

## Capitolul 3

### 3. TRANZITORUL BIPOLAR CU JONCȚIUNI

Tranzistoarele reprezintă cea mai importantă clasă de dispozitive electronice, deoarece au proprietatea de a amplifica semnalele electrice. În funcționarea tranzistorului bipolar cu joncțiuni (TBJ) intervin ambele tipuri de purtători de sarcină electrică din semiconductoare (electroni și goluri), ceea ce justifică denumirea de *bipolar*.

#### 3.1. Principiul de funcționare al tranzistorului bipolar cu joncțiuni

Un tranzistor este construit din trei regiuni semiconductoare de conductibilitate diferită, dispuse alternant, realizate pe același monocristal, în succesiunea *pn* (fig. 3.1a) sau *npn* (fig. 3.1b). Semiconductoarele vecine constituie două joncțiuni *pn*. Fiecărei regiuni semiconductoare *i* se asociază câte o bornă pentru legăturile tranzistorului cu exteriorul. Bornele poartă numele *emitor* (*E*), *bază* (*B*) și *colector* (*C*).

În figura 3.1 se arată și simbolurile tranzistoarelor *pn* sau *npn* folosite în schemele electronice și curenții prin tranzistor cu precizarea sensurilor în care circulă:

- $I_E$  – curentul prin emitor;
- $I_B$  – curentul prin bază;
- $I_C$  – curentul prin colector.

În prezent tranzistorul *npn* este folosit uzual, în timp ce tranzistorul *pn* este folosit din ce în ce mai rar.

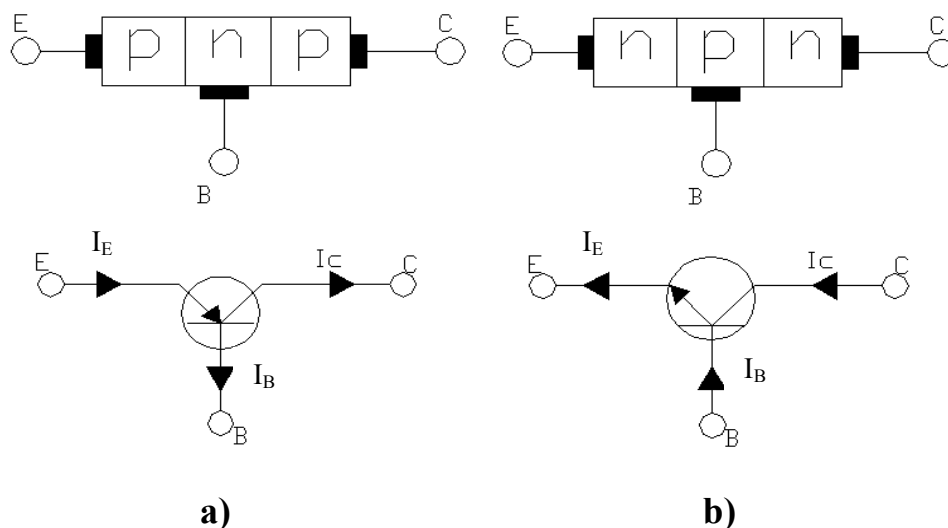


Fig. 3.1.

În structura unui tranzistor apar două joncțiuni:

1. joncțiunea dintre emitor și bază (*joncțiunea emitor-bază*);
2. joncțiunea dintre colector și bază (*joncțiunea colector-bază*).

Tranzistorul funcționează în regim normal, adică în regim de amplificator, dacă joncțiunea emitor-bază este polarizată direct, iar joncțiunea colector-bază este polarizată invers. În figura 3.2 se arată polarizarea corectă a tranzistoarelor *pnp* și *npn* astfel încât să poată funcționa în regim normal. Tot în această figură se pot vedea și notațiile curenților și tensiunilor la un tranzistor.

Pentru a îndeplini rolul de tranzistor o structură *pnp* sau *npn* trebuie să respecte două condiții:

1. concentrația de impurități din emitor trebuie să fie mult mai mare decât concentrația de impurități din bază;
2. distanța dintre cele două joncțiuni emitor-bază și bază-colector (grosimea bazei tranzistorului) trebuie să fie suficient de mică pentru a evita recombinarea purtătorilor mobili de sarcină care traversează baza.

Tranzistorul reprezintă cel mai important dispozitiv electronic deoarece poate amplifica semnalele electrice. Amplificarea este posibilă datorită *efectului de tranzistor*, adică *comanda unui curent de valoare apreciabilă, dintr-o*

joncțiune polarizată invers, de către un curent de valoare mică dintr-o joncțiune polarizată direct.

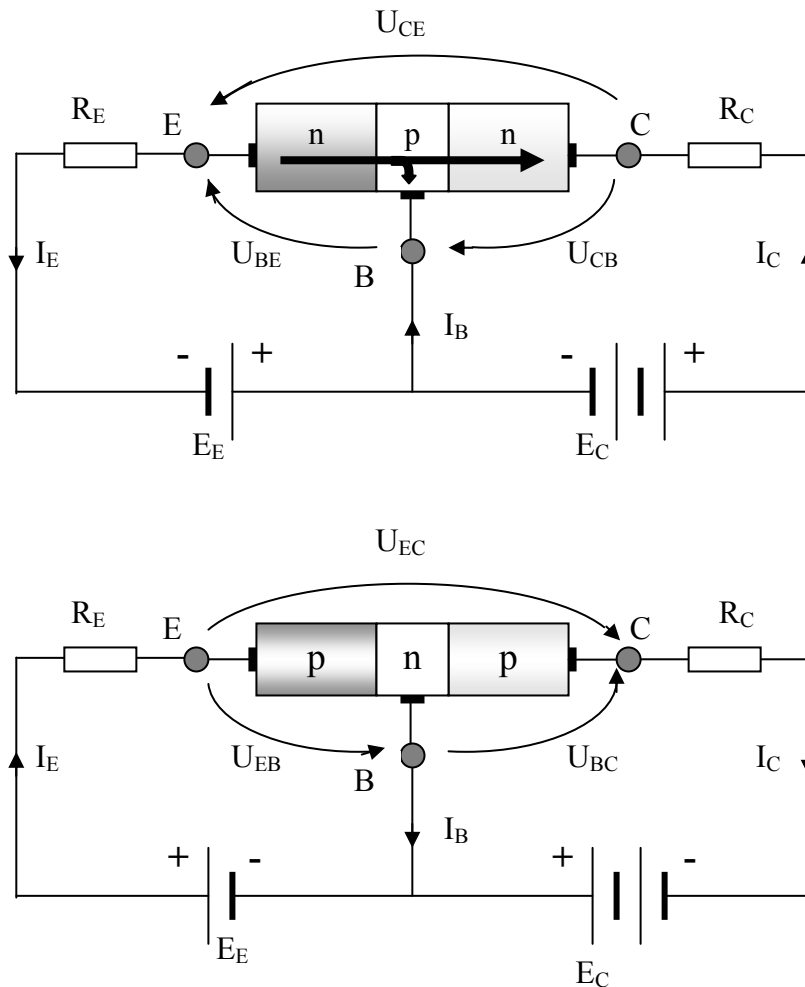


Fig. 3.2.

Un tranzistor poate fi privit ca un nod electric în care curenții din circuitul exterior, conform legii întâi a lui Kirchoff, sunt legați prin relația:

$$I_E = I_C + I_B \quad (3.1)$$

Constatăm că tranzistorul, de tip *nnp* sau *pnp*, este constituit din două joncțiuni *pn* și deci, pentru a se putea explica *efectul de tranzistor*, se poate considera ca fiind format din două diode. Pentru funcționarea în regim normal a

tranzistorului (amplificare), cele două diode trebuie să fie polarizate astfel încât *dioda bază-emitor să fie în conducție și dioda bază-colector să fie blocată*.

Considerăm cazul tranzistorului de tip *npn* care este cel mai răspândit (fig. 3.2). Dioda bază-emitor fiind în conducție, un flux de electroni (săgeata groasă) ar trebui să traverseze emitorul și să se dirijeze către bază. Dar, deoarece baza tranzistorului s-a realizat mult mai puțin dopată cu impurități decât emitorul și grosimea bazei tranzistorului este foarte mică, atunci cea mai mare parte a electronilor porniți din emitor vor continua să se deplaseze către colector, fiind atrași de potențialul pozitiv al acestuia și ajutați de asemenea de câmpul electric din joncțiunea bază-colector. Numai o mică parte ( $\approx 1\%$ ) din electronii veniți dinspre emitor vor găsi în bază goluri pentru a se recombina și deci vor forma un curent de electroni către baza tranzistorului (săgeata subțire din figura 3.2).

Iată deci proveniența denumirilor de emitor și de colector la tranzistorul bipolar cu joncțiuni: emitorul lansează un flux de electroni care este colectat de către colector.

Conform celor prezentate, între curentul de colector  $I_C$  și curentul de bază  $I_B$  rezultă relația

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (3.2)$$

în care  $\beta$  se numește *factorul de amplificare în curent* al tranzistorului. Valorile lui  $\beta$  sunt cuprinse uzual între 50 și 500 și depind de tipul tranzistorului.

Regiunea emitorului este mai mult dopată cu impurități decât regiunea colectorului, deci tranzistorul nu este construit simetric. Dacă s-ar permuta emitorul și colectorul s-ar obține atunci un factor de amplificare în curent  $\beta$  mai mic.

Folosind relația 3.2 înlocuim pe  $I_C$  în expresia (3.1) a lui  $I_E$ , ținem seama de valorile lui  $\beta$  și obținem:

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B \approx I_C \quad (3.3)$$

Pentru tranzistorul de tip *pnp*, tensiunile de polarizare sunt inversate (fig. 3.3), dar principiul de funcționare rămâne același. Colectorul va colecta un curent de goluri (sarcini pozitive).

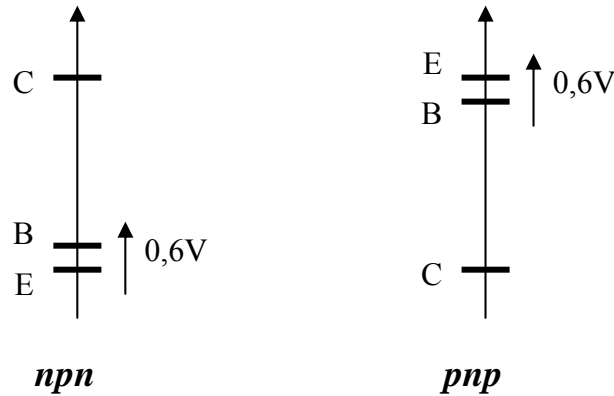


Fig. 3.3.

În literatura de specialitate [? DCE, Dănilă] se demonstrează expresiile curenților printr-un tranzistor în regim staționar care sunt cunoscute sub numele de *ecuațiile Ebers-Moll*. Acestea permit determinarea valorilor curenților dintr-un tranzistor în funcție de tensiunile aplicate joncțiunilor și în funcție de parametrii de catalog ai tranzistoarelor.

### 3.2. Analogie mecano-hidraulică pentru tranzistor

Tranzistorul opune o rezistență electrică trecerii curentului de la colector spre emitor cu atât mai mică cu cât valoarea curentului de bază  $I_B$ , sau tensiunea bază-emitor  $U_{BE}$ , este mai mare. Variațiile tensiunii  $U_{BE}$  dau naștere la variații ale curentului  $I_B$  (variații în circuitul de comandă al tranzistorului), care, la rândul lor produc variații importante ale curentului  $I_C$  de colector al tranzistorului (variații în circuitul comandat al tranzistorului).

În figura 3.4 se prezintă o analogie pentru a se putea înțelege mai ușor funcționarea tranzistorului, în care se folosește o conductă verticală prin care

curge un fluid de sus în jos și debitul fluidului este reglat cu ajutorul unui robinet. Robinetul joacă rolul tranzistorului.

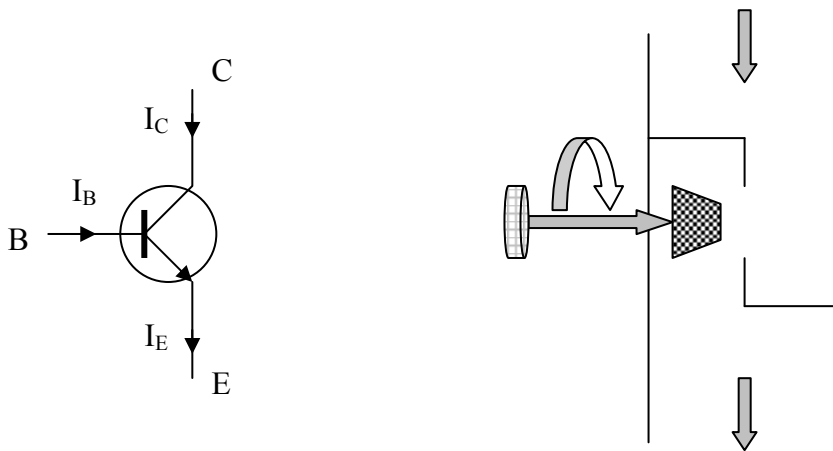


Fig. 3.4.

Prin rotirea robinetului acesta se poate deschide mai mult sau mai puțin. Cu cât deschiderea este mai mare cu atât fluidul va curge mai ușor dinspre partea superioară a conductei (unde presiunea este mai mare) către partea inferioară a conductei (unde presiunea este mai mică). Presiunea de sus, mai mare, corespunde potențialului mai ridicat al colectorului tranzistorului, iar presiunea de jos, mai mică, corespunde potențialului mai scăzut la care se află emitorul tranzistorului.

Robinetul este astfel construit încât, rotirea lui cu un unghi mic și cu energie redusă, asigură o modificare importantă a debitului prin conductă.

Dincolo de o anumită limită a deschiderii robinetului, debitul prin conductă nu se mai modifică (saturație). Tot așa și la tranzistor, peste o anumită valoare a curentului de bază  $I_B$  sau a tensiunii bază-emitor  $U_{BE}$ , curentul de colector  $I_C$  nu mai crește (saturație).

### 3.3. Conexiuni fundamentale ale tranzistorului bipolar cu joncțiuni

Dacă se desenează tranzistorul ca un cvadripol se pot evidenția conexiunile fundamentale din figura 3.5, în funcție de terminalul tranzistorului care este comun intrării și ieșirii (este legat la masă).

Cele trei conexiuni fundamentale ale tranzistorului sunt *bază comună (BC)*, *emitor comun (EC)* și *colector comun (CC)*.

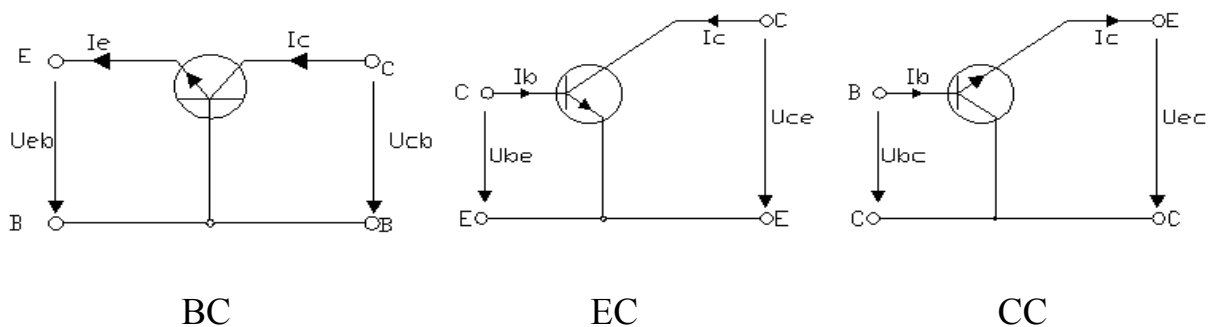


Fig. 3.5.

În cataloagele de tranzistoare se dau caracteristicile statice în conexiunea emitor comun (EC) care se consideră a fi reprezentativă.

### 3.4. Caracteristici statice ale tranzistorului bipolar cu joncțiuni

Caracteristicile statice sunt reprezentări grafice ale unor relații de dependență stabilite între trei mărimi ce caracterizează tranzistorul în regim staționar: o mărime se reprezintă pe ordonată, alta pe abscisă și a treia mărime este un parametru pentru ale cărui valori se obține o familie de caracteristici statice.

Se reprezintă tranzistorul ca un cvadripol (fig. 3.6), se consideră tranzistorul în conexiunea fundamentală emitor comun (EC), deci terminalul comun (emitorul) aparține atât circuitului de intrare, cât și circuitului de ieșire. Sensurile curenților de intrare  $I_1$  ( $I_B$ ) și de ieșire  $I_2$  ( $I_C$ ) sunt reprezentate convențional ca intrând în cvadripol. Tensiunile de intrare  $U_1$  ( $U_{BE}$ ) și de ieșire  $U_2$  ( $U_{CE}$ ) au polaritatea aleasă cu minusul spre emitorul comun.

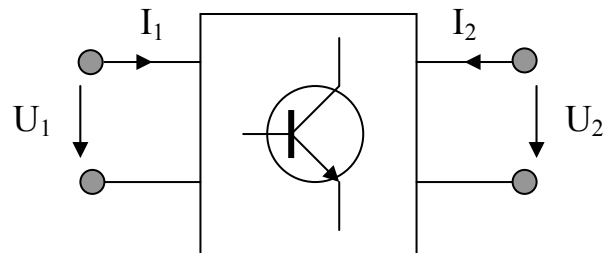


Fig. 3.6.

Starea electrică a unui tranzistor bipolar este definită de cele patru mărimi electrice care apar în figura 3.6 ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ) și în practica proiectării circuitelor electronice comportarea unui tranzistor se poate stabili cu ajutorul caracteristicilor statice.

Se pot trasa trei tipuri de familii de caracteristici statice pentru un tranzistor:

- 1) Caracteristici statice de intrare

$$I_1 = f_1(U_1) \Big|_{U_2 = ct} \quad (3.4)$$

- 2) Caracteristici statice de ieșire

$$I_2 = f_2(U_2) \Big|_{I_1 = ct} \text{ sau } I_2 = f_3(U_2) \Big|_{U_1 = ct} \quad (3.5)$$

- 3) Caracteristici statice de transfer

$$I_2 = f_4(I_1) \Big|_{U_2 = ct} \text{ sau } I_2 = f_5(U_1) \Big|_{U_2 = ct} \quad (3.6)$$



În continuare se vor descrie caracteristicile statice de intrare și de ieșire ale unui tranzistor *npn* (fig. 3.7) în conexiunea emitor comun (EC).

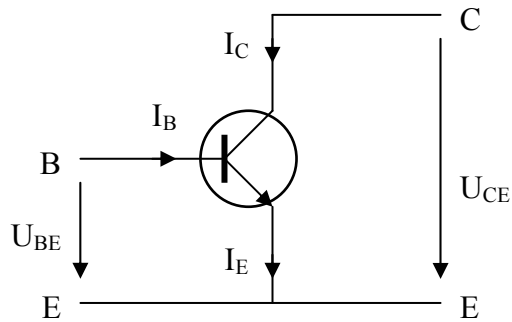


Fig. 3.7.

- Caracteristici statice de intrare  $I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE} = ct}$

Caracteristica este de tip diodă (fig. 3.8 a), curentul  $I_B$  prezintă o variație exponențială în raport cu tensiunea  $U_{BE}$ , iar influența tensiunii  $U_{CE}$  este relativ redusă.

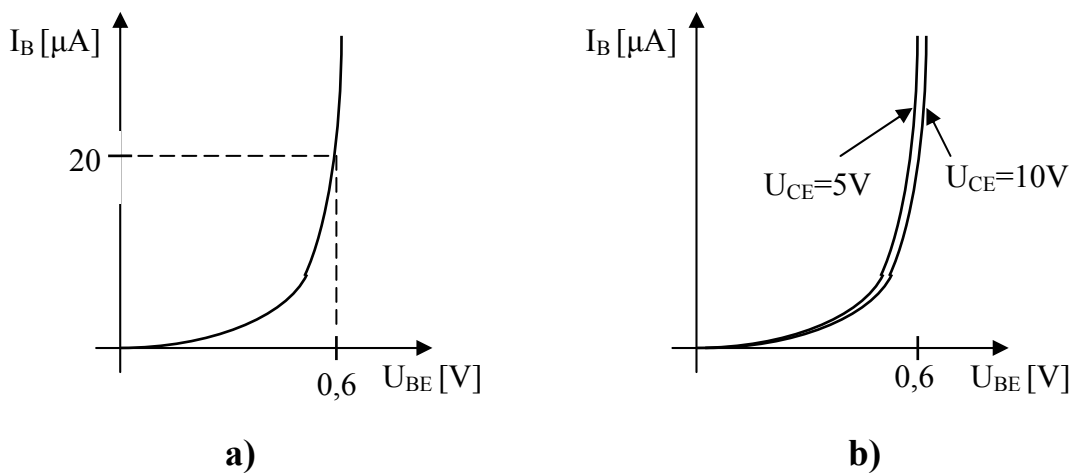


Fig. 3.8.

Spre exemplu, se fixează  $U_{CE} = 5V$ ; curba  $I_B = f(U_{BE})$  este chiar caracteristica statică a diodei cu particularitatea că intensitatea curentului prin diodă (inițial  $I_E$ ) va fi divizată printr-un factor de valoare constantă, aproximativ

egal cu factorul de amplificare în curent  $\beta$ . Intensitatea curentului  $I_B$  atinge valori notabile numai după ce tensiunea  $U_{BE}$  a atins pragul de 0,6V.

Dacă acum tensiunea  $U_{CE}$  se va fixa la o valoare superioară,  $U_{CE} = 10V$  spre exemplu, se va constata prin măsurări experimentale că forma și poziția caracteristicii rămâne aproape neschimbată (fig. 3.8 b); caracteristica statică de intrare se va deplasa cu câțiva milivolți. Acest rezultat verifică faptul că tranzistorul este un element de circuit unidirecțional, adică o variație a mărimii de ieșire nu influențează sensibil intrarea.

- *Caracteristici statice de ieșire*  $I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = ct}$

Familia caracteristicilor statice de ieșire (fig. 3.9) este mult folosită în analiza și în sinteza circuitelor electronice cu tranzistoare bipolare. Explicația ce urmează pentru obținerea caracteristicilor statice de ieșire se bazează pe principiul de funcționare al tranzistorului, prezentat în paragraful 3.1.

Dacă  $U_{CE} = 0V$  atunci colectorul tranzistorului nu se află la un potențial mai pozitiv decât emitorul și colectorul nu va atrage electronii proveniți din emitor ( $I_C = 0$ ). Pentru valori ale tensiunii  $U_{CE} \geq 1V$ , colectorul aflat la potențial pozitiv va atrage toți electronii din emitor și curentul de colector atinge un palier la valoarea  $I_C = \beta \cdot I_B$  (vezi relația 3.2). Atunci când valoarea tensiunii  $U_{CE}$  crește pornind de la zero, curentul  $I_C$  crește urmând porțiunea din caracteristica statică de ieșire denumită „curba de saturație”. Urmează apoi atingerea palierului fixat cu ajutorul valorii curentului  $I_B$ .

Dacă se trasează curbele  $I_C = f(U_{CE})$ , fiecare curbă pentru altă valoare a curentului de bază menținut constant pe durata trasării curbei respective, se va obține o familie de caracteristici statice de ieșire așa cum se poate vedea în figura 3.9.

Modul de explicație referitor la obținerea caracteristicii statice de ieșire, este puțin simplist și de aceea se impun următoarele precizări:

- Palierele nu sunt orizontale, ele prezintă o anumită pantă care crește cu valoarea lui  $I_B$  (efectul Early) [?-DCE Dănilă, ?-El. Vasilescu];

- $U_{CE}$  nu trebuie să depășească o anumită valoare peste care joncțiunea bază-colector a tranzistorului se poate străpunge;

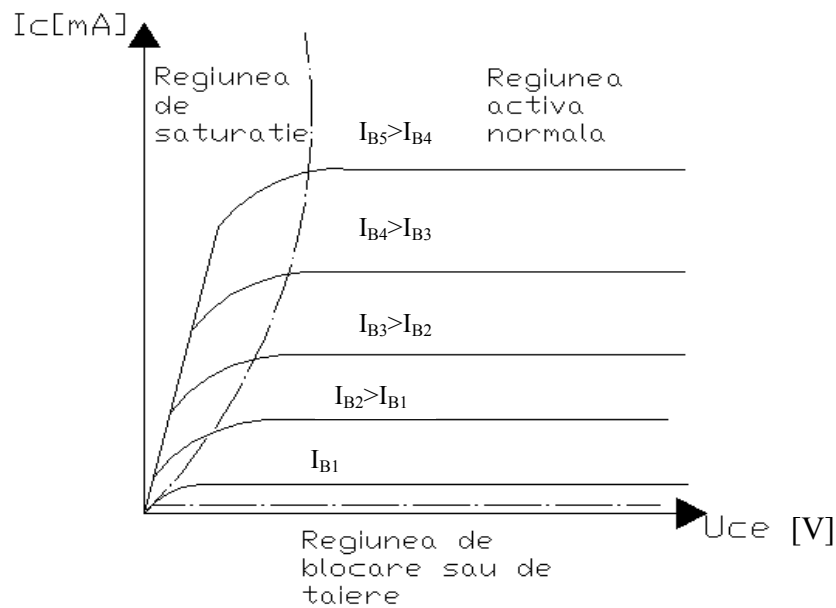


Fig. 3.9.

- Chiar în absența curentului de bază ( $I_B = 0$ ), între colector și emitor există un curent de scurgere  $I_{C0}$  de valoare mică, de unde rezultă relația

$$I_C = \beta I_B + I_{C0} \quad (3.7)$$

mai riguroasă și care poate înlocui relația (3.2).

- Caracteristicile statice de ieșire depind de temperatură astfel: curentul de scurgeri  $I_{C0}$  se dublează pentru fiecare creștere a temperaturii cu 7K și pentru un anumit curent de bază  $I_B$ , tensiunea  $U_{BE}$  se diminuează cu 2 mV pentru fiecare creștere a temperaturii cu 1K.

### 3.5. Circuite de polarizare și stabilizare a punctului static de funcționare în curent continuu

Circuitele de polarizare sunt circuitele cu ajutorul cărora se aplică tranzistorului tensiuni directe pe joncțiunea emitor-bază și tensiuni inverse pe joncțiunea colector-bază (vezi fig. 3.2). Punctul static de funcționare al tranzistorului va trebui să se găsească pe caracteristicile statice de ieșire, în zona în care acestea se pot aproxima cu drepte. Aici tranzistorul funcționează aproximativ liniar.

Un circuit de polarizare este format din una sau două surse de tensiune continuă ideale și din rezistoare. Un circuit de polarizare impune tranzistorului o stare electrică descrisă prin setul de valori ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $U_{BE}$ ,  $U_{CE}$ ), care constituie coordonatele punctului static de funcționare.

Deoarece curentul de colector  $I_C$  al tranzistorului bipolar cu joncțiuni tinde să crească odată cu creșterea temperaturii, problema stabilizării punctului static de funcționare în raport cu temperatura este una din problemele critice care apar la aceste dispozitive semiconductoare. Prin variația temperaturii se înțelege variația temperaturii joncțiunilor tranzistorului.

Stabilizarea punctului static de funcționare al unui tranzistor se poate asigura prin metode liniare și prin metode neliniare. *Metodele liniare* de stabilizare constau în introducerea în circuitul de polarizare a unor rezistențe (elemente liniare) de valoare adecvată. *Metodele neliniare* constau în introducerea în circuitul de polarizare a unor elemente neliniare (diodă, termistor, diodă Zener), astfel încât prin variația cu temperatura a unui parametru caracteristic elementului neliniar să se compenseze tendința de variație a curentului de colector.

La abordarea circuitelor de polarizare se parcurg următoarele etape:

- se desenează circuitul;
- se notează tensiunile la bornele tranzistorului și curenții prin rezistoarele circuitului;
- se scriu teoremele I și II ale lui Kirchhoff;
- se face calculul cerut.

În felul acesta se obține un sistem de ecuații care reprezintă modelul matematic al circuitului în curent continuu.

La circuitele de polarizare în curent continuu se întâlnesc două tipuri de probleme:

1. Probleme tip *analiză* la care se dau rezistențele din circuit, parametrii tranzistorului, tensiunea sursei de alimentare și se cere punctul static de funcționare, adică  $I_C$ ,  $U_{CE}$ ,  $U_{BE}$ ;

2. Probleme tip *proiectare* în care se dau punctul static de funcționare, tipul tranzistorului, tensiunea sursei de alimentare și se cer valorile rezistențelor de polarizare.

### 3.5.1. Circuit de polarizare cu rezistență serie în bază (circuit de polarizare fixă)

Circuitul de polarizare cu rezistență serie în bază (fig. 3.10) este cel mai simplu și mai economic circuit de polarizare a tranzistoarelor, dar care nu asigură stabilizarea punctului static de funcționare la variația temperaturii joncțiunilor.

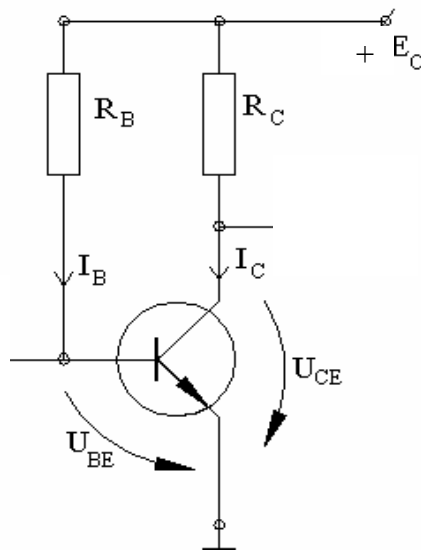


Fig. 3.10.

Valorile posibile ale curentului de bază  $I_B$  sunt date de caracteristica statică de intrare (fig. 3.11) a tranzistorului utilizat. Rezistența  $R_B$  din baza tranzistorului fixează valoarea curentului de bază  $I_B$  ca urmare a folosirii relației (3.8) scrisă cu ajutorul teoremei a II-a a lui Kirchhoff

$$E_C = R_B \cdot I_B + U_{BE} . \quad (3.8)$$

Vom considera că tranzistorul se află într-un punct static de funcționare  $Q$  caracterizat prin valorile  $I_{BQ}$  și  $U_{BEQ}$ . Aceste valori se pot obține grafic prin intersecția caracteristicii statice de intrare a tranzistorului cu dreapta dată prin ecuația (3.8). Considerăm  $U_{BEQ} = 0,6V$  în (3.8) și obținem

$$I_{BQ} = \frac{E_C - 0,6V}{R_B} \cong \frac{E_C}{R_B} . \quad (3.9)$$

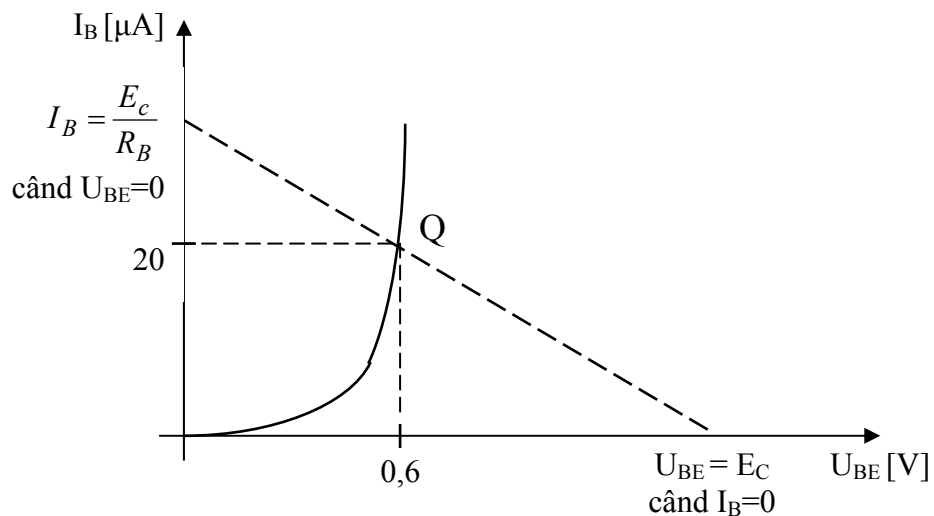


Fig. 3.11.

Curentul și tensiunea din circuitul de ieșire,  $I_{CQ}$  și  $U_{CEQ}$ , se obțin pornind de la caracteristica statică de ieșire a tranzistorului (fig. 3.12) și de la relația (3.10) scrisă cu ajutorul teoremei a II-a a lui Kirchhoff

$$E_c = R_C \cdot I_C + U_{CE} . \quad (3.10)$$

Această relație se reprezintă grafic printr-o dreaptă, denumită „dreapta de sarcină”, ca în figura 3.12. Punctul static de funcționare  $Q$  se află la intersecția acestei drepte cu caracteristica statică de ieșire corespunzătoare lui  $I_{BQ}$ . Vom putea scrie relațiile

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} \quad U_{CEQ} = E_C - R_C \cdot I_{CQ} \quad (3.11)$$

Prin simpla variație a valorii rezistenței din bază  $R_B$  se modifică curentul din bază și se poate deplasa punctul static de funcționare  $Q$  între cele două extreme care corespund blocării și saturării tranzistorului. Saturarea se produce imediat ce curentul de bază atinge valoarea  $I_{Bsat}$ , utilizând o rezistență în bază de valoarea  $R_B = \frac{E_C}{I_{Bsat}}$ . Curentul din colector va fi  $I_{Csat} \cong \frac{E_C}{R_C} = \beta \cdot I_{Bsat}$ .

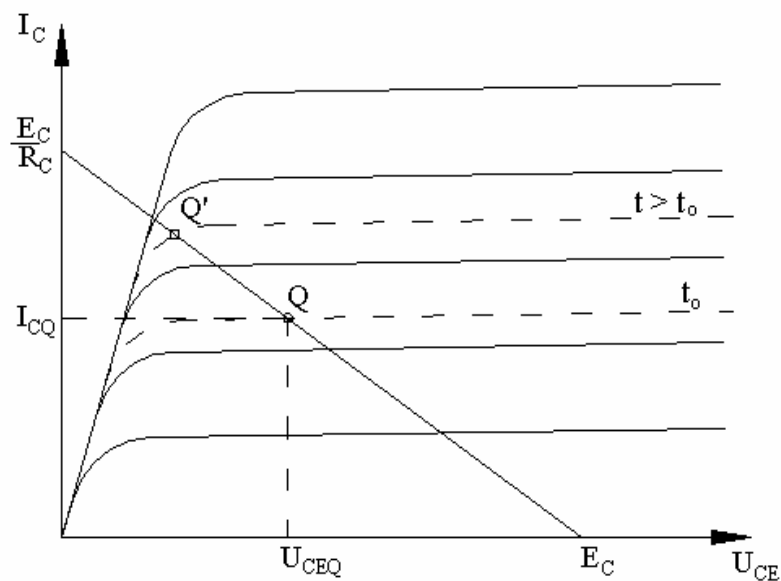


Fig. 3.12.

Saturația tranzistorului va avea loc dacă rezistențele din bază și colector satisfac inegalitatea

$$R_B < \beta \cdot R_C \quad (3.12)$$

Atunci  $U_{CE}$  este foarte mică (câteva zecimi de volt) și se poate aproxima  $U_{CE} = 0$ .

Din (3.9) reiese că această schemă lucrează cu o valoare constantă a curentului de bază, independent de condițiile de funcționare. Ea prezintă o variație mare a valorii curentului de colector cu temperatura și este utilă numai în cazul etajelor de amplificare care lucrează la temperaturi constante, apropiate de temperatura ambiantă.

### 3.5.2. Circuit de polarizare colector-bază

Insensibilizarea punctului static cu condițiile de funcționare se poate asigura cel mai simplu polarizând baza printr-o rezistență conectată între colector și bază, ca în figura 3.13.

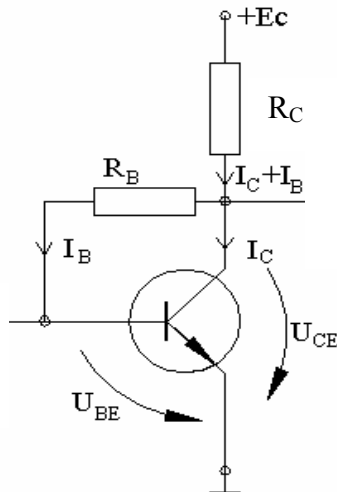


Fig. 3.13.

Pentru acest circuit se pot scrie ecuațiile următoare:

$$E_C = R_C(I_C + I_B) + U_{CE} \quad (3.13)$$

$$E_C = R_C(I_C + I_B) + R_B I_B + U_{BE} \quad (3.14)$$

$$U_{CE} = R_B I_B + U_{BE} \quad (3.15)$$

$$I_C \cong \beta \cdot I_B \quad (3.16)$$



Din ecuația (3.15) se obține pentru curentul de bază expresia

$$I_B = \frac{U_{CE} - U_{BE}}{R_B}. \quad (3.17)$$

Considerăm că are loc o creștere a temperaturii joncțiunilor tranzistorului și astfel va crește valoarea curentului de colector  $I_C$ . Va crește căderea de tensiune pe rezistența  $R_C$  și va scădea  $U_{CE}$ , deoarece suma celor două tensiuni este egală cu tensiunea sursei de alimentare  $E_C = \text{ct.}$  (sursă cu tensiune stabilizată). Conform relației (3.17) curentul de bază  $I_B$  scade și conform relației (3.16) scade și curentul de colector  $I_C$ .

Circuitul asigură o stabilizare a punctului static de funcționare cu temperatura prin efectul reacției negative materializate de rezistența  $R_B$  care leagă circuitul de ieșire cu cel de intrare. Rezistența  $R_B$  realizează o reacție negativă după tensiunea de la ieșire.

### 3.5.3. Circuit de polarizare cu rezistență în emitor și divizor în bază

Introducerea unei rezistențe în emitorul tranzistorului are un efect favorabil de stabilizare a punctului static de funcționare cu temperatura, cu atât mai pronunțat cu cât valoarea rezistenței este mai ridicată. Divizorul de tensiune format din rezistențele  $R_1$  și  $R_2$  are rolul de a stabili potențialul la care se va afla baza tranzistorului (fig. 3.14).

Pentru a stabili condițiile de proiectare a circuitului de polarizare este necesar să se calculeze expresia curentului de colector, după ce în prealabil schema din figură cu polarizare de la o singură sursă se reprezintă printr-o schemă echivalentă cu două surse, prin aplicarea teoremei lui Thèvenin. Tratatrea matematică a acestor aspecte poate fi studiată în [? DCE, Dănilă].

Circuitul asigură stabilizarea punctului static de funcționare cu temperatura astfel:

- ✓ presupunem că are loc o creștere a temperaturii joncțiunilor tranzistorului și astfel  $I_C$  crește;

- ✓ va crește și  $I_E$  ținând seama de relația  $I_E = I_B + I_C$ ;
- ✓ căderea de tensiune  $R_E I_E$  crește și astfel va scădea  $U_{BE}$ ;
- ✓ curentul  $I_B$  scade corespunzător și deoarece  $I_C \cong \beta \cdot I_B$  va scădea și  $I_C$ .

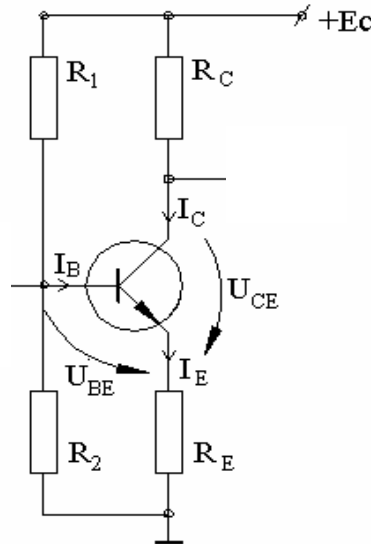


Fig. 3.14.

S-a pornit de la tendința de creștere a curentului  $I_C$  prin tranzistor datorată creșterii temperaturii și s-a ajuns la tendința de scădere a curentului  $I_C$  datorată modului cum este realizat circuitul electronic. Este și aici tot efectul unei reacții negative îndeplinite de rezistorul  $R_E$ , care face legătura între circuitul de intrare și cel de ieșire.

### 3.6. Modelul cu parametri hibridi al tranzistorului

Se consideră un tranzistor *pnp* în conexiune bază comună echivalat cu un cuadripol ca în figura 3.15.

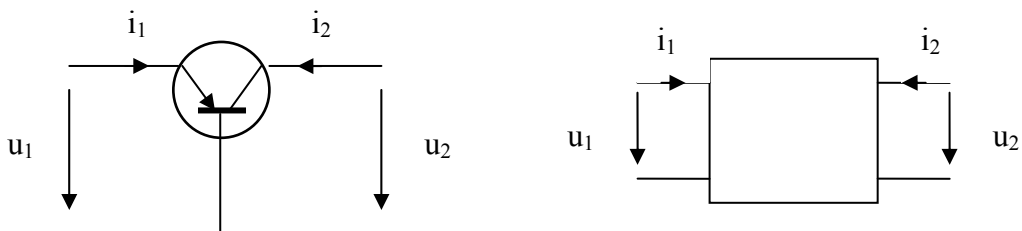


Fig. 3.15.

Se poate descrie cuadripolul cu ajutorul ecuațiilor (3.18) cu parametri hibridi (sau parametri „h”). Denumirea de parametri hibridi provine de la faptul că parametrii nu au aceeași dimensiune.

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Prin transpunerea acestor ecuații se obține modelul cu parametrii hibridi din figura 3.16.

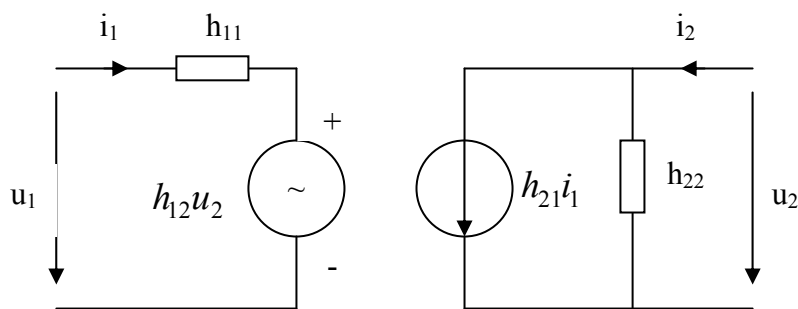


Fig. 3.16.

Parametrii hibridi se definesc conform relațiilor următoare:

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad (3.19)$$

și au următoarele semnificații:

$h_{11}$  – impedanța de intrare, ieșirea fiind în scurtcircuit;

$h_{12}$  – raportul dintre tensiunea de intrare și tensiunea de ieșire (coeficientul de transfer invers), cu intrarea în gol;

$h_{21}$  – amplificarea în curent (coeficientul de transfer al curentului) cu ieșirea în scurtcircuit;

$h_{22}$  – admitanța de ieșire, intrarea fiind în gol.