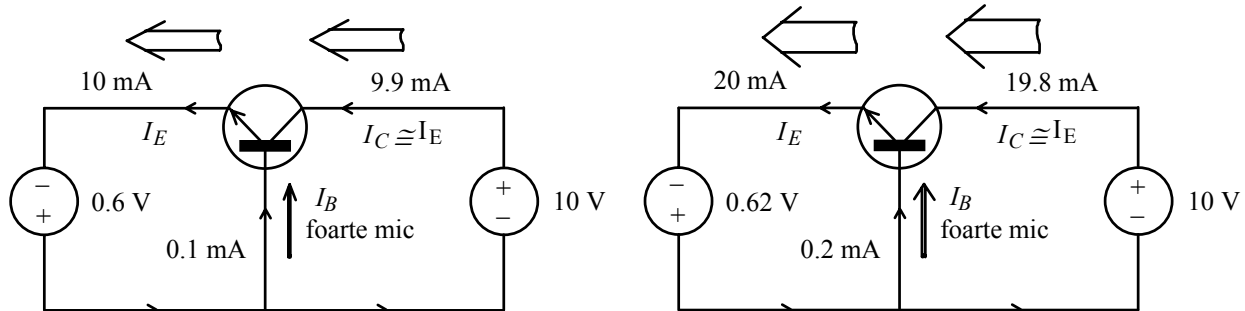


Tranzistoare bipolare - caracteristici statice

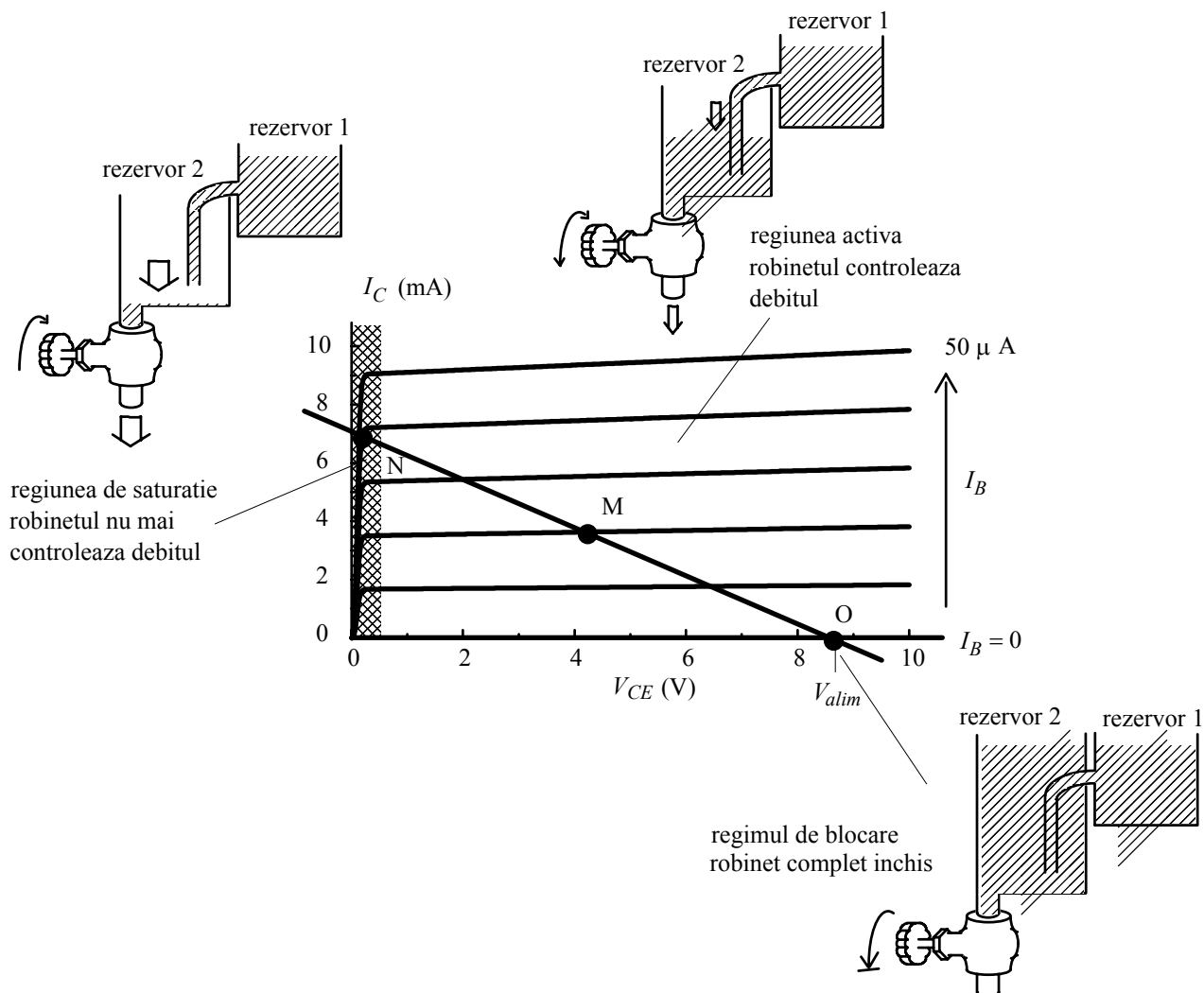


4.1. Conexiunea bază comună 83

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

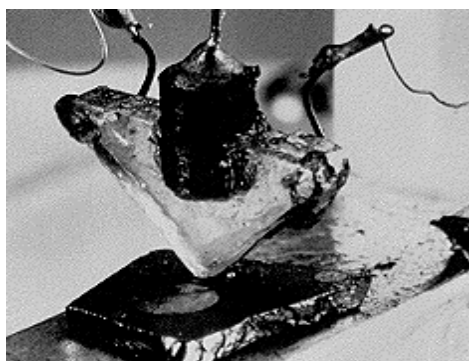
4.1. Conexiunea bază comună

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).

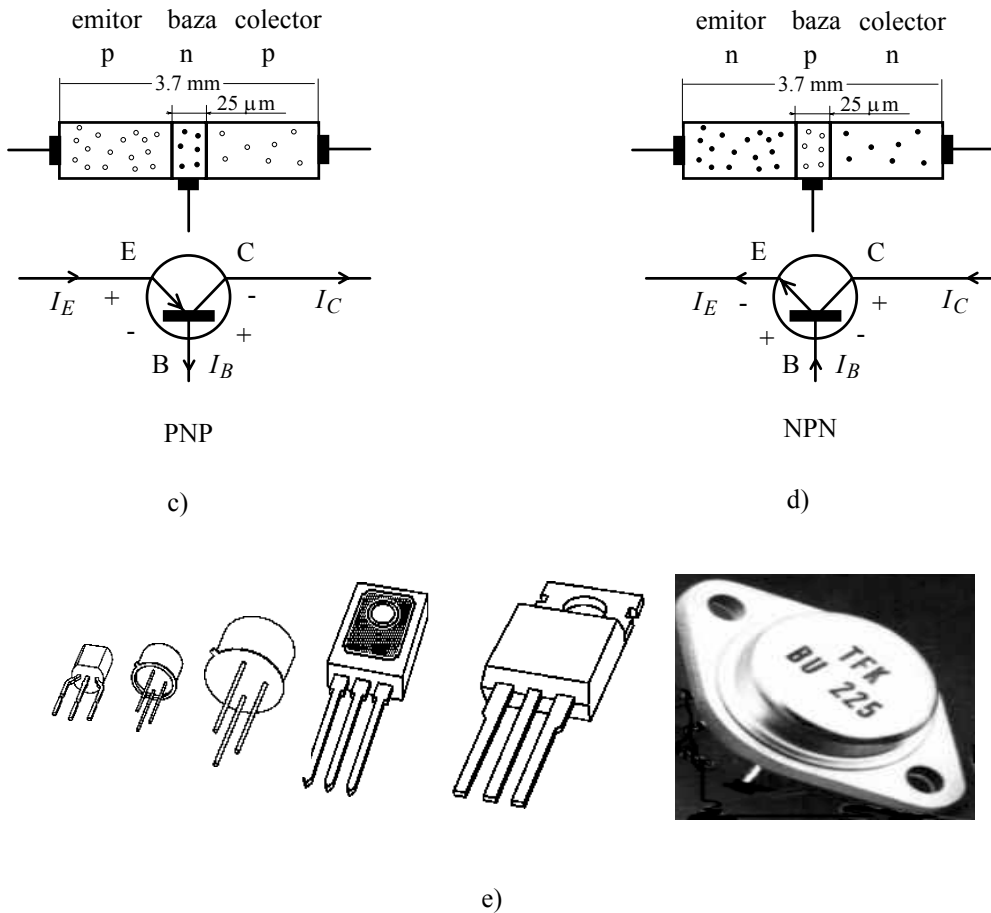


Fig. 4.1 c), d) și e). Tranzistoare bipolare, structură, simboluri și câteva dintre tipurile de capsule utilizate.

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.

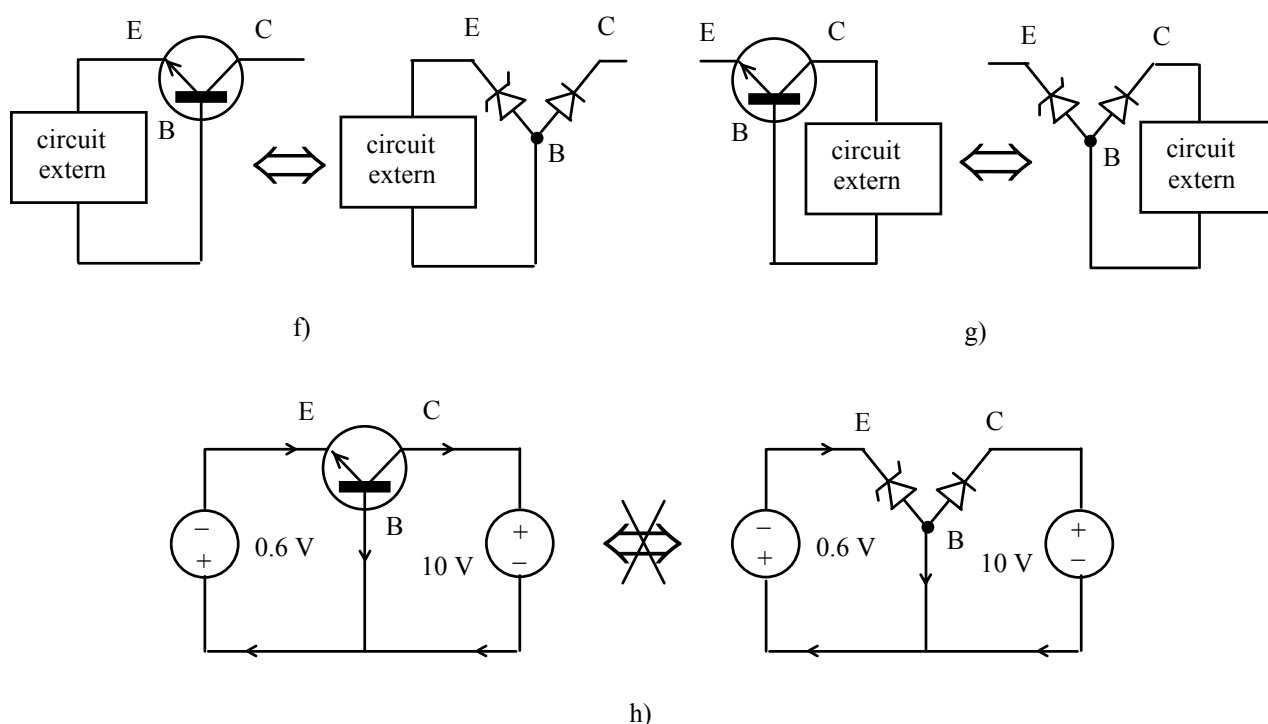


Fig. 4.1 f), g) și h). Tranzistoare bipolare: echivalența cu două diode dacă numai una din joncțiuni este polarizată (e, f) și absența acestei echivalențe când ambele joncțiuni sunt polarizate (g).

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**.

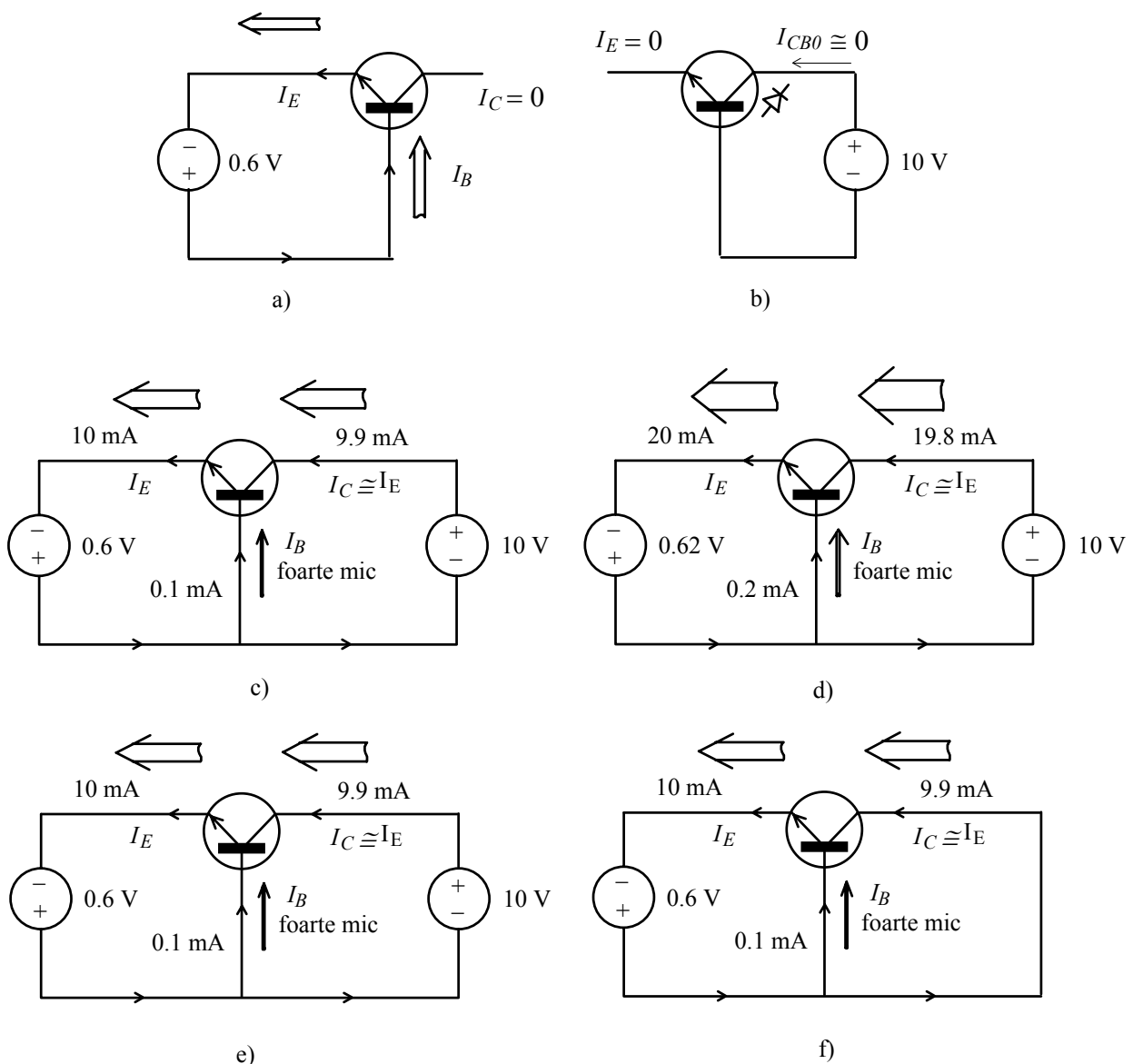


Fig. 4.2. Efectul de tranzistor.

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

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

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 mărimea 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 înfilnească 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

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} \quad (4.2)$$

unde constanta α se numește amplificarea în curent (în conexiunea bază comună) 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.

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 .

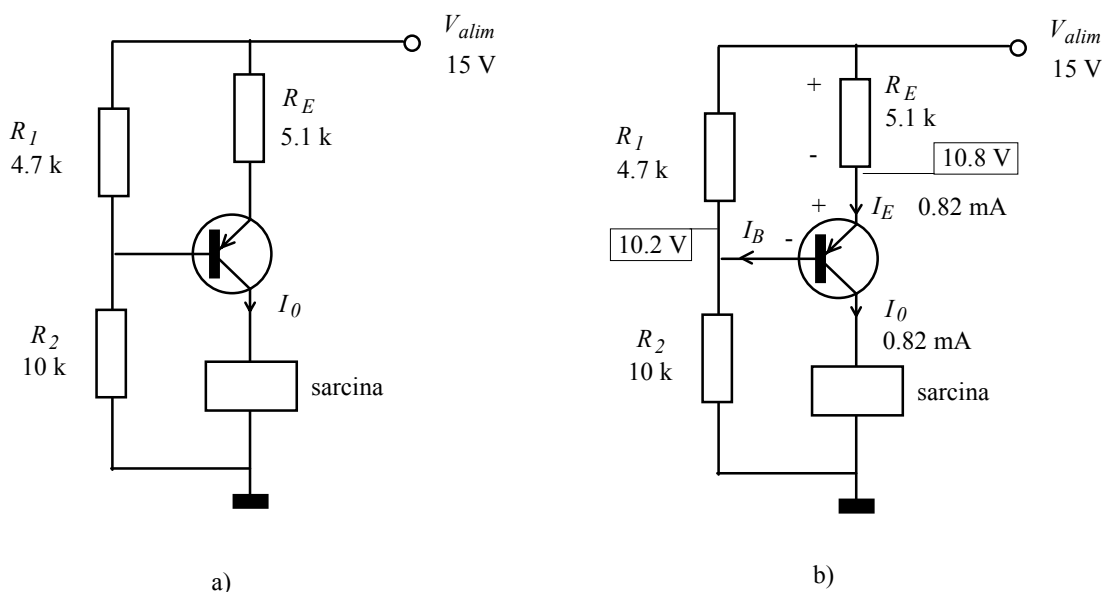


Fig. 4.13. Sursă de curent.

- 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 întîi 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, $I_B < 3 \text{ mA} / 100 = 0.03 \text{ mA} = 30 \mu\text{A}$. 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 aplicând 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 decât să aplicăm legea lui Ohm pe rezistența R_E

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

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 încât 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, atât calculele cât 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

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

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

În aceste condiții, curentul de bază ajunge 0.05 mA, de 20 de ori mai mic decât 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, ținând 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 .

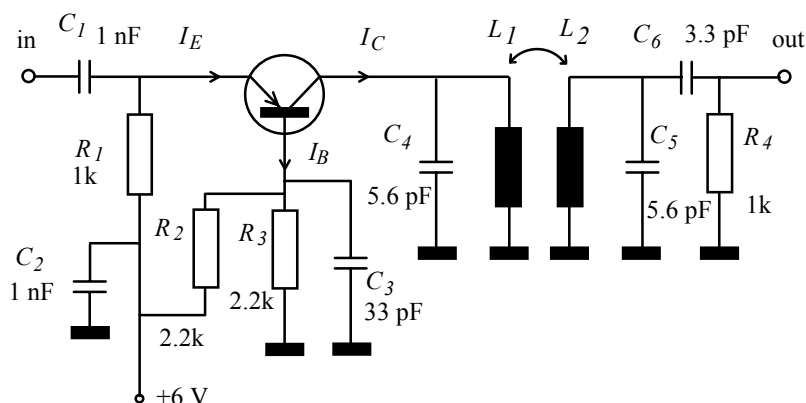


Fig. 4.14. Amplificator de antenă TV.

- 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 +3V (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, $I_C = 2.4\text{mA}$.

Întrucât 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 atât ne-am înșelat când am calculat potențialul bazei.

În ceea ce privește rezistența dinamică a portului emitor-bază $r_{QEB} = dV_{EB} / dI_E$, calculată **în jurul punctului de funcționare determinat anterior** $I_E = 2.4\text{mA}$, ea rezultă simplu din formula $r_{QEB} = V_T / I_E = 25\text{mV} / 2.4\text{mA} \cong 10\Omega$. 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 2.4 V, 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 **repaus**. Când 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 scurtecircuitează, **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 tranzistorele se găsesc în regiunea normală de funcționare, completați schema cu polaritatea surseei de alimentare și sensurile curenților prin terminalele tranzistoarelor. De ce tip sunt tranzistorele ?

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.

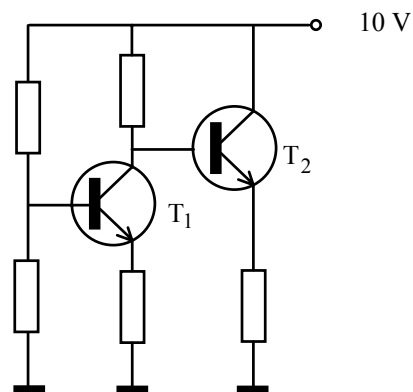
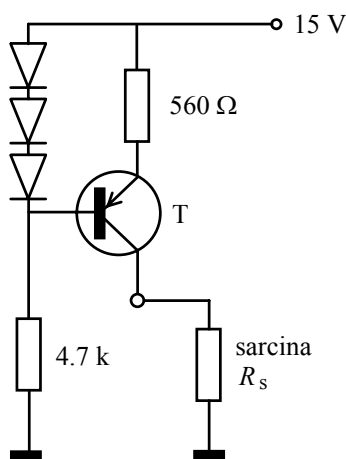
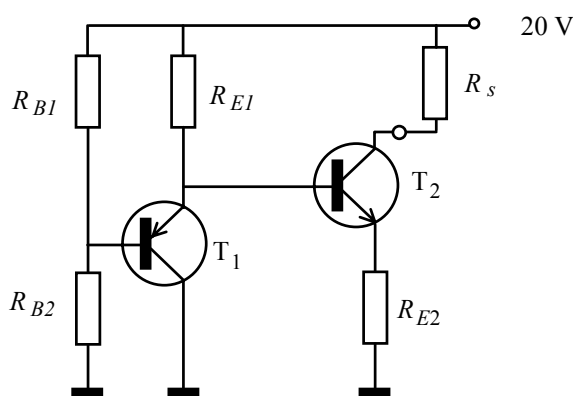


Fig. 4.15.



a)



b)

Fig. 4.16.

P 4.1.3 Și, în sfârșit, ultima schemă, care trebuie completată cu polaritatea surseei 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} . Aproximarea 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 ? Considerând 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.

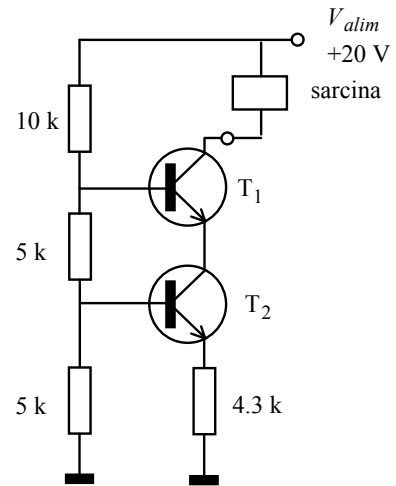


Fig. 4.17.

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 competentă 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** :

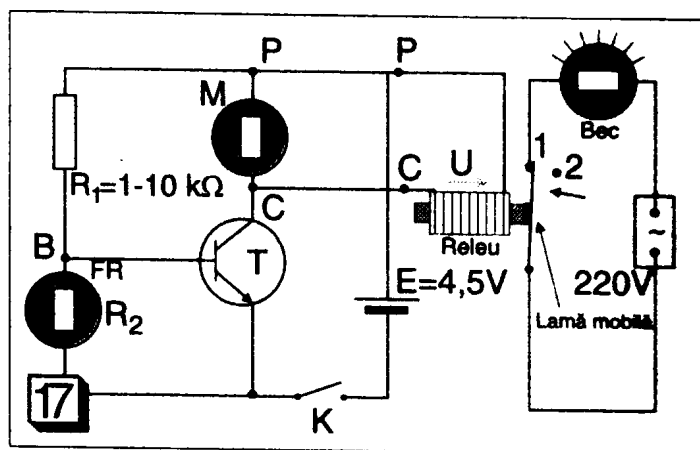
"În simbolul tranzistorului, săgeata indică sensul conducției în prima joncțiune (E-B), în montaj cu emitorul comun"

Ce trebuie să facă simbolul în celelalte conexiuni este treaba lui, ori săgeata dispăre, 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 exemplul, 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.

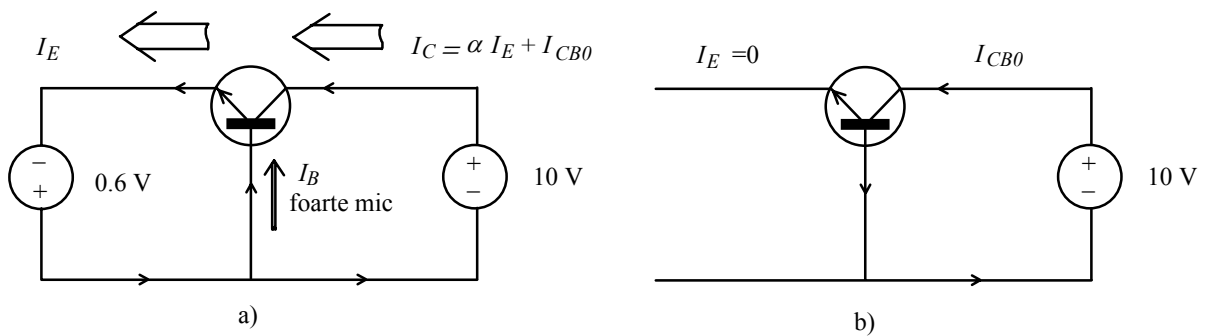


Fig. 4.20. Curenții în regiunea activă normală (a) și semnificația curentului rezidual I_{CB0} .

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.

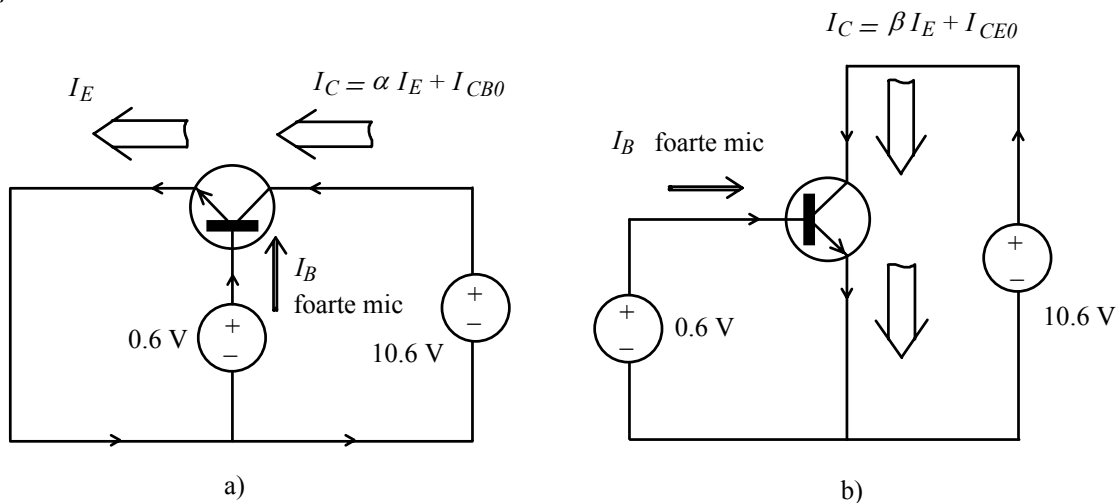


Fig. 4.21. Conexiunea cu emitor comun.

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 decât 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;

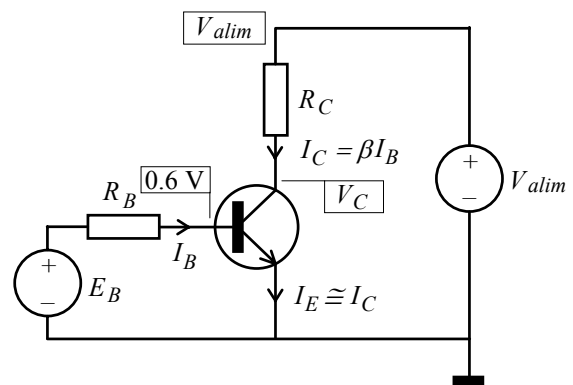


Fig. 4.22. Tranzistorul NPN într-un circuit practică cu emitorul comun.

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).

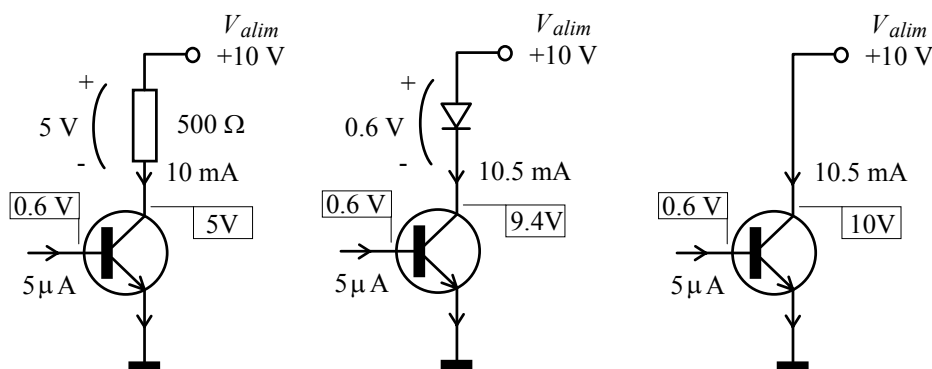


Fig. 4.23. În regiunea activă normală curentul de colector este practic constant (egal cu βI_B) indiferent de dispozitivul conectat în colector.

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 conductă ce leagă rezervoarele este aproximativ proporțional cu diferența de nivel în cele două rezervoare (echivalentul legii lui Ohm pe rezistența din colector).

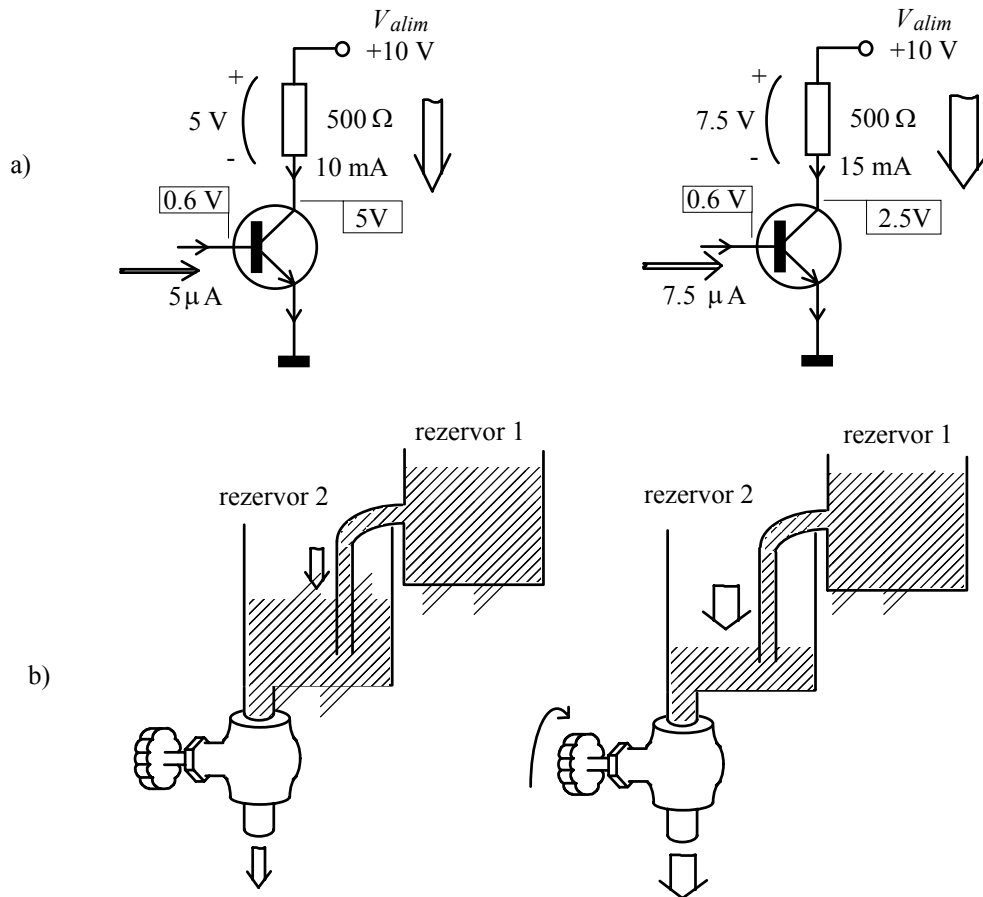


Fig. 4.24. Creșterea curentului de bază deschide mai mult tranzistorul, provocând creșterea curentului de colector și coborârea potențialului colectorului.

2.E. Saturația tranzistorului

Pentru trasarea caracteristicilor am legat între colector și emitor o sursă ideală de tensiune care să mențină între aceste puncte tensiunea la valoarea dorită de noi. Astfel, intrarea în saturație s-a făcut prin coborârea tensiunii acestei surse care, continuată,, **coborâ la zero curentul de colector.**

În circuitele practice în care tranzistorul este utilizat (și nu studiat, cum am făcut noi pînă acum), lucrurile stau cu totul altfel, așa cum se vede în Fig. 4.32. Diferența esențială este că sursa V_{alim} nu mai menține constantă tensiunea între colector și emitor ci potențialul "în amonte" de rezistența R_C . Astfel, tensiunea colector emitor este dictată de legea lui Ohm

$$V_{CE} = V_C = V_{alim} - I_C R_C. \quad (4.26)$$

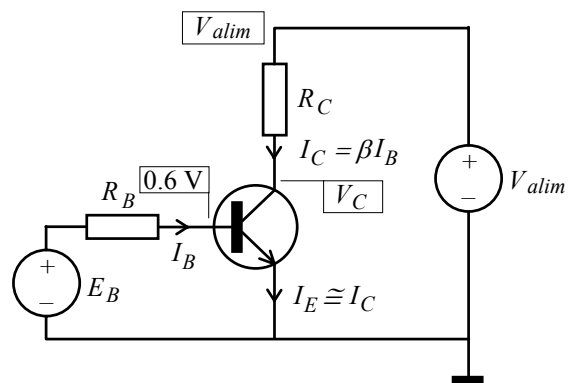


Fig. 4.32. Circuit cu emitor comun.

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.

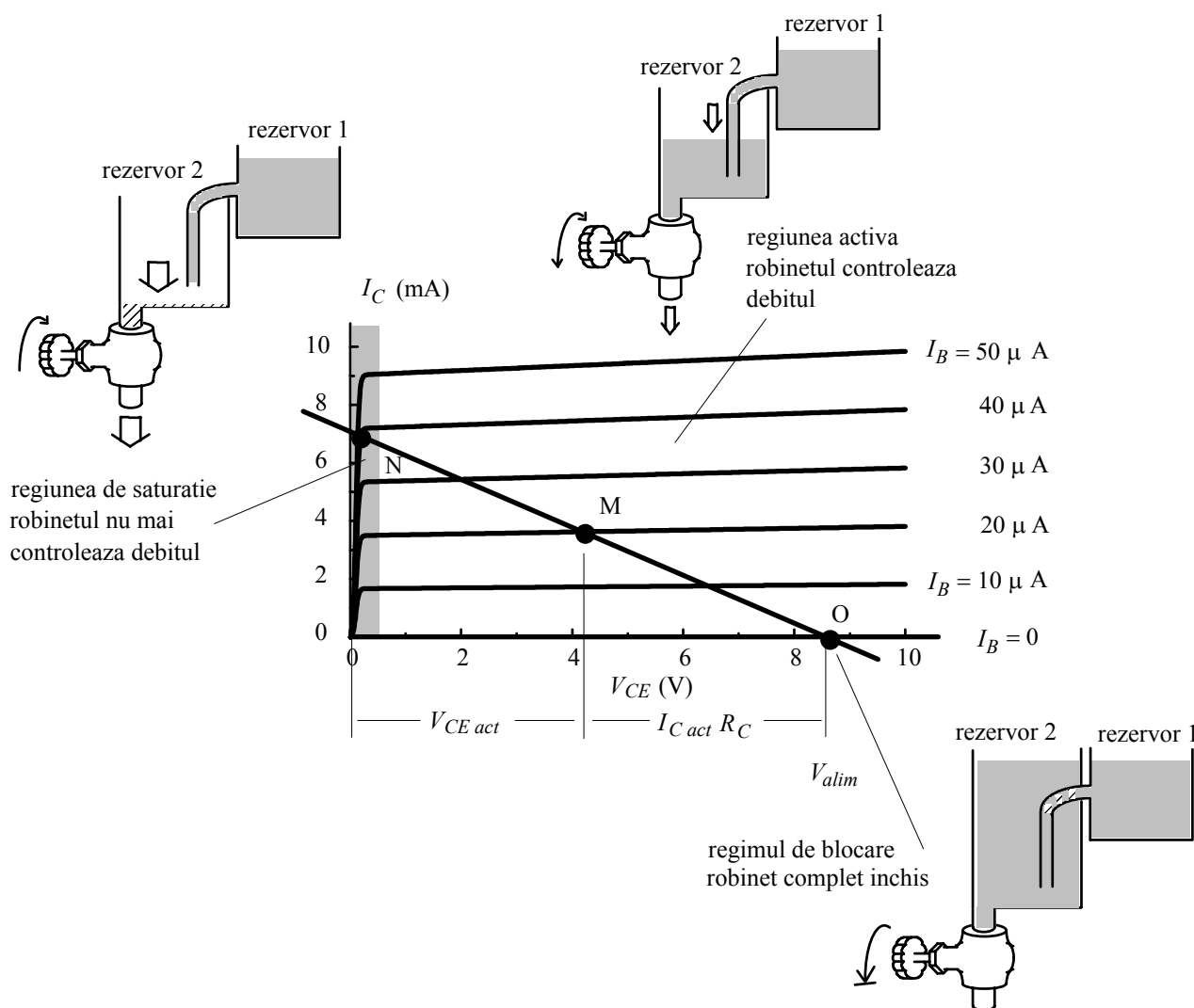


Fig. 4. 33. Regimurile de funcționare a tranzistorului.

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, împrăștiilor tehnologice a curentului I_S).

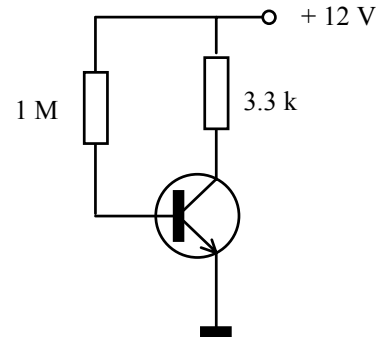


Fig. 4.35.

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

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

de aici calculăm imediat curentul de colector

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

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

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

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 $V_C = -32\text{ V}$** 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 $I_{C\ sat}$ 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 întîmplă 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

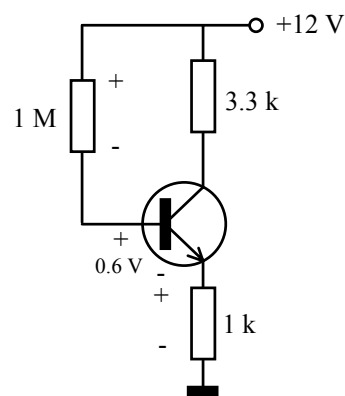


Fig. 4.36.

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

care conduce la

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

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.

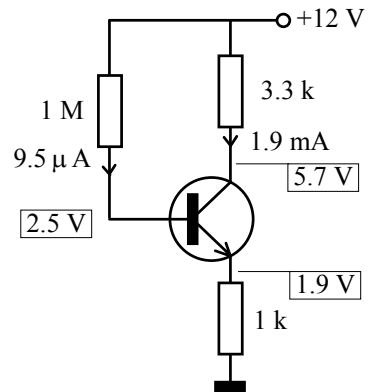


Fig. 4.37.

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

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

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 $\beta = 200$,

a) decideți dacă divizorul rezistiv din bază poate fi considerat neîncărcat și calculați punctul de static funcționare.

b) 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 % putem considera că divizorul este operat în gol. Prezența căderii de tensiune pe joncțiunea bază-emitor

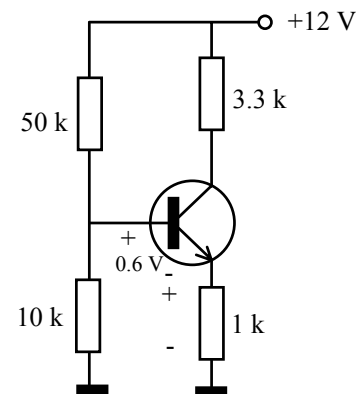


Fig. 4.38.

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 decât 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 circuitelor 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 împrăștierii 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 8°C a tranzistorului este echivalentă cu o creștere de aproximativ 18 mV a tensiunii bază emitor (prin

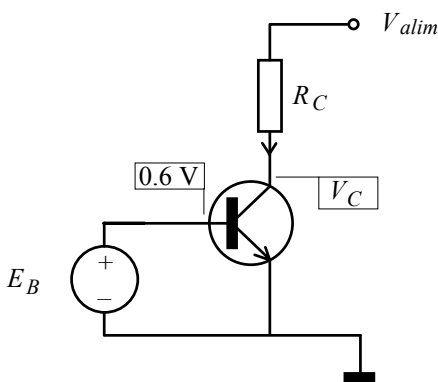


Fig. 4.41 .

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

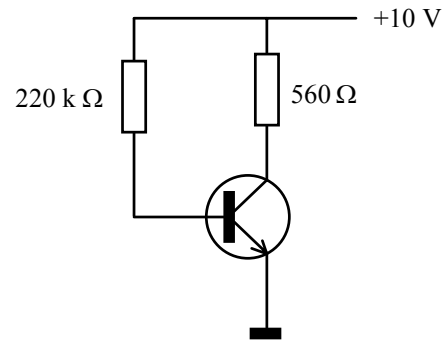


Fig. 4.39 .

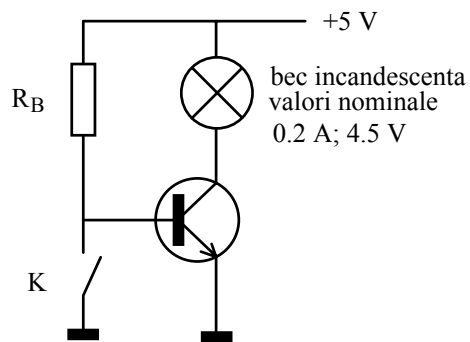


Fig. 4.40.

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 $V_{BE} = \text{cons.}$

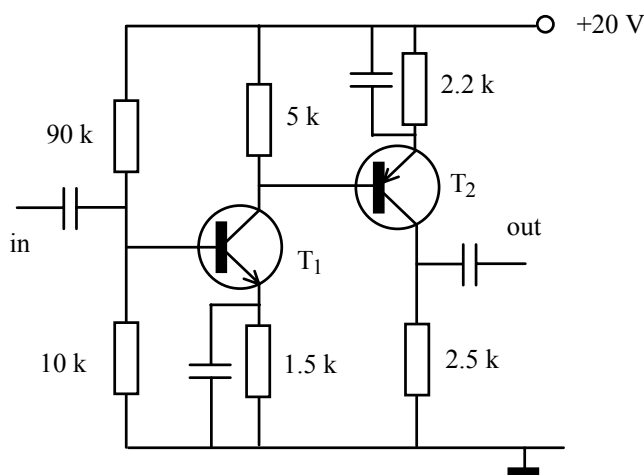


Fig. 4.42.

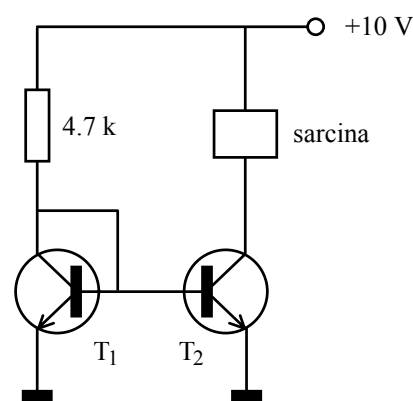


Fig. 4.43.

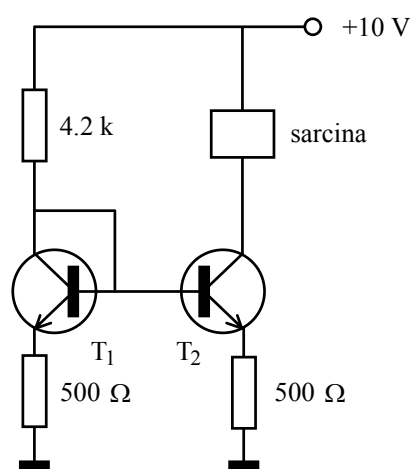


Fig. 4.44.

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.

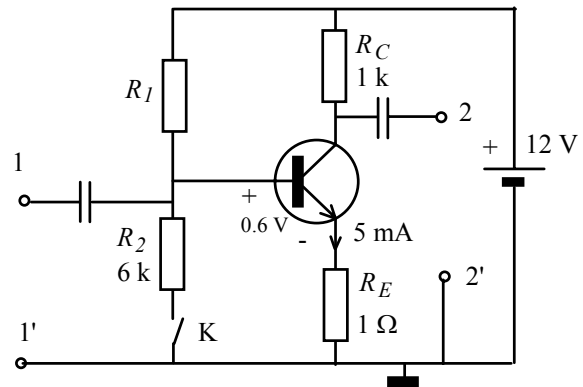
d) Calculați cât este acum complianța de tensiune a sursei de curent.

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.

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 26.06.200 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 $U_{RC} = (5 \text{ mA} - 10 \mu\text{A}) \cdot 1 \text{ k}\Omega = 4.99 \text{ V} \cong 5 \text{ V}$. Cum tensiunea de alimentare este de 12 V , între colector și emitor mai rămâne să cadă $12 \text{ V} - 5 \text{ V} - 5 \text{ mV} = 6.995 \text{ V} \cong 7 \text{ V}$.

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 $5 \text{ mA} / 10 \mu\text{A} + 1 = 501 \cong 500$. 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 colector, de $1 \text{ k}\Omega$, nu permite curentului de colector să ajungă decât pe la 12 mA , unde

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

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 $I_C \cong 12 \text{ mA}$ 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 chestiunea 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:

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

$$I_C + I_B = I_E \Rightarrow I_C = 5 \text{ mA}; U_{CE} = E - R_C I_C - R_E I_E = 7 \text{ V. Tranzistorul este ușor în conducție deoarece } U_{R2} = U_{BE} + U_{RE} = U_{BB} = 0,66 \text{ V. Dacă } R_2' \rightarrow \infty \text{ (echivalent cu K deschis), atunci } I_1' = I_B' \Rightarrow E = R_1 I_B' + U_{BE} + R_E I_E, \text{ de unde } I_B' = 11,4 \text{ mA.}$$

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

$$\text{regim dinamic: } \begin{cases} E = R_C(I_C + i_{C1}) + u_{CE1} + R_E(I_E + i_{E1}) \\ E = R_C(I_C + i_{C2}) + u_{CE2} + R_E(I_E + i_{E2}) \end{cases}$$

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: $R_C \Delta i_C = -\Delta u_{CE} \Rightarrow u_{2-2'} = -R_C i_C$.

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".