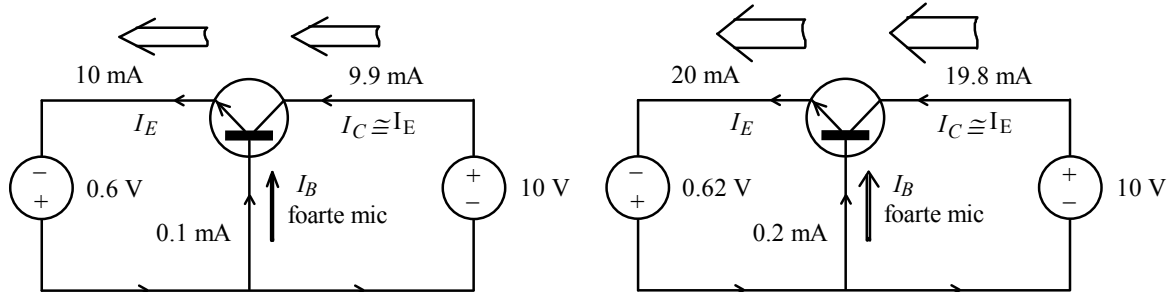


Tranzistoare bipolare - caracteristici statice



4.1. Conexiunea bază comună 83

4.2. Conexiunea emitor comun 113

4.1. Conexiunea bază comună

1.A. Tranzistoare: structură, simboluri și mod de funcționare 83

1.B. Caracteristica de intrare 88

1.C. Caracteristicile de transfer 89

1.D. Caracteristica de ieșire 90

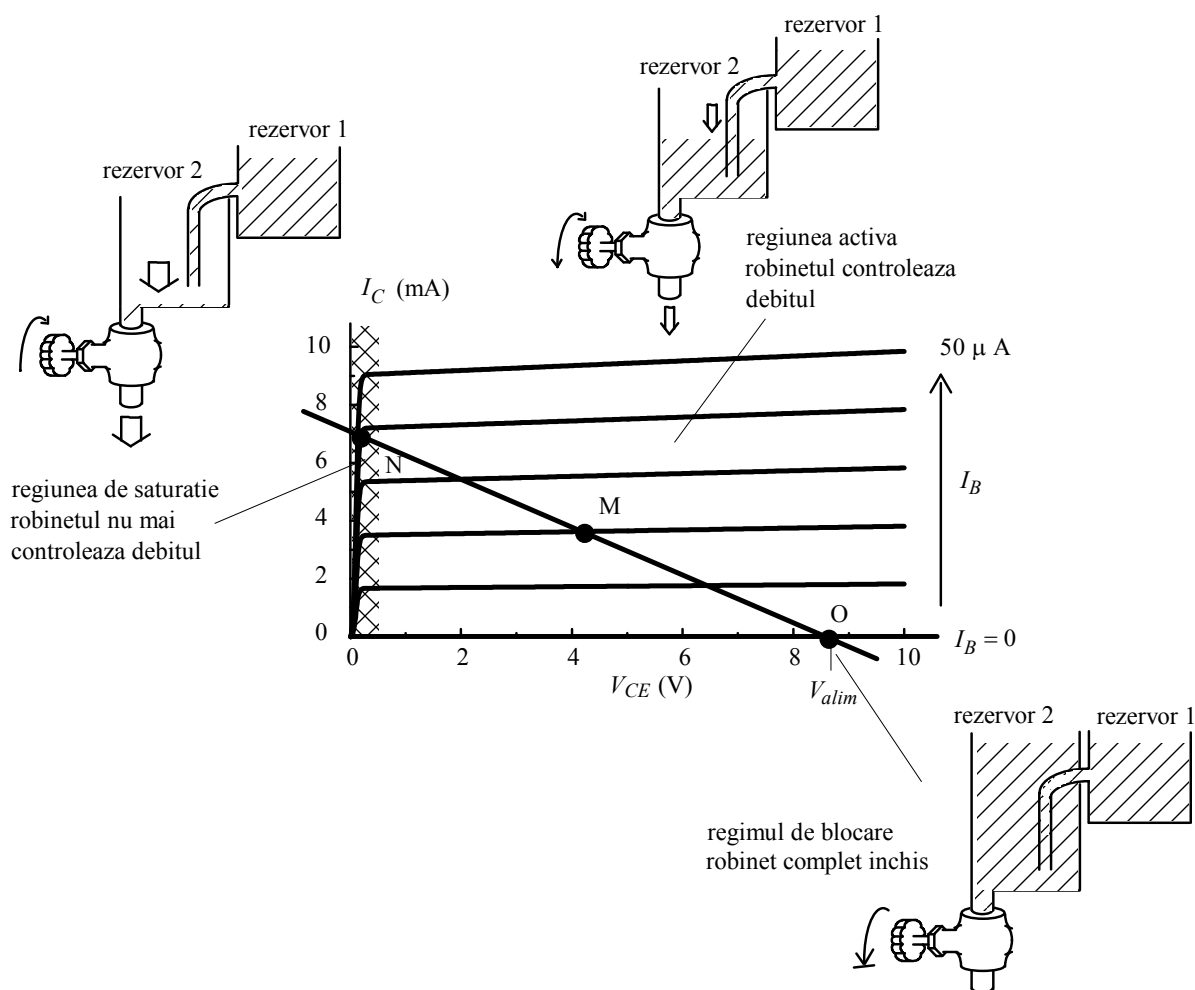
1.E. Saturația tranzistorului 93

1.F. Depășirea dificultăților conexiunii cu bază comună 95

1. G. Surse de curent cu tranzistoare bipolare 97

Probleme rezolvate 102, probleme propuse 106

Lucrare experimentală 108



4.2. Conexiunea emitor comun

2.A. Configurația cu emitor comun 113

2.B. Caracteristica de intrare 117

2.C. Caracteristicile de transfer 118

2.D. Caracteristica de ieșire 120

2.E. Saturația tranzistorului 123

2.F. Date de catalog 126

Probleme rezolvate 131, probleme propuse 135

Lucrare experimentală 137

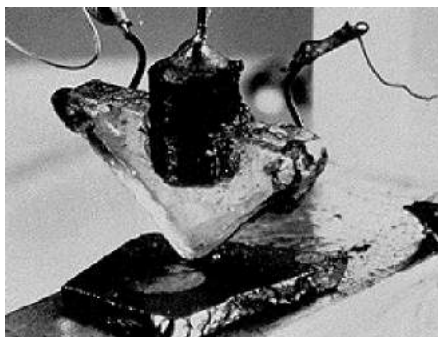
4.1. Conexiunea bază comună

1. A. Tranzistoare: structură, simboluri și mod de funcționare

Am văzut că dioda, acționând ca și supapa în circuitele în care circulă fluide, permite curentului să treacă într-un singur sens, ca un întrerupător care s-ar deschide și închide singur, după sensul curentului. Un alt dispozitiv esențial în circuitele cu fluide este **robinetul**, care **controlează debitul** conform unei acțiuni externe, mecanice.

Pentru circuitele electrice, o acțiune asemănătoare o are **releul electromagnetic**, care controlează trecerea unui curent de intensitate mare, fiind comandat electric cu un curent mult mai mic. Releul electromagnetic are două proprietăți care îl fac să mai fie încă utilizat în unele aplicații: curentul de scurgere în starea "întrerupt" este extrem de mic iar rezistența în starea de conducție este infimă. Cu toate acestea, el are două dezavantaje majore. În primul rând, pentru că are piese mecanice în mișcare, este prea lent, neputând fi utilizat la frecvențe de peste câteva sute de Hz. Pe de altă parte, el nu permite **controlul gradual** al curentului ci doar unul de tipul tot sau nimic (on-off în limba engleză). Un control gradual îl putem realiza cu un rezistor reglabil ("potențiomtru") dar acesta trebuie acționat mecanic.

Primul dispozitiv care putea controla gradual curentul și era comandat printr-o tensiune a fost un tub electronic, **trioda**. Tuburile erau însă mari, grele și fragile, și aveau nevoie de puteri electrice mari. Din acest motiv, inventarea tranzistorului în 1947 de către John Bardeen și Walter Brattain de la Bell Laboratories a marcat un pas important în dezvoltarea electronicii; în Fig. 4.1 a) puteți admira primul tranzistor realizat, cu **contacte punctiforme**. Bazat pe conducția electrică la suprafața cristalului și pe contacte punctiforme cu fire metalice, acest "tranzistor de tip A" era instabil și nu funcționa de două ori la fel; în plus curentul controlat era puternic afectat de zgomot. Primul tranzistor utilizabil, **cu joncțiuni** (Fig. 4.1 b), este pus la punct în 1950 și în 1951 laboratoarele Bell îl fac cunoscut public ¹. Electronica modernă putea începe. Ulterior apare posibilitatea integrării mai multor tranzistoare într-un circuit integrat și revoluția tehnologică schimbă fața secolului XX.



a)



b)

Fig. 4.1 a) și b). Primul tranzistor cu contacte punctiforme și primul tranzistor cu joncțiuni.

Imaginat încă din 1948 de către William Shockley, tranzistorul bipolar cu joncțiuni (prescurtat BJT - **B**ipolar **J**unction **T**ransistor în lb. eng.) este un dispozitiv semiconductor de tip sandwich, a cărui structură fizică conține trei regiuni semiconductoare distincte: emitorul, baza și colectorul, așa cum se vede în Fig. 4.1 c) și d) Pentru tranzistoarele **PNP**, emitorul și colectorul sunt de tip *p*, adică purtătorii majoritari sunt

¹ O istorie fascinantă a inventării tranzistorului bipolar puteți găsi la www.pbs.org/transistor/index.html.

golurile, pe cînd baza este de tip n , aici purtătorii majoritari fiind electronii. Deși de același tip, emitorul și colectorul diferă prin concentrația de purtători majoritari, care este mult mai mare în emitor. La tranzistoarele **NPN** tipurile sunt inversate, emitorul și colectorul fiind de tip n iar baza de tip p . Elementele cheie în funcționarea tranzistorului sunt **grosimea mică a bazei și nivelul ei scăzut de dopare** (conductivitate redusă).

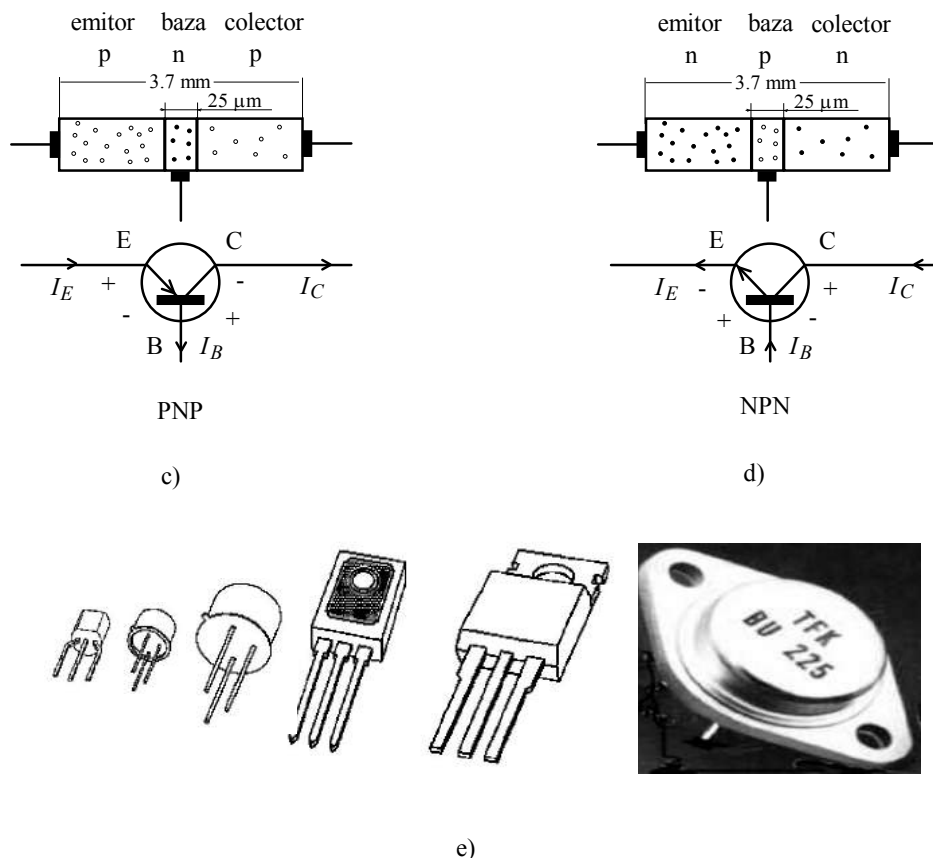


Fig. 4.1 c), d) și e). Tranzistoare bipolare, structură, simboluri și câteva dintre tipurile de capsule utilizate.

În figură sunt date și simbolurile pentru cele două tipuri de tranzistoare.

Săgeata arată care este terminalul **emitorului**; sensul ei este sensul în care conduce joncțiunea emitor bază, joncțiune care controlează starea "robinetului"

Primele tranzistoare cu joncțiuni erau fabricate prin extragerea unui monocristal de tip bară dintr-o topitură de germaniu dopată n ; în timpul extragerii, extrem de lente, regiunea bazei era dopată p . Au apărut apoi alte tehnologii mai perfecționate care au îmbunătățit performanțele tranzistoarelor bipolare obținute. Astăzi se realizează o gamă foarte largă de tranzistoare, pentru diferite aplicații: joasă și medie frecvență, înaltă frecvență, aplicații liniare, aplicații de comutație, etc.. În acest manual atenția noastră va fi concentrată asupra aplicațiilor de joasă și medie frecvență. În acest domeniu, capsulele tranzistoarelor (Fig. 4.1 e) sunt diferite după mărimea curentului maxim pe care îl pot suporta (de la 100 mA la 10 A) și după puterea termică pe care o pot disipa (de la 300 mW la 110 W)

Deocamdată ne vom focaliza atenția numai **asupra tranzistoarelor NPN**; după ce vom înțelege bine cum funcționează acestea, cînd va trebui să utilizăm tranzistoare **PNP** nu va trebui decît să inversăm sensurile tuturor tensiunilor și curenților. Deși primul material semiconductor utilizat în construcția tranzistoarelor a

fost germaniul, datorită puternicei lor sensibilități termice aceste tranzistoare au fost înlocuite complet de tranzistoarele cu siliciu; din acest motiv

vom aborda în cele ce urmează numai tranzistoarele cu siliciu,

chiar dacă nu vom menționa de fiecare dată acest lucru explicit.

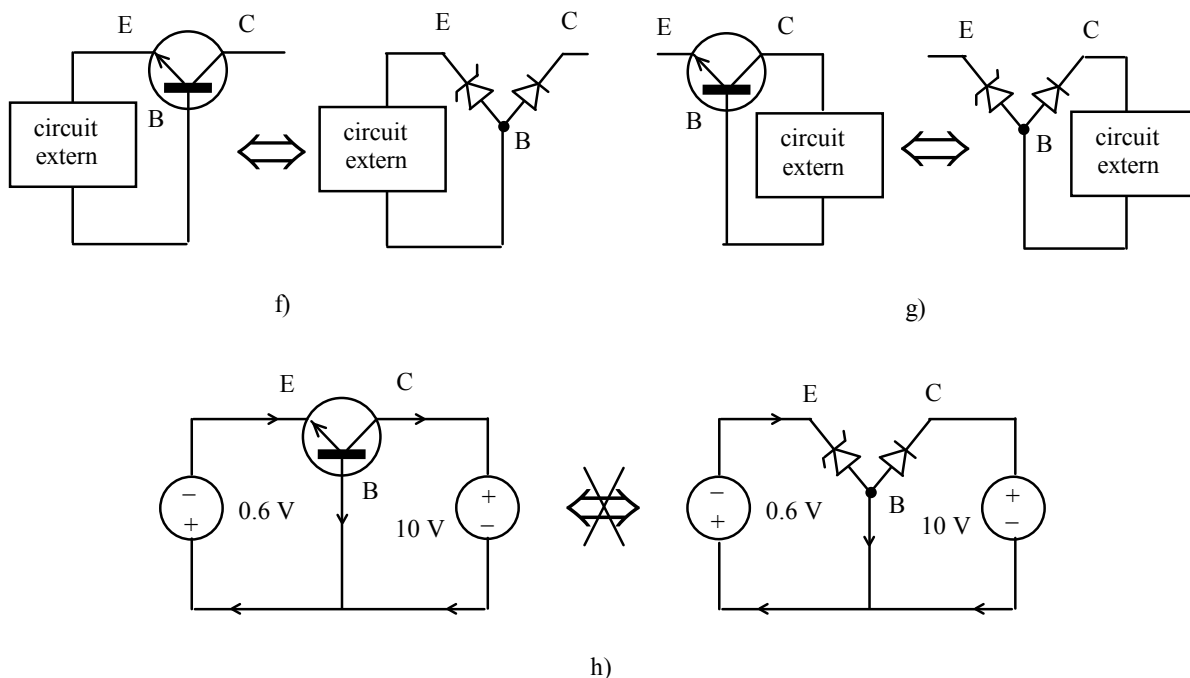


Fig. 4.1 f), g) și h). Tranzistoare bipolare: echivalența cu două diode dacă numai una din joncțiuni este polarizată (e, f) și absența acestei echivalențe când ambele joncțiuni sunt polarizate (g).

Tranzistorul are două **joncțiuni semiconductoare**, una emitor-bază și cealaltă bază-colector. Dacă le investigăm separat (al treilea terminal fiind lăsat în gol), ele se comportă ca niște diode, așa cum se poate observa în Fig. 4.1 f) și g). La tranzistoarele de putere mică, joncțiunea emitor bază are tensiunea inversă de străpungere coborâtă în jur de 6 V; din acest motiv e bine să privim această joncțiune ca o diodă Zener așa cum am figurat și noi în aceste desene. Efectul de tranzistor apare atunci când polarizăm ambele joncțiuni: cea emitor bază în sens direct iar cea colector bază în sens invers: datorită grosimii mici a bazei, cele două joncțiuni nu funcționează independent, așa cum ar fi făcut-o două diode legate între ele prin conductoare (Fig. 4.1 h).

Atenție, acesta este un experiment imaginar și l-am construit cât mai simplu posibil; dacă îl încercați în practică și tensiunea sursei care polarizează joncțiunea bază-emitor crește accidental cu numai 0.180 V, curentul de emitor va crește de 1000 de ori și joncțiunea va fi pulverizată. În circuitele practice se utilizează todeauna o rezistență legată în serie, pentru limitarea curentului prin joncțiune.

Să vedem în ce constă efectul de tranzistor. Dacă dorim ca tranzistorul să funcționeze ca un robinet controlat, cele două joncțiuni trebuie polarizate într-un anumit mod: joncțiunea emitor bază, care va controla robinetul, trebuie să fie direct polarizată (deschisă) iar joncțiunea colector bază trebuie să fie invers polarizată.

Regimul de lucru al tranzistorului cu joncțiunea emitor bază deschisă iar joncțiunea colector bază invers polarizată este denumit **regim activ normal**.

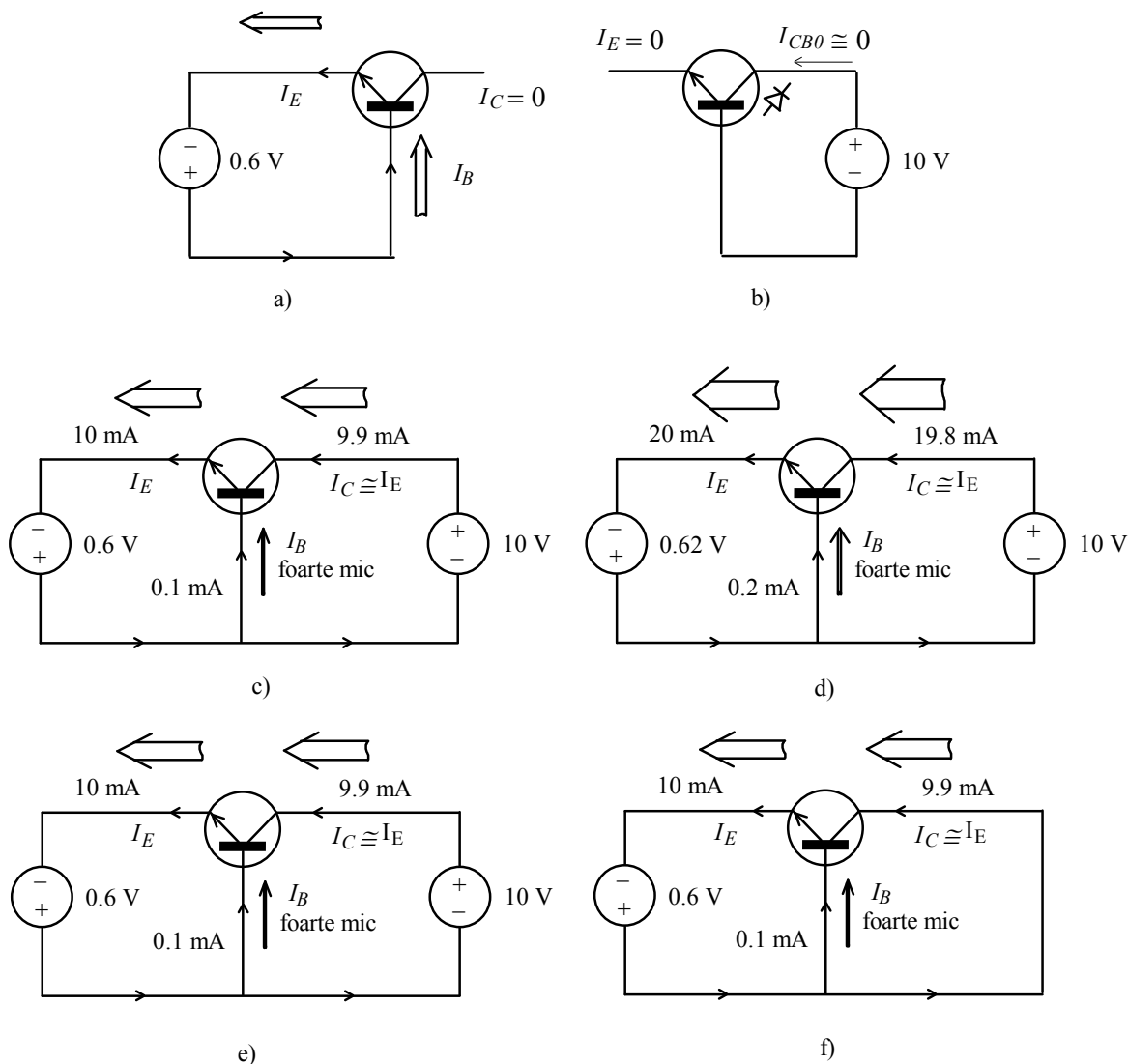


Fig. 4.2. Efectul de tranzistor.

Polarizăm mai întâi joncțiunile, separat, pe rând; așa cum am spus, în acest caz, tranzistorul se comportă ca un ansamblu de două diode montate "spate la spate". Joncțiunea emitor-bază se deschide și între emitor și bază circulă un curent de ordinul de ordinul mA - zeci de mA (Fig. 4.2 a). Dependența curentului de tensiune este una exponențială

$$I_E \cong \left(e^{\frac{V_{EB}}{mV_T}} - 1 \right); \quad (4.1)$$

cu m apropiat de valoarea 2, ca la o diodă cu siliciu. În ceea ce privește joncțiunea colector bază (desenul b), aceasta este invers polarizată (am desenat lângă simbol dioda echivalentă pentru ca acest lucru să fie evident) și curentul de colector (notat cu I_{CB0} pentru a arăta că emitorul este "în gol") este practic nul.

Aplicăm apoi simultan sursele de tensiune, ca în desenul c) al figurii, și, surpriză, curentul de emitor, în loc să circule prin terminalul bazei, circulă practic integral prin terminalul colectorului, **deși joncțiunea colector bază este invers polarizată.**

Aplicarea atentă a legii curenților arată că, deși curentul de bază este foarte mic, la cealaltă bornă a sursei de 0.6 V curentul este egal cu I_E , la fel ca la borna legată în emitor. Pentru a nu complica desenul, săgețile "groase", care sugerează mărirea curenților, au fost desenate numai la terminalele tranzistorului.

Dacă modificăm polarizarea joncțiunii emitor bază, deschizînd-o mai mult (desenul d), curenții de emitor și colector, rămînînd în continuare practic egali între ei, cresc. Spre deosebire de circuitul cu două diode,

în tranzistor, curentul de colector este controlat de tensiunea aplicată pe joncțiunea emitor bază.

Acest efect este datorat grosimii mici a bazei, mult mai mică decît lungimea de difuzie a electronilor, și dopării sale slabe; astfel, la străbaterea acesteia, electronii injectați din emitor au foarte puține șanse să întâlnească goluri și să se recombine cu ele.

Mai mult, la tranzistoarele de putere mică (sute de mW), curentul de bază este de sute de ori mai mic decît ceilalți și

curentul de colector este practic egal cu cel de emitor, curentul de bază fiind mult mai mic decît aceștia.

Chiar și la tranzistoarele de putere mare curentul de bază este foarte mic, de 20 -50 ori mai mic decît ceilalți doi și afirmația anterioară rămîne valabilă.

Pentru $I_E = 0$, rezultă, conform afirmației anterioare că și curentul ar trebui să fie nul. La polarizarea inversă a joncțiunii colector bază cu cel puțin cîteva zecimi de volt, acest lucru nu este perfect exact pentru că joncțiunea colector-bază fiind invers polarizată, vom avea în colector curentul invers I_{CB0} al joncțiunii. Relația ce leagă curenții de colector și emitor se scrie

(4.2)

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

unde constanta α se numește amplificarea în curent (în conexiunea bază comnă) și are valori foarte apropiate de unitate (fiind împrăștiată de la exemplar la exemplar și după tipul tranzistorului aproximativ între 0.95 și 0.998).

Pentru tranzistoarele cu germaniu, curentul I_{CB0} nu putea fi neglijat, mai ales cînd temperatura tranzistorului creștea, și din această cauză **aceste tranzistoare nu se mai utilizează.** În schimb, pentru tranzistoarele cu siliciu, curentul invers al joncțiunii colector-bază este de aproape 1000 de ori mai mic decît la cele cu germaniu. Putem, astfel, să uităm complet de el. Ni-l vom aminti doar atunci cînd vom studia efectul

modificării temperaturii asupra caracteristicilor tranzistoarelor. Și vom trage concluzia că nu el este vinovatul principal.

Și aceasta nu e tot. Revenim la polarizarea inițială a joncțiunii emitor-bază (desenul e) și modificăm acum valoarea tensiunii care polarizează invers joncțiunea colector-bază, coborînd-o chiar la zero, cu un scurtcircuit între colector și bază (desenul f). Curentul de colector rămîne insensibil la manevra noastră !

În regiunea activă normală, curentul de colector este **practic independent de tensiunea colector bază**.

Scopul circuitelor electronice este, în majoritatea cazurilor, prelucrarea semnalelor (informației). Există o pereche de borne de intrare, numită **port de intrare**, între care se aplică o tensiune variabilă din exterior. La o altă pereche de borne, numită **port de ieșire** este legat un consumator de energie pe post de **sarcină** (eventual un alt circuit). Rolul circuitului este ca starea portului de ieșire (tensiunea și curentul de ieșire) să fie controlată de starea portului de intrare, după o anumită relație funcțională. Pe de altă parte, ne-ar conveni ca starea portului de intrare să fie influențată cît mai puțin de cea a portului de ieșire.

Tranzistorul are numai trei terminale; astfel, unul dintre ele va trebui să fie comun atît portului de intrare cît și celui de ieșire. În configurația în care am investigat noi comportarea tranzistorului, baza era terminalul comun celor două porturi; am utilizat, deci, o configurație **cu baza comună**.

În conexiunea cu bază comună, portul de intrare este între emitor și bază iar portul de ieșire este între colector și bază, baza fiind astfel comună celor două porturi.

Această conexiune permite explicarea mai comodă a funcționării tranzistorului pentru că cele două surse de tensiune controlează **separat** tensiunile pe cele două joncțiuni. În plus, conexiunea oferă anumite avantaje în cîteva tipuri de aplicații.

Funcționarea în regim static a unui dipol poate fi descrisă prin dependența funcțională curent-tensiune, numită caracteristică statică. Starea unui dispozitiv care are un port de intrare și unul de ieșire, cum este tranzistorul, este determinată, însă, de **patru variabile**, care sunt curenții și, respectiv, tensiunile la fiecare din porturi. Vom avea nevoie, deci, de mai multe tipuri caracteristici:

- caracteristica de intrare (dependența curent-tensiune la portul de intrare)
- caracteristica de ieșire (dependența curent-tensiune la portul de ieșire)
- caracteristici de transfer, care leagă o mărime de la ieșire (curent sau tensiune) de o mărime de la intrare. Dacă dorim să înțelegem cum se comportă tranzistorul în circuitele în care este utilizat, va trebui să vedem cum arată caracteristicile sale statice.

1. B. Caracteristica de intrare

Prin caracteristică de intrare înțelegem dependența curent-tensiune de la portul de intrare, adică I_E în funcție de V_{EB} . Deși baza tranzistorului este și ea legată la portul de intrare, curentul de bază **nu este curent de intrare** deoarece, așa cum am subliniat anterior, la ambele borne ale sursei de tensiune care realizează controlul curentul are valoarea I_E . Pentru a nu complica discuția, vom înțelege aici, prin tensiunea V_{EB} , mărimea (fără semn) a tensiunii de polarizare a joncțiunii emitor bază; cu alte cuvinte, nu vom mai lăsa în seama caracteristicii de intrare să ne amintească polaritatea necesară pentru a ne situa în regiunea activă normală. Același lucru îl aplicăm și pentru curentul de intrare. Această abordare are avantajul că forma caracteristicii arată la fel și pentru tranzistoarele PNP.

Caracteristica de intrare trebuie trasată la anumite condiții constante la portul de ieșire. Cum I_C este practic egal cu I_E , nu pe el îl putem păstra constant; nu avem de ales, **va trebui să păstrăm constantă tensiunea de ieșire V_{CB}** . În aceste condiții, caracteristica de intrare $I_E = f(V_{EB})|_{V_{CB}=\text{const.}}$ este una exponențială,

$$I_E = I_0 e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} \quad (4.3)$$

tensiunea de deschidere fiind, pentru tranzistoarele bipolare cu siliciu, în jur de 0.6 V. Când curentului de colector i se oferă o cale pe care să circule (colectorul nu este în gol) parametrul m este unitar deoarece baza este foarte subțire și recombinările au loc exclusiv în regiunea neutră a colectorului. Din acest motiv numitorul de la exponențială este exact V_T și curentul de emitor se multiplică cu 10 la fiecare creștere cu 60 mV a tensiunii emitor-bază, **ca la o diodă cu germaniu**.

La portul de intrare, **tranzistorul nu se comportă ca un rezistor**, caracteristica sa fiind neliniară și similară cu aceea a unei diode. Pentru a caracteriza efectul unei mici variații a tensiunii V_{EB} , introducem **rezistența dinamică**, ce caracterizează local caracteristica (depinde de punctul unde se calculează)

$$r_{eb} = dV_{EB}/dI_E; \quad (4.4)$$

Din relația (4.3) rezultă că ea are expresia

$$r_{eb} = V_T/I_E \quad (4.5)$$

fiind invers proporțională cu valoarea curentului. Astfel, la 1 mA ea este de 25 Ω , pe cînd la 10 mA coboară la 2.5 Ω .

Depinde caracteristica de intrare de tensiunea de la portul de ieșire ?

În mod ideal, ar trebui ca starea portului de ieșire să nu afecteze starea portului de intrare de unde se face controlul dispozitivului. Pentru tranzistorul bipolar, acest lucru este aproximativ adevărat. Cu toate acestea, o analiză mai atentă poate constata modificarea caracteristicii de intrare, dacă se schimbă valoarea tensiunii V_{CB} colector-baza la care este ea trasată. Acest efect, numit **efect Early**, se pune în evidență mai comod pe o scară logaritmică pentru curent (Fig. 4.3). Astfel, dacă V_{CB} se modifică de la 0 la 10V, caracteristica de intrare este pur și simplu trasată în sus. Aceasta înseamnă că putem descrie efectul fie la V_{EB} constant, prin înmulțirea curentului de emitor cu un factor de aproximativ 1.1 (creștere de 10 %), fie la I_E constant, fiind necesară acum o tensiune V_{EB} cu aproximativ 2 mV mai mică. Cele mai multe texte preferă a doua variantă, afirmînd că la creșterea tensiunii colector-bază scade tensiunea emitor bază, factorul $\Delta V_{EB}/\Delta V_{CB}$ fiind în valoare absolută de

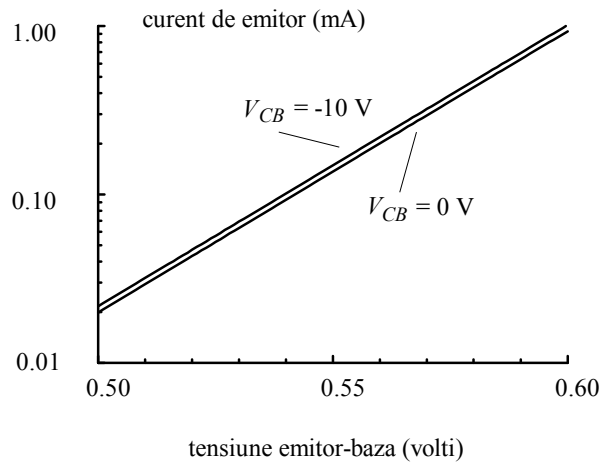


Fig. 4.3. Modificarea caracteristicii de intrare la variația tensiunii colector bază.

ordinul a 10^{-4} (de cele mai multe ori informația că aceasta se întâmplă dacă păstrăm constant curentul I_E este omisă, producând confuzie pentru începători).

Observație: Pentru diferite valori constante ale tensiunii de ieșire V_{CB} se obțin curbe diferite $I_E = f(V_{EB})$; acest ansamblu de curbe este numit de multe ori "familia caracteristicilor" de intrare. Noi vom continua să utilizăm însă o terminologie mai simplă, vorbind despre caracteristica de intrare și influențarea sa de către parametrul V_{CB} . Acest lucru va fi valabil și pentru celelalte tipuri de caracteristici.

1.C. Caracteristicile de transfer

Mărimea de ieșire care este controlată prin starea portului de intrare este **curentul de colector**. Putem considera, cu egală îndreptățire, că el este controlat fie de curentul de emitor (curentul de la portul de intrare), fie de tensiunea emitor-bază (tensiunea de la portul de intrare). În ambele cazuri, parametrul care trebuie menținut constant este tensiunea colector bază.

Așa cum am spus, la tranzistoarele cu siliciu curentul rezidual de colector este neglijabil și avem îndeplinită relația (4.2)

$$I_C = \alpha I_E$$

Cum $\alpha \cong 1$, caracteristica de transfer $I_C = f(I_E)|_{V_{CB}=\text{const.}}$ este o linie dreaptă, practic identică cu prima bisectoare. La modificarea tensiunii V_{CB} , factorul de amplificare α se modifică extrem de puțin, crescând cam cu $10^{-4}/\text{volt}$.

Considerînd că tensiunea emitor bază controlează curentul de colector, caracteristica de transfer $I_C = f(V_{EB})|_{V_{CB}=\text{const.}}$ este descrisă de relația

$$I_C = I_s e^{\frac{V_{EB}}{V_T}}; \quad (4.6)$$

dacă privim tranzistorul ca un robinet controlat de tensiune, funcționarea sa este foarte neliniară. Pentru tensiuni pînă la 0.6 V curentul este nesemnificativ, pentru ca apoi creșterea să fie explozivă. Avem, de fapt, aceeași comportare de la dioda cu germaniu:

dublare a curentului la fiecare creștere cu 18 mV și multiplicare cu 10 la fiecare creștere de 60 mV.

Pentru a caracteriza **sensibilitatea controlului** se definește un parametru dinamic, numit **transconductanță dinamică**

$$g_m = \frac{d I_C}{d V_{EB}}; \quad (4.7)$$

se poate arăta imediat că

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (4.8)$$

unde I_C este valoarea în jurul căreia s-a calculat transconductanța iar V_T este potențialul termic (25 mV la temperatura camerei).

1.D. Caracteristica de ieșire

Păstrind constantă intensitatea curentului de emitor, caracteristica de ieșire $I_C = f(V_{CB})$ are forma din Fig. 4.4 a), adică o dreaptă orizontală. Ecuația care descrie caracteristica este $I_C = \alpha I_E$ și cum I_E este constant...Cît de constant este, însă, factorul α la variația tensiunii colector bază ? El variază cam cu 10^{-4} pe volt și cum noi am produs o variație de 10 V, curentul de colector a crescut cam cu o miime din valoarea lui, creștere insesizabilă cu un aparat de măsură analogic (cu ac indicator) și la fel de insesizabilă pe graficul nostru).

Tranzistorul se comportă la portul de ieșire ca o sursă de curent aproape ideală, așa cum este arătat în desenul c) al figurii. La o valoare a curentului de 1 mA, rezistența ei echivalentă este de ordinul a $\frac{10V}{I_E \cdot 10^{-3}} = \frac{10V}{1mA \cdot 10^{-3}} = 10M\Omega$. Cum la aceeași modificare a tensiunii colector-bază variația curentului este proporțională cu valoarea sa inițială, valoarea rezistenței este **invers proporțională cu valoarea curentului de emitor**.

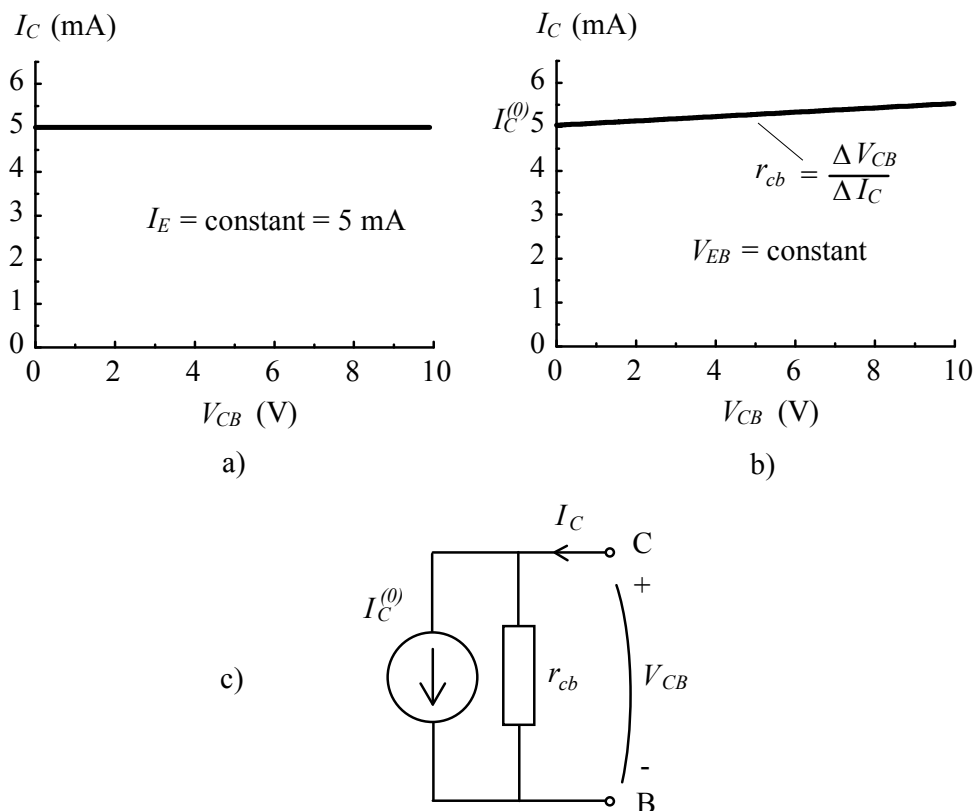


Fig. 4.4. Caracteristica de ieșire și modelarea portului de ieșire.

Ce s-ar fi întâmplat dacă ne-am fi hotărât să păstrăm, la portul de intrare, tensiunea emitor-bază constantă în locul curentului de emitor ? De data aceasta, în expresia $I_C = \alpha I_E$, s-ar fi modificat și α și valoarea I_E a curentului de emitor iar caracteristica de ieșire ar fi arătat ca în Fig. 4.4 b), curentul de colector modificându-se aproximativ cu o zecime din valoarea sa atunci când tensiunea colector bază variază de la zero la 10 V. Când am discutat modificarea caracteristicii de intrare la variația tensiunii de ieșire am remarcat pe graficul din Fig. 4.3 o variație a curentului de emitor de 10%. Cum α variază extrem de puțin, aceasta este acum cauza principală a variației curentului de colector. Acum portul de ieșire nu mai este așa de aproape de o sursă ideală de curent: rezistența sa dinamică, calculată tot la un curent de 1 mA este în jur de $\frac{10V}{1mA \cdot 10^{-1}} = 100k\Omega$, performanță ce este de 100 de ori mai modestă decât în cazul în care mențineam I_E constant.

Cine păstrează constant curentul de emitor în circuitele practice ?

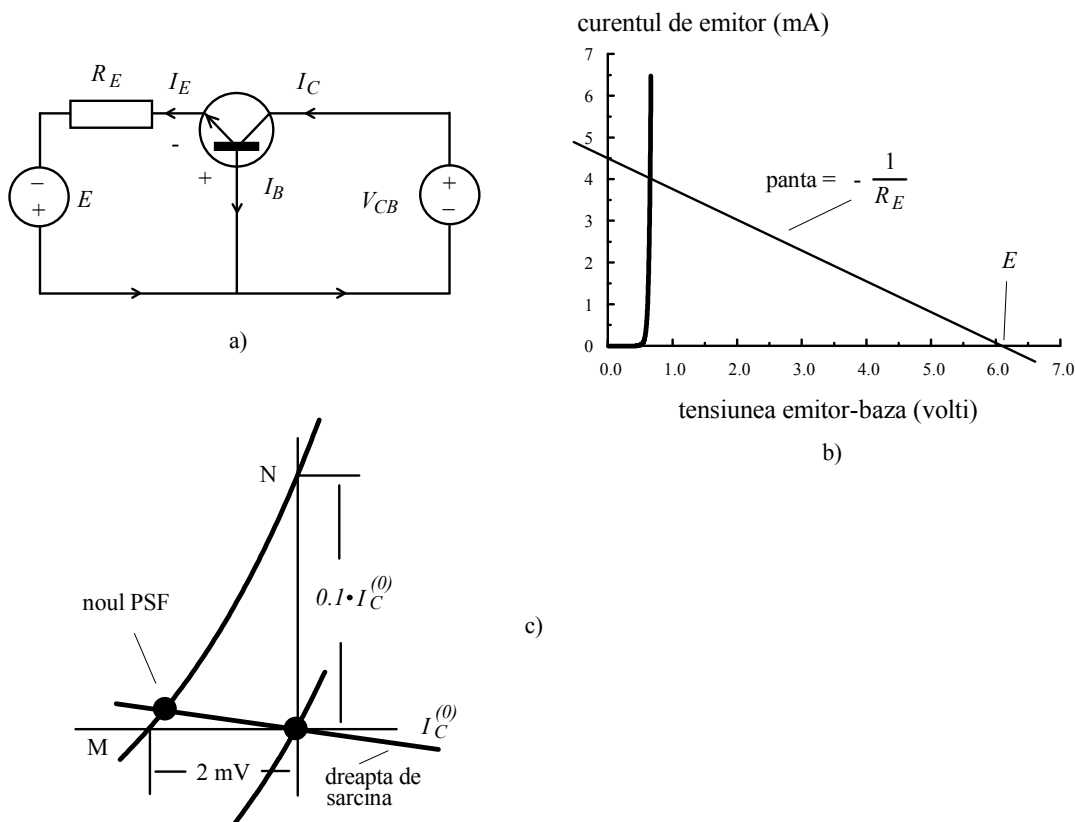


Fig. 4.5. Modificarea PSF de la intrare la variația tensiunii colector-bază în cazul unui circuit practic.

În circuitele practice nu se păstrează nici tensiunea V_{EB} constantă (nu ne convine pentru că performanțele sunt modeste) și nici I_E (ne-ar trebui o sursă ideală de curent, or tocmai asta vrem să realizăm cu tranzistorul nostru). Juncțiunea emitor bază este polarizată cu un circuit care conține o sursă de tensiune E și un rezistor cu rezistența R_E , ca în Fig. 4.5 a). Punctul de funcționare (curentul de emitor și tensiunea emitor bază) se găsește la intersecția caracteristicii cu dreapta de sarcină, care are panta $\Delta I_E / \Delta V_{EB} = -1/R_E$, așa cum se vede în Fig. 4.5 b).

Metoda dreptei de sarcină a fost descrisă pe larg în Cap. 3 la pag. 66.

Pentru a urmări cum se modifică acest punct de funcționare (PSF) la schimbarea tensiunii colector-bază, cele mai comode sunt coordonatele liniare (desenul c al figurii). Să presupunem că la $V_{CB} = 0$ punctul de funcționare se găsește la $I_{CB}^{(0)}$. La creșterea tensiunii colector bază la valoarea de 10 V, avem o nouă caracteristică de intrare: cunoaștem două puncte de pe aceasta, punctul M la 2 mV la stînga pe orizontală și punctul M cu o zecime din $I_{CB}^{(0)}$ mai sus, pe verticală ca în desenul c) al figurii.

Este evident din figură că tensiunea emitor bază-emitor scade cu mai puțin de 2 mV. Din acest motiv veți întâlni în multe texte afirmația că "tensiunea emitor bază scade cu 2 mV..."; aceasta trebuie înțeleasă în sensul cazului cel mai defavorabil: "tensiunea scade cu cel mult 2 mV..." Putem deduce imediat că valoarea curentului de emitor crește cu mai puțin de $2\text{mV}/R_E$. Dacă pe rezistența R_E am fi acceptat să pierdem o tensiune $I_E^{(0)} R_E = U_{RE}$, variația relativă a curentului de emitor $\Delta I_E / I_E^{(0)}$ ar fi mai mică decât $\frac{2\text{mV}}{U_{RE}}$. Cu o

cădere de tensiune de 2 V pe rezistența din emitor (ceea ce nu constituie o problemă), curentul de emitor crește la variația cu 10 V a tensiunii colector bază cu numai o miime din valoarea sa; efectul este de aceeași mărime cu cel produs de variația factorului α .

În concluzie, la o variație de 10 V a tensiunii colector bază, curentul de colector crește cu 0.2 - 0.5 %. Aceasta este performanța pe care ne-o poate oferi sursa de curent realizată cu circuitul simplu din Fig. 4.5 a). Dacă o exprimăm în termeni de rezistență dinamică a portului de colector, la un curent de 1 mA, obținem o valoare în jur de 2 - 5 M Ω .

Rezistența dinamică obținută va fi, însă, invers proporțională cu valoarea curentului.

1.E. Saturația tranzistorului

Ce condiție trebuie să respectăm pentru ca portul colector-bază să se comporte ca o sursă de curent ? Din Fig. 4.4 a) rezultă că dacă tensiunea colector bază este mai mare ca zero, totul este în regulă. Această tensiune nu poate depăși o anumită valoare maximă, peste care joncțiunea colector-bază se străpunge invers. Dar dacă polaritatea tensiunii V_{CB} se schimbă ? Joncțiunea colector bază devine direct polarizată și, după depășirea tensiunii de deschidere, prin ea începe să treacă un curent din ce în ce mai mare, care are sensul invers celui determinat de curentul de emitor. Astfel, curentul total de colector începe să scadă (Fig. 4.6), ajunge la zero, schimbă sensul și crește în continuare puternic (în valoare absolută), deoarece devine dominant curentul de conducție directă al joncțiunii colector-bază.

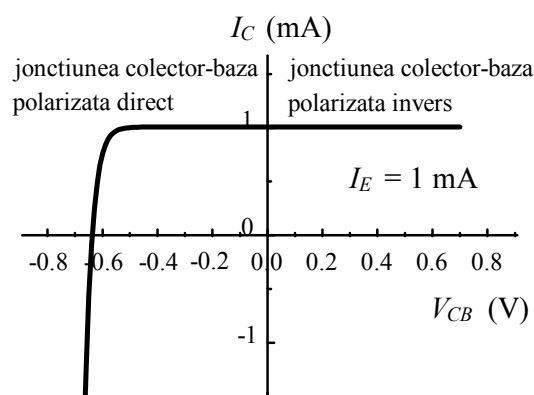


Fig. 4.6. Caracteristica de ieșire la inversarea polarității tensiunii colector bază.

În regiunea în care joncțiunea colector-bază este deschisă, numită **regiune de saturație**, relația $I_C = \alpha I_E$ încetează să mai fie respectată și curentul de colector nu mai este controlat de portul de intrare.

Pentru ca tranzistorul să se comporte sigur ca o sursă de curent, tensiunea V_{CB} trebuie să fie cuprinsă între valoarea zero și valoarea $V_{CB_{\max}}$ specificată de fabricant. Aceasta este **compliancea de tensiune a sursei de curent** realizată cu tranzistorul nostru.

Utilizarea unei surse de curent nu se face, însă, prin cuplarea directă la bornele sale a unei surse de tensiune ci prin intercalarea unei **sarcini** care să beneficieze de curentul constant al sursei de curent, ca în Fig. 4.7 a). În general, parametrul care se modifică este valoarea rezistenței de sarcină și vom analiza evoluția punctului de funcționare prin metoda dreptei de sarcină.

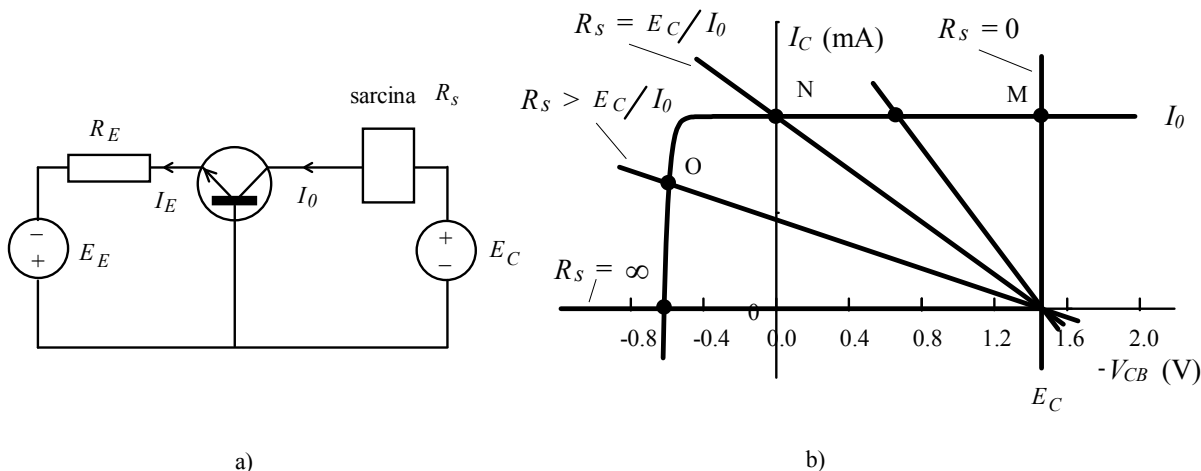


Fig. 4.7. Efectul modificării rezistenței de sarcină cuplată la sursa de curent.

La polarizare inversă a joncțiunii colector bază, portul colector-bază se comportă ca o sursă de curent de valoare I_0 . Pe de altă parte, intersecția cu axele ale dreptei de sarcină sunt situate la E_C și E_C/R_s . Dacă sarcina este un scurtcircuit ($R_s = 0$), dreapta este verticală și punctul de funcționare este în poziția M, în regiunea unde portul colector-bază se comportă ca o sursă de curent. Pe măsură ce rezistența de sarcină crește, punctul de funcționare se deplasează spre stînga pe caracteristica de ieșire a tranzistorului. Atunci cînd $R_s = E_C/I_0$, toată tensiunea sursei E_C cade pe rezistența de sarcină și tensiunea colector-bază ajunge la valoarea zero (punctul de funcționare N); aici, încă portul de ieșire se comportă ca o sursă de curent.

Creșterea rezistenței de sarcină peste valoarea $R_s = E_C/I_0$ duce, însă, la **schimbarea polarității tensiunii colector-bază deși sursa de alimentare nu și-a modificat polaritatea** (punctul O pe figură). Joncțiunea colector bază începe să devină direct polarizată și apoi se deschide.

Regimul de funcționare al tranzistorului cu ambele joncțiuni deschise se numește regim de **saturație**; în acest regim circuitul încetează să se mai comporte ca o sursă de curent.

Cum structura tranzistorului este simetrică, emitorul și colectorul avînd același tip de dopare iar ambele joncțiuni sunt deschise,

în regimul de saturație potențialele colectorului și emitorului devin practic egale.

La creșterea în continuare a rezistenței de sarcină, punctul de funcționare se deplasează în jos, ajungînd la limita $R_s = \infty$ (circuit întrerupt în colector) la valoarea $I_C = 0$, așa cum era de așteptat. Trebuie menționat că în regiunea de saturație curenții de colector încetează să mai fie controlat de curentul de emitor.

În concluzie,

pentru ca tranzistorul să se comporte ca sursă de curent, rezistența de sarcină din colector trebuie să aibă valoarea între zero (scurtcircuit) și $R_s = E_C/I_0$.

1.F. Depășirea dificultăților conexiunii bază comună

Am văzut că efectul fundamental al tranzistorului este controlul curentului de colector (independent de tensiunea colector bază) de către curentul de emitor. Caracteristica de transfer $I_C = f(V_{EB})|_{V_{CB}=\text{const.}}$ este una exponențială și, pentru a putea face acest lucru, jonțiunea bază-emitor trebuie, mai întâi, deschisă prin aplicarea unei tensiuni în jur de 0.6 V; aceasta stabilește un curent **de repaus (quiescent)** în lb. engleză). Operația este numită **polarizare (bias)** în lb. engleză). Peste regimul de repaus se adună, apoi, mici variații provocate de o **sursă de semnal** (de exemplu, un microfon) care modifică puțin tensiunea emitor-bază $\Delta V_{EB} = r_{be} \cdot \Delta I_E$, așa cum se observă în Fig. 4.8. Modificarea curentului de colector $\Delta I_C = \Delta I_E$ provoacă, datorită valorii mari a rezistenței R_C (mult mai mari decât a rezistenței dinamice r_{eb} egală cu cîteva zeci de Ω), variații ale tensiunii de colector de sute de ori mai ample decât ale tensiunii de intrare.

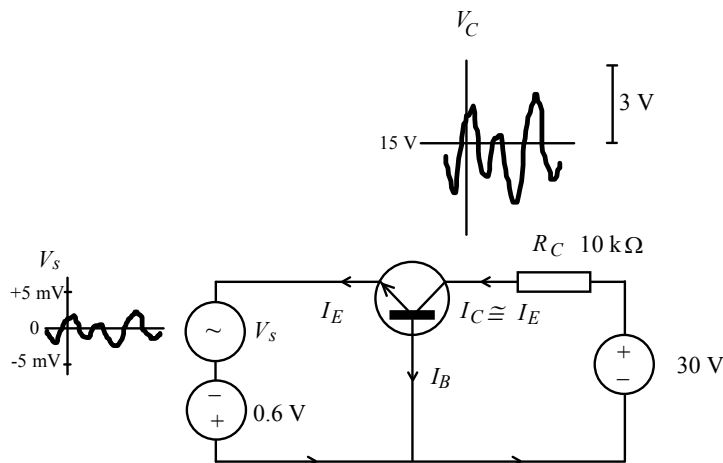


Fig. 4.8. Amplificarea variațiilor tensiunii de intrare.

Tranzistorul este, fără îndoială un **consumator de energie**. Cu toate acestea, dacă luăm în considerație **numai variațiile**, acestea au la ieșire o putere electrică mai mare decât cea de la intrare; diferența este, desigur, furnizată de sursa de alimentare din colector, tranzistorul controlînd numai modul în care această energie este furnizată sarcinii. Pentru că reușește să "amplifice" puterea semnalului variabil, tranzistorul este considerat în electronică un **element activ de circuit**. Nu trebuie să uităm, însă, că acest lucru este aparent și valabil numai pentru variații.

Circuitul din Fig. 4.8 prezintă, însă, inconveniente majore, ce afectează atât sursa de tensiune continuă necesară pentru polarizare cît și sursa de semnal. În ceea ce privește polarizarea, cele două surse de tensiune continuă au polarități opuse față de borna lor comună și **va trebui obligatoriu să construim două surse de alimentare diferite**. Această variantă este complet neeconomică și este evitată prin deplasarea sursei de polarizare lîngă terminalul bazei, ca în Fig. 4.9 a). Pentru a păstra 25 V între colector și bază, creștem cu 0.6V tensiunea sursei din ochiul colectorului. Aceasta dacă suntem exagerat de scrupuloși; putem la fel de bine

să nu o facem deoarece știm că o variație de 0.6 V a tensiunii colector bază nu afectează practic funcționarea tranzistorului. În acest mod, am reușit să facem ca ambele surse de tensiune continuă să fie legate cu borna negativă la masă; putem să construim o singură sursă de alimentare de 25 V, iar tensiunea de 0.6 V să o realizăm cu un **divizor rezistiv**, ca în desenul b) al figurii. Mai mult, acum curentul care străbate sursa este curentul de bază. Merită să exprimăm valoarea acestuia

$$I_B = I_E - I_C = I_E(1 - \alpha) \cong I_C(1 - \alpha) ; \quad (4.9)$$

cum α este foarte aproape de unitate, factorul $(1 - \alpha)$ are valori sub 1/100. În consecință, sursa de polarizare va trebui să debiteze un curent sub o zecime de mA, ușurând astfel realizarea divizorului rezistiv. **Aceasta este întodeauna soluția aleasă în circuitele practice.**

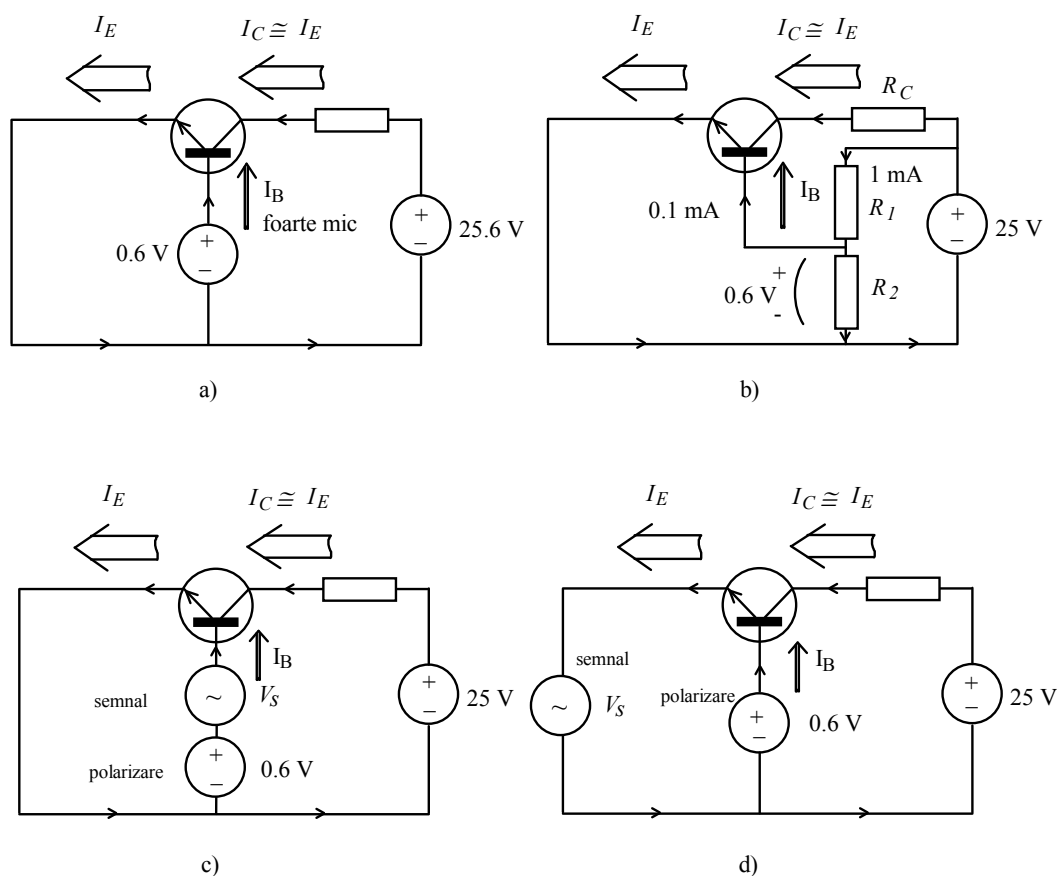


Fig. 4.9.

Să ne ocupăm acum și de sursa de semnal, care produce variația curentului de colector. Pe circuitul cu bază comună (Fig. 4.8) sursa de semnal trebuie să debiteze curenți $\Delta I_E = \Delta I_C$ egali cu cei pe care îi controlează. Cu alte cuvinte, dacă dorim să controlăm curentul de încălzire de 10 A al unui cuptor, va trebui să avem o sursă de semnal capabilă să vehiculeze și ea 10 A. Cam neplăcut, nu? Rezolvarea dificultății se face deplasând și sursa de semnal lângă terminalul bazei, ca în Fig. 4.9 c). Curentul de intrare este acum curentul de bază, curentul cerut de la sursa de semnal fiind de o sută de ori mai mic decât înainte. Putem acum controla curentul de 10 A al cuptorului cu un curent de numai 0.1 A; îl putem obține chiar și de la o baterie de lanternă.

În noua configurație, în care **emitorul este comun**, curentul de colector este controlat de curentul de bază. Dependența se obține simplu, din legea curenților și $I_C = \alpha I_E$

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B. \quad (4.10)$$

Deoarece această conexiune este de departe cea mai utilizată, factorul β , numit factor de amplificare în curent în conexiunea emitor comun, este parametrul interesant în aplicații.

Există, însă, aplicații unde conexiunea cu bază comună oferă anumite avantaje. În aceste cazuri, deși sursa de polarizare s-a deplasat lângă terminalul bazei, sursa de semnal rămâne în ochiul emitorului (Fig. 4.10 d).

1.G. Surse de curent cu tranzistoare bipolare

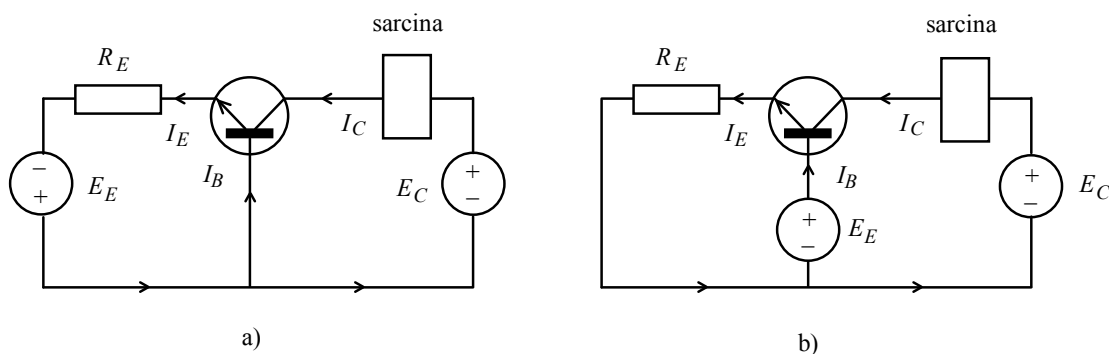
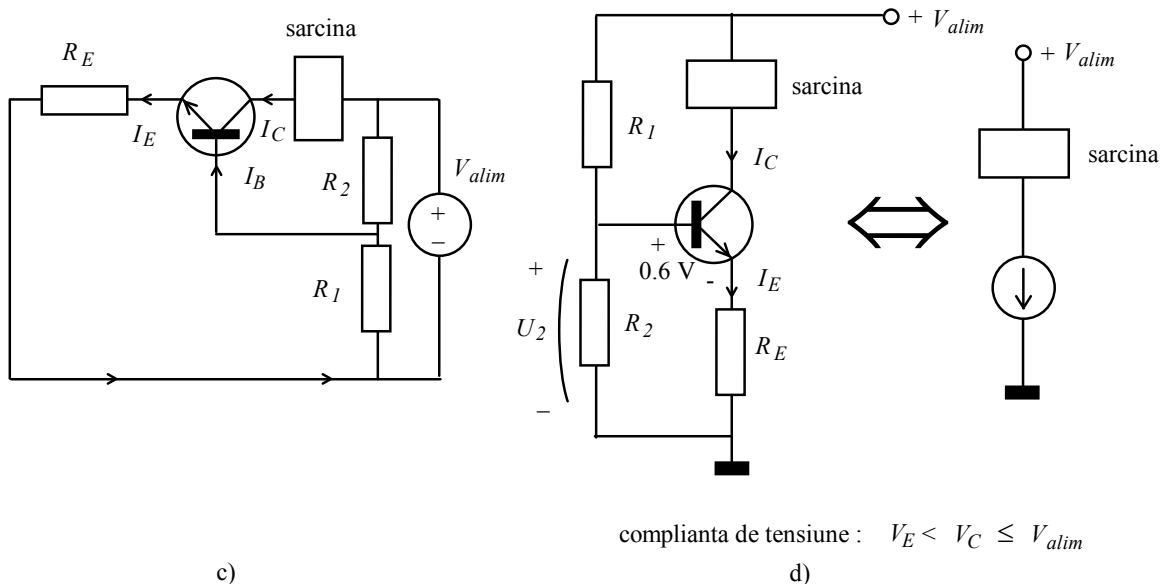


Fig. 4.10 a) și b). Sursa de curent cu tranzistor NPN.

Am văzut că dacă polarizăm joncțiunea emitor-bază trecînd curentul de emitor printr-un rezistor pe care pierdem cîțiva volți, portul de ieșire dintre colector și bază se comportă ca o sursă de curent cu rezistența echivalentă de ordinul $M\Omega$. Să reluăm schema circuitului, ca în Fig. 4.10 a) unde am desenat și o sarcină, care nu este neapărat liniară și care se poate modifica în timp. Circuitul prezintă un inconvenient pe care tocmai l-am discutat: cele două surse au polarități diferite față de borna comună (baza). Utilizăm trucul prezentat acolo, deplasînd una din surse de-a lungul ochiului de circuit, ca în desenul b) al figurii. Realizăm apoi această sursă cu un divizor rezistiv (Fig. 4.10 c). Nu mai rămîne decît să redesenăm schema mai elegant, cu linia de potențial ridicat în partea de sus a figurii, să alegem ca nod de masă borna negativă a sursei de alimentare și, în final, să renunțăm la desenarea explicită a sursei de alimentare, trecînd doar valoarea ei. Ceea ce am obținut (desenul d) este **configurația tipică** în care veți găsi în scheme **sursa de curent cu tranzistor NPN**.

Va trebui să învățați să o desenați în această formă și **să înțelegeți funcționarea sa în această formă**. Aceasta este extrem de simplă: curentul de bază fiind foarte mic, divizorul format din rezistoarele R_1 și R_2 este practic neîncărcat și menține constantă tensiunea notată pe schemă cu U_2 . Cum și tensiunea emitor bază este practic constantă, rezultă că tensiunea pe rezistorul din emitor este constantă, deci curentul de emitor este menținut constant. În final nu trebuie decît să vă amintiți că valoarea curentului de colector este practic egală cu aceea a curentului de emitor:

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = \text{const.} \\ V_{EB} = \text{const.} \end{array} \right\} \Rightarrow U_{RE} = \text{const.} \Rightarrow I_E = \text{const.} \Rightarrow I_C = \text{const.}$$

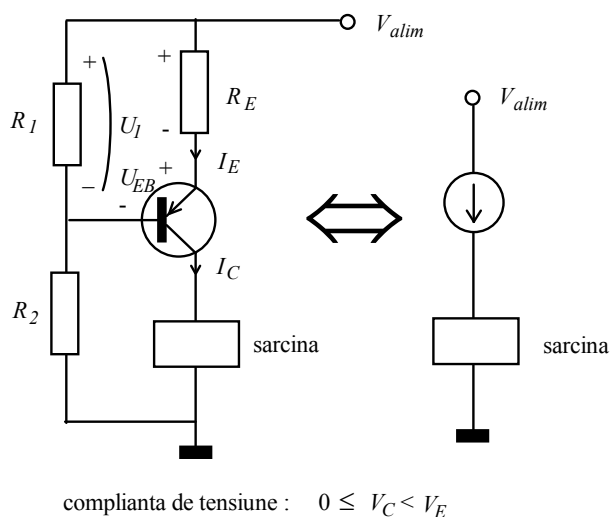
Fig. 4.10 c) și d). Sursa de curent cu tranzistor **NPN**, realizare practică.

Și acum, merită să ne aducem aminte că există și tranzistoare bipolare **PNP** la care sensurile tensiunilor și curenților sunt inverse față de cele de la tranzistoarele **NPN**. Cu un asemenea tranzistor **NPN**, sursa de curent arată ca în Fig. 4.11. Între cele două surse de curent există o deosebire esențială: **sursa cu tranzistor PNP debitează curent înspre nodul de masă** (fiind legată cu o bornă la alimentarea pozitivă) în timp ce **sursa cu tranzistor NPN absoarbe curent înspre nodul de masă**, fiind legată cu o bornă la masă. Din acest motiv, aceasta din urmă se mai numește uneori în limba engleză "current sink" (absorbant de curent).

Trebuie să ne întrebăm, pentru aceste surse, cât de mare este complianța de tensiune. Pe de o parte potențialul colectorului poate să ajungă pînă la borna sursei de alimentare, cea de masă în circuitul cu tranzistor PNP și, respectiv, cea de potențial pozitiv în circuitul cu tranzistor NPN. Pe de cealaltă parte, excursia acestui potențial este limitată de intrarea în saturație a tranzistorului, prin deschiderea joncțiunii colector bază. În amîndouă circuitele, indiferent de tipul tranzistorului, la saturație potențialul colectorului devine practic egal cu cel al emitorului, aceasta fiind a doua limită a domeniului permis pentru potențialul colectorului.

Procedură de proiectare

Cum proiectăm o sursă de curent cu tranzistor **NPN** ca cea din Fig. 4.10, alimentată la 12 V și care să debiteze un curent $I_0 = 2 \text{ mA}$? Mai întîi ne hotărîm cât de mare să fie tensiunea pierdută pe rezistența din emitor. Dacă va fi prea mică, sursa va fi mai departe de idealitate, deoarece așa cum am văzut cînd am discutat caracteristica de ieșire, curentul de emitor va suferi variații mai mari. Pe de altă parte, dacă această

Fig. 4.11. Sursă de curent cu tranzistor **PNP**.

cădere de tensiune va fi prea mare, va diminua complianța de tensiune a sursei de curent. Astfel, o tensiune de 1-2 volți pierdută pe rezistența din emitor este o alegere rezonabilă.

Cunoaștem, deci, potențialul emitorului. Din legea lui Ohm rezultă imediat valoarea rezistenței din emitor

$$R_E = V_E / I_0 = 2 \text{ V} / 2 \text{ mA} = 1 \text{ k}\Omega.$$

Tot din potențialul emitorului rezultă potențialul bazei, cu 0.6 V mai ridicat,

$$V_B = V_E + 0.6 \text{ V} = 2.6 \text{ V}.$$

Mai rămîne să proiectăm divizorul rezistiv. Cum valoarea curentului de bază va fi cam de $I_B = I_0 / \beta \cong I_0 / 100$, valoarea curentului prin divizor va trebui să fie de cel puțin 10 ori mai mare, adică $I_0 / 10$. Rezultă, astfel, suma celor două rezistențe

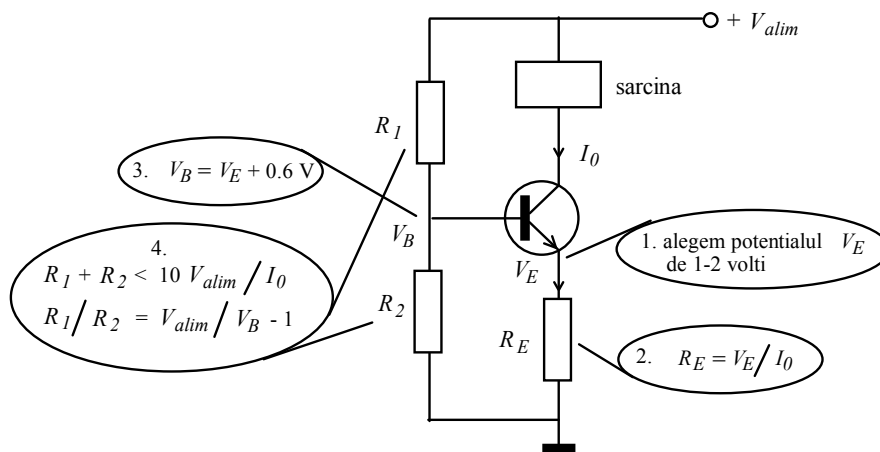
$$R_1 + R_2 < 10 \cdot V_{\text{alim}} / I_0 = 60 \text{ k}\Omega.$$

Raportul celor două rezistențe se obține cu regula de trei simplă, din raportul tensiunilor care cade pe ele

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{\text{alim}} - V_B}{V_B} = \frac{9.4 \text{ V}}{2.6 \text{ V}} = 3.6.$$

Putem opta, de exemplu, pentru valorile $R_2 = 12 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 43 \text{ k}\Omega$, care sunt standardizate.

În Fig. 4.12, aveți reprezentată sugestiv procedura de proiectare pe care am utilizat-o.



complianța de tensiune : $V_E < V_C \leq V_{\text{alim}}$

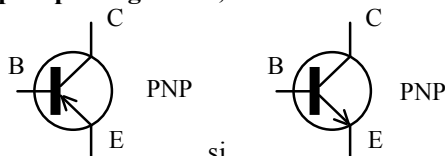
Fig. 4.12. Procedura de proiectare a unei surse de curent cu tranzistor NPN.

Enunțuri frecvent utilizate

(atât de frecvent încât merită să le memorați)

-Tranzistorul bipolar cu joncțiuni (BJT) este constituit din trei regiuni semiconductoare, emitorul, baza și colectorul. Tipul de dopare al emitorului și al colectorului este diferit de cel al bazei, care este foarte subțire. Apar astfel, două joncțiuni, emitor-bază și colector-bază.

-După tipul regiunilor, există tranzistoare PNP și tranzistoare NPN, pentru care se utilizează



simbolurile și . Săgeata arată întodeauna sensul în care conduce joncțiunea emitor bază; de aici puteți determina ușor sensurile curenților de emitor și de bază.

-Funcționarea tranzistorului în regiunea activă normală este cu joncțiunea emitor-bază direct polarizată (deschisă) iar joncțiunea colector-bază invers polarizată.

-În această situație $I_C = \alpha I_E$, curentul de colector fiind practic egal cu cel de emitor (cu o precizie în jur de 1 %); puteți, de aici, să găsiți sensul curentului de colector, dacă cel de emitor intră în tranzistor, cel de colector trebuie să iasă și reciproc (din legea curenților).

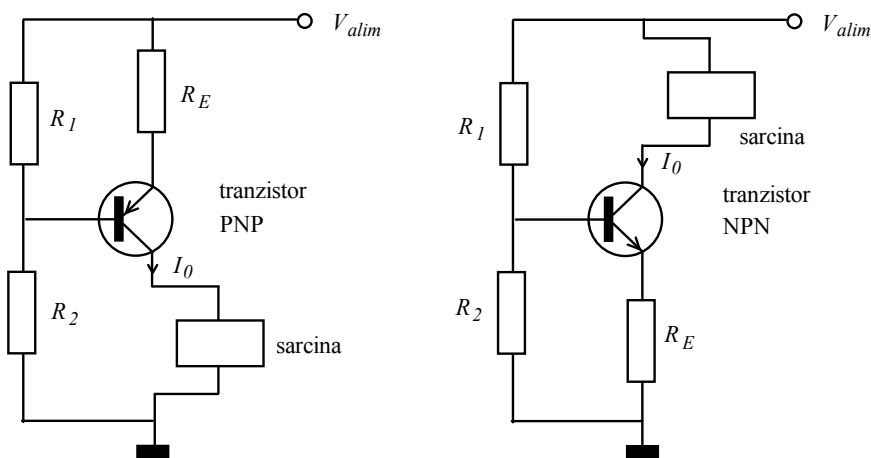
- În conexiunea cu baza comună, portul de intrare este între emitor și bază iar portul de ieșire este între colector și bază: baza este, astfel, comună celor două porturi.

- Portul de intrare se comportă ca o diodă, caracteristica sa fiind foarte puțin afectată de valoarea tensiunii de ieșire (colector bază).

- La portul de ieșire, tranzistorul se comportă ca o sursă de curent comandată de starea portului de intrare. Comportarea este foarte apropiată de aceea a unei surse de curent constant ideale dacă se menține constant curentul de emitor. În circuitele practice, în care polarizarea joncțiunii emitor bază se face cu o sursă de tensiune și un rezistor, performanțele nu sunt mult înrăutățite, rezistența echivalentă având valori de ordinul M Ω .

- Dacă rezistența sarcinii are valori prea mari, tranzistorul ajunge în regiunea de saturație, unde joncțiunea colector bază se deschide și relația $I_C = \alpha I_E$ nu mai este respectată.

- Circuitele cu tranzistoare PNP și respectiv NPN, cu care se realizează în practică surse de curent au configurațiile:




-Cel cu tranzistor PNP trimite spre masă un curent constant pe când cel cu tranzistor NPN absoarbe înspre masă un curent constant.

Termeni noi

-tranzistor bipolar cu joncțiuni	dispozitiv semiconductor constituit din trei regiuni, emitorul, baza și colectorul între care se formează două joncțiuni, emitor-bază și colector-bază; baza trebuie să aibă grosimea foarte mică și să fie mult mai slab dopată;
-tranzistoare PNP	tranzistoare bipolare cu joncțiuni la care emitorul și colectorul sunt de tip p iar baza de tip n ;
-tranzistoare NPN	tranzistoare bipolare cu joncțiuni la care emitorul și colectorul sunt de tip n iar baza de tip p ;
-factorul α	factorul de proporționalitate între curentul de colector și cel de emitor, în funcționare normală (factor de amplificare în curent în conexiunea bază comună); are valori între 0.95 și 0.995;
-port	pereche de borne între care se aplică sau se extrage un semnal de tensiune;
-conexiunea bază comună	configurația în care tranzistorul bipolar este legat astfel încât baza să fie comună atât portului de intrare (emitor-bază) cât și celui de ieșire (colector-bază)
-caracteristică de intrare	dependența curent-tensiune la portul de intrare, în condiții ale portului de ieșire bine precizate (adesea tensiune constantă);
-caracteristică de ieșire	dependența curent-tensiune la portul de ieșire, în condiții ale portului de ieșire bine precizate (adesea tensiune constantă sau curent constant);
-conexiunea emitor comun	configurația în care tranzistorul bipolar este legat astfel încât emitorul să fie comun atât portului de intrare (bază-emitor) cât și celui de ieșire (colector-emitor);
-factorul β	factorul de proporționalitate între curentul de colector și cel de bază, în funcționare normală (factor de amplificare în curent în conexiunea emitor comun); are expresia $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ având valori peste o sută;
- saturație	regim de funcționare al tranzistorului în care joncțiunea colector-bază ajunge să fie deschisă; în acest regim curentul de
- polarizarea tranzistorului	colector nu mai este controlat de curentul de emitor; stabilirea unui regim de curent continuu, prin deschiderea (bias) joncțiunii bază-emitor, regim peste care se suprapun apoi variațiile
- curent de repaus (quiescent)	ce reprezintă semnalul care conține informația; curentul regimului de curent continuu produs de polarizare; poate fi măsurat în absența variațiilor produse de sursa de semnal;

Probleme rezolvate

Problema 1.

Circuitul din Fig. 4.13 este o sursă de curent. Schema este desenată așa cum o puteți întâlni în textele de electronică și pentru a o înțelege trebuie să facem câteva precizări asupra **convențiilor utilizate de electroniști**. În primul rând, observăm o mulțime de elemente legate cu un capăt la un simbol de forma ; este simbolul pentru nodul de **masă**, toate aceste puncte sunt legate între ele prin firul (sau planul) de masă care **nu se mai desenează explicit pentru a nu complica schema**. O altă deosebire față de schemele desenate de noi pînă acum apare în privința surselor de alimentare care **nu se mai desenează nici ele explicit, cu simbolurile corespunzătoare lor**. Cum **ele sunt legate întodeauna cu un capăt la masă**, se desenează pur și simplu un cerculeț (dacă se mai desenează și acela) și se scrie **valoarea tensiunii sursei, față de masă**. Ultima observație este legată de valoarea rezistențelor: atunci cînd se utilizează un prefix (kilo sau mega) nu se mai trece simbolul Ω . De multe ori, așa cum se întâmplă la marcarea rezistoarelor, prefixul înlocuiește delimitatorul zecimal: 2k2 înseamnă 2.2 k Ω iar M22 înseamnă 0.22 M Ω .

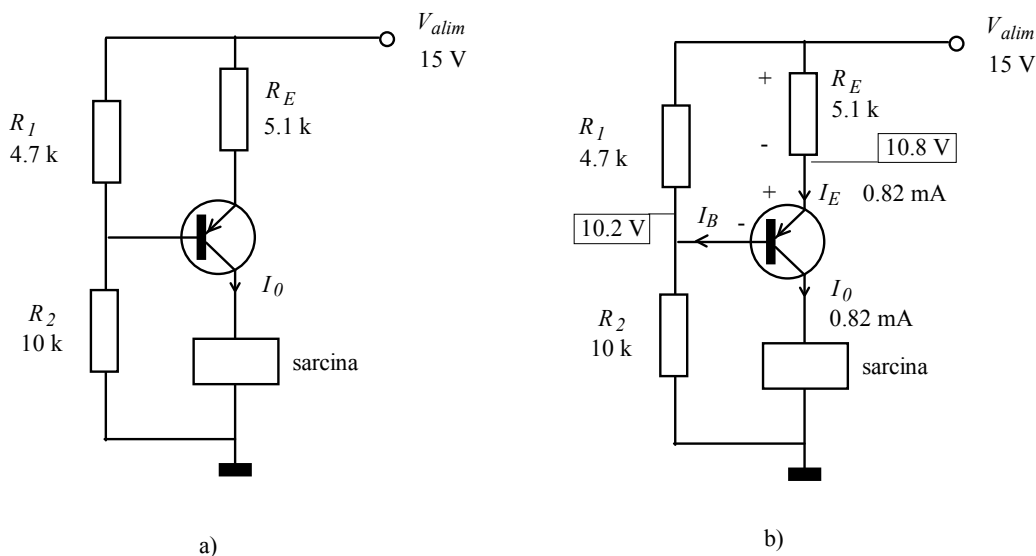


Fig. 4.13. Sursă de curent.

- Calculați valoarea curentului furnizat de această sursă, știind că tranzistorul are factorul β de cel puțin 100.
- Modificați apoi circuitul astfel încît să obțineți o sursă de curent de 5 mA.

Rezolvare

a) Desenăm sensurile curenților, ca în Fig. 4.13 b). Pentru aceasta ne aducem aminte că sensul săgeții de pe simbolul tranzistorului ne dă sensul curentului în joncțiunea bază emitor. Avem, deci, sensul curentului de bază și al celui de emitor. Curentul intră în emitorul tranzistorului și, cum curentul de colector este practic egal cu cel de emitor, curentul de colector iese din tranzistor.

Divizorul format din rezistențele R_1 și R_2 determină potențialul bazei. Trebuie să aflăm, mai întâi dacă putem să considerăm că el este practic neîncăcat de curentul cerut de bază. Pentru aceasta estimăm rapid curentul de bază. Curentul de colector (egal practic cu cel de emitor) nu poate fi mai mare de $15 \text{ V} / 5.1 \text{ k}\Omega \cong 3 \text{ mA}$ (ar lua această valoare dacă pe sarcină și între colector și emitor nu ar cădea de loc

tensiune). Deoarece $I_B = I_C/\beta$ și $\beta > 100$, rezultă că, în funcționare normală, $I_B < 3 \text{ mA}/100 = 0.03 \text{ mA} = 30 \text{ }\mu\text{A}$. Pe de altă parte, prin divizorul neîncărcat ar circula un curent de $15 \text{ V}/(10 \text{ k}\Omega + 4.7 \text{ k}\Omega) \cong 1 \text{ mA}$. Acesta este mai mare de $1/0.03 \cong 33$ ori decât curentul cerut de baza tranzistorului. Cu o aproximație rezonabilă ($1/33 \cong 3\%$) putem considera că divizorul nu este încărcat de curentul bazei.

Cu aceasta, potențialul bazei rezultă aplicînd regula de trei simplă

$$V_B = \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 4.7 \text{ k}\Omega} \cdot 15 \text{ V} = 10.2 \text{ V};$$

cel al emitorului fiind cu aproximativ 0.6 V mai sus

$$V_E = 10.8 \text{ V}.$$

Nu mai avem decît să aplicăm legea lui Ohm pe rezistența R_E

$$I_E = \frac{V_{a\text{lim}} - V_E}{R_E} = \frac{15 \text{ V} - 10.8 \text{ V}}{5.1 \text{ k}\Omega} = 0.82 \text{ mA}$$

și să ne aducem aminte că în colector curentul este egal practic cu cel din emitor

$$I_C = I_E = 0.82 \text{ mA}.$$

b) Trebuie să modificăm circuitul astfel încît sursa de curent să debiteze 5 mA. Avem două variante, fie modificăm divizorul rezistiv, fie modificăm valoarea rezistorului din emitor. Cea de-a doua este mai tentantă, atît calculele cît și înlocuirea efectivă fiind mai simplă, deoarece este vorba de o singură rezistență. Cum valoarea sursei de curent este egală cu intensitatea curentului din emitor, scriem din nou legea lui Ohm pe rezistența R_E

$$I_E = 5 \text{ mA} = \frac{V_{a\text{lim}} - V_E}{R_E} = \frac{15 \text{ V} - 10.8 \text{ V}}{R_E}$$

de unde rezultă $R_E = 0.84 \text{ k}\Omega = 840 \text{ }\Omega$.

În aceste condiții, curentul de bază ajunge 0.05 mA, de 20 de ori mai mic decît curentul prin divizor, care poate fi considerat în continuare neîncărcat. Valoarea 840 Ω nu este standardizată în seria E12 (vezi Anexa 1), cea mai apropiată fiind cea de 820 Ω . Cu ea sursa de curent debitează 5.1 mA; dacă dorim să avem o valoare mai precisă, ținînd seama și de faptul că noi am făcut în calcul o seamă de aproximații (divizorul neîncărcat, tensiunea emitor bază egală cu 0.6 V), cel mai bine este să realizăm rezistorul R_E dintr-o combinație serie: o rezistență semireglabilă de 250 Ω (mai mică este greu de găsit) și una fixă, standardizată, de 680 Ω . În acest fel, valoarea lui R_E va putea fi ajustată între 680 Ω și 930 Ω "la cald", în timp ce măsurăm cu un miliampermetru curentul furnizat de sursa de curent.

Problema 2.

Circuitul din Fig. 4.14 este utilizat într-un amplificator de antenă pentru recepția de televiziune, funcționând în banda FIF, canalul 6 (aproximativ 175-180 MHz). Alimentarea este realizată cu o sursă de 6 V, legată cu minusul la masă și cu borna pozitivă la capătul comun al rezistențelor R_1 și R_2 .

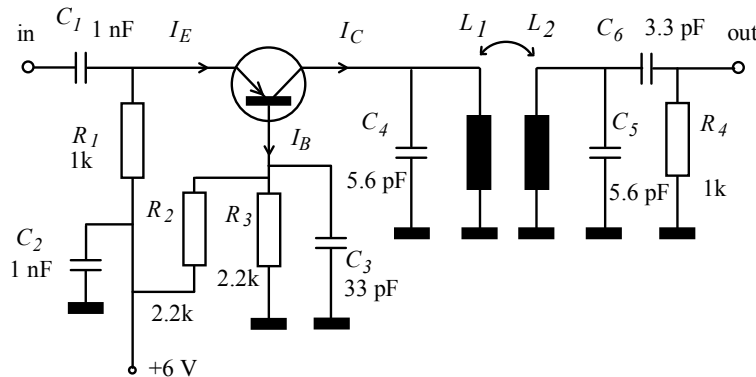


Fig. 4.14. Amplificator de antenă TV.

a) Determinați, cu aproximație de câteva procente, **punctul static de funcționare al tranzistorului**. Calculați, apoi, rezistențele dinamice ale porturilor emitor-bază și colector-bază. Tranzistorul este cu siliciu și putem miza pe un factor de amplificare în curent β de cel puțin 50 (tranzistoarele de înaltă frecvență au factori de amplificare mai mici).

b) Încercați să explicați rolul fiecăruia dintre condensatoarele $C_1 \div C_6$. (numai pentru curioși, ceilalți pot omite acest punct la prima lectură).

Rezolvare

a) Rezistoarele R_2 și R_3 formează un **divizor rezistiv**; în absența curentului de bază, ele ar fi parcurse de un curent de $6 \text{ V} / 4.4 \text{ k}\Omega = 1.4 \text{ mA}$. Este curentul de bază suficient de mare pentru a modifica semnificativ această situație? Îl putem estima imediat: curentul de emitor ar avea valoarea maximă dacă potențialul emitorului s-ar duce la cea mai coborâtă valoare posibilă, adică la zero (la masă). În acest caz el ar fi $6 \text{ V} / R_1 = 6 \text{ mA}$, iar curentul de bază ar avea valoarea $6 \text{ mA} / \beta = 0.12 \text{ mA}$. El ar fi, astfel, sub o zecime din curentul de 1.4 mA care parcurge divizorul: **efectul cuplării bazei tranzistorului în nodul comun al rezistențelor R_2 și R_3 poate fi neglijat în aproximația în care lucrăm**. Cel care a proiectat circuitul știa ce face, spre deosebire de mulți autori de culegeri de probleme.

Astfel, am ajuns la un prim rezultat: potențialul bazei este la jumătate din tensiunea de alimentare, adică la $+3 \text{ V}$ (regula de trei simplă aplicată pe divizorul rezistiv), $V_B = +3 \text{ V}$. Cum colectorul este legat **în curent continuu** direct la masă prin bobina L_1 , potențialul său este nul, $V_C = 0$, și **joncțiunea colector bază este invers polarizată**, așa cum este necesar pentru a avea tranzistorul în regiunea activă.

De aici lucrurile devin atât de simple că pot părea plictisitoare: joncțiunea emitor bază este polarizată direct și tranzistorul este cu siliciu, deci potențialul emitorului este cu 0.6 V mai sus, $V_E = +3.6 \text{ V}$. Legea lui Ohm aplicată pe R_1 conduce imediat la $I_E = \frac{6 \text{ V} - 3.6 \text{ V}}{R_1} = 2.4 \text{ mA}$ și, deoarece curentul de colector este egal cu acesta, $I_C = 2.4 \text{ mA}$.

Întrucît factorul β nu este cunoscut cu precizie, știind despre el că este pe undeva peste 50, curentul de bază poate fi numai estimat $I_B < 2.4\text{mA}/50 \cong 0.05\text{mA}$. Aceasta înseamnă mai puțin de 4% din curentul divizorului; cam cu afit ne-am înșelat cînd am calculat potențialul bazei.

În ceea ce privește rezistența dinamică a portului emitor-bază $r_{dEB} = dV_{EB}/dI_E$, calculată **în jurul punctului de funcționare determinat anterior** $I_E = 2.4\text{mA}$, ea rezultă simplu din formula $r_{dEB} = V_T/I_E = 25\text{mV}/2.4\text{mA} \cong 10\Omega$. Pentru rezistența dinamică dintre colector și bază nu putem să facem decît o estimare. Contribuția factorului α , conform celor spuse la secțiunea C, va fi $10\text{M}\Omega/2.4 \cong 4\text{M}\Omega$. În plus, variația curentului de emitor datorat variației lui V_{EB} va mai produce un efect ce poate fi modelat cu o rezistență dinamică tot de aproape $4\text{M}\Omega$ (căderea de tensiune pe rezistența din emitor este de 2.4V , aproximativ egală cu cea din exemplul discutat la secțiunea 1.C). Cele două rezistențe apar în paralel (sunt două variații de curent, produse de două mecanisme diferite, **care se adună**), așa că rezistența dinamică între colector și bază va fi pe undeva pe la $2\text{M}\Omega$.

*Observație: în funcționarea amplificatorului, la frecvențe mari, în paralel cu aceste rezistențe dinamice (calculate pentru variații cuasistatice) trebuie considerate **capacitățile echivalente emitor-bază și colector-bază**. Cea dintre emitor și bază nu contează pentru că este în paralel cu o rezistență dinamică foarte mică (10Ω în cazul nostru) dar cea dintre colector și bază are un rol esențial în funcționare. Pentru un tranzistor de înaltă frecvență aceasta este de ordinul a 0.5pF . Astfel, la frecvența de lucru de 180MHz , ea are o reactanță de numai $1.8\text{k}\Omega$.*

b) Am văzut că, pentru a putea amplifica, tranzistoarele bipolare trebuie polarizate, adică aduse într-un anumit punct static de funcționare caracterizat prin valorile curenților și potențialelor de **repauș**. Cînd circuitul conține mai multe etaje, polarizarea se rezolvă (în general) **separat** pentru fiecare etaj. Ce trebuie să facem pentru ca, la cuplarea etajelor între ele, rezultatul efortului nostru de a polariza etajele să nu se spulbere? **Să împiedicăm curentul continuu să circule între diferite etaje**. Variațiile (semnalul), care trebuie amplificate, trebuie, totuși să treacă. Acest rol îl îndeplinesc condensatoarele **de separare** C_1 și C_6 .

Condensatorul C_2 este cuplat între alimentarea pozitivă și masă, adică între terminalele sursei de alimentare. El ne amintește de condensatorul de filtraj care avea rolul să furnizeze consumatorului variațiile bruște de curent. La frecvența de lucru, inductanțele firelor care merg la sursa de alimentare nu pot fi neglijate și ele se comportă ca niște **șocuri** împiedicînd variațiile rapide ale curentului. Din acest motiv aceste variații trebuie furnizate de undeva din **apropierea tranzistorului**, cu un condensator capabil să lucreze la frecvențe mari (cu inductanță proprie foarte mică): acesta este rolul lui C_2 , care de multe ori este unul **fără terminale**.

Condensatoarele C_4 și C_5 sunt legate în paralel pe niște inductanțe, formînd niște **circuite rezonante**. Aceasta deoarece circuitul este destinat să amplifice numai o bandă îngustă de frecvențe.

A mai rămas condensatorul C_3 . Pentru a înțelege rolul lui trebuie să ne întrebăm mai întîi ce fel de configurație are amplificatorul, cu emitorul comun sau cu bază comună. Pentru a răspunde la întrebare, căutăm bornele de intrare și ieșire ale **semnalului** (variațiilor). Ieșirea este legată, prin transformatorul L_1 L_2 , în colector, așa cum ne așteptam (întodeauna **curentul de colector este mărimea controlată la un tranzistor bipolar**). Borna de intrare, prin C_1 , este legată în emitor. A mai rămas un singur terminal, baza. Amplificatorul este, deci, cu bază comună. Acest terminal trebuie ținut **la potențial constant**, pentru ca acolo variațiile să fie nule și variațiile de la intrare (ale potențialului V_E) să se regăsească integral în variațiile tensiunii emitor bază ($\Delta V_{EB} = \Delta V_E - \Delta V_B = \Delta V_E - 0 = \Delta V_E$) deoarece **tranzistorul este controlat de tensiunea emitor-bază**. Pentru a ține practic constant potențialul bazei, deși curentul de bază variază în timp, soluția este legarea unui condensator între bază și masă. Datorită rezervei sale de sarcină, el va furniza variațiile de curent fără să-și modifice semnificativ tensiunea de încărcare. Acesta este rolul condensatorului

C_3 . El scurtcircuitază, **numai în curent alternativ**, baza la masă și este numit în jargonul electroniștilor **condensator de decuplare**.

Probleme propuse

P 4.1.1. Un coleg a început desenarea unei scheme, pe care nu a mai continuat-o, astfel că multe informații lipsesc (Fig. 4.15). Știind că simbolurile pentru tranzistoare au fost utilizate corect și că tranzistoarele se găsesc în regiunea normală de funcționare, completați schema cu polaritatea surseei de alimentare și sensurile curenților prin terminalele tranzistoarelor. De ce tip sunt tranzistoarele ?

P 4.1.2. De fapt, colegul vostru a început să deseneze mai multe scheme; așa că mai aveți de lucru. Completați și schema din Fig. 4.16 a), cu aceleași informații ca la problema precedentă.

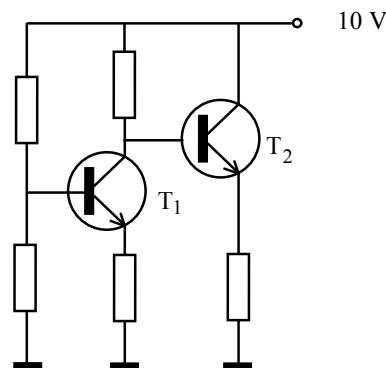
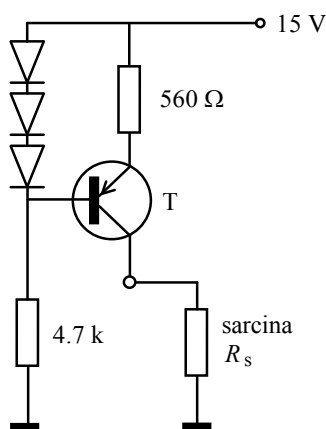
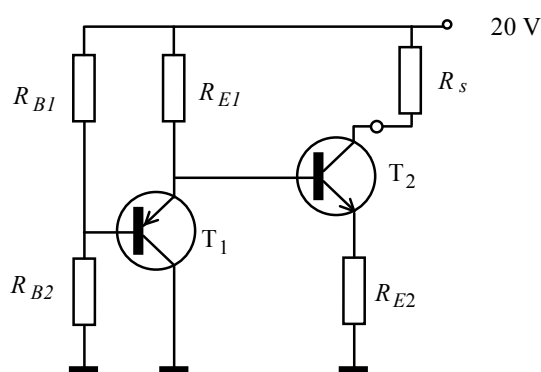


Fig. 4.15.



a)



b)

Fig. 4.16.

P 4.1.3 Și, în sfârșit, ultima schemă, care trebuie completată cu polaritatea sursei de alimentare și sensurile curenților: aceea din Fig. 4.16 b).

P 4.1.4. Reluați schema din Fig. 4.16 a) pe care tocmai ați completat-o. Ați recunoscut ce este ? Știind că cele trei diode sunt din siliciu, calculați potențialul din baza tranzistorului. Determinați apoi potențialul emitorului și curentul din emitor. Cât este curentul din colector ? Dacă nu ați recunoscut de la început ce este circuitul, aceasta este ultima șansă: a intervenit în calcularea curentului de colector mărirea rezistenței de sarcină ? Ce semnificație are acest lucru ?

P 4.1.5. În circuitul de la problema precedentă, înlocuiți cele trei diode cu un rezistor, astfel încât valoarea curentului de colector să rămână nemodificată. Pentru tranzistor puteți conta pe un factor β de cel puțin 100.

P 4.1.6. Aveți două circuite care îndeplinesc aceeași funcție. Considerați acum că tensiunea de alimentare are o variație de 10 % și determinați efectul asupra curentului de colector, pentru fiecare din circuite. Formulați o concluzie.

P 4.1.7. Utilizând un tranzistor NPN cu factorul β mai mare decât 100 și o sursă de alimentare de 12 V, proiectați o sursă de curent care să absoarbă spre masă un curent de intensitate 5 mA. Stabiliți

potențialul bazei cu un divizor rezistiv, ca în procedura de proiectare din Fig. 4.12.. Determinați complianța de tensiune a sursei proiectate.

P 4.1.8. Reluați aceeași problemă de proiectare dar rezolvați stabilirea potențialului bazei cu trei diode în serie, inspirându-vă din Fig. 4.16 a)

P 4.1.9. Am văzut că la modificarea tensiunii colector bază, valoarea curentului de colector nu rămânea perfect constantă din două motive: variația lui α cu V_{CB} și variația curentului de emitor cu V_{CB} . Apropierea maximă de sursa de curent ideală avea loc dacă valoarea curentului de emitor putea fi menținută constantă. Circuitul din Fig. 4.17 încearcă să facă acest lucru. Mai întâi, neglijând curenții bazelor, calculați potențialele celor două baze. Determinați apoi potențialele emitoarelor și, în final, curenții de emitor și colector ai celor două tranzistoare.

P 4.1.10. Cu o valoare a rezistenței de sarcină de $5\text{ k}\Omega$, determinați potențialul de colector al tranzistorului T_1 . Să presupunem, acum, că rezistența de sarcină se modifică, schimbând potențialul de colector tocmai calculat. Între ce limite se poate modifica această rezistență, fără să aducă tranzistorul T_1 în saturație ?

P 4.1.11. Afectează variația rezistenței de sarcină tensiunea colector bază a tranzistorului T_2 ? Ce puteți spune, în aceste condiții despre variația curentului său de colector ?

P 4.1.12. Afectează variația rezistenței de sarcină tensiunea colector bază a tranzistorului T_1 ? Considerînd că potențialul colectorului a efectuat întreaga variație permisă fără a aduce tranzistorul în saturație, încercați să estimați variația curentului său de colector. Nu uitați că în emitorul său curentul este exact curentul de colector al tranzistorului T_2 .

P 4.1.13. Încercați o comparație între performanțele sursei de curent cu un singur tranzistor și performanțele sursei de curent perfecționate pe care tocmai ați analizat-o.

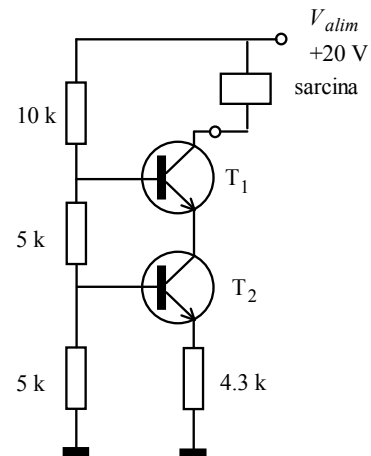


Fig. 4.17.

Lucrare experimentală

Pregătirea experimentelor

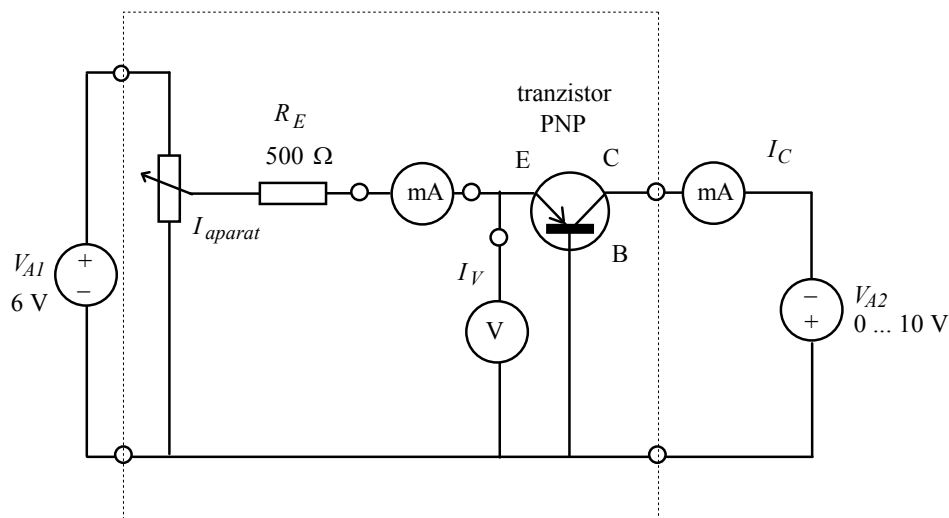


Fig. 4.18. Circuit pentru trasarea caracteristicilor statice.

Desenați-vă pe caiet circuitul din Fig. 4.18, pe care îl veți utiliza pentru trasarea caracteristicilor statice. Determinați sensurile curenților și polaritățile necesare pentru aparatele de măsură și completați schema cu aceste informații. Realizați apoi circuitul.

Sursa V_{A2} , legată direct între colector și bază, va menține constantă tensiunea V_{CB} iar miliampermetrul va măsura valoarea curentului de colector. Sursa V_{A1} și rezistența R_E vor asigura deschiderea joncțiunii emitor-bază. Pentru controlul mai fin al punctului de funcționare a mai fost montat un potențiomtru pe planșetă. Voltmetrul măsoară tensiunea V_{EB} între bază și emitor. Cunoșcând tensiunea de deschidere (tranzistorul este cu siliciu), stabiliți scala pe care va trebui utilizat voltmetrul și notați aceasta pe schema desenată.

Pentru determinarea curentului de emitor a fost intercalat un miliampermetru. El nu măsoară însă curentul de emitor ci suma dintre acesta și curentul prin voltmetru

$$I_{\text{apar}} = I_E + \frac{V_{EB}}{R_V};$$

dacă al doilea termen este semnificativ, **va trebui să faceți corecția necesară.**

Determinați rezistența voltmetrului, decuplînd emitorul tranzistorului (legînd miliampermetrul numai la voltmetru) și ajustînd sursa V_{A1} astfel încît tensiunea pe voltmetru să fie pe scala de 1V, acolo unde voltmetrul va fi utilizat. Comparați valoarea aflată cu cea înscrisă pe aparat.

Experimentul 1. Caracteristica de intrare

Caracteristica de intrare este dependența **curentului de emitor în funcție de tensiunea bază-emitor**. Ea trebuie trasată menținând constantă tensiunea colector-bază, care este **parametrul** la care se trasează caracteristica.

Veți modifica valoarea curentului de emitor între 0 și 10 mA. Stabiliți la 10 V tensiunea V_{CB} și apoi variați polarizarea joncțiunii emitor-bază, observând deschiderea joncțiunii emitor-bază și faptul că ea controlează curentul de colector. Înainte să trasați caracteristica, determinați aproximativ **tensiunea de deschidere**. Pentru a trasa caracteristica de intrare în scară liniară, determinați 10-12 puncte experimentale, pe cât posibil cu valori I_E echidistante. Măsurați, în același timp, și valorile curentului de colector, trecând datele într-un tabel de forma

V_{EB} (V)	I_{aparat} (mA)	$I_V = V_{EB}/R_V$ (mA)	$I_E = I_{aparat} - I_V$ (mA)	I_C (mA)	$\alpha = I_C/I_E$
0	0	0	0	0	

Completați apoi tabelul, făcând măsurători la valori mult mai mici ale curenților. Utilizați, pentru valorile curentului de emitor, secvența 1 mA, 0.5 mA, 0.2 mA, 0.1 mA, 0.05 mA, 0.02 mA, 0.01 mA, 0.005 mA, 0.002 mA, 0.001 mA deoarece aceste valori vor apărea practic echidistante pe **scară logaritmică**.

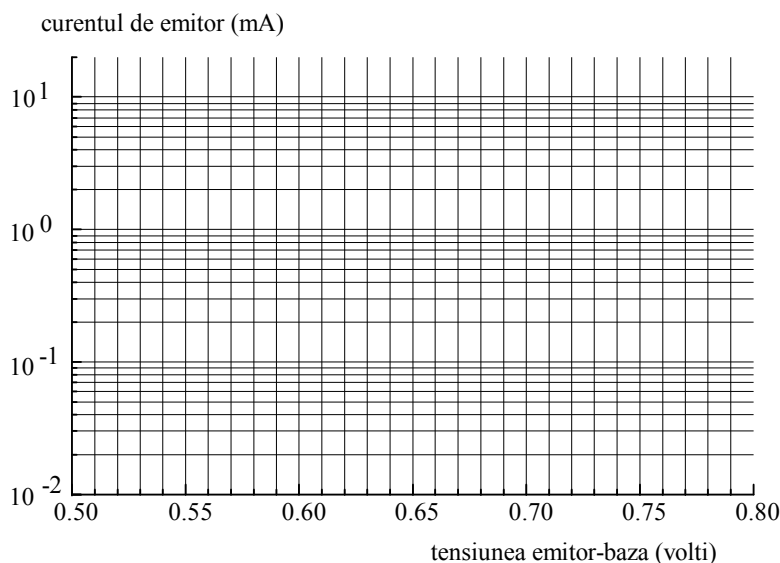
Modificați acum tensiunea colector-emitor la valoarea 0 V scoțind firele de alimentare de la bornele sursei V_{A2} și legându-le între ele. Refaceți măsurătorile tensiunii V_{EB} la valorile 10 mA, 1 mA, 0.1 mA ale curentului de emitor.

Reprezentați, apoi, grafic, în coordonate liniare, începând de la $V_{EB} = 0$, caracteristica $I_E = f(V_{EB})$ ridicată la $V_{CB} = 10$ V. Se comportă portul de intrare ca un rezistor ? Pentru mici variații în jurul unui punct de funcționare, putem introduce **rezistența dinamică** $r_{eb} = \Delta V_{EB}/\Delta I_E$. Calculați, din grafic, valorile ei la curent de colector de 0.1 mA și 1 mA.

Desenați pe același grafic și punctele experimentale ridicate la $V_{CB} = 0$ V. Cum depinde comportarea portului de intrare de tensiunea de la portul de ieșire ? Dacă ați avut un voltmetru digital, încercați să puneți în evidență deosebirile dintre cele două grafice reprezentând în detaliu o regiune a caracteristicii de la curenți mari, pe care tensiunea emitor bază nu variază cu mai mult 50 mV.

Dacă nu ați avut un voltmetru digital, împrumutați unul și, la curentul de emitor constant de 10 mA, măsurați tensiunea emitor bază cu $V_{CB} = 10$ V și apoi cu $V_{CB} = 0$ V. Determinați cu cât s-a modificat tensiunea emitor bază în aceste condiții.

Verificați acum că expresia caracteristicii de intrare este una exponențială. Pentru aceasta desenați caracteristica $I_E = f(V_{EB})$ cu o scară logaritmică pentru curent. Ce formă are graficul obținut ? Ce concluzie trageți de aici ? Determinați pe ce interval de variație a tensiunii curentul crește cu o decadă (se multiplică cu un factor de 10). Din această valoare calculați potențialul termic V_T , utilizând relația (4.3).



Experimentul 2. Caracteristica de transfer $I_C = f(I_E)$

Aveți, în tabelul completat la primul experiment, date asupra curentului de emitor și a celui de colector. Estimați mai întâi eroarea absolută cu care ați determinat aceste valori. Apoi comparați între ele valorile I_E și I_C și formulați o concluzie asupra valorii factorului α .

Experimentul 3. Caracteristica de ieșire

Mutați voltmetrul din ochiul emitorului în acela al colectorului, astfel încât să măsoare tensiunea colector-bază; **atenție la polaritate !** Fixați apoi I_E la o anumită valoare (să zicem 2 mA) și micșorați gradual tensiunea V_{CE} de la 10 V pînă la 0 V, urmărind evoluția curentului de colector. Cum sursa V_{A2} nu coboară tensiunea exact pînă la zero, pentru obținerea acestei valori desfaceți firele de la sursă și legați-le între ele. Reconectați sursa și refaceți experimentul pentru alte câteva valori ale curentului de emitor (4 mA, 6 mA, 8 mA). Desenați aceste dependențe $I_C = f(V_{CB})|_{I_E=const.}$ pe același grafic, obținînd o parte din familia de caracteristici de ieșire. Cunoșcînd eroarea absolută cu care ați măsurat curentul de colector, estimați valoarea rezistențe dinamice dintre colector și bază. Este ea concordantă cu predicția făcută pe baza cunoașterii căderii de tensiune pe rezistența R_E (pag. 93) ?

Experimentul 4. Ohmmetrul electronic

Multimetrele electronice digitale oferă, în afara funcțiilor de voltmetru și ampermetru, și pe aceea de **ohmmetru**. Principiul de funcționare pentru aceasta din urmă este foarte simplu: prin rezistența de valoare necunoscută se trece un curent constant, de valoare cunoscută, furnizat de la o sursă de curent și se măsoară tensiunea. Veți realiza și dumneavoastră un ohmetru electronic de acest tip. Mai întâi, desenați-vă schema sursei de curent din Fig. 4.19 a) și calculați potențialul bazei, potențialul emitorului și valoarea curentului de colector.

Calculul pe care l-ați făcut este numai unul aproximativ deoarece nu cunoaștem cu suficientă precizie valoarea rezistenței din emitor și caracteristicile statice neliniare ale diodelor și tranzistorului. Din acest motiv, sursa de curent trebuie "etalonată" (calibrată) la cald, adică în stare de funcțiune. Pentru aceasta, alimentați circuitul de pe planșetă, conectați un miliampermetru analogic și ajustați rezistența reglabilă din

emitor pentru a obține un curent de $100\ \mu\text{A}$. Montați apoi în serie cu miliampermetrul diferite valori de rezistențe și verificați cât de "ideală" este sursa de curent.

Ohmmetrul nostru este gata, nu mai rămâne decât să conectăm un voltmetru electronic și rezistența de valoare necunoscută (Fig. 4.19 b). Măsurăți, astfel, valorile rezistențelor necunoscute existente pe planșetă.

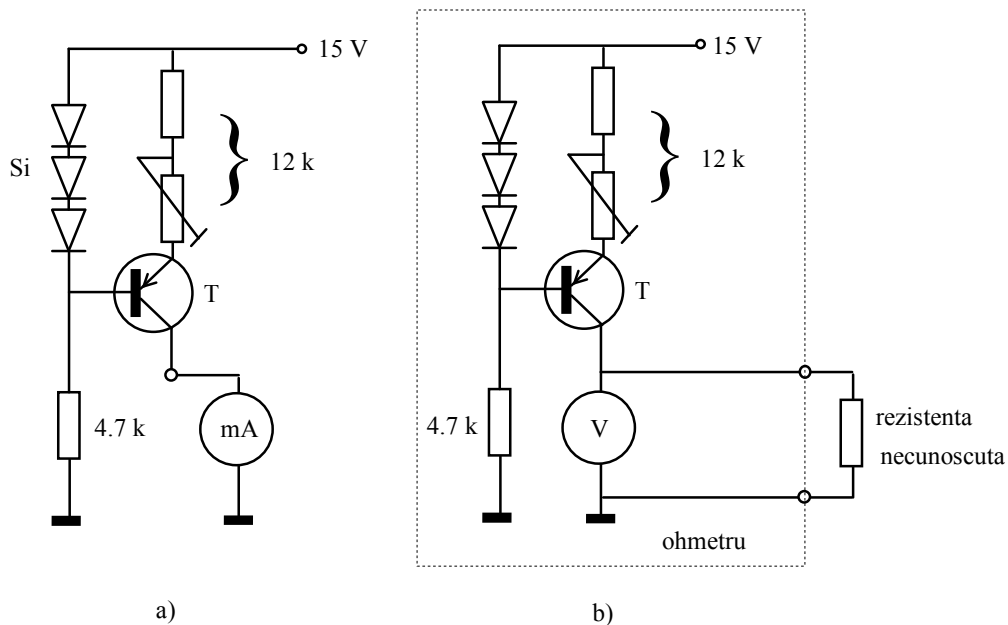


Fig. 4.19. Ohmmetru electronic.

Ce se întâmplă dacă încercăm să măsurăm "rezistența" în polarizare directă a unor diode? Aveți pe planșetă două diode cu care puteți experimenta acest lucru. Formulați o concluzie.

Pagină distractivă

Ani buni de muncă le-au fost necesari cercetătorilor de la Bell Laboratories ca să realizeze primele tranzistoare cu joncțiuni. Cum sandwich-ul are trei straturi, între acestea există două joncțiuni semiconductoare. Mult mai eficienți, specialiștii noștri autori de manuale² inventează dintr-un condei **tranzistorul bipolar cu trei joncțiuni**, cea suplimentară fiind între colector și emitor :



Curentul care intră în baza tranzistorului, de intensitate I_B – mică –, permite curentului I_C – cu intensitate mult mai mare – să circule prin joncțiunea colector-emitor, deci tranzistorul

Este de mirare cum așa referenți serioși și o așa competență comisie de avizare a Ministerului nu au valorificat această prioritate românească. Punem acest lucru pe seama caracterului lor modest, modest ...

Noutate plutea însă în aer încă de la pagina anterioară, unde simbolul tranzistorului este părintește tras de urechi pentru a nu arăta sensul curentului prin joncțiunea bază-emitor **decît în conexiunea emitor comun** :

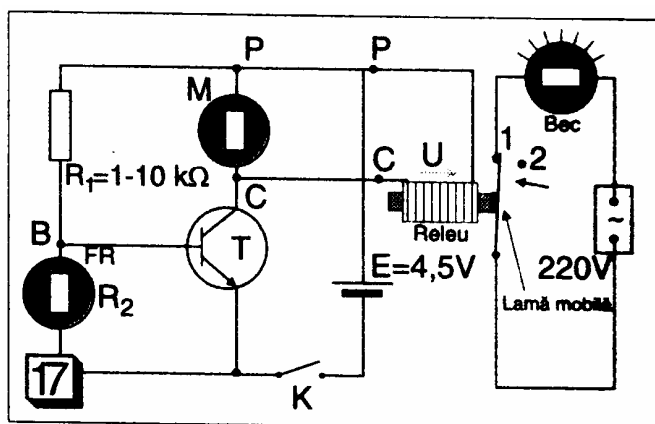
"În simbolul tranzistorului, săgeata indică sensul conducției în prima joncțiune (E-B), în montaj cu emitorul comun"

Ce trebuie să facă simbolul în celelalte conexiuni este treaba lui, ori săgeata dispare, ori, mai bine, arată todeauna înspre acești autori inventivi.

Că treaba este serioasă și tranzistorul acestor domni autori este ceva cu totul nou, ne putem convinge imediat. Cum credeți că se comportă "joncțiunea colector-emitor ? Așa e că nu ghiciți ? Ca un rezistor : "Dacă un tranzistor se deschide ..., atunci rezistența dintre colector și emitor (R_{CE}) scade foarte mult..." Și asta nu e încă nimic, pentru că " U_{CE} devine neglijabilă (zecimi de volt) cînd curentul I_C atinge valorile maxime admise (notate în cataloagele de dispozitive semiconductoare)". Trebuie să recunoaștem că acest tranzistor, care se uită în cataloage ca să știe să intre în saturație cînd curentul I_C atinge "valorile maxime admise" este într-adevăr ceva revoluționar.

Și comportarea sa în circuite este la fel de revoluționară. De exemplu, în cel din figura alăturată: "Cînd fotorezistența FR este luminată, rezistența ei scade, tranzistorul intră puternic în conducție și". Oricare alt tranzistor NPN s-ar fi blocat la scăderea rezistenței R_2 , cel al autorilor citați "intră puternic în conducție". Numai să fie fotorezistența "luminată", vorba (inconfundabilă) a acestor autori.

Ca orice realizare importantă și inventarea acestui tranzistor a necesitat o pregătire anterioară. Gîndiți-vă numai prin cîte cărți or fi căutat pînă au găsit simbolurile stranii pe care le folosesc pentru rezistoare, becuri și diode. Sau poate ne înșelăm noi, le-au găsit în prima (și singura)



² *** , "Fizică", Manual pentru clasa a X-a, Ed. Teora Educațional, București, 2000.

4.2. Conexiunea emitor comun

2.A. Configurația cu emitor comun

Structura și modul de funcționare ale tranzistorului bipolar cu joncțiuni au fost descrise în secțiunea 4.1. În regimul de funcționare activ normal, joncțiunea emitor-bază este direct polarizată (deschisă), în timp ce joncțiunea colector-bază este invers polarizată. În aceste condiții, curentul de colector este dat de relația

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}; \quad (4.11)$$

deoarece I_{CB0} (curentul invers rezidual colector-bază cu emitorul în gol) este complet neglijabil la tranzistoarele moderne cu siliciu, iar factorul α este extrem de aproape de unitate, curentul de colector este practic egal cu cel de emitor, așa cum se poate constata și în Fig. 4.20.

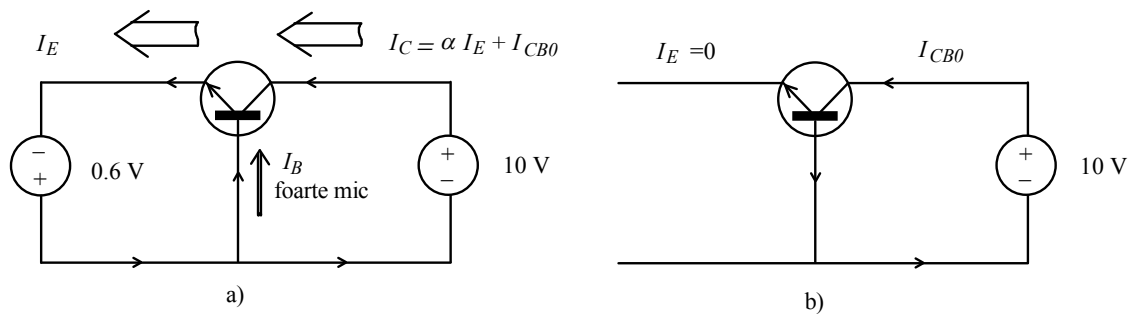


Fig. 4.20. Curenții în regiunea activă normală (a) și semnificația curentului rezidual I_{CB0} .

Configurația cu bază comună din figura precedentă prezintă două dezavantaje:

- cele două surse au polarități opuse în raport cu masa și, de aceea, nu se utilizează aproape niciodată pentru regimul de curent continuu (polarizare);
- curentul de emitor are valori egale cu acelea ale curentului pe care îl comandă; din acest motiv, pentru regimul de variații (prelucrarea semnalelor) configurația cu bază comună este utilizată numai în puține aplicații.

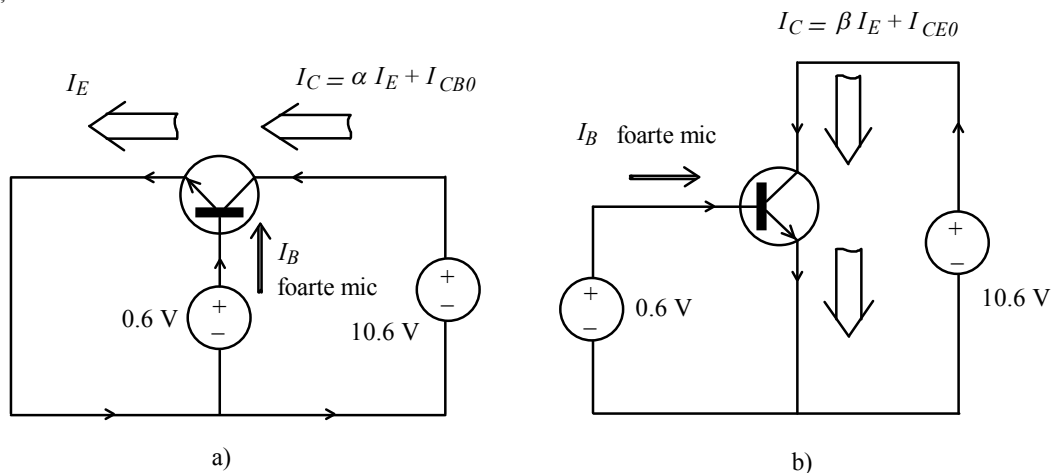


Fig. 4.21. Conexiunea cu emitor comun.

Prin deplasarea sursei de tensiune de 0.6 V de-a lungul buclei de circuit, se ajunge la configurația cu **emitorul comun** din Fig. 4.21 a) care este cea mai utilizată configurație pentru tranzistoarele bipolare. Pentru a

avea portul de intrare în stînga, schema trebuie redesenată ca în Fig. 4.21 b), așa cum o veți întâlni întodeana în aplicații.

În conexiunea cu emitorul comun, portul de intrare este între bază și emitor iar cel de ieșire este între colector și emitor, terminalul de emitor fiind comun.

Deși perechea de borne de intrare este aceeași ca la conexiunea bază comună, **curent de intrare este acum curentul bazei, care este de cel puțin o sută de ori mai mic decît cel de emitor.** Prin aplicarea legii curenților și utilizarea relației (4.11), curentul de colector poate fi exprimat în funcție de curentul de bază prin

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{1}{1 - \alpha} I_{CB0}. \quad (4.12)$$

Factorul

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (4.13)$$

este esențial pentru descrierea funcționării acestei configurații și se numește factor de amplificare a curentului în conexiunea emitor comun. Cum α este foarte apropiat de unitate, factorul β are valori mari, de ordinul sutelor. Numai în cazul tranzistoarelor de mare putere factorul β are valori mai mici, de ordinul 20 - 50.

Deoarece la numitorul relației (4.13) este o diferență între două numere foarte apropiate, valoarea ei este extrem de sensibilă la variațiile lui α . Diferențiind relația, putem arăta că

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot \frac{d\alpha}{\alpha} = (\beta + 1) \cdot \frac{d\alpha}{\alpha} \cong \beta \cdot \frac{d\alpha}{\alpha}; \quad (4.14)$$

astfel

variațiile relative ale factorului α provoacă variații relative ale factorului β de sute de ori mai mari.

Din acest motiv, deși factorul α este controlat tehnologic rezonabil de bine,

factorul β are o împrăștiere tehnologică foarte mare.

Astfel, în practică, la montarea unui tranzistor într-un circuit, asupra lui există o incertitudine destul de mare, extremitățile acestui interval fiind cel puțin în raportul 1:2. De exemplu, la BC 171A factorul β este între 125 și 260 (litera A înseamnă ca producătorul a făcut deja o sortare prealabilă, dacă ați cumpărat BC 171 puteți să vă așteptați la valori între 40 și 1000). Din această cauză,

orice circuit cu tranzistoare ale cărui performanțe (punct static de funcționare, amplificări, etc) depind puternic de factorul β este contraindicat în aplicațiile practice.

Observație: Ați scăpat, astfel, de rezolvarea unui mare număr de probleme din culegerile scrise de o serie de autori români, specialiști în "electronică teoretică".

Exprimînd cu ajutorul factorului β relația (4.12), avem

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CB0};$$

dacă definim curentul rezidual colector-emitor (cu baza în gol) prin $I_{CE0} = (\beta + 1) I_{CB0}$, relația anterioară capătă forma

$$\boxed{I_C = \beta I_B + I_{CE0}} \quad (4.15)$$

La siliciu curenții reziduali sunt extrem de mici; de exemplu, chiar la un tranzistor de curent mare (15 A) cum e 2N3055, curentul I_{CE0} este sub 20 nA la temperatura camerei și abia ajunge spre 100 μ A dacă îl încălzim la 130 °C. Putem, deci, scrie cu foarte bună aproximație

$$\boxed{I_C = \beta I_B} \quad (4.16)$$

iar cu o aproximație mai bună de un procent

$$\boxed{I_C \cong I_E} \quad (4.17)$$

Curentul de colector este practic egal cu cel de emitor și de β ori mai mare decât curentul de bază.

Să privim acum un tranzistor **NPN** într-o schemă practică cu emitorul comun (Fig. 4.22). Funcționarea sa poate fi înțeleasă cu un model extrem de simplu. Între bază și emitor există o joncțiune semiconductoare care se comportă ca o diodă: curentul poate să treacă numai într-un singur sens, dacă tensiunea bază-emitor depășește tensiunea de prag, egală cu 0.6-0.7 V. Peste această valoare, curentul crește foarte abrupt (valoarea sa multiplicîndu-se cu 10 la fiecare variație de aproximativ 60 mV). Putem astfel considera, în primă aproximație, că **după deschidere, tensiunea bază-emitor rămîne constantă**, valoarea curentului de bază fiind determinată de circuitul exterior;

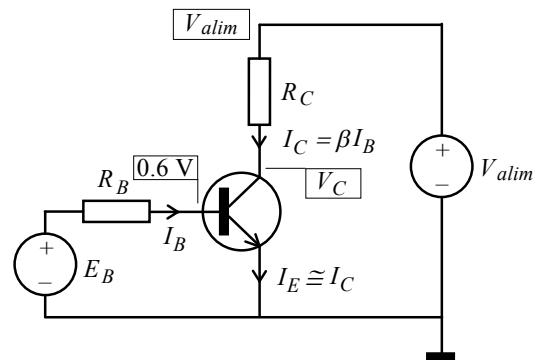


Fig. 4.22. Tranzistorul NPN într-un circuit practic cu emitorul comun.

în absența unei rezistențe de limitare a curentului, polarizarea joncțiunii bază-emitor direct cu o sursă de tensiune cu rezistență mică este o cale sigură pentru distrugerea tranzistorului.

Dacă între colector și emitor s-ar face scurtcircuit (manevră absolut inofensivă pentru tranzistor), am obține o valoare maximă a curentului

$$I_{Cmax} = \frac{V_{alim}}{R_C}; \quad (4.18)$$

îndepărtînd scurtcircuitul, curentul de colector nu poate fi decît mai mic sau egal cu această valoare $0 \leq I_C \leq I_{Cmax}$. Tranzistorul se comportă ca un **robinet controlat**: el nu produce curent ci numai lasă să treacă unul de valoare $I_C = \beta I_B$, indiferent de circuitul extern (tensiunea de alimentare V_{alim} și rezistența R_C), atîta timp cît circuitul extern poate furniza această valoare de curent, așa cum se poate vedea în Fig. 4.23. Putem înlocui rezistența R_C cu o diodă conectată în polarizare directă (desenul b): valoarea curentului de colector va rămîne practic neschimbată, se va modifica numai potențialul colectorului, de la $V_{alim} - I_C R_C$ la $V_{alim} - 0.6 \text{ V}$. La fel de bine putem să o înlocuim cu un scurtcircuit, potențialul colectorului se va duce la V_{alim} dar curentul de colector va rămîne nemodificat (desenul c).

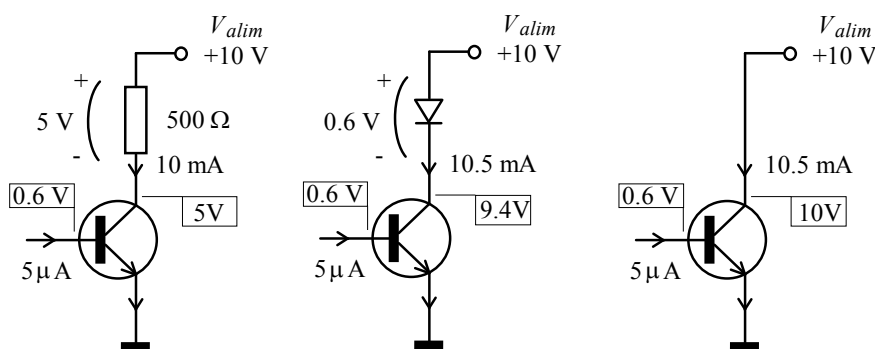


Fig. 4.23. În regiunea activă normală curentul de colector este practic constant (egal cu βI_B) indiferent de dispozitivul conectat în colector.

Funcția tranzistorului este controlul curentului de colector, control efectuat prin starea portului de intrare. Să ne întoarcem la situația din desenul a) al figurii precedente, în care avem o rezistență legată în colector, și să creștem curentul bazei, ca în Fig. 4.24 a). Tranzistorul acționează ca un **robinet controlat** permițînd ca un curent mai mare să fie absorbit din rezistența de colector. În același timp însă, conforme relației $V_C = V_{alim} - R_C I_C$, **potențialul colectorului coboară**, așa cum se întîmplă cu nivelul lichidului din rezervorul 2 din echivalentul hidraulic reprezentat în desenul b). În circuitul hidraulic, nivelul rezervorului 1 este presupus constant, așa cum este menținut potențialul de +10 V, iar debitul prin conducta ce leagă rezervoarele este aproximativ proporțional cu diferența de nivel în cele două rezervoare (echivalentul legii lui Ohm pe rezistența din colector).

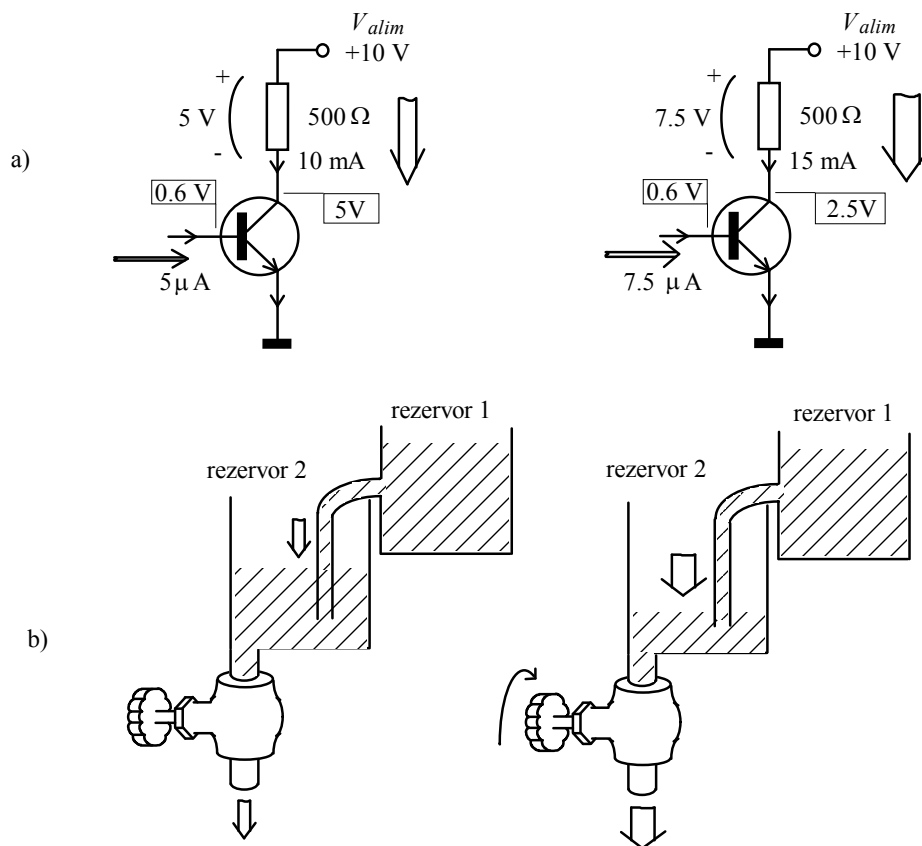


Fig. 4.24. Creșterea curentului de bază deschide mai mult tranzistorul, provocând creșterea curentului de colector și coborîrea potențialului colectorului.

2.B. Caracteristica de intrare

Așa cum spuneam, portul de intrare este echivalent cu o diodă, caracteristica sa statică $I_B = f(V_{BE})$ fiind aproximativ exponențială și foarte puțin influențată de tensiunea colector-emitor, atunci când valoarea acesteia este modificată **între 1 V și câteva zeci de volți** (pînă la valoarea maximă garantată de fabricant). Nu discutăm aici situația în care **colectorul este lăsat în gol** ($I_C = 0$) pentru că aceasta nu se întâlnește în aplicații. Când V_{BE} este mai mic decît tensiunea de deschidere (în jur de 0.6 V), curentul de bază este practic nul; după depășirea tensiunii de deschidere el crește foarte rapid, astfel încît la valorile permise pentru I_B tensiunea V_{BE} este aproximativ constantă.

Dacă efectuăm măsurători mai precise, constatăm că mărirea tensiunii colector-emitor **deplasează** extrem de puțin caracteristica de intrare. Pentru aceeași valoare a curentului de bază, tensiunea necesară între bază și emitor este un pic mai mare. Pentru o variație V_{CE} între 1 și 11 volți, aceasta, care are valori pe la 600 mV , crește cu mai puțin de 1 mV ! Dacă menținem constantă tensiunea emitor-bază, la aceeași variație a lui V_{CE} , curentul de bază scade cu mai puțin de 3% .

2.C. Caracteristicile de transfer

Vom păstra constantă tensiunea colector-emitor, la o valoare care asigură funcționarea în regiunea activă. Mărimea de ieșire este curentul de colector dar, ca mărime de intrare avem de ales între curentul de bază și tensiunea bază-emitor. Dacă alegem curentul de bază, conform relației $I_C = \beta I_B$, ne așteptăm la o linie dreaptă care trece prin origine. Dacă pe graficul $I_C = f(I_B)$ e puțin probabil să observăm (cu ochiul liber) o abatere de la linia dreaptă, calcularea raportului $I_C/I_B = \beta_{DC}$, numit **factor static de amplificare** (în curent continuu), arată că acesta nu rămâne constant. Pe o scară lin-lin acest fenomen nu este evident deoarece este localizat foarte aproape de originea axelor. Din acest motiv, e mai bine să reprezentăm chiar dependența lui β_{DC} în funcție de curentul de colector. La un tranzistor de mică putere, ea are forma din Fig. 4.25. Se observă că dacă tranzistorul este operat la curenți de colector foarte mici, în domeniul microamperilor, factorul de amplificare β_{DC} scade aproape la o zecime din valoarea sa maximă.

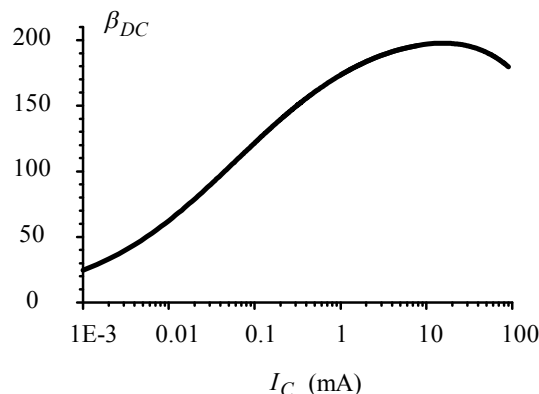


Fig. 4.25. Variația factorului β_{DC} cu intensitatea curentului de colector la tranzistorul 2N2222.

Observație: În cataloage, factorul de amplificare static β_{DC} este notat adesea cu h_{FE} ("h" pentru că este considerat unul din parametrii hibridi, "F" de la forward și "E" de la emitor comun). Indicele "FE" este scris cu litere mari pentru a arăta că factorul este definit la curent continuu.

Cum dependența $I_C = f(I_B)$ nu este strict liniară, este clar că nici panta ei nu este constantă. Se definește, din acest motiv, **factorul dinamic de amplificare în curent** $\beta_{AC} = \frac{dI_C}{dI_B}$, pentru a caracteriza funcționarea tranzistorului la variații mici în jurul unui anumit punct de funcționare. Evoluția acestui factor dinamic în funcție de curentul de colector este similară cu variația celui static: are valori mici la valori foarte coborâte ale lui I_C și trece printr-un maxim puțin înainte ca I_C să ajungă la valoarea maximă admisă.

Observație: Factorul dinamic de amplificare β_{AC} este notat în cataloage cu h_{fe} .

Strict vorbind, în modelele pentru variații ar trebui să apară β_{AC} iar la calculul polarizării (curent continuu) ar trebui să utilizăm factorul static β_{DC} . Dar chiar pentru tranzistoare sortate de fabricant, acești factori au valori cu o împrăștiere tehnologică atât de mare încât distincția dintre ei este un academism complet inutil. **Pentru că nu-i știm decât foarte aproximativ, îi vom considera întodeauna egali și îi vom nota de aici înainte, simplu, cu β .**

Am ales anterior, ca mărime de intrare, curentul I_B . Dacă alegem ca mărime de intrare tensiunea bază-emitor, în regiunea activă caracteristica de transfer respectă o lege exponențială

$$I_C = I_s e^{V_{BE}/V_T} \quad (4.19)$$

pe aproape șapte decade de variație a curentului; ca și pînă acum, V_T este potențialul termic, egal cu aproximativ 25 mV la temperatura camerei. Astfel,

curentul de colector se dublează la fiecare creștere cu 18 mV a tensiunii bază-emitor și se multiplică cu zece la fiecare creștere de 60 mV.

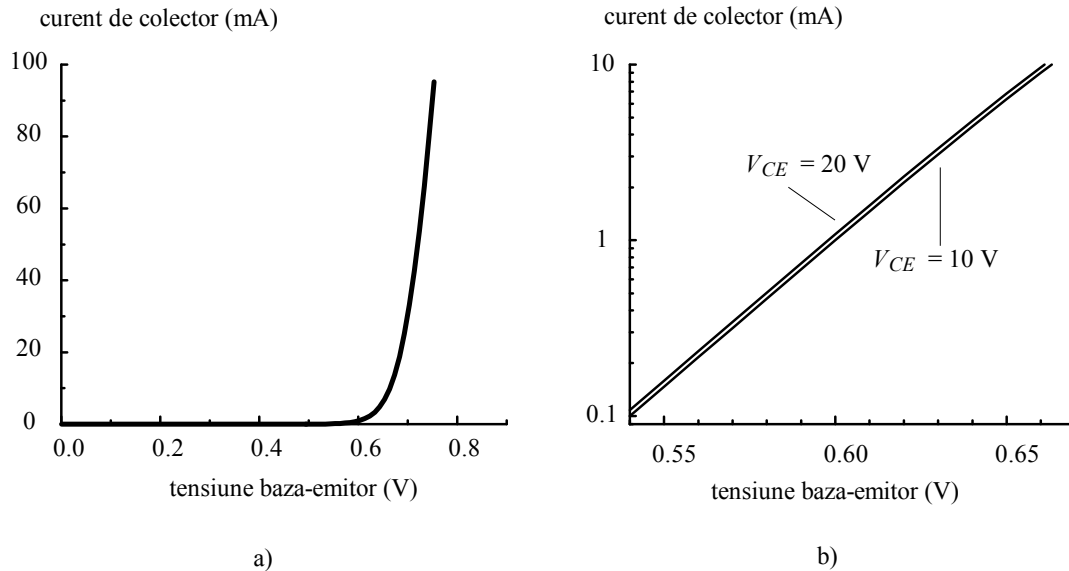


Fig. 4.26. Caracteristica de transfer $I_C = f(V_{BE})$.

Reprezentată în coordonate liniare, caracteristica de transfer are forma din Fig. 4.26 a) și arată că modul în care este controlat robinetul este foarte neliniar. Sensibilitatea controlului poate fi descrisă cu un parametru diferențial, numit **transconductanță dinamică** (adesea numit simplu transconductanță), definit prin viteza de creștere a curentului în raport cu tensiunea de control

$$g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}}; \quad (4.20)$$

din relația (4.19) se obține imediat că transconductanța **nu depinde decît de curentul de colector la care operează tranzistorul**,

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}. \quad (4.21)$$

Cu alte cuvinte,

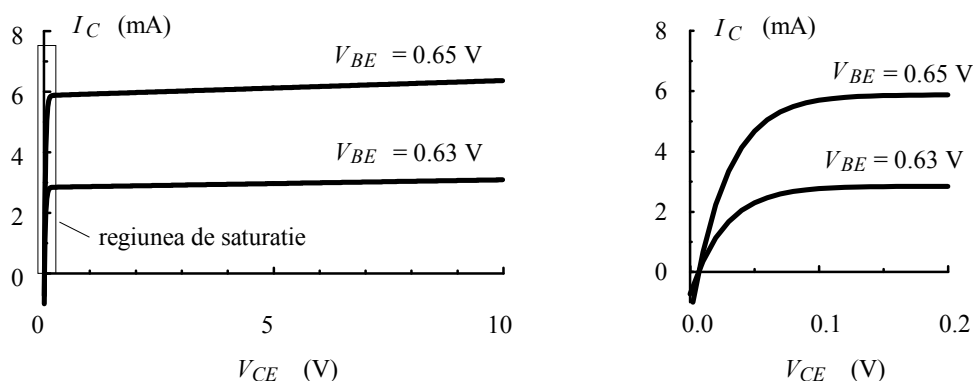
dacă am stabilit valoarea curentului de colector, orice tranzistor are aceeași transconductanță, indiferent de parametrii săi I_S și β .

Diferențele în parametrii I_S și β afectează numai modul în care trebuie polarizăm tranzistorul pentru a obține curentul de colector I_C dorit: modificarea lui I_S va cere o tensiune V_{BE} ușor diferită, iar variația lui β va conduce la o altă valoare a curentului absorbit de baza tranzistorului.

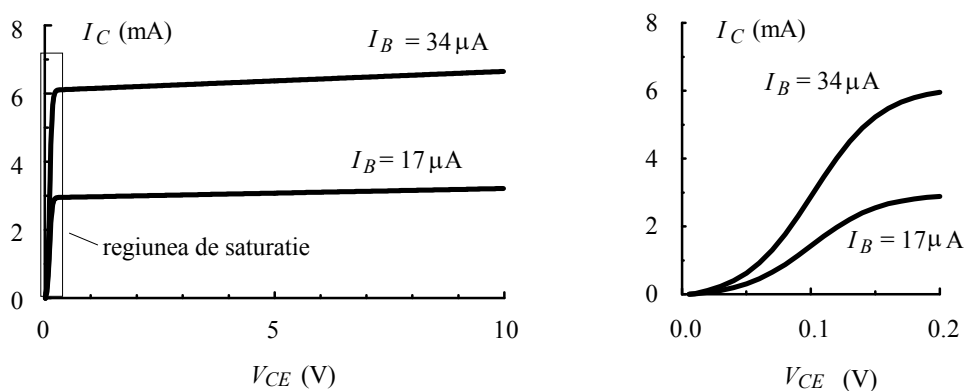
Mai mult, așa cum se vede în desenul b) al figurii, modificarea tensiunii colector-bază nu face decât să translateze caracteristica în coordonate logaritmice, adică să afecteze numai factorul multiplicativ I_S din relația (4.19). Astfel, modificarea transconductanței la variația tensiunii de ieșire colector-bază are loc numai prin variația curentului I_C la care este operat tranzistorul, conform relației (4.21).

2.D. Caracteristica de ieșire

Păstrînd constantă tensiunea bază-emitor, caracteristica de ieșire $I_C = f(V_{CE})$ are forma din Fig. 4.27 a). Constatăm că valoarea curentului de colector este aproximativ independentă de V_{CE} numai pentru valori ale lui V_{CE} mai mari de cîteva zecimi de volt. Aceasta este numită **regiune activă normală**.



a) Caracteristici de ieșire la V_{BE} constant



b) Caracteristici de ieșire la I_B constant

Fig. 4.27. Caracteristici de ieșire în conexiunea emitor comun.

Ce se întîmplă la valori mai mici ? În plus față de joncțiunea bază-emitor, tranzistorul mai are o joncțiune între bază și colector, joncțiune care în mod normal este **invers polarizată** (Fig. 4.28 a). Cînd tensiunea colector emitor coboară sub 0.6 V, potențialul colectorului coboară sub potențialul bazei (Fig. 4.28 b) și joncțiunea bază-colector începe să fie direct polarizată, iar la potențiale de colector sub 0.1 V începe chiar să se deschidă, curentul produs prin acest mecanism **ieșind** prin terminalul de colector și diminuînd progresiv

curentul total de colector, așa cum se poate observa în desenul b) al figurii. În final, la $V_{CE} = 0$, curentul de emitor este practic nul întregul curent de bază ieșind prin colector (I_C este negativ), ca în desenul c) al figurii. Trebuie notat că nici în acest regim tranzistorul nu se comportă ca și cum ar fi alcătuit din două diode montate "spate la spate", joncțiunea bază-colector acaparînd tot curentul de bază, deși cealaltă joncțiune este polarizată cu exact aceeași tensiune. Deschiderea nedorită a joncțiunii colector bază, cunoscută sub numele de **saturație**, este un dezavantaj congenital al tranzistoarelor bipolare.

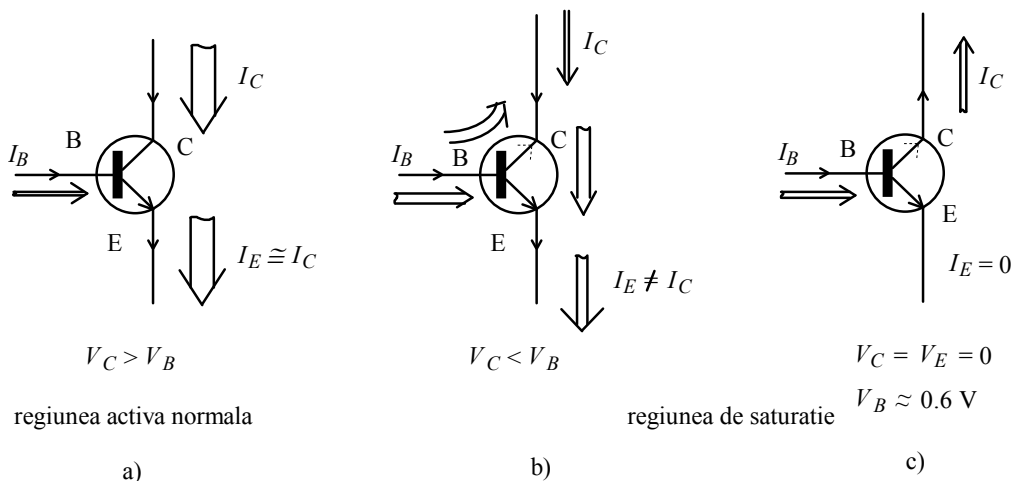


Fig. 4.28. Intrarea în saturație la coborîrea potențialului de colector; potențialul bazei este menținut la 0.6 V.

În circuitele practice nu tensiunea bază-emitor este menținută constantă, ci **curentul de bază** (aproximativ constant). În aceste condiții, caracteristicile de ieșire au forma din Fig. 4.27 b). Ele diferă de cele trasate la $V_{BE} = \text{const.}$ doar în regiunea de saturație, deoarece acum potențialul bazei nu mai este fixat. Astfel, curentul de colector scade la zero pentru $V_{CE} = 0$, fără să mai ajungă la valori negative.

În oricare din situații însă, în regiunea de saturație sensibilitatea controlării curentului de colector scade dramatic, astfel că putem afirma că, practic, acest curent încetează să mai fie controlat de starea portului de intrare.

În conexiunea emitor comun, saturația tranzistorului se manifestă prin **imposibilitatea de a controla curentul de colector prin valoarea curentului de bază**.

Să ne ocupăm acum și de cealaltă regiune a caracteristicii de ieșire, numită activă normală. Spuneam că aici practic curentul de colector nu depinde de tensiunea colector-emitor: **la portul de ieșire tranzistorul nu se comportă ca un rezistor**. La o privire mai atentă, constatăm însă o ușoară creștere a curentului de colector atunci cînd creștem tensiunea colector-emitor. Ea apare la fel, indiferent dacă menținem $V_{BE} = \text{const.}$ sau $I_B = \text{const.}$, deci nu putem da vina pe modificarea caracteristicii de intrare produsă de variația tensiunii de ieșire V_{CE} . Cu $I_B = \text{const.}$ curentul ar trebui să fie $I_C = \beta I_B$, indiferent de valoare tensiunii V_{BE} ; rezultă că această înclinare a caracteristicii de ieșire este provocată de variația lui β cu V_{CE} .

La conexiunea bază comună, păstrînd curentul de intrare I_E constant, curentul de colector se modifică extrem de puțin la variația tensiunii de ieșire. De ce oare în conexiunea emitor comun efectul este mult mai mare? În cazul conexiunii bază comună, variația curentului $I_C = \alpha I_E$ este produsă datorită variației factorului α care se modifică extrem de puțin, cam cu 0.01 % (10^{-4}) pe volt. În cazul conexiunii emitor comun, $I_C = \beta I_B$ și, dacă menținem constant curentul de bază, curentul de colector se modifică numai datorită variației factorului β . Am văzut însă anterior că o variație a lui α provoacă o variație relativă a lui

β de β ori mai mare, deci de cîteva sute de ori mai mare. Vom avea, deci, pe fiecare volt de variație a tensiunii V_{CE} , o variație a curentului de colector de cel puțin 1%; aceasta înseamnă, pe un interval de zece volți, o variație apreciabilă : 10 %. Sursa de curent echivalentă este de o sută de ori mai modestă decît aceea de la bază comună.

Presupunînd o variație liniară (de gradul întâi) a lui β în funcție de V_{CE}

$$\beta = \beta_0(1 + V_{CE}/V_{EA}) \quad (4.22)$$

cu valoarea V_{EA} **constantă**, ajungem la o expresie a curentului de colector

$$I_C = \beta_0 I_B + \beta_0 I_B V_{CE}/V_{EA} = I_C^{(0)} + I_C^{(0)} V_{CE}/V_{EA} \quad (4.23)$$

unde am notat cu $I_C^{(0)} = \beta_0 I_B$ curentul de colector "extrapolat" la $V_{CE} = 0$ (Fig. 4.29 a).

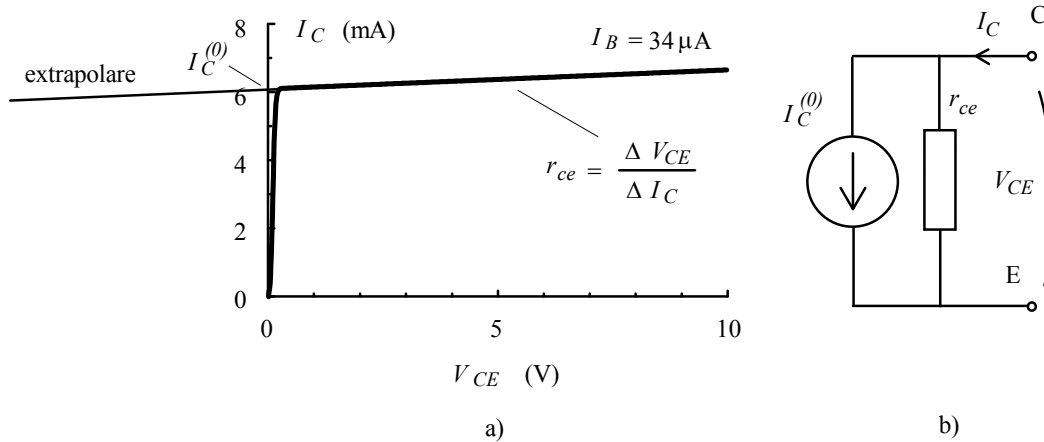


Fig. 4.29. Efectul Early în conexiunea emitor comun.

Rezistența dinamică în regiunea activă se obține simplu

$$r_{ce} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{V_{EA}}{I_C^{(0)}} \quad (4.24)$$

fiind **invers proporțională cu valoarea curentului de colector**. În regiunea activă normală, portul de ieșire poate fi echivalat cu o sursă ideală de curent de valoare $I_C^{(0)} = \beta I_B$ în paralel cu un rezistor cu rezistența $r_{ce} = V_{EA}/I_C^{(0)}$, ca în Fig. 4.26 b).

Relația (4.23) are și o consecință geometrică. Să calculăm intersecția cu axa orizontală a carateristicii extrapolate; punem $I_C = 0$ și obținem intersecția la

$$V_{CE} = -V_{EA} \quad (4.25)$$

indiferent de valoarea lui I_B . În consecință, așa cum se poate vedea în Fig. 4.30,

toate prelungirile caracteristicilor se întâlnesc într-un singur punct, la tensiunea $-V_{EA}$, numită **tensiune Early**; aceasta are valori de ordinul a o sută de volți.

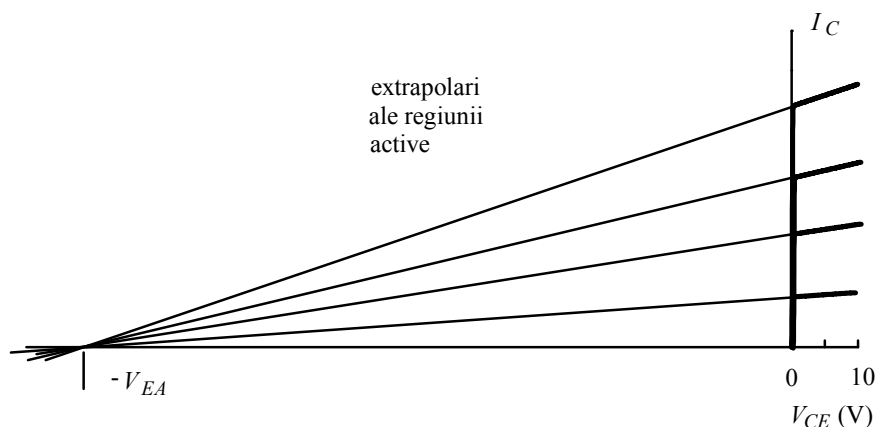


Fig. 4.30. Toate dreptele obținute prin extrapolarea caracteristicii din regiunea activă se întâlnesc într-un singur punct.

Mai rămîne să discutăm al treilea regim de funcționare, acela în care curentul de colector este nul.

Cînd curentul de colector este nul, tranzistorul se află în regiunea de blocare (tăiere).

Practic, cel mai adesea, blocarea este realizată prin aducerea la zero a tensiunii bază-emitor sau polarizarea inversă a acestei joncțiuni. În principiu, însă, deoarece la tranzistoarele cu siliciu curentul rezidual de colector este neglijabil, aducerea tranzistorului în regiunea de blocare se poate face și prin lăsarea în gol a bazei ($I_B = 0$).

Așa cum se poate constata în Fig. 4.31, unde am reprezentat circuitul cu emitor comun și echivalentul său hidraulic, căderea de tensiune pe rezistorul din colector devine nulă (legea lui Ohm) și potențialul colectorului devine egal cu cel al alimentării pozitive, **ca și cum tranzistorul nu ar exista**.

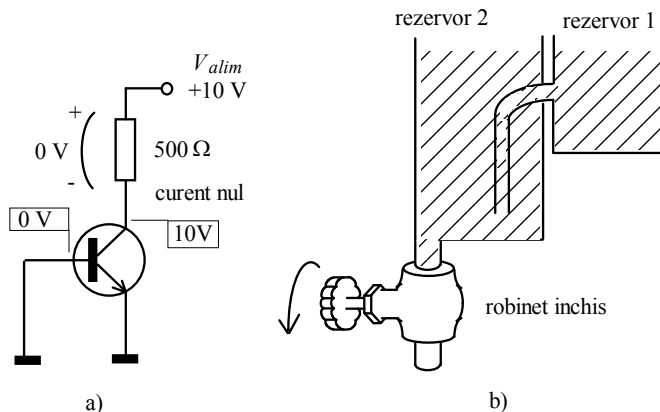


Fig. 4.31. Regimul de blocare.

Prin blocarea tranzistorului, potențialul său de colector urcă la nivelul potențialului alimentării.

Putem urmări starea tranzistorului pe familia de caracteristici de ieșire, prin metoda dreptei de sarcină. Această dreaptă intersectează axele la V_{alim} și V_{alim}/R_C , așa cum se vede în Fig. 4.33. Să presupunem că am stabilit curentul de bază la $20 \mu A$ și punctul de funcționare se găsește în poziția M de pe desen. Se vede că tensiunea colector-emitor nu este întreaga tensiune de alimentare, cantitatea $R_C \cdot I_{C act}$ căzând pe rezistența din colector, conform relației precedente. Mărirea sau micșorarea curentului de bază deschide mai mult sau mai puțin robinetul de curent, modificând simultan valoarea curentului de colector și tensiunea colector emitor (echivalentul nivelului din rezervorul 2). Aceasta este regiunea activă. Aici curentul de colector și potențialul colectorului sunt controlate de curentul de bază

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_B \\ V_C &= V_{alim} - \beta R_C I_B \end{aligned} \quad (4.27)$$

tranzistorul putând fi utilizat ca un amplificator.

Dacă valoarea curentului de bază este adusă la zero, și curentul de colector devine zero, robinetul fiind complet închis (punctul O de pe desen); în consecință, potențialul colectorului urcă la nivelul tensiunii de alimentare. Am ajuns, astfel, în regimul de blocare.

Ce se întâmplă însă dacă mărim prea mult curentul de bază? Deplasându-se spre stînga de-a lungul dreptei de sarcină, punctul de funcționare ajunge, în poziția N, în regiunea de saturație a tranzistorului, figurată cu un dreptunghi hașurat. Aici curentul de colector încetează să mai depindă practic de curentul de bază; degeaba creștem noi curentul de bază de la $40 \mu A$ la $60 \mu A$, punctul de funcționare rămîne practic tot în poziția N, la un curent de colector foarte puțin sub valoarea V_{alim}/R_C la care dreapta de sarcina intersectează axa verticală.

Dacă desenăm dependența curentului de colector în funcție de curentul de bază, obținem graficul din Fig. 34 a). Începînd de la o valoare a curentului de bază egală cu

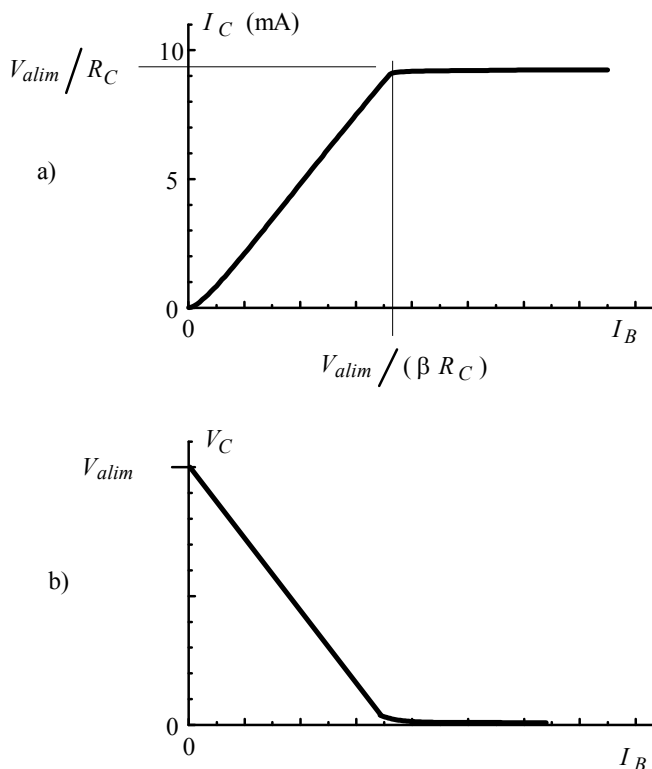


Fig. 4.34. Saturația curentului de colector în raport cu cel de bază.

$$I_{B sat} \cong \frac{V_{alim}}{\beta R_C} \quad (4.28)$$

curentul de colector încetează să mai crească, plafonîndu-se la o valoare de

$$I_{C\text{sat}} \cong \frac{V_{\text{alim}}}{R_C} \quad (4.29)$$

astfel,

valorile curenților (de bază și de colector) la care tranzistorul ajunge în saturație depind numai de circuitul extern.

Dacă în locul rezistenței R_C am fi legat colectorul direct la tensiunea de alimentare, dreapta de sarcină din Fig. 4.33 ar fi devenit verticală, deoarece potențialul colectorului nu s-ar fi clintit de la V_{alim} . În consecință, oricât am fi mărit curentul de bază, tranzistorul ar fi rămas în regiunea activă, urmînd ca la un moment dat să se distrugă prin supraîncălzire, fără să fi ajuns să afle ce înseamnă saturația.

În circuitele practice, tranzistorul poate ajunge în saturație datorită dipolului legat în colector: la creșterea curentului, pe acest dipol cade o tensiune din ce în ce mai mare, tensiunea între colector și emitor putînd astfel scădea pînă spre valoarea nulă.

În general, atunci cînd o mărime y , care depinde de o alta, x , încetează practic să mai crească la mărirea lui x , spunem că avem **saturația lui y în raport cu x** .

În cazul tranzistoarelor bipolare, prin saturație înțelegem saturația curentului de colector în raport cu cel de bază.

Vom vedea că, parcă pentru a încurca lucrurile, în cazul tranzistoarelor cu efect de cîmp, prin saturație se înțelege cu totul altceva.

Potențialul de la capătul inferior al rezistenței R_C ar fi ajuns la zero și dacă am fi controlat curentul cu un rezistor reglabil sau un tranzistor cu efect de cîmp. Ce aduce în plus tranzistorul este impedimentul legat de joncțiunea sa bază-colector: la valori ale potențialului de colector de cîteva zecimi de volt aceasta se deschide și împiedică potențialul de colector să ajungă la zero volți, așa cum se observă în Fig. 4.4 b). Această tensiune reziduală poate fi micșorată puțin prin mărirea exagerată a curentului de bază (se spune că tranzistorul intră adînc în saturație) dar ea rămîne și reprezintă o dificultate pentru unele tipuri de circuite cu tranzistoare bipolare. De exemplu, la curenți de zeci de amperi, valoarea ei ajunge spre 1 V, ceea ce produce o disipație de putere de cîteva zeci de wați pe **tranzistorul deschis**.

2.F. Date de catalog

Utilizatorul găsește informațiile relevante despre tranzistoarele pe care dorește să le folosească în foile da catalog oferite de producător. Deși pentru unii dintre parametri sunt date definițiile, majoritatea au semnificația acceptată în manuale sau alte publicații care standardizează terminologia. Prezентăm, în continuare, extrase din foia de catalog tranzistoarelor BC107 - BC108, limitînd comentariile la mărimile care au fost prezentate în acest capitol sau a căror semnificație este evidentă. Alți parametri importanți vor fi discutați în capitolele ulterioare, cînd ne vom ocupa de circuitele în care sunt utilizate tranzistoarele.

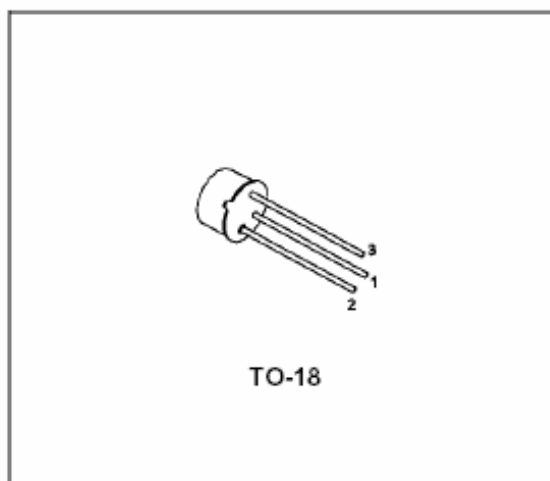
Foia de catalog începe cu prezentarea succintă a tranzistoarelor: **amplificatoare (aplicații liniare) de uz general (general purpose) la frecvențe joase (audio)**, avînd în plus specificația particulară de **zgomot**

redus (low noise). Urmează apoi câteva rânduri din care aflăm că tranzistoarele sunt de tip NPN, cu siliciu, și tipul capsulei. Ni se dau, de asemenea, câteva sugestii de aplicații, complementarele lor PNP și simbolul tranzistorului. De aici aflăm un lucru important, care trebuie reținut: **și foile de catalog pot conține erori.** În această foaie, de la SGS Thomson Microelectronics, simbolul desenat este al unui tranzistor PNP !.

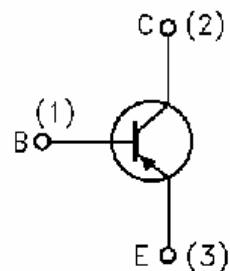
LOW NOISE GENERAL PURPOSE AUDIO AMPLIFIERS

DESCRIPTION

The BC107 and BC108 are silicon planar epitaxial NPN transistors in TO-18 metal case. They are suitable for use in driver stages, low noise input stages and signal processing circuits of television receivers. The PNP complement for BC107 is BC177.



INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



SC02810

Primele date numerice prezentate sunt acelea ale valorilor maxime admise; pentru exemplificare, ne vom referi numai la BC107. Tensiunea inversă maximă între colector și bază este de 50 V (este inversă pentru că este definită ca V_{CB0} și este pozitivă, deci potențialul colectorului este mai ridicat). Între colector și emitor tensiunea nu trebuie să depășească 45 V iar joncțiunea bază-emitor străpunge invers dacă creștem tensiunea peste 6 V. Curentul maxim de colector este de 100 mA.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value		Unit
		BC107	BC108	
V_{CB0}	Collector-Base Voltage ($I_E = 0$)	50	30	V
V_{CE0}	Collector-Emitter Voltage ($I_B = 0$)	45	20	V
V_{EB0}	Emitter-Base Voltage ($I_C = 0$)	6	5	V
I_C	Collector Current	100		mA
P_{tot}	Total Dissipation at $T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$ at $T_{case} \leq 25^\circ\text{C}$	0.3		W
		0.75		W
T_{stg}	Storage Temperature	-55 to 175		$^\circ\text{C}$
T_j	Max. Operating Junction Temperature	175		$^\circ\text{C}$

Valorile maxime pentru V_{CE} și I_C nu pot fi obținute simultan deoarece puterea disipată (egală cu produsul lor) nu poate depăși 300 mW și aceasta numai dacă aerul ambiant nu are o temperatură mai mare de 25°C . Tranzistorul poate disipa o putere mai mare (750 mW) dacă reușim să menținem **capsula** sub 25°C . Ultimele linii din tabel se referă la temperaturile de depozitare și funcționare. Aflăm astfel că performanțele sunt garantate pînă la o temperatură a joncțiunii de $+175^\circ\text{C}$.

Urmează grupa parametrilor legați de funcționare, "caracteristicile electrice". Dintre ele menționăm curentul rezidual colector bază, care este de 15 nA dar crește la 15 μA dacă joncțiunea ajunge la 150°C . Pentru joncțiunea bază-emitor este dată căderea de tensiune în conducție directă $V_{BE(on)}$. Recunoaștem apoi factorii de amplificare a curentului în conexiunea emitor comun, atât cel static $h_{FE} = \beta_{DC}$ cît și cel dinamic $h_{fe} = \beta_{AC}$. Observăm că pentru cel dinamic sunt date numai valorile tipice, **nu și intervalul de împrăștiere tehnologică**.

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{CB0}	Collector Cut-off Current ($I_E = 0$)	for BC107				
		$V_{CB} = 40\text{ V}$			15	nA
		$V_{CB} = 40\text{ V}$ $T_{case} = 150^\circ\text{C}$			15	μA
		for BC108				
		$V_{CB} = 20\text{ V}$			15	μA
		$V_{CB} = 20\text{ V}$ $T_{case} = 150^\circ\text{C}$			15	μA

$V_{BE(on)}^*$	Base-Emitter On Voltage	$I_C = 2 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5 \text{ V}$	550	650 700	700 770	mV mV
h_{FE}^*	DC Current Gain	$I_C = 2 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5 \text{ V}$ for BC107 for BC107 Gr. A for BC107 Gr. B for BC108 for BC108 Gr. A for BC108 Gr. B for BC108 Gr. C $I_C = 10 \mu\text{A}$ $V_{CE} = 5 \text{ V}$ for BC107 for BC107 Gr. A for BC107 Gr. B for BC108 for BC108 Gr. A for BC108 Gr. B for BC108 Gr. C	110 110 200 110 110 200 420 40 40 100	 120 90 150 120 90 150 270	450 220 450 800 220 450 800	
h_{fe}^*	Small Signal Current Gain	$I_C = 2 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5 \text{ V}$ $f = 1 \text{ KHz}$ for BC107 for BC107 Gr. A for BC107 Gr. B for BC108 for BC108 Gr. A for BC108 Gr. B for BC108 Gr. C $I_C = 10 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$ $f = 100 \text{ MHz}$		250 190 300 370 190 300 500 2		

Același lucru se întâmplă și pentru alt parametru important, impedanța de intrare în conexiune emitor comun h_{ie} (la V_{CE} constant). Situația poate conduce la confuzii, mai ales pentru începători, deoarece, în realitate, **acești parametri h_{fe} și h_{ie} au aceeași dispersie tehnologică ca și factorul de amplificare static.**

Enunțuri frecvent utilizate

(atît de frecvent încît merită să le memorați)

- În conexiunea cu emitorul comun, portul de intrare este între bază și emitor iar portul de ieșire este între colector și emitor; colectorul este, astfel, comun celor două porturi.
- Cel mai frecvent, tranzistoarele bipolare sunt utilizate în conexiunea emitor comun.
- Portul de intrare se comportă ca o diodă, caracteristica sa fiind foarte puțin afectată de valoarea tensiunii de ieșire (colector-bază).
- Curentul de colector este controlat exponențial de tensiunea bază-emitor; fiecare creștere de 60 mV produce o multiplicare cu 10 a curentului.
- Sensibilitatea acestui control poate fi caracterizată de un parametru dinamic numit transconductanță, $g_m = dI_C/dV_{BE}$; transconductanța nu depinde decît de valoarea curentului de colector în jurul căreia s-a efectuat mica variație, conform relației $g_m = I_C/V_T$, unde V_T este tensiunea termică (25 mV la temperatura camerei).
- Pe de altă parte, valoarea curentului de colector este proporțională cu valoarea curentului de bază. Factorul de amplificare β are valori peste o sută și are o împrăștiere tehnologică mare.
- La portul de ieșire, tranzistorul se comportă aproximativ ca o sursă de curent. Comportarea este mai depărtată de idealitate în comparație cu situația de la conexiunea bază comună, deoarece factorul β suferă variații relative de $\beta > 100$ ori mai mari decît factorul α .
- Rezistența dinamică a portului de ieșire este invers proporțională cu valoarea curentului de colector, conform relației $r_{ce} = V_{EA}/I_C$, unde parametrul V_{EA} este tensiunea Early; această tensiune are valori de ordinul a 100 V.
- Regimul în care curentul de colector este controlat de starea portului de intrare se numește regim activ normal.
- Prin aducerea la zero a tensiunii bază-emitor, curentul de colector se anulează și tranzistorul ajunge în regimul de blocare; curentul de colector poate fi adus foarte aproape de zero și prin anularea curentului de bază.
- Dacă în colector este montată o rezistență și dacă valoarea curentului de bază crește în așa fel încît practic întreaga tensiune de alimentare să cadă pe rezistență, tranzistorul ajunge în regiunea de saturație, potențialul colectorului devenind practic egal cu cel al emitorului. În acest regim, curentul de colector nu mai este controlat de starea portului de intrare, fiind stabilit de circuitul extern la $I_{C\text{sat}} \cong V_{\text{alim}}/R_C$.

Termeni noi

- factorul β	factorul de amplificare a curentului în conexiunea emitor comun; este egal cu $\alpha/(1 - \alpha)$ și are valori peste 100, prezentînd o împrăștiere tehnologică mare;
- transconductanță	parametru dinamic ce caracterizează sensibilitatea cu care tensiunea bază-emitor controlează curentul de colector, definit ca $g_m = d I_C / d V_{BE}$;
- tensiune Early	parametru care caracterizează dependența liniară a factorului β de tensiunea colector bază; este utilizată la exprimarea rezistenței dinamice între colector și emitor prin relația $r_{ce} = V_{EA} / I_C$ și are valori de ordinul a 100 V;
- saturație	regim de funcționare a tranzistorului în care joncțiunea colector-bază ajunge să fie în conducție directă; în acest regim, curentul de colector nu mai este controlat de starea portului de intrare;
- curent de colector de saturație	valoare a curentului de colector la care tranzistorul ajunge în saturație; este stabilită de circuitul extern $I_{C\text{sat}} \cong V_{\text{alim}} / R_C$;
- tensiune de saturație colector emitor	valoarea tensiunii colector-emitor în regimul de saturație; depinde de curentul de colector la care a apărut saturația
- regim de blocare	regim de funcționare a tranzistorului în care curentul de colector este nul;

Probleme rezolvate

Problema 1. Circuitul din Fig. 4.35 reprezintă o variantă de polarizare, cunoscută în multe texte de limbă română ca "polarizare fixă".

a) Tranzistorul are factorul β egal cu 200. Determinați punctul static de funcționare.

b) Reluați calculul de la punctul precedent în situațiile în care factorul β are valorile 100 și, respectiv, 400. Formulați o concluzie asupra sensibilității potențialului de colector la modificarea factorului β .

c) Revenind la valoarea de 200 a factorului β , calculați care este efectul asupra potențialului de colector produs de modificarea cu 0.2 V a tensiunii bază-emitor (datorită, de exemplu, împrăștierei tehnologice a curentului I_S).

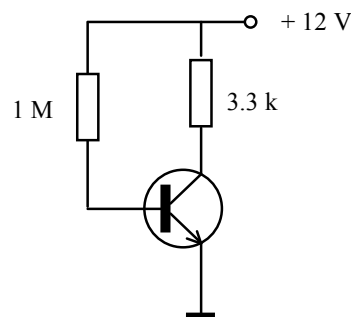


Fig. 4.35.

Rezolvare

a) Emitorul este legat la masă, tranzistorul este din siliciu, deci potențialul bazei va fi pe undeva pe la tensiunea de deschidere de 0.6 V. Legea lui Ohm aplicată pe rezistorul din bază conduce la valoarea curentului la acest terminal

$$I_B = \frac{12 \text{ V} - 0.6 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega} = 11.4 \text{ }\mu\text{A};$$

de aici calculăm imediat curentul de colector

$$I_C = \beta I_B = 200 \cdot 11.4 \text{ }\mu\text{A} = 2.3 \text{ mA}.$$

Pe rezistența din colector va cădea tensiunea $U_{R_C} = 2.3 \text{ mA} \cdot 3.3 \text{ k}\Omega = 7.6 \text{ V}$, așa că potențialul din colector este

$$V_C = 12 \text{ V} - 7.6 \text{ V} = 4.4 \text{ V}.$$

b) Cu valoarea 100 pentru factorul β obținem $I_C = 1.1 \text{ mA}$, $U_{R_C} = 3.6 \text{ V}$ și $V_C = 8.4 \text{ V}$. Potențialul de colector nu mai este pe la jumătatea tensiunii de alimentare ci s-a apropiat de aceasta; cu toate acestea, mai avem o rezervă de 3.6 V pînă la regimul de blocare.

Reluăm acum calculele pentru $\beta = 400$. Curentul de colector rezultă $I_C = 4.6 \text{ mA}$, de unde rezultă $U_{R_C} = 15.2 \text{ V}$ și obținem $V_C = 12 \text{ V} - 15.2 \text{ V} = -3.2 \text{ V}$. Așa să fie, un potențial negativ al colectorului cînd singura tensiune de alimentare pe care am o avem este pozitivă? Este clar că am greșit pe undeva. Refacem calculele și aritmetica ne conduce la același rezultat $V_C = -3.2 \text{ V}$. Verificăm acum ce relații am aplicat la fiecare pas de calcul. Tensiunea bază emitor este sigur de ordinul a 0.6 V; și dacă ar fi mai mică potențialul de colector ar rezulta și mai negativ. Legea lui Ohm este cu siguranță valabilă pe rezistorul de 1 MΩ. Putem, deci, să contăm pe valoarea obținută pentru curentul de bază, el este de 11.4 μA .

Mai departe am scris că $I_C = \beta I_B$; este această relație valabilă întodeauna? Recitim textul capitolului și descoperim că aceasta nu se mai întîmplă **dacă tranzistorul intră în saturație**. Putem chiar verifica faptul că tranzistorul este în saturație, există o valoare a curentului de colector fixată de circuitul extern pe care tranzistorul nu o poate depăși; aceasta se calculează simplu

$$I_{C\text{ sat}} = \frac{12\text{ V}}{3.3\text{ k}\Omega} = 3.64\text{ mA}.$$

Or, cu relația $I_C = \beta I_B$, curentul de colector a rezultat egal cu 4.6 mA. Concluzia este una singură, cu $\beta = 400$ **tranzistorul este în saturație**. Din acest motiv, **valoarea corectă pentru potențialul de colector nu este $V_C = -3.2\text{ V}$ cum a ieșit din calcul, ci**

$$V_C \cong V_E = 0\text{ V};$$

de fapt, vom avea o tensiune de saturație de câteva zecimi de volt.

Dacă am fi calculat valoarea lui $I_{C\text{ sat}}$ de la început, în momentul în care am fi ajuns la $I_C = 4.6\text{ mA}$ clopoțelul ar fi sunat imediat, anunțându-ne că tranzistorul a ajuns în saturație. Este bine, deci, **să începem rezolvarea unei astfel de probleme prin calcularea curentului de colector la care tranzistorul ar ajunge în saturație**.

Să tragem acum concluziile. Am modificat factorul β de la 200 la 100 și, apoi, la 400. La prima operație, potențialul colectorului s-a deplasat în sus cu 4 V, dar tranzistorul a rămas în regiunea activă. Prin creșterea la 400 însă, tranzistorul a intrat în saturație și colectorul a ajuns la potențialul mase, tranzistorul încetînd să mai funcționeze ca un robinet controlat. Morala este că **polarizarea tranzistorului cu o rezistență direct de la alimentare este total contraindicată, deoarece punctul static de funcționare depinde puternic de parametrul β** .

c) Valoarea curentului de bază, calculat în ipoteza $V_{BE} = 0.6\text{ V}$, a fost de $11.4\text{ }\mu\text{A}$. Dacă tensiunea bază-emitor crește cu 0.2 V , noua valoare va fi

$$I_B = \frac{12\text{ V} - 0.8\text{ V}}{1\text{ M}\Omega} = 11.2\text{ }\mu\text{A}$$

cu numai 1.8 % mai mică. În consecință, rezistența din bază stabilește practic valoarea curentului de bază, indiferent de parametrii tranzistorului. O denumire mai corectă a acestei variante de polarizare ar fi "la curent de bază fixat".

Problema 2. Circuitul din problema precedentă a fost modificat și acum arată ca în Fig. 4.36.

a) Pentru valoarea factorului β de 200, calculați punctul static de funcționare. Încercați să găsiți o cale de a reduce o parte a rezolvării la cazul precedent.

b) Aflați ce se întâmplă dacă factorul β se modifică, ajungînd la 400.

Rezolvare

a) De data aceasta nu mai cunoaștem potențialul emitorului. Va trebui să aplicăm legea tensiunilor, efectuînd o excursie de la nodul de masă prin rezistența din emitor, joncțiunea emitor bază și rezistența din bază. Ecuația care rezultă este

$$0 + I_E \cdot 1\text{ k}\Omega + 0.6\text{ V} + I_B \cdot 1\text{ M}\Omega = 12\text{ V};$$

dacă ținem seama că $I_E \cong I_C = \beta I_B$, relația devine

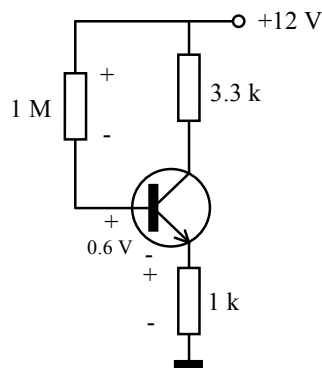


Fig. 4.36.

$$0.6 \text{ V} + I_B(1 \text{ M}\Omega + \beta \cdot 1 \text{ k}\Omega) = 12 \text{ V}$$

care conduce la

$$I_B = \frac{12 \text{ V} - 0.6 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega + \beta \cdot 1 \text{ k}\Omega} = \frac{11.4 \text{ V}}{1.2 \text{ M}\Omega} = 9.5 \text{ }\mu\text{A}.$$

De aici urmăm calea cunoscută, $I_C = \beta I_B = 1.9 \text{ mA}$, $U_{R_C} = 6.3 \text{ V}$ și $V_C = 5.7 \text{ V}$. Pe de altă parte, $V_E = I_E \cdot 1 \text{ k}\Omega = 1.9 \text{ V}$ iar $V_B = V_E + 0.6 \text{ V} = 2.5 \text{ V}$. Circuitul, cu toate valorile calculate, este prezentat în Fig. 4.37.

Dacă analizăm relația din care am obținut valoarea curentului de bază, constatăm că rezistența din emitor apare multiplicată cu β și adunată cu rezistența din bază. Astfel, **pentru calcularea curentului din bază am putea considera că ea dispăre din emitor și apare, de β mai mare, în serie cu rezistența din bază**. Acest truc funcționează numai pentru calcularea curentului din bază. Pentru etapele ulterioare ale calculului ea trebuie să revină la locul ei în circuitul emitorului.

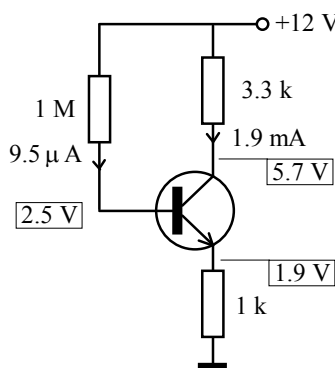


Fig. 4.37.

b) Cu $\beta = 400$ curentul de bază se obține

$$I_B = \frac{12 \text{ V} - 0.6 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega + \beta \cdot 1 \text{ k}\Omega} = \frac{11.4 \text{ V}}{1.4 \text{ M}\Omega} = 8.14 \text{ }\mu\text{A}.$$

Creșterea lui β a micșorat un pic curentul de bază dar efectul creșterii rămîne puternic asupra curentului de colector, care rezultă acum $I_C = \beta I_B = 3.3 \text{ mA}$. În acest caz, pe rezistorul din colector ar cădea tensiunea $U_{R_C} = 10.7 \text{ V}$ de unde ar rezulta că potențialul colectorului ar fi la 1.3 V. Pe de altă parte, pe rezistorul din emitor ar cădea 3.3 V și emitorul ar urca la $V_E = 3.3 \text{ V}$. Am ajuns la o soluție în care potențialul colectorului (1.3 V) este mai coborât decît al emitorului. Acest lucru este imposibil, deci **tranzistorul a ajuns în saturație**.

Problema 3. În circuitul din Fig. 4.38 s-a utilizat un alt mod de polarizare al bazei. Considerînd în continuare că $\beta = 200$,

- decideți dacă divizorul rezistiv din bază poate fi considerat neîncărcat și calculați punctul de static funcționare.
- Reluați punctul precedent, pentru $\beta = 400$. Formulați o concluzie.

Rezolvare

a) Rezistența echivalentă a divizorului rezistiv este puțin mai mică decît valoarea rezistenței de 10 kΩ. Dacă doriți o valoare mai precisă, calculați combinația lor paralel și obțineți 8.3 kΩ. Din rezolvarea problemei precedente am învățat că, pentru calcularea curentului de bază, putem să deplasăm rezistența din emitor în circuitul bazei, dacă o multiplicăm cu β . Avem, astfel, o valoare pentru rezistența care constituie sarcina divizorului, ea este $\beta \cdot 1 \text{ k}\Omega = 200 \text{ k}\Omega$, de $200/8.3 \cong 24$ de ori mai mare decît rezistența echivalentă a divizorului. În concluzie, cu o aproximație de 4 %

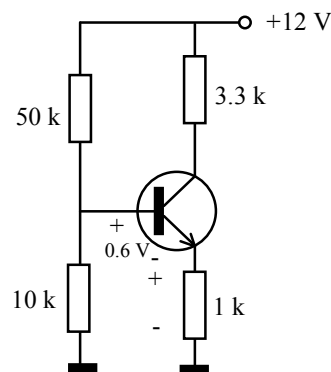


Fig. 4.38.

putem considera că divizorul este operat în gol. Prezența căderii de tensiune pe joncțiunea bază-emitor contribuie suplimentar la **micșorarea curentului extras din divizor**, astfel că eroarea este chiar mai mică de 4 %.

În continuare, readucem rezistența din emitor la locul ei. Apoi calculăm tensiunea de ieșire în gol a divizorului, prin regula de trei simplă. Ea este identică cu potențialul bazei tranzistorului

$$V_B = \frac{10 \text{ k}\Omega}{60 \text{ k}\Omega} \cdot 12 \text{ V} = 2 \text{ V} ;$$

de aici calculăm potențialul emitorului $V_E = V_B - 0.6 \text{ V} = 1.4 \text{ V}$ și, cu legea lui Ohm, curentul de emitor, care este practic egal cu cel de colector, $I_C = 1.4 \text{ mA}$. Urmează la rând tensiunea pe rezistența din colector $V_{R_C} = 4.6 \text{ V}$ și, în final, potențialul colectorului $V_C = 12 \text{ V} - 4.6 \text{ V} = 7.4 \text{ V}$. Colectorul este mai sus cu 6 V decît emitorul, tranzistorul este departe de regimul de saturație.

b) Acum divizorul rezistiv "vede" în locul rezistenței de sarcină de $200 \text{ k}\Omega$ una de valoare dublă, egală cu $400 \text{ k}\Omega$. Dacă în cazul anterior cuplarea rezistenței de sarcină cobora cu 4 % tensiunea de ieșire (fața de cea de mers în gol), acum coborîrea este numai de 2 %. În concluzie, modificarea lui β de la 200 la 400 produce numai o creștere a potențialului bazei de 2 % din tensiunea în gol a divizorului, adică de numai 0.04 V. Aceeași creștere se va regăsi și în emitor, provocînd o creștere a curentului de colector de numai 0.04 mA, adică sub 3 %. În consecință, potențialul de colector va coborî cu 0.13 V de la valoarea anterioară de 7.4 V.

Să ne aducem aminte că, în cazul circuiturilor de la problemele 1 și 2, aceeași creștere a factorului β aducea tranzistorul în saturație, pe cînd acum **modificarea potențialului de colector este practic neglijabilă**. Circuitul de polarizare din Fig. 4.38, care **fixează potențialul bazei** și nu curentul de bază, este circuitul care asigură predictibilitatea punctului static de funcționare în condițiile împrăstierii mari a factorului β .

Probleme propuse

P 4.2.1. Încercînd să realizați circuitul din Fig. 4.39, luați un tranzistor din cutie și îl montați. Să presupunem că tranzistorul are $\beta = 200$. Calculați curentul de bază, curentul de colector și potențialul colectorului. Este el în regiunea activă sau în saturație ?

P 4.2.2. Luînd un alt exemplar din aceeași cutie trimisă de fabricant, tranzistorul are, să zicem, $\beta = 450$. Reluați problema precedentă și stabiliți în ce regiune de funcționare se găsește tranzistorul.

P 4.2.3. Stabiliți acum în ce interval trebuie să fie factorul β pentru ca potențialul colectorului să nu se apropie la mai puțin de doi volți de potențialul alimentării și, de asemenea, de potențialul masei. În cutia cu tranzistoare, valorile lui β sînt distribuite cu egală probabilitate între limitele 200 și 450. Dacă dorim să realizăm un amplificator după schema precedentă, cît la sută dintre amplificatoarele realizate trebuie aruncate pentru că nu îndeplinesc condiția asupra potențialului de colector enunțată mai sus ?

P 4.2.4. Utilizînd circuitul din Fig. 4.40, prin comutatorul K dorim să controlăm aprinderea becului, care are valorile nominale de funcționare 0.2 A și 4.5 V. În ceea ce privește tranzistorul, contăm pe un factor β de cel puțin 50. Cît ar trebui să fie valoarea rezistenței din bază pentru ca becul să funcționeze normal ? Dar dacă ne luăm o rezervă, pentru orice eventualitate (de exemplu, cu filamentul rece becul absoarbe mai mult curent decît cel nominal) ?

P 4.2.5. În circuitul din Fig. 4.41, tensiunea sursei ideale E_B a fost ajustată fin astfel încît $V_C = V_{alim}/2$. O încălzire cu 80°C a tranzistorului este echivalentă cu o creștere de aproximativ 18 mV a tensiunii bază emitor (prin

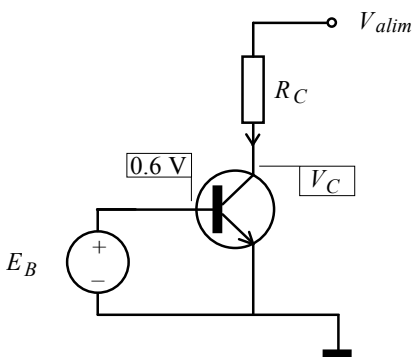


Fig. 4.41 .

modificarea parametrului I_S din ecuația (4.19)). Utilizați ecuația citată și calculați de cîte ori crește curentul de colector. Mai rămîne tranzistorul în regiunea activă ? Este o idee bună să polarizăm tranzistorul în acest mod ?

P 4.2.6. Circuitul de la problema precedentă mai are un dezavantaj. Imaginați-vă că E_B suferă o variație necontrolată, de scurtă durată, de la aproximativ 0.6 V la 1 V. Calculați de cîte ori ar crește curentul de colector dacă rezistența R_C ar fi nulă (sau în locul ei s-ar afla o diodă). Care ar fi consecințele ?

P 4.2.7. În Fig. 4.42 aveți schema unui amplificator cu emitor comun, cu două etaje. Ne vom ocupa numai de polarizare (regimul de curent continuu) așa că nu trebuie să luați în seamă condensatoarele, **ele nu afectează regimul de curent continuu**. Nu le ștergeți de pe schemă, obișnuiți-vă să lucrați cu ele acolo și să le ignorați cînd

vorbiți despre polarizare. Mai întîi stabiliți sensurile curenților și estimați cît de mari ar putea fi (în cea mai defavorabilă situație) curenții de colector.

P 4.2.8. Știind că ambele tranzistoare au factorul de amplificare β mai mare de 100, decideți dacă divizorul din baza lui T_1 poate fi considerat neîncărcat. Calculați apoi, pentru primul tranzistor, potențialul

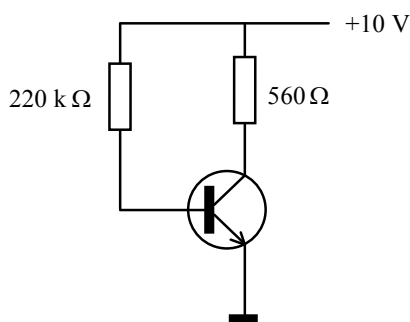


Fig. 4.39 .

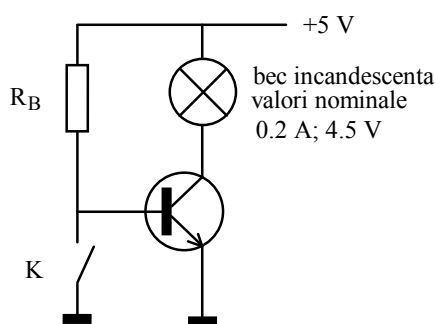


Fig. 4.40.

bazei, potențialul emitorului și curentul de colector. Scrieți aceste valori pe schemă, obișnuiți-vă să lucrați în principal pe schemă și să scrieți cât mai puține ecuații sub formă literală.

P 4.2.9. Pentru determinarea potențialului de colector al lui T_1 ar trebui să cunoaștem curentul de bază al lui T_2 , pe care nu îl știm. Puteți afirma, însă, că el nu este mai mare decât o anumită valoare, pentru că aveți deja o estimare maximală a curentului de colector. Sunteți, astfel, în măsură să aflați și potențialul de colector al primului tranzistor.

P 4.2.10. În sfârșit, determinați, pentru al doilea tranzistor, potențialul de emitor, curentul de colector și potențialul colectorului.

P 4.2.11. Am văzut că putem considera curentul de colector ca fiind controlat de tensiunea bază-emitor, parametrul care depinde de tranzistorul particular pe care îl folosim fiind factorul multiplicativ I_S . Acest fapt are o aplicație importantă în circuite ca cel din Fig. 4.43,, numit **oglină de curent**.

a) Determinați curentul de colector al tranzistorului T_1 (curenții de bază se pot neglija).

b) Considerînd că cele două tranzistoare sunt "**împerecheate**", avînd aceeași valoare pentru parametrul I_S , calculați curentul de colector al tranzistorului T_2 .

c) Rezistența sarcinii se modifică; cu ce este echivalent tranzistorul T_2 ?

d) Care este complianța de tensiune a sursei de curent ?

e) Este aceasta o sursă cu rezistență dinamică mare ? Revedeți caracteristica de ieșire cu $V_{BE} = \text{const.}$

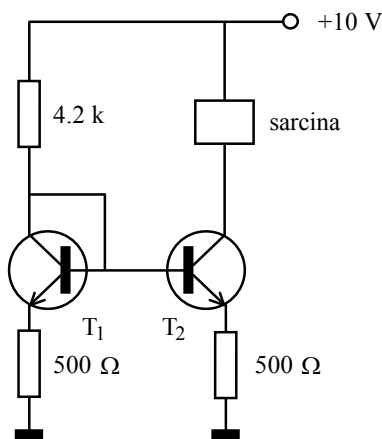


Fig. 4.44.

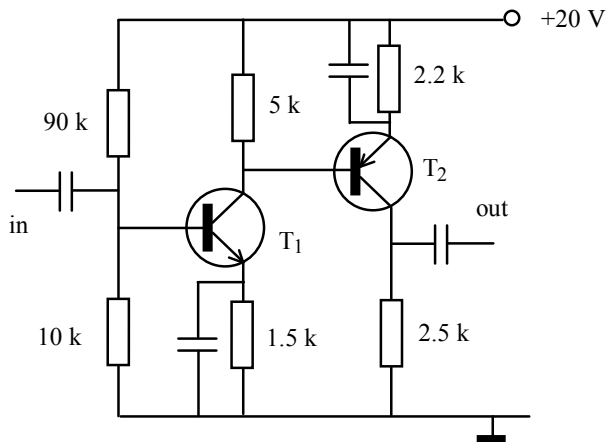


Fig. 4.42.

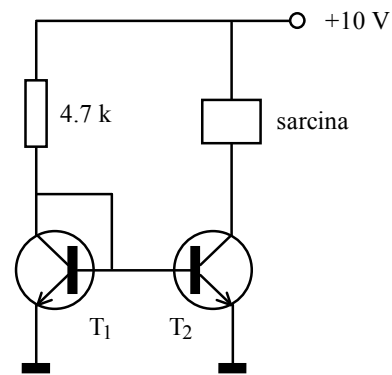


Fig. 4.43.

P 4.2.12. Circuitul din Fig. 4.44 este o oglindă de curent perfecționată.

a) Calculați curentul de colector al tranzistorului T_1 .

b) Determinați curentul de colector al tranzistorului T_2 , considerînd tranzistoarele identice.

c) Estimați cu cât se modifică valoarea curentului de colector al tranzistorului T_2 dacă parametrul său I_S devine de 10 ori mai mare. Formulați o concluzie în privința predictibilității curentului dacă tranzistoarele nu sunt împerecheate.

d) Calculați cât este acum complianța de tensiune a sursei de curent.

e) Ce se întîmplă cu valoarea rezistenței dinamice a sursei de curent ? Indicație: potențialul bazei lui T_2 este menținut constant dar tensiunea bază - emitor nu mai este constantă; ați întîlnit o situație similară atunci cînd am discutat conexiunea cu bază comună.

Lucrare experimentală

Pregătirea experimentelor

Desenați-vă pe caiet circuitul din Fig. 4.45. pe care îl veți utiliza pentru trasarea caracteristicilor statice. Determinați sensurile curenților și polaritățile necesare pentru aparatele de măsură. Realizați apoi circuitul.

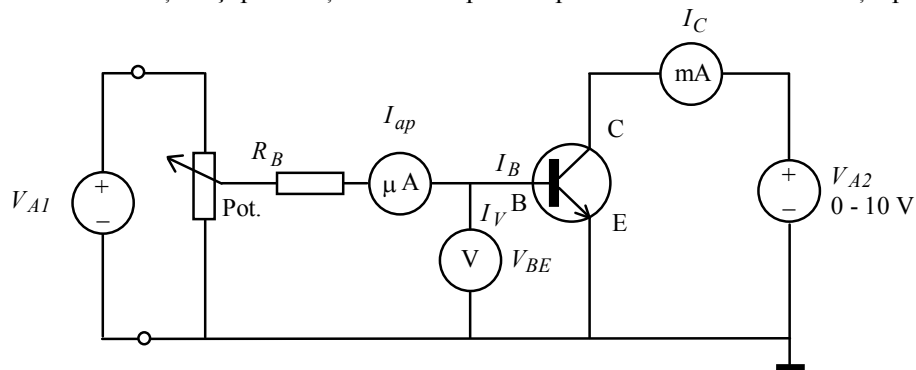


Fig. 4.45 Circuit pentru trasarea caracteristicilor statice.

Sursa V_{A2} , legată direct între colector și emitor, va menține constantă tensiunea V_{CE} iar miliampermetrul va măsura valoarea curentului de colector. Sursa V_{A1} și rezistența R_B vor asigura deschiderea joncțiunii bază-emitor. Curentul de bază poate fi reglat din valoarea acestei surse și, mai fin, cu potențiometrul Pot. montat pe planșetă. Voltmetrul măsoară tensiunea V_{BE} între bază și emitor. Cunoscând tensiunea de deschidere (tranzistorul este cu siliciu), stabiliți scala pe care va trebui utilizat voltmetrul și notați aceasta pe schema desenată.

Pentru determinarea curentului de bază a fost intercalat un microampermetru. El nu măsoară însă curentul de bază ci suma dintre acesta și curentul prin voltmetru

$$I_{ap} = I_B + \frac{V_{BE}}{R_V}; \quad (3)$$

al doilea termen fiind semnificativ, **va trebui să faceți corecția necesară**. Determinați rezistența voltmetrului, decuplînd baza tranzistorului (legînd microampermetrul numai la voltmetru) și ajustînd sursa V_{A1} astfel încît tensiunea pe voltmetru să fie pe scala de 1V, acolo unde voltmetru va fi utilizat. Comparați valoarea aflată cu cea înscrisă pe aparat.

Experimentul 1. Caracteristica de intrare

Caracteristica de intrare este dependența **curentului de bază în funcție de tensiunea bază-emitor**. Ea trebuie trasată menținînd constante anumite condiții de la portul de ieșire. Cum valoarea curentului de colector este controlată de la intrare, se menține constantă tensiunea colector-emitor, care este **parametrul** la care se trasează caracteristica. Modificînd valoarea parametrului, obținem **familia** de caracteristici de intrare.

Vom modifica valoarea curentului de bază între 0 și 100 μA . Presupunînd că tranzistorul are un factor de amplificare de 100, estimați valorile curentului de colector și alegeți o scală adecvată pentru miliampermetrul din colector. Stabiliți la 5 V tensiunea V_{CE} și variați curentul de bază cu ajutorul potențiometrului, observînd deschiderea joncțiunii bază-emitor și faptul că ea controlează curentul de colector. Înainte să trasați caracteristica, determinați aproximativ **tensiunea de deschidere** și factorul β . Pentru a trasa

caracteristica de intrare în scară liniară, determinați 10-12 puncte experimentale, pe cât posibil cu valori I_C echidistante. Măsurați, în același timp, și valorile curentului de colector, trecând datele într-un tabel de forma

V_{BE} (V)	I_{ap} (μ A)	$I_V = V_{BE}/R_V$ (μ A)	$I_B = I_{ap} - I_V$ (μ A)	I_C (mA)	$\beta = I_C/I_B$
0	0	0	0	0	

Completați apoi tabelul, făcând măsurători la valori mult mai mici ale curenților. Utilizați, pentru valorile curentului de colector, secvența 5 mA, 1 mA, 0.5 mA, 0.2 mA, 0.1 mA, 0.05 mA, 0.02 mA, 0.01 mA, 0.005 mA, 0.002 mA, 0.001 mA deoarece aceste valori **vor apărea practic echidistante pe scara logaritmică**.

Modificați acum tensiunea colector-emitor la valoarea 10 V și trasați din nou caracteristica de intrare (numai măsurătorile pentru scară liniară).

Reprezentați, apoi, grafic, în coordonate liniare, **începând de la $V_{BE} = 0$** , caracteristica $I_B = f(V_{BE})$ măsurată la $V_{CE} = 5$ V. Se comportă portul de intrare ca un rezistor? Pentru mici variații în jurul unui punct de funcționare, putem introduce **rezistența dinamică** $r_{be} = \Delta V_{BE} / \Delta I_B$. Calculați valorile ei la curent de colector de 1 mA și 10 mA.

Desenați pe același grafic și caracteristica ridicată la $V_{CE} = 10$ V. Cum depinde comportarea portului de intrare de tensiunea de la portul de ieșire? Caracterizați cantitativ această dependență, alegându-vă o anumită valoare a curentului de bază (de exemplu $I_B = 50 \mu$ A) și măsurând cu cât s-a modificat tensiunea bază-emitor la modificarea tensiunii colector emitor; estimați factorul $\Delta V_{BE} / \Delta V_{CE}$.

Experimentul 2. Caracteristicile de transfer

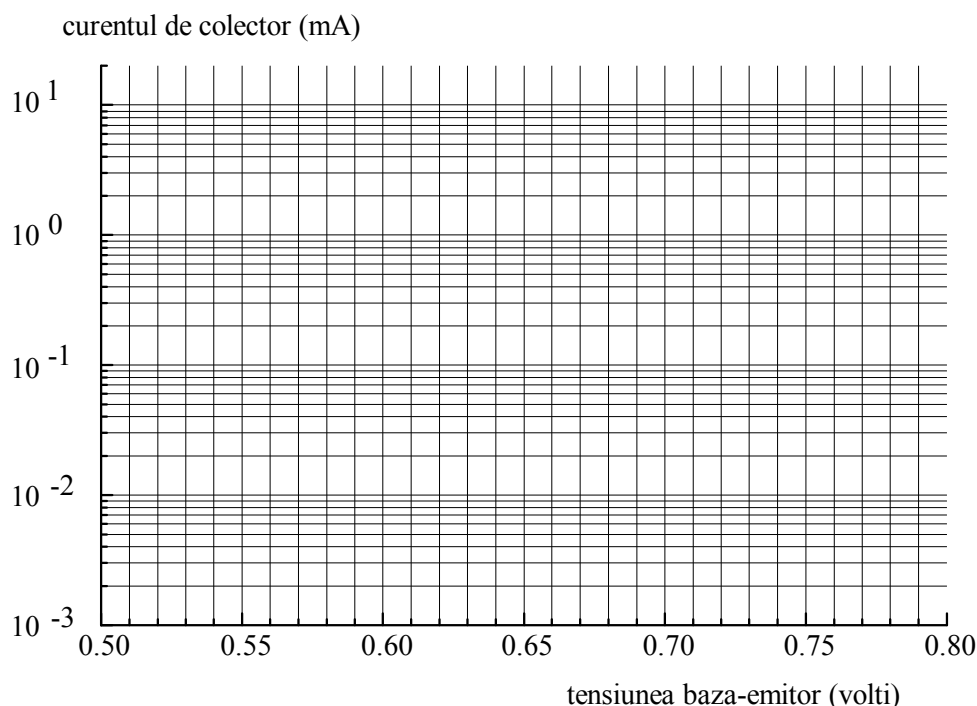
Începeți cu caracteristica $I_C = f(I_B)$. Aveți deja valori măsurate pentru trasarea acestei caracteristici. desenați-o și verificați că ea este apropiată de o linie dreaptă. Este util în practică să cunoaștem cum se abate un tranzistor de la caracteristica ideală. Pentru aceasta, va trebui să calculați valorile factorului β și să le reprezentați în funcție de curentul de colector $\beta = f(I_C)$, deoarece acest curent este cunoscut în aplicații. Utilizați o scară logaritmică pentru curentul de colector. Formulați o concluzie asupra dependenței factorului de amplificare în curent β .

Și pentru dependența $I_C = f(V_{BE})$ aveți deja datele. Mai întâi reprezentați-o în coordonate liniare, cu tensiunea începând de la zero. Răspundeți la întrebarea: este tranzistorul bipolar un element de circuit liniar? Determinați **transconductanța** sa

$$g_m = \Delta I_C / \Delta V_{BE}.$$

la $I_C = 1$ mA și $I_C = 10$ mA și verificați că ea respectă relația $g_m = I_C / V_T$.

Ne așteptăm ca dependența să fie descrisă de relația $I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$. Pentru a verifica aceasta, desenați din nou caracteristica, cu o scară logaritmică pentru curent. (atenție, pe axa logaritmică "etichetele" trebuie să arate valoarea curentului și nu a logaritmului !); alegeți o scară liniară convenabilă pentru tensiune, chiar dacă nu începe de la zero. Ce formă are graficul și ce concluzie puteți trage asupra dependenței $I_C = f(V_{BE})$? Determinați pe ce interval de variație a tensiunii bază-emitor curentul variază cu o decadă (multiplicare cu 10). Din această valoare, determinați valoarea lui V_T și apoi, utilizând un punct de pe grafic, calculați valoarea parametrului I_S .



Desenați pe același grafic și dependența curentului de bază (caracteristica de intrare). Are curentul de bază aceeași comportare ca cel de colector ?

Experimentul 3. Caracteristica de ieșire

Deconectați voltmetrul din baza tranzistorului și legați-l între colector și emitor. Fixați I_B la o anumită valoare (să zicem $10 \mu\text{A}$) și micșorați gradual tensiunea V_{CE} de la 10 V până la 0 V , urmărind evoluția curentului de colector. Dacă valoarea curentului de bază are tendința să se modifice față de cea stabilită la început, reajustați-i valoarea cu ajutorul potențiometrului de pe planșetă.

Refaceți experimentul pentru alte câteva valori ale curentului de bază ($20 \mu\text{A}$, $30 \mu\text{A}$, $40 \mu\text{A}$) și desenați aceste dependențe $I_C = f(V_{CE})|_{I_B = \text{const.}}$ pe același grafic, obținând o parte din familia de caracteristici de ieșire. Estimați din grafic, pentru fiecare din caracteristicile de ieșire, valoarea rezistenței dinamice în regiunea activă. Cum depinde ea de valoarea curentului de colector ? (desenați un grafic) Determinați, în final, valoarea **tensiunii Early**, fie din valoarea rezistenței dinamice, fie prin extrapolarea caracteristicilor.

Experimentul 4. Saturația tranzistorului în circuitele practice

Cînd am trasat caracteristica de ieșire am legat o sursă ideală de tensiune între colector și emitor, sursă care menținea tensiunea între aceste puncte la valoarea dorită de noi. Astfel, intrarea în saturație s-a făcut prin coborîrea tensiunii acestei surse, care continuată, **coboră la zero curentul de colector**. În circuitele practice în care tranzistorul este utilizat (și nu studiat), lucrurile stau cu totul altfel. Diferența esențială este că între sursa V_{A2} și colector se intercalează o rezistență R_C .

Stabiliți la 10 V tensiunea de alimentare V_{A2} și modificați circuitul, cuplînd o rezistență de colector de $10 \text{ k}\Omega$. Calculați cît trebuie să fie valoarea curentului de colector la saturație. Măriți, apoi, valoarea curentului de bază și observați ce se întîmplă cu valoarea curentului de colector și cu tensiunea colector emitor.

După ce V_{CE} coboară sub 1 V, măsurați dependența acestuia în funcție de curentul de bază $V_{CE sat} = f(I_B)$; creșteți curentul de bază pînă la 100 μA .

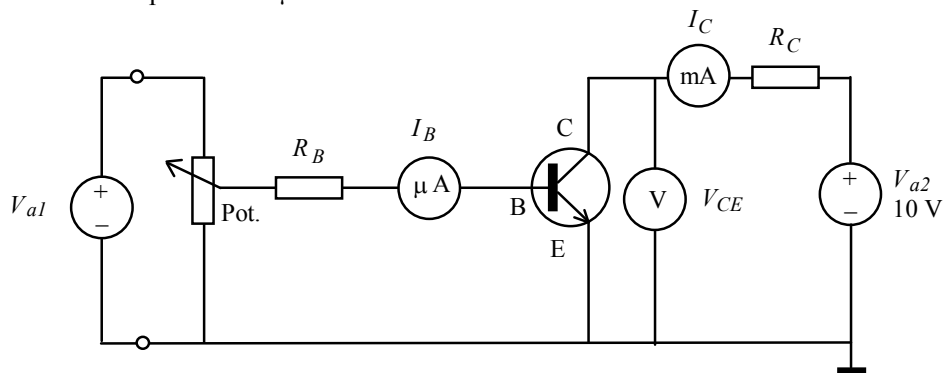
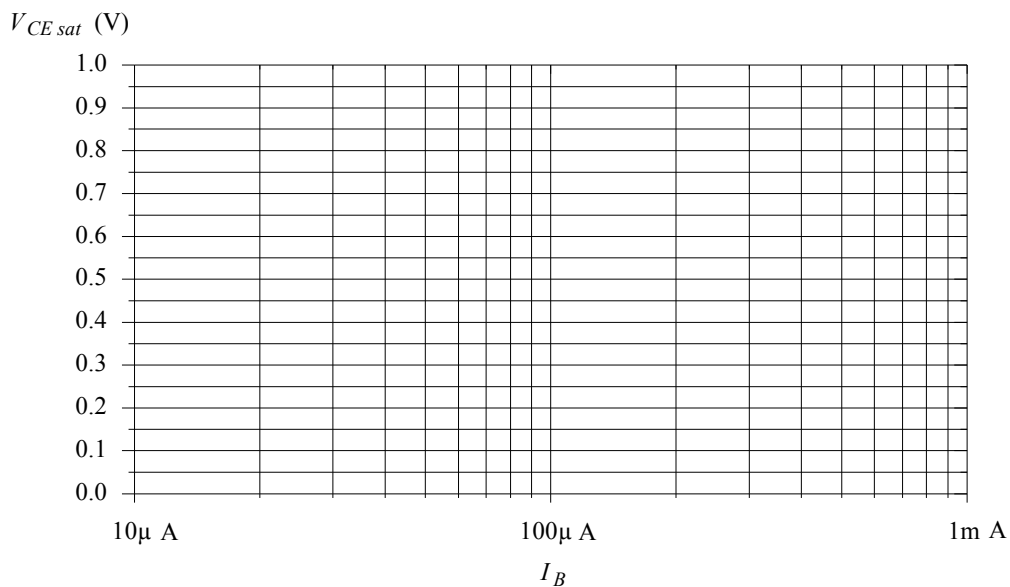


Fig. 4.46.

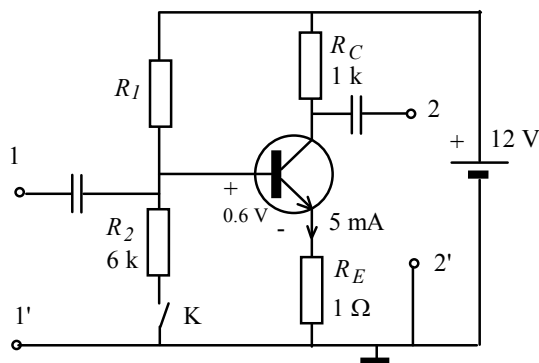
Schimbați apoi rezistența de colector cu una de 1 k Ω . Calculați curentul de colector la care se va satura acum tranzistorul și refaceți măsurătorile $V_{CE sat} = f(I_B)$. De data aceasta măriți curentul de bază pînă la 1 mA. Desenați apoi, pe același grafic, ambele dependențe. Pentru curentul de bază alegeți o scară logaritmică iar pentru tensiunea colector emitor utilizați o scară liniară, între zero și 1 V. Pe fiecare din curbe notați valoarea curentului de colector la care a fost trasată.



Pagini distractive

Am văzut, la sfârșitul secțiunii 4.1, că, la instigarea unor autori "alternativi" ³, Ministerul Educației Naționale îi ordonă bietului tranzistor bipolar (Ordinul nr. 4055 din 26.06.2000 prin care avizează manualul) **să aibă o joncțiune între colector și emitor, să se satureze la valoarea maximă admisă în catalog pentru I_C și, cel mai dureros, să intre în conducție la un scurtcircuit între bază și emitor.** Supliciu la care e supus acest dispozitiv onest nu se oprește, însă, aici. Cum specialiști de calibrul autorilor se pare că se găsesc din belșug pe la noi, suntem delectați cu o bijuterie de problemă, propusă la Olimpiada națională de fizică, 1998. Pentru că al treilea punct al problemei nu cere decât reproducerea unor cuvinte de prin manuale, ne vom referi numai la primele două.

"Într-un etaj de amplificare cu un tranzistor în montaj cu emitorul comun (vezi figura alăturată) este folosit un tranzistor n-p-n. Pentru polarizarea bazei tranzistorului se folosește un divizor compus din rezistoarele R_1 și R_2 . În lipsa semnalului electric de la bornele de intrare 1 - 1', pentru punctul static de funcționare, situat pe porțiunea liniară a caracteristicii de curent $I_C = f(U_{CE})$, se consideră cunoscuți parametrii electrici: $I_E = 5 \text{ mA}$, $I_B = 10 \mu\text{A}$, $U_{BE} = 0.6 \text{ V}$, $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $E = 12 \text{ V}$, $r = 0$, $R_E = 1 \Omega$ ".



Pentru a ușura discuția, ne-am permis să trecem pe schema originală valorile unora dintre "parametrii electrici" (rezistențele și curentul de emitor). Să citim acum cerințele problemei și să le rezolvăm cu ceea ce știm noi despre tranzistoare.

"a) Ce valoare are tensiunea U_{CE} (între colectorul și emitorul tranzistorului) dacă întrerupătorul K este închis și ce valoare va avea curentul din bază când K este deschis, dacă U_{BE} și I_E se mențin practic la aceleași valori."

Sunt, de fapt, două chestiuni. Tensiunea U_{CE} rezultă imediat după ce calculăm căderile de tensiune pe rezistorul din emitor ($5 \text{ mA} \cdot 1 \Omega = 5 \text{ mV}$) și pe cel din colector $U_{RC} = (5 \text{ mA} - 10 \mu\text{A}) \cdot 1 \text{ k}\Omega = 4.99 \text{ V} \approx 5 \text{ V}$. Cum tensiunea de alimentare este de 12 V , între colector și emitor mai rămâne să cadă $12 \text{ V} - 5 \text{ V} - 5 \text{ mV} = 6.995 \text{ V} \approx 7 \text{ V}$.

A doua chestiune se referă la situația în care contactul K se întrerupe (K deschis): ni se cere valoarea curentului din bază, dându-ni-se informația suplimentară că " U_{BE} și I_E se mențin practic la aceleași valori". Știm că tensiunea pe joncțiunea bază-emitor nu se va modifica semnificativ dar autorul problemei îi cere tranzistorului **să-și mențină practic neschimbat curentul de emitor când contactul K se întrerupe !** Că doar de aia este el autor național de probleme.

Ce ar face totuși un tranzistor umil, dacă ar fi lăsat în pace de autorul respectiv ? Observăm, mai întâi că nu știm valoarea rezistenței R_1 ; o putem calcula, deoarece cunoaștem curentul de bază și potențialul bazei. Prin R_2 curge la masă un curent de $0.605 \text{ V} / 6 \text{ k}\Omega = 0.101 \text{ mA}$, iar rezistența R_1 trebuie să furnizeze suplimentar și curentul bazei, deci în total $0.101 \text{ mA} + 0.01 \text{ mA} = 0.111 \text{ mA}$. Cum pe ea cade $12 \text{ V} - 0.605 \text{ V} = 11.4 \text{ V}$, ea are valoarea $11.4 \text{ V} / 0.111 \text{ mA} = 103 \text{ k}\Omega$. Tot din datele problemei putem afla factorul β al tranzistorului, este $5 \text{ mA} / 10 \mu\text{A} + 1 = 501 \approx 500$. Acum avem tot ce ne trebuie. Tensiunea de alimentare cade pe R_1 , pe joncțiunea bază-emitor și pe rezistorul din emitor. Astfel, curentul de bază se obține prin $(12 \text{ V} - 0.6 \text{ V}) / (103 \text{ k}\Omega + 500 \cdot 1 \Omega) = 0.11 \text{ mA}$. Cu un asemenea curent de bază, dacă tranzistorul ar mai rămâne în regiunea activă, curentul de colector ar trebui să fie de 55 mA . Dar rezistența din

³***, "Fizică", Manual pentru clasa a X-a, Ed. Teora Educațional, București, 2000.

colector, de 1 k Ω , nu permite curentului de colector să ajungă decât pe la 12 mA, unde **tranzistorul intră în saturație**. Cum rezistența din emitor este extrem de mică (numai Dumnezeu poate ști de ce a ales-o așa autorul, vom reveni în alt capitol asupra acestui lucru), în regim de saturație emitorul stă pe la 12 mV, potențialul bazei este pe la 0.612 mV și curentul de bază este doar cu o miime mai mic decât cel calculat anterior.

În concluzie, când contactul K este întrerupt, **tranzistorul este saturat** la $I_C \cong 12$ mA iar curentul de bază este de 0.11 mA. **Curentul de emitor este, deci, de 12.1 mA**. Autorul problemei își încordează, însă, mușchii și obligă tranzistorul să mențină curentul de emitor "practic" la aceeași valoare, adică la 5 mA.

Să ne ocupăm acum și de cheștiunea de la punctul următor.

"b) Se aplică un semnal electric de tensiune $u_i = U \sin(\omega t)$, $U \ll E$, la bornele de intrare 1 -1' ale etajului de amplificare (peste valoarea de regim static, se suprapune componenta de tensiune variabilă în timp). Se cere să se exprime dependența tensiunii de la bornele de ieșire 2 -2' în funcție de **valorile instantanee** ale curentului de colector i_C , când K este închis. Condensatoarele lasă semnalul variabil să treacă."

Ne minunăm un pic de faptul că, pentru a pune condiția de semnal mic, autorul problemei compară amplitudinea semnalului cu **tensiunea de alimentare**. Noi știam că numai 18 mV variație a tensiunii bază-emitor dublează curentul de colector și duce tranzistorul aproape de saturație. 18 mV nu înseamnă semnal mic pentru acest amplificator, deși este de peste 600 de ori mai puțin decât tensiunea de alimentare. Nu merită să ne minunăm, totuși, prea tare; față de menținerea constantă a lui I_E de la punctul precedent această este o șotie nevinovată. Ne mai întrebăm numai de ce e nevoie să știm forma semnalului de intrare dacă dependența cerută trebuie exprimată în funcție "de valorile instantanee ale curentului de colector". Să răspundem, totuși la întrebarea problemei. Considerînd variațiile de la regimul de repaus, întotdeauna $\Delta V_C = -R_C \Delta I_C$; dacă variațiile sunt de frecvență suficient de mare, la ieșirea 2 -2' **tensiunea instantanee** va fi egală în orice moment cu abaterea instantanee a potențialului colectorului de la regimul de repaus $u_{2-2'} = -R_C \Delta I_C$. Aici $\Delta I_C = i_C$ este **abaterea instantanee a curentului de colector de la valoarea de repaus**. Dacă dorm să apară valoarea instantanee a curentului de colector i_C , va trebui să o punem sub forma $u_{2-2'} = -R_C [i_C(t) - I_{CQ}]$ unde I_{CQ} este curentul de colector în repaus.

Și acum să încetăm comentariile și să admirăm rezolvarea dată de autorii manualului:

$$\text{Rezolvare. a) } I_2 = \frac{U_{BE} + R_E I_E}{R_2} \approx 10^{-4} \text{ A}; I_1 = I_2 + I_B = 110 \mu\text{A}; E = R_1 I_1 + R_2 I_2 \Rightarrow R_1 = 103,6 \text{ k}\Omega;$$

$$I_C + I_B = I_E \Rightarrow I_C \approx 5 \text{ mA}; U_{CE} = E - R_C I_C - R_E I_E \approx 7 \text{ V. Tranzistorul este ușor în conducție deoarece } U_{R2} = U_{BE} + U_{RE} \approx U_{BE} = 0,66 \text{ V. Dacă } R'_2 \rightarrow \infty \text{ (echivalent cu K deschis), atunci } I'_1 = I'_B \Rightarrow E = R_1 I'_B + U_{BE} + R_E I_E, \text{ de unde } I'_B \approx 11,4 \text{ mA.}$$

b) Considerăm două momente de timp, t_1 și t_2 , foarte apropiate, când la intrarea amplificatorului, între bornele 1 - 1', se aplică un semnal (peste valorile de regim static) pentru care sunt satisfăcute ecuațiile de

$$\text{regim dinamic: } \begin{cases} E = R_C(I_C + i_{C,1}) + u_{CE,1} + R_E(I_E + i_{E,1}) \\ E = R_C(I_C + i_{C,2}) + u_{CE,2} + R_E(I_E + i_{E,2}) \end{cases}$$

Deoarece curenții de emitor și curenții de colector sunt de același ordin de mărime:

$$\alpha = \frac{i_{C2} - i_{C1}}{i_{E2} - i_{E1}} \approx 0,9; i_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} i_B = \beta i_B \Rightarrow \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \text{ și } R_E \ll R_C; \text{ ultimul termen din cele două ecuații}$$

ale sistemului se poate neglija față de ceilalți termeni sau se reduce dacă scădem cele două ecuații membru cu membru. Obținem: $R_C \Delta i_C \approx -\Delta u_{CE} \Rightarrow u_{2-2'} = -R_C i_C$.

Tranzistorul este "ușor în conducție" și nu se saturează la întreruperea lui K pentru că, după știința autorilor manualului, aceasta are loc la valoarea maximă admisă a lui I_C . Pentru calculul tensiunii de ieșire sunt scrise o mulțime de relații complet inutile. Un lucru extraordinar ne luminează spre sfârșit: autorii au aflat că intensitățile curenților de emitor și de colector sunt "de același ordin de mărime".