Polarizarea tranzistoarelor bipolare

1. Introducere

Tranzistorul bipolar poate funcţiona în 4 regiuni diferite şi anume regiunea activă normala –RAN, regiunea activă inversă, regiunea de blocare şi regiunea de saturaţie. **Regiunea de funcţionare a tranzistorului bipolar este stabilită prin polarizarea acestuia**.

Polarizarea tranzistorului este realizată prin intermediul unui circuit special, numit **circuit de polarizare**. Circuitul de polarizare conţine întotdeauna o sursă de tensiune continuă, care se mai numeşte şi sursă de polarizare şi un set de rezistoare de polarizare.

În sistemele electronice analogice, circuitul de polarizare al tranzistorului bipolar trebuie să asigure funcţionarea 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** (curenţii de terminal, respectiv tensiunile între terminale au valori constante în timp).

O pereche de mărimi electrice continue, compusă dintr-un curent de terminal şi o tensiune între 2 terminale, formează **PUNCTUL STATIC de FUNCŢIONARE** al tranzistorului respectiv (pe scurt PSF-ul tranzistorului). În funcţie de poziţionarea sa în planul curent-tensiune, PSFul tranzistorului indică regiunea în care acesta funcţionează.

Un rol secundar (dar nu mai puţin important) al circuitului de polarizare este de a **menţine PSF-ul** tranzistorului **la o valoare constantă**, la variaţiile condiţiilor de lucru (temperatura, variaţia parametrilor circuitului, a sursei de alimentare, etc).

Circuite de polarizare elementare pentru tranzistoare bipolare

Există 3 variante de circuite elementare de polarizare pentru tranzistoare bipolare. Rolul acestora este de a asigura funcţionarea tranzistorului în regim de curent continuu în Regiunea Activă Normală şi totodată de a menţine un **PSF STABIL** la variaţiile condiţiilor de lucru (de a menţine mărimile electrice ale PSF-ului tranzistorului bipolar la valori constante, la variaţiile condiţiilor de lucru).

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

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

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

- variază puternic cu temperatura (creşte la creşterea temperaturii de lucru).
- prezintă fenomenul de dispersie tehnologică: valoarea lui β pentru un anume tip de tranzistor nu este fixă, ci aparţine unui anumit domeniu de valori [β_{MIN}, β_{MAX}], specificat în catalogul pentru tranzistoare. De exemplu, pentru tranzistorul bipolar de tip NPN BC170, parametrul β are valoarea cuprinsă în intervalul [125÷500].

Datorită acestor caracteristici, parametrul β poate constitui o sursă importantă de variaţie a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar. **Din acest motiv, circuitele de polarizare ale tranzistoarelor bipolare trebuie să fie astfel proiectate, încât să asigure independenţa 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 aceeaşi, dar bornele sursei de alimentare se inversează.

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

2. Circuit de polarizare elementar

Structura circuitului este prezentată în Figura 1. Sursa de tensiune continuă notată $\mathbf{V_{CC}}$ asigură polarizarea tranzistorului **Q** prin intermediul rezistoarelor de polarizare $\mathbf{R_B}$ şi $\mathbf{R_C}$. Este important de subliniat faptul că, pentru ca tranzistorul să poată funcţiona în RAN, bornele lui $\mathbf{V_{CC}}$ trebuie să fie dispuse ca în figură. Numai în acest caz, condiţia care asigură funcţionarea tranzistorului bipolar în RAN ($\mathbf{v_{BE}} > \mathbf{0[V]}$ şi $\mathbf{v_{BC}} < \mathbf{0[V]}$) poate fi satisfăcută.

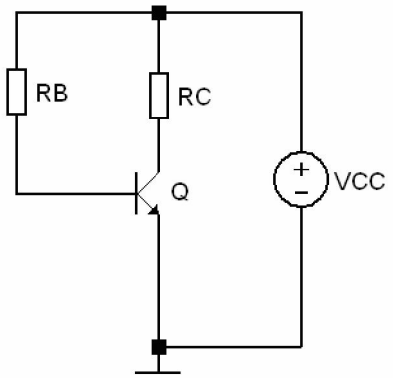


Figura 1. Circuit elementar de polarizare cu rezistor în bază.

Pentru circuitul de polarizare din Figura 1, PSF-ul tranzistorului bipolar se determină cu relaţiile următoare:

$$I_C = \beta \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \qquad 1.a$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C \qquad 1.b$$

unde, pentru tensiunea continuă $\mathbf{V_{BE}}$, se consideră valoarea **0,6[V]**. Tranzistorul bipolar funcţionează în RAN dacă este satisfăcută condiţia:

$$0{,}5[V] < V_{CE} < V_{CC} - 0{,}5[V] \qquad 2$$

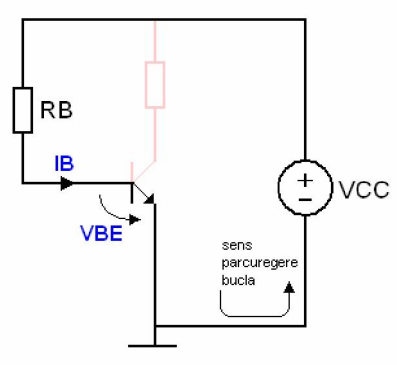
CONCLUZIE: Se observă că valoarea curentului $\mathbf{I_C}$ (şi implicit PSF-ul tranzistorului) depinde direct proporţional de parametrul β. Deci, acest circuit NU asigură independenţa PSF-ului de parametrul β şi din acest motiv PSF-ul tranzistorului nu este stabil. Din acest motiv, performanţa circuitului de polarizare prezentat în Figura 1 este redusă.

Determinarea relaţiilor de calcul a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar

a. determinarea curentului $\mathbf{I_C}$ se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scot în evidenţă curenţii prin terminalele tranzistoarelor;
- se scoate în evidenţă tensiunea bază emitor a tranzistorului $\mathbf{V_{BE}}$;
- se aplică teorema lui Kirkhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea $\mathbf{V_{BE}}$ şi NU trece prin tensiunile $\mathbf{V_{CE}}$ şi $\mathbf{V_{BC}}$ ale tranzistorului respectiv.

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



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

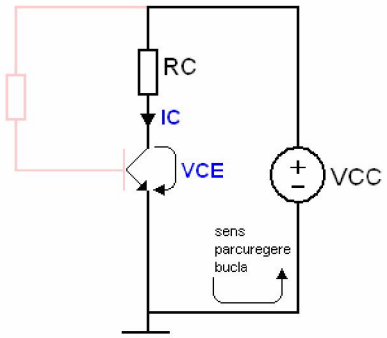
Din ecuaţiile de funcţionare ale TBJ se cunosc: $I_E \cong I_C$ şi $I_B \cong \frac{I_C}{\beta}$

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

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



Aplicând TK2 pe bucla menţionată rezultă ecuaţia: $R_C \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$

Din relaţia 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 mulţimea Punctelor Statice de Funcţionare pe care le poate avea tranzistorul bipolar, la variaţia valorilor componentelor care constituie circuitul de polarizare (**V_{CC}**, **R_B**, **R_C**). Această dreaptă se desenează în planul **I_C-V_{CE}**, iar ecuaţia dreptei respective este dată de relaţia de calcul a tensiunii **V_{CE}**, rescrisă sub următoarea formă:

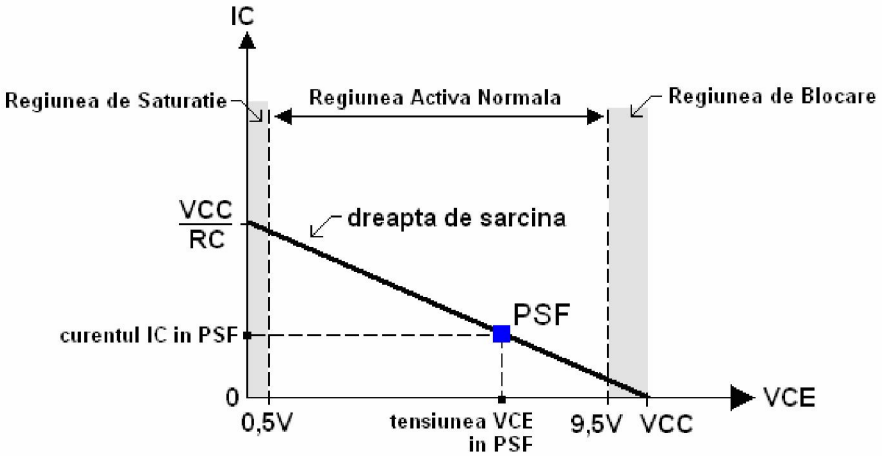
$$R_C \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

ecuaţia dreptei de sarcină statică

Intersecţia acestei drepte cu axele planului $\mathbf{I_C}$-$\mathbf{V_{CE}}$ se determină astfel:

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

Pe baza celor 2 puncte de intersecţie ale dreptei de sarcină statică cu axele OX-OY ale graficului, aceasta se desenează ca în figura de mai jos. Punctul static de funcţionare determinat la punctul precedent se află pe această dreaptă, aşa cum este prezentat în figura de mai jos. În aplicaţii, 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 1.

3. Circuit de polarizare cu rezistor în emitor

Structura circuitului este prezentată în Figura 2. Faţă de circuitul precedent, se introduce încă un rezistor $\mathbf{R_E}$, între emitor şi masa circuitului. Rolul elementelor care compun circuitul de polarizare este acelaşi ca şi în cazul circuitului precedent. În plus, prezenţa rezistorului $\mathbf{R_E}$ în circuit asigură o mai mare stabilitate a PFS-ului tranzistorului.

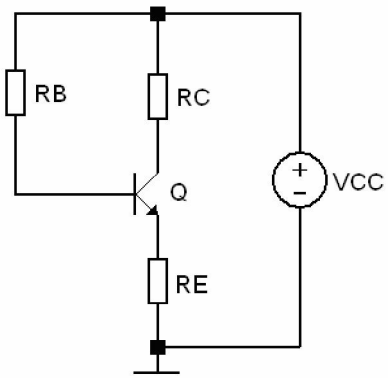


Figura 2. Circuit elementar de polarizare cu rezistor în emitor.

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

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B} \qquad 3.a$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E) \qquad 3.b$$

în care, presupunând că tranzistorul bipolar **Q** funcţionează în RAN, valoarea tensiunii bază emitor se consideră $V_{BE} = 0{,}6[V]$. Tranzistorul bipolar funcţionează în RAN dacă este satisfăcută condiţia 2.

CONCLUZIE: Se observă din formula de calcul a curentului $\mathbf{I_C}$ că parametrul β al tranzistorului bipolar se regăseşte atât la numărător cât şi la numitor. Din acest motiv, există o cale de a asigura independenţa lui $\mathbf{I_C}$ (şi implicit a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar) de parametrul β. Astfel, dacă se respectă condiţia:

$$\beta \cdot R_E >> R_B \qquad 4$$

(unde condiţia >> reprezintă "de cel puţin 10 ori mai mare") atunci, în relaţia 3.a, parametrul β se poate simplifica, iar formula de calcul a lui $\mathbf{I_C}$ devine următoarea:

$$I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E} \qquad 3.c$$

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

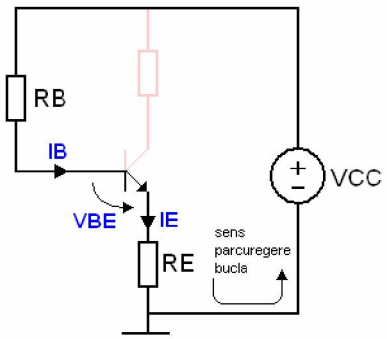
Dar, pentru acest tip de circuit, condiţia 4 nu poate fi satisfăcută simultan cu condiţia 2 . Din acest motiv, circuitul de polarizare prezentat în Figura 2 nu asigură, decât într-o măsură moderată, independenţa valorii PSF-ului tranzistorului bipolar de parametrul β, şi astfel performanţa circuitului de polarizare din Figura 2 este doar satisfăcătoare, dar, în comparaţie cu circuitul prezentat în Figura 1, superioară.

Determinarea relaţiilor de calcul a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar

a. determinarea curentului $\mathbf{I_C}$ se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scot în evidenţă curenţii prin terminalele tranzistoarelor;
- se scoate în evidenţă tensiunea bază emitor a tranzistorului $\mathbf{V_{BE}}$;
- se aplică teorema lui Kirkhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea $\mathbf{V_{BE}}$ şi NU trece prin tensiunile $\mathbf{V_{CE}}$ şi $\mathbf{V_{BC}}$ ale tranzistorului respectiv.

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



Aplicând TK2 pe bucla menţionată rezultă ecuaţia: $R_E \cdot I_E - V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0$

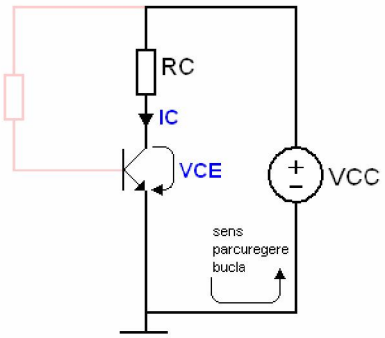
Din ecuaţiile de funcţionare ale TBJ se cunosc: $I_E \cong I_C$ şi $I_B \cong \frac{I_C}{\beta}$

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

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



Aplicând TK2 pe bucla menţionată rezultă ecuaţia: $R_E \cdot I_E - V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0$

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 mulţimea Punctelor Statice de Funcţionare pe care le poate avea tranzistorul bipolar, la variaţia 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 ecuaţia dreptei respective este dată de relaţia de calcul a tensiunii **V_{CE}**, rescrisă sub următoarea formă:

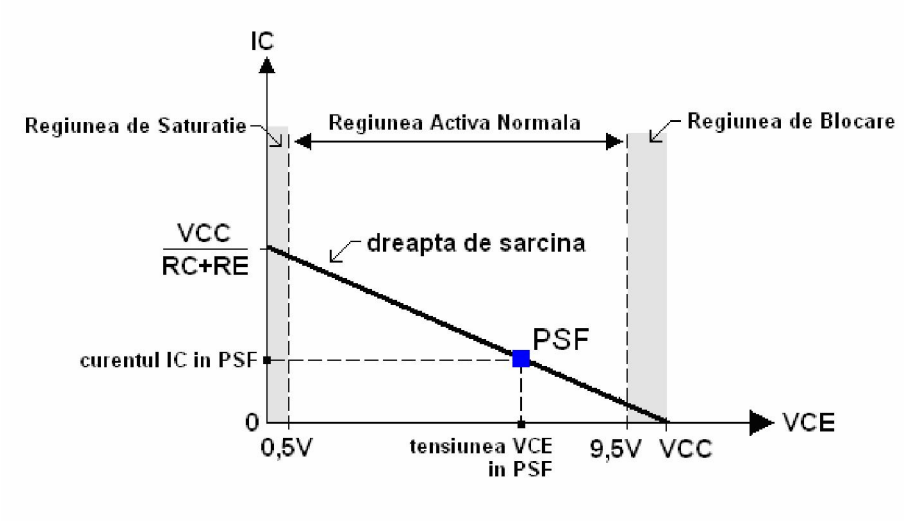
$$(R_C + R_E) \cdot I_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

ecuaţia dreptei de sarcină statică

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

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

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



Dreapta de sarcină statică a circuitului de polarizare din Figura 2.

4. Circuit de polarizare cu divizor rezistiv în bază

Structura circuitului de polarizare este prezentată în Figura 3. Faţă de circuitul precedent, se introduce încă un rezistor, notat $\mathbf{R_{B1}}$, între baza tranzistorului bipolar şi masa circuitului. Rolul elementelor de circuit, care compun circuitul de polarizare, este acelaşi ca şi în circuitul precedent. Denumirea de circuit cu divizor rezistiv în bază este determinată de reţeaua rezistivă compusă din elementele $\mathbf{R_{B1}}$ $\mathbf{R_{B2}}$, care formează un divizor rezistiv de tensiune pentru tensiunea de alimentare $\mathbf{V_{CC}}$.

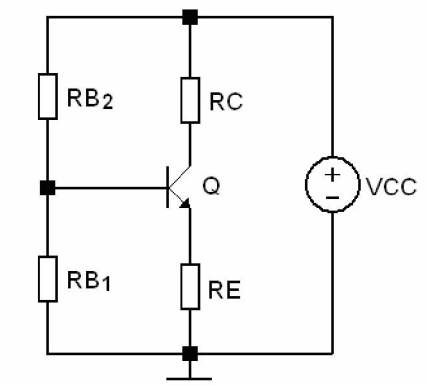


Figura 3. Circuit elementar de polarizare cu divizor rezistiv în bază.

Pentru circuitul de polarizare din Figura 3, valoarea PSF-ului tranzistorului bipolar se determină cu relaţiile următoare:

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{\beta \cdot R_E + R_B} \qquad 5.a$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E) \qquad 5.b$$

unde:

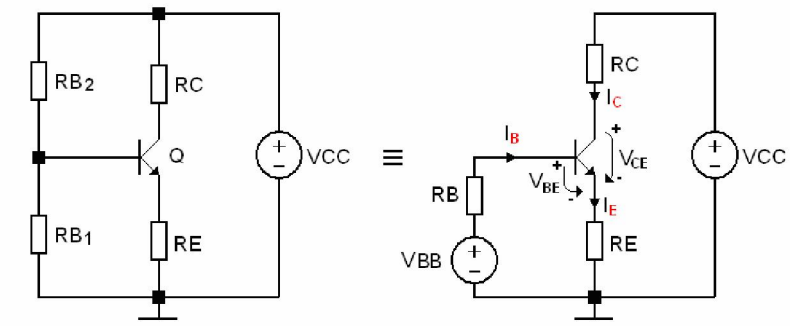
$$V_{BB} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} \qquad 5.c$$

$$R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \qquad 5.d$$

Presupunând că tranzistorul bipolar **Q** funcţionează în RAN, valoarea tensiunii bază emitor se consideră $V_{BE} = 0{,}6[V]$. Tranzistorul bipolar funcţionează în RAN dacă este satisfăcută condiţia 2.

CONCLUZIE: La fel ca şi pentru circuitul de polarizare precedent, independenţa valorii curentului $\mathbf{I_C}$ (şi implicit a valorii PSF-ului tranzistorului) de parametrul β poate fi asigurată prin respectarea condiţiei 4. Spre deosebire de circuitul precedent, pentru circuitul de polarizare din Figura 3, relaţia 4 poate fi satisfăcută simultan cu condiţia 2 şi din acest motiv, acest circuit asigură independenţa valorii PSF-ului tranzistorului bipolar de parametrul β. Astfel, performanţa circuitului de polarizare prezentat în Figura 3 este superioară celorlalte circuite de polarizare, prezentate în Figurile 1, respectiv 2.

Determinarea relaţiilor de calcul a valorii PSF-ului tranzistorului bipolar
Calculele se realizează pe circuitul din figura de mai jos, dreapta, obţinut din circuitul iniţial, prin aplicarea teoremei generatorului echivalent de tensiune (teorema lui Thevenin) între baza tranzistorului şi masa circuitului.



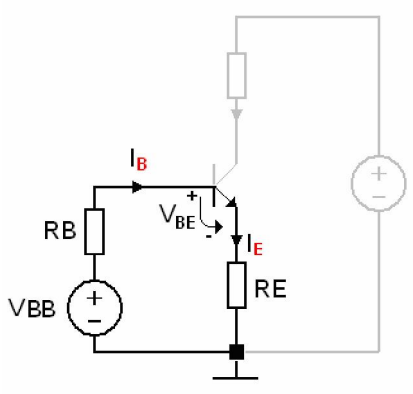
Din teorema generatorului echivalent de tensiune, elementele VBB, respectiv RB, introduse în locul reţelei rezistive RB1-RB2 prin aplicarea teoremei amintite, se determină cu relaţiile:

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

a. determinarea curentului $\mathbf{I_C}$ se realizează parcurgând următoarele etape:

- se scot în evidenţă curenţii prin terminalele tranzistoarelor;
- se scoate în evidenţă tensiunea bază emitor a tranzistorului $\mathbf{V_{BE}}$;
- se aplică teorema lui Kirkhoff 2 pe bucla de circuit care trece prin tensiunea $\mathbf{V_{BE}}$ şi NU trece prin tensiunile $\mathbf{V_{CE}}$ şi $\mathbf{V_{BC}}$ ale tranzistorului respectiv.

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



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

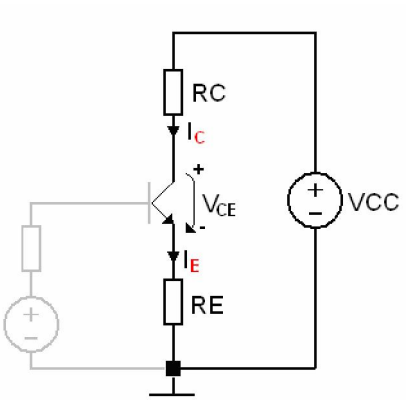
Dar: $I_B = \dfrac{I_C}{\beta} \quad si \quad I_E = I_C$

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

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

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

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



Se aplica TK2 pe bucla evidenţiată: $R_E \cdot I_E - V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0$

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 mulţimea Punctelor Statice de Funcţionare pe care le poate avea tranzistorul bipolar, la variaţia 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 ecuaţia dreptei respective este dată de relaţia de calcul a tensiunii **V_{CE}**, rescrisă sub următoarea formă:

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

ecuaţia dreptei de sarcină statică

Deoarece se remarcă faptul că ecuaţia dreptei de sarcină statică a acestui circuit este identică cu cea a circuitului de polarizare din Figura 2, dreapta de sarcină pentru circuitul din Figura 3 este identică cu cea obţinută pentru circuitul din Figura 2.

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

$$0{,}5[V] < V_{EC} < V_{CC} - 1[V]$$