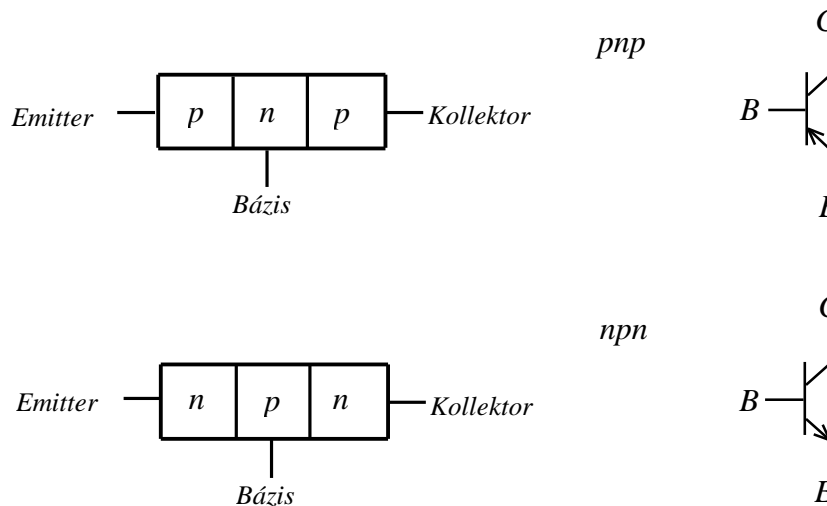


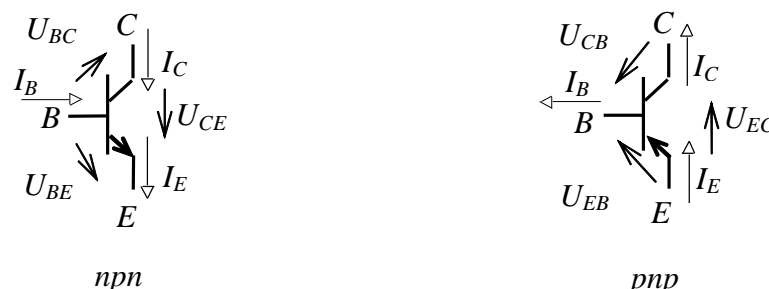
3.3. BIPOLÁRIS TRANZISZTOROK

A tranzisztor két pn átmenetből áll, ahol az egyik réteg közös. A közös réteg vagy n , vagy p típusúan szennyezett, ezért a tranzisztor szennyezési sorrendje lehet pnp vagy nnp . Minden réteghez tartozik egy-egy kivezetés: a közös réteg a bázis, amelynek egyik oldalán az emitter, a másikon pedig a kollektor van. A tranzisztor szerkezeti sémája és jelképi jelölése a 3.33. ábrán látható.



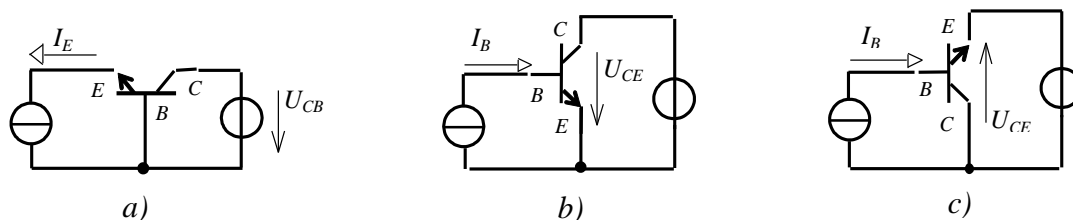
3.33. ábra. A tranzisztor szerkezeti sémája és jelképi jelölése

A közös bázisréteg rendkívül vékony, és mivel mindkét pn átmenet közös eleme, ezért az átmenetek között jelentős kölcsönhatás lép fel: a bázis-emitter átmenet áramával a kollektor és az emitter között folyó áram befolyásolható. A rétegtranzisztorban az elektronok és a lyukak egyaránt részt vesznek az áramvezetésben, erre utal a bipoláris tranzisztor elnevezés. Az nnp és a pnp struktúrájú tranzisztorok működése lényegében nem tér el egymástól, csupán az egyenfeszültségek polaritása, illetve az egyenáramok iránya ellentétes (3.34. ábra). A következőkben csak a gyakoribb nnp típusú tranziszttal foglalkozunk.



3.34. ábra. Az nnp és a pnp típusú tranzisztor feszültség- és áramirányai közös emitterű kapcsolásban

A tranzisztor működtetéséhez két tápforrás szükséges, ezért aszerint, hogy e két tápforrásnak melyik elektródán van a közös pontja, alapvetően három kapcsolási lehetőség van: a közös bázisú, a közös emitterű és a közös kollektorú kapcsolás (3.35. ábra). Ezen alkalmazások közül a közös emitterű a legjelentősebb, leggyakrabban alkalmazott kapcsolás, ezért a tranzisztor működését közös emitterű alapkapcsolást feltételezve tárgyaljuk.



3.35. ábra. Az npn tranzisztor elvi alapkapcsolásai: a) közös bázisú, b) közös emitterű, c) közös kollektorú kapcsolás

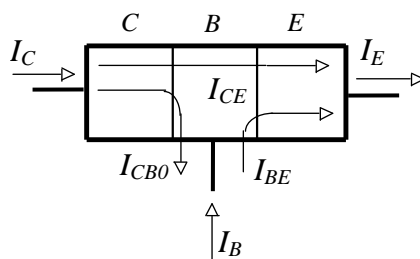
A tranzisztor folyamatosan vezérelhető elektronikus eszköz, amely – egy tápforrás energiájának hasznosításával – teljesítményerősítésre alkalmas. A közös emitterű kapcsolásban az I_B bázisáram a vezérlő, az I_C kollektoráram pedig a vezérelt áram.

A tranzisztor üzemmódjai a külső feszültségek polaritása szerint

A tranzisztor egyes pn átmeneteire kapcsolt feszültségek polaritásától függően négy alapvető működési mód különböztethető meg.

a) *Normál aktív működési mód*

A tranzisztor *normál aktív tartományban* működik, ha a bázis-emitter átmenet igénybevétele nyitóirányú, a bázis-kollektor átmenet pedig záróirányú. A kialakuló áramok a 3.36. ábrán láthatók.



3.36. ábra. A tranzisztor áramai a normál aktív tartományban

Az $U_{BE} > 0$ és az $U_{BC} < 0$ feszültségek hatására a bázis-kollektor átmeneten I_{CB0} záróirányú áram, a bázis-emitter átmeneten pedig I_{BE} nyitóirányú áram folyik. A kis értékű bázis-emitter áram hatására a kollektor-emitter között nagy I_{CE} áram indul (tranzisztor hatás).

E két áram között az

$$I_{CE} = B I_{BE} \quad (3.48)$$

összefüggés teremt kapcsolatot, ahol B a közös emitterű egyenáramú (nagyjelű) áramerősítési tényező, amelynek szokásos értéke: $B = 25-1500$.

A bevezetett jelölésekkel a bázis elektróda árama az

$$I_B = I_{BE} - I_{CB0} \quad (3.49)$$

összefüggéssel, a kollektor elektróda árama az

$$I_C = I_{CB0} + B I_{BE} \quad (3.50)$$

összefüggéssel, az emitter elektróda árama pedig az

$$I_E = I_{BE} + B I_{BE} = (B + 1) I_{BE} \quad (3.51)$$

összefüggéssel határozható meg. A csomóponti törvény szerint:

$$I_E = I_C + I_B. \quad (3.52)$$

A bázis-emitter átmenet árama a (2.20) összefüggés alapján:

$$I_{BE} = I_B + I_{CB0}. \quad (3.53)$$

Ezt az összefüggést felhasználva a kollektoráram

$$I_C = I_{CB0} + B(I_B + I_{CB0}) = B I_B + (B+1) I_{CB0}, \quad (3.54)$$

az emitteráram pedig

$$I_E = (B+1)(I_B + I_{CB0}) = (B+1) I_B + (B+1) I_{CB0}. \quad (3.55)$$

A kollektor-bázis záróirányú áram általában elhanyagolható, ekkor a kollektoráram

$$I_C = B I_B, \quad (3.56)$$

az emitteráram pedig

$$I_E = (B + 1) I_B \quad (3.57)$$

alakú. A két áram hányadosa az A közös bázisú egyenáramú (nagyjelű) áramerősítési tényező:

$$A = \frac{I_C}{I_E} = \frac{B}{B + 1}. \quad (3.58)$$

A normál aktív tartomány jellemzője, hogy a bázis-emitter átmenet kis értékű áramának hatására a kollektor-emitter átmeneten nagy értékű áram folyik.

b) Inverz aktív működési mód

A kollektor és az emitter szerepét felcserélve a tranzisztor inverz aktív tartományban működik. Ekkor a bázis-emitter átmenetre $U_{BE} < 0$ záróirányú, a kollektor-bázis átmenetre pedig $U_{CB} > 0$ nyitóirányú feszültség jut. A normál aktív tartomány mintájára definiált inverz áramerősítési tényezők a tranzisztor aszimmetrikus felépítése miatt lényegesen kisebbek, ezért ennek a tartománynak kicsi a jelentősége.

c) Telítési mód

Ebben az üzemmódban a tranzisztor mindkét átmenetére nyitóirányú feszültség jut, tehát $U_{BE} > 0$ és $U_{BC} > 0$. A nyitott pn átmenetek kis ellenállása miatt az áramot főképp a külső hálózat határozza meg. A telítési tartomány határa az $U_{BC} = 0$ értékhez tartozik, ekkor $U_{BE} = U_{CE}$. A telítéshez tartozó kollektor-emitter feszültséget U_{CEsat} maradékfeszültségnek, másképpen szaturációs feszültségnek nevezik. Értéke: 0,1-3V.

d) Zárási mód

Ha mindkét pn átmenetre $U_{BE} < 0$ és $U_{BC} < 0$ záróirányú feszültség jut, a tranzisztor közelítőleg szakadásként viselkedik, a pn átmeneteken záróirányú áramok folynak.

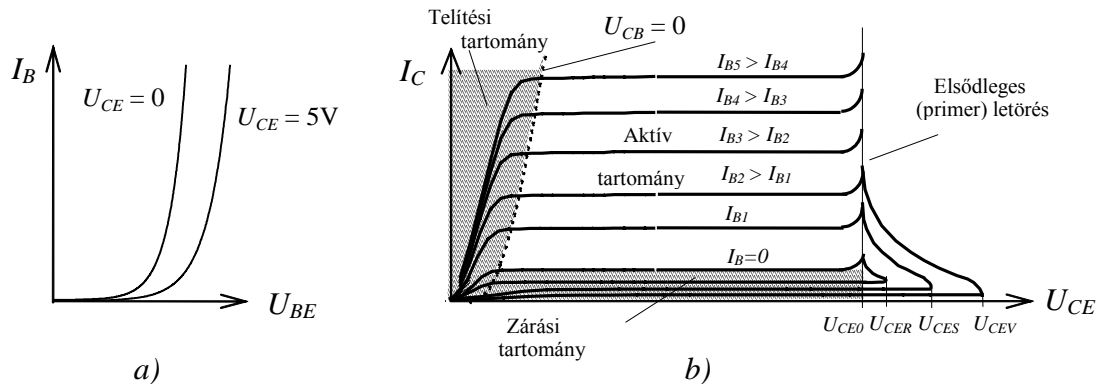
A záróirányú áramok értékei: $I_{CB0} = I_{BE0} = 0,1 \dots 5$ mA.

Jelleggörbék

A tranzisztor kivezetéseire jutó feszültségek és a kivezetéseken átfolyó áramok közötti összefüggéseket általában jelleggörbékben adják meg. Ezek közül legfontosabb a bemeneti és a kimeneti jelleggörbe sereg ismerete. Ezek alapján tárgyalhatók pl. a kisjelű erősítők, a kapcsolóüzem, stb.

Közös emitterű kapcsolásban a tranzisztor $I_B = f(U_{BE})$ bemeneti, valamint az $I_C = f(U_{CE})$ kimeneti jelleggörbéi a 3.37. ábrán láthatók. A bemeneti jelleggörbe az emitter-bázis pn átmenet nyitóirányú jelleggörbéjéhez hasonló. Mivel a kimeneti oldal U_{CE} feszültsége visszahat a bemenetre, ezért meg kell adni, hogy mekkora U_{CE} kollektor-emitter feszültségre vonatkozik a jelleggörbe. Záróirányban a maradékáramot és a letörési feszültséget elegendő ismerni.

A kimeneti karakterisztika az állandó bázisáramhoz tartozó kollektoráram változást adja meg az U_{CE} kollektor-emitter feszültség függvényében. Az $I_B = 0$ bázisáramhoz tartozó jelleggörbe a zárási tartományt, az $U_{CB} = 0$ jelleggörbe pedig a telítési tartományt határolja.



3.37. ábra. A közös emitterű tranzisztor: a) bemeneti és b) kimeneti karakterisztikái

A tranzisztor kollektor-emitter feszültsége egy maximális értéket nem haladhat meg, ez az érték az U_{CE0} letörési feszültség az $I_B = 0$ bázisáramhoz tartozó jelleggörbén, szabadon hagyott bázis esetén. Ha a bázis és az emitter között R ellenállás van, a zárási tartományban csökken a kollektor-emitter maradékáram, a letörési feszültség pedig nagyobb lesz. A karakterisztika azonban visszahajló jellegű és az U_{CER} érték elérése után csökkenő feszültségnél is megnövekszik a kollektoráram. A maradékáram tovább csökkenthető, ha az ellenállás értéke egészen rövidzárig csökken. Ekkor a letörési feszültség U_{CES} értékű. A legkisebb maradékáram és a legnagyobb letörési feszültség érték (U_{CEV}) a bázis-emitter közé kapcsolt zárófeszültséggel érhető el. A letörési feszültségnél nagyobb feszültségeknél a lavinahatás miatt elsődleges (primer) letörés következik be, a tranzisztor a nagy veszteségi teljesítmény következtében meghibásodik.

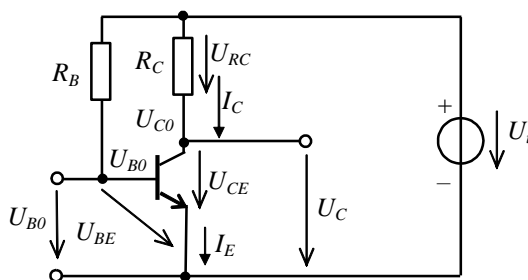
3.31. Bipoláris tranzisztor munkapont beállítása

A jelerősítés folyamata a normál aktív tartományban működtetett tranzisztorral valósítható meg. Ebben a működési tartományban a tranzisztor a bemenetére kapcsolt kis teljesítményű jelet a kimenetén felerősített, nagy teljesítményű jellé alakítja. A jelerősítés megvalósításához megfelelő munkapont beállító hálózattal biztosítani kell, hogy a tranzisztor bemenőjel nélkül is az aktív működési tartományban maradjon.

A munkapont beállítás során biztosítani kell a bázis-emitter pn átmenet nyitóirányú, és a kollektor-emitter átmenet záróirányú feszültségét, miközben a kollektoráram és a munkaellenállás értékét úgy kell megválasztani, hogy a lehető legnagyobb legyen az alakhűen felerősített kimeneti jel amplitúdója. Fontos követelmény a munkapont stabilitása is, ezért a munkapont beállító áramkört ennek megfelelően kell kialakítani.

Áramtáplálásos munkapont beállítás – munkapont beállítás bázisárammal

Gyakorlatilag állandó bázisáram a tápfeszültség és a bázis közé iktatott nagy értékű ellenállással állítható elő (3.38. ábra).



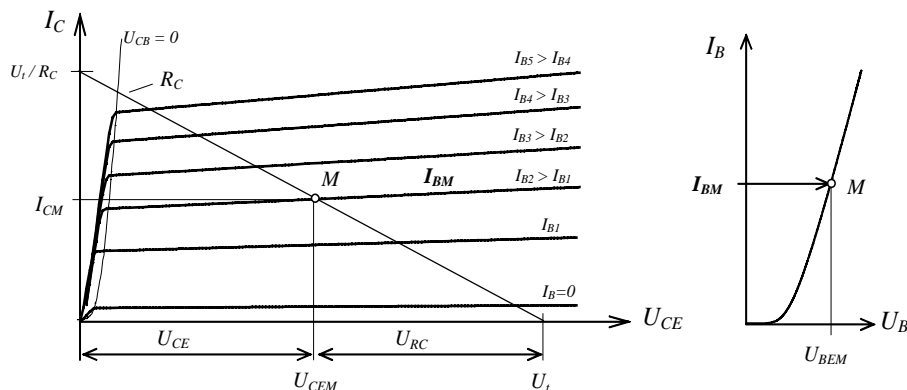
3.38. ábra. Munkapontbeállítás bázisárammal.

A munkapont beállítás menete: először a kimeneti karakterisztikán ki kell választani az M munkapontot: a karakterisztika és az R_C munkaellenállás (szembefordított) karakterisztikájának metszéspontján (3.39a ábra). Ha más egyéb kötöttség nincs, a munkapontot a munkaegyenesen a tápfeszültség közel felénél célszerű kijelölni, így a munkapont körüli szimmetrikus változás a lehető legnagyobb lehet. A karakterisztikáról leolvasható az I_{BM} munkaponti bázisáram értéke.

A tranzisztor bemeneti karakterisztikáján az I_{BM} bázisáramhoz U_{BEM} munkaponti bázis-emitter feszültség tartozik (3.39b ábra). Ennek ismeretében az R_B bázisellenállás értéke az

$$R_B = \frac{U_t - U_{BEM}}{I_{BM}} \quad (3.59)$$

összefüggéssel meghatározható.



3.39. ábra. Munkaegyenes szerkesztése áramtáplálásos munkapont beállítás esetén.

A kapcsolás előnye az egyszerű, kevés alkatrészt igénylő felépítés, valamint a nagy bemeneti ellenállás. Hátránya a hőmérsékletváltozások jelentős hatása.

Az áramtáplálásos munkapont beállítás esetén a bázis-emitter dióda hőfokfüggése nem befolyásolja lényegesen a munkaponti bázisáram értékét, mert az áramgenerátoros táplálás miatt a bázisáram állandó, a szükséges bázis-emitter feszültség pedig automatikusan kialakul. A munkaponti stabilitást a tranzisztor B nagyjelű áramerősítési tényezőjének jelentős hőfokfüggése, illetve nagy szórása veszélyezteti.

A munkapontot befolyásolja még a kollektor-bázis átmenet záróirányú áramának hőmérsékletváltozása is. Az I_{CB0} maradékáram értéke ugyan kicsi, de a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan növekszik, és $(1+\beta)$ -szor nagyobb értéke adódik hozzá a kollektoráramhoz, amely így már jelentős munkaponti kollektoráram változást jelent.

Munkapont beállítás bázisosztóval

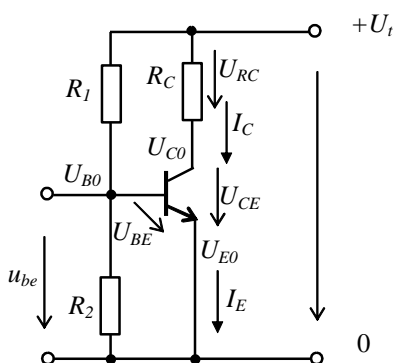
A tranzisztor munkapontja a bázisáram helyett a bázis-emitter feszültség beállításával is megválasztható. (3.40. ábra.)

A beállítás menete: a tranzisztor $U_{CE} - I_C$ kimeneti karakterisztikáján ki kell választani a munkapont helyét, lehetőleg a munkaegyenes felezőpontjaként a tápfeszültség felénél, így biztosítva a felerősített jel alakhűségét. A kimeneti karakterisztika és az R_C ellenállás munkaegyenesének metszéspontja meghatározza a munkaponti bázisáramot, ennek ismeretében az $U_{BE} - I_B$

bemeneti karakterisztikából leolvasható a szükséges U_{BEM} munkaponti bázis-emitter feszültség. Ezt a feszültséget kell a bázisra kapcsolt R_1 és R_2 ellenállásokból kialakított osztóval előállítani.

$$U_{B0} = U_t \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.60)$$

Az osztó ellenállásai nem választhatók nagyon kis értékűre, mert ebben az esetben az osztó nagy árama a vezérlő generátort túlzottan leterheli. Az osztó ellenállásait túl nagy értékűre sem célszerű választani, mert ekkor már a bázisáram terheli az osztót, és ez további stabilitási problémát okoz.



3.40. ábra. Munkapont beállítás bázisosztóval

A kapcsolás hátrányai:

- érzékeny a tranzisztor áramerősítési tényezőjének szórására,
- az U_{BE} bázis-emitter feszültség meghatározásánál is nagy a hibalehetőség,
- kényes az $R_1 - R_2$ osztó eltéréseire: az osztónak mV pontossággal kell a bázis – emitter átmenet számára a nyitóirányú feszültséget biztosítani,
- jelentős a hőmérsékletváltozás hatása. Döntő szerepe a bázis-emitter átmenet hőfokfüggésének van, ezért ezt a feszültségáplálós munkapont beállítást nem célszerű alkalmazni hőkompenzálás nélkül.

Munkapont beállítás bázisosztóval és emitterellenállással

A bázisosztóval beállított munkapont esetén az állandó bázisfeszültség miatt a hőmérséklet növekedésével növekszik a bázisáram, illetve az emitteráram. Állandó értéken akkor lehetne a bázisáramot tartani, ha minden 1°C hőmérséklet növekedés esetén 2mV-al csökkenne a bázis-emitter feszültség. Az emitterkörbe iktatott ellenállással megvalósítható a hőmérséklet okozta változás kompenzálása. (3.41a ábra.) Az emitterpont feszültsége az emitter ellenálláson

eső feszültséggel azonos: $U_{E0} = U_{RE}$. Ha a hőmérséklet növekedése miatt a bázisáram ΔI_B értékkel megnövekszik, ezzel arányosan megnő az emitteráram is

$$\Delta I_E = (1 + \beta) \Delta I_B \quad (3.61)$$

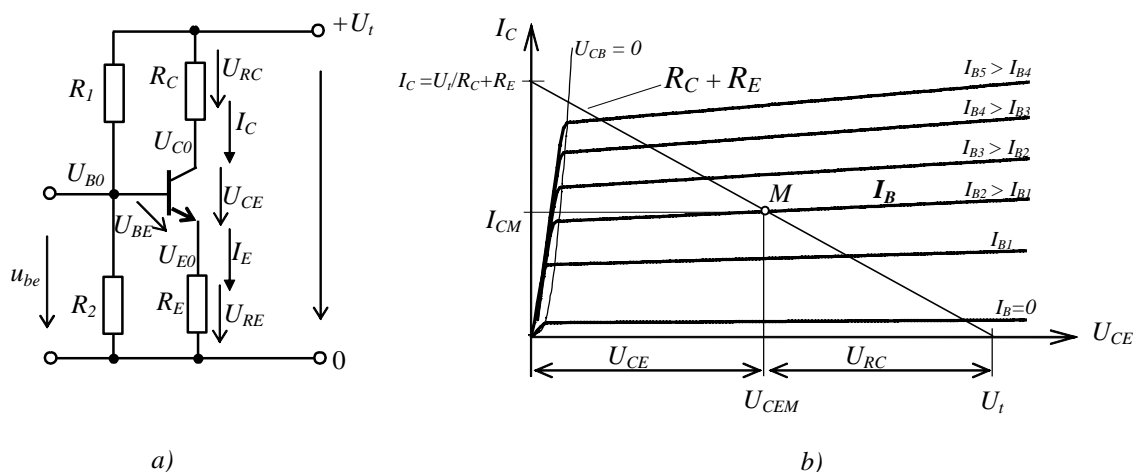
értékkel, ahol β a váltakozóáramú áramerősítési tényező. Az emitterellenálláson nagyobb lesz a feszültség:

$$\Delta U_{RE} = \Delta I_E R_E, \quad (3.62)$$

az emitterpont feszültsége megemelkedik. A bázis feszültsége a bázisosztó által beállított állandó érték, így a bázis-emitter feszültség az

$$U_{BE} = U_{B0} - U_{E0} \quad (3.63)$$

összefüggés alapján kisebb lesz, a tranzisztor kisebb mértékben nyit, az emitteráram kevésbé növekszik, mint emitterellenállás nélkül: negatív soros áramvisszacsatolás valósul meg. A jó stabilitás érdekében az emitterellenállást nagyra célszerű választani, de ügyelni kell arra, hogy a tranzisztor kivezérelhetősége még megfelelő maradjon, jusson elegendő feszültség a kollektor- emitter elektródák közé.



3.41. ábra. Munkapont beállítás bázisosztóval és emitterellenállással: a) kapcsolási rajz

b) egyenáramú munkaegyenes szerkesztése.

A munkapont beállítás során a nyitott bázis-emitter átmenet feszültsége szilícium alapú tranzisztorokra közelítő értéként $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$ -ra megválasztható. Ez a becslés nem okoz számottevő hibát, a tranzisztor nagy gyártási szórása, és a beállító ellenállások pontatlansága miatt. Ezen a becsült adaton kívül a munkapont nem függ a tranzisztor paramétereitől, a külső elemek segítségével beállítható.

A kimeneti oldal hurokegyenlete:

$$U_t = U_{RC} + U_{CE} + U_{RE} = I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E. \quad (3.64)$$

Mivel a tranzisztor bázisárama általában nagyságrendekkel kisebb, mint az emitteráram, ezért a kollektoráram és az emitteráram közel azonos: $I_C \approx I_E$.

Ennek figyelembevételével a hurokegyenlet

$$U_t = U_{RC} + U_{CE} + U_{RE} = I_C(R_C + R_E) + U_{CE}. \quad (3.65)$$

alakban megadható, amely alapján megszerkeszthető a kapcsolás egyenáramú munkaegyenese (3.41b ábra).

A kapcsolás kimeneti pontja a kollektor kivezetés, ennek munkaponti feszültsége az

$$U_{C0} = U_t - U_{RC}, \quad (3.66)$$

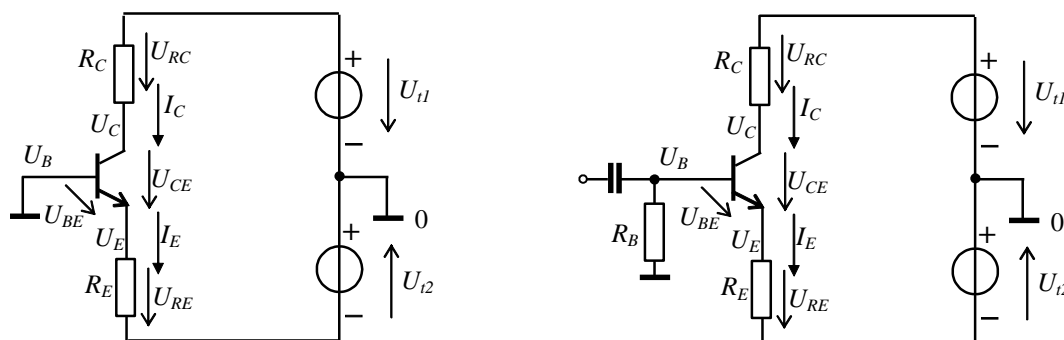
vagy az

$$U_{C0} = U_{CE} + U_{RE} \quad (3.67)$$

összefüggéssel megadható.

Munkapont beállítás két tápfeszültséggel

Két tápforrás alkalmazásával kialakított munkapont-beállító kapcsolás látható a 3.42. ábrán.



3.42. ábra. Munkapont beállítás két tápforrással.

A két tápforrással való munkapont beállításnál a hőmérsékletkompenzálás szintén az emitterellenállással történik, de elmarad a bázisosztó, a bázist a tápforrások közös 0 pontjára kell kötni. A bázisáramot akkor is biztosítani kell, ha az erősítő bemenetére csatolókapacitátor kerül, ezért ilyenkor a bázist egy viszonylagosan nagy értékű ellenálláson keresztül kell a közös pontra kötni. Mivel az R_B bázisellenálláson átfolyik az I_B bázisáram, a bázis kis értékű negatív feszültségre kerül. A bázisellenállást úgy kell megválasztani, hogy feszültsége nagyságrendekkel legyen kisebb a tranzisztor bázis-emitter feszültségénél, így a tranzisztor bázisfeszültsége közel 0-nak tekinthető:

$$R_B I_B \ll U_{BE}, \quad U_{B0} \approx 0. \quad (3.68)$$

A nyitott bázis-emitter átmenet feszültsége szilícium tranzisztorokra közelítő értéként $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$ -ra megválasztható, tehát az emitter feszültsége a közös ponthoz képest:

$$U_{E0} = U_{B0} - U_{BE} = 0 - 0,6 = -0,6 \text{ V}. \quad (3.69)$$

Az emitterellenállás feszültsége:

$$U_{RE} = U_{E0} - U_{t2}. \quad (3.70)$$

A kimeneti oldalra felírható hurokegyenlet:

$$U_{t1} - U_{t2} = U_{RC} + U_{CE} + U_{RE}. \quad (3.71)$$

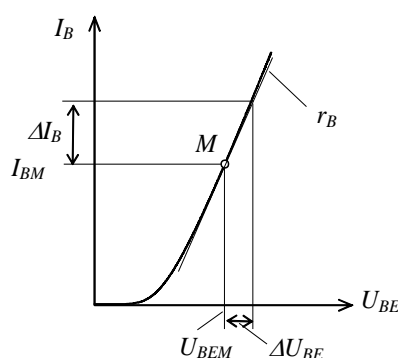
3.32. A bipoláris tranzisztor kisjelű helyettesítő képe

A bipoláris tranzisztor kisjelű helyettesítő képe a munkapont kis környezetében jellemzi a munkaponti mennyiségek megváltozásának összefüggéseit. A tranzisztor kisjelű fizikai helyettesítő képe a tranzisztor fizikai működéséből adódóan rajzolható fel, adott alapkapsolás esetén.

A közös emitterű kapcsolás kisjelű helyettesítő képe

Közös emitterű alapkapsolás esetén a vezérlés a bázis és az emitter között a bázisáram változtatásával jön létre, a kimenet a kollektor és az emitter közötti feszültségváltozás.

A bemeneti karakterisztika a pn átmenet nyitóirányú karakterisztikája (3.43. ábra). A karakterisztika a munkapont kis környezetében lineáris egyenessel közelíthető, amely az r_B dinamikus ellenállással jellemezhető.



3.43. ábra. A tranzisztor bemeneti dinamikus ellenállása.

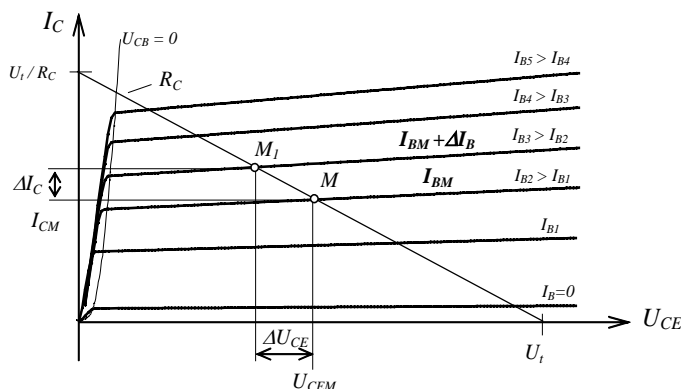
A bemenet változásai: a bázisáram a vezérlés hatására az M munkaponthoz képest ΔI_B értékkel megváltozik, ugyanakkor megváltozik a bázis-emitter feszültség is ΔU_{BE} értékkel:

$$\Delta I_B = \frac{\Delta U_{BE}}{r_B}, \quad (3.72)$$

ahol az r_B dinamikus ellenállás az

$$r_B = \left. \frac{dU_{BE}}{dI_B} \right|_M \quad (3.73)$$

összefüggéssel adható meg, ahol a β a közös emitterű kisjelű áramerősítési tényező. (3.43. ábra.)



3.44. ábra. A bipoláris tranzisztor kimeneti karakterisztikája közös emitterű kapcsolás esetén. A bázisáram változás hatása.

A bemenet változásának hatására megváltozik a kimenet is. (3.44. ábra.)
A bázisáram változásával arányosan változik meg a kollektoráram:

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B, \quad (3.74)$$

A bázisáram változását a 3.72 összefüggés szerint a bázis-emitter feszültség változásával kifejezve a kollektoráram változása átírható a

$$\Delta I_C = \beta \frac{\Delta U_{BE}}{r_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{\frac{r_B}{\beta}} \quad (3.75)$$

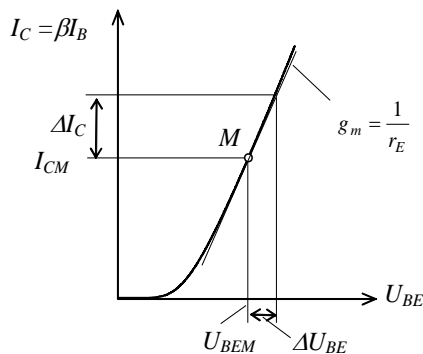
alakra, ahol az

$$\frac{r_B}{\beta} = r_E \quad (3.76)$$

dinamikus ellenállás a tranzfer karakterisztikát jellemzi (3.45. ábra):

$$r_E = \left. \frac{dU_{BE}}{dI_C} \right|_M \quad (3.77)$$

a tranzfer karakterisztika munkapontjához húzott érintő meredekségének, azaz a tranzisztor meredekségének reciproka.



3.45. ábra. A bipoláris tranzisztor transzfer karakterisztikája közös emitterű kapcsolás esetén.

A tranzisztor meredeksége:

$$g_m = \frac{1}{r_E} = \left. \frac{dI_C}{dU_{BE}} \right|_M \quad (3.78)$$

A transzfer karakterisztikát leíró áram-feszültség összefüggés:

$$I_C \cong I_0 e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}. \quad (3.79)$$

A 3.78 összefüggésbe behelyettesítve:

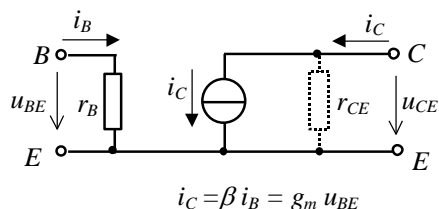
$$g_m = \left. \frac{dI_C}{dU_{BE}} \right|_M = \left. \frac{dI_0 e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}}{dU_{BE}} \right|_M, \quad (3.80)$$

majd deriválás után a munkaponti értéket behelyettesítve:

$$g_m = \frac{I_{CM}}{U_T}, \quad (3.81)$$

a meredekség gyakorlatilag a tranzisztor munkaponti kollektorárama és a termikus feszültség hányadosaként a kis áramok tartományában jó közelítéssel számítható.

A tranzisztor közös emitterű, legegyszerűbb, fizikai, kisjelű helyettesítő képe, amely csak a változásokra érvényes, a bemeneten az r_B dinamikus ellenállással, a kimeneten áramgenerátorral modellezi a tranzisztort.



3.46. ábra. A tranzisztor közös emitterű, legegyszerűbb, fizikai, kisjelű helyettesítő képe

Az áramgenerátor $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ árama a ΔU_{BE} bemeneti feszültségváltozással is felírható:

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B = \beta \frac{\Delta U_{BE}}{r_B} = \frac{\Delta U_{BE}}{\frac{r_B}{\beta}} = \frac{\Delta U_{BE}}{r_E} = g_m \Delta U_{BE} \quad (3.82)$$

A változó mennyiségek jelölésére a kisbetűket alkalmazva az összefüggések átírhatók az

$$i_C = \beta i_B = g_m u_{BE} \quad (3.83)$$

alakra.

A helyettesítő kép pontosítása:

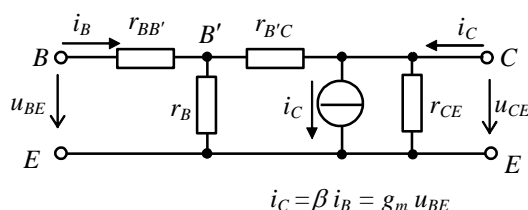
- A kimeneten az áramgenerátor belső ellenállását kell a kollektor-emitter közé berajzolni, ez a dinamikus ellenállás a kimeneti karakterisztika alapján definiálható:

$$r_{CE} = \left. \frac{dU_{CE}}{dI_C} \right|_{I_B = \text{állandó}}, \quad (3.84)$$

értéke $10^5 \Omega$ nagyságrendű.

- A bázis gyengén szennyezett, villamos vezetőképessége kicsi. A tényleges bázisréteg és a báziskivezetés között mindig található egy rosszul vezető kristályrész, amelynek néhány ohmtól néhány száz ohmig terjed a nagysága. Az $r_{BB'}$ a bázis és a báziskivezetés közötti kristályellenállás.
- A kimenet kis mértékben visszahat a bemenetre: ezt a kollektor és a bázis közé kapcsolt $r_{B'C}$ ellenállással lehet figyelembe venni. A kimeneti feszültségváltozás az r_B és az $r_{B'C}$ ellenállások alkotta osztón visszajut a bemenetre. Az $r_{B'C}$ ellenállás értéke nagy, $M\Omega$ nagyságrendű.

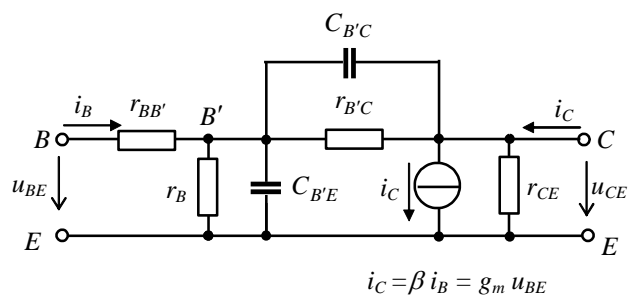
A bipoláris tranzisztor pontosított helyettesítő képe látható a 3.47. ábrán.



3.47. ábra. A bipoláris tranzisztor pontosított kisjelű fizikai helyettesítő képe.

A pn átmenetek kapacitásai kis értékük következtében nagyfrekvencián fejtik ki hatásukat. A normál aktív tartományban működő tranzisztor bázis és emittere közötti pn átmenet nyitóirányú igénybevétele miatt a $C_{B'E}$ diffúziós kapacitását, a bázis-kollektor átmenetnek pedig a záróirányú igénybevétele miatt a kiürített

réteg $C_{B'C}$ kapacitását kell figyelembe venni. A bipoláris tranzisztor nagyfrekvenciás helyettesítő képe látható a 3.48. ábrán.



3.48. ábra. A bipoláris tranzisztor helyettesítő képe nagyfrekvencián.