

LUCREAREA NR.2

CARACTERISTICILE STATICE ALE TRANZISTORULUI BIPOLAR

1. Scopul lucrării : Ridicarea caracteristicilor statice ale tranzistorului bipolar în conexiunile emitor-comun (EC) și bază-comună (BC), determinarea unor parametri de curent continuu și de regim dinamic al tranzistorului bipolar.

2. În *fig.2.1* este reprezentat simbolul unui tranzistor NPN cu precizarea sensului curenților și tensiunilor așa cum vor fi folosite în această lucrare. Între aceste mărimi se pot scrie relațiile $i_E = i_C + i_B$ (2.1) și $u_{CE} = u_{CB} + u_{BE}$ (2.2).

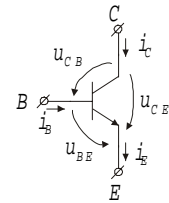


fig .2 .1

3. Comportarea tranzistorului bipolar în regim continuu este definită de relațiile ce descriu dependența curenților i_C și i_E de tensiunile aplicate la bornele celor două joncțiuni u_{BE} și u_{CB} . În regiunea activă normală, joncțiunea emitor-bază polarizată direct și joncțiunea colector-bază polarizată invers, relațiile de bază pentru

curenți pentru un tranzistor NPN sunt: $i_E = S \frac{qD_n n_p}{w} e^{\frac{q \cdot u_{BE}}{kT}}$ (2.3) și $i_C = \alpha_0 i_E + I_{CB0}$ (2.4). În aceste

relații S este suprafața joncțiunii bază-emitor, D_n este constanta de difuzie a purtătorilor minoritari din bază (electronii) a căror concentrație este n_p , $\frac{kT}{q} = 26$ mV la temperatura camerei, w este

grosimea efectivă a bazei dată de relația $w = d - \sqrt{\frac{2\varepsilon(U'_0 - u_{CB})}{q} \frac{n_n + p'_p}{n_n \cdot p'_p}}$ (2.5) (d este grosimea

fizică a bazei, U'_0 este bariera de potențial a joncțiunii colector-bază dependentă de concentrațiile de purtători majoritari din bază n_n și din colector p'_p , iar ε este permeativitatea electrică a materialului din care este confecționat tranzistorul); se constată că, la creșterea tensiunii de polarizare inversă a joncțiunii bază-colactor, grosimea efectivă a bazei scade. Parametrul α_0 este factorul de curent al tranzistorului în conexiunea bază comună și are expresia aproximativă :

$\alpha_0 = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L_n} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \frac{w}{L_p} \right)$ (2.6), unde L_n și L_p sunt lungimile de difuzie ale electronilor (în

bază) respectiv ale golurilor (în emitor) iar σ_p și σ_n sunt conductivitățile electrice ale bazei, respectiv emitorului. Se remarcă dependența lui α_0 de tensiunea colector bază prin intermediul lui w .

4. Din punct de vedere practic, pentru determinarea regimului de funcționare în curent continuu, este necesară cunoașterea caracteristicilor statice de intrare, de transfer direct și de ieșire (numai două dintr ele sunt independente), cu particularități specifice fiecărui mod de conexiune. În conexiunea bază comună, electrodul de referință este baza iar în conexiunea emitor comun electrodul de referință va fi emitorul.

Din punct de vedere dinamic, la semnale mici (când caracteristicile statice pot fi liniarizate în jurul punctului static de funcționare), lent variabile, tranzistorului poate fi caracterizat prin parametri

de cuadripol definiți prin ecuațiile $\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases}$ (2.7) unde U_1 , U_2 , I_1 și I_2 sunt mărimile

variabile sinusoidale, cu sensurile obișnuite acceptate pentru cuadripoli (*fig.2.1*). Parametrii h vor fi indexați b sau e după cum tranzistorul este utilizat în conexiunea BC sau EC; de multe ori se notează $h_{ije} = h_{ij}$.

5. Caracteristica de intrare a tranzistorului în conexiunea BC adică $i_E = i_E(u_{EB})$, se deduce din relația 2.3, în care se înlocuiește $u_{BE} = -u_{EB}$. Reprezentarea grafică este dată în *fig.2.2*, unde s-a considerat ca parametru, tensiunea u_{CB} . Se constată caracterul exponențial al caracteristicii de intrare și influența mică a tensiunii de colector asupra caracteristicii de intrare. Exponentul poate fi afectat de coeficientul γ , ca la dioda semiconductoră, determinarea lui experimentală făcându-se în același mod.

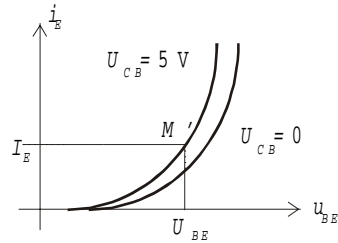


fig .2 .2

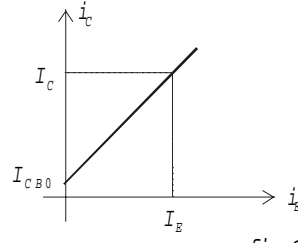


fig 2 .3

6. Caracteristica de transfer $i_C = i_C(i_E)$ este descrisă de ecuația (2.4) și este reprezentată grafic în *fig.2.3*; factorul de curent α_0 , care dă panta acestei drepte, variază foarte puțin cu tensiunea u_{CB} (prin intermediul lui w) și cu curentul de colector (scădere atât la curenți mici cât și la curenți mari, dependență care nu rezultă din traiectoria elementară a tranzistorului). Factorul de curent al tranzistorului în conexiunea bază comună, α_0 , se calculează cu relația $\alpha_0 = \frac{i_C - I_{CB0}}{i_E}$ (2.8) dar precizia acestei relații este puternic afectată de imprecizia măsurărilor curenților i_C și i_E , de valori foarte apropiate. Pentru măsurarea factorului de curent α_0 se preferă relația (2.15), după măsurarea factorului de curent în conexiunea EC, β_0 .

I_{CB0} este curentul jonctiunii colector-bază polarizate invers cu emitorul în gol, de valoare foarte mică pentru tranzistoarele realizate din siliciu și dependent de tensiunea u_{CB} .

7. Caracteristicile de ieșire $i_C = i_C(u_{CB})$, sunt determinate de relațiile (2.4) și (2.6) și sunt

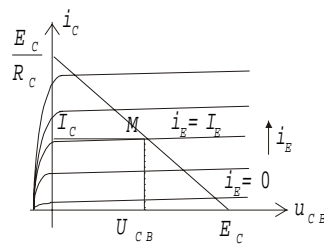


fig .2 .4

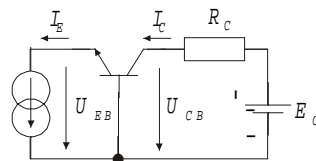


fig 2 .5

reprezentate grafic în *fig.2.4*. Se constată dependență foarte mică a curentului de colector de tensiunea u_{CB} în regiunea activă normală, caracteristicile fiind practic orizontale și echidistante, pentru trepte constante ale curentului de emitor (ceea ce conferă tranzistorului în conexiunea BC caracterul de generator de curent). Pentru tensiuni $u_{CB} < 0$, curentul de colector scade datorită polarizării în conducție directă și a jonctiunii colector-bază, ceea ce duce la funcționarea tranzistorului în regiunea de saturatie.

8. În circuitul elementar din *fig.2.5*, punctul static de funcționare se determină prin rezolvarea grafo-analitică a sistemului de ecuații $\begin{cases} i_C = i_C(i_E, u_{CB}) \\ E_C = R_C i_C + u_{CB} \end{cases}$ (2.9) unde valoarea curentului de emitor este fixată de circuitul de intrare (în lucrare, de către generatorul de curent). În *fig.2.4* în planul caracteristicilor statice, se trasează drepte de sarcină și, pentru $i_E = I_E$, se obține punctul static de

funcționare M cu coordonatele $M(I_E, I_C, U_{CB})$; pe caracteristica de intrare punctul static de funcționare este $M'(I_E, U_{EB})$.

În punctul static de funcționare, se pot măsura parametrii h pentru caracterizarea funcționării tranzistorului la semnale variabile mici, conform relațiilor : $h_{11b} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_E} \right|_M$, $h_{21b} = - \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \right|_M$,

$$h_{22b} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CB}} \right|_M \quad (2.10).$$

Parametrii h_{11b} și h_{21b} se dau și relațiile teoretice deduse din ecuațiile (2.3) și (2.4) sub forma

$$h_{11b} \approx \frac{kT}{q \cdot I_E} \approx \frac{kT}{q \cdot I_C} \quad (2.11) \text{ și } h_{21b} \approx -\alpha_0 \quad (2.12).$$

Parametrul h_{12b} nu poate fi determinat printr-o aceeași metodă deoarece variațiile foarte mici ale tensiunii u_{EB} (la variații mari ale tensiunii u_{CB}) sunt afectate de fenomene secundare, cum ar fi modificarea regimului termic al tranzistorului la variația tensiunii de colector.

9. Caracteristica de intrare pentru tranzistorul în conexiunea EC, dată de funcția $i_B = i_B(u_{BE})$ are ca parametru tensiunea u_{CE} , care intervine, în principal, prin parametrul w . Ecuația acestei caracteristici se obține din relațiile (2.1), (2.3) și (2.4) sub forma :

$$i_B = (1 - \alpha_0) \frac{S \cdot q \cdot D_n n_p}{w} e^{\frac{q \cdot u_{BE}}{kT}} - I_{CB0} \quad (2.13) \text{ și este reprezentată grafic în fig.2.6.}$$

Se constată forma exponențială a caracteristicii, cu o influență redusă a tensiunii u_{CE} (prin intermediul variației grosimii efective a bazei, w) și anularea curentului de bază pentru o valoare diferită de 0 a tensiunii u_{BE} .

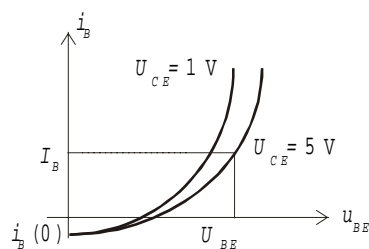


fig .2 .6

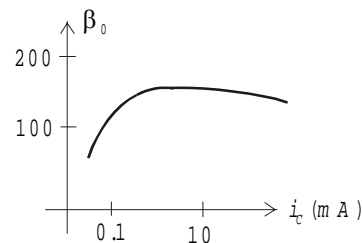


fig .2 .7

10. Caracteristica de transfer este dată de relația (2.14) : $i_C = \beta_0 i_B + I_{CE0}$ unde β_0 este factorul de curent în conexiune EC a cărei expresie dedusă din relațiile (2.1) și (2.4) este :

$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad (2.15), \text{ iar } I_{CE0} \text{ este curentul de colector măsurat cu baza în gol și determinat prin relația}$$

$$: I_{CE0} = (\beta_0 + 1) I_{CB0} \quad (2.16) .$$

Factorul de curent al tranzistorului în conexiunea EC depinde de tensiunea colector-emitor (prin intermediul grosimii efective a bazei, w) și de curentul de colector (această dependență este mai puternică decât a factorului de curent α_0) ca în fig.2.7.

$$\text{Factorul de curent } \beta_0 \text{ se determină din relația (2.14) sub forma } \beta_0 = \frac{i_C - I_{CE0}}{i_B} \quad (2.17).$$

11. Caracteristicile de ieșire dau dependența curentului de colector de tensiunea u_{CE} având ca parametru curentul de bază, i_B , și sunt descrise de relația (2.14); dependența mai puternică a factorului

de curent al tranzistorului, β_0 , de u_{CE} , determină o inclinare mai puternică a caracteristicilor față de orizontală.

În zona tensiunilor u_{CE} mici, ecuația (2.14) nu mai este valabilă, tranzistorul funcționând în regiunea de saturație.

12. Pentru circuitul elementar din *fig.2.9*, punctul static de funcționare se determină prin metoda grafo-analitică de rezolvare a sistemului format din ecuațiile :

$$\begin{cases} i_C = i_C(i_B, u_{CE}) \\ E_C = R_C i_C + u_{CE} \end{cases} \quad (2.18),$$

curentul i_B fiind determinat de circuitul de intrare (in cazul lucrării, prin generator de curent constant).

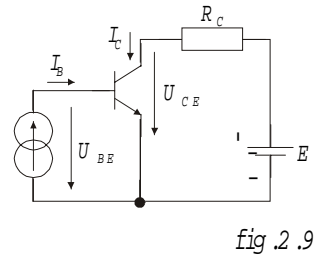
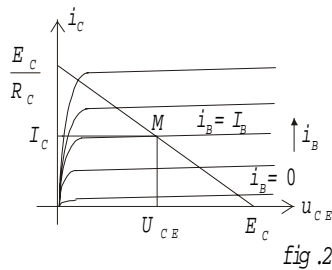


fig .2 .9

În punctul static de funcționare, M , caracterizat prin parametrii $M(I_C, I_B, U_{BE}, U_{CE})$, se pot defini parametri h pentru semnal mic, lent variabil :

$$h_{11e} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_M, \quad h_{21e} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_M, \quad h_{22e} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} \right|_M \quad (2.19).$$

La fel ca și h_{12b} , parametrul h_{12e} nu se poate măsura prin această metodă.

Între parametri h în conexiunea EC și cei în conexiunea BC există următoarele relații aproximative :

$$h_{11e} \approx (h_{21e} + 1)h_{11b} \approx \frac{h_{21e} kT}{qI_C} \quad (2.20), \quad h_{21b} \approx -\frac{h_{21e}}{1 + h_{21e}} \quad (2.21).$$

13. În anumite circuite electronice, tranzistorul bipolar poate fi folosit în conexiune inversă prin schimbarea rolurilor terminalelor emitor și colector. Parametrul ce caracterizează această funcționare este factorul de curent în conexiune inversă, α_i sau β_i . Cu excepția unor tranzistoare special construite, factorul de curent β_i , este foarte mic, de obicei, subunitar.

DESFĂȘURAREA LUCRĂRII

1. Se identifică montajul din *fig.2.10*, în care se folosește un circuit ajutător în calitate de generator de curent reglabil din potențiometrul P . Pentru curenții de bază necesari tranzistorului NPN în conexiune EC se alimentează schema cu +5 V (aproximativ) la borna 2 față de borna de masă (borna 1) și se obține la borna 3 un curent reglabil (în sensul săgeții) între 0÷200 μA ; pentru curenții de emitor necesari aceluiași tranzistor NPN în conexiune BC se alimentează schema cu -5V la borna 2 față de borna 1 (borna de masă) și se obține la borna 4 un curent reglabil între 0÷50 mA.

2. Se trasează caracteristica de intrare a tranzistorului în conexiunea BC conform schemei de măsură din *fig.2.11*. Pentru aceasta, generatorul de curent se va alimenta cu -5 V la borna 2 față de borna de masă (borna 1), ieșirea generatorului de curent fiind borna 4. Pentru curentul de emitor se vor lua valorile: 0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; mA, iar tensiunea

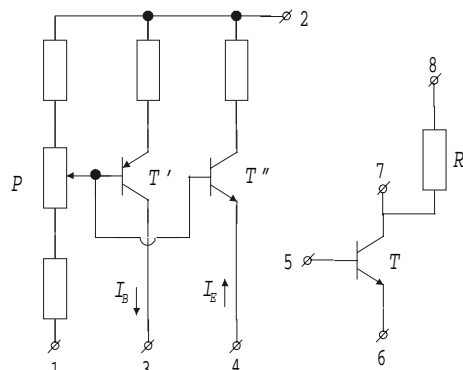


fig .2 .10

colector-bază va fi de 5 V. Rezultatele se trec în tabelul 2.1 și se trasează caracteristica de intrare atât la scară liniară cât și la scară logaritmică (pentru curent) pentru determinarea parametrului γ ca la dioda semiconductoră.

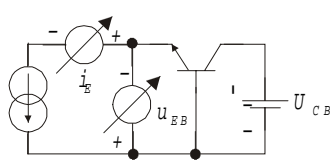


fig .2 .11

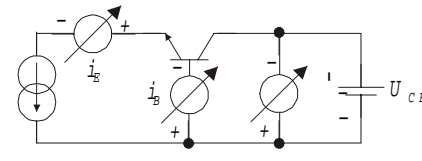


fig .2 .12

U_{CB}	i_E (mA)	0	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50
5V	u_{EB} (mV)										

Tabelul2.1

3. Se trasează cracteristica de transfer $i_C = i_C(i_E)$ folosind schema de măsură din fig.2.12. Întrucât valorile curenților i_C și i_E sunt foarte apropiate, se preferă măsurarea curentului de bază pentru fiecare valoare a curentului de emitor, iar curentul de colector se deduce din relația (2.1). tensiunea u_{CB} este de 5 V. Pentru curentul de emitor se vor lua aceleași valori ca la punctul precedent. Rezultatele se trec în tabelul 2.2 și se trasează caracteristic de transfer la scară liniară. Pentru $i_E=2$ mA, se determină factorul de curent al tranzistorului în conexiunea BC, α_0 , cu relația (2.8) în care I_{CB0} este valoarea curentului de colector obținut cu emitorul în gol .

Se vor compara valorile obținute pentru α_0 și I_{CB0} cu valorile rezultate din relațiile (2.15) și (2.16), în care β_0 are valoarea determinată în același punct de funcționare la punctul 7.

U_{CB}	i_E (mA)	0	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50
5V	i_B (μ A)										
	i_C (mA)										

Tabelul2.2

4. Se trasează caracteristicile statice de ieșire în conexiunea BC cu schema de măsură din fig.2.12. Pentru tensiunea de ieșire se vor lua valorile 0.1; 0.5; 1; 2; 5; 10; V, iar curentul de emitor va fi fixat la valorile 2; 4; 6; 8; 10; mA . Rezultatele se trec în tabelul 2.3.

i_E (mA)	u_{CB} (V)	0	0.1	0.5	1	2	5	10
2	i_B (μ A)							
	i_C (μ A)							
4	i_B (μ A)							
	i_C (mA)							
6	i_B (μ A)							
	i_C (mA)							
8	i_B (μ A)							
	i_C (mA)							
10	i_B (μ A)							
	i_C (mA)							

Tabelul2.3

Pentru $i_E = 2 \text{ mA}$, se inversează semnul tensiunii U_{CB} și se determină valoarea acestei tensiuni pentru care curentul de colector se anulează; măsurătoarea se va face cu atenție, deoarece anularea curentului de colector se produce la valori mici ale tensiunii colector bază (circa $-0.6 \div -0.7 \text{ V}$)

5. În planul caracteristicilor ridicate la punctul precedent, se trasează dreapta statică de funcționare, conform relației (2.9) în care $R_C = 3.6 \text{ k}\Omega$ și $E_C = 12 \text{ V}$ și se determină coordonatele punctului static de funcționare, știind că $I_E = 2 \text{ mA}$.

Se realizează montajul elementar din *fig.2.5* cu $R_C = 3.6 \text{ k}\Omega$ și $E_C = 12 \text{ V}$ și se măsoară coordonatele punctului static de funcționare pentru $I_E = 2 \text{ mA}$. Se compară rezultatele obținute prin cele două metode. În punctul de funcționare astfel determinat, se calculează parametrul h_{11b} pe caracteristica de intrare, iar parametrii h_{21b} și h_{22b} se calculează folosind rezultatele din tabelul corespunzător, având în vedere dificultatea măsurării unor variații foarte mici ale curentului de colector direct pe grafic. Se vor folosi relațiile (2.10)

6. Se alimentează generatorul de curent cu $+5 \text{ V}$ la borna 2 (față de borna 1); se trasează caracteristica de intrare în conexiunea EC, $i_B = i_B(u_{BE})$, conform schemei de măsură din *fig.2.13* (bornele 1 și 6 sunt legate împreună iar miliampermetrul se conectează între bornele 3 și 5); tensiunea u_{BE} se va măsura cu un voltmetru electronic, de preferință numeric. Se va măsura tensiunea u_{BE}

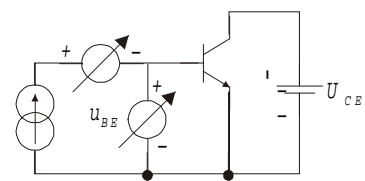


fig .2.13

pentru următoarele valori ale curentului de bază: $i_B = 0; 10; 20; 30; 40$ și $50 \mu\text{A}$. Întrucât caracteristica de intrare $i_B(u_{BE})$ pleacă de la valori negative ale curentului de bază, se vor pune în scurt circuit baza cu emitorul și se va măsura $i_B(0)$ (schimbând bornele miliampermetrului). Se menține curentul de bază la valoarea constantă $I_B = 50 \mu\text{A}$ și se măsoară tensiunea bază-emitor pentru următoarele valori ale tensiunii colector-emitor : $0; 1; 5$ și 10 V . Rezultatele se vor trece în tabelul 2.4. Se va trasa graficul $i_B(u_{BE})$ cu $U_{CE} = 5 \text{ V}$, la scară liniară.

$U_{CE}(\text{V})$	5							0.1	1	10
$i_B(\mu\text{A})$		0	10	20	30	40	50	50	50	50
$u_{BE}(\text{mV})$	0									

Tabelul 2.4

7. Se măsoară mărimile necesare pentru ridicarea caracteristicii de transfer, conform schemei de măsură din *fig.2.14*. Tensiunea colector-emitor va fi $u_{CE} = 5 \text{ V}$.

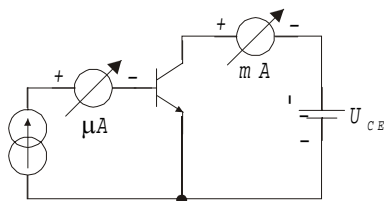


fig .2.14

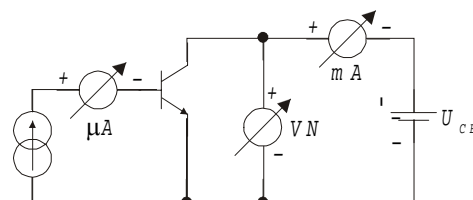


fig .2.15

Se va nota, mai întâi, valoarea curentului de colector cu baza în gol, I_{CE0} . Se va regla apoi curentul de bază pentru a se obține curenți de colector de valoare $0.5; 1; 2; 5; 10; 20; 50 \text{ mA}$, rezultatele fiind trecute în tabelul 2.5.

În același tabel, se va trece factorul de curent al tranzistorului, β_0 , calculat cu relația (2.7).

Se măsoară factorul de curent al tranzistorului în conexiunea EC la alte două tensiuni colector-emitor, $u_{CE} = 1 \text{ V}$ și $u_{CE} = 10 \text{ V}$. Pentru fiecare dintre aceste valori, se determină, mai întâi I_{CE0} (cu

baza în gol) și apoi curentul de bază necesar obținerii ac eluiași curent colector $I_C = 2$ mA. Se va trasa graficul funcției de transfer $i_C(i_B)$, la scară liniară.

$U_{CE}(V)$	5							1	10			
$i_B(\mu A)$	0							0		0		
$i_C(mA)$		0.5	1	2	5	10	20	50		2	0	2
β_0	-											

Tabelul 2.5

8. Se determină caracteristicile de ieșire ale tranzistorului în conexiune EC cu parametru i_B , conform schemei de măsură din fig.2.15. Pentru curentul de bază, i_B , se vor lua valorile 10; 20; 30; 40; 50 μA , iar curentul colector se va măsura pentru următoarele valori ale tensiunii colector-emitor care asigură funcționarea tranzistorului în regiunea activă normală : 0.5; 1; 2; 5; 10 V și se trasează familia de caracteristici $i_C(u_{CE})$ la scară liniară.

Se efectuează măsurătorile pentru ridicarea caracteristicilor de ieșire în zona de saturație a tranzistorului și în zona activă normală învecinată, pentru tensiuni mici între colector și emitor. Se va folosi același montaj și se vor considera aceleași valori ale curentului de bază, iar tensiunea colector-emitor se reglează la valorile 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 și 0.5 V. Rezultatele se trec în același tabelul 2.6 și se va trasa un grafic separat pentru această zonă la o scară convenabilă pentru u_{CE} .

i_C (mA)	$u_{CE}(V)$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	5	10
	$i_B(\mu A)$										
	10										
	20										
	30										
	40										
50											

Tabelul 2.6

9. Se realizează schema din fig.2.9 pentru determinarea punctului static de funcționare Se fixează $E_C = 12$ V și se reglează curentul de bază până când $I_C = 2$ mA. Se vor nota coordonatele punctului static de funcționare (I_C, I_B, U_{CE}, U_{BE}).

Pe caracteristicile statice de ieșire ale tranzistorului desenate la punctul precedent, se trasează prin interpolare, cu aproximație, caracteristica statică corespunzătoare curentului de bază măsurat anterior și dreapta de sarcină descrisă de ecuația (2.18). La intersecția lor se obține punctul static de funcționare ale cărui coordonate trebuie să fie apropiate de cele măsurate.

În acest punct static de funcționare, se vor determina parametrii h_{11e} (pe caracteristica de intrare), h_{21e} (pe caracteristica de transfer), h_{22e} (pe caracteristica de ieșire) conform relațiilor (2.19).

Se vor verifica relațiile de legătură între parametrii h în cele două conexiuni (2.20) și (2.21), punctele de funcționare fiind apropiate.

10. Se măsoară factorul de curent al tranzistorului în conexiune inversă, conform schemei de măsură din fig.2.16 și folosind relația $\beta_i = \frac{i_E - I_{EC0}}{i_B}$, unde i_E este curentul înregistrat de ampermetrul din emitor pentru $i_B = 200 \mu A$, iar I_{EC0} este curentul înregistrat de același aparat pentru $i_B = 0$ (baza în gol).

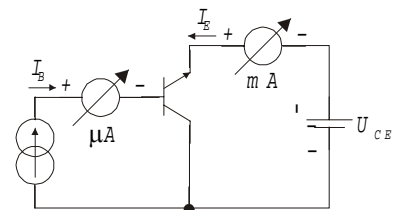


fig .2 .16

11. Se vor vizualiza, pe caracterograf, caracteristicile statice de intrare și de ieșire pentru ambele conexiuni ale tranzistorului. Se vor vizualiza și deformările caracteristicilor de ieșire la tensiuni de colector apropiate de tensiunea de străpungere, pentru ambele conexiuni.

12. Referatul va conține: schemele de măsură pentru parametrii și pentru caracteristicile statice ale tranzistorului în cele două conexiuni, tabelele cu rezultatele măsurărilor, graficele corespunzătoare și determinările făcute pe baza acestora așa cum se indică la modul de lucru; schemele elementare cu tranzistoare pentru determinarea punctelor statice de funcționare respective. În cazul unor neconcordanțe între rezultatele teoretice și cele experimentale se vor da scurte justificări.