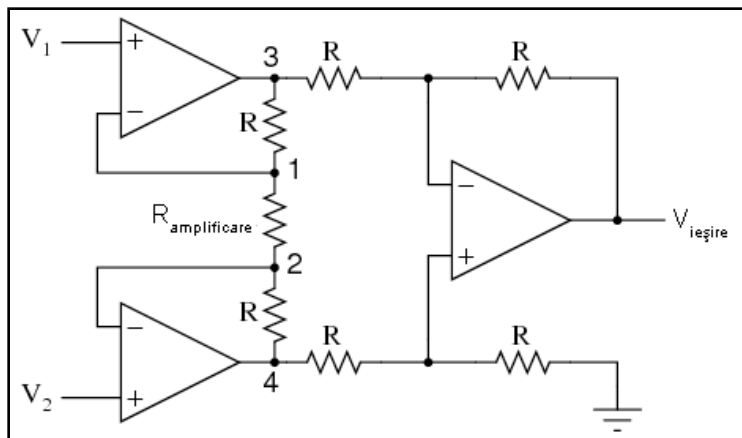
De data aceasta, semnalele de intrare  $V_1$  și  $V_2$  sunt conectate direct la intrările celor două AO repetitoare de tensiune, rezultând o impedanță foarte mare de intrare. Cele două AO din stânga sunt folosite pentru generarea curentului (prin intermediul unei surse de tensiune de c.c. exterioare) necesar prin rezistori în locul surselor de tensiune de la intrare.

## 08. Amplificatorul de instrumentație

### Scop

După cum am spus și în secțiunea precedentă, este de dorit modificarea factorului de amplificare al circuitului fără a schimba mai mult de un rezistor, așa cum era cazul exemplului precedent. Această posibilitatea se poate realiza cu ajutorul amplificatorului de instrumentație.

### Circuitul amplificatorului de instrumentație



Circuitul este construit din două amplificatoare diferențiale și trei rezistori ce conectează cele două amplificatoare împreună. Considerăm că toți rezistorii din circuit sunt egali, cu excepția rezistorului  $R_{amplificare}$ . Reacția negativă a AO din stânga sus duce tensiunea din punctul 1 (deasupra lui  $R_{amplificare}$ ) la o valoare egală cu  $V_1$ . Asemănător, tensiunea la punctul 2 (sub  $R_{amplificare}$ ) este menținută la o valoare egală cu  $V_2$ .

Căderea de tensiune la bornele lui  $R_{\text{amplificare}}$  va fi egală cu diferența de tensiune dintre  $V_1$  și  $V_2$ . Această cădere de tensiune duce la apariția unui curent prin  $R_{\text{amplificare}}$ , și din moment ce curentul prin buclele de reacție ale celor două amplificatoare este zero, curentul prin  $R_{\text{amplificare}}$  trebuie să fie egal cu valoarea curentului prin cele două rezistoare  $R$  din imediata sa vecinătate.

Căderea de tensiune între punctele 3 și 4 va fi prin urmare egală cu:

$$V_{3-4} = \frac{V_2 - V_1}{1 + \frac{2R}{R_{\text{amplificare}}}}$$

### Factorul de amplificare în tensiune

Amplificatorul diferențial din dreapta va amplifica această cădere de tensiune dintre punctele 3 și 4 cu un factor de 1 (presupunând că valorile tuturor rezistorilor  $R$  sunt egale).

Din formula de mai sus reiese și factorul de amplificare în tensiune al unui amplificator de instrumentație:

$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_{\text{amplificare}}}$$

Cea mai mică amplificare posibilă cu ajutorul configurației de mai sus este 1, atunci când  $R_{\text{amplificare}}$  este deschis (rezistența infinită).

### Avantaje

Deși modul de realizare al acestui AO pare greoi, avantajul constă în impedanțele de intrare extrem de mari pentru  $V_1$  și  $V_2$ , iar amplificarea se poate ajusta prin variația valorii unui singur rezistor.

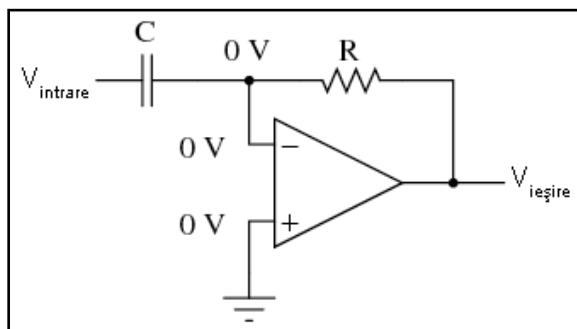
## 9. Circuite de derivare și integrare

- Un circuit derivator produce o tensiune constantă la ieșire pentru o tensiune variabilă la intrare
- Un circuit integrator produce o tensiune variabilă la ieșire pentru o tensiune de intrare constantă
- Ambele tipuri de dispozitive se construiesc ușor, folosind componente reactive (de obicei condensatoare și nu bobine) în bucla de reacție a circuitului amplificatorului operațional

## Scop și definiții

Prin introducerea reactanței în buclele de reacție ale amplificatoarelor operaționale, ieșirea acestora va depinde de variația tensiunii de intrare cu timpul. Folosind nomenclatura analizei matematice, integratorul produce o tensiune de ieșire proporțională cu produsul dintre tensiunea de intrare și timp; derivatorul produce o tensiune de ieșire proporțională cu variația tensiunii de intrare ( $dv / dt$ ).

## Circuit de derivare



Putem construi un circuit cu AO ce măsoară variația de tensiune prin determinarea curentului printr-un condensator; tensiunea de ieșire va fi proporțională cu valoarea acelui curent.

Partea dreaptă a condensatorului este menținută constantă la o tensiune de 0 V, datorită efectului „masei virtuale”. Prin urmare, curentul „prin” condensator se datorează doar variației tensiunii de intrare. O tensiune constantă nu va duce la apariția unui

curent prin condensator, ci doar o tensiune de intrare variabilă.

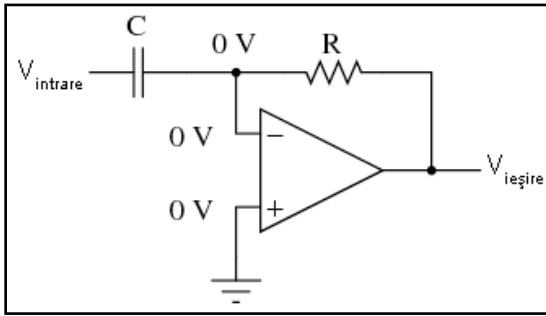
Curentul condensatorului va trece și prin rezistorul de reacție, producând o cădere de tensiune la bornele sale, tensiune ce este egală cu tensiunea de ieșire. O variație liniară și pozitivă a tensiunii de intrare va rezulta într-o tensiune negativă la ieșirea AO, și invers. Această inversare a polarității se datorează faptului că semnalul de intrare este trimis la intrarea inversoare a AO, iar acesta se comportă precum un amplificator inversor. Cu cât variația tensiunii de la intrare este mai mare (negativă sau pozitivă), cu atât tensiunea de la ieșire va fi mai mare. Formula pentru determinarea tensiunii de ieșire a derivatorului:

$$V_{ieșire} = -RC \frac{dv_{intrare}}{dt}$$

## Aplicații ale circuitelor de derivare

Pe lângă utilizarea acestor circuite ca și funcție matematică de derivare în calculatoarele numerice, acestea se folosesc ca și indicatoare de variație a mărimilor în instrumentație. O astfel de aplicație include monitorizarea (sau controlul) ratei de variație a temperaturii într-un furnal, unde o creștere sau scădere prea bruscă a temperaturii poate crea probleme. Tensiunea de c.c. produsă de circuitul integrator poate fi folosită pentru acționarea unui comparator, ce ar putea activa o alarmă sau ar putea controla rata de variație, dacă aceasta depășește o anumită valoare prestabilită.

## Circuit de integrare



În acest caz, AO va genera la ieșire o tensiune proporțională cu amplitudinea și durata de timp în care semnalul a deviat de la valoarea de 0 V. Altfel spus, un semnal de intrare constatat va genera o anumită variație a tensiunii de ieșire: inversul derivatorului. Pentru a realiza acest lucru, trebuie doar să inversăm locul rezistorului cu cel al condensatorului din circuitul precedent.

Ca și în cazul precedent, AO asigură faptul că intrarea inversoare va fi menținută la o tensiune de 0 V (masa virtuală). Dacă tensiunea de intrare este exact 0 V, nu va exista curent prin rezistor, condensatorul nu se va încărca, și prin urmare, tensiunea de ieșire nu se va modifica. Nu putem garanta valoarea tensiunii de la ieșire față de masă în această situație, dar putem afirma că aceasta va fi constantă.

Totuși, dacă aplicăm o tensiune constantă și pozitivă la intrare, tensiunea de ieșire va scădea spre negativ, într-un mod liniar, în încercarea de a produce o variația de tensiune pe condensator necesară menținerii curentului stabilit datorită diferenței de tensiune la bornele rezistorului. Invers, o tensiune constantă și negativă va duce la apariția unei variații de tensiune liniară și pozitivă la ieșire. Rata de variație a tensiunii de ieșire este proporțională cu valoarea tensiunii de intrare.

Formula de determinare a tensiunii de ieșire a integratorului este următoarea:

$$\frac{dv_{ieșire}}{dt} = -\frac{V_{intrare}}{RC} \text{ sau}$$
$$V_{ieșire} = \int_0^t -\frac{V_{intrare}}{RC} dt + c$$

unde,

$c$  = tensiunea de ieșire inițială ( $t = 0$ )

### Aplicații ale circuitelor de integrare

O aplicație a acestui circuit ar fi menținerea expunerii totale la radiație, sau dozajul, în cazul în care tensiunea de intrare ar fi conectată la un detector electronic de radiație. Un circuit integrator trebuie să ia în calcul atât intensitatea radiației (amplitudinea tensiunii de intrare) cât și timpul de expunere, generând o tensiune de ieșire ce reprezintă expunerea totală suferită.

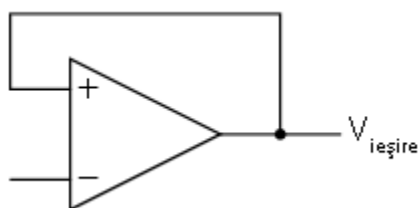


Circuitul de integrare poate fi folosit și pentru integrarea unui semnal ce reprezintă curgerea unui lichid, producând la ieșire un semnal ce reprezintă cantitatea totală de lichid ce a trecut printr-un anumit punct, într-o anumită perioadă de timp.

## 10. Reacția pozitivă

- Reacția pozitivă crează o condiție de histereză: tendința de „agățare” într-una dintre cele două situații extreme, saturație pozitivă sau saturație negativă

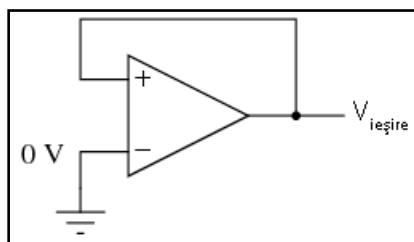
### Definiție



Spre deosebire de reacția negativă, ce conectează ieșirea amplificatorului la intrarea sa inversoare (-), reacția pozitivă introduce semnalul de ieșire al AO la intrarea sa ne-inversoare (+), astfel.

### Circuitul bistabil

Intrarea inversoare nu este conectată la bucla de reacție, prin urmare, se poate aplica o tensiune externă pe aceasta. Să vedem pentru început efectele conectării intrării inversoare la masă (0 V).



negativ.

În acest caz, tensiunea de ieșire va depinde de amplitudinea și de polaritatea tensiunii intrării ne-inversoare. Dacă această tensiune este pozitivă, ieșirea AO va fi și ea pozitivă, ducând la saturația pozitivă a amplificatorului ca urmare a reacției pozitive pe intrarea ne-inversoare. Pe de altă parte, dacă tensiunea intrării ne-inversoare pornește de la o valoare negativă, AO se va satura negativ.

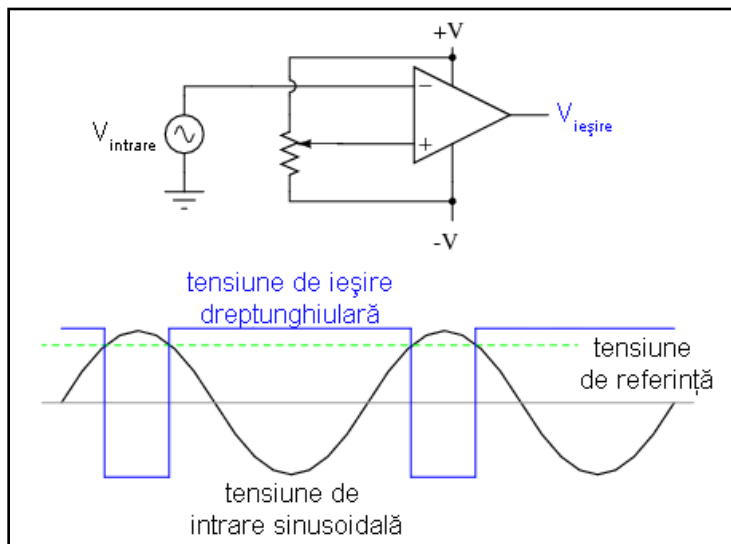
Ceea ce avem în cazul de față poartă numele de circuit bistabil, și anume stabil într-una dintre cele două stări (saturat pozitiv sau saturat negativ). După atingerea uneia dintre aceste stări, circuitul tinde să rămână în aceea stare, nemodificat. Pentru aducerea circuitului dintr-o stare în cealaltă, este necesară aplicarea unei tensiuni de aceeași polaritate pe intrarea inversoare (-), dar de o amplitudine mai mare. De exemplu, dacă circuitul este saturat pozitiv la +12 V, va fi necesară o tensiune pe intrarea inversoare de cel puțin +12 V pentru ca AO să intre în saturație negativă.

Prin urmare, un AO cu reacție pozitivă tinde să rămână în starea în care se află deja. Tehnic, acest lucru este cunoscut sub numele de histerezis.

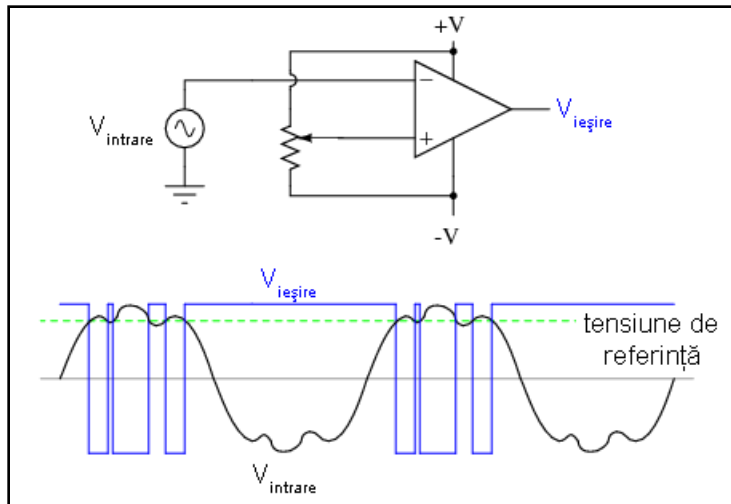
## Comparatorul cu histereză

După cum am mai văzut, comparatoarele pot fi utilizate pentru producerea unei unde dreptunghiulare folosind orice tip de undă periodică (sinusoidală, triunghiulară, dinte de fierăstrău, etc.) pe intrare.

### Comparatorul cu AO simplu



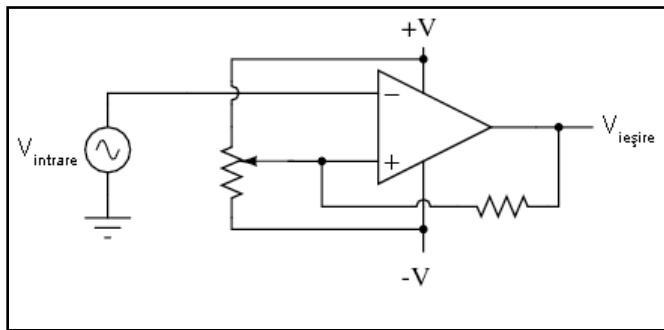
Dacă forma de undă în c.a. este pură, un comparator simplu este suficient pentru realizarea acestei transformări.



Pe de altă parte, dacă semnalul de intrare conține zgomot, ce cauzează creșterea sau descreșterea semnificativă a amplitudinii în decurs de o perioadă, ieșirea unui astfel de comparator poate varia neașteptat.

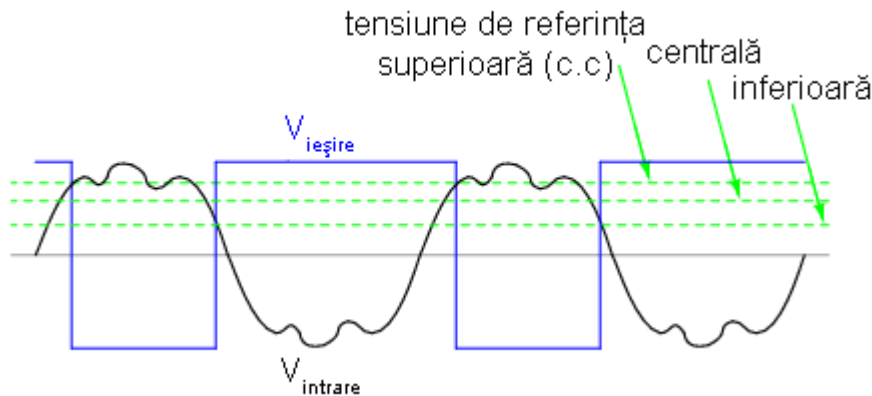
Ori de câte ori există o tranziție a semnalului de intrare prin semnalul de referință, indiferent cât de mică ar fi, ieșirea comparatorului își va modifica starea.

### Introducerea histerezei prin reacția pozitivă



Dacă adăugăm o mică reacție pozitivă circuitului comparator, vom introduce histereză în circuit. Această histereză va determina rămânerea circuitului în starea sa actuală, modificându-și starea doar dacă amplitudinea tensiunii de intrare în c.a. suferă o modificarea majoră.

Acest rezistor de reacție crează o referință duală pentru circuitul comparator. Tensiunea aplicată la intrarea ne-inversoare (+) ca și referință pentru comparația tensiunii de c.a, depinde de valoarea tensiunii de ieșire a AO. Când ieșirea AO este saturată pozitiv, tensiunea de referință pe intrarea ne-inversoare va fi mai pozitivă decât înainte. Invers, când ieșirea AO este saturată negativ, tensiunea de referință a intrării ne-inversoare va fi mai negativă decât înainte. Rezultatul poate fi transpus pe un grafic, astfel:



Când ieșirea AO este saturată pozitiv, tensiunea de referință va fi cea superioară; ieșirea nu va fi saturată pozitiv decât dacă intrarea de c.a. crește peste această referință superioară. Invers, când AO este saturat negativ, tensiunea de referință luată în considerare este cea inferioară; ieșirea nu va crește spre saturație pozitivă decât dacă intrarea de c.a. scade sub nivelul de referință inferior. Rezultatul este un semnal de ieșire dreptunghiular curat, în ciuda existenței unor distorsiuni mari ale semnalului de intrare de c.a. Pentru ca ieșirea comparatorului să sară de la o stare la alta (lucru nedorit), este nevoie ca diferența dintre amplitudinile semnalului de intrare să fie cel puțin la fel de mare precum diferența dintre tensiunile de referință superioară și inferioară.

## Circuite oscilatoare (circuite astabile)

Un oscilator este un dispozitiv ce produce o tensiune de ieșire alternativă sau pulsatorie. Tehnic, este cunoscut sub numele de dispozitiv *astabil*: nu posedă o ieșire stabilă.

