

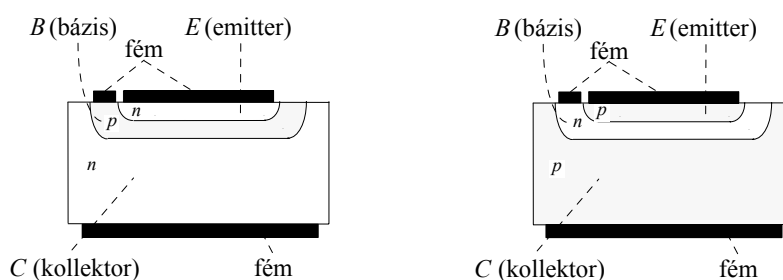
15. TRANZISZTOROS ERŐSÍTŐ

Célkitűzés:

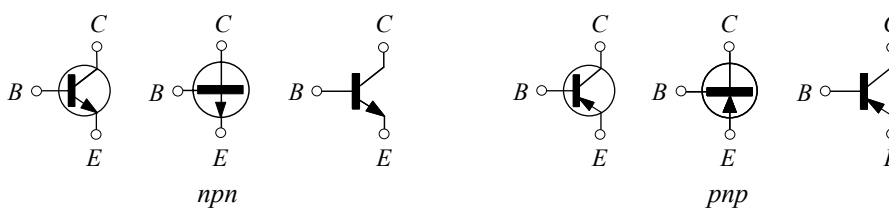
- A közös emitteres erősítőkapcsolás működésének megértése.

I. Elméleti áttekintés

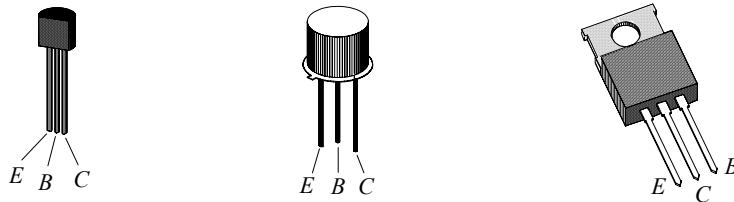
A tranzisztorok főleg feszültség vagy áramerősség erősítésére használt félvezető eszközök, amelyek legelterjedtebb típusa az ún. bipoláris, vagy rétegtranzisztor. Ennek metszeti képei az 1. ábrán, jelölései a 2. ábrán, néhány típus rajza a 3. ábrán látható. Szerkezetük alapján a tranzisztorok két csoportra oszthatók: *npn* és *pnp* típusúak. Három elektródával rendelkeznek: emitter (*E*), bázis (*B*) és kollektor (*C*), melyek vékony fém rétegen keresztül csatlakoznak a kivezetésekhez. A tranzisztor legfontosabb tulajdonsága az, hogy a kollektoráram értékét a sokkal kisebb bázisárammal lehet szabályozni.



1. ábra



2. ábra



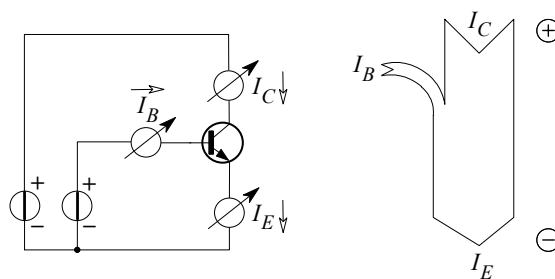
3. ábra

A tranzisztorban lejátszódó áramvezetési folyamatokat egy *npn* típusú tranzisztort tartalmazó erősítőkapcsolás esetén magyarázzuk el. Ha a tranzisztorra nem kapcsolunk feszültséget, akkor a diffúzió hatására a *p* rétegből az *n* rétegekbe lyukak, az *n* rétegekből a *p* rétegbe (bázisba) elektronok mennek át. Az *n-p* és a *p-n* átmenetekenél egy vékony rétegben – a határrétegben – a semlegesség felborul: az *n* rétegben az elektronok és a donorok, a *p* rétegben a lyukak és az akceptorok koncentrációja között eltérés jön létre. A határrétegekben kialakuló töltés, az ún. tértöltés olyan elektromos térerőt hoz létre, amely a diffúzióval ellentétes irányú elektromos áramot kelt. Külső tér nélkül a diffúziós és a tér hatására folyó áramok egyenlő nagyságúak, de ellentétes irányúak.

A szokásos erősítőkapcsolásoknál az emitter-bázis átmenetre nyitó feszültséget kapcsolnak. Ennek hatására csökken a diffúziós árammal ellentétes áramkomponens, egy külső körben is mérhető eredő áram jön létre, ami túlnyomó részben az emitterből a bázisba jutó elektronáramból, kisebb részben a bázisból az emitterbe folyó lyukáramból áll. A kollektorra a bázishoz viszonyítva pozitív feszültséget kapcsolnak. Ennek hatására a kollektor-bázis átmenet határán kiürített réteg jön létre: a külső tér a határrétegből „kiszívja” az elektronokat. Az emitterből a vékony bázisba átjutó elektronok a diffúzió eredményeként a kollektorba jutnak.

A szokásos erősítőkapcsolásban (normál aktív üzem) működő tranzisztor mérhető bázisárama gyakorlatilag a bázis-emitter dióda lyukárama, a kollektoráram az emitterből a bázisba folyó elektronárammal azonos. Az emitteráram e két áram összege (l. 4. ábra, ahol az áramforrás feszültséggenerátor):

$$I_E = I_B + I_C. \quad (1)$$



4. ábra

A bázisáramot és a kollektoráramot is a bázis-emitter dióda nyitófeszültsége szabályozza, ezért a két áram között közelítőleg arányosság áll fenn:

$$I_C = \beta I_B. \quad (2)$$

A β mennyiséget áramerősítési tényezőnek nevezzük. Értéke kismértékben függ a kollektoráramtól.

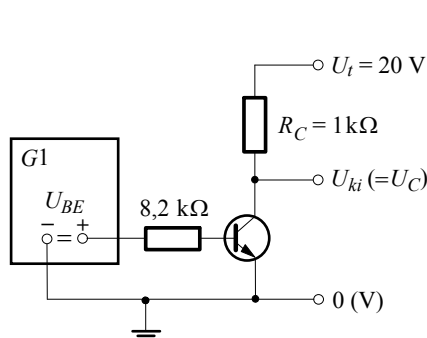
A legtöbb kapcsolásban jelentős átlagos kollektoráram folyik. Gyakran arra vagyunk kíváncsiak, hogy a bázisáram kismértékű megváltozása milyen változást okoz a kollektoráramban. A kismértékű változások jelölésére a továbbiakban kisbetűket használunk, tehát pl. dI helyett i -t. Jó közelítéssel igaz az, hogy

$$i_C = \beta i_B. \quad (3)$$

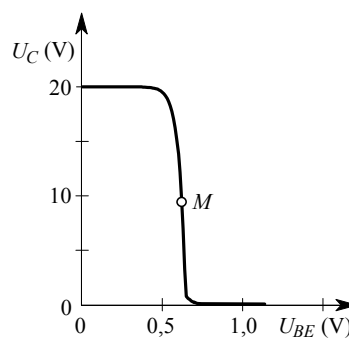
ahol β -t kisjelű áramerősítési tényezőnek nevezzük.

Az erősítés vizsgálatához tekintsük az 5. ábrán látható kapcsolást. Feszültségerősítésnél az erősítő jelét a bázis és a „föld” (0 volt) közé kapcsolják, (földelt emitteres kapcsolás), a kimenő feszültség pedig a kollektor és a föld között mérhető. Az U_{ki} kimenőfeszültség az R_C kollektorellenálláson átfolyó áram miatt kisebb az U_t tápfeszültségnél:

$$U_{ki} = U_C = U_t - I_C R_C. \quad (4)$$



5. ábra

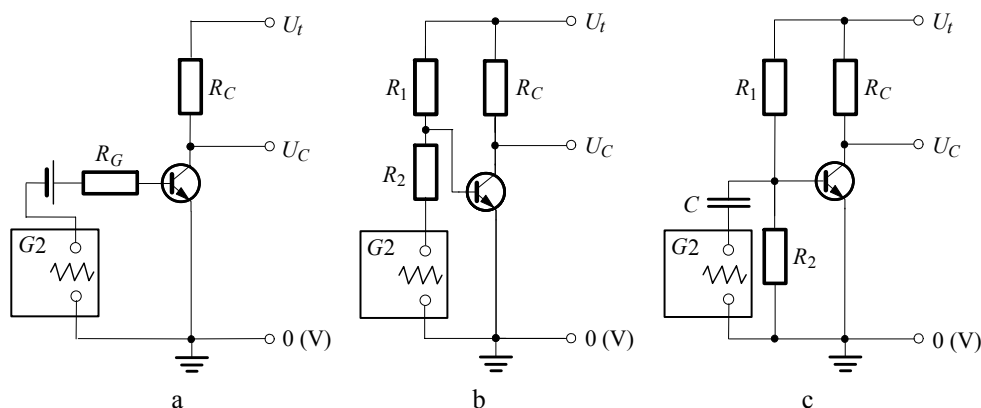


6. ábra

Ha a bázisfeszültség növekszik, a bázisáram és a kollektoráram is növekszik, U_{ki} csökken. A kollektorfeszültséget (ami U_{ki} -vel azonos), mint az U_{BE} bázis-emitter feszültség függvényét a 6. ábrán rajzoltuk fel. Az ábrából látható, hogy az ilyen kapcsolás erősítésre csak U_{BE} viszonylag kis tartományában használható, ahol U_{ki} erősen függ a bázisra kapcsolt feszültségtől.

Ahhoz, hogy kis jeleket jelentős mértékben erősíthessünk, célszerű a jelfeszültséghez egy olyan állandó értékű feszültséget hozzáadni, hogy a bázis-emitter feszültség a 6. ábrán látható meredek szakaszra essen. Ezzel a karakterisztikán kijelölünk egy M pontot („munkapont”), és a jel (U_{BE}) hatására a bemenő és a kimenő feszültség is eme pont környezetében változik.

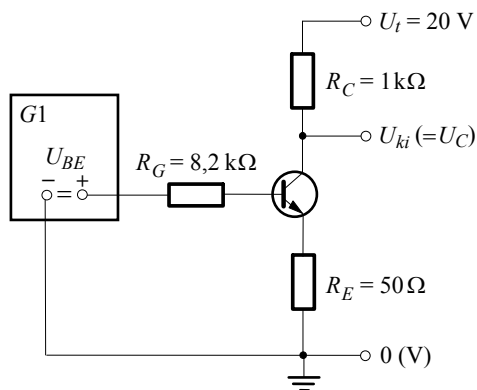
A 7. ábrán a munkapont beállítás módszerei láthatók. A 7.a ábra inkább csak elvi megoldást mutat be, a gyakorlatban a telep helyett egy feszültségosztót használnak, ami a tápfeszültségből állítja elő az átlagos bázisfeszültséget (a 7.b és 7.c ábrákon az R_1 és R_2 ellenállások). A 7.c ábrán a kondenzátor „elválasztja” a $G2$ generátort (az erősítendő jelforrást) és a bázist, ezért a generátor feszültségének egyenáramú komponense nem befolyásolja a bázis átlagos feszültségét, ezért ez a legelterjedtebb megoldás.



7. ábra

A 6. ábra alapján vegyük észre, hogy a munkaponthoz tartozó bázisfeszültséget igen pontosan (néhány mV pontossággal) kell beállítani.

Nagyobb jelek erősítése esetén az erősítő jelentősen torzít. A torzítás az emitterrel sorbakötött ellenállással csökkenthető. Ekkor a bázisra kapcsolt U_B feszültség az U_{BE} bázis-emitter és az U_E emitterfeszültség összege. A bázisfeszültség megváltozásának csak egy része hoz létre bázis-emitter feszültségváltozást, tehát a tranzistor számára a jel „kicsi”. A 8. ábrán a módosított elvi kapcsolás, a 9. ábrán az így kapott $U_{ki}(U_B)$ karakterisztika



8. ábra

látható. Észrevehető, hogy a kollektor feszültség változása most jelentősen nagyobb bemenő feszültségtartományhoz tartozik, tehát a munkapont beállítása könnyebb.

Ebben az esetben is célszerű a bázis előfeszültségét az 7.c ábrához hasonló módon a tápfeszültségből feszültségosztással előállítani és a jelforrás feszültségét a bázisra kondenzátoron át csatolni.

Számítsuk ki a 10. ábrán látható kapcsolás erősítését! A számításhoz szükségünk lesz a diódák dinamikus ellenállására vonatkozó összefüggésre. Ismeretes, hogy a dióda I_D árama és a rákapcsolt U feszültség között érvényes az

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (5)$$

összefüggés, ahol I_0 a diódára jellemző érték (az ún. telítési áram), $U_T = kT/e$, k a Boltzmann-állandó, T az abszolút hőmérséklet, e pedig az elektron töltése (nem tévesztendő össze az „e” természetes alapú logaritmus alapszámával). Szobahőmérsékleten $U_T \approx 26$ mV. Ha U értéke a 100 mV-ot meghaladja, akkor az (5) egyenletben az 1-es tag elhanyagolható. Ebből az egyenletből a dinamikus ellenállás reciproka könnyen kiszámítható:

$$\frac{1}{r_D} = \frac{\partial I_D}{\partial U} = I_0 \frac{1}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}} \approx \frac{I_D}{U_T}. \quad (6)$$

A bázis-emitter diódánál kétféle dinamikus ellenállás definiálható, úgymint az

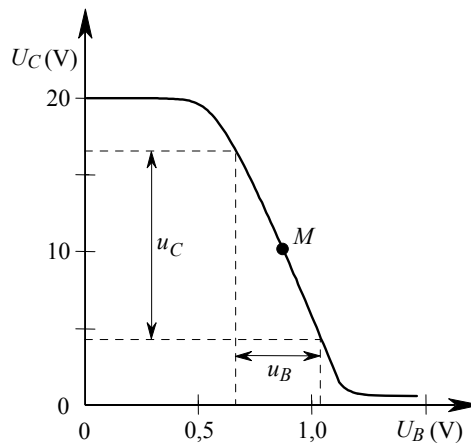
$$r_E = \frac{U_T}{I_E} \quad (7)$$

dinamikus emitter-ellenállás, és az

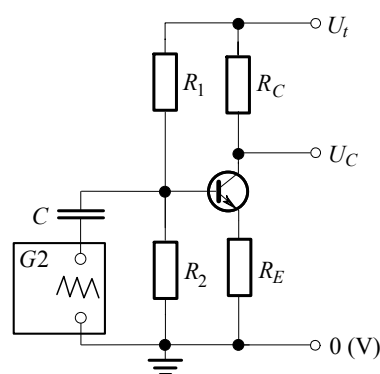
$$r_B = \frac{U_T}{I_B} \quad (8)$$

dinamikus bázis-ellenállás.

Mivel $I_E = I_C + I_B = (B + 1)I_B$ és $B \approx \beta$, ezért szokásos az



9. ábra



10. ábra

$$r_B = (\beta + 1)r_E \quad (9)$$

közelítés.

A tranzisztorok bázisa egy vékony, gyengén vezető réteg. A bázis-kontaktus és a bázis-emitter dióda középső részei (l. 1. ábrán) között az ellenállás általában nem elhanyagolható. Ennek hatását egy átlagos $r_{BB'}$ ellenállással lehet figyelembe venni. [$r_{BB'}$ értéke kis teljesítményű szilícium tranzisztoroknál (10 - 20) Ω .]

Ha a tranzisztoron eső feszültségek csak kis mértékben változnak meg, akkor a tranzisztor lineárisnak tekinthető, más szóval a feszültségváltozás arányos az áramváltozással. Tehát az u_{BE} bázis-emitter feszültségváltozás kifejezhető az *Ohm* törvénnyel:

$$u_{BE} = (r_{BB'} + r_B)i_B. \quad (10)$$

A 10. ábrának megfelelő erősítőkapcsolás erősítése ezek után már könnyen kiszámítható. Jelöljük a bemenő feszültség megváltozását u_{in} -nel. Ez két tagból tevődik össze: $u_{in} = u_{BE} + u_E$, ahol $u_E = R_E i_E$ az emitterfeszültség változás. A kimenőfeszültség megváltozása (4)-ből $u_{ki} = -i_C R_C$, melynek felhasználásával az erősítés:

$$A = \frac{u_{ki}}{u_{in}} = -\frac{i_C R_C}{u_{BE} + u_E} = -\frac{\beta i_B R_C}{i_B (r_{BB'} + r_B) + i_E R_E}. \quad (11)$$

A (9) egyenlet és az $i_E = i_C + i_B = (\beta + 1)i_B$ összefüggés felhasználásával:

$$A = -\frac{\beta R_C}{r_{BB'} + (\beta + 1)(r_E + R_E)} \approx -\frac{R_C}{r_E + R_E}. \quad (12)$$

Az erősítés tehát könnyen megbecsülhető. A (12) kifejezésből az is látszik, hogy kis értékű R_E esetén az erősítés r_E csökkentésével (tehát az átlagos emitteráram változtatásával) növelhető.

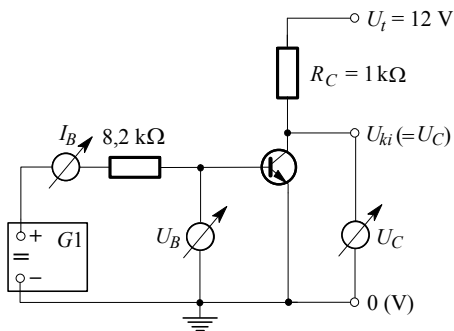
II. A mérés menete

Az $U_C(U_B)$, $U_C(I_B)$ és $I_B(U_B)$ karakterisztikák méréséhez először a 11., illetve a 12. ábrán látható kapcsolást állítsa össze. A bázissal sorbakötött ellenállásnak az a feladata, hogy a bázisáram finom szabályozása a $G1$ jelű generátor feszültségének megváltoztatásával könnyebb legyen.

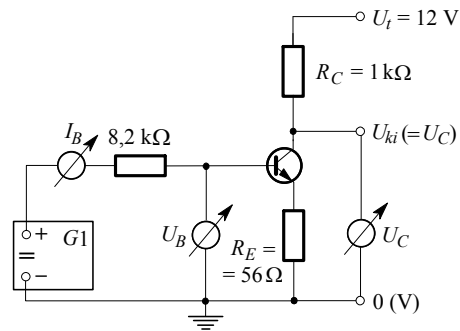
Az időben változó feszültségű jelek erősítésének vizsgálatánál kétsugaras oszcilloszkópot használjon, ezáltal a bázison és a kollektoron fellépő jelek egyidejűleg mérhetők, megfigyelhetők és az esetleges jeltorzulás is észrevehető (l. 13. és 14. ábra).

Az erősítő torzítását ugyanebben a kapcsolásban lehet megnézni, illetve megvizsgálni. (A torzításon itt a jelek alakjának megváltozását értjük, ami oszcilloszkópon jól látható. Ezt

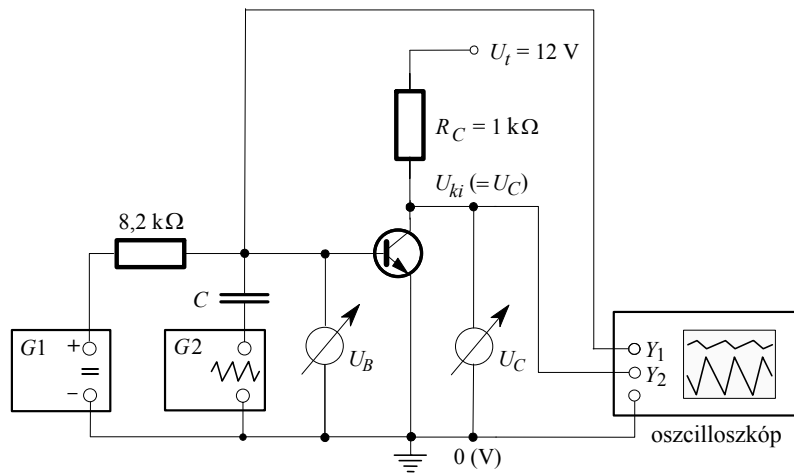
az elektronikában egy szinuszos jel felharmonikusainak keletkezésével mérik, amelynek a mérésére itt nincs mód.) A torzítás vizsgálatához az oszcilloszkóp egyik (a 13. ábrán Y_2) függőleges erősítőjét inverz módba (+/-) kapcsolja át. Ekkor a bázisra kapcsolt jel és a kollektoron keletkezett jel a képernyőn ugyanolyan irányú kitérést hoz létre. Az erősítés és a függőleges eltolás szabályozásával a torzítatlan jelek fedésbe hozhatók. A bázisra kapcsolt jel amplitúdójának növelésével a jelek alakja között jelentős eltérés lép fel. Ha a jeleket közepén összeillesztjük, akkor az eltérések a csúcsoknál jól láthatók lesznek.



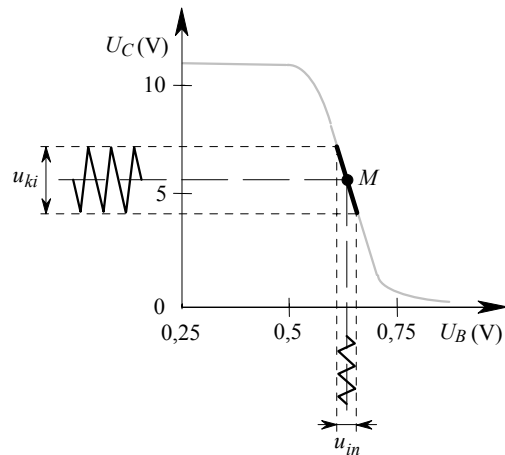
11. ábra



12. ábra



13. ábra



14. ábra

Feladatok:

1. Mérje meg U_{ki} és U_B értékét I_B függvényében! Ábrázolja az $U_{ki}(I_B)$, $U_{ki}(U_B)$ és az $I_B(U_B)$ függvényeket!
2. Ismétlje meg az előző feladatot 56Ω emitterellenállásnál!
3. Mérje meg az erősítést a bázisfeszültség függvényében a 13. ábrán látható kapcsolásnál $r_E = 0 \Omega$ és $r_E = 56 \Omega$ emitterellenállásnál! Ábrázolja az eredményt! Vizsgálja meg az erősítő torzítását mindkét esetben! Próbálja meg kvantitatív mennyiséggel jellemezni a torzítást az itt leírt mérési módnál!

Kérdések:

1. Hogyan függ össze a bázis- és az emitteráram?
2. A bázis feszültségének pozitív irányú megváltozása milyen kollektor feszültségváltozást hoz létre?
3. Mi az R_1 ellenállás szerepe a 7.b ábrán szereplő kapcsolásnál?
4. Mi az R_2 ellenállás feladata az előző kapcsolásnál?
5. Mi a kondenzátor szerepe a 7.c kapcsolásnál?
6. Hogyan változik meg a kimenőfeszültség, ha a tápfeszültség (U_I) megváltozik?
7. Nagy jeleket miért torzítja el az egyszerű, 5. ábrán látható erősítőkapcsolás?

8. A 8. ábrán látható erősítőnek miért kisebb a torzítása, mint az 5. ábrán látható erősítőnek?
9. Milyennek gondolja a 10. ábrán látható kapcsolásnál a tranzisztor bázisán fellépő feszültségváltozás és az emitteren fellépő feszültségváltozás viszonyát?
10. Miért kicsi a kollektoráram és az emitteráram különbsége?
11. Ha a tranzisztor bázisát vékonyabbra készítik, hogyan változik meg az áramerősítési tényező?
12. Ha a kollektort és az emittert felcseréljük, fog-e működni az erősítő?

Ajánlott irodalom:

1. Török M.: Elektronika, JATEPress, Szeged, 2000.
2. J.D. Long: Korszerű elektronikus áramkörök tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
3. Hevesi I.: Elektromosságtan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.