

CAPITOLUL 5. TRANZISTOARE BIPOLARE

5.1. TRANZISTOARE BIPOLARE - GENERALITĂȚI

5.1.1 STRUCTURA ȘI SIMBOLUL TRANZISTORULUI BIPOLAR

Tranzistorul bipolar – este un dispozitiv electronic realizat din material semiconductor, format din trei regiuni (EMITOR, BAZĂ, COLECTOR) separate prin două joncțiuni *pn*.

În funcție de tipul regiunilor, tranzistoarele bipolare se împart în două categorii:

NPN și PNP

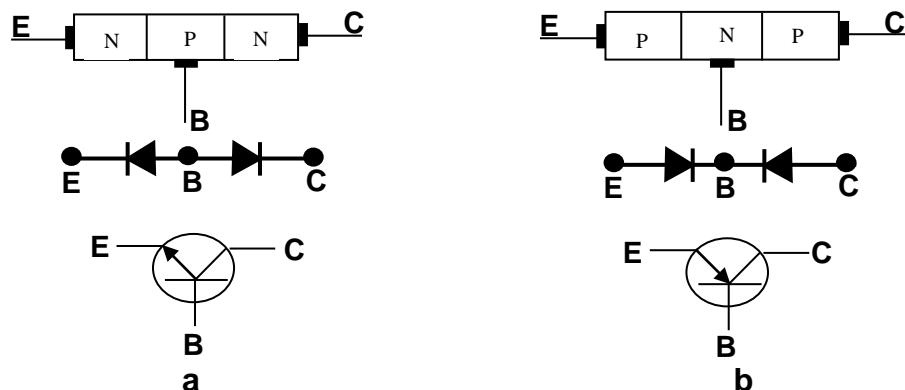


Figura 5.1 Structura și simbolul tranzistorului bipolar

a - tranzistor NPN ; b – tranzistor PNP

Tranzistorul de tip NPN este format din două regiuni N separate de o regiune P.

Tranzistorul de tip PNP este format din două regiuni P separate de o regiune N.

Regiunea bazei este mai subțire și mai slab dopată în comparație cu regiunea emitorului (puternic dopată) și cu regiunea colectorului (dopată moderat).

Între două regiuni învecinate se formează o joncțiune. Între bază și emitor este *joncțiunea bază-emitor*, iar între bază și colector este *joncțiunea bază-colector*.

Fiecare regiune are atașată câte un terminal care se notează cu E(emitor) , B(bază), C(colector).

În structura tranzistorului bipolar, purtătorii de sarcină electrică sunt atât golarile cât și electronii. Deoarece conductția este realizată de două tipuri de purtători, tranzistorul se numește bipolar.

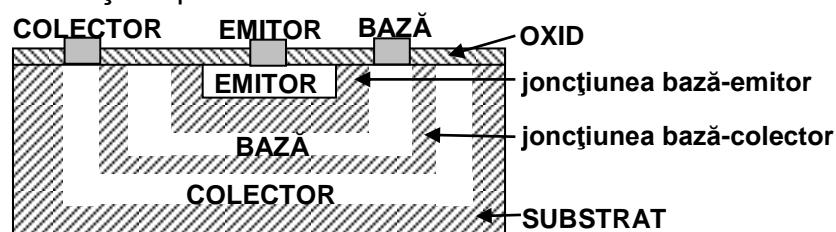


Figura 5.2 Secțiunea de principiu printr-un tranzistor

5.1.2 ÎNCAPSULAREA TRANZISTOARELOR. IDENTIFICAREA TERMINALELOR.

a. Încapsularea tranzistoarelor

Tranzistoarele, în funcție de destinația lor se realizează într-o gamă largă de capsule. Tranzistoarele pot avea capsule din *metal* sau *material plastic*, care au dimensiuni mai mici sau mai mari în funcție de destinația care o au.

În funcție de destinația lor tranzistoarele se împart în 3 mari categorii:

- **tranzistoare de semnal mic** – se utilizează la frecvențe joase (sub 100 kHz) și curenți mici (sub 1 A);

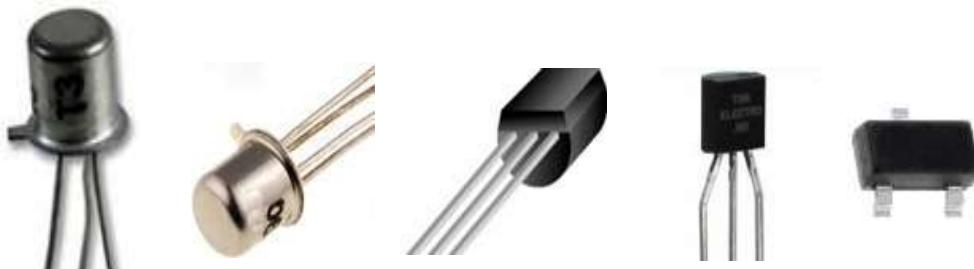


Figura 5.3 Capsule de tranzistoare de semnal mic (uz general)

- **tranzistoare de putere** – se utilizează la curenți mari (peste 1 A);



Figura 5.4 Capsule de tranzistoare de putere

- **tranzistoare de radio-frecvență (RF)** – se utilizează la frecvențe foarte înalte.



Figura 5.5 Capsule de tranzistoare de radio-frecvență

b. Identificarea terminalelor tranzistoarelor bipolare.

Identificarea terminalelor în funcție de tipul capsulei

- **tranzistoare de uz general în capsulă metalică** – la majoritatea tranzistoarelor din această categorie Emitorul este terminalul de lângă cheită, Colectorul este în partea opusă iar Baza este la mijloc. Terminalele sunt dispuse sub forma unui triunghi echilateral.

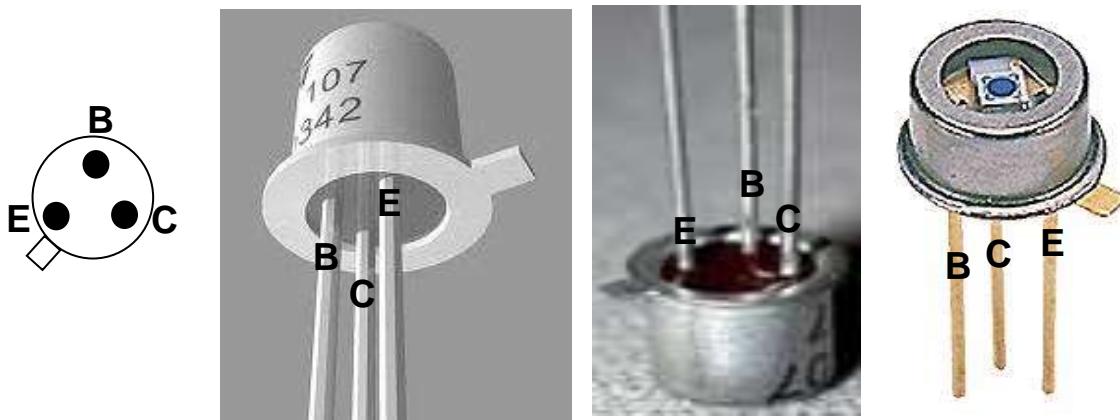


Figura 5.6 Dispunerea terminalelor la tranzistoarele în capsulă metalică

- **tranzistoare de uz general în capsulă din material plastic** – la tranzistoarele din această categorie terminalele sunt dispuse liniar cu baza în mijloc. La majoritatea, terminalele sunt dispuse ca în **figura 5.7**, dar sunt și familii de tranzistoare din această categorie la care Emitorul și Colectorul sunt dispuse invers față de cum sunt prezentate în **figura 5.7**.

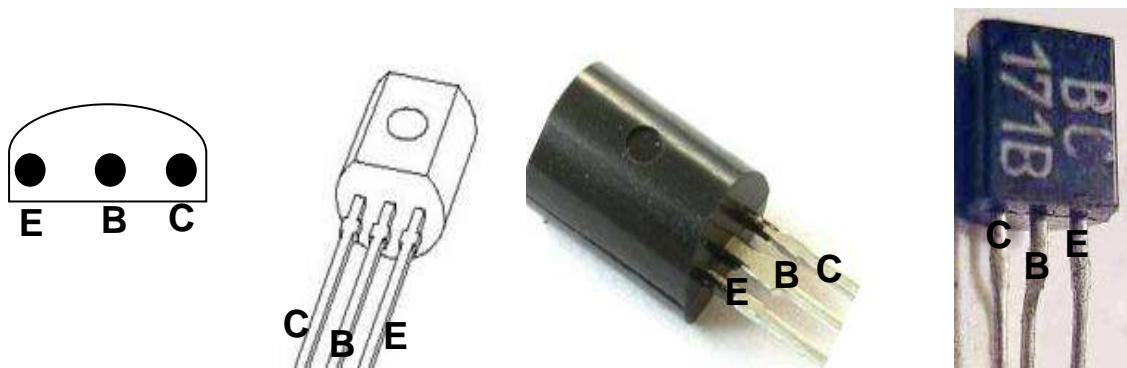


Figura 5.7 Dispunerea terminalelor la tranzistoarele în capsulă din plastic

- **tranzistoare de putere** – la tranzistoarele din această categorie Colectorul este conectat la partea metalică a tranzistorului. La majoritatea tranzistoarelor din această categorie terminalele sunt dispuse liniar iar Colectorul este la mijloc. La tranzistoarele care au numai 2 terminale (vezi 2N3055), Colectorul este corpul metalic al tranzistorului.

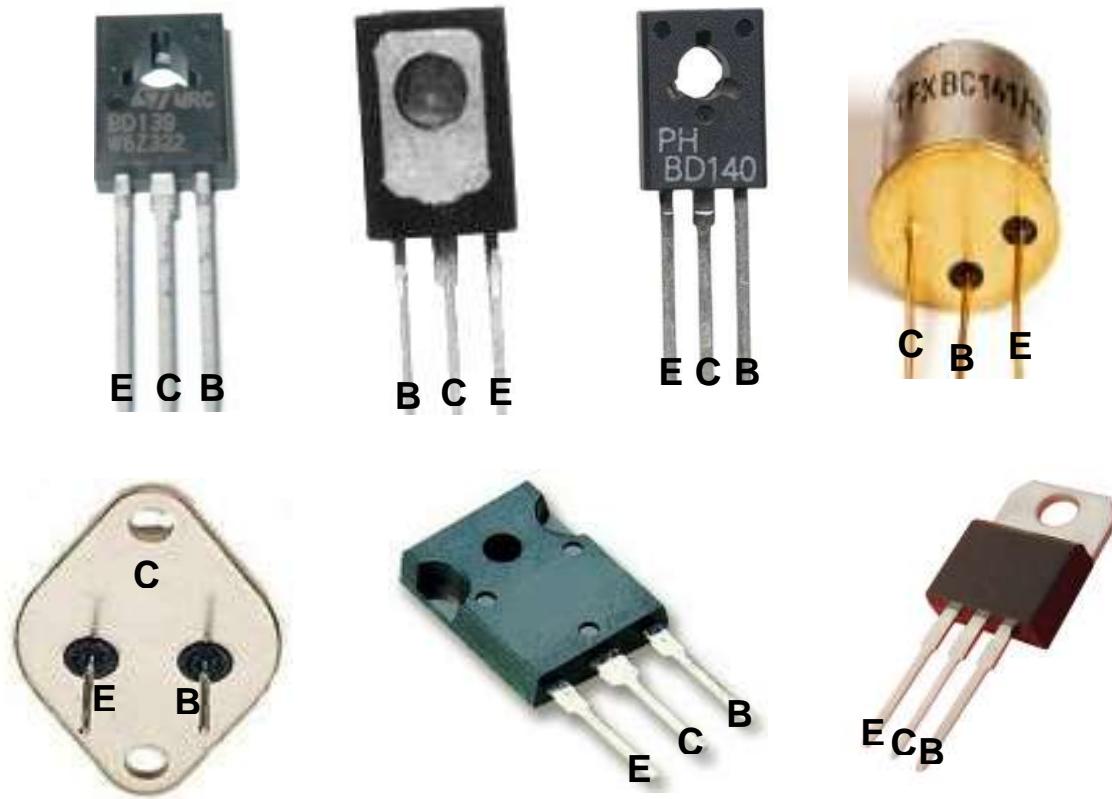


Figura 5.8 Dispunerea terminalelor la tranzistoarele de putere

OBSERVAȚIE IMPORTANTĂ!

La unele familii de tranzistoare terminalele pot fi dispuse altfel decât sunt prezentate în figurile de mai sus chiar dacă capsulele sunt identice. Metoda cea mai sigură de identificare a terminalelor este măsurarea rezistenței electrice între terminalele tranzistorului, metodă ce va fi prezentată în cele ce urmează.

5.1.3 FUNCȚIONAREA TRANZISTORULUI BIPOLAR

Un tranzistor bipolar funcționează corect, dacă joncțiunea bază-emitor este polarizată direct cu o tensiune mai mare decât tensiunea de prag, iar joncțiunea bază-colector este polarizată invers cu o tensiune mult mai mare decât tensiunea bază-emitor.

Emitorul este sursa de purtători care determină curentul prin tranzistor, iar colectorul colectează purtătorii ajunși aici. Baza controlează curentul prin tranzistor în funcție de valoarea tensiunii de polarizare a joncțiunii bază-emitor.

Joncțiunea emitor-bază (polarizată direct) injectează un curent de emitor I_E care este colectat în cea mai mare parte de joncțiunea colector-bază (polarizată invers), acest proces definind efectul de tranzistor.

Tranzistorul bipolar transferă curentul din circuitul de intrare de rezistență mică, în circuitul de ieșire de rezistență mare, de unde denumirea TRANSfer reZISTOR \Leftrightarrow TRANZISTOR.

a. Funcționarea tranzistorului NPN.

La acest tip de tranzistor purtătorii majoritari sunt electronii.

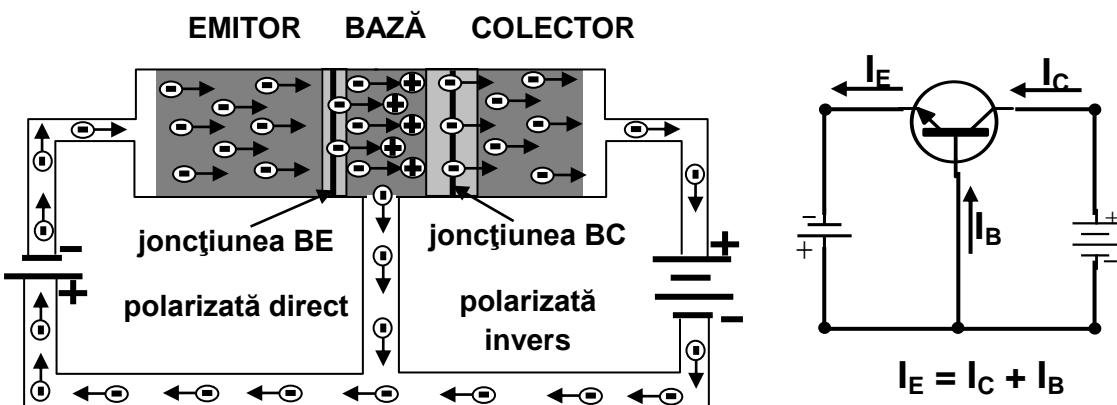


Figura 5.13 Prezentarea funcționării tranzistorului NPN

Regiunea de tip n a emitorului este puternic dopată cu electroni liberi. Regiunea de tip p a bazei este foarte subțire și slab dopată cu goluri. Prin polarizarea directă a joncțiunii BE electronii din regiunea emitorului difuzează cu ușurință prin joncțiunea BE către regiunea bazei. Aici un procent foarte mic de electroni se combină cu golurile din bază și formează curentul de bază. Prin polarizarea inversă a joncțiunii BC majoritatea electronilor difuzează prin joncțiunea BC și sunt atrași către regiunea colectorului de către tensiunea de alimentare a colectorului, formându-se astfel curentul de colector.

b. Funcționarea tranzistorului PNP.

La acest tip de tranzistor purtătorii majoritari sunt golurile.

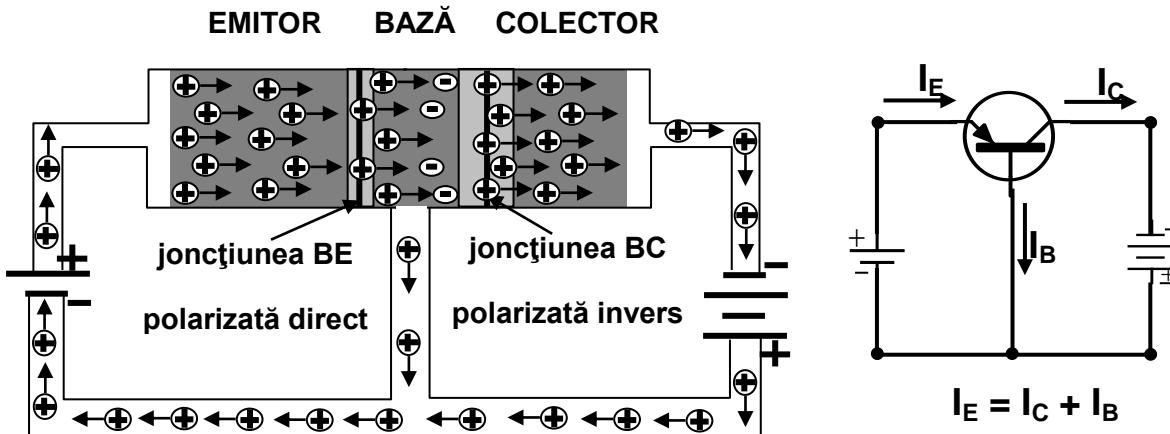


Figura 5.14 Prezentarea funcționării tranzistorului PNP

Regiunea de tip p a emitorului este puternic dopată cu goluri. Regiunea de tip n a bazei este foarte subțire și slab dopată cu electroni. Prin polarizarea directă a joncțiunii BE golurile din regiunea emitorului difuzează cu ușurință prin joncțiunea BE către regiunea bazei. Aici un procent foarte mic de goluri se combină cu electronii din bază și formează curentul de bază. Prin polarizarea inversă a joncțiunii BC majoritatea golurilor difuzează prin joncțiunea BC și sunt atrași către regiunea colectorului de către tensiunea de alimentare a colectorului, formându-se astfel curentul de colector.

5.1.4 PARAMETRII ȘI CARACTERISTICILE TRANZISTORULUI BIPOLAR

a. Parametrii tranzistorului bipolar

a1. Factorul de amplificare al tranzistorului

Factorul de amplificare în curent din bază în colector (β_{CC}) – reprezintă raportul dintre curentul continuu prin colector (I_C) și curentul continuu prin bază (I_B)

$$\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1)$$

β este o mărime statică de curent continuu, care indică de câte ori este mai mare curentul prin colectorul tranzistorului decât curentul prin baza tranzistorului. Acest parametru mai poartă denumirea de câștig în curent al tranzistorului.

Valoarea acestui parametru este menționat de către producător în foile de catalog, ca parametru echivalent hibrid h_{FE}

$$h_{FE} = \beta_{CC} \quad (2)$$

Valorile parametrului β sunt cuprinse între 10 și 1000, în funcție de tipul tranzistorului.

Factorul de amplificare în curent din emitor în colector (α_{CC}) – reprezintă raportul dintre curentul continuu prin colector (I_C) și curentul continuu prin emitor (I_E)

$$\alpha_{CC} = \frac{I_C}{I_E} \quad (3)$$

Acest parametru este întotdeauna subunitar deoarece curentul de colector (I_C) este întotdeauna mai mic decât curentul de emitor (I_E).

Valorile parametrului α sunt cuprinse între 0,95 și 0,99 în funcție de tipul tranzistorului. Între parametrii β și α sunt următoarele relații:

$$\beta_{CC} = \frac{\alpha_{CC}}{1 - \alpha_{CC}} \quad (4) \qquad \alpha_{CC} = \frac{\beta_{CC}}{1 + \beta_{CC}} \quad (5)$$

a2. Valorile maxime absolute

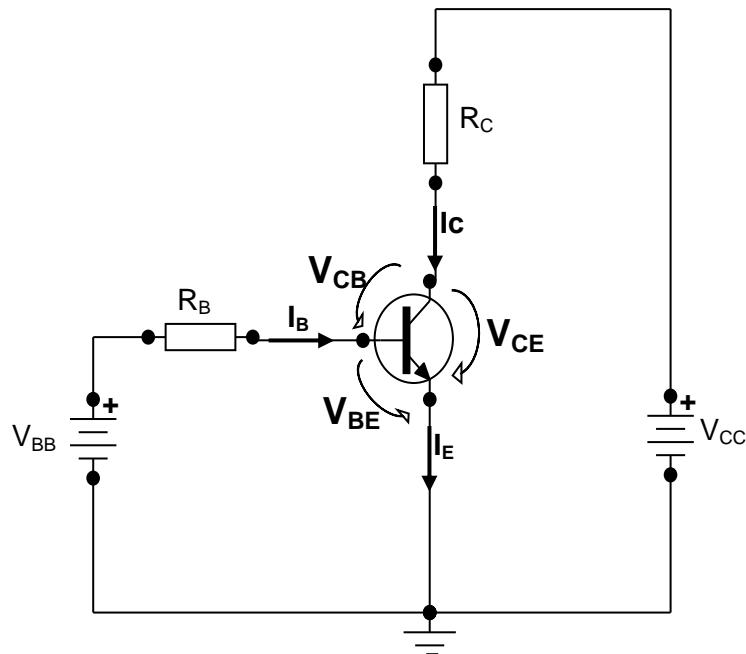
Sunt valori care nu trebuie depășite în timpul funcționării tranzistorului, deoarece pot produce defectarea acestuia. De regulă în această grupă apar:

- Tensiunile maxime între terminale: V_{CBO} , V_{CEO} , V_{EBO} ;
- Curentul maxim de colector și de bază: I_{CM} , I_{BM} ;
- Puterea maximă disipată: P_{tot} ;
- Temperatura maximă a jonctiunii: T_{jM} (este cuprinsă între 175°C și 200°C).

În practică se recomandă încărcarea tranzistorului la cel mult 0,75 din valorile de catalog ale acestor parametrii.

b. Caracteristicile tranzistorului bipolar.

b1. Caracteristicile electrice



I_B – curentul continuu de bază

I_C – curentul continuu de colector

I_E – curentul continuu de emitor

V_{CB} – tensiunea colector-bază

V_{BE} – tensiunea bază-emitor

V_{CE} – tensiunea colector-emitor

V_{BB} – sursă de tensiune continuă care polarizează direct joncțiunea bază - emitor

Figura 5.1.15 Curenții și tensiunile tranzistorului

$$V_{BE} = 0,7V \quad (1)$$

$$I_B = \frac{V_{R_B}}{R_B} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad (2)$$

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B \quad (3)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad (4)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{R_C} = V_{CC} - I_C \cdot R_C \quad (5)$$

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} \quad (6)$$

V_E , V_B , V_C - reprezintă tensiunile pe terminalele tranzistorului. Aceste tensiuni se măsoară între terminalul respectiv și "masa" montajului.

b2. Caracteristicile statice

Acste caracteistici sunt grafice ce reprezintă dependența dintre curenți ce trec prin terminalele tranzistorului și tensiunile ce se aplică la aceste terminale. Fiecare schemă de conectare a unui tranzistor se caracterizează prin patru familii de caracteistici:

- $I_{IEŞ} = f(U_{IEŞ})$ la $I_{INT} = \text{constant}$ – caracteisticile de ieșire;
- $U_{INT} = f(I_{INT})$ la $U_{IEŞ} = \text{constant}$ – caracteisticile de intrare;
- $I_{IEŞ} = f(I_{INT})$ la $U_{IEŞ} = \text{constant}$ – caracteisticile de transfer a curentului;
- $U_{INT} = f(U_{IEŞ})$ la $I_{INT} = \text{constant}$ – caracteisticile de reacție inversă după tensiune.

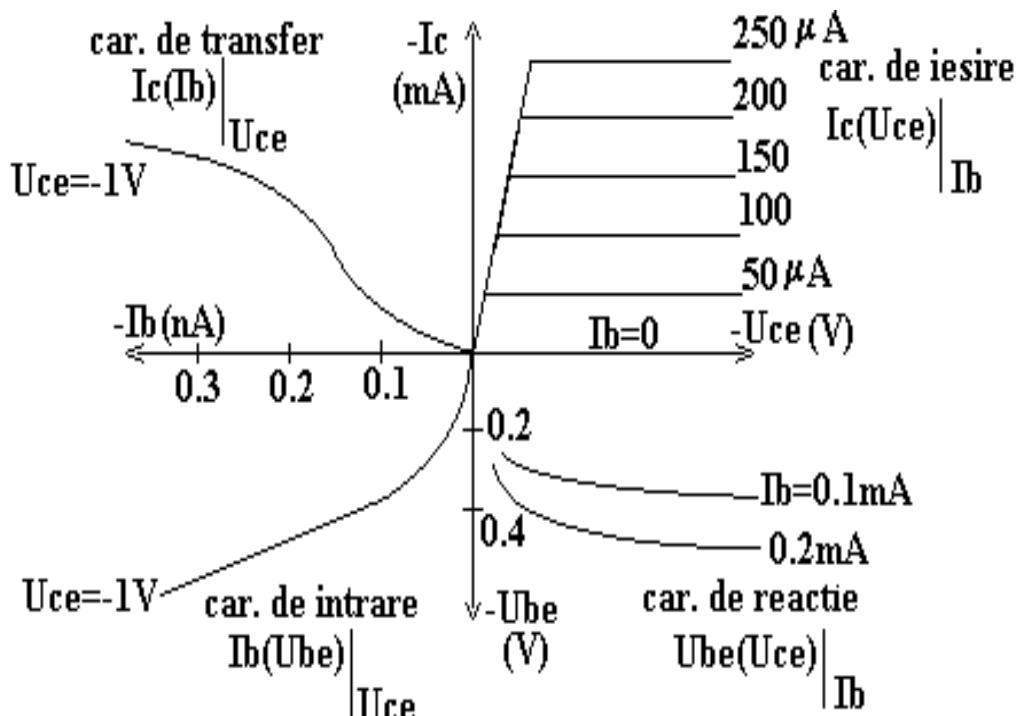


Figura 5.16 Caracteristicile statice ale tranzistorului bipolar în conexiunea EC

În cataloagele de tranzistoare sunt prezentate caracteistica de intrare și caracteistica de ieșire, deoarece aceste caracteisticile sunt mai importante. Pe caracteistica de ieșire se pot delimita regiunile de funcționare a tranzistorului și se poate trasa dreapta de sarcină.

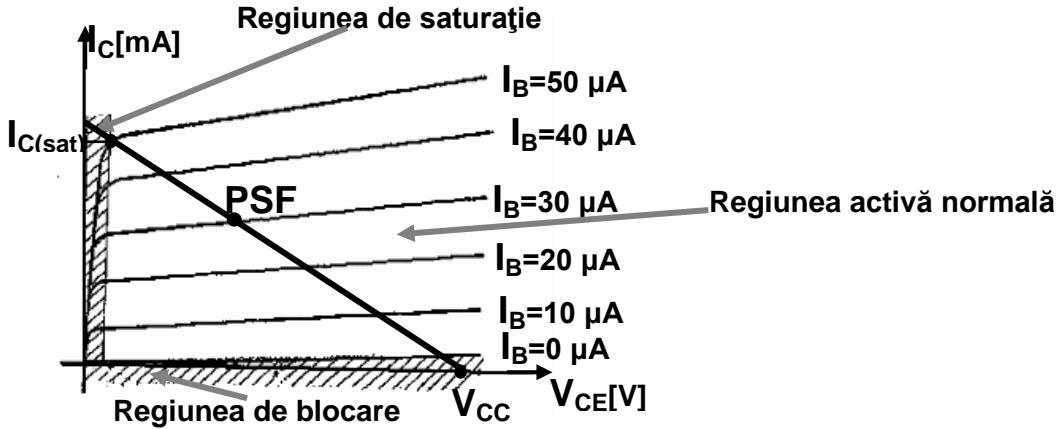


Figura 5.17 Caracteristica de ieșire a tranzistorului bipolar în conexiunea EC

În regiunea de blocare tranzistorul funcționează în regim de blocare (tăiere):

- joncțiunea bază – emitor este polarizată invers (sau direct cu o tensiune mai mică decât tensiunea de prag);
- joncțiunea bază – colector este polarizată invers;
- curenții prin tranzistor sunt foarte mici, practic $I_C=0$;
- tensiunea de ieșire are valoare mare, practic $V_{CE} = V_{CC}$;
- tranzistorul se comportă ca un întrerupător deschis.

În regiunea de saturatie tranzistorul funcționează în regim de saturatie:

- joncțiunea bază – emitor este polarizată direct;
- joncțiunea bază – colector este polarizată direct;
- curentul de saturatie este mai mare decât în regim activ normal $I_{C(sat)} > \beta \cdot I_B$;
- tensiunea de saturatie este foarte mică $V_{CE(sat)} = 0,2 – 0,3$ V;
- tranzistorul se comportă ca un întrerupător închis.

În regiunea activă normală tranzistorul funcționează în regim activ normal (RAN):

- joncțiunea bază – emitor este polarizată direct;
- joncțiunea bază – colector este polarizată invers;
- curentul prin tranzistor este mare $I_C = \beta \cdot I_B$;
- tensiunea de ieșire (V_{CE}) este mică;
- tranzistorul se comportă ca un amplificator de semnal.

Pe graficul caracteristicii de ieșire (figura 5.17) dacă se unește punctul de blocare (V_{CC}) cu punctul de saturatie ($I_{C(sat)}$) se obține dreapta de sarcină în curent continuu. De-a lungul dreptei de sarcină între cele două puncte se află regiunea activă normală de funcționare a tranzistorului. La intersecția unei caracteristici de ieșire cu dreapta de sarcină se află punctul static de funcționare (PSF).

5.1.5 FUNCȚIILE TRANZISTORULUI BIPOLAR.

Din graficul caracteristicii de ieșire a tranzistorului se observă că tranzistorul bipolar are două funcții importante:

- Funcția de amplificare – când tranzistorul funcționează în regim activ normal;
- Funcția de comutare – când tranzistorul funcționează în regim de blocare și în regim de saturatie.

a. FUNCȚIA DE AMPLIFICARE.

Când tranzistorul este polarizat astfel încât să lucreze în regiunea activă, acesta poate amplifica atât un semnal de formă continuă cât și un semnal de formă alternativă.

În circuitul de curent continuu tranzistorul amplifică curentul din bază (figura 5.18 a)

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B \quad (1)$$

În circuitul echivalent de curent alternativ tranzistorul amplifică tensiunea alternativă din bază (figura 5.18 b)

$$A_V = \frac{V_C}{V_B} \quad (2)$$

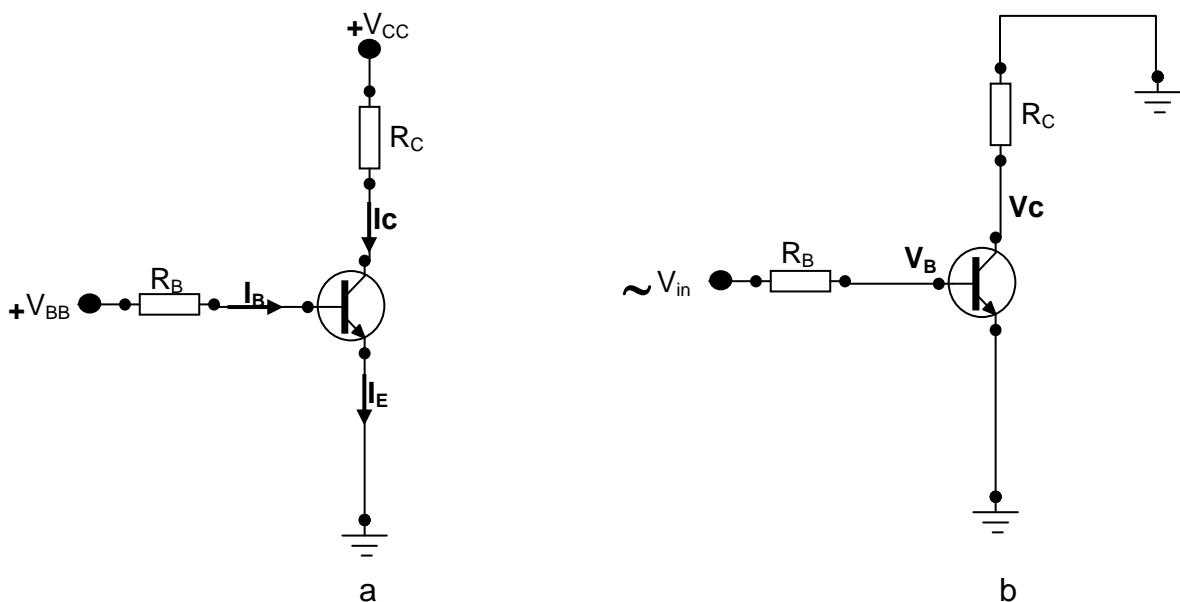


Figura 5.18 Funcția de amplificare a tranzistorului bipolar în conexiunea EC

b. FUNCȚIA DE COMUTARE.

Tranzistorul bipolar când lucrează în regim de comutație, trece alternativ din starea de blocare în starea de saturăție.

În starea de blocare, când jonctiunea bază-emitor nu este polarizată direct, tranzistorul se comportă ca un întrerupător deschis și prin el nu circulă curent (**figura 5.19 a)**

În această situație tensiunea colector-emitor este maximă:

$$V_{CE(blocare)} = V_{CC} \quad (3) \text{ - condiția de blocare}$$

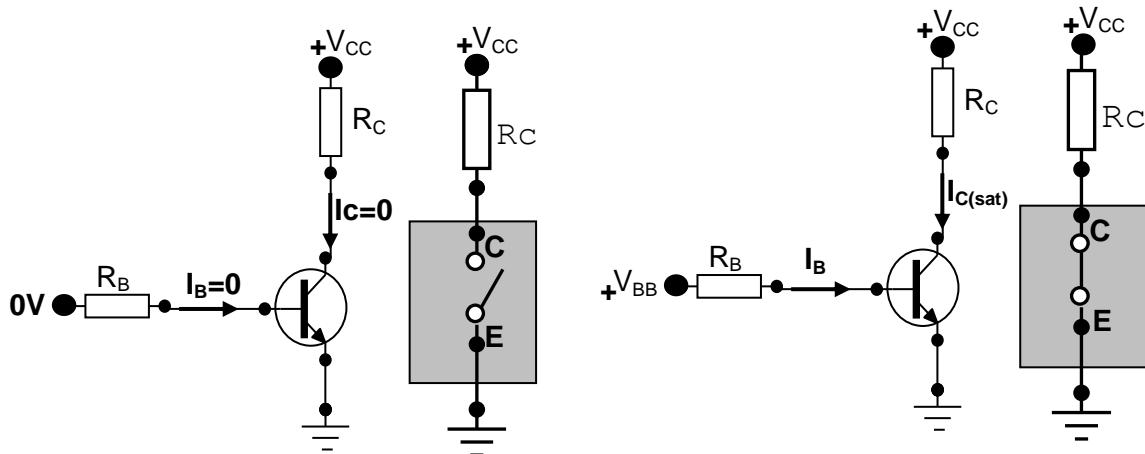
În starea de saturăție, când jonctiunea bază-emitor este polarizată direct, tranzistorul se comportă ca un întrerupător închis și prin el circulă un curent (**figura 5.19 b)**

Valoarea curentului care circulă de la colector spre emitor este:

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (4) \quad V_{CE(sat)} \approx 0$$

Valoarea minimă a curentului de bază pentru a aduce tranzistorul în saturăție este:

$$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{CC}} \quad (5)$$



(a) Blocare – întrerupător deschis

(b) Saturăție – întrerupător închis

Figura 5.19 Funcția de comutare a tranzistorului bipolar în conexiunea EC

5.2 CONEXIUNILE TRANZISTOARELOR BIPOARE

Conexiunile TB reprezintă modurile de conectare a unui tranzistor într-un circuit.

Tranzistorul poate fi conectat în circuit în 3 configurații de bază:

- Conexiunea emitor comun;
- Conexiunea bază comună;
- Conexiunea colector comun.

O conexiune are o poartă de intrare și o poartă de ieșire.

Fiecare poartă este prevăzută cu câte două terminale (borne).

Prin termenul “**comun**” se definește terminalul care este comun atât intrării cât și ieșirii.

Acest terminal se conectează la “masa” montajului.

Pentru a identifica tipul conexiunii se procedează astfel:

- se identifică terminalul pe care se aplică semnalul de intrare;
- se identifică terminalul de pe care se culege semnalul de ieșire;
- terminalul rămas este cel comun, care dă numele conexiunii.

5.2.1 CONEXIUNEA EMITOR COMUN

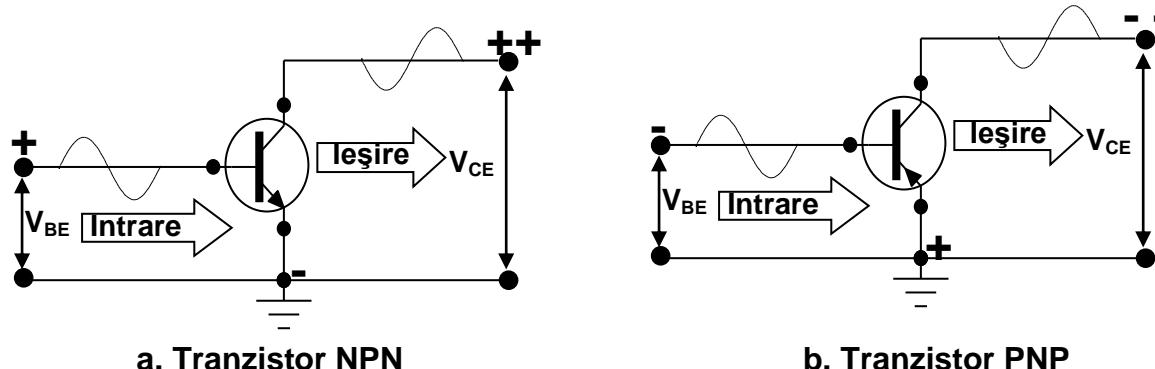


Figura 5.22 Conexiunea emitor comun

În această conexiune **EMITORUL** este comun intrării și ieșirii circuitului. Conexiunea este utilizată în circuitele de amplificare în tensiune, curent și putere. Este cea mai utilizată conexiune, deoarece are cea mai eficientă combinație de amplificare în tensiune și curent.

Amplificarea în curent (**β - beta**) este raportul dintre curentul de ieșire și curentul de intrare.

$$(1) h_{FE} = h_{21} = \beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{factorul de amplificare în curent}$$

Mărimile caracteristice conexiunii emitor comun:

- impedanța de intrare este medie ($500 \Omega - 1500 \Omega$);
- impedanța de ieșire este mare ($30 \text{ k}\Omega - 50 \text{ k}\Omega$);
- amplificarea în curent mare ($10 - 100$);
- amplificarea în tensiune mare (peste 100);
- amplificarea în putere foarte mare (până la 10.000);
- semnalul de ieșire este defazat cu 180° față de semnalul de intrare.

5.2.2 CONEXIUNEA BAZĂ COMUNĂ

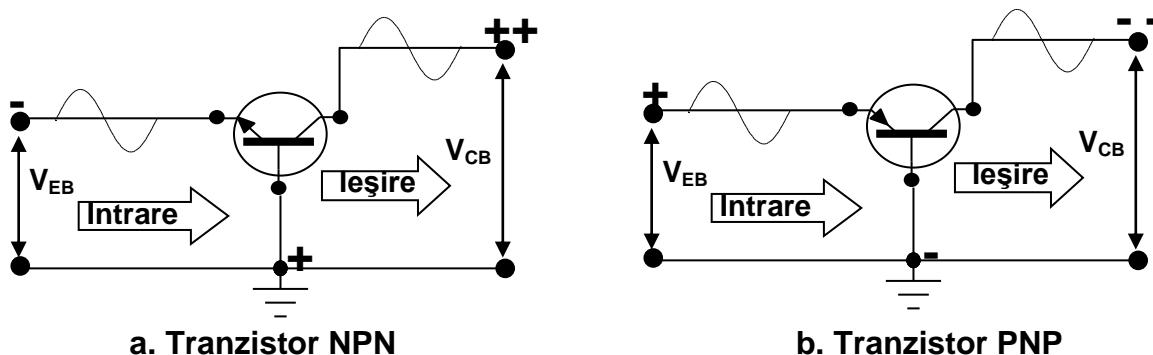


Figura 5.23 Conexiunea bază comună

În această conexiune **BAZA** este comună intrării și ieșirii, semnalul de intrare este aplicat pe emitor iar semnalul de ieșire este cules de pe colector. Amplificarea în curent (**α - alfa**) este raportul dintre curentul de ieșire și curentul de intrare.

$$(2) \quad \alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

Mărimile caracteristice conexiunii bază comună:

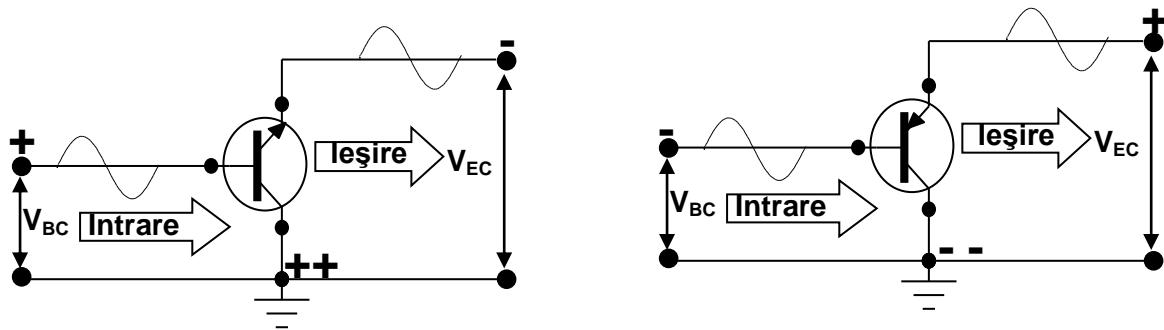
- impedanța de intrare este mică ($30 \Omega - 160 \Omega$);
- impedanța de ieșire este mare ($250 \text{ k}\Omega - 550 \text{ k}\Omega$);
- amplificarea în curent unitară (1);
- amplificarea în tensiune mare (până la 1000);
- amplificarea în putere mare (până la 1000);
- semnalul de ieșire este în fază cu semnalul de intrare.

Se utilizează în etajele amplificatoare de RF din receptoarele UUS.

Avantaj - lucrează la frecvențe foarte înalte.

Dezavantaj - rezistență de intrare mică.

5.2.3 CONEXIUNEA COLECTOR COMUN



a. Tranzistor NPN

b. Tranzistor PNP

Figura 5.24 Conexiunea colector comun

În această conexiune **COLECTORUL** este comun intrării și ieșirii, semnalul de intrare este aplicat pe bază iar semnalul de ieșire este cules de pe emitor.

Conexiunea se mai numește și repetor pe emitor, deoarece tensiunea de ieșire este aproximativ egală cu tensiunea de intrare.

Amplificarea în curent (**γ - gama**) este raportul dintre curentul de ieșire și curentul de intrare

$$(3) \quad \gamma = \frac{I_E}{I_B}$$

Mărimile caracteristice conexiunii colector comun:

- impedanța de intrare este mare ($2 \text{ k}\Omega$ - $500 \text{ k}\Omega$);
- impedanța de ieșire este mică (50Ω – 1500Ω);
- amplificarea în curent mare (peste 10);
- amplificarea în tensiune unitară (1);
- amplificarea în putere mare (peste 10);
- semnalul de ieșire este în fază cu semnalul de intrare.

Conexiunea colector comun se utilizează când se dorește o rezistență de intrare foarte mare și o rezistență de ieșire mică.

Conexiunea se utilizează în general ca adaptor de impedanță între impedanța de ieșire a unui amplificator și o rezistență de sarcină de valoare mică.

5.3. POLARIZAREA TRANZISTOARELOR BIPOARE

Prin polarizarea unui tranzistor se înțelege, modul de conectare a surselor de alimentare la bornele tranzistorului, astfel încât acesta să funcționeze ca amplificator. Prin polarizarea corectă a unui tranzistor se urmărește stabilirea și menținerea valorilor corecte pentru tensiunile și curentii din circuit și determinarea punctului static de funcționare.

5.3.1 PUNCTUL STATIC DE FUNCȚIONARE (PSF)

În **figura 5.25** se observă că punctul static de funcționare se află pe dreapta de sarcină, la intersecția acesteia cu caracteristica statică de ieșire a tranzistorului.

Pentru funcționarea cât mai corectă a unui amplificator (semnalul de intrare să fie amplificat și reproducă fidel la ieșire), punctul static de funcționare trebuie să fie situat cam la jumătatea dreptei de sarcină.

Odată cu deplasarea PSF în regiunea de saturatie sau în regiunea de blocare, semnalul de ieșire este distorsionat.

Dacă PSF este situat în regiunea de saturatie sunt distorsionate semialternanțele pozitive ale semnalului alternativ sinusoidal de intrare (**figura 5.26 a**).

Dacă PSF este situat în regiunea de blocare sunt distorsionate semialternanțele negative ale semnalului alternativ sinusoidal de intrare (**figura 5.26 b**).

Coordonatele punctului static de funcționare (I_C , V_{CE}) sunt impuse de valorile tensiunilor surselor de polarizare și de valorile rezistențelor din circuitele de polarizare.

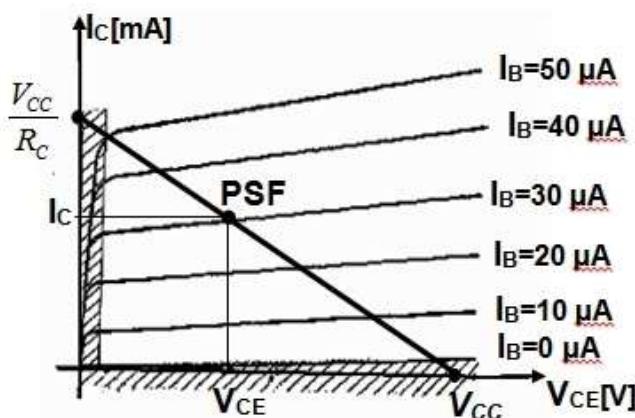


Figura 5.25 Caracteristica pentru determinarea PSF

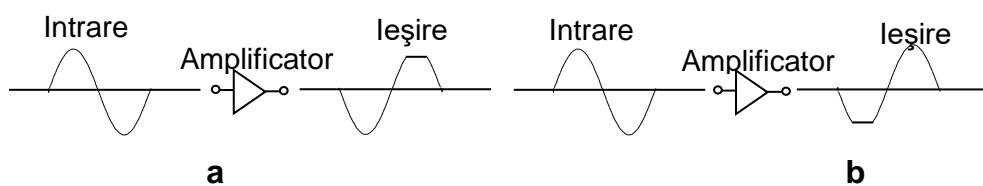


Figura 5.26 Distorsionarea semnalului de ieșire la un amplificator cu TB

Determinarea PSF pentru conexiunea EC.

Se va determina PSF al circuitului din **figura 5.27**.

Pentru tranzistorul BC 546BP se consideră $\beta_{CC} = 200$.

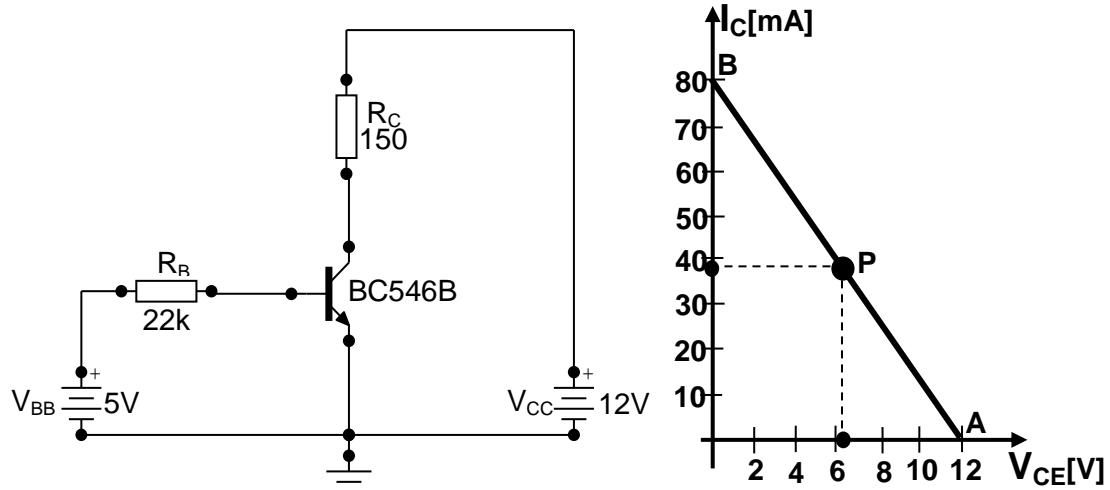


Figura 5.27 Circuit pentru determinarea PSF la un TB în conexiunea EC

Se determină coordonatele dreptei de sarcină, apoi se trasează dreapta

$$(1) \quad V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE}$$

Pentru $I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 12 \text{ V} \Rightarrow A(12, 0)$

$$\text{Pentru } V_{CE} = 0 \Rightarrow V_{CC} = R_C \cdot I_C \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \Rightarrow I_C = \frac{12V}{150\Omega} = 80mA \Rightarrow B(0, 80)$$

Se determină coordonatele punctului static de funcționare P(I_S, V_{CE})

$$(2) \quad I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,7}{22K} \cong 195\mu A$$

$$(3) \quad I_C = I_B \cdot \beta_{CC} = 195\mu A \cdot 200 = 39mA \quad \Rightarrow \quad I_C = 39mA$$

$$(4) \quad V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12V - 39mA \cdot 150\Omega \cong 6,2V \Rightarrow V_{CE} = 6,2V$$

Punctul static de funcționare are coordonatele P(6,2V ; 39mA)

Se determină valoarea maximă a curentului de bază în funcționare liniară

$$(5) \quad I_{C(vârf)} = I_{C(sat)} - I_{C(PSF)} = 80mA - 39mA = 41mA$$

$$(6) \quad I_{B(vârf)} = \frac{I_{C(vârf)}}{\beta_{CC}} = \frac{41mA}{200} = 205\mu A$$

5.3.2 POLARIZAREA BAZEI DE LA V_{CC}

Prin această metodă baza tranzistorul se polarizează prin intermediul unei rezistențe **R_b** de la sursa de alimentare **V_{CC}** (figura 5.28). Configurația este instabilă, nu funcționează liniar, de aceea nu se utilizează în practică. Poate fi utilizată la circuitele care lucrează în comutație.

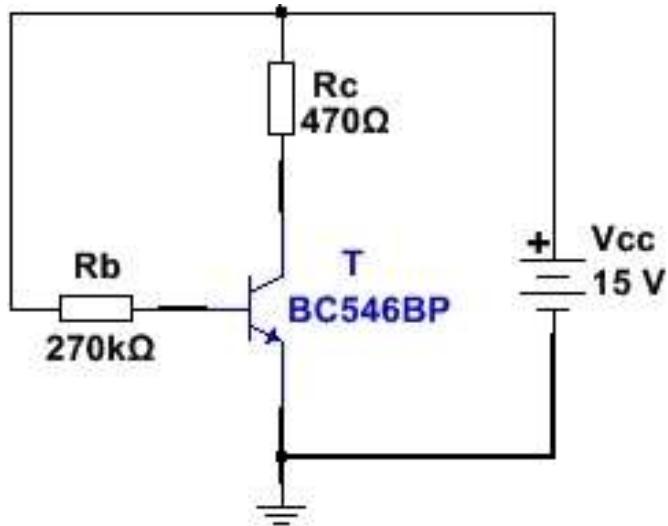


Figura 5.28 Polarizarea tranzistorului bipolar cu un rezistor în bază

Tranzistorul BC546BP are $\beta_{CC} = 300$.

Se aplică legea a II-a a lui Kirchhoff pe ochiul ce conține jonctiunea colector-emitor:

$$V_{CC} - V_{CE} - I_C \cdot R_C = 0 \quad (1)$$

$$\text{Din relația (1)} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C \quad (2)$$

$$\text{Căderea de tensiune pe rezistorul } R_b \text{ este: } U_{Rb} = V_{CC} - V_{BE} \quad (3)$$

$$\text{Dar: } U_{Rb} = R_b \cdot I_B \quad (4)$$

$$\text{Înlocuind (4) în (3) se obține relația: } R_b \cdot I_B = V_{CC} - V_{BE} \quad (5)$$

$$\text{Din relația (5)} \Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \quad (6)$$

$$\text{Știm că } I_C = \beta_{CC} \cdot I_B \quad (7)$$

$$\text{Înlocuind relația (6) în (7) se obține relația: } I_C = \beta_{CC} \cdot \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \right) \quad (8)$$

Din relația (8) se observă că I_c este dependent de β_{CC} .

Deoarece β_{CC} se modifică cu modificarea temperaturii și depinde de procesul tehnologic de realizare a tranzistorului, această configurație este instabilă și poate produce distorsiuni la ieșire.

Pentru montajul din figura 5.28 se determină PSF și se trasează dreapta de sarcină.

$$I_C = \beta_{CC} \cdot \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{Rb} \right) = 300 \cdot \left(\frac{15V - 0,7V}{270K\Omega} \right) = 300 = 15,8 mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 15V - 15,8mA \cdot 470\Omega = 7,57 V$$

Prin calcule s-a obținut: $I_c = 15,8mA$ și $V_{CE} = 7,57 V$

Punctul static de funcționare are coordonatele P(7,5V ; 15,8mA).

Pentru trasarea dreptei de sarcină se determină $I_{C(sat)}$ și $V_{CE(blocare)}$.

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (9) \Rightarrow I_{C(sat)} = \frac{15V}{470\Omega} = 31,9mA$$

$$V_{CE(blocare)} = V_{CC} \quad (10) \Rightarrow V_{CE(blocare)} = 15 V$$

În fig. 5.29 este prezentată dreapta de sarcină și PSF-ul montajului din fig. 5.28

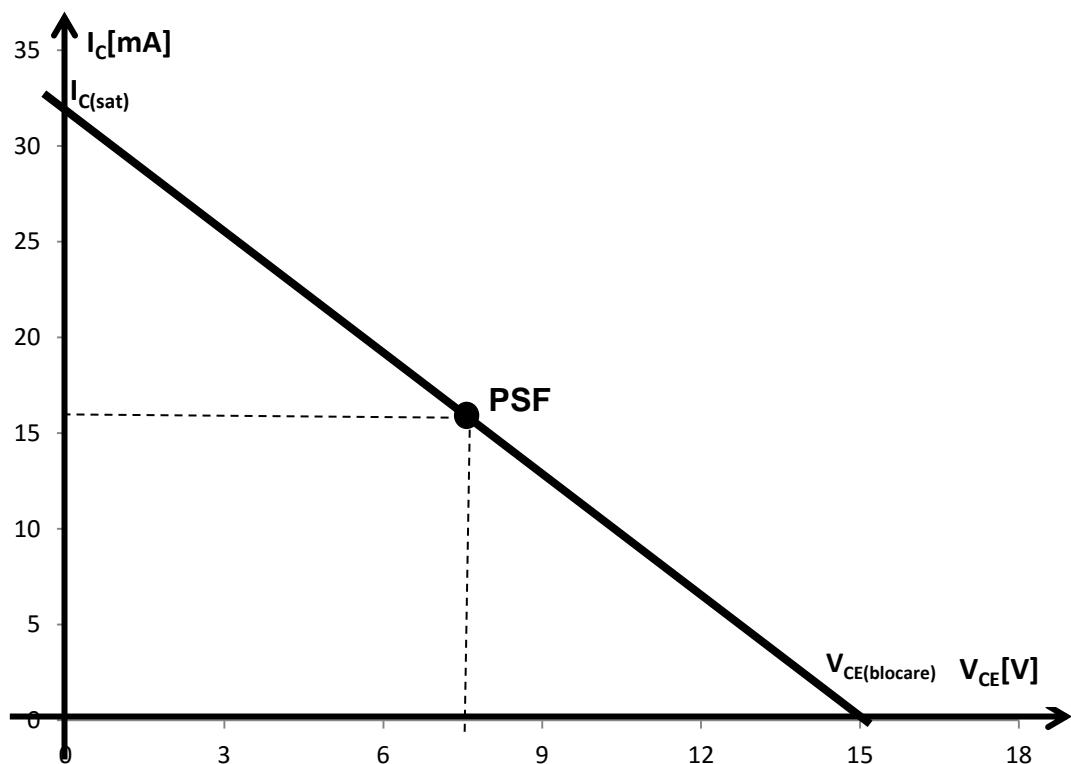


Figura 5.29 Dreapta de sarcină a TB polarizat cu un rezistor în bază

Dacă β_{CC} scade la 100 atunci PSF coboară până aproape de zona de blocare și are coordonatele (12,5V ; 5,2mA). În consecință acest mod de polarizare nu se utilizează unde este necesară o funcționare liniară.

5.3.3 POLARIZAREA CU DIVIZOR REZISTIV

Prin această metodă, tranzistorul se polarizează prin intermediul unui divizor de tensiune rezistiv, de la o singură sursă de alimentare. Rezistențele divizorului de tensiune înlocuiesc o a doua sursă de alimentare necesară polarizării celor două joncțiuni ale tranzistorului. Această metodă de polarizare se utilizează foarte des în practică deoarece asigură o stabilitate satisfăcătoare utilizând o singură sursă de tensiune.

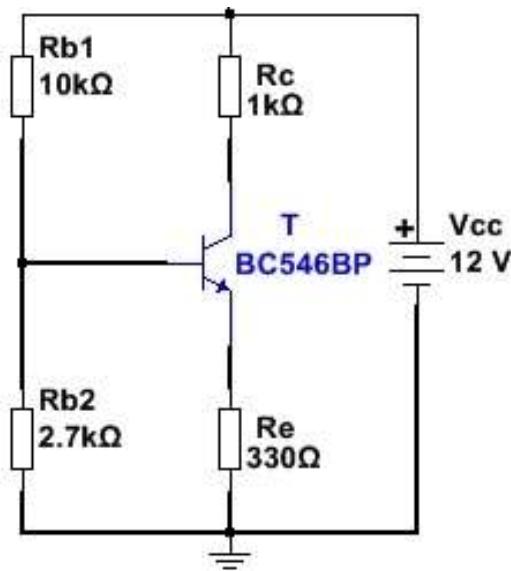


Figura 5.30 Polarizarea tranzistorului bipolar cu divizor rezistiv

Divizorul de tensiune este format din rezistențele **Rb1** și **Rb2**

Tensiunea din baza tranzistorului se calculează cu formula:

$$V_B = \left(\frac{Rb2}{Rb1 + Rb2} \right) \cdot V_{CC} \quad (1)$$

Pentru modificarea tensiunii în baza tranzistorului se modifică valorile rezistențelor divizorului astfel:

- **V_B crește** dacă **Rb2 crește** sau **Rb1 scade**
- **V_B scade** dacă **Rb2 scade** sau **Rb1 crește**

Un circuit de polarizare a tranzistorului trebuie să fie astfel conceput încât să asigure independența PSF-ului de parametrul β (factorul de amplificare în curent). Tranzistorul va funcționa în regiunea activă normală dacă sunt îndeplinite două condiții de bază:

- $0,5 < V_{CE} < (V_{CC} - 1)$ (2);
- **Rb2 să fie mai mică de cel puțin 10 ori decât $\beta_{CC} \cdot R_E$.**
 $Rb2 \ll \beta_{CC} \cdot R_E$ (3).

Pentru verificarea primei condiții trebuie determinată valoarea tensiunii V_{CE} astfel:

- Se calculează I_C

$$V_B = V_{BE} + V_{Re} = 0,7V + Re \cdot I_E \quad (4)$$

$$I_E = \frac{V_B - 0,7}{Re} \quad (5)$$

$$I_C \cong I_E = \frac{V_B - 0,7}{Re} \quad (6)$$

- Se calculează V_{CE}

$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{CE} + V_{Re} = Rc \cdot I_C + V_{CE} + Re \cdot I_C \quad (7)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (Rc + Re) \quad (8)$$

Pentru schema din **figura 5.30** se obțin următoarele valori:

$$V_B = \left(\frac{Rb2}{Rb1+Rb2} \right) \cdot V_{CC} = \left(\frac{2,7K\Omega}{10K\Omega+2,7K\Omega} \right) \cdot 12V = 2,55 V$$

$$I_C = \frac{V_B - 0,7}{Re} = \frac{2,55 - 0,7}{330} = 0,0056 A = 5,6 mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (Rc + Re) = 12 - 5,6mA(1K\Omega + 330\Omega) = 4,56 V$$

$0,5 \text{ V} < 4,56 \text{ V} < (12 \text{ V} - 1 \text{ V}) \Rightarrow 0,5 \text{ V} < 4,56 \text{ V} < 11 \text{ V} \Rightarrow$ prima condiție este îndeplinită.

Se verifică a doua condiție:

$$\beta_{CC} \cdot R_E = 300 \cdot 330\Omega = 99000 \Omega = 99 K\Omega$$

$R_b2 = 2,7 \text{ k}\Omega \Rightarrow 2,7 \text{ k}\Omega \ll 99 \text{ k}\Omega \Rightarrow$ a doua condiție este îndeplinită.

Punctul static de funcționare are coordonatele P(4,56V ; 5,6mA)

Pentru trasarea dreptei de sarcină se determină $I_{C(sat)}$ și $V_{CE(blocare)}$.

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (9) \Rightarrow I_{C(sat)} = \frac{12V}{1,33K\Omega} = 9 \text{ mA}$$

$$V_{CE(blocare)} = V_{CC} \quad (10) \Rightarrow V_{CE(blocare)} = 12 \text{ V}$$

În fig. 5.31 este prezentată dreapta de sarcină și PSF-ul montajului din fig. 5.30

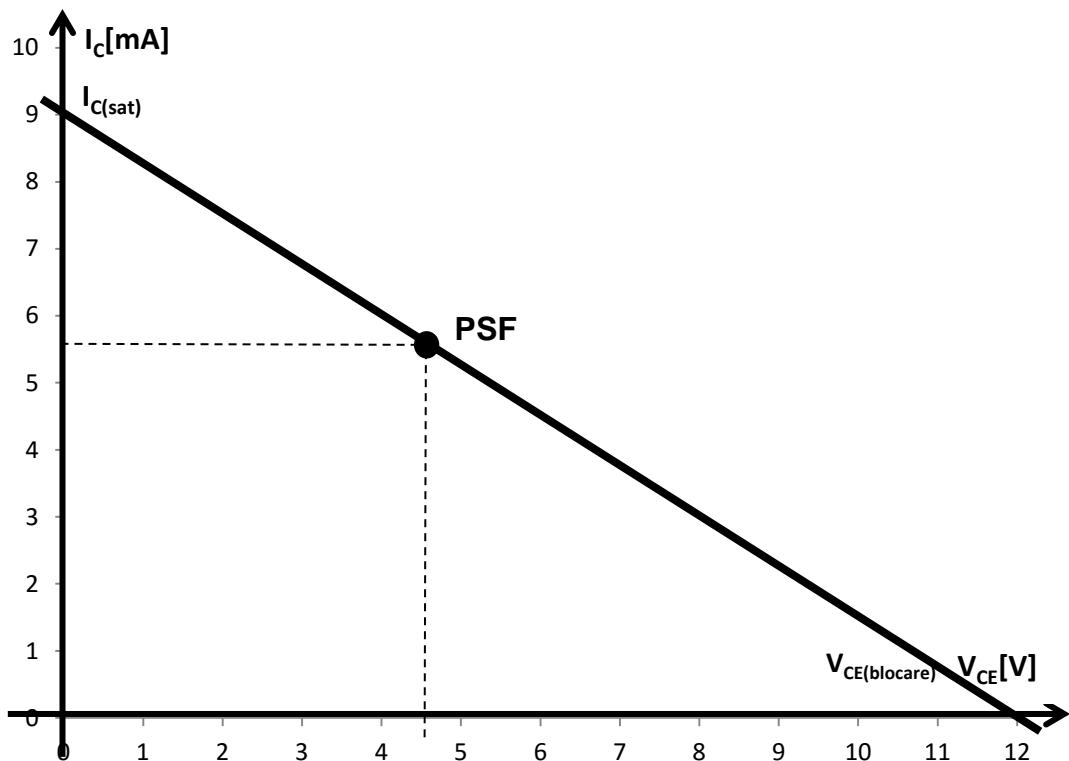


Figura 5.31 Dreapta de sarcină a TB polarizat cu divizor de tensiune

Este cea mai utilizată metodă de polarizare a tranzistoarelor bipolare.

Asigură o stabilitate destul de bună deoarece I_C este independent de β_{CC} .

5.3.4 POLARIZAREA CU DOUĂ SURSE DE TENSIUNE

Prin această metodă tranzistorul se polarizează cu o sursă de tensiune diferențială, $\pm V$, $+V$ se aplică în colector și $-V$ se aplică în emitor (figura 5.32).

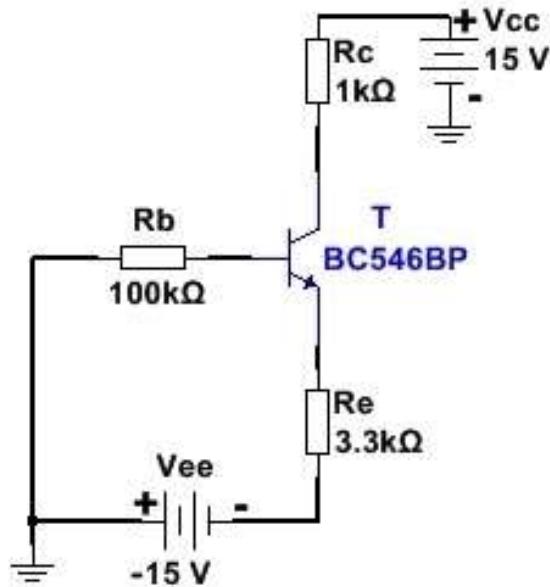


Figura 5.32 Polarizarea tranzistorului bipolar cu două surse de tensiune

Tranzistorul BC546BP are $\beta_{CC} = 300$.

Condiția $R_b \ll \beta_{CC} \cdot R_E$ este îndeplinită deoarece $100 \text{ k}\Omega \ll 990 \text{ k}\Omega$

Verificăm dacă este îndeplinită condiția a două $0,5 < V_{CE} < (2V_{CC} - 1)$.

Se aplică legea a II-a a lui Kirchhoff pe ochiul ce conține jonctiune bază-emitor:

$$V_{BE} + I_E \cdot R_E + V_{EE} + I_B \cdot R_B = 0 \quad (1)$$

$$\text{Deoarece } I_C \cong I_E \text{ și } I_C = \beta_{CC} \cdot I_B \Rightarrow I_B \cong \frac{I_E}{\beta_{CC}} \quad (2)$$

În ecuația (1) se înlocuiește I_B cu cel din relația (2) se trece V_{BE} și V_{EE} în dreapta:

$$I_E \cdot R_E + \frac{I_E \cdot R_B}{\beta_{CC}} = -V_{EE} - V_{BE} \quad (3)$$

$$\text{Din relația (3)} \Rightarrow I_E = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta_{CC}}} \quad (4) \Rightarrow I_C = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta_{CC}}} \quad (5)$$

Înlocuim în relația (5) valorile date \Rightarrow

$$I_C = \frac{-(-15V) - 0,7V}{3,3K\Omega + \frac{100K\Omega}{300}} = \frac{14,3V}{3,63K\Omega} \cong 4mA$$

În figura 5.32 se observă că tensiunea sursei care alimentează colectorul este egală cu suma tensiunilor care cad pe elementele dintre colector și masa montajului:

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + I_C \cdot R_E + V_{EE} \quad (6) \Rightarrow$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{EE} - I_C(R_C + R_E) \quad (7)$$

Înlocuind în relația (7) valorile date $\Rightarrow V_{CE} = 15 - (-15) - 4mA \cdot 4,3k\Omega \cong 13V$

Condiția a doua este îndeplinită deoarece $0,5 < 13 < (2 \cdot 15 - 1) \Rightarrow 0,5 < 13 < 29$

Prin calcule s-a obținut: $I_C = 4mA$ și $V_{CE} = 13V$

Punctul static de funcționare are coordonatele P(13V ; 4mA).

Pentru trasarea dreptei de sarcină se determină $I_{C(sat)}$ și $V_{CE(blocare)}$.

Pentru determinarea $I_{C(sat)}$ în relația (7) se consideră $V_{CE} = 0$

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_C + R_E} \quad (8) \Rightarrow I_{C(sat)} = \frac{15V - (-15V)}{1k\Omega + 3,3k\Omega} = \frac{30V}{4,3k\Omega} = 6,97mA$$

Pentru determinarea $V_{CE(blocare)}$ în relația (7) se consideră $I_C = 0$

$$V_{CE(blocare)} = V_{CC} - V_{EE} \quad (9) \Rightarrow V_{CE(blocare)} = 15V - (-15V) = 30V$$

În fig. 5.33 este prezentată dreapta de sarcină și PSF-ul montajului din fig. 5.32

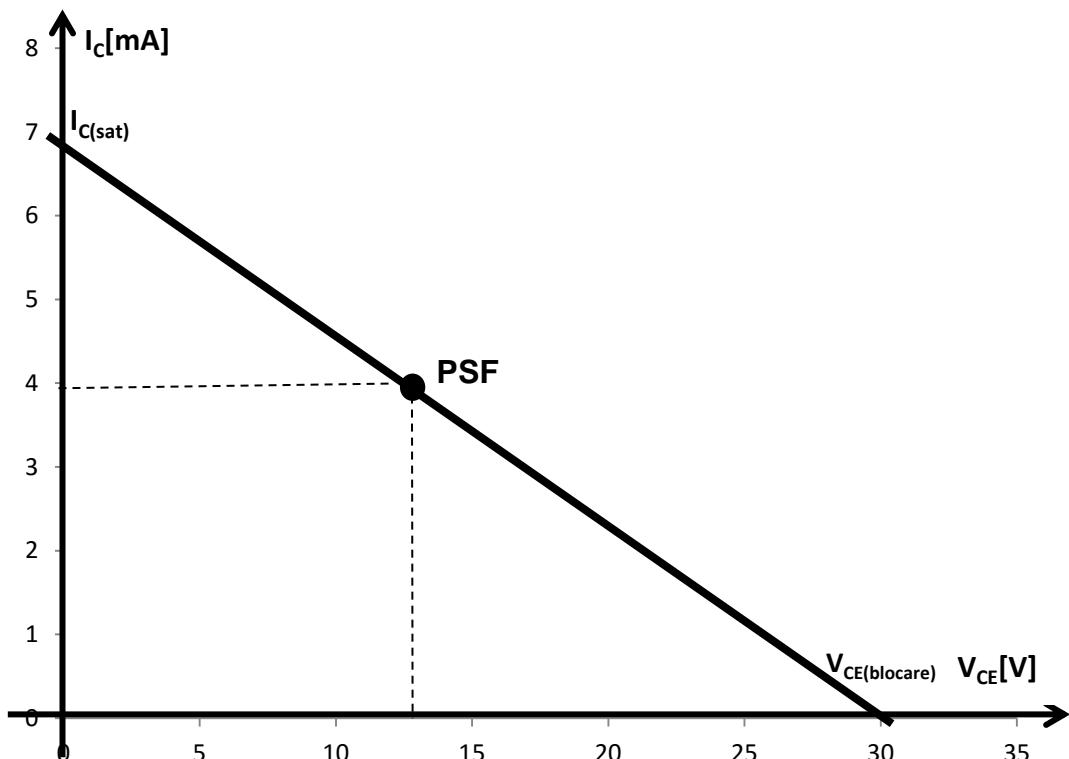


Figura 5.33 Dreapta de sarcină a TB polarizat cu două surse de tensiune

Această modalitate de polarizare asigură un PSF stabil deoarece I_C este independent de V_{BE} și de β_{CC} .

5.4. DEPANAREA CIRCUITELOR CU TRANZISTOARE BIPOLARE

Funcționarea anormală a unui circuit cu tranzistoare bipolare, se datorează unui defect intern al unui tranzistor, sau defectării unui rezistor din circuitele de polarizare a tranzistoarelor. La tranzistor, un defect intern apare în cazul întreruperii unei joncțiuni sau străpungerii unei joncțiuni a tranzistorului (rezistența electrică a joncțiunii scade foarte mult). În cazul rezistoarelor pot apărea întreruperi ale acestora. În majoritatea cazurilor aceste defecte aduc tranzistorul în regimul de blocare sau de saturatie. Pentru depanarea defectului se măsoară tensiunile și curentii din circuit și în funcție de valorile acestora se poate localiza defectul respectiv.

5.4.1 DEFECTE INTERNE ALE TRANZISTORULUI

Cea mai rapidă metodă de a afla dacă joncțiunile unui tranzistor sunt întrerupte sau străpuse este **măsurarea rezistențelor joncțiunilor** cu un multimetru digital. Pentru aceasta vom considera structura tranzistorului bipolar ca un ansamblu de două diode conectate ca în **figura 5.36**

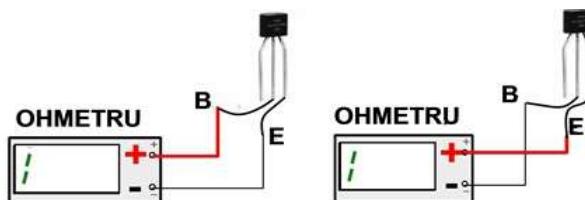


Figura 5.36 Structura tranzistoarele bipolare cu diode

O joncțiune (BE sau BC) este **întreruptă** dacă multimetru în ambele sensuri de măsurare indică **rezistență foarte mare** (sau infinită).

O joncțiune (BE sau BC) este **străpunsă** dacă multimetru în ambele sensuri de măsurare indică **rezistență mică**.

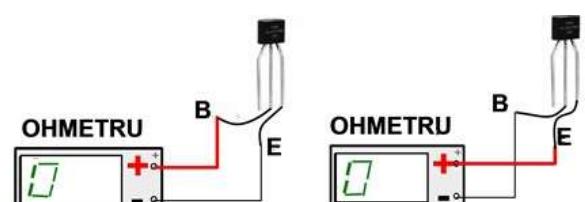
O joncțiune (BE sau BC) este **scurtcircuitată** dacă multimetru în ambele sensuri de măsurare indică **rezistență foarte mică** (sau infinită).



Joncțiunea bază-emitor întreruptă.

În ambele sensuri de măsurare multimetru digital indică valoarea 1

Figura 5.37 Verificarea unui tranzistor bipolar defect(joncțiune întreruptă)

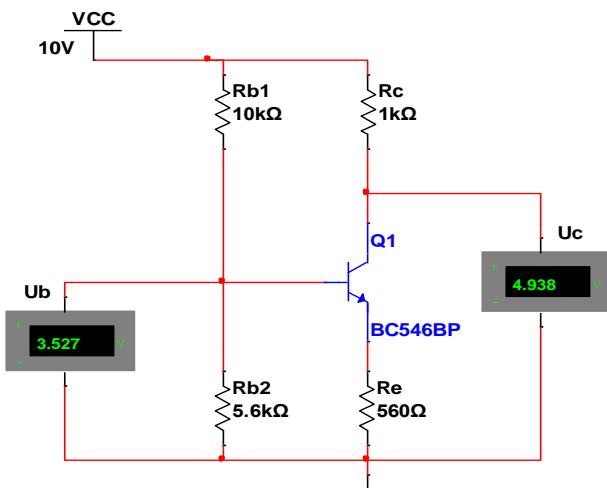


Joncțiunea bază-emitor scurtcircuitată.

În ambele sensuri de măsurare multimetru digital indică valoarea 0

Figura 5.38 Verificarea unui tranzistor bipolar defect(joncțiune scurtcircuitată)

Altă metodă de verificare a stării joncțiunilor unui tranzistor este măsurarea valorilor tensiunilor din baza și colectorul unui tranzistor în circuit.

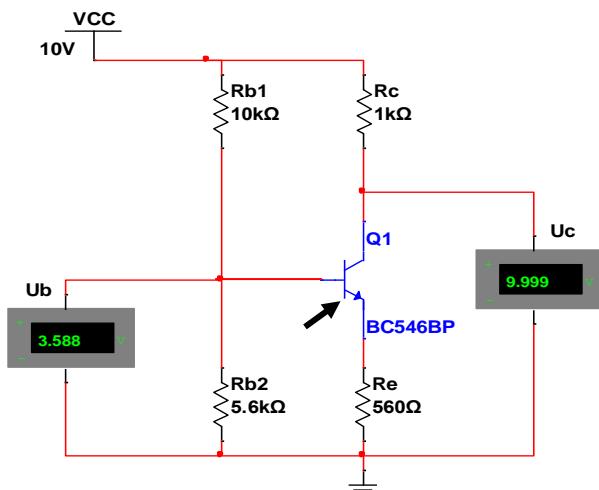


Pentru montajul din **figura 5.39** la funcționarea în condiții normale:

Tensiunea în bază $U_B = 3,52 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 4,93 \text{ V}$

Figura 5.39 Tranzistor polarizat cu divizor rezistiv cu valorile corecte ale tensiunilor

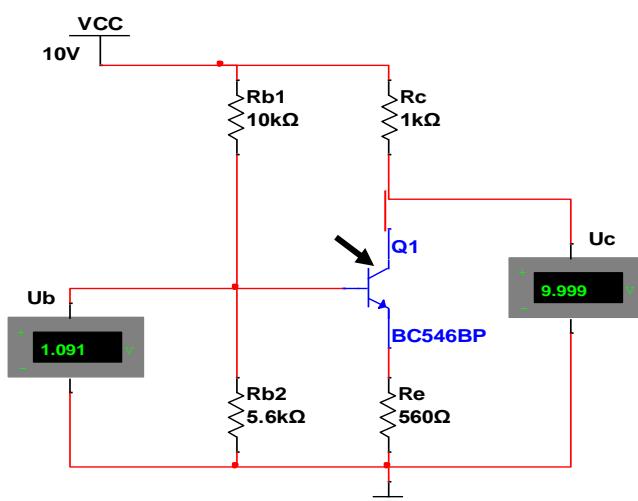


Dacă s-a **întrerup** joncțiunea BE, Emitterul sau Baza, tranzistorul se **blochează**, iar tensiunile sunt:

Tensiunea în bază $U_B = 3,58 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 9,99 \text{ V}$

Figura 5.40 Circuit cu tranzistor bipolar defect (întreruperea joncțiunii BE)

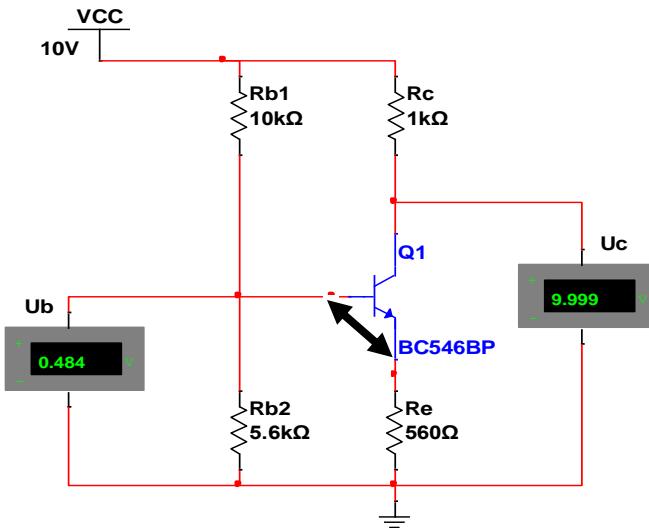


Dacă s-a **întrerup** joncțiunea BC, sau Colectorul, tranzistorul se **blochează**, iar tensiunile sunt:

Tensiunea în bază $U_B = 1,09 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 9,99 \text{ V}$

Figura 5.41 Circuit cu tranzistor bipolar defect (întreruperea joncțiunii BC)

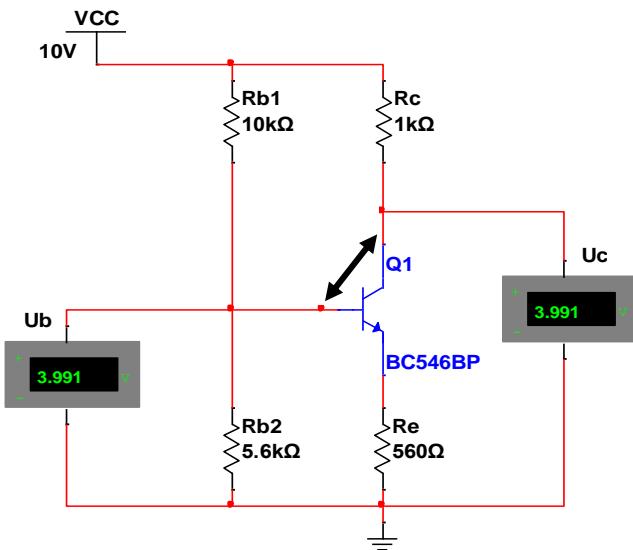


Dacă s-a **scurtcircuitat** joncțiunea BE, tranzistorul se **blochează**, iar tensiunile sunt:

Tensiunea în bază $U_B = 0,48 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 9,99 \text{ V}$

Figura 5.42 Circuit cu tranzistor bipolar defect (scurtcircuitarea joncțiunii BE)

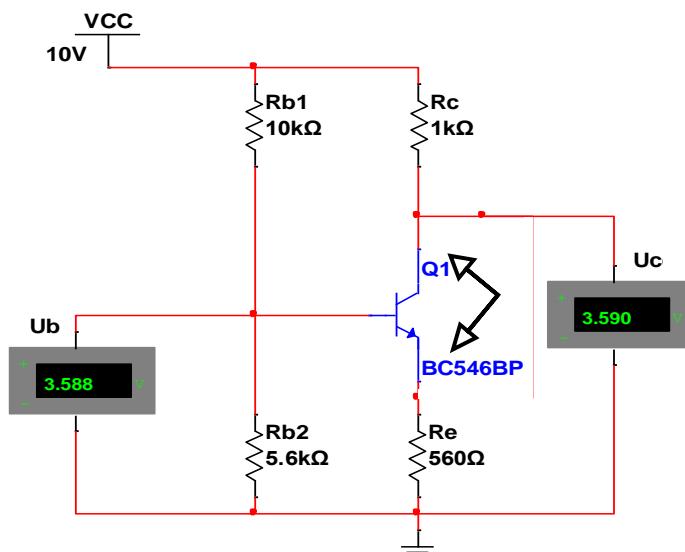


Dacă s-a **scurtcircuitat** joncțiunea BC, tranzistorul se comportă ca o diodă polarizată direct prin care circulă curent, iar tensiunile sunt:

Tensiunea în bază $U_B = 3,99 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 3,99 \text{ V}$

Figura 5.43 Circuit cu tranzistor bipolar defect (scurtcircuitarea joncțiunii BC)



Dacă s-a **scurtcircuitat** joncțiunea CE, tranzistorul se comportă ca un conductor prin care circulă curent, iar tensiunile sunt:

Tensiunea în bază $U_B = 3,58 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 3,59 \text{ V}$

Figura 5.44 Circuit cu tranzistor bipolar defect (scurtcircuitarea joncțiunii CE)

5.4.2 DEFECTE ALE CIRCUITELOR DE POLARIZARE

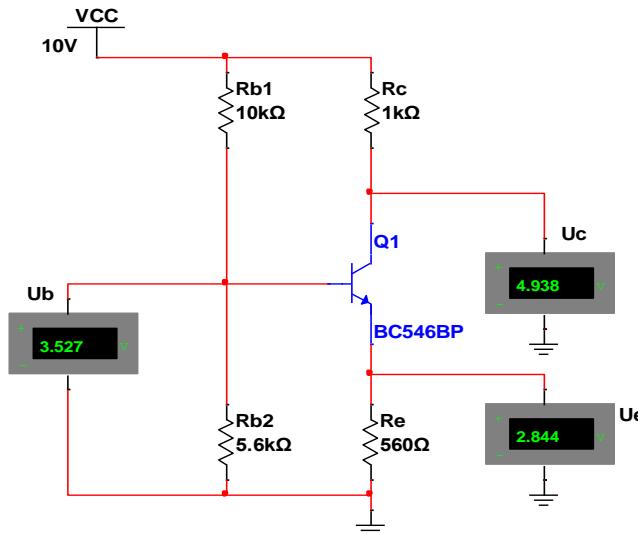
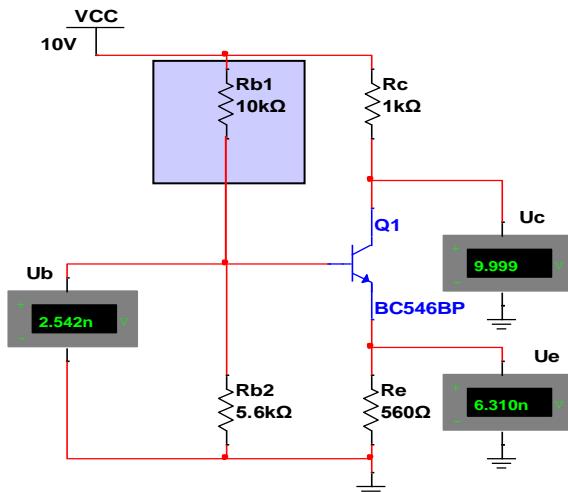


Figura 5.45 TB polarizat cu divizor rezistiv cu valorile corecte ale tensiunilor

DEFECT 1. REZISTORUL Rb1 ÎNTRERUPT



Acest defect duce la dispariția tensiunilor din baza și emitorul tranzistorului, iar tranzistorul se **BLOCHEAZĂ**

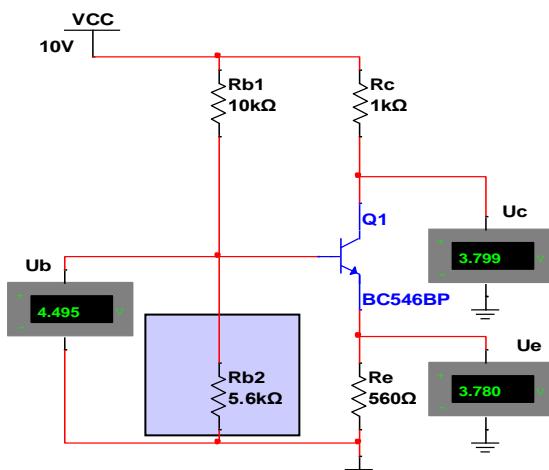
Tensiunea în bază $U_B \approx 0 \text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E \approx 0 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 9,99 \text{ V}$

Figura 5.46 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (întrerupere circuit Rb1)

DEFECT 2. REZISTORUL Rb2 ÎNTRERUPT



Acest defect duce la creșterea tensiunii și curentului din bază, iar tranzistorul intră în **SATURAȚIE**

Tensiunea în bază $U_B = 4,49 \text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E = 3,79 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 3,78 \text{ V}$

Figura 5.47 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (întrerupere circuit Rb2)

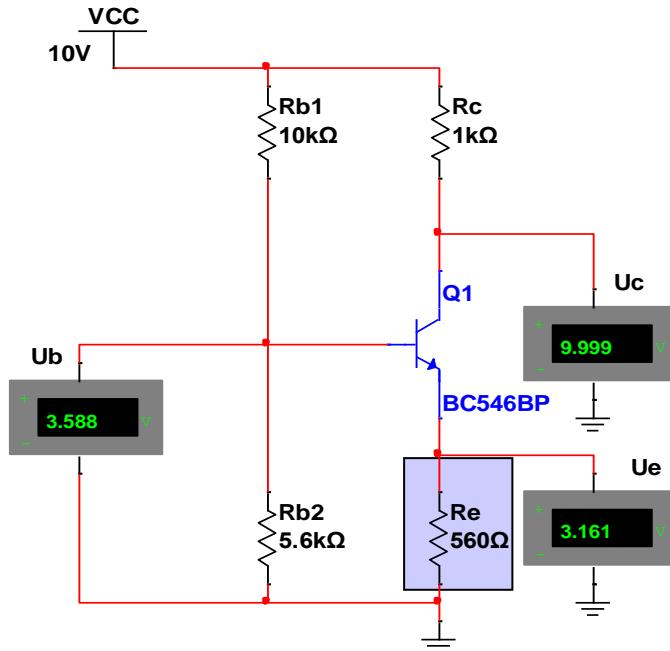
Pentru montajul din **figura 5.45**, la funcționarea în condiții normale, valorile tensiunilor la terminalele tranzistorului bipolar sunt:

Tensiunea în bază $U_B = 3,52 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 4,93 \text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E = 2,84 \text{ V}$

DEFECT 3. REZISTORUL R_E ÎNTRERUPT



Acest defect duce la dispariția curentilor prin tranzistor, iar tranzistorul se **BLOCHEAZĂ**

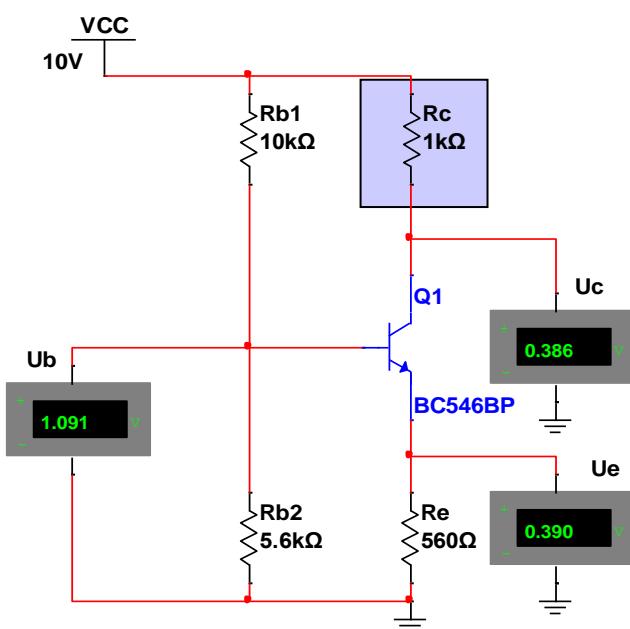
Tensiunea în bază $U_B = 3,58 \text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E = 3,16 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 9,99 \text{ V}$

Figura 5.48 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (întrerupere circuit R_E)

DEFECT 4. REZISTORUL R_C ÎNTRERUPT



Acest defect duce la dispariția curentului prin colector. Valorile tensiunilor din colector și emitor ne determină să presupunem că tranzistorul este saturat dar în realitate **tranzistorul nu conduce**.

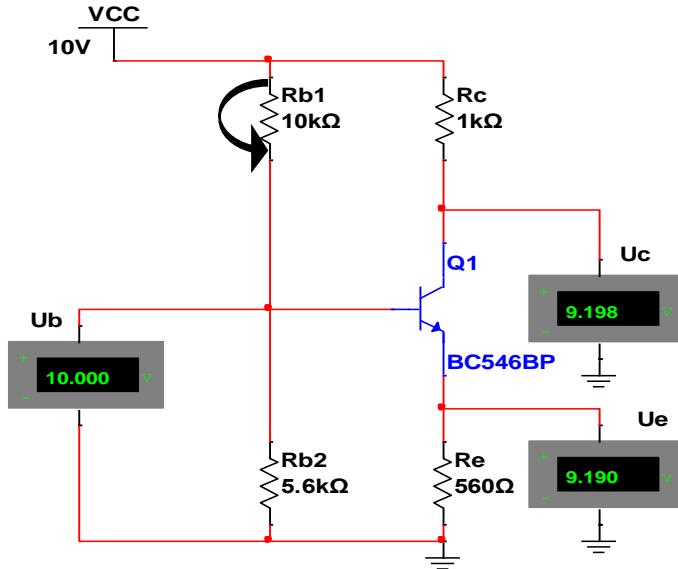
Tensiunea în bază $U_B = 1,09 \text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E = 390 \text{ mV}$

Tensiunea în colector $U_C = 386 \text{ mV}$

Figura 5.49 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (întrerupere circuit R_c)

DEFECT 5. REZISTORUL Rb1 SCURTCIRCUITAT



Tensiunea bază-emitor este egală cu tensiunea de alimentare a tranzistorului fapt care determină deteriorarea acestei joncțuni.

Tranzistorul se **BLOCHEAZĂ**.

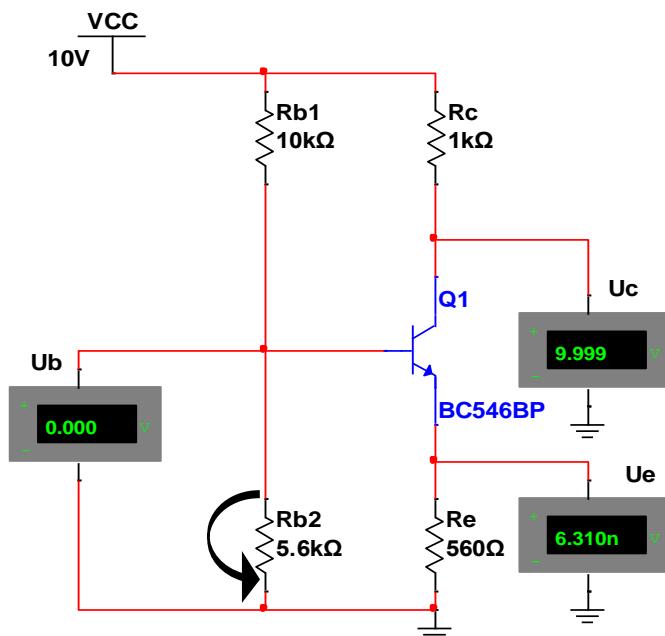
Tensiunea în bază $U_B = 10 \text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E = 9,1 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 9,1$

Figura 5.50 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (scurtcircuit Rb1)

DEFECT 6. REZISTORUL Rb2 SCURTCIRCUITAT



Acest defect duce la dispariția curentului și tensiunii în baza tranzistorului, iar tranzistorul se **BLOCHEAZĂ**

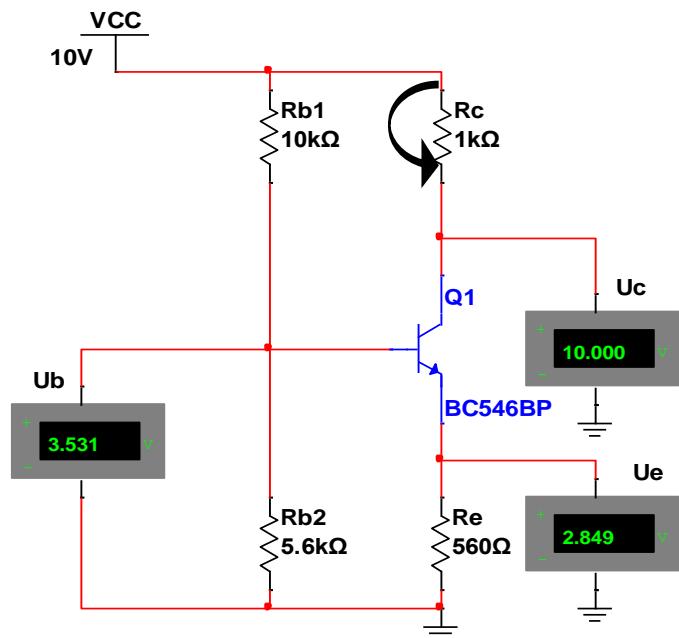
Tensiunea în bază $U_B = 0 \text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E \approx 0 \text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 9,99 \text{ V}$

Figura 5.51 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (scurtcircuit Rb2)

DEFECT 7. REZISTORUL R_C SCURTCIRCUITAT



Acest defect duce la creșterea tensiunii pe joncțiunea colector-emitor a tranzistorului.

Funcționarea tranzistorului nu este stabilă (**PSF-ul se deplasează spre zona de blocare**)

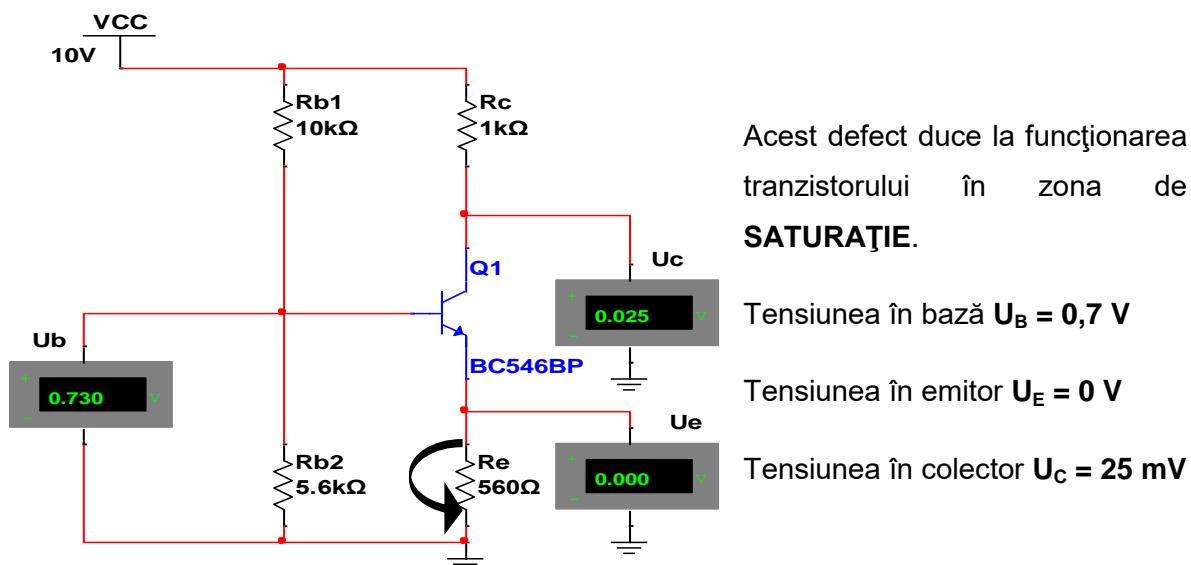
Tensiunea în bază $U_B = 3,53\text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E = 2,84\text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 10\text{ V}$

Figura 5.52 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (scurtcircuit R_C)

DEFECT 8. REZISTORUL R_E SCURTCIRCUITAT



Acest defect duce la funcționarea tranzistorului în zona de **SATURAȚIE**.

Tensiunea în bază $U_B = 0,7\text{ V}$

Tensiunea în emitor $U_E = 0\text{ V}$

Tensiunea în colector $U_C = 25\text{ mV}$

Figura 5.53 Tranzistor cu circuit de polarizare defect (scurtcircuit R_E)

5.5. REZOLVAREA CIRCUITELOR CU TRANZISTOARE BIPOARE

PROBLEMA 1.

În circuitul din figura 5.54 se cunosc valorile: $I_B = 40 \text{ mA}$ și $\beta = 250$

Se cere:

- Valoarea intensității curentului de colector I_C .
- Valoarea tensiunii bază-emitor U_{BE} .
- Valoarea tensiunii colector-emitor U_{CE} .

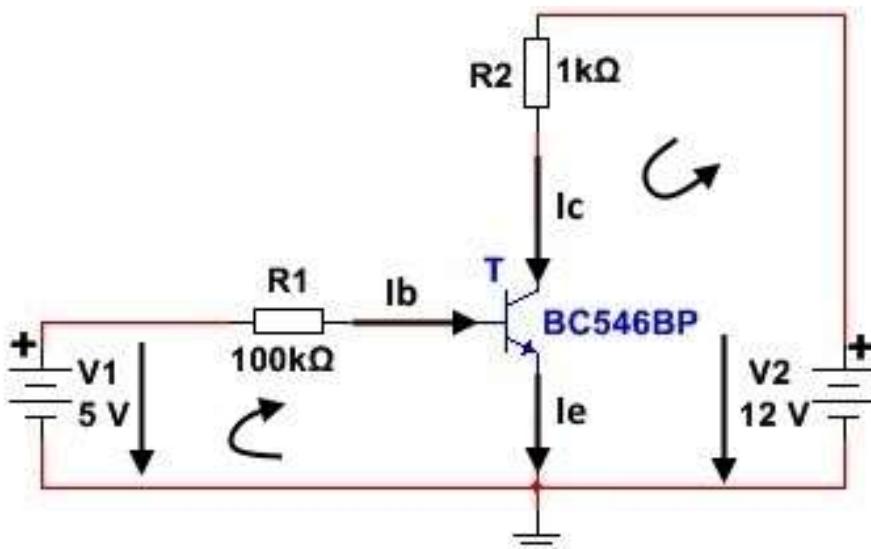


Figura 5.54 Tranzistor bipolar NPN polarizat cu două surse de alimentare

REZOLVARE

a. $I_C = \beta \cdot I_B = 250 \cdot 40(\mu A) = 10000 \mu A = 10 \text{ mA} \quad I_C = 10 \text{ mA}$

b. În ochiul de rețea unde se află jonctiunea BE, conform legii a II a lui Kirchhoff:

$$-V1 + U_{R1} + U_{BE} = 0 \Rightarrow U_{BE} = V1 - R1 \cdot I_B \Rightarrow U_{BE} = 5V - 100K\Omega \cdot 40\mu A$$

$$U_{BE} = 5 - 100 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 5 - 4 = 1 \text{ V} \quad U_{BE} = 1 \text{ V}$$

c. În ochiul de rețea unde se află jonctiunea CE, conform legii a II a lui Kirchhoff:

$$-V2 + U_{R2} + U_{CE} = 0 \Rightarrow U_{CE} = V2 - R2 \cdot I_C \Rightarrow U_{CE} = 12V - 1K\Omega \cdot 10mA$$

$$U_{CE} = 12 - 1 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 12 - 10 = 2 \text{ V} \quad U_{CE} = 2 \text{ V}$$

PROBLEMA 2.

În circuitul din figura 5.55 se cunosc valorile: $U_{BE} = 0,6 V$ și $\beta = 200$

Se cere:

- Valoarea intensității curentului de colector I_C .
- Valoarea tensiunii din colector U_C .
- Valoarea tensiunii din emitor U_E .
- Valoarea tensiunii colector – emitor U_{CE} .

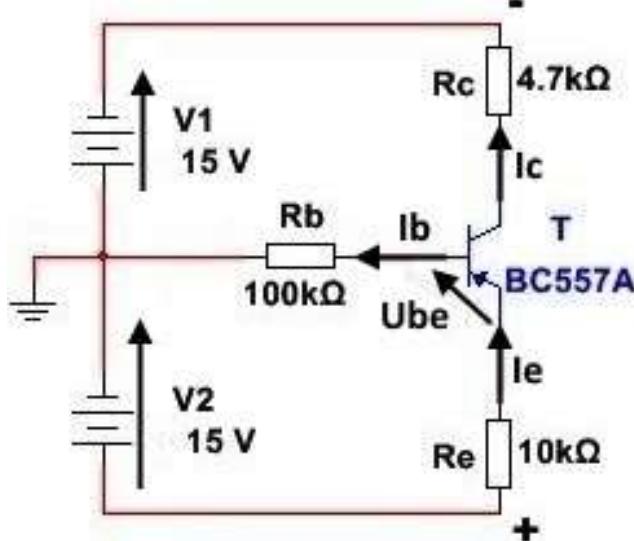


Figura 5.55 Tranzistor bipolar PNP polarizat cu două surse de alimentare

REZOLVARE

$$a. -V_2 + U_{be} + R_e \cdot I_e + R_b \cdot I_b = 0 \Rightarrow R_e \cdot I_e + R_b \cdot I_b = V_2 - U_{be} \quad (1)$$

$$\text{Dar: } I_e \cong I_c = \beta \cdot I_b \Rightarrow I_b = \frac{I_c}{\beta} \text{ și } I_e = I_c \quad (2)$$

$$\text{Înlocuind (2) în (1)} \Rightarrow R_e \cdot I_c + R_b \cdot \frac{I_c}{\beta} = V_2 - U_{be} \Rightarrow I_c \cdot \left(R_e + \frac{R_b}{\beta} \right) = V_2 - U_{be}$$

$$I_c = \frac{V_2 - U_{be}}{\frac{R_b}{\beta} + R_e} = \frac{15V - 0,6V}{\frac{100K}{200} + 10K} = \frac{14,4}{(\frac{100}{200} + 10) \cdot 10^3} = \frac{14,4}{10,5} \cdot 10^{-3} = 1,37 \text{ mA}$$

$$I_c = 1,37 \text{ mA}$$

OBS. Se poate calcula mai întâi I_B apoi I_C și I_E știind că $I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$ și $I_C = \beta \cdot I_B$

$$b. V_1 - R_c \cdot I_c + U_c = 0 \Rightarrow U_c = R_c \cdot I_c - V_1 \Rightarrow U_c = 4,7K \cdot 1,37mA - 15V$$

$$U_c = 4,7 \cdot 10^3 \cdot 1,37 \cdot 10^{-3} - 15 = 6,43 - 15 = -8,57 \quad U_c = -8,57 \text{ V}$$

$$c. V_2 - R_e \cdot I_e - U_E = 0 \Rightarrow U_E = V_2 - R_e \cdot I_e \Rightarrow U_E = 15V - 10K \cdot 1,37mA$$

$$U_E = 15 - 10 \cdot 10^3 \cdot 1,37 \cdot 10^{-3} = 15 - 13,7 = 1,3 \quad U_E = 1,3 \text{ V}$$

$$d. U_{CE} = U_c - U_E \Rightarrow U_{CE} = -8,57V - 1,3V \Rightarrow U_{CE} = -9,87 \text{ V}$$

PROBLEMA 3.

În circuitul din figura 5.56 se cunosc valorile: $U_{BE} = 0,6 V$ și $\beta = 239$

Se cere:

- Valoarea intensității curentului din bază I_b .
- Valoarea intensității curentului din colector I_c și curentului din emitor I_e .
- Valoarea tensiunii colector – emitor U_{ce} .

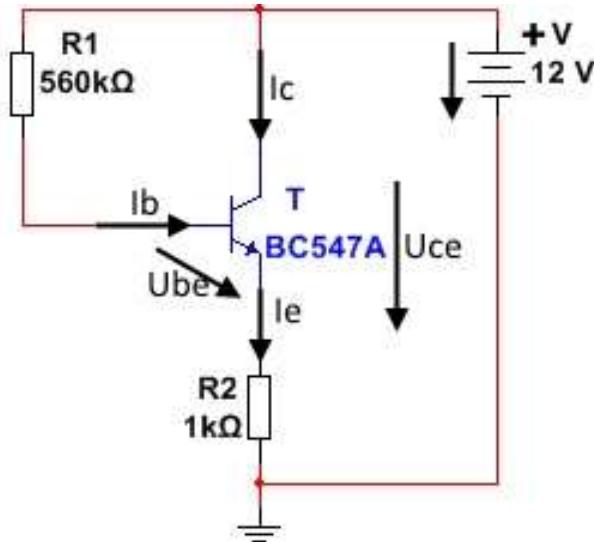


Figura 5.56 Tranzistor bipolar NPN polarizat cu o sursă de alimentare

REZOLVARE

a. Se aplică T2 Kirchhoff pe ochiul care conține jonctiunea bază-emitor:

$$R_1 \cdot I_b + U_{be} + R_2 \cdot I_e - V = 0 \Rightarrow V = U_{be} + R_1 \cdot I_b + R_2 \cdot I_e \quad (1)$$

$$I_c = \beta \cdot I_b \quad (2) \quad I_e = I_b + I_c \quad (3) \quad \text{Înlocuind (2) în (3)} \Rightarrow I_e = I_b \cdot (\beta + 1) \quad (4)$$

$$\text{Înlocuind (4) în (1)} \Rightarrow V - U_{be} = R_1 \cdot I_b + R_2 \cdot I_b \cdot (\beta + 1) \quad (5)$$

$$\text{Din (5)} \Rightarrow I_b = \frac{V - U_{be}}{R_1 + R_2 \cdot (\beta + 1)} \quad (6)$$

$$I_b = \frac{12V - 0,6V}{560K + 1K \cdot (239 + 1)} = \frac{11,4}{800 \cdot 10^3} = 0,014 \cdot 10^{-3} A \Rightarrow I_b = 14 \mu A$$

$$\mathbf{b. I_c = \beta \cdot I_b \Rightarrow I_c = 239 \cdot 14 \mu A = 3346 \mu A = 3,34 mA \Rightarrow I_c = 3,34 mA}$$

$$I_e = (\beta + 1) \cdot I_b \Rightarrow I_e = 240 \cdot 14 \mu A = 3360 \mu A = 3,36 mA \Rightarrow I_e = 3,36 mA$$

c. Se aplică T2 Kirchhoff pe ochiul care conține jonctiunea colector-emitor:

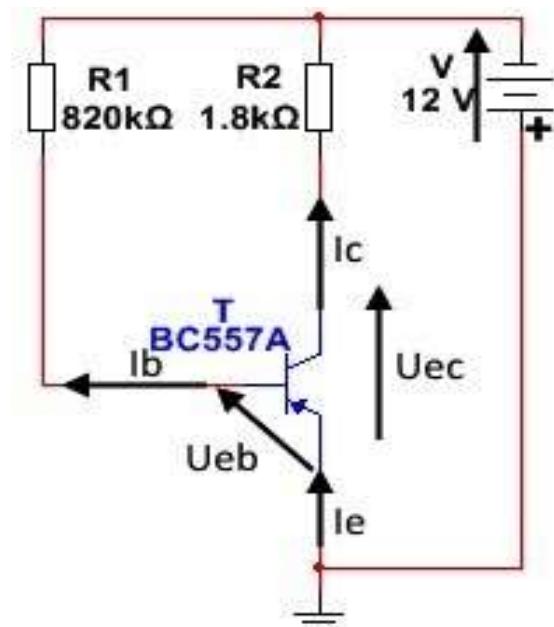
$$U_{ce} + R_2 \cdot I_e - V = 0 \Rightarrow U_{ce} = V - R_2 \cdot I_e \quad (7)$$

$$U_{ce} = 12V - 1K \cdot 3,36mA = 12 - 1 \cdot 10^3 \cdot 3,36 \cdot 10^{-3} = 12 - 3,36 = 8,64$$

$$U_{ce} = 8,64 V$$

PROBLEMA 4.

În circuitul din figura 5.57 se cunosc valorile: $U_{EB} = 0,7 V$ și $\beta = 220$.



Se cere:

- Coordonatele punctului static de funcționare.
- Coordonatele punctelor de intersecție ale dreptei de sarcină cu axele de coordonate.

Figura 5.57 Tranzistor bipolar PNP polarizat cu o sursă de alimentare

REZOLVARE

a. Se aplică T2 Kirchhoff pe ochiul ce conține jonctiunea bază-emitor:

$$U_{eb} + R_1 \cdot I_b - V = 0 \Rightarrow R_1 \cdot I_b = V - U_{eb} \Rightarrow I_b = \frac{V - U_{eb}}{R_1} \quad (1)$$

$$I_b = \frac{12V - 0,7V}{820K\Omega} = \frac{11,3}{820 \cdot 10^3} = 0,013 \cdot 10^{-3} mA = 13 \mu A \quad I_b = 13 \mu A$$

$$I_c = \beta \cdot I_b \quad (2) \Rightarrow I_c = 220 \cdot 13 \mu A = 2860 \mu A = 2,8 mA \quad I_c = 2,8 mA$$

Se aplică T2 Kirchhoff pe ochiul ce conține jonctiunea colector-emitor:

$$U_{ec} + R_2 \cdot I_c - V = 0 \Rightarrow U_{ec} = V - R_2 \cdot I_c \quad (3)$$

$$U_{ec} = 12V - 1,8K \cdot 2,8mA = 12 - 1,8 \cdot 10^3 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} \Rightarrow U_{ec} = 6,9 V$$

Coordonatele PSF sunt: ($I_c = 2,8 mA$; $U_{ec} = 6,9 V$)

b. Pentru determinarea punctelor de intersecție cu axele în relația (3) se egalează cu zero, pe rând, I_c și U_{ec}

$$I_c = 0 \Rightarrow U_{ec} + 0 - V = 0 \Rightarrow U_{ec} = V \Rightarrow U_{ec(max)} = 12V$$

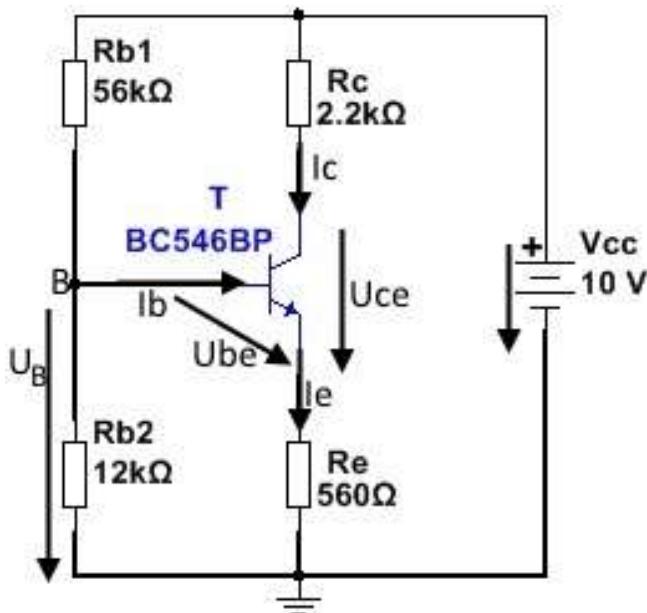
$$U_{ec} = 0 \Rightarrow 0 + R_2 \cdot I_c - V = 0 \Rightarrow I_c = \frac{V}{R_2} \Rightarrow I_c(max) = 6,6 mA$$

Coordonatele punctelor de intersecție cu axele sunt:

$$A(12; 0) \text{ și } B(0; 6,6)$$

PROBLEMA 5.

În circuitul din figura 5.58 se cunosc valorile: $U_{be} = 0,6 V$ și $\beta = 310$.



Se cere:

- Coordonatele punctului static de funcționare.
- Coordonatele punctelor de intersecție ale dreptei de sarcină cu axele de coordonate.
- Să se verifice dacă tranzistorul funcționează în regiunea activă normală

Figura 5.58 Tranzistor bipolar NPN polarizat cu divizor de tensiune

REZOLVARE

- a. Divizorul de tensiune format din rezistoarele R_{b1} și R_{b2} stabilește în baza tranzistorului T tensiunea $U_B = \left(\frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \right) \cdot V_{cc}$ (1)

$$U_B = \left(\frac{12K}{56k + 12k} \right) \cdot 10V = 0,176 \cdot 10 = 1,76V \Rightarrow U_B = 1,76V$$

Se aplică T2 Kirchhoff pe ochiul ce conține jonctiunea bază-emitor:

$$-U_B + U_{be} + Re \cdot Ie = 0 \Rightarrow Re \cdot Ie = U_B - U_{be} \Rightarrow Ie = \frac{U_B - U_{be}}{Re} \quad (2)$$

$$Ie = \frac{1,76V - 0,6V}{560\Omega} = \frac{1,16}{560} = 0,00207 A = 2,07 mA \Rightarrow Ie = 2,07 mA$$

$$\text{Se știe că: } Ie = (\beta + 1) \cdot Ib \Rightarrow Ib = \frac{Ie}{\beta+1} \quad (3)$$

$$Ib = \frac{2,07}{310 + 1} = \frac{2,07}{311} = 0,0066 mA = 6,6 \mu A \Rightarrow Ib = 6,6 \mu A$$

Deoarece $Ic = \beta \cdot Ib$ (4) $\Rightarrow Ic = 310 \cdot 6,6 \mu A = 2046 \mu A = 2,04 mA$

$Ic = 2,04 mA$

Se aplică T2 Kirchhoff pe ochiul ce conține joncțiunea colector-emitor:

$$-V_{cc} + R_c \cdot I_c + U_{ce} + R_e \cdot I_e = 0 \Rightarrow U_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c - R_e \cdot I_e \quad (5)$$

$$U_{ce} = 10 - 2,2K\Omega \cdot 2,04mA - 560\Omega \cdot 2,07mA$$

$$U_{ce} = 10 - 2,2 \cdot 10^3 \cdot 2,04 \cdot 10^{-3} - 560 \cdot 2,07 \cdot 10^{-3}$$

$$U_{ce} = 10 - 4,48 - 1,16 = 4,36 V \Rightarrow U_{ce} = 4,36 V.$$

Coordonatele PSF sunt: (**$I_c = 2,04 mA$** ; **$U_{ce} = 4,36 V$**)

b. Pentru determinarea punctelor de intersecție cu axele în relația (5) se egalează cu zero, pe rând, I_c și U_{ce}

$$I_c = 0 \Rightarrow U_{ce} = 10 - 0 - 1,16 \Rightarrow U_{ce(max)} = 8,84V$$

$$U_{ce} = 0 \Rightarrow R_c \cdot I_c = V_{cc} - 0 - R_e \cdot I_e \Rightarrow I_c = \frac{V_{cc} - R_e \cdot I_e}{R_c}$$

$$I_c = \frac{10 - 1,16}{2,2 \cdot 10^3} = \frac{8,84}{2,2} \cdot 10^{-3} = 4,01 \cdot 10^{-3} A \quad I_{c(max)} = 4,01 mA$$

Coordonatele punctelor de intersecție cu axele sunt:

A(8,84 ; 0) și **B(0 ; 4,01)**

c. Tranzistorul funcționează în RAN dacă sunt îndeplinite condițiile;

$$(1) \quad 10 \cdot R_b2 < \beta \cdot R_e \quad (2) \quad 0,5 < U_{ce} < (V_{cc} - 1) [V]$$

Verificarea condițiilor:

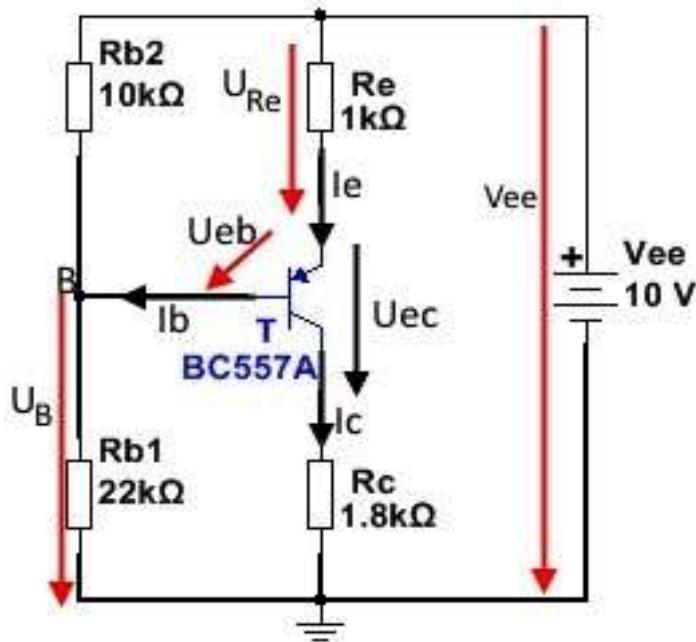
$$1. \quad 12000 \cdot 10 < 310 \cdot 560 \Rightarrow 120000 < 173600 \Rightarrow "A"$$

$$2. \quad 0,5 < 4,36 < 10 - 1 \Rightarrow 0,5 < 4,36 < 9 \Rightarrow "A"$$

Pentru verificarea regimului de funcționare a tranzistorului se calculează tensiunea pe fiecare terminal al tranzistorului apoi se observă cum sunt polarizate joncțiunile tranzistorului. Această metodă este prezentată în problemele care urmează.

PROBLEMA 6.

În circuitul din figura 5.59 se cunosc valorile: $U_{eb} = 0,7 V$ și $\beta = 215$.



Se cere:

- Coordinatele punctului static de funcționare.
- Să se determine regimul de funcționare al tranzistorului.

Figura 5.59 Tranzistor bipolar PNP polarizat cu divizor de tensiune

REZOLVARE

a. Divizorul de tensiune format din rezistoarele R_b1 și R_b2 stabilește în baza tranzistorului T tensiunea $U_B = \left(\frac{R_b1}{R_b1 + R_b2} \right) \cdot V_{cc}$ (1)

$$U_B = \left(\frac{22K}{22k + 10k} \right) \cdot 10V = 0,688 \cdot 10 = 6,88V \Rightarrow U_B = 6,88V$$

Între tensiunile marcate cu roșu în schema de mai sus este relația:

$$V_{ee} = U_{Re} + U_{eb} + U_B \Rightarrow U_{Re} = V_{ee} - U_{eb} - U_B \quad (2)$$

$U_{Re} = R_E \cdot I_e \quad (3)$ Înlocuind relația (3) în relația (2) se obține:

$$R_E \cdot I_e = V_{ee} - U_{eb} - U_B \Rightarrow I_e = \frac{V_{ee} - U_{eb} - U_B}{R_E} \quad (4)$$

$$I_e = \frac{10 - 0,7 - 6,88}{1 \cdot 10^3} = 2,42 \cdot 10^{-3} A = 2,42 mA \Rightarrow I_e = 2,42 mA$$

$$\text{Se știe că: } I_e = (\beta + 1) \cdot I_b \Rightarrow I_b = \frac{I_e}{\beta + 1} \quad (5)$$

$$I_b = \frac{2,42}{215 + 1} = \frac{2,42}{216} = 0,011 mA = 11 \mu A \Rightarrow I_b = 11 \mu A$$

Deoarece $Ic = \beta \cdot Ib$ (6) $\Rightarrow Ic = 215 \cdot 11 \mu A = 2365 \mu A = 2,36 mA$

$Ic = 2,36 mA$

Se aplică T2 Kirchhoff pe ochiul ce conține jonctiunea colector-emitor:

$$-Vee + Re \cdot Ie + Uec + Rc \cdot Ic = 0 \Rightarrow Uec = Vcc - Re \cdot Ie - Rc \cdot Ic \quad (7)$$

$$Uec = 10V - 1K\Omega \cdot 2,42mA - 1,8K\Omega \cdot 2,36mA$$

$$Uec = 10 - 1 \cdot 10^3 \cdot 2,42 \cdot 10^{-3} - 1,8 \cdot 10^3 \cdot 2,36 \cdot 10^{-3}$$

$$Uec = 10 - 2,42 - 4,24 = 3,34 \Rightarrow \mathbf{Uec = 3,34 V}$$

Coordonatele PSF sunt: (**$Ic = 2,36 mA$** ; **$Uec = 3,34 V$**)

b. Pentru determinarea regimului de funcționare se determină tensiunile în Emitor, Bază, Colector și se observă cum sunt polarizate jonctiunile EB și EC.

Tensiunile la terminalele tranzistorului se determină față de "masa" montajului.

$Ub = 6,88 V$ a fost calculat cu relația (1)

$$Ueb = Ue - Ub \Rightarrow Ue = Ueb + Ub \quad (8)$$

$$Ue = 0,7V + 6,88V = 7,58 V \Rightarrow \mathbf{Ue = 7,58 V}$$

$$Uec = Ue - Uc \Rightarrow Uc = Ue - Uec \quad (9)$$

$$Uc = 7,58V - 3,34V = 4,24 V \Rightarrow \mathbf{Uc = 4,24 V}$$

Se observă că **$Uc = Ur_c = 4,24 V$** (o metodă mai simplă!)

$$\mathbf{Ue = 7,58 V ; Ub = 6,88 V ; Uc = 4,24 V}$$

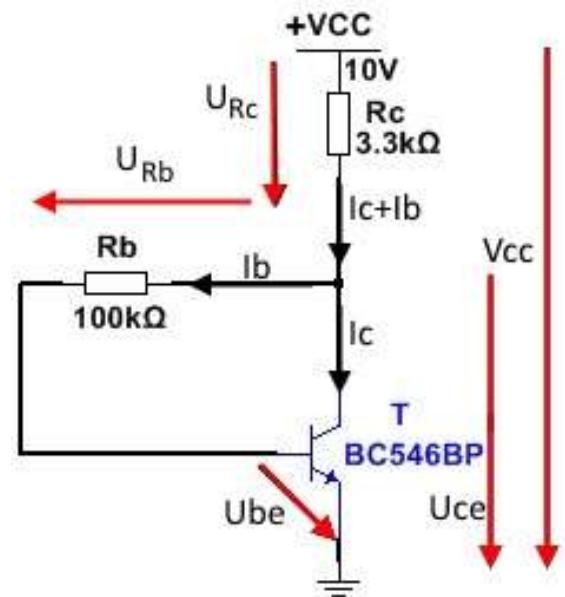
Deoarece **$Ue > Ub$** \Rightarrow jonctiunea emitor-bază este polarizată direct

Deoarece **$Uc < Ub$** \Rightarrow jonctiunea colector-bază este polarizată invers

Tranzistorul funcționează în regim activ normal deoarece jonctiunea emitor-bază este polarizată direct iar jonctiunea colector-bază este polarizată invers.

PROBLEMA 7.

În circuitul din figura 5.60 se cunosc valorile: $U_{be} = 0,6 V$ și $\beta = 280$



Se cere:

a. Valorile parametrilor ce caracterizează punctul static de funcționare al tranzistorului.

b. Să se determine regimul de funcționare al tranzistorului.

Figura 5.60 Tranzistor bipolar NPN polarizat cu reacție în colector

REZOLVARE

a. Parametrii care caracterizează PSF sunt: Ib , Ic , Uce .

$$\text{Deoarece } Ic \gg Ib \Rightarrow Ic + Ib \cong Ic \Rightarrow U_{Rc} = R_c \cdot Ic \quad (1)$$

Pe ochiul format de: Vcc , U_{Rc} , U_{Rb} , U_{be} se aplică T2 Kirchhoff:

$$Vcc = U_{Rc} + U_{Rb} + Ube \Rightarrow U_{Rc} + U_{Rb} = Vcc - Ube \quad (2)$$

$$Rc \cdot Ic + Rb \cdot Ib = Vcc - Ube \quad (3) \quad Ic = \beta \cdot Ib \quad (4)$$

Înlocuind relația (4) în relația (3) se obține:

$$Rc \cdot \beta \cdot Ib + Rb \cdot Ib = Vcc - Ube \Rightarrow Ib = \frac{Vcc - Ube}{Rc \cdot \beta + Rb} \quad (5)$$

$$Ib = \frac{10V - 0,6V}{3,3K\Omega \cdot 280 + 100K\Omega} = \frac{9,4}{3,3 \cdot 10^3 \cdot 280 + 100 \cdot 10^3} = \frac{9,4}{1024} \cdot 10^{-3}$$

$$Ib = 0,009 \cdot 10^{-3} A = 0,009 mA = 9 \mu A \Rightarrow Ib = 9 \mu A$$

Se înlocuiește valoarea lui Ib în relația (4) și se obține:

$$Ic = 280 \cdot 9 \mu A = 2520 \mu A = 2,52 mA \Rightarrow Ic = 2,52 mA$$

Pe ochiul format de : **V_{CC} , U_{Rc} , U_{ce}** se aplică T2 Kirchhoff:

$$V_{CC} = U_{Rc} + U_{ce} \Rightarrow U_{ce} = V_{CC} - U_{Rc} \Rightarrow U_{ce} = V_{CC} - R_c \cdot I_c \quad (6)$$

$$U_{ce} = 10V - 3,3K\Omega \cdot 2,52mA = 10 - 3,3 \cdot 10^3 \cdot 2,52 \cdot 10^{-3}$$

$$U_{ce} = 10 - 3,3 \cdot 2,52 = 10 - 8,31 = 1,69 \Rightarrow U_{ce} = 1,69 V$$

Parametrii caracteristici punctului static de funcționare al tranzistorului sunt:

$$I_b = 9 \mu A ; \quad I_c = 2,52 mA ; \quad U_{ce} = 1,69 V$$

b. Pentru determinarea regimului de funcționare se determină tensiunile în Emitter, Bază, Colector și se observă cum sunt polarizate jonctiunile BE și BC.

Deoarece emitorul tranzistorului este conectat la "masa" montajului $\Rightarrow U_e = 0$

Dacă $U_e = 0 \Rightarrow U_c = U_{ce} = 1,69 V$ și $U_b = U_{be} = 0,6 V$

$$U_e = 0 V ; \quad U_b = 0,6 V ; \quad U_c = 1,69 V$$

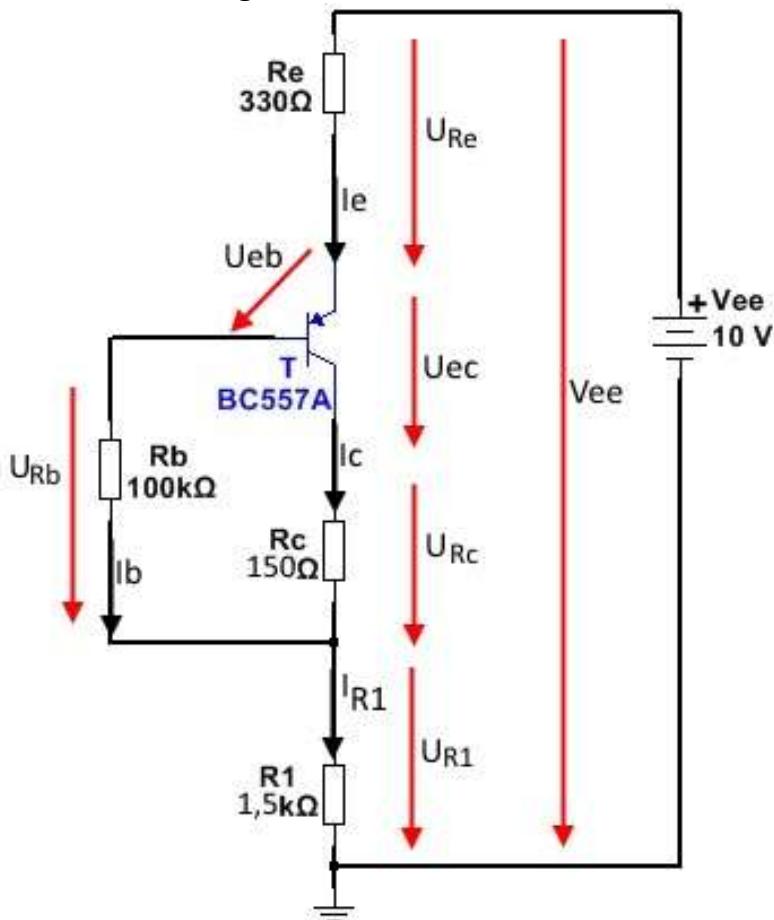
Deoarece $U_b > U_e \Rightarrow$ jonctiunea bază-emitor este polarizată direct

Deoarece $U_b < U_c \Rightarrow$ jonctiunea bază-colector este polarizată invers

Tranzistorul funcționează în regim activ normal deoarece jonctiunea bază-emitor este polarizată direct iar jonctiunea bază-colector este polarizată invers.

PROBLEMA 8.

În circuitul din figura 5.61 se cunosc valorile: $U_{be} = 0,7 V$ și $\beta = 230$



Se cere:

a. Valorile parametrilor ce caracterizează punctul static de funcționare al tranzistorului.

b. Să se determine regimul de funcționare al tranzistorului.

Figura 5.61 Tranzistor bipolar PNP polarizat cu reacție în colector

REZOLVARE

a. Parametrii care caracterizează PSF sunt: I_b , I_c , U_{ce} .

Pe ochiul format de : V_{ee} , U_{Re} , U_{eb} , U_{Rb} , U_{R1} se aplică T2 Kirchhoff:

$$V_{ee} = U_{Re} + U_{eb} + U_{Rb} + U_{R1} \Rightarrow U_{Re} + U_{Rb} + U_{R1} = V_{cc} - U_{eb} \quad (1)$$

$$\text{Aplicând T1 Kirchhoff în nodul dintre } R_c \text{ și } R_1 \Rightarrow I_{R1} = I_c + I_b \quad (2)$$

$$U_{Re} = R_e \cdot I_e ; \quad U_{Rb} = R_b \cdot I_b ; \quad U_{R1} = R_1 \cdot I_{R1} = R_1 \cdot (I_c + I_b) \quad (3)$$

$$I_c = \beta \cdot I_b ; \quad I_e = (\beta + 1) \cdot I_b \quad (4)$$

Înlocuind relațiile (3) și (4) în relația (1) se obține:

$$R_e \cdot (\beta + 1) \cdot I_b + R_b \cdot I_b + R_1 \cdot (\beta \cdot I_b + I_b) = V_{cc} - U_{eb} \quad (5)$$

$$I_b \cdot [R_e \cdot (\beta + 1) + R_b + R_1 \cdot (\beta + 1)] = V_{cc} - U_{eb} \quad (6)$$

$$I_b = \frac{V_{cc} - U_{eb}}{R_e \cdot (\beta + 1) + R_b + R_1 \cdot (\beta + 1)} \quad (7)$$

$$Ib = \frac{10V - 0,7V}{330\Omega \cdot (230 + 1) + 100K\Omega + 1,5K\Omega \cdot (230 + 1)}$$

$$Ib = \frac{9,3}{330 \cdot 231 + 100000 + 1500 \cdot 231} = \frac{9,3}{76230 + 100000 + 346500}$$

$$Ib = \frac{9,3}{522730} = 0,0000177 A = 17,7 \mu A \Rightarrow Ib = 17,7 \mu A$$

Înlocuind valoarea lui Ib în relațiile (4) și (2) se obține:

$$Ic = 230 \cdot 17,7 \mu A = 4071 \mu A = 4,07 mA \Rightarrow Ic = 4,07 mA$$

$$Ie = (230 + 1) \cdot 17,7 \mu A = 4089 \mu A = 4,09 mA \Rightarrow Ie = 4,09 mA$$

$$I_{R1} = 4,07 mA + 17,7 \mu A = 4,08 mA \Rightarrow I_{R1} = 4,08 mA$$

Pe ochiul format de : Vee , U_{Re} , U_{ec} , U_{Rc} , U_{R1} se aplică T2 Kirchhoff:

$$Vee = U_{Re} + U_{ec} + U_{R1} \Rightarrow U_{ec} = Vee - (U_{Re} + U_{Rc} + U_{R1}) \quad (8)$$

$$U_{ec} = 10V - (330\Omega \cdot 4,09mA + 150\Omega \cdot 4,07mA + 1,5K\Omega \cdot 4,08mA)$$

$$U_{ec} = 10 - (330 \cdot 4,09 \cdot 10^{-3} + 150 \cdot 4,07 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^3 \cdot 4,08 \cdot 10^{-3})$$

$$U_{ec} = 10 - (1,35 + 0,61 + 6,12) = 10 - 8,08 = 1,92 \text{ V} \Rightarrow U_{ec} = 1,92 \text{ V}$$

Parametrii caracteristici punctului static de funcționare al tranzistorului sunt:

$$Ib = 17,7 \mu A ; Ic = 4,07 mA ; U_{ec} = 1,92 V$$

b. Pentru determinarea regimului de funcționare se determină tensiunile în Emitter, Bază, Colector și se observă cum sunt polarizate jonctiunile EB și EC.

$$Uc = U_{Rc} + U_{R1} ; Ue = Vee - U_{Re} ; Ub = Ue - Ueb \quad (9)$$

$$Ue = 10 - 1,35 = 8,65 \Rightarrow Ue = 8,65 V$$

$$Ub = 8,65 - 0,7 = 7,95 \Rightarrow Ub = 7,95 V$$

$$Uc = 0,61 + 6,12 = 6,73 V \Rightarrow Uc = 6,73 V$$

Deoarece $Ue > Ub \Rightarrow$ jonctiunea emitor-bază este polarizată direct

Deoarece $Uc < Ub \Rightarrow$ jonctiunea colector-bază este polarizată invers

Tranzistorul funcționează în regim activ normal.

5.6. FORMULE DE BAZĂ UTILIZATE ÎN CIRCUITELE CU TRANZISTOARE

Formule utilizate în circuite cu tranzistoare de tip NPN cu emitorul comun.

$$(1) I_E = I_C + I_B \quad (2) I_C = \beta \cdot I_B \quad (3) I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$$

$$(4) I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$(5) I_{C(max)} = \frac{P_{D(max)}}{V_{CE}}$$

$$(6) I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C}$$

$$(7) I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta}$$

$$(8) V_{BE} = (0,6 \dots 0,7) V$$

$$(9) V_{CE(blocare)} = V_{CC}$$

$$(10) V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_E \quad (11) V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

Formule utilizate în circuite de polarizare a bazei din Vcc.

$$(12) V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

$$(13) I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b}$$

$$(14) I_C = \beta_{CC} \cdot \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \right)$$

Formule utilizate în circuite de polarizare a bazei prin divizor de tensiune.

$$(15) V_B = \left(\frac{Rb2}{Rb1 + Rb2} \right) \cdot V_{CC} \quad (16) V_B = V_{BE} + V_{RE}$$

$$(17) I_C \cong I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

$$(18) V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot (R_C + R_E) \quad (19) V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

$$(20) I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

$$(21) V_{CE(blocare)} = V_{CC}$$

Formule utilizate în circuite de polarizare cu două surse de tensiune.

$$(22) \quad I_C \cong I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta_{CC}}}$$

$$(23) \quad V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C(R_C + R_E)$$

$$(24) \quad V_E = -V_{EE} + I_E \cdot R_E$$

$$(25) \quad V_B = V_E + V_{BE}$$

$$(26) \quad V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

$$(27) \quad I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_C + R_E}$$

$$(28) \quad V_{CE(blocare)} = V_{CC} + V_{EE}$$

Formule utilizate în circuite de polarizare cu reacție în colector.

$$(29) \quad I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_C \cdot \beta + R_B}$$

$$(30) \quad I_C = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{\beta}} \quad (31) \quad I_C = \beta \cdot I_B$$

$$(32) \quad U_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$