

Tranzistoare bipolare cu joncțiuni

1. Noțiuni introductive

Tranzistorul bipolar cu joncțiuni, pe scurt, tranzistorul bipolar, este un dispozitiv semiconductor cu **trei terminale**, furnizat de către producători sub diverse forme (capsule), iar în Figura 1 sunt prezentate mai multe variante.

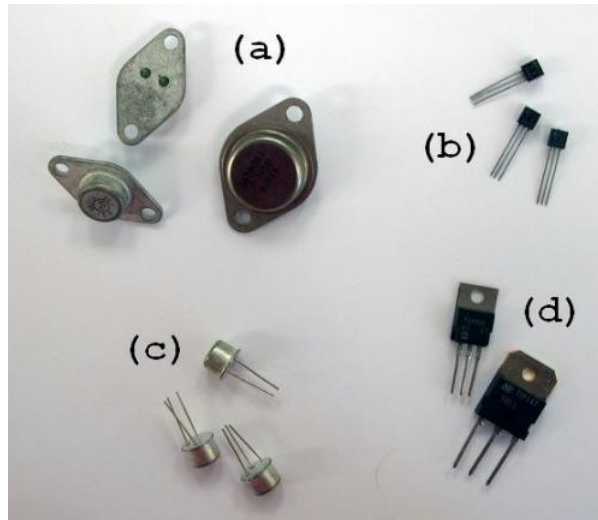


Figura 1. Tranzistoare bipolare cu joncțiuni.

Cele trei terminale ale tranzistorului bipolar îndeplinesc roluri diferite, fiind identificate sub următoarele denumiri:

- **EMITOR**
- **BAZĂ**
- **COLECTOR.**

În funcție de structura lor, tranzistoare bipolare se clasifică în două tipuri și anume:

- **NPN**
- **PNP**

În circuitele electronice, tranzistoarele bipolare sunt simbolizate ca în Figura 2.

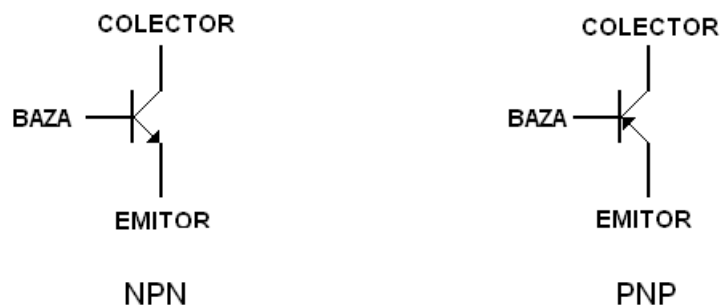


Figura 2. Simbolul electronic al tranzistoarelor bipolare.

La nivelul tranzistorului bipolar apar 6 mărimi electrice de terminal:

- 3 curenți electrice – curenții prin cele 3 terminale, care sunt notați astfel:
 - i_E – curentul de emitor
 - i_B – curentul de bază
 - i_C – curentul de colector
- 3 tensiuni electrice – tensiunile între terminalele tranzistoarelor, notate astfel:

- v_{BE} – tensiunea bază-emitor
- v_{BC} – tensiunea bază-colector
- v_{CE} – tensiunea colector-emitor

Sensul curenților electrici în terminalele tranzistorului bipolar este același cu sensul săgeții care indică emitorul în simbolul electronic al tranzistorului bipolar. Referințele tensiunilor între terminalele tranzistorului depind de tipul tranzistorului bipolar. În Figura 3 sunt prezentate mărimile electrice ale tranzistorului bipolar, în funcție de tipul său.

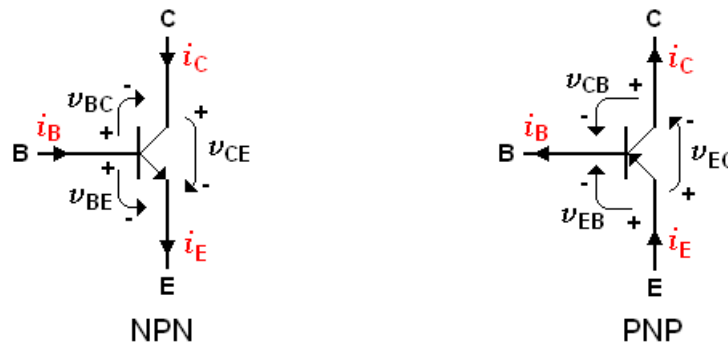


Figura 3. Mărimile electrice ale tranzistoarelor bipolare.

Între mărimile electrice de terminal ale tranzistorului bipolar există următoarele relații generale:

- relația între curenții prin terminalele tranzistorului:

$$i_E = i_B + i_C \quad 1$$

- relația între tensiunile dintre terminalele tranzistorului:

$$\begin{aligned} v_{BE} &= v_{BC} + v_{CE} & \text{NPN} \\ v_{EB} &= v_{CB} + v_{EC} & \text{PNP} \end{aligned} \quad 2$$

2. Funcționarea tranzistorului bipolar.

Tranzistorul bipolar poate funcționa în patru moduri distincte, denumite **regiuni de funcționare**, stabilite de semnul tensiunilor de comandă bază-emitor v_{BE} , respectiv bază-colector v_{BC} pentru un tranzistor bipolar de tip NPN (v_{EB} , respectiv bază-colector v_{CB} pentru un tranzistor bipolar de tip PNP). Astfel, pentru un tranzistor bipolar de tip NPN, cele patru regiuni de funcționare sunt următoarele (semnul tensiunilor v_{BE} , respectiv v_{BC} este raportat la referințele considerate în Figura 3; pentru tranzistoarele de tip PNP se păstrează același condiții de funcționare, dar cu inversarea ordinii indicilor care definesc tensiunile de comandă):

• REGIUNEA ACTIVĂ NORMALĂ (RAN):

- condiția de funcționare: $v_{BE} > 0[V]$ și $v_{BC} < 0[V]$
- în această regiune de funcționare, tranzistorul bipolar poate fi utilizat pentru prelucrarea analogică a semnalelor (informațiilor), fiind singura regiune de funcționare în care tranzistorul bipolar poate **amplifica liniar** semnalele aplicate în baza sa; în cazul în care un tranzistor lucrează în RAN, funcționarea acestuia este descrisă prin următorul set de ecuații de funcționare, care se adaugă la cele generale:
- relația între curentul de colector și tensiunea bază-emitor:

$$i_C \cong I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \quad 3$$

unde I_S este un curent de saturație de valoare foarte redusă (ordinul nanoamperilor sau mai mic), iar V_T este tensiunea termică; din relația 3, se poate trage concluzia că funcționarea tranzistorului bipolar depinde de temperatura la care acesta lucrează.

- o relația între curentul de colector și cel din bază:

$$i_C \cong \beta \cdot i_B \quad 4.a$$

unde β reprezintă unul din cei mai importanți parametri ai tranzistorului bipolar, numit **factorul** (coeficientul) **de amplificare în curent** al tranzistorului.

Parametrul β este o constantă adimensională, valoarea sa variind între anumite limite, pentru același tip de tranzistor bipolare, fiind de ordinul sutelor pentru tranzistoare de tip NPN, respectiv de ordinul zecilor, pentru tranzistoare de tip PNP. De exemplu, pentru tranzistorul bipolar de tip NPN BC107, parametrul β are valoarea cuprinsă în intervalul $[125 \div 500]$.

Din relația 4.a se poate deduce că tranzistorul bipolar generează în colectorul său un curent electric care este de sute/zeci de ori mai mare decât curentul electric aplicat în baza sa. Acest comportament ilustrează efectul de amplificator în curent, manifestat de către tranzistorul bipolar, dacă acesta lucrează în RAN. Totodată, deoarece curentul de colector este mult mai mare decât cel aplicat în bază, relația 1 se poate simplifica astfel:

$$i_E \cong i_C \quad 4.b$$

Din relațiile 3 și 4.a rezultă că și valoarea curentului i_B depinde exponențial de tensiunea v_{BE} , în mod asemănător modului în care depinde curentul printr-o diodă de tensiunea electrică aplicată pe aceasta. Din acest motiv, între bază și emitor, tranzistorul bipolar are un comportament similar diodei semiconductoare și în consecință, comportamentul său poate fi modelat prin intermediul unei surse de tensiune V_D care are o valoare de aproximativ **0,6[V]** (valoarea tensiunii de prag a unei joncțiuni pn). Așadar, dacă tranzistorul bipolar funcționează în RAN, devine valabilă relația:

$$v_{BE} \cong 0,6[V] \quad 4.c$$

- **REGIUNEA DE SATURAȚIE:**

- o condiția de funcționare: $v_{BE} > 0[V]$ și $v_{BC} > 0[V]$
- o în această regiune de funcționare, tensiunea $v_{CE} \cong 0[V]$ (se consideră că un tranzistor bipolar intră în regiunea de saturație dacă $v_{CE} < 0,5[V]$)
- o este o regiune de funcționare în care tranzistorul bipolar poate fi utilizat pentru prelucrarea digitală a semnalelor sau pentru generarea semnalelor digitale (biți);

- **REGIUNEA DE BLOCARE:**

- o condiția de funcționare: $v_{BE} < 0[V]$ și $v_{BC} < 0[V]$
- o în această regiune de funcționare **toți curenții electrici ai tranzistorului sunt zero:**
 $i_E = i_C = i_B \cong 0[A]$
- o este o regiune de funcționare în care tranzistorul bipolar poate fi utilizat pentru prelucrarea digitală a semnalelor sau pentru generarea semnalelor digitale (biți);

- **REGIUNEA ACTIVĂ INVERSĂ:**

- o condiția de funcționare: $v_{BE} < 0[V]$ și $v_{BC} > 0[V]$
- o în această regiune de funcționare, tranzistorul poate fi utilizat pentru prelucrarea analogică a semnalelor (informațiilor), dar, datorită amplificării foarte slabe a semnalelor, se evită utilizarea tranzistorului în această regiune;

3. Modelarea funcționării tranzistorului bipolar

3.a. Modelarea funcționării tranzistorului bipolar în RAN

Din relația 3 se constată că tranzistorul bipolar este un **ELEMENT DE CIRCUIT NELINIAR**. Analiza circuitelor care conțin elemente de circuit neliniare este dificilă. Din acest motiv, întotdeauna este util ca, pentru aceste elemente de circuit neliniare, să se dezvolte **MODELE LINIARE**, valabile în anumite condiții de funcționare. La fel se pune problema și în cazul tranzistoarelor bipolare.

În circuitele electronice analogice, tranzistorul bipolar este utilizat cu precădere în această regiune, motiv pentru care modelarea funcționării sale în RAN este extrem de utilă.

Așa cum s-a precizat în paragraful anterior, tranzistorul bipolar se comportă între bază și emitor similar unei diode semiconductoare. Din acest motiv, tranzistorul bipolar se modelează între bază și emitor prin intermediul unei diode (Figura 4.a), care, la rândul său se modelează prin oricare dintre modelele liniare, propuse pentru modelarea comportamentului acesteia, în regiunea de conducție directă (conducția directă a diodei este stabilită de faptul că, în RAN, tensiunea v_{BE} este pozitivă).

Relația 4.a furnizează relația între curentul de colector și cel din bază, care poate fi modelată electric prin intermediul unui generator de curent comandat în curent, în care parametrul de legătură între curenții electrici este factorul de amplificare în curent al tranzistorului, β .

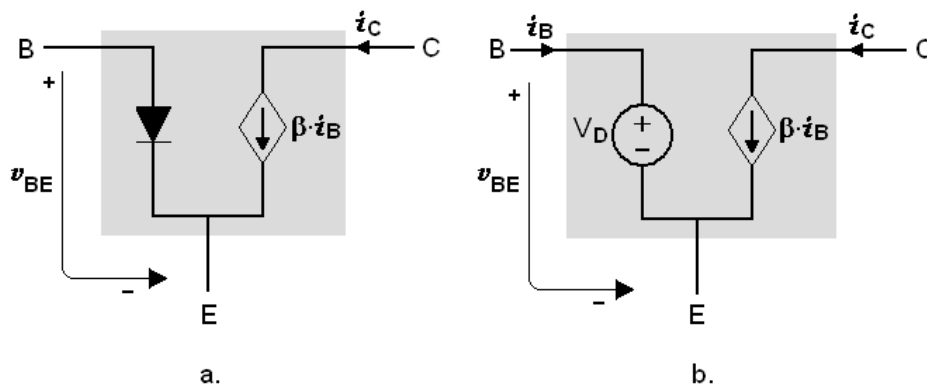


Figura 4. Circuitul echivalent care modelează comportamentul tranzistorului bipolar în RAN.

În circuitele echivalente de mai sus, toate mărimile electrice sunt reprezentate în componente totale. Din acest motiv, modelul de mai sus este valabil atât în **regim de curent continuu**, cât și în **regim variabil de semnal mare**.

Un tranzistor bipolar funcționează în regim de curent continuu, dacă mărimile sale electrice au valori constante în timp.

Un tranzistor bipolar funcționează în regim variabil de semnal mare, dacă mărimile sale electrice au valori variabile în timp, iar amplitudinea tensiunii între bază și emitor, notată V_{be} este mai mare decât o valoare aproximativă de **12,5[mV]**.

Revenind la relația 4.a, aceasta indică faptul că, un tranzistor bipolar care funcționează în RAN, are următoarele proprietăți importante:

- amplifică puternic în curent (i_B este crescut de sute de ori și furnizat ca i_C)
- amplificarea este liniară (între i_C și i_B este o relație liniară).

Aceste proprietăți constituie elemente fundamentale, utilizate în proiectarea circuitelor capabile să amplifice semnale.

B. Modelarea funcționării tranzistorului bipolar în variabil de semnal mic.

Modelul prezentat în acest paragraf se poate aplica numai în cazul în care tranzistorul bipolar funcționează în regim variabil de semnal mic.

Un tranzistor bipolar funcționează în regim variabil de semnal mic, dacă mărimile sale electrice au valori variabile în timp, iar amplitudinea tensiunii între bază și emitor, notată V_{be} este mai mică decât o valoare aproximativă de **12,5[mV]**.

În aceste condiții, comportamentul tranzistorului bipolar poate fi considerat ca fiind LINIAR și în consecință poate fi modelat prin intermediul unui circuit LINIAR.

Deoarece tranzistorul bipolar se comportă asemănător unei diode între bază și emitor, acesta se modelează între cele 2 terminale cu ajutorul modelului diodei semiconductoare valabil în regim variabil de semnal mic. În consecință, între bază și emitor, un tranzistor bipolar se modelează prin intermediul unei rezistențe de semnal mic, notată r_{π} .

Următorul indiciu în cadrul modelului dezvoltat este furnizat de către relația 3. Deoarece se remarcă faptul că i_c variază în funcție de v_{BE} , este util să se determine modul în care se manifestă această variație. Informații în acest sens se pot obține calculând derivata curentului i_c în funcție de tensiunea v_{BE} pentru cazul în care valoarea curentului de colector este menținută la o valoare constantă, notată I_C . Valoarea derivatei respective se notează cu g_m și se numește **PANTA tranzistorului bipolar**:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad 5$$

unde I_C este **curentul CONTINUU** prin colectorul tranzistorului. Valoarea pantei tranzistorului bipolar se exprimă în mod uzual în [mA/V] și furnizează o mărime asupra capacității tranzistorului respectiv de a amplifica curentul electric în colector: cu cât panta tranzistorului este mai mare, cu atât mai mult tranzistorul respectiv poate amplifica curentul în colector, pe seama unei variații a tensiunii bază-emitor.

Rezistența echivalentă în regim de semnal mic între bază și emitor, r_{π} se calculează conform unei relații similare relației de calcul a rezistenței echivalente de semnal mic a diodei semiconductoare, în care se ține cont de relația 4.a:

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} \quad 6$$

Mărimile g_m și r_{π} reprezintă parametrii modelului de semnal mic al tranzistorului bipolar și sunt utilizați în circuitul echivalent al acestuia, care modelarea comportamentul în regim variabil de semnal mic.

Modelul prezentat depinde de frecvența la care este utilizat tranzistorul bipolar. Pentru frecvențe de lucru mai mici decât un prag de aproximativ **1[MHz]** (domeniul frecvențelor joase și medii), modelul este caracterizat de circuitul echivalent prezentat în Figura 5. În acest circuit, mărimile electrice I_b , I_e și I_c reprezintă **amplitudinile** curenților de bază, emitor, respectiv colector, iar V_{be} reprezintă **amplitudinea** tensiunii bază-emitor și nu trebuie confundată cu tensiunea continuă V_{BE} care, pentru cazul în care tranzistorul bipolar funcționează în RAN, are valoarea de aproximativ **0,6[V]**.

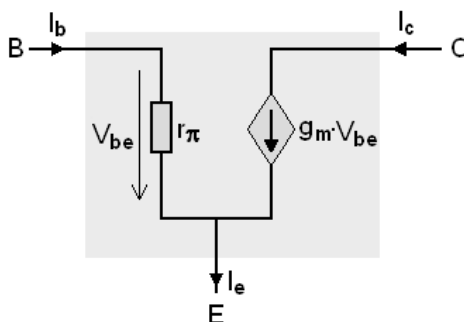


Figura 5. Circuitul echivalent al modelului tranzistorului bipolar, valabil în regim variabil de semnal mic, pentru frecvențe joase și medii.

Pentru frecvențe de lucru mai mari decât un prag de aproximativ **1[MHz]** (domeniul frecvențelor înalte), funcționarea tranzistorului bipolar este afectată de anumite fenomene dinamice, de natură capacitivă, care pot fi modelate prin intermediul unor așa numite **CAPACITĂȚI PARAZITE**, reunite în parametrii notați c_{π} , respectiv c_{μ} . Circuitul echivalent valabil în acest caz este prezentat în Figura 6. Valorile capacităților parazite sunt furnizate în cataloagele de tranzistoare bipolare.

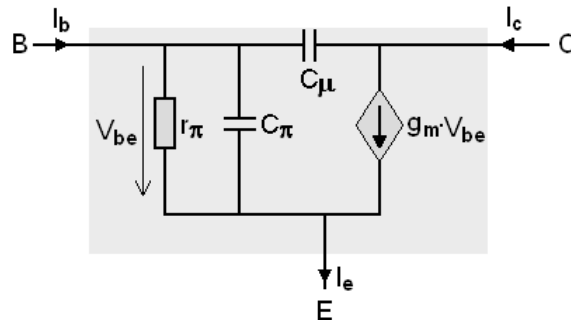


Figura 6. Circuitul echivalent ale modelului tranzistorului bipolar, valabil în regim variabil de semnal mic, pentru frecvențe înalte.

4. Polarizarea tranzistoarelor bipolare

Tranzistorul bipolar poate funcționa în 4 regiuni diferite și anume regiunea activă normală – RAN, regiunea activă inversă, regiunea de blocare și regiunea de saturație. **Regiunea de funcționare a tranzistorului bipolar este stabilită prin polarizarea acestuia.**

Polarizarea tranzistorului este realizată prin intermediul unui circuit special, numit **circuit de polarizare**. Circuitul de polarizare conține întotdeauna o sursă de tensiune continuă, care se mai numește și sursă de polarizare și un set de rezistoare de polarizare. În sistemele electronice analogice, circuitul de polarizare al tranzistorului bipolar trebuie să asigure funcționarea acestuia în **Regiunea Activă Normală**, deoarece numai în această regiune tranzistorul bipolar poate amplifica liniar semnalele (semnalele sunt mărimile variabile în timp).

Prin polarizare, la nivelul terminalelor tranzistorului se stabilesc mărimi electrice **CONTINUE** (curenții de terminal, respectiv tensiunile între terminale au valori constante în timp).

O pereche de mărimi electrice continue, compusă dintr-un curent de terminal și o tensiune între 2 terminale, formează **PUNCTUL STATIC de FUNCȚIONARE** al tranzistorului respectiv (pe scurt PSF-ul tranzistorului). În funcție de poziționarea sa în planul curent-tensiune, PSF-ul tranzistorului indică regiunea în care acesta funcționează.

Un rol secundar (dar nu mai puțin important) al circuitului de polarizare este de a **menține PSF-ul** tranzistorului **la o valoare constantă**, la variațiile condițiilor de lucru (temperatura, variația parametrilor circuitului, a sursei de alimentare, etc).

Polarizarea tranzistoarelor este realizată prin intermediul unor circuite electronice speciale, numite circuite de polarizare.

Circuite de polarizare elementare pentru tranzistoare bipolare

Există 3 variante de bază de circuite de polarizare pentru tranzistoare bipolare. Rolul acestora este de a asigura funcționarea tranzistorului în regim de curent continuu în Regiunea Activă Normală și totodată de a menține un **PSF STABIL** la variațiile condițiilor de lucru (de a menține mărimile electrice ale PSF-ului tranzistorului bipolar la valori constante, la variațiile condițiilor de lucru).

Pentru tranzistoarele bipolare, perechea de mărimi electrice care definește PSF-ul este:

- curentul continuu din colector: I_C
- tensiunea continuă colector-emitor: V_{CE}

Unul din parametrii cei mai importanți ai tranzistoarelor bipolare este factorul de amplificare în curent, notat β . Acest parametru prezintă două caracteristici importante:

- variază puternic cu temperatura (crește la creșterea temperaturii de lucru).
- prezintă fenomenul de dispersie tehnologică: valoarea lui β pentru un anumit tip de tranzistor nu este fixă, ci aparține unui anumit domeniu de valori $[\beta_{\text{MIN}}, \beta_{\text{MAX}}]$, specificat în catalogul pentru tranzistoare. De exemplu, pentru tranzistorul bipolar de tip NPN BC170, parametrul β are valoarea cuprinsă în intervalul $[125 \div 500]$.

Datorită acestor caracteristici, parametrul β poate constitui o sursă importantă de variație a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar. **Din acest motiv, circuitele de polarizare ale tranzistoarelor bipolare trebuie să fie astfel proiectate, încât să asigure independența PSF-ului de parametrul β .**

Circuitele elementare de polarizare ale tranzistorului bipolar sunt prezentate în continuare. Se consideră numai cazul tranzistoarelor bipolare de tip NPN. Pentru tranzistoarele de tip PNP, structura circuitelor de polarizare este aceeași, dar bornele sursei de alimentare se inversează.

Pentru circuitele care urmează a fi prezentate, se determină valoarea PSF-ului și se discută dependența acestuia de parametrul β - factorul de amplificare în curent al tranzistorului.

4.1. Circuit de polarizare elementar

Structura circuitului este prezentată în Figura 7. Sursa de tensiune continuă notată V_{CC} asigură polarizarea tranzistorului Q prin intermediul rezistoarelor de polarizare R_B și R_C . Este important de subliniat faptul că, pentru ca tranzistorul să poată funcționa în RAN, bornele lui V_{CC} trebuie să fie dispuse ca în figură. Numai în acest caz, condiția care asigură funcționarea tranzistorului bipolar în RAN ($V_{BE} > 0[V]$ și $V_{BC} < 0[V]$) poate fi satisfăcută.

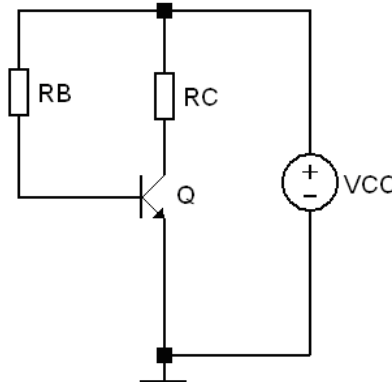


Figura 7. Circuit elementar de polarizare cu rezistor în bază.

Pentru circuitul de polarizare din Figura 7, PSF-ul tranzistorului bipolar se determină cu relațiile următoare:

$$I_C = \beta \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad 7.a$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C \quad 7.b$$

unde, pentru tensiunea continuă V_{BE} , se consideră valoarea $0,6[V]$. Tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția:

$$0,5[V] < V_{CE} < V_{CC} - 0,5[V] \quad 8$$

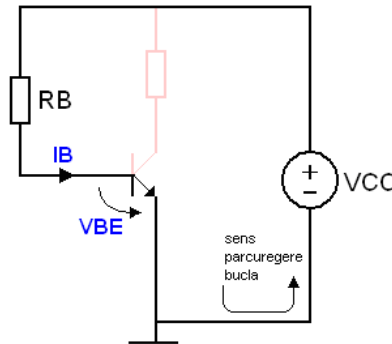
CONCLUZIE: Se observă că valoarea curentului I_C (și implicit PSF-ul tranzistorului) depinde direct proporțional de parametrul β . Deci, acest circuit NU asigură independența PSF-ului de parametrul β și din acest motiv PSF-ul tranzistorului nu este stabil și în concluzie, performanța circuitului de polarizare prezentat în Figura 7 este redusă.

Determinarea relațiilor de calcul a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar

a. determinarea curentului I_C se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scot în evidență curenții prin terminalele tranzistoarelor;
- se scoate în evidență tensiunea bază emitor a tranzistorului V_{BE} ;
- se aplică teorema lui Kirchhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea V_{BE} și NU trece prin tensiunile V_{CE} și V_{BC} ale tranzistorului respectiv.

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru):



Aplicând TK2 pe bucla menționată rezultă ecuația: $R_B \cdot I_B + V_{BE} - V_{CC} = 0$

Din ecuațiile de funcționare ale TBJ se cunosc: $I_E \cong I_C$ și $I_B \cong \frac{I_C}{\beta}$

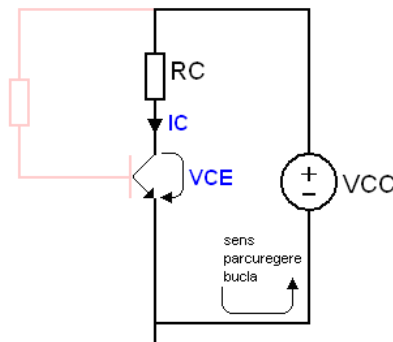
Combinând relațiile de mai sus, se deduce formula de calcul pentru curentul I_C :

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{R_B}$$

b. determinarea tensiunii V_{CE} se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scoate în evidență tensiunea colector emitor a tranzistorului V_{CE} ;
- se aplică teorema lui Kirchhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea V_{CE} și NU trece prin tensiunea V_{BC} a tranzistorului respectiv; dacă este necesar, bucla poate trece și prin tensiunea V_{BE} (nu este cazul pentru acest circuit).

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru):



Aplicând TK2 pe bucla menționată rezultă ecuația:

$$R_C \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

Din relația de mai sus, se deduce formula de calcul pentru tensiunea V_{CE} : $V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$

Dreapta de sarcină statică

Reprezintă mulțimea Punctelor Statice de Funcționare pe care le poate avea tranzistorul bipolar, la variația valorilor componentelor care constituie circuitul de polarizare (V_{CC} , R_B , R_C). Această dreaptă se desenează în planul I_C - V_{CE} , iar ecuația dreptei respective este dată de relația de calcul a tensiunii V_{CE} , rescrisă sub următoarea formă:

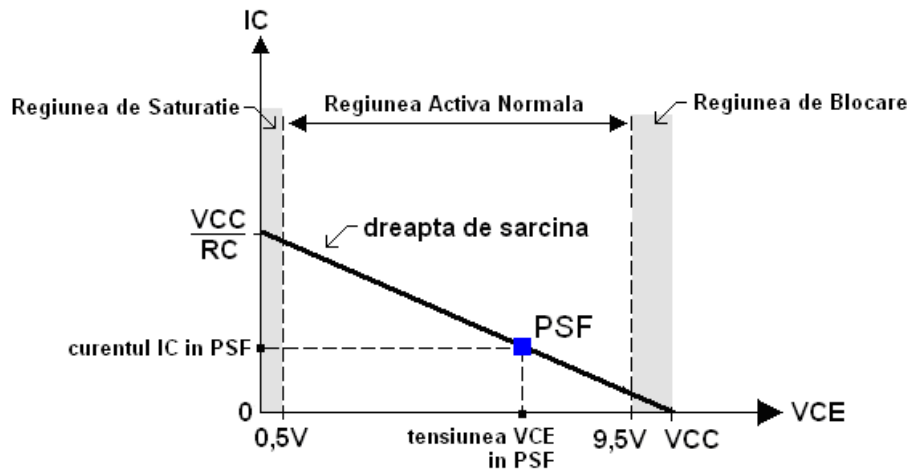
$$R_C \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

ecuația dreptei de sarcină statică

Intersecția acestei drepte cu axele planului I_C - V_{CE} se determină astfel:

- intersecția cu axa OX: în relația de mai sus, se consideră $I_C=0[\text{mA}] \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$.
- intersecția cu axa OY: în relația de mai sus, se consideră $V_{CE}=0[\text{V}] \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$.

Pe baza celor 2 puncte de intersecție ale dreptei de sarcină statică cu axele OX-OY ale graficului, aceasta se desenează ca în figura de mai jos. Punctul static de funcționare determinat la punctul precedent se află pe această dreaptă, așa cum este prezentat în figura de mai jos. În aplicații, se recomandă ca circuitul de polarizare să fie astfel proiectat încât valorile PSF-ului să rezulte la mijlocul dreptei de sarcină statică, pentru a fi situat cât mai în interiorul Regiunii Active Normale.



Dreapta de sarcină statică a circuitului de polarizare din Figura 7.

4.2. Circuit de polarizare cu rezistor în emitor

Structura circuitului este prezentată în Figura 8. Față de circuitul precedent, se introduce încă un rezistor R_E , între emitor și masa circuitului. Rolul elementelor care compun circuitul de polarizare este același ca și în cazul circuitului precedent. În plus, prezența rezistorului R_E în circuit asigură o mai mare stabilitate a PFS-ului tranzistorului.

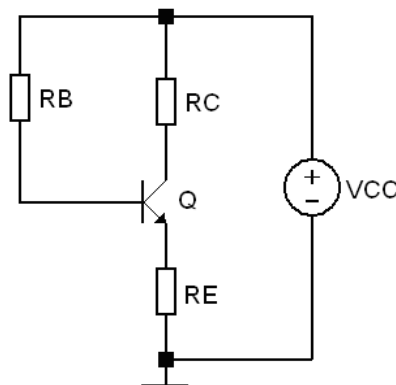


Figura 8. Circuit elementar de polarizare cu rezistor în emitor.

Pentru circuitul de polarizare din Figura 2, PSF-ul tranzistorului bipolar se determină cu relațiile următoare:

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B} \quad 9.a$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E) \quad 9.b$$

în care, presupunând că tranzistorul bipolar **Q** funcționează în RAN, valoarea tensiunii bază emitor se consideră $V_{BE} = 0,6[V]$. Tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția 8.

CONCLUZIE: Se observă din formula de calcul a curentului **I_C** că parametrul **β** al tranzistorului bipolar se regăsește atât la numărător cât și la numitor. Din acest motiv, există o cale de a asigura independența lui **I_C** (și implicit a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar) de parametrul **β**. Astfel, dacă se respectă condiția:

$$\beta \cdot R_E \gg R_B \quad 10$$

(unde condiția \gg reprezintă “de cel puțin 10 ori mai mare”) atunci, în relația 3.a, parametrul **β** se poate simplifica, iar formula de calcul a lui **I_C** devine următoarea:

$$I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E} \quad 9.c$$

caz în care valoarea PSF-ului tranzistorului bipolar nu mai depinde de parametrul **β**.

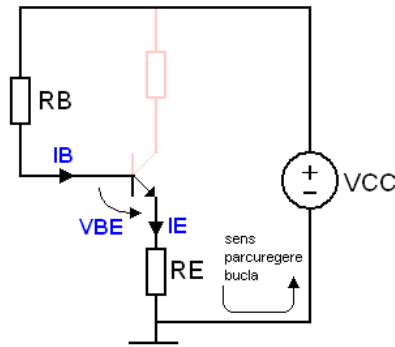
Dar, pentru acest tip de circuit, condiția 10 nu poate fi satisfăcută simultan cu condiția 8. Din acest motiv, circuitul de polarizare prezentat în Figura 8 nu asigură, decât într-o măsură moderată, independența valorii PSF-ului tranzistorului bipolar de parametrul **β**, și astfel performanța circuitului de polarizare din Figura 8 este doar satisfăcătoare, dar, în comparație cu circuitul prezentat în Figura 7, superioară.

Determinarea relațiilor de calcul a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar

a. determinarea curentului **I_C** se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scot în evidență curenții prin terminalele tranzistoarelor;
- se scoate în evidență tensiunea bază emitor a tranzistorului **V_{BE}**;
- se aplică teorema lui Kirchhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea **V_{BE}** și NU trece prin tensiunile **V_{CE}** și **V_{BC}** ale tranzistorului respectiv.

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru):



Aplicând TK2 pe bucla menționată rezultă ecuația:

$$R_E \cdot I_E - V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0$$

Din ecuațiile de funcționare ale TBJ se cunosc:

$$I_E \cong I_C \quad \text{și} \quad I_B \cong \frac{I_C}{\beta}$$

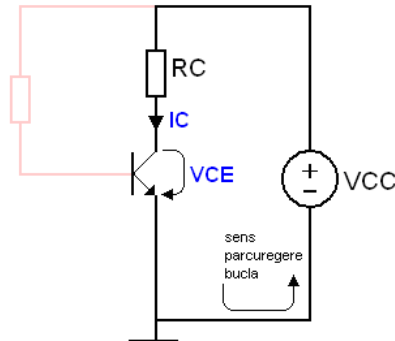
Combinând relațiile de mai sus, se deduce formula de calcul pentru curentul I_C :

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{R_B + \beta \cdot R_E}$$

b. determinarea tensiunii V_{CE} se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scoate în evidență tensiunea colector emitor a tranzistorului V_{CE} ;
- se aplică teorema lui Kirchhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea V_{CE} și NU trece prin tensiunea V_{BC} a tranzistorului respectiv; dacă este necesar, bucla poate trece și prin tensiunea V_{BE} (nu este cazul pentru acest circuit).

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru):



Aplicând TK2 pe bucla menționată rezultă ecuația:

$$R_E \cdot I_E - V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0$$

din care se deduce formula de calcul pentru tensiunea V_{CE} :

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

Dreapta de sarcină statică

Reprezintă mulțimea Punctelor Statice de Funcționare pe care le poate avea tranzistorul bipolar, la variația valorilor componentelor care constituie circuitul de polarizare (V_{CC} , R_B , R_C , R_E). Această dreaptă se desenează în planul I_C - V_{CE} , iar ecuația dreptei respective este dată de relația de calcul a tensiunii V_{CE} , rescrisă sub următoarea formă:

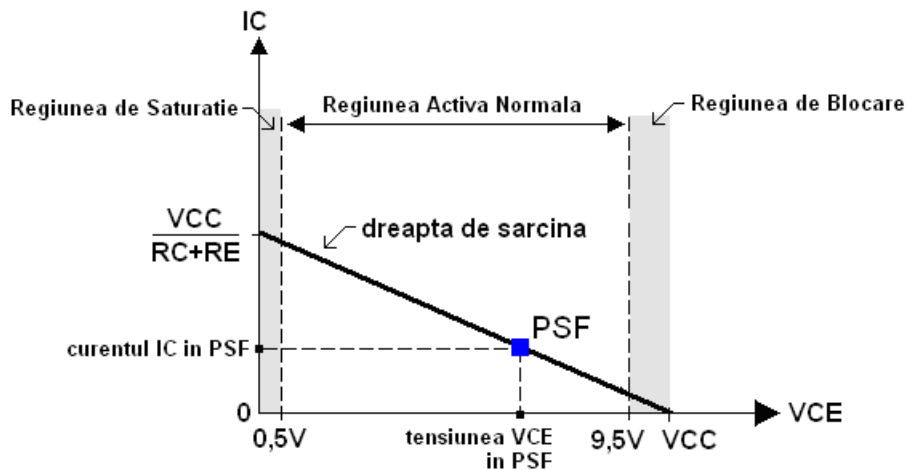
$$(R_C + R_E) \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

ecuația dreptei de sarcină statică

Intersecția acestei drepte cu axele planului I_C - V_{CE} se determină astfel:

- intersecția cu axa OX: în relația de mai sus, se consideră $I_C=0[\text{mA}] \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$.
- intersecția cu axa OY: în relația de mai sus, se consideră $V_{CE}=0[\text{V}] \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$.

Pe baza celor 2 puncte de intersecție ale dreptei de sarcină statică cu axele OX-OY ale graficului, aceasta se desenează ca în figura de mai jos. Punctul static de funcționare determinat la punctul precedent se află pe această dreaptă, așa cum este prezentat în figura de mai jos.



Dreapta de sarcină statică a circuitului de polarizare din Figura 8.

4.3. Circuit de polarizare cu divizor rezistiv în bază

Structura circuitului de polarizare este prezentată în Figura 9. Față de circuitul precedent, se introduce încă un rezistor, notat R_{B1} , între baza tranzistorului bipolar și masa circuitului. Rolul elementelor de circuit, care compun circuitul de polarizare, este același ca și în circuitul precedent. Denumirea de circuit cu divizor rezistiv în bază este determinată de rețeaua rezistivă compusă din elementele R_{B1} R_{B2} , care formează un divizor rezistiv de tensiune pentru tensiunea de alimentare V_{CC} .

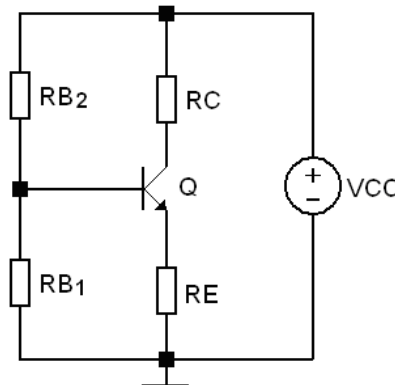


Figura 9. Circuit elementar de polarizare cu divizor rezistiv în bază.

Pentru circuitul de polarizare din Figura 9, valoarea PSF-ului tranzistorului bipolar se determină cu relațiile următoare:

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B} \quad 11.a$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E) \quad 11.b$$

unde:

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} \quad 11.c$$

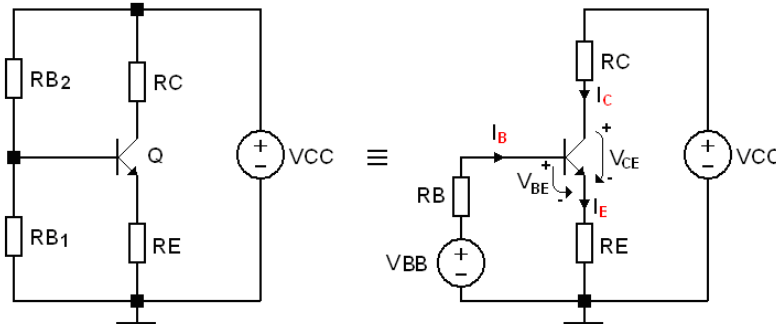
$$R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad 11.d$$

Presupunând că tranzistorul bipolar **Q** funcționează în RAN, valoarea tensiunii bază emitor se consideră $V_{BE} = 0,6[V]$. Tranzistorul bipolar funcționează în RAN dacă este satisfăcută condiția **8**.

CONCLUZIE: La fel ca și pentru circuitul de polarizare precedent, independența valorii curentului I_C (și implicit a valorii PSF-ului tranzistorului) de parametrul β poate fi asigurată prin respectarea condiției **10**. Spre deosebire de circuitul precedent, pentru circuitul de polarizare din Figura 9, relația **10** poate fi satisfăcută simultan cu condiția **8** și din acest motiv, acest circuit asigură independența valorii PSF-ului tranzistorului bipolar de parametrul β . Astfel, performanța circuitului de polarizare prezentat în Figura 9 este superioară celorlalte circuite de polarizare, prezentate în Figurile 7, respectiv 8.

Determinarea relațiilor de calcul a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar

Calculul se realizează pe circuitul din figura de mai jos, dreapta, obținut din circuitul inițial, prin aplicarea teoremei generatorului echivalent de tensiune (teorema lui Thevenin) între baza tranzistorului și masa circuitului.



Din teorema generatorului echivalent de tensiune, elementele V_{BB} , respectiv R_B , introduse în locul rețelei rezistive R_{B1} - R_{B2} prin aplicarea teoremei amintite, se determină cu relațiile:

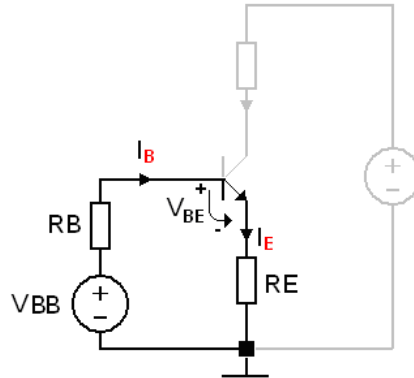
$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} \quad R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

a. determinarea curentului I_C se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scot în evidență curenții prin terminalele tranzistoarelor;
- se scoate în evidență tensiunea bază emitor a tranzistorului V_{BE} ;

- se aplică teorema lui Kirkhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea V_{BE} și NU trece prin tensiunile V_{CE} și V_{BC} ale tranzistorului respectiv.

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru):



Se aplica TK2 pe bucla evidențiată: $R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E - V_{BB} = 0$

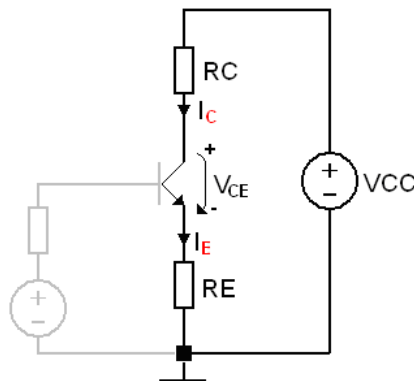
Dar: $I_B = \frac{I_C}{\beta}$ și $I_E = I_C$

Rezulta: $I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B}$

b. determinarea tensiunii V_{CE} se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scoate în evidență tensiunea colector emitor a tranzistorului V_{CE} ;
- se aplică teorema lui Kirkhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea V_{CE} și NU trece prin tensiunea V_{BC} a tranzistorului respectiv; dacă este necesar, bucla poate trece și prin tensiunea V_{BE} (nu este cazul pentru acest circuit).

În urma parcurgerii acestor etape se scoate în evidență bucla de circuit (cea desenată cu negru).



Se aplica TK2 pe bucla evidențiată:

$$R_E \cdot I_E - V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0$$

din care se deduce formula de calcul pentru tensiunea V_{CE} :

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

Dreapta de sarcină statică

Reprezintă mulțimea Punctelor Statice de Funcționare pe care le poate avea tranzistorul bipolar, la variația valorilor componentelor care constituie circuitul de polarizare (V_{CC} , R_{B1} , R_{B2} , R_C , R_E).

Această dreaptă se desenează în planul I_C - V_{CE} , iar ecuația dreptei respective este dată de relația de calcul a tensiunii V_{CE} , rescrisă sub următoarea formă:

$$(R_C + R_E) \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

ecuația dreptei de sarcină statică

Deoarece se remarcă faptul că ecuația dreptei de sarcină statică a acestui circuit este identică cu cea a circuitului de polarizare din Figura 8, dreapta de sarcină pentru circuitul din Figura 9 este identică cu cea obținută pentru circuitul din Figura 8.

În cazurile prezentate mai sus, s-a considerat că tranzistoarele bipolare sunt de tip NPN. Pentru cele de tip PNP, circuitele de polarizare au aceeași structură, dar bornele sursei de alimentare V_{CC} sunt inversate față de cazul tranzistorului NPN. Astfel, borna “-” se leagă la R_C și R_B , iar borna “+” devine masă pentru circuitul de polarizare. În cazul tranzistoarelor PNP, acestea funcționează în RAN dacă este satisfăcută relația:

$$0,5[V] < V_{EC} < V_{CC} - 0,5[V]$$