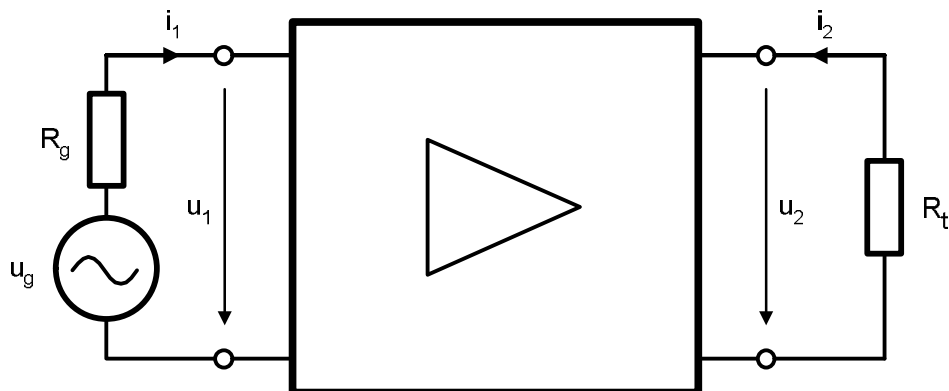


1. Erősítő áramkörök

1.1 Alapfogalmak

A való világ elektromos jelei gyakran olyan kis jelszinten jelentkeznek, hogy az általuk hordozott információ így nem használható, előzőleg fel kell őket erősíteni egy adott gyakorlati alkalmazás által megkövetelt szintre. Azokat az elektronikus kapcsolásokat, amelyekkel egy jel erősítését meg lehet valósítani, *erősítőknek* nevezzük.

Általános esetben, az erősítő egy *aktív négyfólyus*, (1.1 ábra) amely képes a kimenetén, a bemenetre kapcsolt elektromos jellel megegyező hullámformájú, de tetszőlegesen nagyobb teljesítményű (feszültségű, áramú) elektromos jelet szolgáltatni. Ahoz, hogy ezt a feladatot egy erősítő teljesíthesse, egyenfeszültségű energiaforrással (tápegység) kell ellátni, amelynek elektromos energiája képes fedezni a kimeneti teljesítménynövekedést és a fellépő veszteségeket.



1.1 ábra Erősítő tömbvázlata

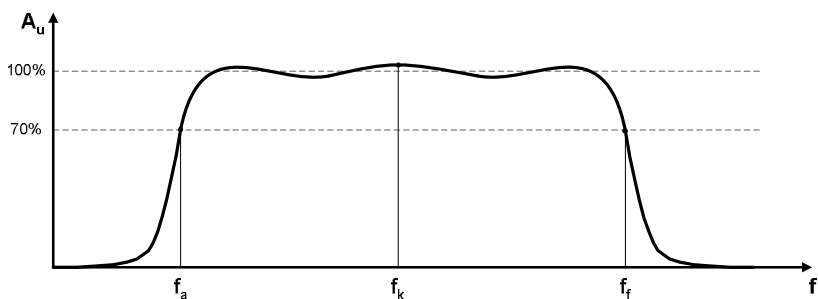
Az erősítés megvalósítása csak aktív félvezető elemmel (bipoláris, vagy térvezérlésű tranzisztor) lehetséges, hiszen az erősítés folyamata nem más, mint *vezérelt teljesítményátadás*.

1.1.1 Osztályozás

Az erősítendő jel típusa szerint megkülönböztetünk:

- egyenfeszültségű erősítőt (a bemeneti jel egyenfeszültség)
- váltakozó feszültségű erősítőt (a bemeneti jel váltakozó feszültség)

A váltakozó feszültségű erősítők erősítése a valóságban frekvenciafüggő. Létezik egy alsó (f_a) és egy felső (f_f) határfrekvencia amelyekken az erősítés 3 dB-lel kisebb a közepes frekvencián (f_k) elért erősítésnél (1.2 ábra). A határfrekvenciák közötti tartomány az erősítő *sávszélessége*, a közepes frekvencia pedig a két határfrekvencia mértani közepe.



1.2 ábra Egy erősítő frekvenciamenete

Az erősítő sávszélessége szerint megkülönböztetünk:

- szélessávú erősítőket
- keskenysávú erősítőket
- hangolt (szelektív) erősítőket

Az erősítendő jel frekvenciája szerint megkülönböztetünk:

- hangfrekvenciás erősítőket
- videofrekvenciás erősítőket
- rádiófrekvenciás erősítőket

Az erősítendő jel amplitúdója szerint megkülönböztetünk:

- kisjelű erősítőket
- nagyjelű (teljesítmény) erősítőket

1.1.2 Jellemző paraméterek

Az erősítők tervezése és felhasználása szükségessé teszi azoknak a paramétereknek az ismeretét, amelyek az erősítő gyakorlati alkalmazását elősegítik. Ezek a következők:

- üzemi frekvenciatartomány
- erősítés
- bemeneti differenciális ellenállás (r_{be})
- kimeneti differenciális frekvenciatartomány (r_{ki})
- torzítások
- az erősítő zajtényezője
- az erősítő határértékadatai

Háromféle erősítést határozhatunk meg:

- Feszültségerősítés: $A_u = \frac{u_2}{u_1}$
- Áramerősítés: $A_i = \frac{i_2}{i_1}$
- Teljesítményerősítés: $A_p = \frac{P_2}{P_1} = A_u * A_i$

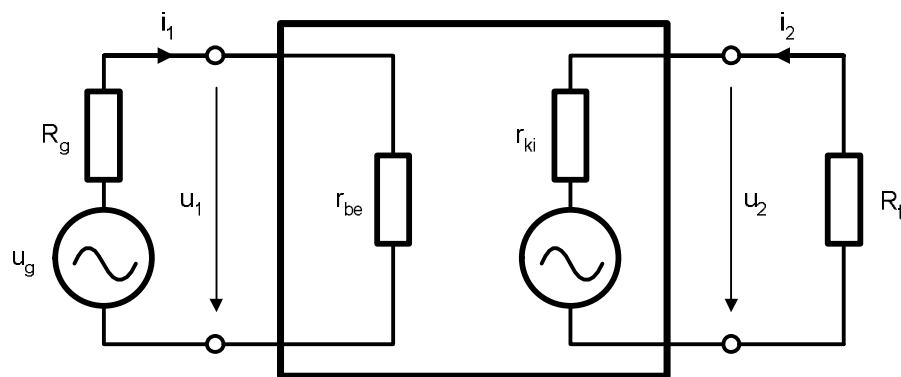
Az erősítés nagyságát általában logaritmikus egységben (*decibelben*) fejezik ki:

$$a_u = 20 \cdot \lg A_u$$

$$a_i = 20 \cdot \lg A_i$$

$$a_p = 10 \cdot \lg A_p$$

Az 1.3 ábra egy erősítő belső felépítését szemlélteti. A bemeneti rész terheli a jelforrást, míg a kimenet generátornak tekinthető, amelyet az R_t terhelés zár le. Az r_{be} és r_{ki} differenciális ellenállásokat *bemeneti* és *kimeneti ellenállásoknak* nevezzük.



1.3 ábra Erősítő általános belső felépítése

Az erősítőkkel szemben alapvető követelmény, hogy az erősítés során a jelek alakja minnél kisebb mértékben változzon. Abban az esetben, ha a bemeneti és kimeneti jel időfüggvénye különbözők,

az erősítő torzít. A torzítás mértéke a **k torzítási tényezővel** fejezhető ki. Jó minőségű erősítő esetén $k \approx 0,01 \div 1\%$.

Az erősítőben, az erősítendő jeltől idegen, zavaró feszültségek is hozzáadódnak a jelhez. Ezen zavaró feszültségek nagyságrendjét fejezi ki az erősítő *zajtényezője*.

A *határértékadatok* megadják a bemeneti jelszint (feszültség, áram, teljesítmény) maximális értékét, amelyet az erősítő elegendően kis torzítással képes feldolgozni, és a kimeneti jel (feszültség, áram, teljesítmény) maximális értékét, amelyet az erősítő károsodás nélkül képes szolgáltatni.

1.2 Kisjelű erősítők

Egy négy-pólus meghatározottnak tekinthető, ha a bemeneti és kimeneti feszültsége és árama ismert. A négy-pólus négy elektromos jellemzője egymás függvénye. Bármely két adat ismeretében a másik kettő meghatározható, ha adott a négy-pólus kapcsolása. Ahoz, hogy egy tranzisztort tartalmazó áramkört négy-pólusú hálózatnak tekinthessünk, az elektromos mennyiségek között lineáris összefüggéseknek kell fennállniuk. Ez a feltétel csak akkor teljesül, ha a jelek *kis amplitúdójúak*, vagyis amikor a nonlineáritások még nem kifejezettek, és ha a tranzisztor a *normál aktív tartományban* működik, vagyis, a munkapont beállító hálózat meghatározta az aktív tartományra jellemző egyenfeszültségeket és egyenáramokat. Az erősítendő jel ezekre a munkaponti értékekre szuperponálódik. A hasznos jel csak akkora lehet, hogy hatására a munkaponti adatokhoz képest fellépő feszültség és áramváltozások között a kapcsolat lineáris maradjon (*kisjelű működés*).

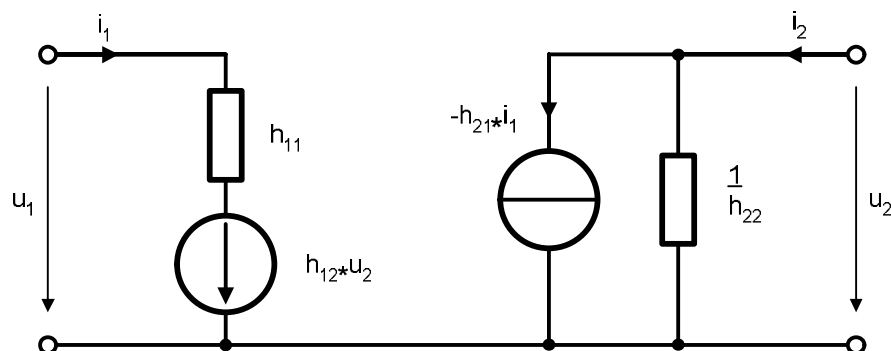
A *négy-pólusok paramétere*i olyan állandók, amelyek segítségével a kimeneti és a bemeneti jellemzők közötti függvényrendszerek felírhatók. Ezek az egyenletek a négy-pólus *karakterisztikus egyenletei*. Az egyenletrendszerek felírására és ezekből a paraméterek meghatározására több (összesen 6) lehetőség nyílik. Mivel a négy-pólusok *bármely paraméterrendszerrel* jellemezhetők, a tranzisztoros erősítők paraméterrendszerének kiválasztásakor *méréstechnikai szempontok* döntenek. Bipoláris tranzisztorok esetében, kisfrekvencián, a bemeneten az üresjárás, a kimeneten a rövidzár valósítható meg a legkönnyebben. Ehez a *hibrid paraméterrendszer* tartozik. Nagyfrekvencián a rövidzárát könnyebb megvalósítani (mérőfrekvenciára hangolt rezgőkörök segítségével). Ezért ilyenkor az *admitancia paramétereket* szokás megadni. A térvezérlésű tranzisztorok jellemzésére a legalkalmasabbak az admitancia vagy az inverz hibrid paraméterek.

A hibrid paraméteres egyenletrendszer:

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = -h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2$$

A paraméterek dimenzióját is figyelembe véve, felrajzolható a bementi és kimeneti körre érvényes *helyettesítő kép*. Helyettesítő képnek nevezünk egy olyan elektronikai számítási szempontból egyenértékű kapcsolást, amely elektromos szempontból ugyanúgy viselkedik mint a helyettesített eszköz. Általános esetben, a helyettesítő kép négy független paramétere jellemzi az eszközt. Az 1.4 ábra, a hibrid paraméteres egyenletrendszernek megfelelő helyettesítő képet szemlélteti.



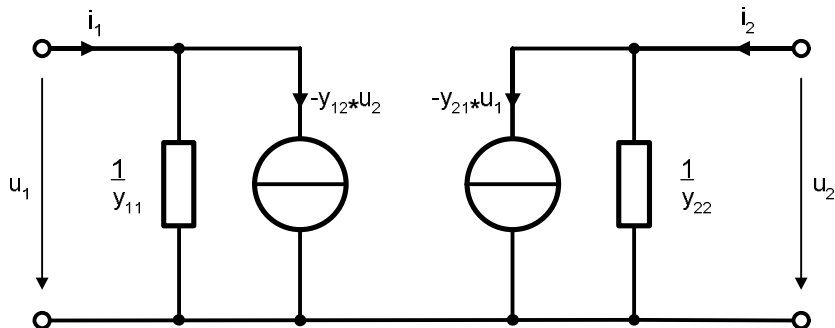
1.4 ábra Kisjelű helyettesítő kép a h paraméterek felhasználásával

Az admittancia paraméteres egyenletrendszer:

$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 - y_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = -y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2$$

Az 1.5 ábra, az admittancia paraméteres egyenletrendszernek megfelelő helyettesítő képet mutatja.

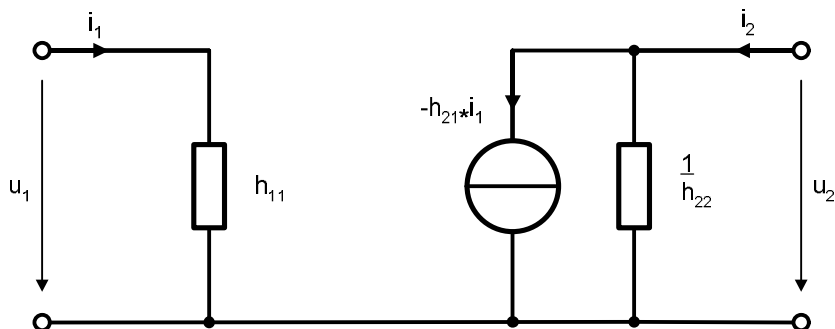


1.5 ábra Kisjelű helyettesítő kép az y paraméterek felhasználásával

A tranzisztorok három alapkapsolásban kerülnek felhasználásra. Az egyenletrendszerek és a helyettesítő képek az egyes alapkapsolásokban formailag változatlanok maradnak, de a paraméterek értékei különböznek. Ez annak tulajdonítható, hogy különböző alapkapsolásokban mást és mást tekintünk bemeneti és kimeneti villamos jellemzőknek. A paraméterek megkülönböztetésére az indexben, az alapkapsolást rövidítő kisbetűt használunk (pl. h_{21e}).

1.2.1 Erősítő alapkapsolások bipoláris tranzisztorokkal

A műszaki gyakorlatban alkalmazott tranzisztorok esetén a feszültségvisszahatást elhanyagolhatjuk ($h_{21} \approx 0$), ezért a helyettesítő kapcsolásban egyszerűsítést alkalmazunk (1.6 ábra). Az egyszerűség kedvéért a tanulmányozást a továbbiakban olyan frekvencián végezzük (pl. 1kHz), amelyen az erősítő minden eleme frekvenciafüggetlennek tekinthető.



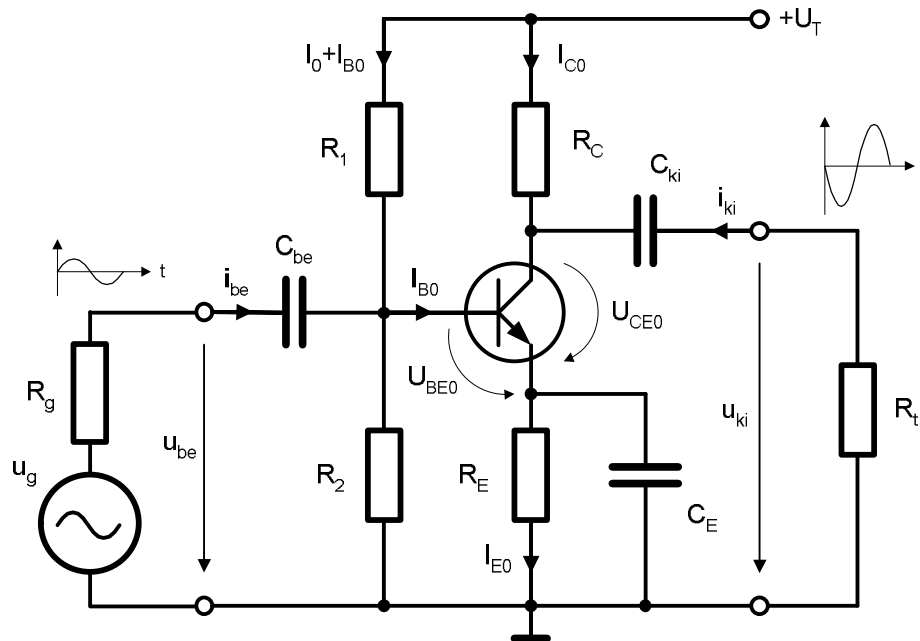
1.6 ábra Hibrid paraméteres egyszerűsített helyettesítő kép

1.2.1.1 Közös emitteres erősítőfokozat

Az 1.7 ábra egy közös emitteres erősítő kapcsolását szemlélteti. A kapcsolás bázisostós munkapont beállítási, a bemenet a bázis-emitter, a kimenet a kollektor-emitter, a közös elektróda az emitter.

A kapcsolást felépítő elemek szerepe a következő:

- R_1, R_2 munkapont beállító ellenállások
- R_E munkapont beállító, munkapont stabilizáló és munkaellenállás
- R_C munkapont beállító és munkaellenállás
- C_{be}, C_{ki} egyenfeszültség leválasztó és váltakozófeszültség csatoló kondenzátorok
- R_t terhelő ellenállás - T bipoláris tranzisztor erősítőelem - C_E váltóáramú rövidzár



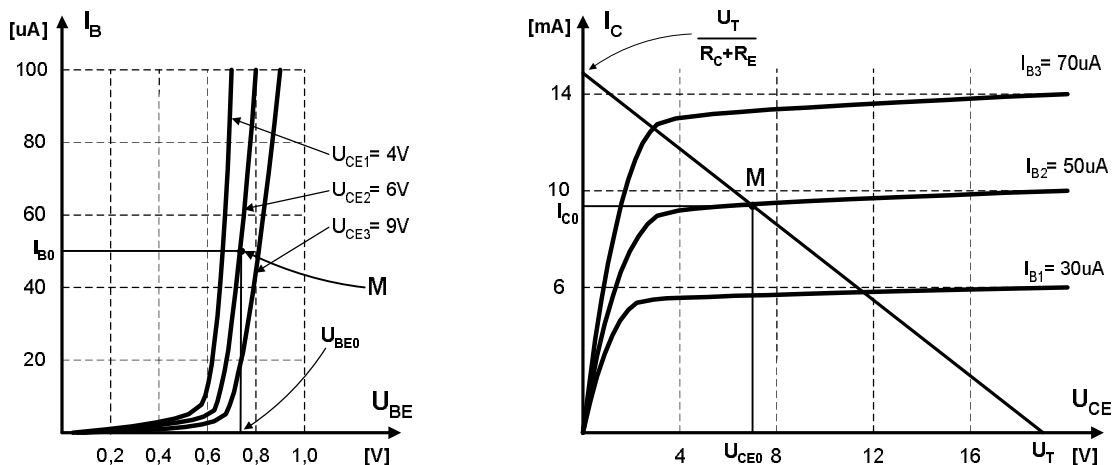
1.7 ábra Közös emitteres erősítőkapcsolás

A működés során az U_T tápegység egyenáramú teljesítményének egy része átalakul a vezérlő u_g generátor által meghatározott ütemben váltakozó áramú teljesítményé, és az így felerősített feszültséget vagy áramot az R_t terhelés használja fel.

Az 1.7 ábrán feltételezve, hogy az u_{be} bemeneti feszültség pozitív irányban nő, ez a változás változás a bemeneti csatoló kondenzátoron keresztül növeli az U_{BE0} feszültséget és az I_{B0} áramot. A bázisáram növekedése felerősítve jelentkezik a kollektorkörben, vagyis I_{C0} nő és növekszik az R_C ellenálláson eső feszültség is, ami előidézi az U_{CE0} feszültség csökkenését, amelyet a C_{ki} csatoló kondenzátor a kimenetre közvetít. Mivel az u_{ki} feszültség változása ellentétes irányú az u_{be} feszültség változásához viszonyítva, az *emitterkapcsolás fázist fordít*.

A munkaponti adatok meghatározása

A munkaponti adatokat szerkesztéssel, az alkalmazott tranzisztor karakterisztikái alapján, az egyenáramú munkaegyenes segítségével határozhatjuk meg. A szerkesztésnél, az M munkapontot a munkaegyenes közepén kell felvenni (1.8 ábra). A kimeneti áramkörre, Kirchoff törvénye alapján felírható: $U_T = I_C \cdot R_C + U_{CE} + I_E \cdot R_E$ és jó megközelítéssel: $I_E \approx I_C$



1.8 ábra A tranzisztor jelleggörbéi

Ha a tápfeszültség (U_T), a kollektorellenállás (R_C), és az emitterellenállás (R_E) értékét ismertnek tekintjük, a tranzisztor négy munkaponti adata (I_{C0} , U_{CE0} , I_{B0} , U_{BE0}) a karakterisztikákról egyszerűen leolvasható.

A tranzisztor munkapontjának beállítása

A bázisosztót alkotó két ellenállás (R_1 , R_2) értéke, a munkaponti adatok ismeretében számítással meghatározható.

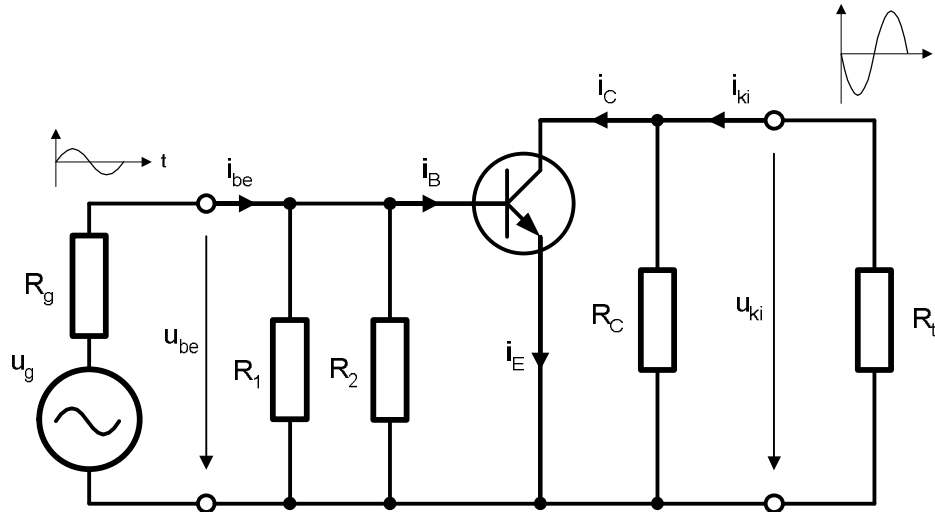
$$R1 = \frac{U_t - U_{BE0} - I_{E0} \cdot R_E}{I_0 + I_{B0}} \quad \text{és} \quad R_2 = \frac{U_{BE0} + I_{E0} \cdot R_E}{I_0}$$

A bázisosztó méretezésénél figyelembe vesszük, hogy a rajta átfolyó áram sokkal nagyobb legyen mint az I_{B0} munkaponti bázisáram. Az 1:10 arány teljesíti ezt a feltételt.

$$I_0 = 10 \cdot I_{B0}$$

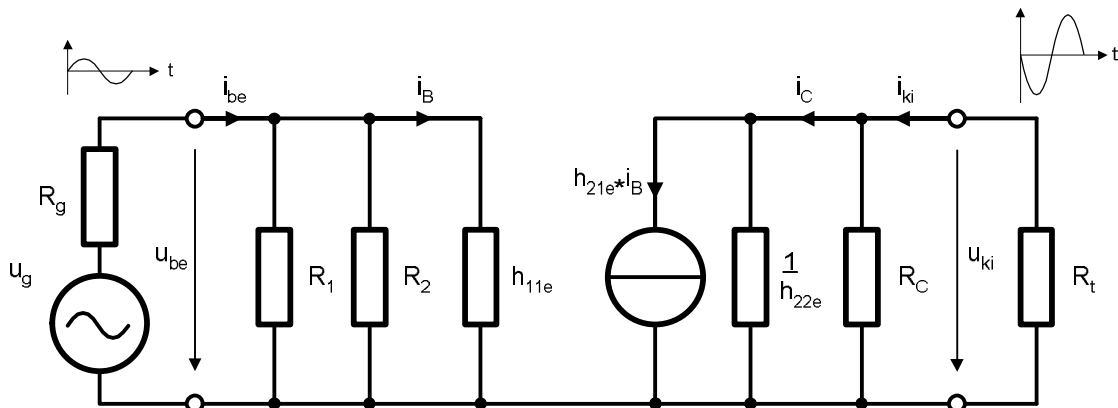
A kapcsolás feszültségerősítésének meghatározása

Az erősítő kapcsolás feszültségerősítése a hibrid paraméteres helyettesítő kép alapján számítással meghatározható. Az erősítő kapcsolás váltakozó áramú helyettesítő képe az 1.9 ábrán, hibrid paraméteres helyettesítő képe az 1.10 ábrán látható.



1.9 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás

A helyettesítő képek értelmezésénél figyelembe kell venni, hogy közepes működésű frekvencián (1 KHz) a kondenzátorok rövidzárnak tekinthetők. Váltakozó áramú szempontból a tápfeszültséget szolgáltató feszültséggenerátor szintén rövidzárnak tekinthető.



1.10 ábra Hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolás

A helyettesítő képből szereplő áramgenerátor árama a vele párhuzamosan kapcsolt három ellenállás eredőjén hozza létre az u_{ki} feszültséget. Figyelembe véve, hogy az áram iránya ellentétes a feszültség irányával:

$$u_{ki} = -h_{21e} \cdot i_B \cdot \left(\frac{1}{h_{22e}} \times R_C \times R_t \right)$$

Az u_{be} bemeneti feszültséget az i_B áram hozza létre a h_{11e} ellenálláson:

$$u_{be} = i_B \cdot h_{11e}$$

A két kapott kifejezést behelyettesítve a feszültségerősítés képletébe:

$$A_{u(e)} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} \cdot \left(\frac{1}{h_{22e}} \times R_C \times R_t \right)$$

Mivel a tranzisztor **S meredeksége**:

$$S = \frac{h_{21e}}{h_{11e}}$$

következik:

$$A_{u(e)} = -S \cdot \left(\frac{1}{h_{22e}} \times R_C \times R_t \right)$$

Abban az esetben, ha:

$$R_t \ll \frac{1}{h_{22e}}$$

kapjuk, hogy a feszültségerősítés:

$$A_{u(e)} = -S \cdot (R_C \times R_t)$$

A kapcsolás áramerősítésének meghatározása

A bemeneti áram:

$$i_{be} = \frac{u_{be}}{(R_1 \times R_2 \times h_{11e})}$$

A kimeneti áram:

$$i_{ki} = -\frac{u_{ki}}{R_t}$$

Az összefüggések helyettesítésével, kapjuk az áramerősítést:

$$A_{i(e)} = \frac{i_{ki}}{i_{be}} = A_{u(e)} \cdot \frac{R_1 \times R_2 \times h_{11e}}{R_t}$$

Mivel a bázisosztót úgy méretezik, hogy ellenállásai lényegesen nagyobbak a h_{11e} ellenállásnál, kapjuk:

$$A_{i(e)} = A_{u(e)} \cdot \frac{h_{11e}}{R_t}$$

A kapcsolás teljesítményerősítése

$$A_{p(e)} = A_{u(e)} \cdot A_{i(e)}$$

A kapcsolás bemeneti ellenállása

A bemeneti ellenállás a bemeneti feszültség és a bemeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő bemenetét lezárja, ha a meghajtó generátort nem vesszük figyelembe.

$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_{be}}$$

A hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolás elemeinek figyelembevételével:

$$r_{be(e)} = R_1 \times R_2 \times h_{11e}$$

Mivel $R_1, R_2 \gg h_{11e}$, kapjuk, hogy a bemeneti ellenállás:

$$r_{be(e)} \approx h_{11e}$$

A kapcsolás kimeneti ellenállása

A kimeneti ellenállás az üresjáratú kimeneti feszültség és a rövidzárlati kimeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő kimenetét lezárja, amikor a terhelő ellenállás nem terheli a kimenetet.

$$r_{ki} = \frac{u_{ki(i)}}{i_{ki(r)}}$$

A helyettesítő kapcsolás elemeivel:

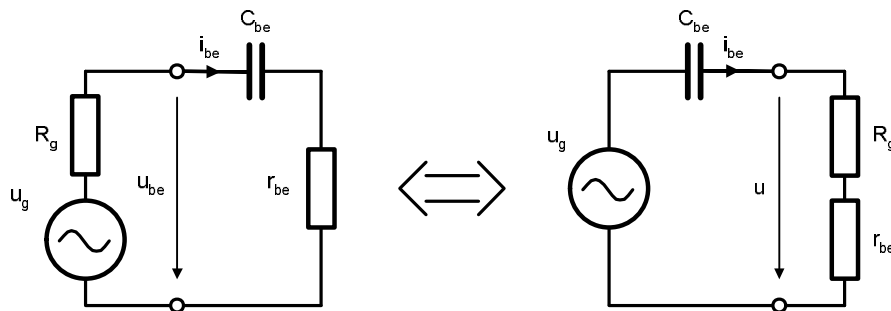
$$r_{ki(e)} = \frac{1}{h_{22e}} \times R_C$$

Alkalmazva az $R_C \ll \frac{1}{h_{22e}}$ megközelítést, kapjuk, hogy a kimeneti ellenállás:

$$r_{ki(e)} \approx R_C$$

A csatolókondenzátorok hatása és méretezése

Noha a váltakozó áramú helyettesítő kapcsolásban a csatolókondenzátorokat (C_{be} , C_{ki}) közepes frekvencián (1kHz), váltakozó áramú szempontból rövidzárnak tekintjük, alacsonyabb frekvenciákon ezek a kondenzátorok szintcsökkenést okoznak, mivel frekvenciafüggő feszültségosztót alkotnak az őket terhelő ellenállásokkal. A csatolókondenzátorok méretezése abból indul ki, hogy az erősítő alsó frekvenciáján a szintcsökkenés nem lehet nagyobb mint 3 dB. Az 1.11 ábra a bemeneti csatolókondenzátor áramkörét szemlélteti.



1.11 ábra A bemeneti csatolókondenzátor méretezése

Ha a megengedhető maximális szintcsökkenés 3 dB, akkor:

$$a_u = 20 \cdot \lg \frac{u_g}{u} = 3dB \quad \Rightarrow \quad \frac{u_g}{u} = \sqrt{2}$$

Másrészt, a feszültségosztás törvényét alkalmazva:

$$\frac{u_g}{u} = \frac{\sqrt{(r_{be} + R_g)^2 + X_{C_{be}}^2}}{r_{be} + R_g} = \sqrt{2}$$

Következik, a műveletek elvégzése után:

$$X_{C_{be}} = r_{be} + R_g$$

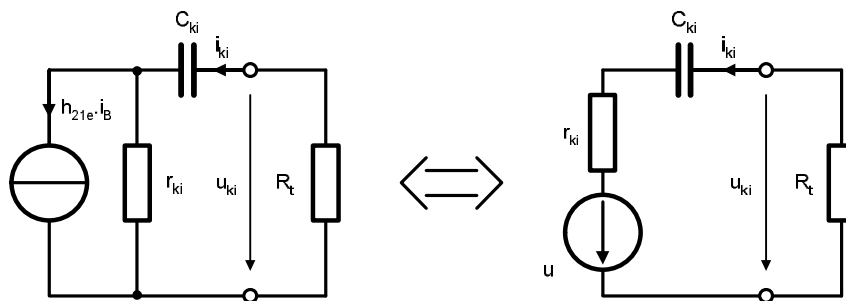
Mivel $X_{C_{be}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot C_{be}}$, a csatolókapacitás értéke:

$$C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot (r_{be} + R_g)}$$

Ha a generátor belső ellenállása elhanyagolható: $R_g \approx 0$, akkor:

$$C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot r_{be}}$$

Hasonlóképpen járunk el a kimeneti csatolókapacitás számításánál is. A kimeneti kondenzátor áramköre az 1.12 ábrán látható. Átalakítva az áramgenerátort feszültséggenerátorrá, a kapott áramkör felépítése hasonló a bemeneti csatolókapacitáshoz.



1.12 ábra A kimeneti csatolókapacitás méretezése

Hasonlóan az előző levezetéshez, a kezdeti feltételből kiszámítható a csatolókapacitás értéke:

$$C_{ki} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot (r_{ki} + R_t)}$$

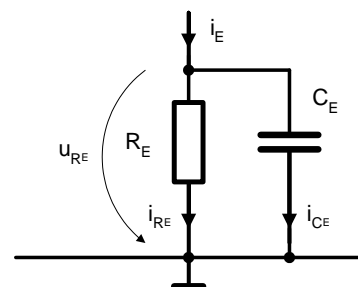
Az emitterkondenzátor hatása és méretezése

Az emitterkondenzátor reaktanciája $X_{C_E} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_E}$ nagyon kis frekvencián már nem

tekinthető rövidzárnak, hanem szakadásnak. Az emitterkondenzátor kisfrekvenciás erősítéscsökkenést okoz és ugyanakkor megnövekszik a kapcsolás bemeneti ellenállása is.

Méretezésénél az a feltétel kell teljesüljön, hogy az erősítő alsó határfrekvenciáján is jó megközelítéssel zárja rövidre az emitter ellenállást. Ez a feltétel akkor teljesül, ha $i_{C_E} \gg i_{R_E}$, vagyis legalább $i_{C_E} \approx 10 \cdot i_{R_E}$

Az 1.13 ábra szerint, kiszámolhatjuk az emitterkondenzátor kapacitásának értékét:



$$\frac{u_{R_E}}{X_{C_E}} = 10 \cdot \frac{u_{R_E}}{R_E} \Rightarrow X_{C_E} = \frac{10}{R_E}$$

1.13 ábra Emitterkondenzátor

A reaktancia összefüggésének behelyettesítése után kapjuk:

$$C_E = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot R_E}$$

Az emitterkapcsolás jellemző adatai

A közös emitteres erősítőfokozat előnyös jellemzői miatt a leggyakrabban használt tranzisztoros erősítőkapcsolás. Az igen nagy feszültségerősítés következtében a kapcsolás csak kis jelszinteket (1-10mV) tud lineárisan erősíteni. Olyan elektronikus kapcsolásokban alkalmazzák, ahol nagy feszültség- és áramerősítésre van szükség. Jellemző értékek:

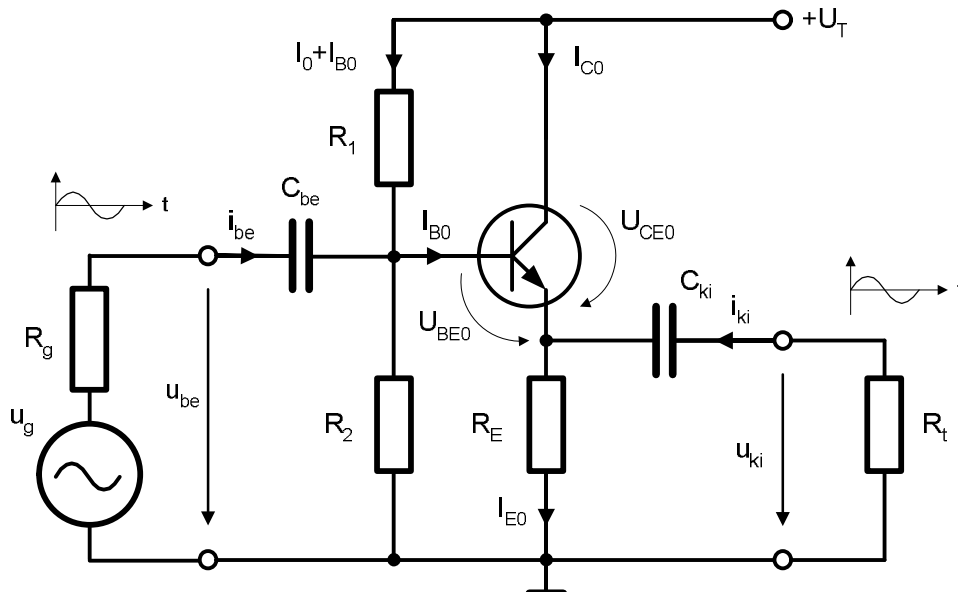
• Feszültségerősítés	nagy	40 – 200
• Áramerősítés	nagy	40 – 200
• Teljesítményerősítés	nagyon nagy	$10^3 - 10^4$
• Bemeneti ellenállás	közepes	1 – 10 kΩ
• Kimeneti ellenállás	közepes	1 – 10 kΩ

1.2.1.2 Kollektorkapcsolású (emitterkövető) erősítőfokozat

Az 1.14 ábra egy emitterkövető erősítő kapcsolását szemlélteti. A kollektor váltakozó áramú szempontból földpotenciálban van a tápfeszültség pozitív pólusával együtt. A bemeneti jelgenerátor ebben a kapcsolásban a bázis és kollektor közé csatlakozik, a kimeneti jel az emitter és kollektor elektródák között áll rendelkezésre.

A kapcsolást felépítő elemek szerepe a következő:

- R_1, R_2 munkapont beállító ellenállás
- R_E munkapont beállító, munkapont stabilizáló és munkaellenállás
- C_{be}, C_{ki} egyenfeszültség leválasztó és váltakozófeszültség csatoló kondenzátorok
- R_t terhelő ellenállás
- T bipoláris tranzisztor erősítőelem

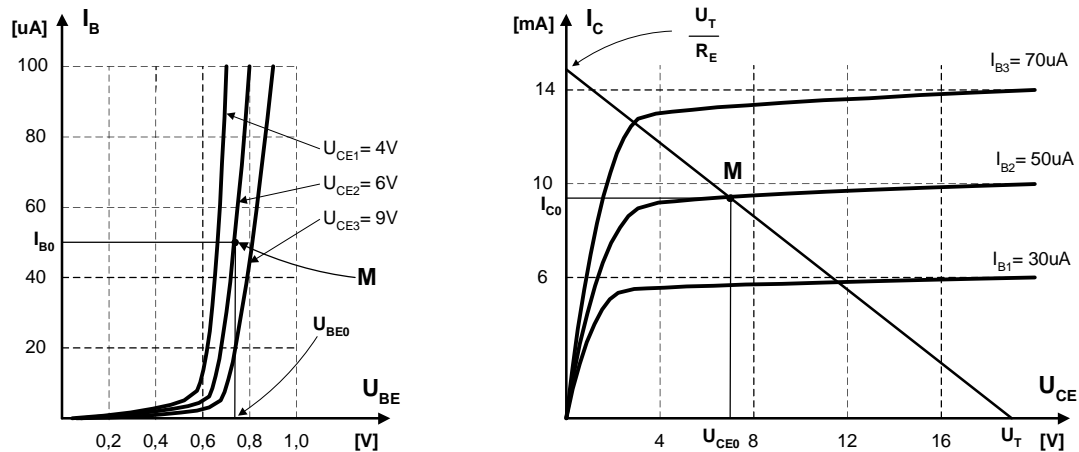


1.14 ábra Emitterkövető erősítőkapcsolás

Az 1.14 ábrán feltételezve, hogy az u_{be} bemeneti feszültség pozitív irányban nő, ez a változás a bemeneti csatolókondenzátoron keresztül növeli az U_{BE0} feszültséget és az I_{B0} áramot. A bázisáram növekedése felerősítve jelentkezik az emitterkörben, vagyis az I_{E0} növekedése előidézi az R_E ellenálláson eső feszültség növekedését, amelyet a C_{ki} csatolókondenzátor a kimenetre közvetít. A bemeneti jel az erősítőfokozaton keresztül nem szenved fázisfordítást, sőt az emitterpotenciál követi a bázispotenciált, aminek a kapcsolás emitterkövető elnevezése tulajdonítható.

A munkaponti adatok meghatározása

A munkaponti adatokat szerkesztéssel, az alkalmazott tranzisztor karakterisztikái alapján, az egyenáramú munkaegyenes segítségével határozhatjuk meg. A szerkesztésnél, az M munkapontot a munkaegyenes közepén kell felvenni (1.15 ábra), ha maximális kivezérelhetőségre törekszünk. A kimeneti áramkörre, Kirchoff törvénye alapján felírható: $U_T = U_{CE} + I_E \cdot R_E$ és: $I_E \approx I_C$



1.15 ábra A tranzisztor jelleggörbéi

Ha a tápfeszültség (U_T) és az emitterellenállás (R_E) értékét ismertnek tekintjük, a tranzisztor négy munkaponti adata (I_{C0} , U_{CE0} , I_{B0} , U_{BE0}) egyszerűen leolvasható a jelleggörbékről.

A tranzisztor munkapontjának beállítása

A bázisosztót alkotó két ellenállás (R_1 , R_2) értéke, a munkaponti adatok ismeretében számítással meghatározható.

$$R_1 = \frac{U_T - U_{BE0} - I_{E0} \cdot R_E}{I_0 + I_{B0}} \quad \text{és} \quad R_2 = \frac{U_{BE0} + I_{E0} \cdot R_E}{I_0}$$

A bázisosztó méretezésénél figyelembe vesszük, hogy a rajta átfolyó áram sokkal nagyobb legyen mint az I_{B0} munkaponti bázisáram. Az 1:10 arány teljesíti ezt a feltételt.

$$I_0 = 10 \cdot I_{B0}$$

A kapcsolás feszültségerősítésének meghatározása

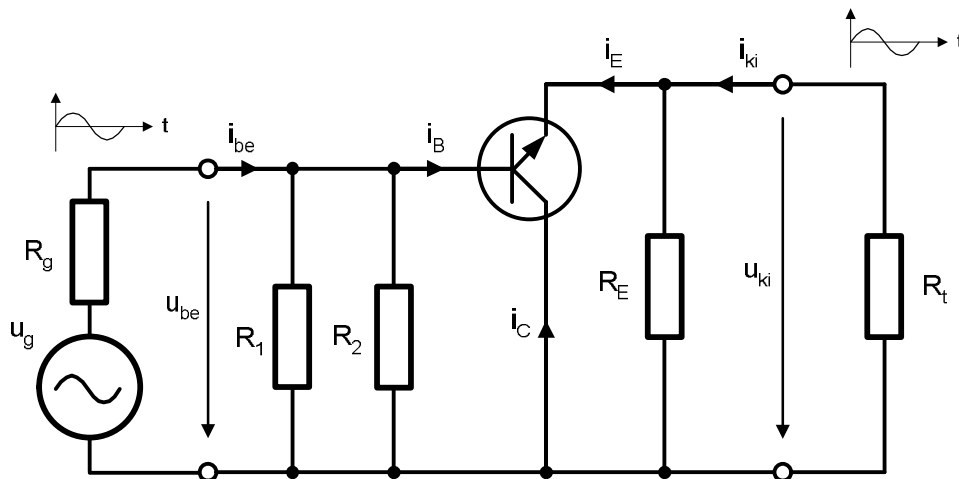
Az erősítő kapcsolás feszültségerősítése a hibrid paraméteres helyettesítő kép alapján számítással meghatározható. Az erősítő kapcsolás váltakozó áramú helyettesítő képe az 1.16 ábrán, hibrid paraméteres helyettesítő képe az 1.17 ábrán látható.

A hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolást felhasználva felírható a következő, bemeneti és kimeneti feszültségek közötti összefüggés:

$$u_{be} = u_{BE} + u_{ki}$$

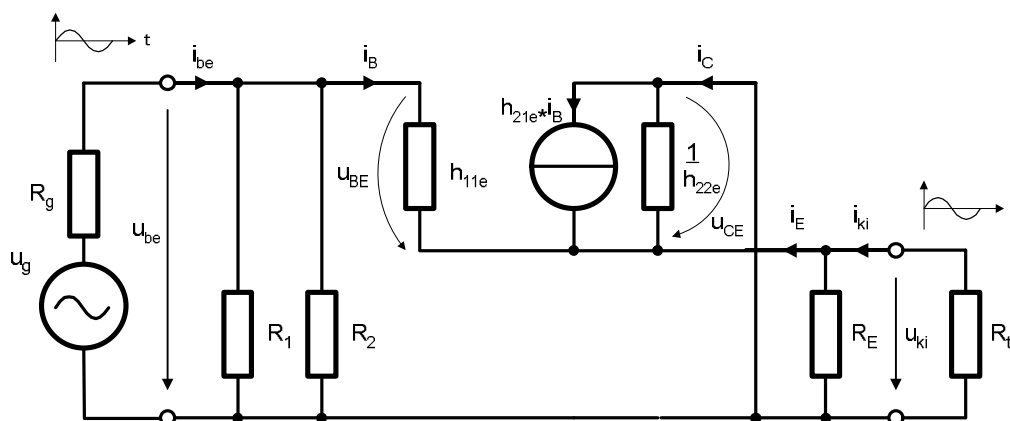
Következik, hogy a feszültségerősítés egységnyinél kisebb:

$$A_{u(c)} < 1$$



1.16 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás

A helyettesítő képek értelmezésénél figyelembe kell venni, hogy közepes működésű frekvencián (1 KHz) a kondenzátorok rövidzárnak tekinthetők. Váltakozó áramú szempontból a tápfeszültséget szolgáltatató feszültséggenerátor szintén rövidzárnak tekinthető.



1.17 ábra Hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolás

Az 1.17 ábrára felírható a bemeneti- és kimeneti feszültségek közötti összefüggés:

$$u_{be} = u_{BE} + u_{ki} = i_B \cdot h_{11e} + h_{21e} \cdot i_B \cdot \left(\frac{1}{h_{22e}} \times R_E \times R_t \right)$$

$$u_{ki} = h_{21e} \cdot i_B \cdot \left(\frac{1}{h_{22e}} \times R_E \times R_t \right)$$

A feszültségerősítés:

$$A_{u(c)} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{S \cdot \left(\frac{1}{h_{22e}} \times R_E \times R_t \right)}{1 + \left(\frac{1}{h_{22e}} \times R_E \times R_t \right)}, \quad \text{ahol } S \text{ a tranzisztor meredeksége: } S = \frac{h_{21e}}{h_{11e}}$$

Mivel jó megközelítéssel $R_t \ll \frac{1}{h_{22e}}$, következik, hogy a feszültségerősítés képlete:

$$A_{u(c)} = \frac{S \cdot (R_E \times R_t)}{1 + S \cdot (R_E \times R_t)} \approx 1$$

Megállapítható, hogy a kapcsolás feszültség erősítése megközelítően egységnyi ($\sim 0,97$) és az erősítés során *nincs fázisfordítás*.

A kapcsolás bemeneti ellenállása

A bemeneti ellenállás a bemeneti feszültség és a bemeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő bemenetét lezárja, ha a meghajtó generátort nem vesszük figyelembe.

$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_{be}}$$

A hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolás figyelembe vételével:

$$r_{be(c)} = R_1 \times R_2 \times \frac{u_{be}}{i_B}$$

Mivel: $u_{be} = u_{BE} + u_{ki} = i_B \cdot h_{11e} + i_E \cdot (R_E \times R_t) \approx i_B \cdot h_{11e} + i_B \cdot h_{21e} \cdot (R_E \times R_t)$,

következik, hogy a bemeneti ellenállás képlete:

$$r_{be(c)} = R_1 \times R_2 \times [h_{11e} + h_{21e} \cdot (R_E \times R_t)]$$

Ha figyelembe vesszük, hogy: $h_{11e} + h_{21e} \cdot (R_E \times R_t) \approx h_{21e} \cdot (R_E \times R_t)$, következik:

$$r_{be(c)} = R_1 \times R_2 \times [h_{21e} \cdot (R_E \times R_t)]$$

A kapcsolás áramerősítésének meghatározása

Mivel értelmezés szerint:

$$A_{i(c)} = \frac{i_{ki}}{i_{be}} = \frac{R_t}{\frac{u_{be}}{i_{be}}} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} \cdot \frac{r_{be}}{R_t}$$

következik:

$$A_{i(c)} = A_{u(c)} \cdot \frac{r_{be}}{R_t} \approx \frac{r_{be}}{R_t}$$

A kapcsolás teljesítményerősítése

$$A_{p(c)} = A_{u(c)} \cdot A_{i(c)}$$

A kapcsolás kimeneti ellenállása

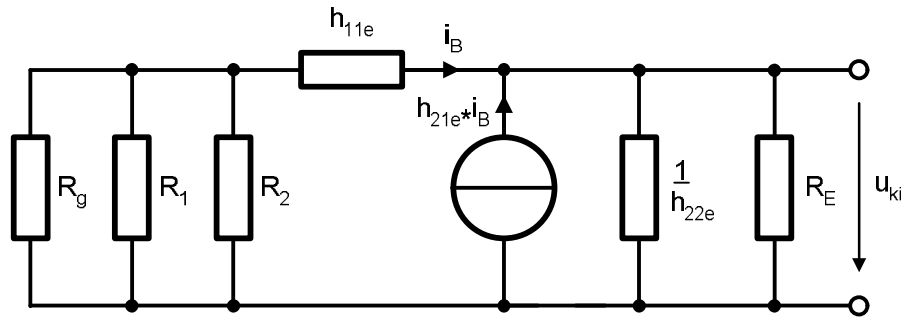
A kimeneti ellenállás az üresjárat kimeneti feszültség és a rövidzárlati kimeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő kimenetét lezárja, amikor a terhelő ellenállás nem terheli a kimenetet.

$$r_{ki} = \frac{u_{ki(i)}}{i_{ki(r)}}$$

A hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolás figyelembe vételével (1.17 ábra), az 1.18 ábrán látható helyettesítő áramkörhöz jutunk.

A helyettesítő kapcsolás elrendezése alapján:

$$r_{ki}(c) = \frac{1}{h_{22e}} \times R_E \times \frac{u_{ki}}{i_B + h_{21e} \cdot i_B}$$



1.18 ábra A kimeneti ellenállás meghatározása

Mivel:

$$u_{ki} = i_B \cdot [h_{11e} + (R_g \times R_1 \times R_2)]$$

és figyelembe véve, hogy:

$$i_B + h_{21e} \cdot i_B = (1 + h_{21e}) \cdot i_B \approx h_{21e} \cdot i_B$$

következik:

$$r_{ki}(c) = \frac{1}{h_{22e}} \times R_E \times \frac{h_{11e} + (R_g \times R_1 \times R_2)}{h_{21e}}$$

Abban az esetben, ha a generátor belső ellenállása $R_g = 0$, következik:

$$r_{ki}(c) = \frac{1}{h_{22e}} \times R_E \times \frac{h_{11e}}{h_{21e}} = \frac{1}{h_{21e}} \times R_E \times \frac{1}{S}$$

Az kollektorkapcsolás jellemző adatai

A közös kollektoros erősítőfokozat jellemzői alkalmassá teszik, hogy erősítő első, vagy utolsó fokozataként alkalmazzák. A kapcsolás nagy bemeneti és kis kimeneti ellenállása jó illesztést valósít meg a meghajtófokozat, illetve a terhelőellenállás és az erősítő között. A kapcsolás nagy kivezérelhetőségű, akár 1 V nagyságrendű jelet is képes lineárisan feldolgozni. Jellemző értékek:

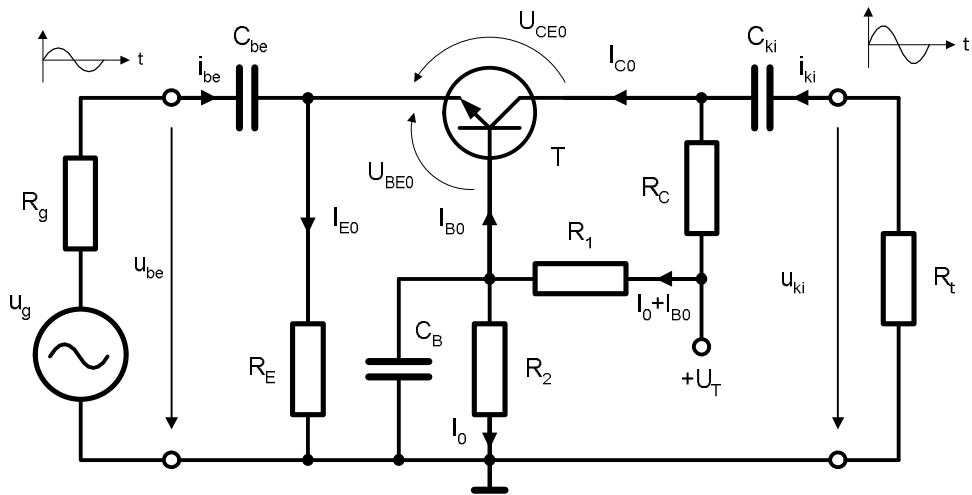
- | | | |
|------------------------|--------------|-------------|
| • Feszültségerősítés | egységnyi | 0,95 – 0,99 |
| • Áramerősítés | nagy | 10 – 100 |
| • Teljesítményerősítés | közepes | 10 – 100 |
| • Bemeneti ellenállás | közepes | 10 – 50 kΩ |
| • Kimeneti ellenállás | nagyon kicsi | 10 – 100 Ω |

1.2.1.3 Báziskapcsolású erősítőfokozat

A báziskapcsolású (közös bázisú) erősítő kapcsolása az 1.19 ábrán látható. Az egyenáramú munkapont beállítás feszültségosztós megoldású. A báziskondenzátornak köszönhetően, a bázis váltakozó áramú szempontból földpotenciálán van.

A kapcsolást felépítő elemek szerepe a következő:

- R_1, R_2 munkapont beállító ellenállások
- R_E munkapont beállító, és munkapont stabilizáló ellenállás
- R_C munkapont beállító és munkaellenállás
- C_{be}, C_{ki} egyenfeszültség leválasztó és váltakozófeszültség csatoló kondenzátorok
- R_t terhelő ellenállás - T bipoláris tranzisztor erősítőelem - C_B váltakozó áramú rövidzár

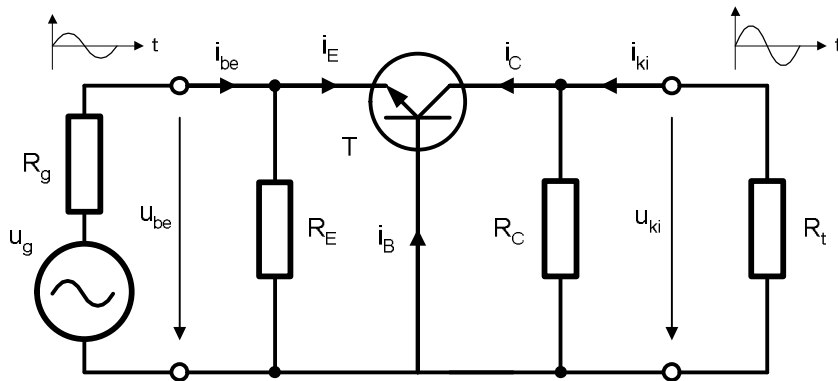


1.19 ábra Báziskapcsolású erősítőfokozat

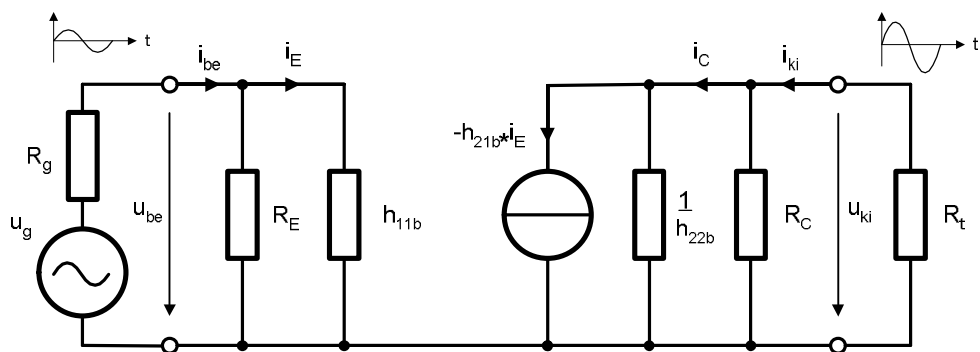
A 1.19 ábrán feltételezve, hogy az u_{be} bemeneti feszültség pozitív irányba nő, ez a változás a bemeneti csatolókapacitáson keresztül növeli az emitterpotenciált, ami az U_{BE0} bázis-emitter feszültségcsökkenéséhez vezet, mivel a bázispotenciál állandó. Ebből adódóan csökken az I_{E0} emitter- és az I_{C0} kollektoráram, ami az R_C kollektorellenálláson eső feszültség csökkenéséhez vezet. Ez a kollektorpotenciál növekedését eredményezi, és így az u_{ki} kimeneti feszültség növekszik. Megállapítható, hogy a kapcsolás *nem fordít fázist*.

Váltakozó feszültségű jellemzők

Az erősítő fokozat váltakozó áramú helyettesítő kapcsolását az 1.20 ábra, hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolását pedig az 1.21 ábra szemlélteti.



1.20 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás



1.21 ábra Hibrid paraméteres helyettesítő kapcsolás

A báziskapcsolás jellemző adatai

A közös kollektoros erősítőfokozat alkalmazása a tervezérlésű tranzisztorok széles körű elterjedésével egyre inkább háttérbe szorult a 2000-es évek elejétől. Jellemző értékek:

• Feszültségerősítés	nagy	40 - 200
• Áramerősítés	egységnél kisebb	0,2 – 0,6
• Teljesítményerősítés	közepes	10 – 120
• Bemeneti ellenállás	kicsi	10 – 100 Ω
• Kimeneti ellenállás	közepes	1 – 10 k Ω

1.2.2 Erősítő alapkapsolások tervezérlésű tranzisztorokkal

A tervezérlésű tranzisztorok különleges előnye a nagyon nagy bemeneti ellenállás, amely miatt a bemeneti áram értéke nullának tekinthető és így gyakorlatilag teljesítmény mentes vezérlést tesz lehetővé.

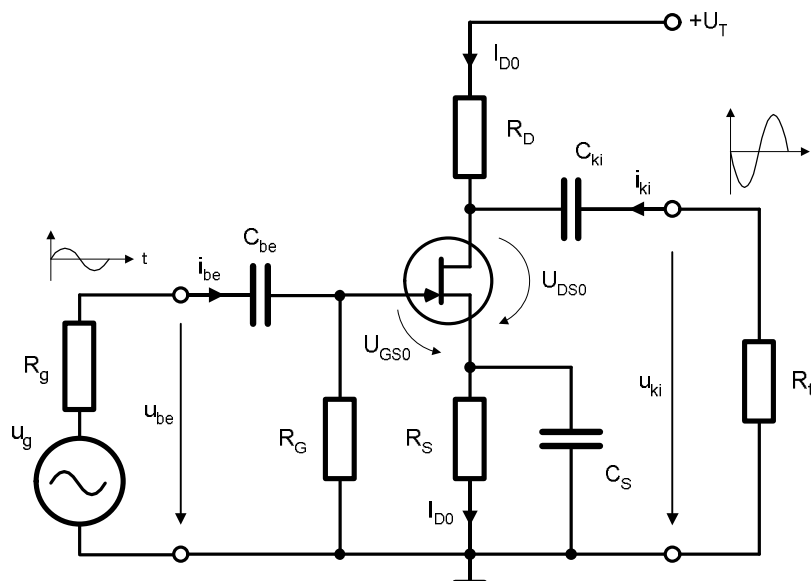
Három alapkapsolást különböztetünk meg, amelyek elnevezése a négypólus be- és kimenete szempontjából közös elektródára utal.

1.2.2.1 Source kapcsolású erősítőfokozat

Az 1.22 ábra egy záróréteges tervezérlésű tranzisztorral (JFET) kivitelezett erősítőfokozat felépítését szemlélteti. A kapcsolás bemenete a gate-source, a kimenet a drain-source, a közös elektróda a source.

A kapcsolást felépítő elemek szerepe a következő:

- R_G munkapont beállító ellenállás
- R_S munkapont beállító és munkapont stabilizáló ellenállás
- R_D munkapont beállító és munkaellenállás
- C_{be} , C_{ki} egyenfeszültség leválasztó és váltakozófeszültség csatoló kondenzátorok
- R_t terhelő ellenállás - T bipoláris tranzisztor erősítőelem - C_s váltóáramú rövidzár
- R_g a jelgenerátor belső ellenállása



1.22 ábra Source kapcsolású erősítőfokozat

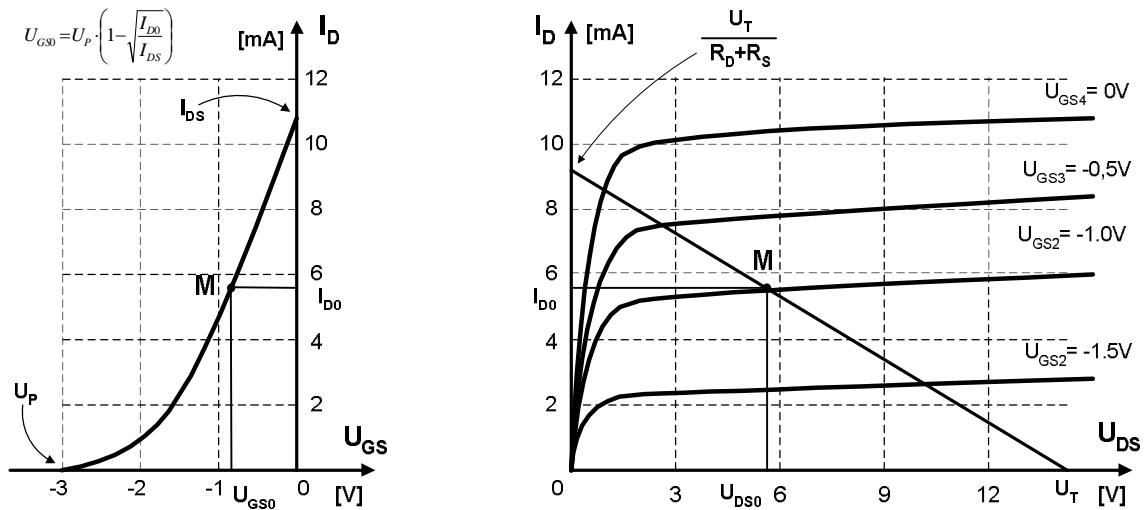
A működés során az U_T tápegység egyenáramú teljesítményének egy része átalakul a vezérlő u_g generátor által meghatározott ütemben váltakozó áramú teljesítményé, és az így felerősített feszültséget, vagy áramot az R_t terhelés használja fel.

Az 1.22 ábrán feltételezve, hogy az u_{be} bemeneti feszültség pozitív irányban nő, ez a változás változás a bemeneti csatolókondenzátoron keresztül növeli az U_{GS0} záróirányú feszültséget és ezzel az I_{D0} csatornaáramot. A csatornaáram növekedése előidézi az R_D ellenálláson eső feszültség növekedését is, ami előidézi az U_{DS0} feszültség csökkenését, amelyet a C_{ki} csatolókondenzátor a kimenetre közvetít. Mivel az u_{ki} feszültség változása ellentétes irányú az u_{be} feszültség változásához viszonyítva, a *source kapcsolás fázist fordít*.

A munkaponti adatok meghatározása

A munkaponti adatokat szerkesztéssel, az alkalmazott tranzisztor karakterisztikái alapján, az egyenáramú munkaegyenes segítségével határozhatjuk meg. A szerkesztésnél, az M munkapontot a munkaegyenes közepén kell felvenni (1.23 ábra), ha maximális kivezérelhetőségre törekszünk.

Ha a tápfeszültséget (U_T) és az egyenáramú munkaellenállások összértékét ($RE=R_D+R_S$) ismertnek tekintjük, a tranzisztor három munkaponti adata (I_{D0} , U_{DS0} , U_{GS0}) leolvasható a jelleggörbéről.



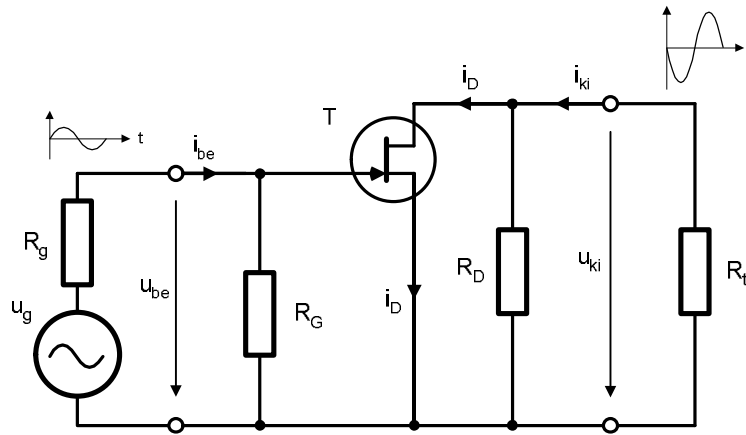
1.23 ábra A záróréteges n-JFET tranzisztor jelleggörbéi

A két munkapont beállító ellenállás értéke (R_D , R_S) a munkaponti adatok ismeretében számítással meghatározható:

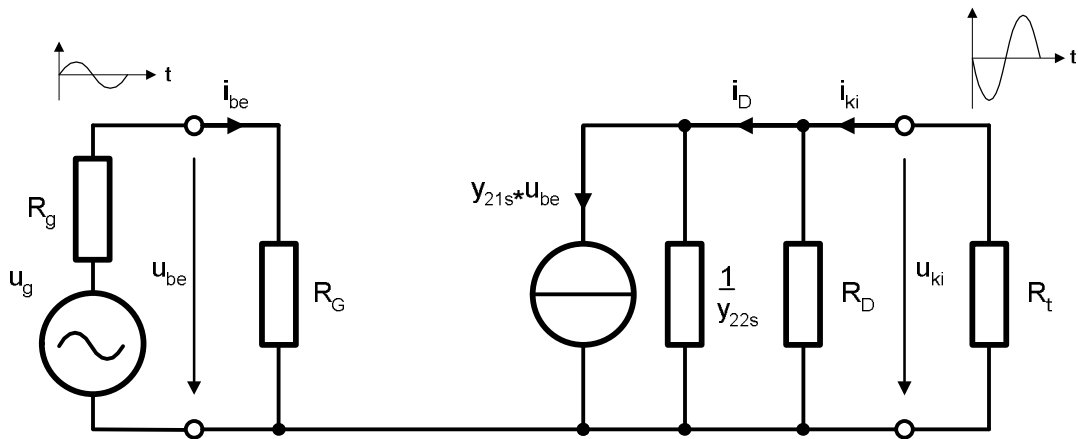
$$R_S = \frac{U_{S0}}{I_{D0}} = \frac{|U_{GS0}|}{I_{D0}} \quad \text{és} \quad R_D = RE - R_S$$

A kapcsolás feszültségerősítésének meghatározása

Az erősítő kapcsolás feszültségerősítése az admittancia paraméteres helyettesítő kép alapján számítással meghatározható. Az erősítő kapcsolás váltakozó áramú helyettesítő képe az 1.24 ábrán, hibrid paraméteres helyettesítő képe az 1.25 ábrán látható. A helyettesítő képek értelmezésénél figyelembe kell venni, hogy közepes működésű frekvencián (1 KHz) a kondenzátorok rövidzárnak tekinthetők. Váltakozó áramú szempontból a tápfeszültséget szolgáltató feszültséggenerátor szintén rövidzárnak tekinthető.



1.24 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás



1.25 ábra Admitanciaparaméteres helyettesítő kapcsolás

A helyettesítő képben szereplő áramgenerátor árama a vele párhuzamosan kapcsolt három ellenállás eredőjén hozza létre az u_{ki} feszültséget. Figyelembe véve, hogy az áram iránya ellentétes a feszültség irányával:

$$u_{ki} = -y_{21s} \cdot u_{be} \cdot \left(\frac{1}{y_{22s}} \times R_D \times R_t \right)$$

A kapott kifejezést behelyettesítve a feszültségerősítés képletébe:

$$A_{u(s)} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -y_{21s} \cdot \left(\frac{1}{y_{22s}} \times R_D \times R_t \right)$$

Abban az esetben, ha:

$$R_t \ll \frac{1}{y_{22s}}$$

a következő összefüggést kapjuk, a feszültségerősítésre:

$$A_{u(s)} = -y_{21s} \cdot (R_D \times R_t)$$

A kapcsolat áramerősítésének meghatározása

A bemeneti áram:

$$i_{be} = \frac{u_{be}}{R_G}$$

A kimeneti áram:

$$i_{ki} = -\frac{u_{ki}}{R_t}$$

Az összefüggések helyettesítésével, kapjuk az áramerősítést:

$$A_{i(s)} = \frac{i_{ki}}{i_{be}} = A_{u(s)} \cdot \frac{R_G}{R_t}$$

A kapcsolás teljesítményerősítése

$$A_{p(s)} = A_{u(s)} \cdot A_{i(s)}$$

A kapcsolás bemeneti ellenállása

A bemeneti ellenállás a bemeneti feszültség és a bemeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő bemenetét lezárja, ha a meghajtó generátort nem vesszük figyelembe.

$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_{be}}$$

Az admittancia paraméteres helyettesítő kapcsolás elemeinek figyelembevételével:

$$r_{be(s)} = R_G$$

A kapcsolás kimeneti ellenállása

A kimeneti ellenállás az üresjáratú kimeneti feszültség és a rövidzárlati kimeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő kimenetét lezárja, amikor a terhelő ellenállás nem terheli a kimenetet.

$$r_{ki} = \frac{u_{ki(i)}}{i_{ki(r)}}$$

A helyettesítő kapcsolás elemeivel:

$$r_{ki(s)} = \frac{1}{y_{22s}} \times R_D$$

A csatolókondenzátorok hatása és méretezése

Noha a váltakozó áramú helyettesítő kapcsolásban a csatolókondenzátorokat (C_{be} , C_{ki}) közepes frekvencián (1kHz), váltakozó áramú szempontból rövidzárnak tekintjük, alacsonyabb frekvenciákon ezek a kondenzátorok szintcsökkenést okoznak, mivel frekvenciafüggő feszültségosztót alkotnak az őket terhelő ellenállásokkal. A csatolókondenzátorok méretezése abból indul ki, hogy az erősítő alsó frekvenciáján a szintcsökkenés nem lehet nagyobb mint 3 dB.

A bipoláris tranzisztoros erősítőkapcsolásoknál levezetett összefüggések alapján, a bemeneti csatolókondenzátor kapacitásának értéke:

$$C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot (r_{be} + R_g)}$$

Ha a generátor belső ellenállása elhanyagolható: $R_g \approx 0$, akkor:

$$C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot r_{be}}$$

Hasonlóképpen járunk el a kimeneti csatolókondenzátor számításánál is.

$$C_{ki} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot (r_{ki} + R_t)}$$

Az source-kondenzátor hatása és méretezése

Az source-kondenzátor reaktanciája $X_{C_s} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_s}$ kis frekvencián már nem tekinthető

rövidzárnak. Méretezésénél az a feltétel kell teljesüljön, hogy az erősítő alsó határfrekvenciáján is jó megközelítéssel zárja rövidre az emitter ellenállást. A bipoláris tranzisztoros erősítőkapcsolásoknál levezetett összefüggések felhasználásával:

$$C_s = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot R_s}$$

Az sourcekapcsolás jellemző adatai

A sourcekapcsolású erősítőfokozatot olyan elektronikus áramkörökben alkalmazzák, ahol nagy bemeneti ellenállásra van szükség és megfelel a közepes feszültségerősítés. Jellemző értékek:

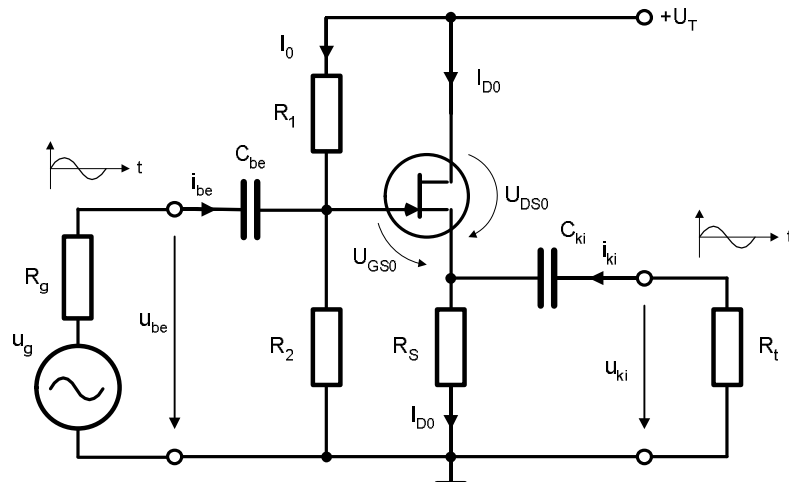
• Feszültségerősítés	közepes	5 – 10
• Áramerősítés	nagy	100 – 5000
• Teljesítményerősítés	nagy	$10^2 - 10^4$
• Bemeneti ellenállás	nagy	1 – 10 MΩ
• Kimeneti ellenállás	közepes	1 – 10 kΩ

1.2.1.2 Drainkapcsolású (source-követő) erősítőfokozat

Az 1.26 ábra egy n csatornás záróréteges térvezérlésű tranzisztorral (JFET) megvalósított source-követő erősítő kapcsolását szemlélteti. A drain váltakozó áramú szempontból földpotenciálon van a tápfeszültség pozitív pólusával együtt. A bemeneti jelgenerátor ebben a kapcsolásban a gate és drain közé csatlakozik, a váltakozó áramú kimeneti jel a source és drain elektródák között áll rendelkezésre.

A kapcsolást felépítő elemek szerepe a következő:

- R_1, R_2 munkapont beállító ellenállás
- R_s munkapont beállító, munkapont stabilizáló és munkaellenállás
- C_{be}, C_{ki} egyenfeszültség leválasztó és váltakozófeszültség csatoló kondenzátorok
- R_t terhelő ellenállás - R_g a jelgenerátor belső ellenállása
- T JFET tranzisztor mint erősítőelem



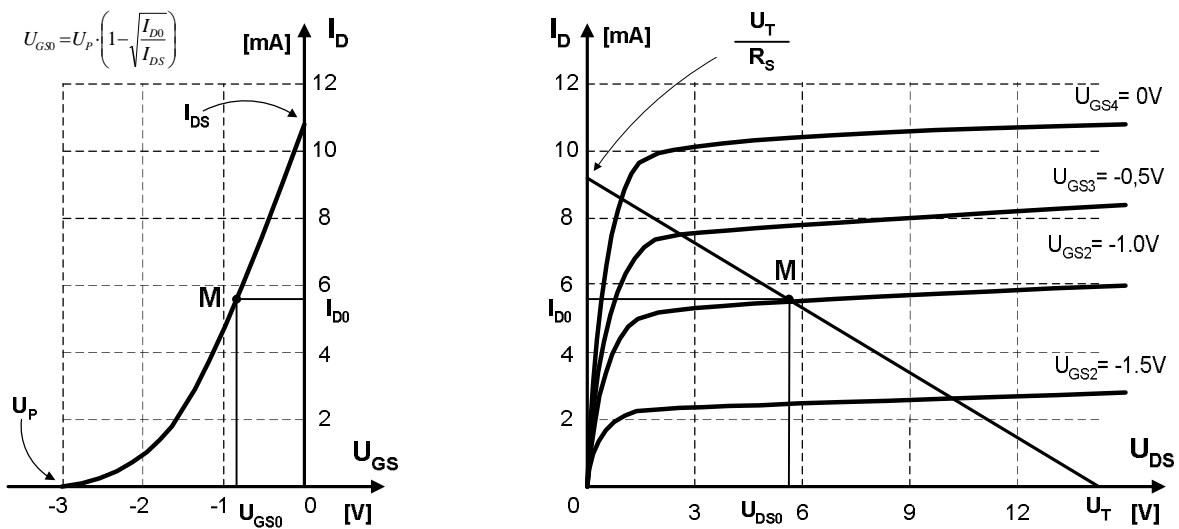
1.26 ábra Source-követő erősítőkapcsolás

Az 1.26 ábrán feltételezve, hogy az u_{be} bemeneti feszültség pozitív irányban nő, ez a változás a bemeneti csatolókondenzátoron keresztül csökkenti az U_{GS0} záróirányú feszültséget és emiatt az I_{D0} csatornaáram növekszik. A csatornaáram növekedése előidézi az R_S ellenálláson eső feszültség növekedését, amelyet a C_{ki} csatolókondenzátor a kimenetre közvetít. A bemeneti jel az erősítőfokozaton keresztül nem szenved fázisfordítást, mivel az u_{ki} feszültség változása követi az u_{be} feszültség változását (source követő).

A munkaponti adatok meghatározása

A kapcsolás munkapont beállítása gate osztós megoldású a nagyobb kivezérelhetőség elérése érdekében. A munkaponti adatokat szerkesztéssel, az alkalmazott tranzisztor karakterisztikái alapján, az egyenáramú munkaegyenes segítségével határozhatjuk meg. A szerkesztésnél, az M munkapontot a munkaegyenes közepén kell felvenni (1.27 ábra), ha maximális kivezérelhetőségre törekszünk. Mivel a kapcsolás egyenáramú munkaellenállása ebben az esetben R_S , a kimeneti áramkörre, Kirchhoff törvénye alapján felírható:

$$U_T = U_{SD} + I_D \cdot R_S$$



1.27 ábra A tranzisztor jelleggörbéi

Ha a tápfeszültség (U_T) és a source-ellenállás (R_S) értékét ismertnek tekintjük, a tranzisztor három munkaponti adata (I_{D0} , U_{DS0} , U_{GS0}) egyszerűen leolvasható a jelleggörbékről.

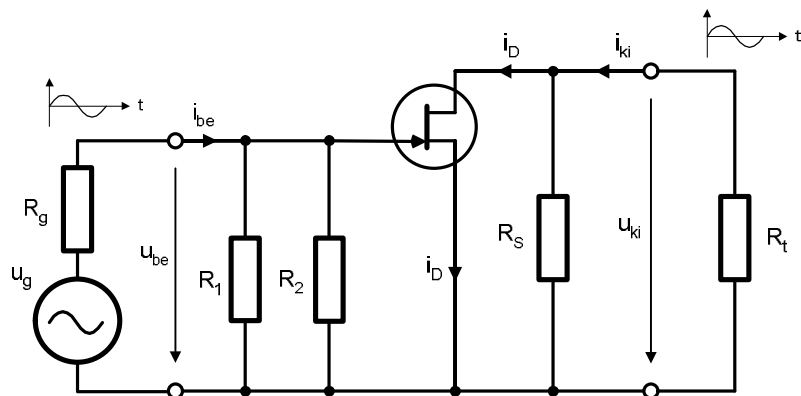
A tranzisztor munkapontjának beállítása

A bázisosztót alkotó két ellenállás (R_1 , R_2) értéke, a munkaponti adatok ismeretében számítással meghatározható.

$$R_1 = \frac{U_T - U_{GS0} - I_{D0} \cdot R_S}{I_0} \quad \text{és} \quad R_2 = \frac{U_{GS0} + I_{D0} \cdot R_S}{I_0}, \quad \text{mivel } I_0 \gg I_{G0}$$

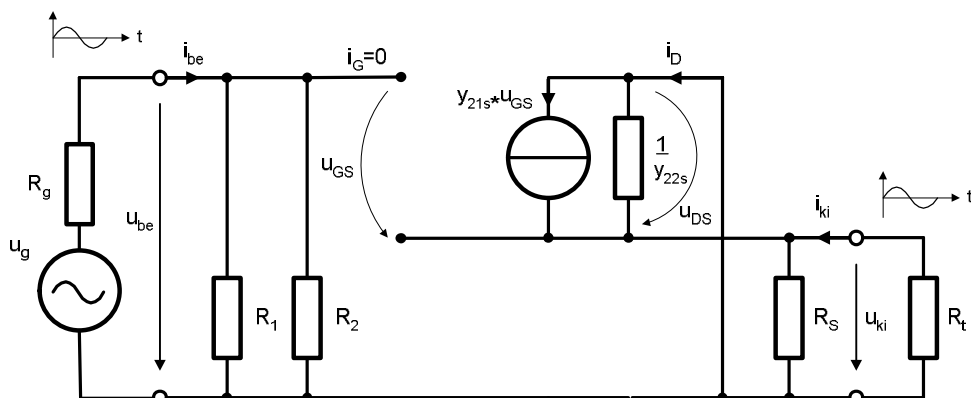
A kapcsolás feszültségerősítésének meghatározása

Az erősítő kapcsolás feszültségerősítése az admittancia paraméteres helyettesítő kép alapján számítással meghatározható. Az erősítő kapcsolás váltakozó áramú helyettesítő képe az 1.28 ábrán, admittancia paraméteres helyettesítő képe az 1.29 ábrán látható.



1.28 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás

A helyettesítő képek értelmezésénél figyelembe kell venni, hogy közepes működésű frekvencián (1 KHz) a kondenzátorok rövidzárnak tekinthetők. Váltakozó áramú szempontból a tápfeszültséget szolgáltató feszültséggenerátor szintén rövidzárnak tekinthető.



1.29 ábra Admittancia paraméteres helyettesítő kapcsolás

A helyettesítő kapcsolásban szereplő áramgenerátor árama a vele párhuzamosan kapcsolt három ellenállás eredőjén hozza létre az u_{ki} feszültséget. Az 1.29 ábra alapján felírható a bemeneti- és kimeneti feszültségek közötti összefüggés:

$$u_{ki} = y_{21s} \cdot u_{GS} \cdot \left(\frac{1}{y_{22s}} \times R_s \times R_t \right)$$

$$u_{be} = u_{GS} + u_{ki}$$

Az u_{GS} értékét kiemelve a fenti egyenletekből, kapjuk, hogy a feszültségerősítés:

$$A_{u(d)} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{y_{21s} \cdot \left(\frac{1}{y_{22s}} \times R_s \times R_t \right)}{1 + y_{21s} \cdot \left(\frac{1}{h_{22s}} \times R_D \times R_t \right)}$$

A kapcsolás áramerősítésének meghatározása

Jó megközelítéssel:

$$A_{i(d)} = \frac{i_{ki}}{i_{be}} = \frac{R_t}{u_{be}} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} \cdot \frac{r_{be}}{R_t}$$

A kapcsolás teljesítményerősítése

$$A_{p(d)} = A_{u(d)} \cdot A_{i(d)}$$

A kapcsolás bemeneti ellenállása

A bemeneti ellenállás a bemeneti feszültség és a bemeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő bemenetét lezárja, ha a meghajtó generátort nem vesszük figyelembe.

$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_{be}}$$

Az admittancia paraméteres helyettesítő kapcsolás figyelembe vételével:

$$r_{be(c)} = R_1 \times R_2 \times \frac{u_{be}}{i_B}$$

Mivel a tranzisztor bemeneti ellenállása: $r_{GS} = \frac{u_{be}}{i_G} \rightarrow \infty$,

következik, hogy a bemeneti ellenállás képlete:

$$r_{be(d)} = R_1 \times R_2$$

A kapcsolás kimeneti ellenállása

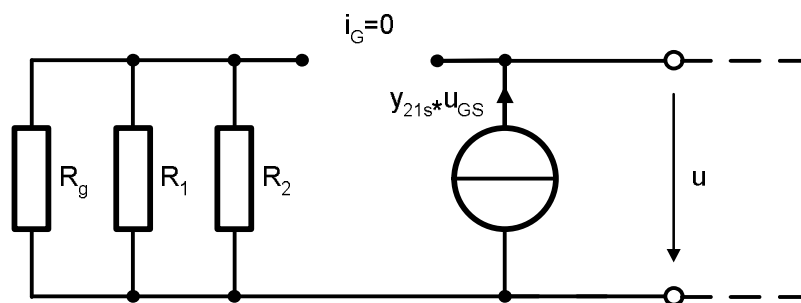
A kimeneti ellenállás az üresjáratú kimeneti feszültség és a rövidzárlati kimeneti áram hányadosa, vagyis az az ellenállás, amely az erősítő kimenetét lezárja, amikor a terhelő ellenállás nem terheli a kimenetet.

$$r_{ki} = \frac{u_{ki(i)}}{i_{ki(r)}}$$

Az admittancia paraméteres helyettesítő kapcsolás figyelembe vételével (1.29 ábra), az 1.30 ábrán látható helyettesítő áramkörhöz jutunk.

A helyettesítő kapcsolás elrendezése alapján:

$$r_{ki}(d) = \frac{1}{y_{22s}} \times R_S \times \frac{u_{GS}}{y_{21s} \cdot u_{GS}}$$



1.30 ábra A belső áramkör kimeneti ellenállásának meghatározása

Következik:

$$r_{ki}(d) = \frac{1}{y_{22s}} \times R_S \times \frac{1}{y_{21s}}$$

A drain-kapcsolás jellemző adatai

A source-követő erősítőfokozat olyan elektronikus áramkörökben kerül alkalmazásra, ahol nagy bemeneti és kis kimeneti ellenállásra van szükség, egységnyi feszültségerősítés mellett. Jellemző értékek:

• Feszültségerősítés	egységnyi (<1)	0,5 – 0,9
• Áramerősítés	nagy	100 – 5000
• Teljesítményerősítés	nagy	100 – 4500
• Bemeneti ellenállás	nagy	1 – 10 MΩ
• Kimeneti ellenállás	kicsi	100 – 1000 Ω

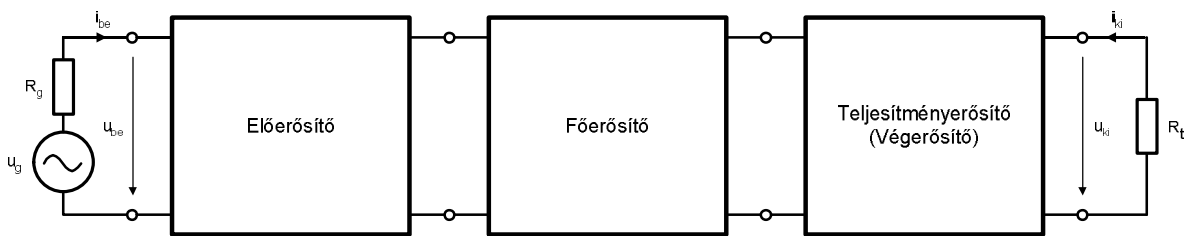
1.3 Többfokozatú erősítők

A gyakorlati alkalmazások által igényelt igen nagy feszültségerősítést egyetlen erősítőfokozat általában nem képes teljesíteni. A nagy erősítés és az egyéb jellemzők biztosítása csak több, megfelelő típusú erősítőfokozat láncba kapcsolásával valósítható meg.

1.3.1 Felépítés

Ha az erősítőfokozatokat egymás után kapcsolt négy pólusoknak tekintjük (1.31 ábra), akkor három fő részt különböztethetünk meg:

- előerősítő: a bemeneti jelet optimálisan illeszti, erősítése rendszerint kicsi
- főerősítő: a szükséges feszültségerősítést biztosítja
- teljesítményerősítő: a kimenetet illeszti a terheléshez és teljesítményerősítést végez



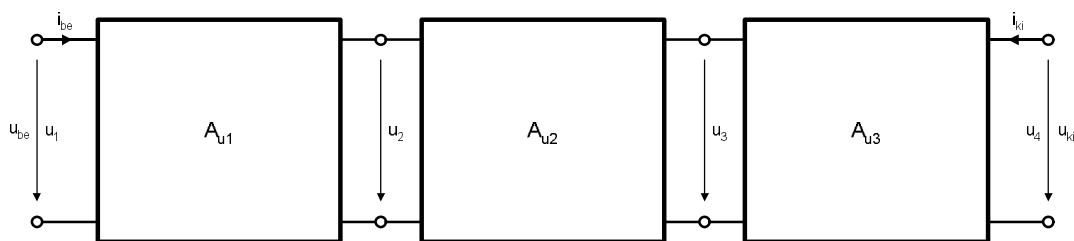
1.31 ábra Többfokozatú erősítő felépítése

A továbbiakban a főerősítő felépítésével foglalkozunk, amely a megfelelő feszültségerősítés biztosítása érdekében, több erősítőfokozatból áll. Az 1.32 ábrán látható főerősítő, például három erősítőfokozatból áll. Az eredő feszültségerősítés (A_u), az egyes fokozatok feszültségerősítésének (A_{u1} , A_{u2} , A_{u3}) szorzatával egyenlő.

$$A_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{u_2}{u_1} \cdot \frac{u_3}{u_2} \cdot \frac{u_4}{u_3} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3}$$

A logaritmikus egységekben (dB) kifejezett feszültségerősítések *összeadódnak*:

$$a_u = a_{u1} + a_{u2} + a_{u3} \quad [\text{dB}]$$



1.32 ábra A főerősítő felépítése

1.3.2 Erősítőfokozatok csatolása

Erősítőfokozatok csatolásának nevezzük azt a folyamatot, amely során az egyikfokozat kimenetéről villamos jelet viszünk át a következő fokozat bemenetére. A csatolás felépítése alapján osztályozhatjuk:

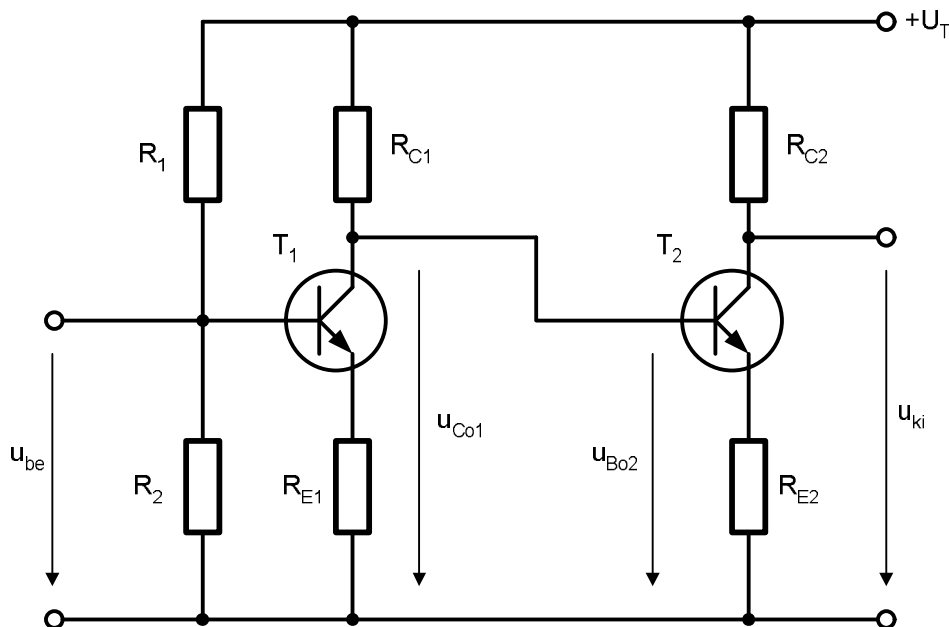
- közvetlen (galvanikus) csatolás: egyenáramú jelátvitel (DC erősítők)
- kapacitív csatolás: jelátvitel RC-taggal (AC erősítők)
- induktív csatolás: jelátvitel transzformátorral

1.3.2.1 Közvetlen csatolás

A jelátvitel minőségét, az alsó frekvencia határát (f_a) és az erősítő stabilitását figyelembe véve, a közvetlen csatolás a többfokozatú erősítők legkedvezőbb csatolási módja. Ez az egyetlen csatolási mód az egyenfeszültségű jelek erősítésére, de ugyanakkor a váltakozó feszültségű jelek erősítésére is alkalmas.

a) Közvetlen csatolás rövidzárral

Az 1.33 ábrán látható rövidzárral történő csatolás előnye, hogy a jel, a fokozatok közötti csillapítás nélkül kerül továbbításra és csak az első fokozat tranzisztora igényel bázispotenciál-beállító ellenállásokat. A csatolás hátránya a munkapont eltolódása, ami a második fokozat erősítéscsökkenéséhez vezet. Ráadásul a második fokozat kivezérelhetősége is csökken.

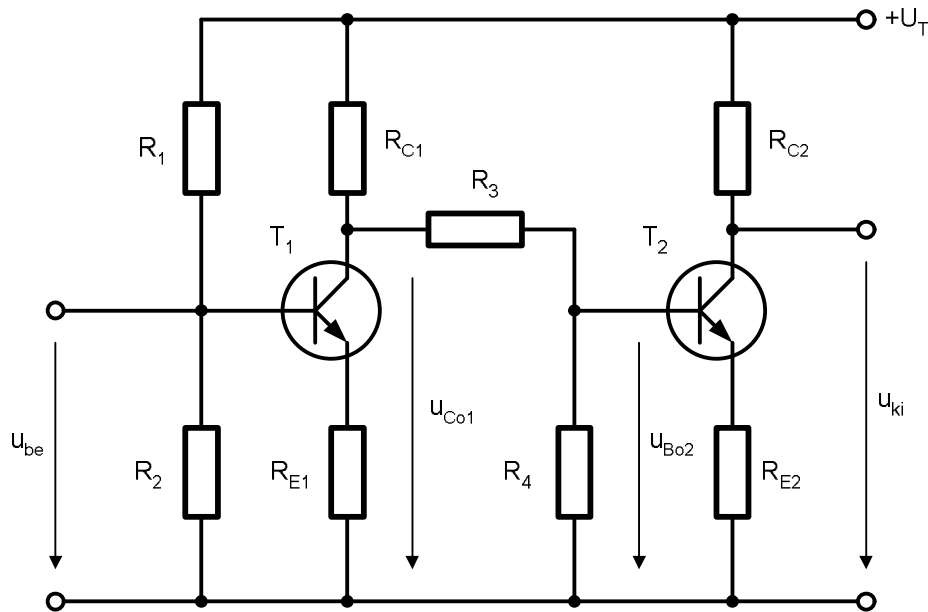


1.33 ábra Közvetlen csatolás rövidzárral

b) Közvetlen csatolás feszültségosztós szinttelővel

A szinttelő áramkörök, az egyes fokozatok közé kapcsolva úgy hozzák létre a szükséges egyenfeszültség esést (megakadályozva ezzel a munkapont eltolódást), hogy közben a felerősítendő jelet minimális mértékben csillapítják.

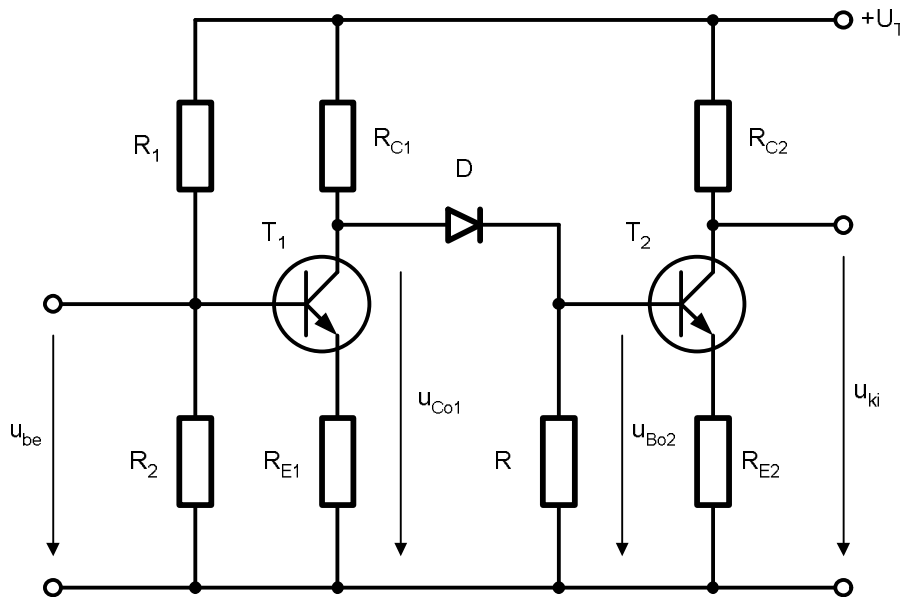
Az 1.34 ábrán látható szinttelő megakadályozza ugyan a munkapont eltolódását, de az erősítendő jelet is osztási arányának függvényében leosztja.



1.34 ábra Közvetlen csatolás feszültségosztós szinteltolóval

c) Közvetlen csatolás diódás szinteltolóval

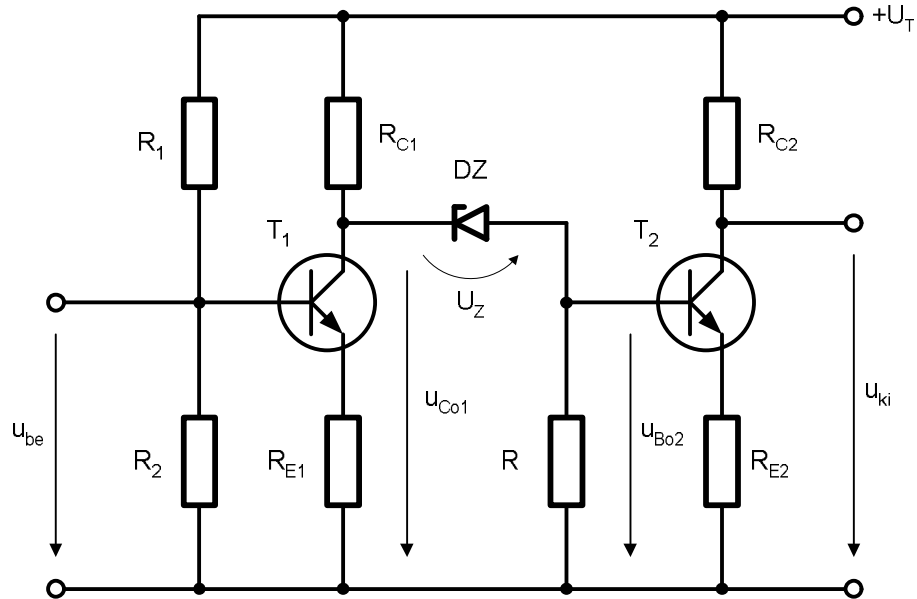
Az 1.35 ábrán látható szinteltoló csak kis egyenfeszültség különbségek esetén alkalmazható eredményesen, mivel az egyenfeszültségű szinteltolás mértéke kicsi, megegyezik a dióda nyitóirányú feszültségesésével ($\approx 0,6V_{CC}$). Több diódát sorbakapcsolva 2-3 V-ig hozható létre szinteltolás az átviteli jellemzők jelentősebb romlása nélkül. A megoldás előnye, hogy a váltakozó feszültségű jelet csillapítás nélkül továbbítja, mivel a dióda kis értékű differenciális ellenállásán elhanyagolható feszültségesés jön létre.



1.35 ábra Közvetlen csatolás diódás szinteltolóval

d) Közvetlen csatolás Zener diódás szinteltolóval

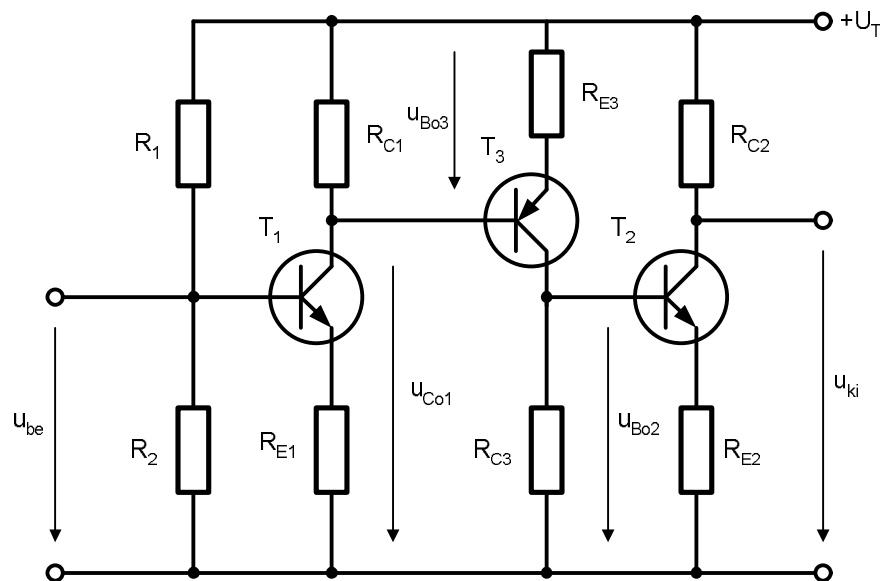
Az 1.36 ábrán bemutatott áramör nagyobb szinteltolásra alkalmas. Az R ellenállás a Zener dióda munkapontját a letörési tartományban állítja be, így a diódán, a Zener feszültséggel azonos feszültségesés jön létre. Noha a Zener dióda differenciális ellenállása nagyon kicsi, ezért a hasznos jelet csillapítás nélkül viszi át, a kapcsolás hátránya, hogy a Zener-letörési jelenségek következtében a dióda nagy zajtényezővel rendelkezik, ezért nagy erősítésű fokozatoknál nem célszerű az alkalmazása.



1.36 ábra Közvetlen csatolás Zener diódás szinteltolóval

e) Közvetlen csatolás tranzisztoros szinteltolóval

A tranzisztoros szinteltolók magasabb követelményeket elégítenek ki. Az 1.37 ábrán látható áramkörben, a T_2 tranzisztor a T_1 kollektorfeszültségét ellentétes irányba tolja el az R_{C2} és R_{E2} ellenállások értékeinek függvényében, így a T_3 tranzisztor bázisának előfeszítése megfelelően alacsony szintű lesz.

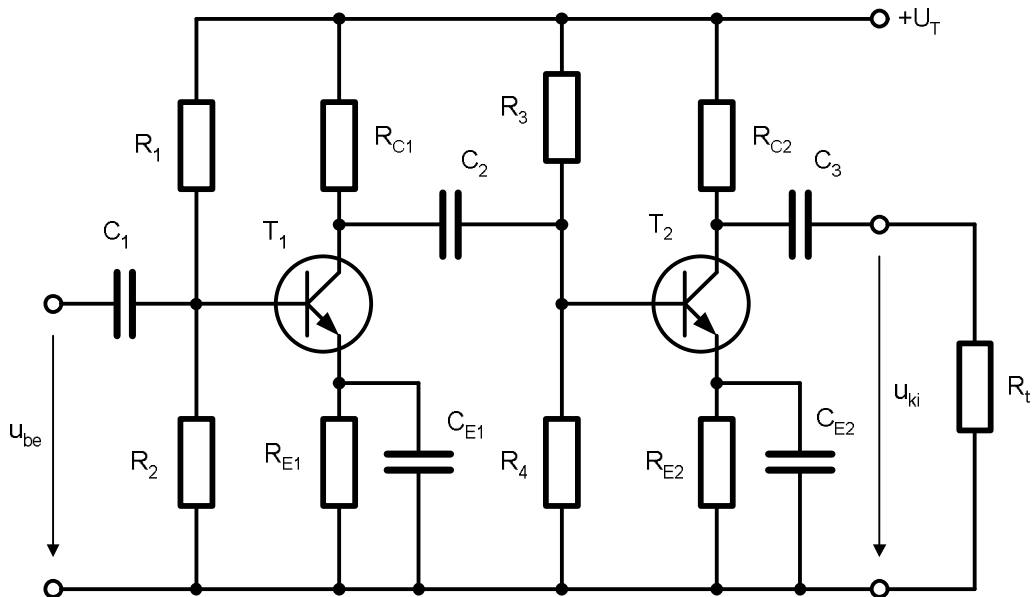


1.37 ábra Közvetlen csatolás tranzisztoros szinteltolóval

A közvetlen erősítők legnagyobb problémája a munkapont eltolódása (drift), valamilyen ok miatt (pl. hőmérséklet változás, tápfeszültség változás, zavarjel). Mivel az erősítés szempontjából az egyenfeszültség és a jel között nincs különbség, a bemeneti fokozat munkapont-változása nagy változást okoz a kimeneti teljesítményben.

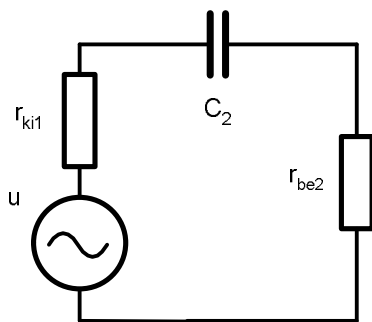
1.3.2.2 Kapacitív csatolás

Az 1.38 ábra egy RC csatolású kétfokozatú erősítő kapcsolási rajzát szemlélteti. Megfigyelhető, hogy a C_2 csatolókapacitás reaktanciája, az első fokozat kimeneti ellenállásával és a második fokozat bemeneti ellenállásával feszültségosztót képez (1.39 ábra).



1.38 ábra RC csatolású erősítő kapcsolási rajza

Ahoz, hogy a csatolókapacitátor ne befolyásolja a hasznos jel átvitelét, reaktanciája az alsó határfrekvencián sokkal kisebb legyen a második fokozat bemeneti ellenállásánál.



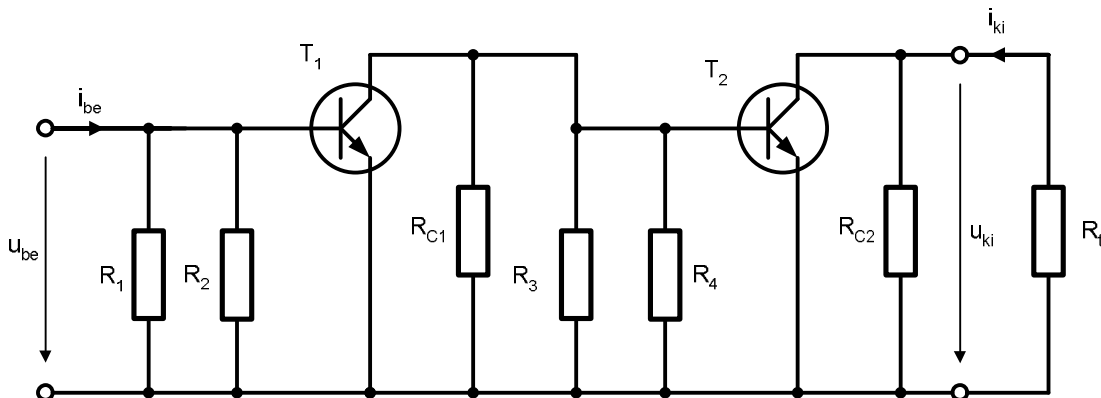
1.39 ábra A csatolókapacitátor méretezése

Kapacitása, a még megengedhető 3 dB szintcsökkenés esetén:

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_a \cdot (R_{ki1} + R_{be2})}, \text{ ahol } R_{ki1} = \frac{1}{h_{22e1}} \times R_{C1} \text{ és } R_{be2} = h_{11e2} \times R_3 \times R_4$$

(kérem a képletek levezetését!)

A kapcsolás váltakozó áramú helyettesítő képe az 1.40 ábrán látható.



1.40 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás

Az erősítő feszültségerősítése $A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}$, ha az első és a második fokozat feszültségerősítése:

$$A_{u1} = -\frac{h_{21e1}}{h_{11e1}} \cdot \left(\frac{1}{h_{22e1}} \times R_{C1} \times R_{be2} \right) = -S_1 \cdot \left(\frac{1}{h_{22e1}} \times R_{C1} \times R_{be2} \right)$$

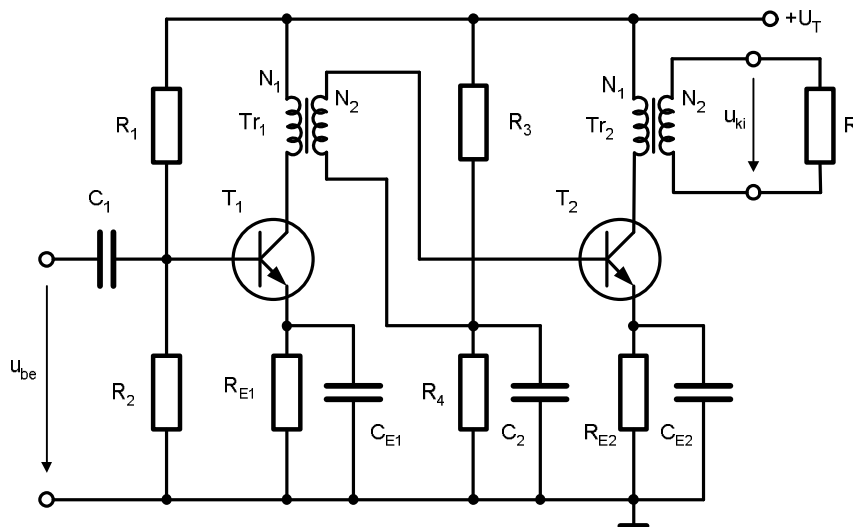
$$A_{u2} = -\frac{h_{21e2}}{h_{11e2}} \cdot \left(\frac{1}{h_{22e2}} \times R_{C2} \times R_t \right) = -S_2 \cdot \left(\frac{1}{h_{22e2}} \times R_{C2} \times R_t \right)$$

(kérem a képletek levezetését!)

Az RC csatolás előnye, hogy a fokozatok munkapontjai nem hatnak egymásra és egymástól függetlenül beállíthatók, mivel a csatolókapacitátor egyenáramú szempontból elválasztja a fokozatokat. A csatolókapacitátorok viszont kisfrekvenciás jelcsökkenést és kisebb torzításokat okoznak.

1.3.2.3 Induktív csatolás

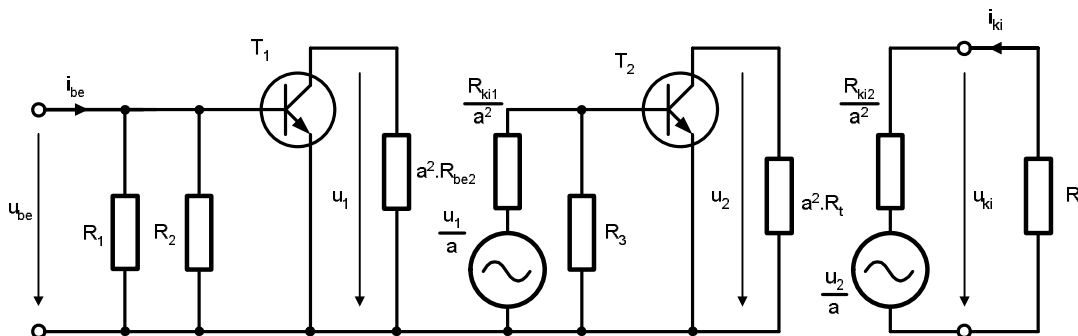
Az 1.41 ábra egy kétfokozatú transzformátoros csatolású váltakozó feszültségű erősítő kapcsolását szemlélteti. Alkalmazásának legnagyobb előnye, hogy jó illesztést valósít meg az erősítőfokozatok között, nagy stabilitás érhető el vele és a transzformátor tekercseiben nem nagy az egyenáramú veszteség. Hátránya, hogy kis teljesítményű üzemben rossz a hatásfoka és a frekvenciaátvittele sem megfelelő. Ezenkívül a transzformátor a legnagyobb méretű, a legnehezebb és a legdrágább áramköri elem.



1.41 ábra Kétfokozatú transzformátor-csatolású erősítő

Az erősítő váltakozó áramú helyettesítő képét az 1.42 ábra mutatja, ha feltételezzük, hogy a két

transzformátor áttétele $a = \frac{N_1}{N_2}$.



1.42 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kép

1.4 A visszacsatolás

A több erősítőfokozat egyszerű láncbakapcsolásával létrehozott erősítők rendszerint nem teljesítik a velük szemben támasztott gyakorlati követelményeket. Vagy nem érhető el elég nagy bemeneti ellenállás, vagy elég kis kimeneti ellenállás, vagy nem megfelelő a linearitás, esetleg az erősítés változásai megengedhetetlenül nagyok. Az erősítők tulajdonságai ilyen esetekben kedvezően befolyásolhatók és látványosan javíthatók a megfelelő visszacsatolások alkalmazásával.

1.4.1 A visszacsatolás elve

A visszacsatolás lényege, hogy az erősítő kimeneti jelének egy részét visszavezetjük a bemenetére, egy visszacsatoló áramkör segítségével. A bemeneti jel és a visszacsatolt jel fázisa függvényében megkülönböztetünk két típusú visszacsatolást:

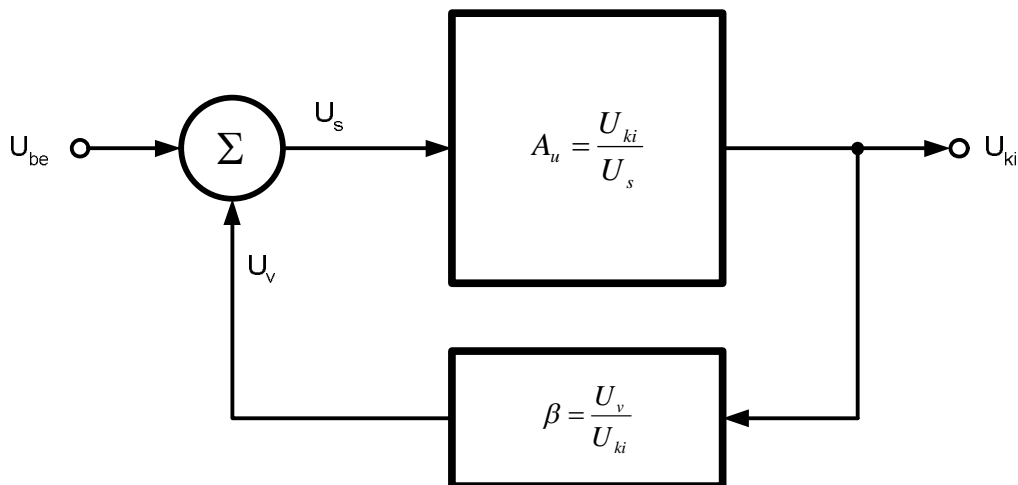
- Negatív visszacsatolás: a visszacsatolt jel fázisa ellentétes a bemeneti jel fázisával, a két jel egymás ellen hat
- Pozitív visszacsatolás: a visszacsatolt jel fázisban van a bemeneti jellel, a két jel összeadódik

A visszacsatolt erősítő elvi felépítése az 1.43 ábrán látható. A felhasznált jelölések a következők:

$$A_u = \frac{U_{ki}}{U_s} \quad \text{- a visszacsatolás nélküli erősítő feszültségerősítése}$$

$$A_{uv} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} \quad \text{- a visszacsatolt erősítő feszültségerősítése}$$

$$\beta = \frac{U_v}{U_{ki}} \quad \text{- a visszacsatolási tényező (általában } \beta \leq 1 \text{)}$$



1.43 ábra Visszacsatolt erősítő tömbvázlata

Ha ismerjük a visszacsatolás nélküli erősítő erősítését (A_u) és a visszacsatoló áramkör tulajdonságait, akkor meghatározható a visszacsatolt erősítő erősítése (A_{uv}):

$$A_{uv} = \frac{A_u}{1 + \beta \cdot A_u}, \quad \text{negatív visszacsatolás esetén}$$

$$A_{uv} = \frac{A_u}{1 - \beta \cdot A_u}, \quad \text{pozitív visszacsatolás esetén}$$

1.4.2 A visszacsatolás hatása

A visszacsatolt erősítő jellemzői megváltoznak az eredeti erősítő jellemzőihez képest:

- pozitív visszacsatolás esetén: feszültségerősítése, zaja, torzitása $\frac{1}{1 - \beta \cdot A_u}$ - szorossa az eredeti értéknek
- negatív visszacsatolás esetén: feszültségerősítése, zaja, torzitása $\frac{1}{1 + \beta \cdot A_u}$ - szorossa az eredeti értéknek

A negatív visszacsatolás tehát erősítékben alkalmazható előnyösen, mivel az erősítés csökkenés árán lényegesen jobb jellemzőket érhetünk el.

A pozitív visszacsatolás jelerősítésre nem alkalmas, mivel kedvezőtlenül befolyásolja az erősítő jellemzőit. Erős pozitív visszacsatolás esetén a visszacsatolt erősítés végtelen nagy értékű lehet, az erősítő begerjed és bemeneti jel nélkül is képes kimeneti jelet szolgáltatni (*oszillál*).

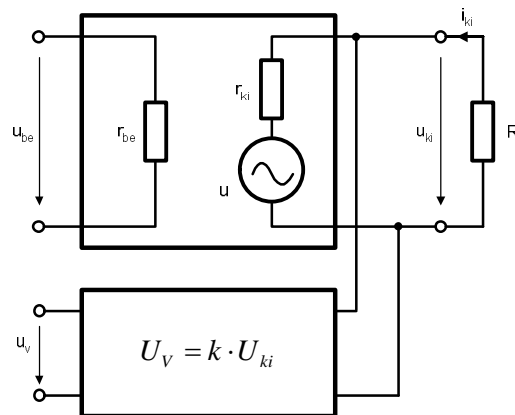
Attól függően, hogy a visszacsatolt jel milyen kimeneti változóval arányos, megkülönböztetünk:

- feszültségvisszacsatolást (1.44 ábra)
- áramvisszacsatolást (1.45 ábra)

Attól függően hogy a visszacsatolt jel hogyan csatlakozik a bemenethez, megkülönböztetünk:

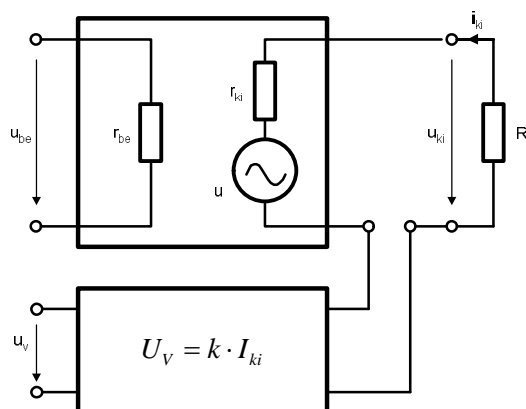
- soros visszacsatolást (1.46 ábra)
- párhuzamos visszacsatolást (1.47 ábra)

Összesen négy visszacsatolási változat lehetséges, melyek jelentősen hatnak az erősítő bemeneti és kimeneti ellenállására.



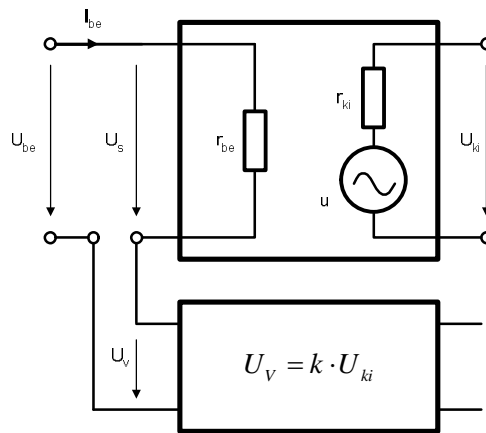
1.44 ábra Feszültség-visszacsatolás az erősítő kimenetén

A negatív feszültség-visszacsatolás az erősítő kimeneti ellenállását csökkenti.



1.45 ábra Áram visszacsatolás az erősítő kimenetén

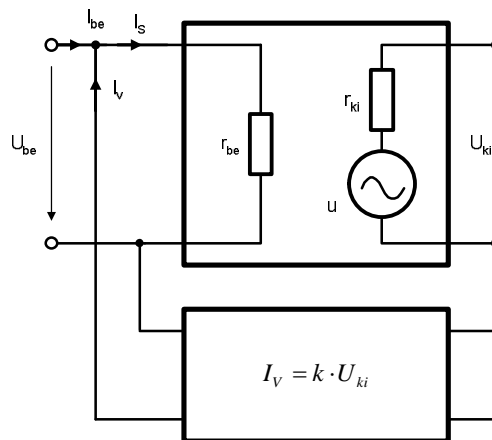
A negatív áram-visszacsatolás az erősítő kimeneti ellenállását növeli.



1.46 ábra Soros visszacsatolás az erősítő bemenetén

A soros negatív visszacsatolás növeli az erősítő bemeneti ellenállását:

$$r_{bev} = (1 + \beta \cdot A_u) \cdot r_{be}$$



1.47 ábra Párhuzamos visszacsatolás az erősítő bemenetén

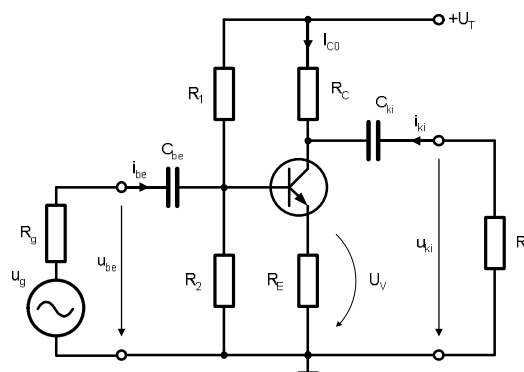
A párhuzamos negatív visszacsatolás csökkenti az erősítő bemeneti ellenállását:

$$r_{bev} = \frac{r_{be}}{(1 + \beta \cdot A_u)}$$

Az ideális erősítő bemeneti ellenállása végtelenül nagy, kimeneti ellenállása pedig végtelenül kicsi. Ezért az erősítőknél a bemeneti ellenállás növelése és a kimeneti ellenállás csökkentése a cél. Ennek megvalósítására az erősítő bemenetén általában soros visszacsatolást, a kimenetén pedig feszültség visszacsatolást alkalmazunk.

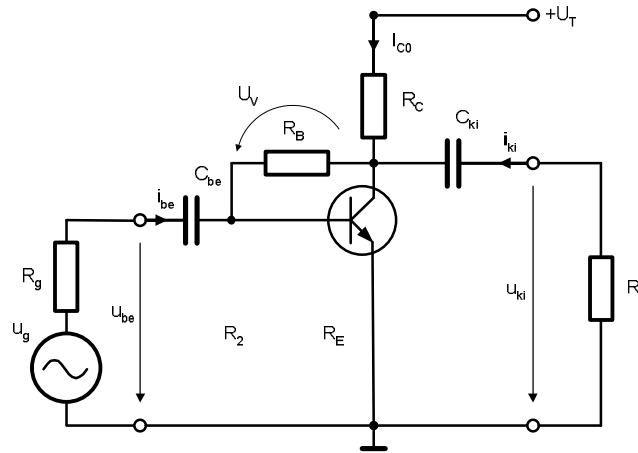
1.4.2 A negatív visszacsatolás gyakorlati megvalósítása

a) Soros negatív áram visszacsatolás: 1.48 ábra



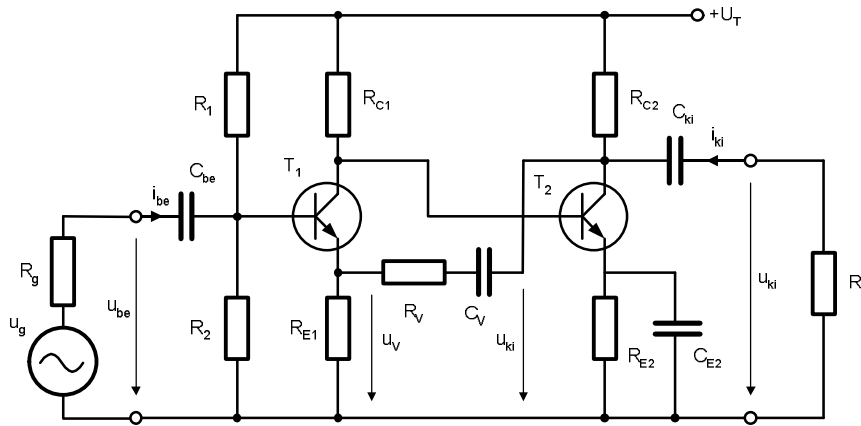
1.48 ábra Soros negatív áram-visszacsatolást tartalmazó egyfokozatú erősítő

b) Párhuzamos negatív feszültség visszacsatolás: 1.49 ábra



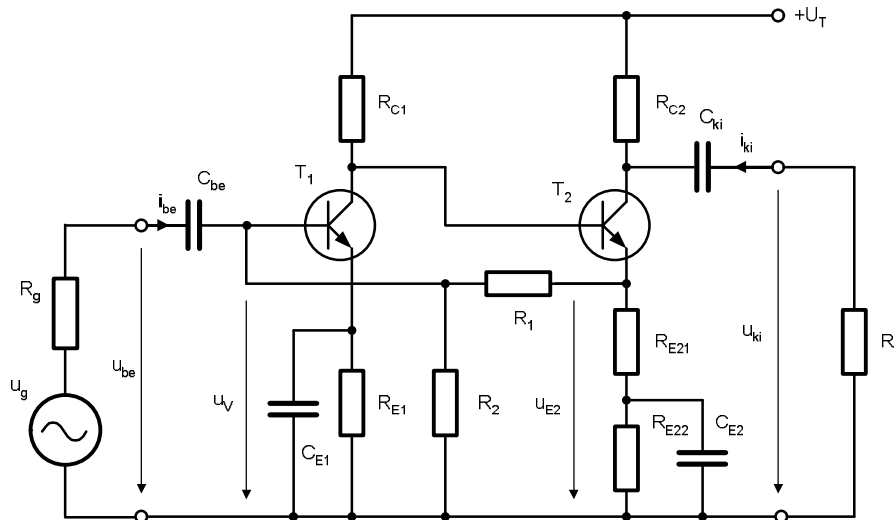
1.49 ábra Párhuzamos negatív feszültség-visszacsatolást tartalmazó egyfokozatú erősítő

c) Soros negatív feszültség visszacsatolás: 1.50 ábra



1.50 ábra Soros negatív feszültség-visszacsatolást tartalmazó egyfokozatú erősítő

d) Párhuzamos negatív áram visszacsatolás: 1.51 ábra



1.51 ábra Párhuzamos negatív áram-visszacsatolást tartalmazó egyfokozatú erősítő

1.5 Szélessávú erősítők

A szélessávú erősítők hasonlítanak a kisfrekvenciás erősítőkre, de átviteli frekvenciasávjuk jóval nagyobb, 0 Hz-től több száz kiloHertzig, megaHertzig terjed. Általában több erősítő fokozatból állnak és negatív visszacsatolást tartalmaznak.

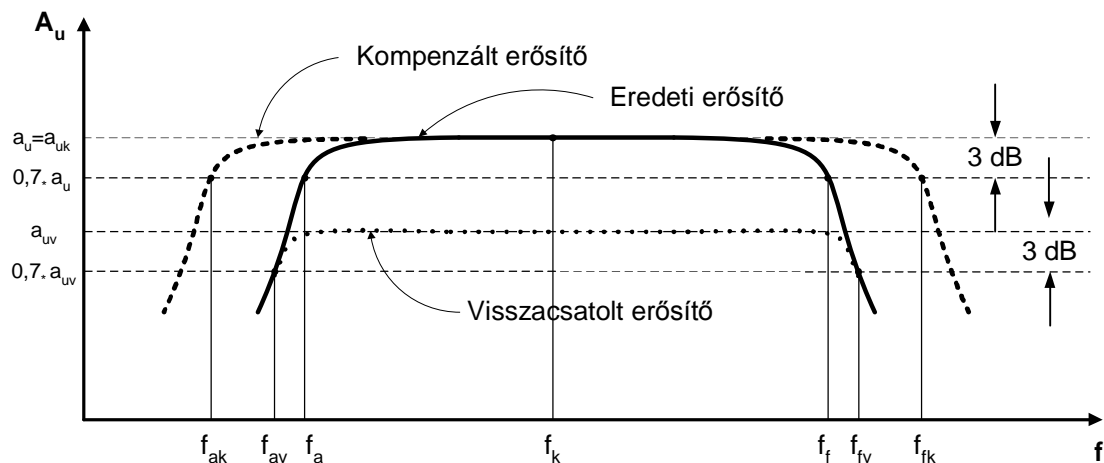
1.5.1 A sávzélesség

A tranzisztoros erősítők sávzélességét, vagyis az erősítés frekvenciafüggését, az alkalmazott tranzisztorok határfrekvenciája és az áramkörükben található különböző reaktanciák határozzák meg.

Az erősítő felső határfrekvenciáját főleg a tranzisztorok paraméterei szabják meg, míg az alsó határfrekvenciát a csatoló- és a lekapcsoló kondenzátorok nagysága. A jó minőségű szélessávú erősítőkben nagy teljesítményerősítésre és széles frekvenciasávra van szükség (1.52 ábra), mivel az erősítő sávjáról egyenesen arányos az A_{uk} erősítés és a B sávzélesség szorzatával:

$$S_j = A_{uk} \cdot B \approx A_{uk} \cdot f_f$$

A negatív visszacsatolás hatására csökken az erősítés a frekvenciasáv közepén, viszont egyenletesebbé válik a frekvenciaátvitel, laposabb lesz az átviteli jelleggörbe és megnő a sávzélesség (1.52 ábra). Az erősítők sávzélességének bizonyos mértékű növelése megvalósítható a közepes frekvencián elért erősítés csökkenése nélkül is. Ilyenkor külső frekvenciafüggő elemek alkalmazásával megpróbáljuk kiegyenlíteni a kis- és nagyfrekvenciás erősítéscsökkenést okozó elemek hatását (1.52 ábra).



1.52 ábra A sávzélesség növelésének lehetőségei

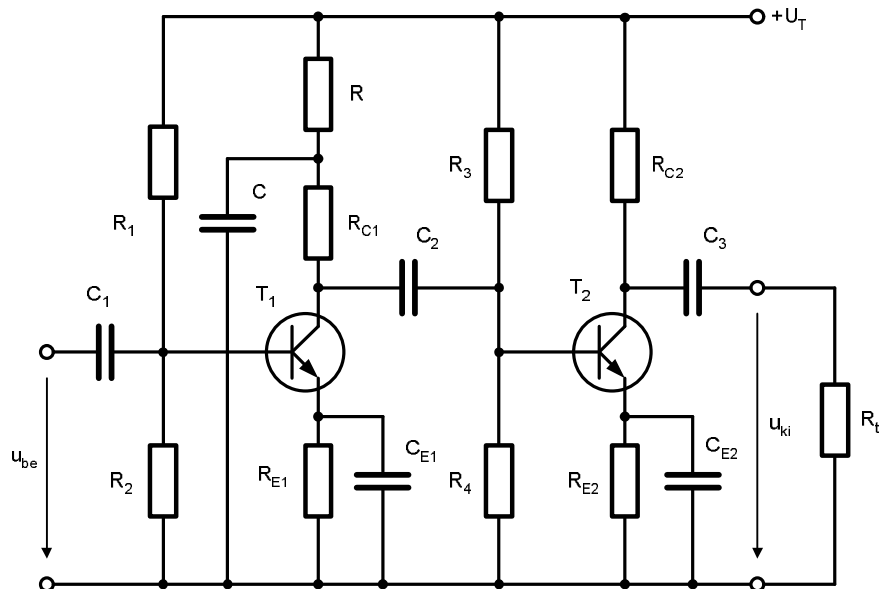
1.5.2 Frekvencia kompenzálás

Frekvenciakompenzálásnak nevezzük azt a módszert, amikor külső *frekvenciafüggő elemek* alkalmazásával megpróbáljuk kiegyenlíteni a kis- és nagyfrekvenciás erősítéscsökkenést okozó elemek hatását.

1.5.2.1 Kisfrekvenciás kompenzálás

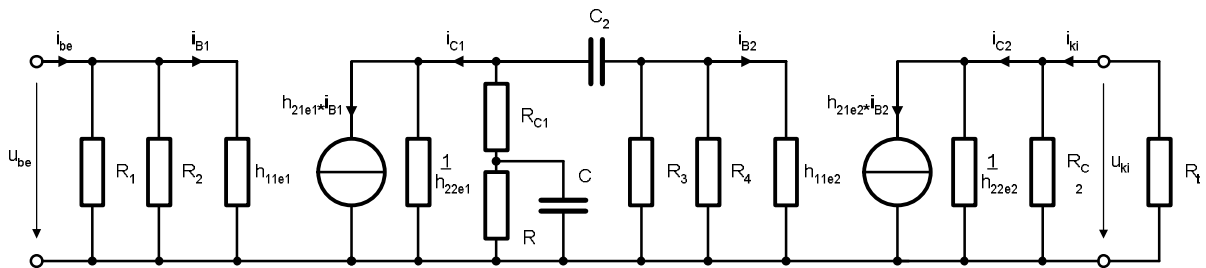
Az egyenáramú erősítők nem igényelnek alacsony frekvenciás kompenzálást, a váltakozó áramú erősítők esetében viszont szükség van csatoló-kondenzátorokra, az egyenáramú feszültség leválasztására. A kisfrekvenciás átvitel szempontjából nem okoz nehézséget a tranzisztor, mert ebben az esetben paraméterei valóságosak és állandó értékűek.

Egy RC csatolású erősítő alacsonyfrekvenciás kompenzálásának egy lehetséges megoldását szemlélteti az 1.53 ábra.



1.53 ábra Kisfrekvenciás kompenzálás

A C_2 csatolókondenzátor, amely a fokozatokat összekötő áramkörben sorosan kapcsolódik a következő fokozat bemeneti ellenállásához, frekvenciakorlátozó elemként viselkedik: minél kisebb a frekvencia, annál nagyobb feszültség esik rajta. A csillapítás mértékét kompenzálhatjuk az ábrán látható RC taggal, amely az RC_1 kollektor ellenállással sorosan egy Z_c kollektorimpedanciát alkot. A kisfrekvenciás váltakozó áramú helyettesítő kapcsoláson látható (1.54 ábra), hogy a Z_c impedancia a frekvencia csökkenésével növekszik, és az így előidézett erősítésnövekedés megfelelő méretezés esetén kiegyenlíti a csatolókondenzátor által előidézett feszültségesést.



1.54 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás

A kompenzáló áramkör méretezésére alkalmas összefüggések:

$$R_{C1} = 2 \cdot R \quad \text{és} \quad C \cdot R_{C1} = C_2 \cdot r_{be2}$$

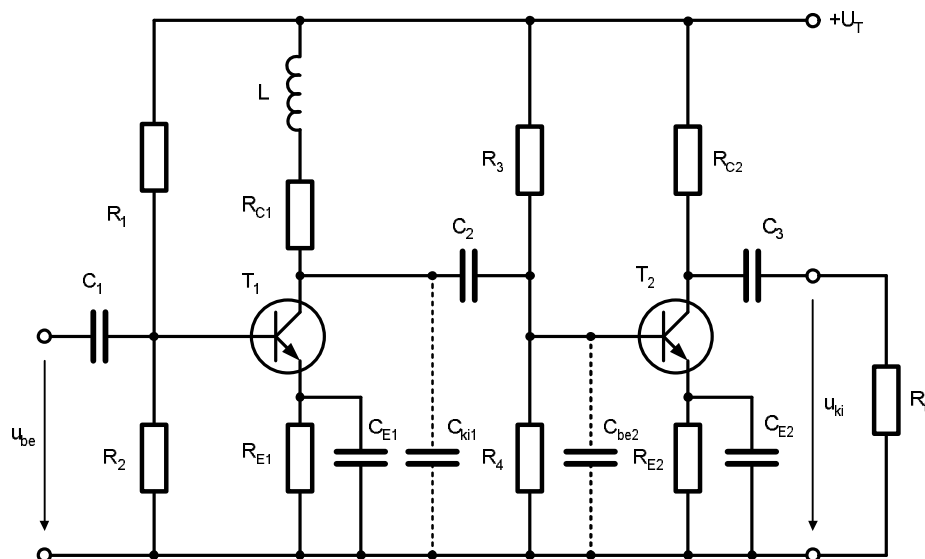
1.5.2.2 Nagyfrekvenciás kompenzálás

A 100 kHz feletti határfrekvencián működő erősítők paramétereit két tényező befolyásolja döntően:

- a h_{21e} csökkenése a frekvencia növekedésével (a tranzisztor belső felépítése miatt)
- a tranzisztor belső kapacitásainak és a szórt kapacitásoknak a söntölő hatása

Ezek a kapacitások az áramköri ellenállásokkal együtt aluláteresztő szűrőt alkotnak úgy a bemeneti mint a kimeneti oldalon, melyek a nagyobb frekvenciákon csökkentik a feszültségerősítést.

A nagyfrekvenciás kompenzálás célja a felső határfrekvencia növelése, ennek egy lehetséges változatát az 1.55 ábra szemlélteti.



1.55 ábra Nagyfrekvenciás kompenzálás

Az R_{C1} ellenállással sorosan beiktatott L tekercs párhuzamos rezgőkört képez a C_p parazitakapacitásokkal (1.56 ábra):

$$C_p = C_{ki1} + C_{be2} + C_{sz} \text{ , ahol:}$$

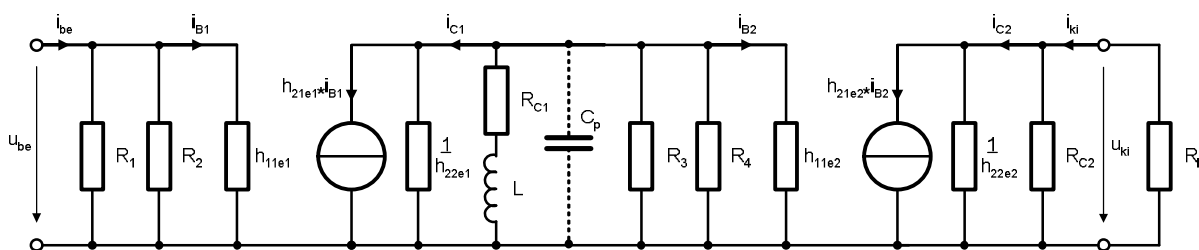
C_{ki1} - a T_1 fokozat kimeneti kapacitása

C_{be2} - a T_2 fokozat bemeneti kapacitása

C_{sz} - a szerelés során kialakuló szórt kapacitások

A rezgőkör megfelelő méretezésével elérhető, hogy a parazita kapacitások okozta erősítés csökkenés és a rezgőkör által létrehozott kiemelés egymást kölcsönösen kiegyenlítse. A rezonanciafrekvencián létrehozott kiemelés a rezgőkör jósági tényezőjétől függ, melynek értékét az

$\frac{1}{h_{22e}} \times R_{C1} \times r_{be2}$ eredő ellenállás értéke szabja meg. A jósági tényezőt nem célszerű igen nagyra választani, mivel ebben az esetben a kiemelés nagyon nagy és csak igen keskeny sávban jön létre.



1.56 ábra Váltakozó áramú helyettesítő kapcsolás

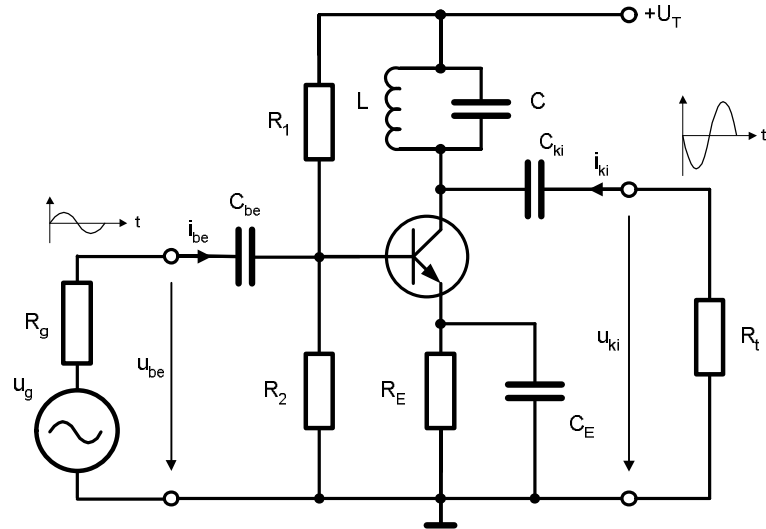
1.6 Hangolt (szelektív) erősítők

Azokat az erősítőket, amelyek csak egy kiválasztott keskeny frekvenciatartományban erősítik a jelet, a kijelölt frekvenciasávon kívül eső jeleket pedig nem, hangolt, vagy szelektív erősítőknek nevezzük. Mivel ilyen erősítőket általában csak nagyobb frekvenciákon alkalmaznak ($f_a > 100\text{kHz}$), ezért a továbbiakban a rádiófrekvenciás hangolt erősítőkkel foglalkozunk.

A nagyfrekvenciás hangolt erősítők jellemzője, hogy munkaellenállásuk frekvenciafüggő: párhuzamos rezgőkör, vagy sávszűrő.

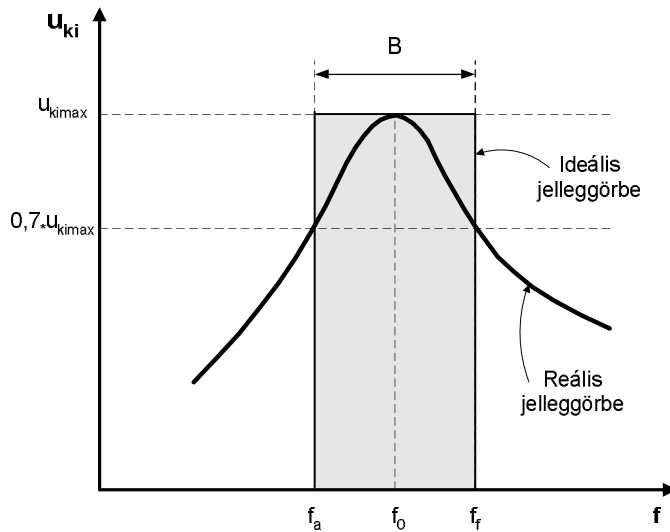
1.6.1 Hangolt fokozat párhuzamos LC rezgőkörrel

Az 1.57 ábra egy emitterkapcsolású párhuzamos rezgőkörrel kivitelezett hangolt erősítő kapcsolását szemlélteti.



1.57 ábra Nagyfrekvenciás hangolt erősítő

A fokozat munkaellenállása a kívánt átviteli frekvenciatartomány közepére hangolt párhuzamos LC rezgőkör, amely az erősítő sáv szélességét is meghatározza. Működése megegyezik a közös emitteres erősítő működésével, azzal a különbséggel, hogy a rezgőkör rezonanciafrekvenciáján a kapcsolás erősítése maximális (1.58 ábra).



1.58 ábra A kimeneti feszültség frekvenciafüggvénye

Rezonanciafrekvencián: $X_L = X_C \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$

A rezgőkör jósági tényezője:

$Q_0 = \frac{R_V}{X_L} = \frac{X_L}{r_V}$, ahol: r_V - a rezgőkör soros veszteségi ellenállása

R_V - a rezgőkör párhuzamos veszteségi ellenállása

Abban az esetben, mikor a kondenzátor és a tekercs is veszteséges elemnek tekinthető:

$R_V = R_{CV} \times R_{LV}$, ahol: R_{CV} - a kondenzátor párhuzamos veszteségi ellenállása

R_{LV} - a tekercs párhuzamos veszteségi ellenállása

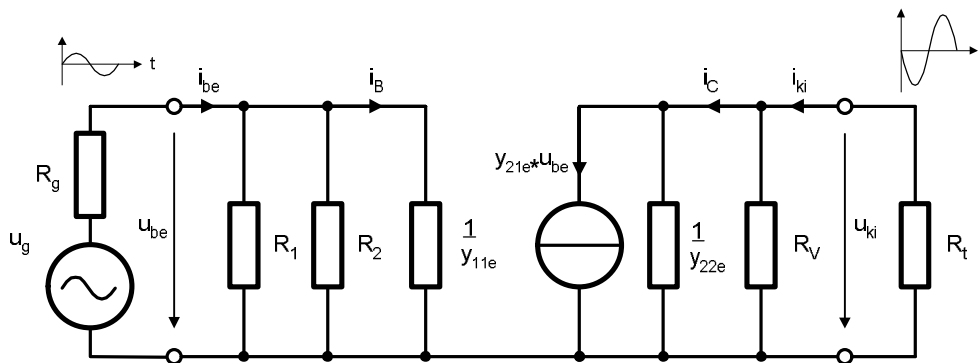
Az eredő jósági tényező:

$$Q_0 = Q_L + Q_C = \frac{R_{LV}}{X_L} + \frac{R_{CV}}{X_C}$$

A rezgőkör terheletlen sávszélessége:

$$B = \frac{f_0}{Q_0}$$

A nagyfrekvenciás tartományban használt tranzisztorok jellemzőit az admittanciás (y) paraméterekkel fejezzük ki (1.59 ábra). A helyettesítő kapcsolások alapján végzett számításoknál mindig az R_V párhuzamos veszteségi ellenállást használjuk: $R_V = r_V \cdot Q_0^2$



1.59 ábra Admittanciaparaméteres helyettesítő kép rezonanciafrekvencián

A kapcsolat feszültségerősítése a helyettesítő kép alapján:

$$u_{ki} = -y_{21e} \cdot u_{be} \cdot \left(\frac{1}{y_{22e}} \times R_V \times R_t \right) = -y_{21e} \cdot u_{be} \cdot RE \quad \Rightarrow \quad A_u = -y_{21e} \cdot RE$$

Az erősítő B_t sávszélességét a rezgőkör tényleges (terhelt) jósági tényezője határozza meg:

$$Q_{0t} = \frac{RE}{X_L} = \frac{RE}{X_C}$$

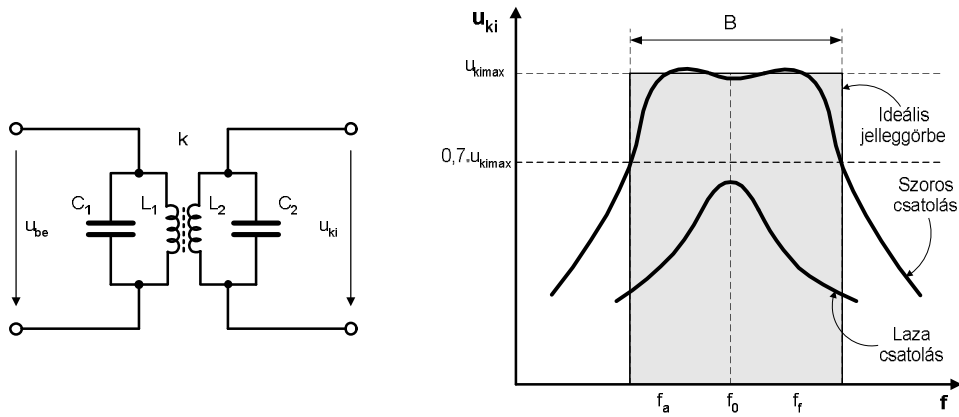
A sávszélesség:

$$B_t = \frac{f_0}{Q_{0t}} \quad (B_t > B)$$

1.6.2 Hangolt fokozat sávszűrős csatolással

A rezgőkörrel rendelkező hangolt erősítők átviteli karakterisztikája számos gyakorlati alkalmazásban nem megfelelő, mivel kicsi a sávszélessége, a sávszéleken nem elég meredek a levágás és az átviteli sávban nem elég egyenletes a feszültségerősítés. Jobb eredményeket érhetünk el a sávszűrők alkalmazásával.

Sávszűrős csatolás esetén a jel az egyik rezgőkörből a másikba valamilyen csatolás (induktív vagy kapacitív) révén jut át. Az 1.60 ábra egy induktív csatolású sávszűrőt és átviteli karakterisztikáját szemlélteti.



1.60 ábra Induktív csatolású sávszűrő

A megfelelő átvitel érdekében a két rezgőkör rezonanciafrekvenciája azonos:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}} \Rightarrow L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2$$

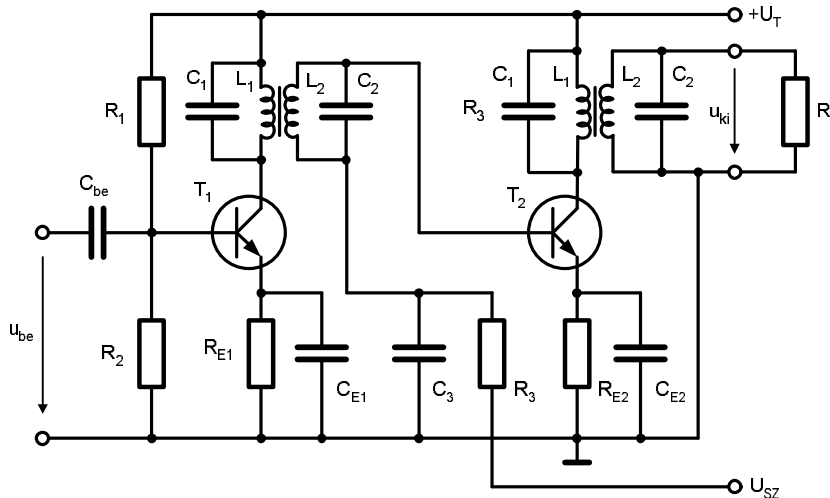
Az átviteli jelleggörbe alakjának változtatása megvalósítható a csatolási tényező értékének változtatásával. A csatolási tényező:

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}, \text{ ahol: } \Phi_1 - \text{ az } L_1 \text{ primer tekercsen áthaladó fluxus}$$

$$k < 1 \quad \Phi_2 - \text{ a primer tekercs fluxusának az } L_2 \text{ szekunder tekercsen áthaladó része}$$

A tényező egyhez közeli értékei szoros csatolást, míg az egytől távol eső értékei laza csatolást eredményeznek.

Az 1.61 ábra közös emitteres, kétfokozatú sávszűrős csatolású, hangolt erősítő kapcsolását szemlélteti. Megfelelő hangolás esetén, a kapcsolatban szereplő négy rezgőkör nagyon jó szelektivitást és az ideálist megközelítő átviteli karakterisztikát biztosít. A kollektoráram jelentős csökkenése, vagy növelése az erősítés csökkenését eredményezi. Mivel a kollektoráram értéke erőteljesen csökken, ha a munkapont a lezárás, vagy a telítés közelébe kerül, a munkapont változtatásával lehetőség van az erősítés szabályozására. A T_2 tranzisztor munkapontját az R_3 , L_2 vonalon az U_{sz} feszültség állítja be a kívánt értékre. Az L_2 és C_3 elemek ugyanakkor biztosítják a T_2 bázisán megjelenő nagyfrekvenciás összetevő leválasztását az egyenáramú szabályozófeszültségtől.



1.61 ábra Nagyfrekvenciás sávszűrős erősítő

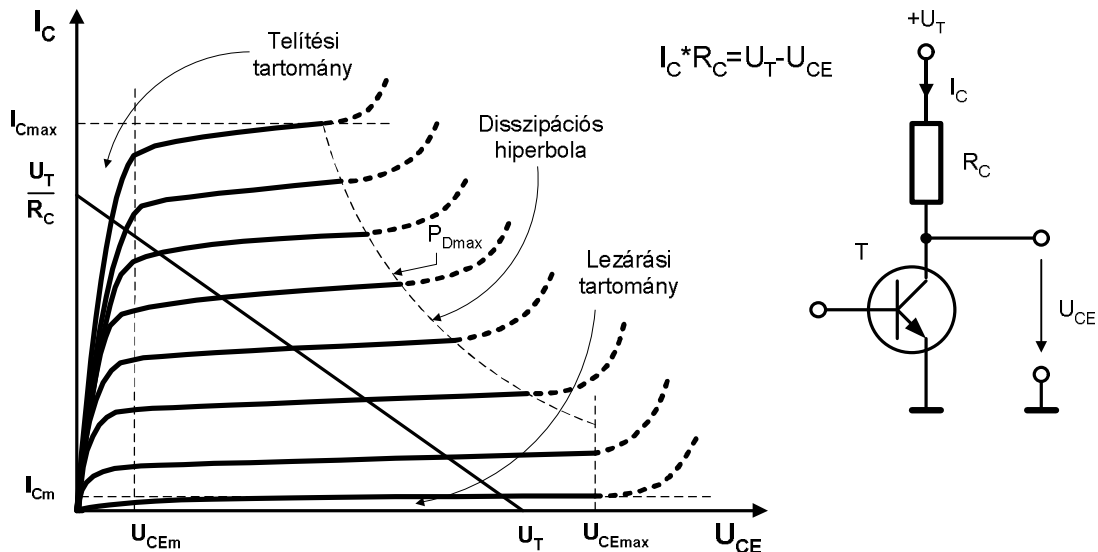
A korszerű kisjelű hangolt erősítőkben speciális integrált áramköröket alkalmaznak, a kívánt átviteli sávot pedig mechanikus szűrőkkel (piezokerámia szűrőkkel, vagy felületi hullámszűrőkkel) biztosítják.

1.7 Nagyjelű erősítők

A nagyjelű erősítők feladata, hogy a terhelésen egy meghatározott teljesítményt és feszültséget adjanak le minnél nagyobb hatásfok és minnél kisebb torzítás mellett. A nagy amplitudójú jelek esetén, a karakterisztikák görbesége miatt, a négyfólus paraméterek között nemlineárisak az összefüggések. A munkapont körüli nagy feszültség- és áramingadozások miatt elsősorban a működés határait és a jeltorzításokat kell megvizsgálni.

a) A tranzisztorok kimeneti jelleggörbéiből (1.62 ábra) megállapítható, hogy több tényező is korlátozza a munkapont és a kivezérlés megválasztását:

- a legnagyobb veszteségi teljesítmény (P_{Dmax}) hiperbolája
- a legnagyobb kollektorfeszültség (U_{CEmax}), ami után már letörés következik
- a legnagyobb kollektoráram (I_{Cmax}), amely fölött nagyon megnő a torzítás
- a telítési tartomány, amely a kisebb feszültségeken a kivezérelhetőséget korlátozza
- a lezárási tartomány, amely kis áramerősségeknél korlátozza a kivezérelhetőséget



1.62 ábra A teljesítménytranzisztorok korlátozó tényezői

A nagyjelű erősítőknél fontos szempont a minnél nagyobb kivezérelhetőség, mivel a maximális erősítés csak teljes kivezérlés esetén jön létre. Teljes kivezérlésnek nevezzük a tranzisztor telítődéséig és lezárásaig történő vezérlését.

A teljesítményerősítők jellemző adatai:

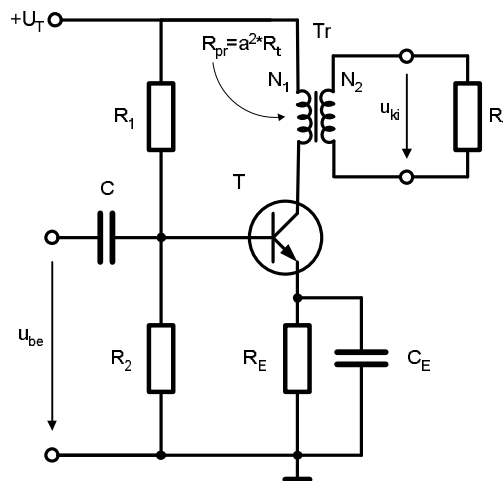
- a veszteségi (disszipált) teljesítmény: $P_D = P_T - P_{ki}$, ahol P_T - a tápforrásból felvett teljesítmény, P_{ki} - a kimeneti (leadott) teljesítmény
- a hatásfok: $\eta = \frac{P_{ki}}{P_T} \cdot 100$ [%]
- a teljesítményerősítés: $A_p = \frac{P_{ki}}{P_{be}}$

Annak függvényében, hogy a tranzisztor munkapontja vezérlés nélküli állapotban a karakterisztika melyik szakaszán helyezkedik el, a következő beállításokat különböztetjük meg:

- A osztályú beállítás – a munkapont a karakterisztika lineáris szakaszán van elhelyezve (M_A) és vezérlés alatt a lineáris szakaszon mozog.
- B osztályú beállítás – a munkapont (M_B) a jelleggörbe zárasi pontjában van. A tranzisztor működése csak az egyik félperiódusban tekinthető lineárisnak.
- AB osztályú beállítás – a munkapont (M_{AB}) az A és B osztályú beállításnak megfelelő két munkapont között helyezkedik el. A tranzisztoron fél periódusnál hosszabb ideig folyik áram vezérlés esetén.
- C osztályú beállítás – a munkapont (M_C) a jelleggörbe zárasi szakaszán helyezkedik el. A tranzisztoron a fél periódusnál rövidebb ideig folyik áram vezérlés esetén.

1.7.1 A osztályú teljesítményerősítők

Az A osztályú teljesítményerősítőket nagyon kis torzításuknak köszönhetően főleg nagyobb teljesítményű fokozatok meghajtására használják, mivel alacsony hatásfokuk miatt viszonylag kis teljesítményleadásra képesek. Az 1.63 ábra egy A osztályú üzemmódban működő teljesítményerősítő kapcsolását szemlélteti. A kollektor-ellenállás szerepét a T_r illesztő transzformátor primer tekercse tölti be, amelynek kis ohmos ellenállása okozza az egyenáramú munkaegyenes nagy meredekségét. A kimenő transzformátor feladata az erősítő illesztése az R_t terhelő ellenálláshoz, a maximális teljesítményfelvétel érdekében. Az a menetszámáttétel megfelelő választásával bármilyen terhelés jól illeszthető a kollektorkörhöz: $R = a^2 \cdot R_t$



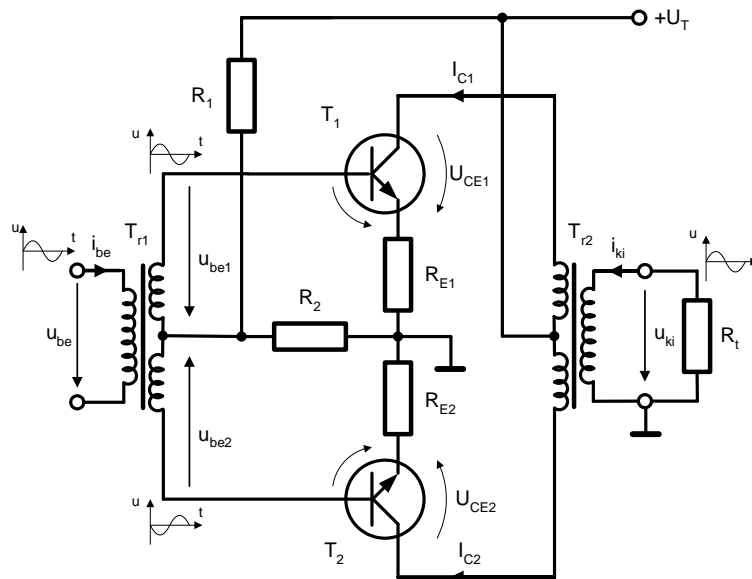
1.63 ábra A osztályú erősítő

A tranzisztorvesztességek csak jelentéktelen mértékben befolyásolják a hatásfokot, a transzformátor azonban sokat fogyaszt. Ezért az A osztályú tranzisztoros végerősítő fokozat hatásfokát a gyakorlatban 40% alattinak tekinthetjük.

1.7.2 Ellenütemű teljesítményerősítők

Az ellenütemű fokozatokban levő két teljesítménytranzisztor két egyenlő nagyságú, de fázisban 180° -al eltérő feszültség vezérli (1.64 ábra). Ebben az esetben hol az egyik, hol a másik tranzisztor vezet, miközben a másik lezárt állapotban van. A vezérlés ellenütemben kell bekövetkeznie, így a terhelésen egy-egy tranzisztor váltakozó áramának a kétszerese jelenik meg.

A bemeneten levő transzformátor biztosítja a két egymáshoz képest ellenfázisú azonos amplitudójú vezérlőfeszültséget. Az R_1 , R_2 bázisosztóval a fokozat munkapontját A, AB, vagy B osztályba beállíthatjuk. Az A osztályú beállítás esetén a hatásfok ugyanakkora mint az egyszerű A osztályos fokozatoké, kimeneti teljesítménye viszont az egyszerű fokozat kétszerese. A B osztályú erősítőkben a munkapont közvetlenül a vízszintes tengely mellett, $I_C = 0$ közelében helyezkedik el, a kollektorfeszültség pedig gyakorlatilag megegyezik az U_T tápfeszültséggel. Az u_{be} jel pozitív félperiódusában a T_1 tranzisztor vezet és létrehozza a kimeneti jel pozitív félperiódusát, a negatív



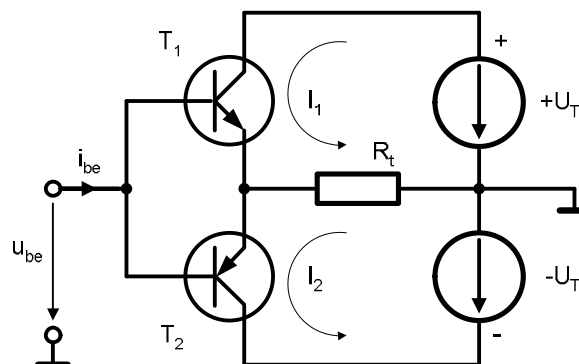
1.64 ábra Ellenütemű teljesítményerősítő

félperiódus alatt pedig a T_2 vezet és létrehozza a kimeneti jel negatív félperiódusát. A kimenő transzformátor kimenetén a teljes szinuszjel megjelenik.

Az $I_C(U_{BE})$ karakterisztika alsó görbülete miatt, kis értékű vezérlőjelek esetén, nemlineáris torzítás jelentkezik a kimeneti jelben. A torzítás megszüntethető, ha a tranzisztorok bázis-emitter feszültségét egy kissé megemeljük, ami egy adott értékű nyugalmi áramot eredményez (AB osztályú beállítás). Ilyenkor a két tranzisztor árama megegyezik és ellentétes irányú, az eredő áram pedig nulla. A gyakorlatban 60-70 %-ra becsülhetjük a B osztályos erősítők hatásfokát.

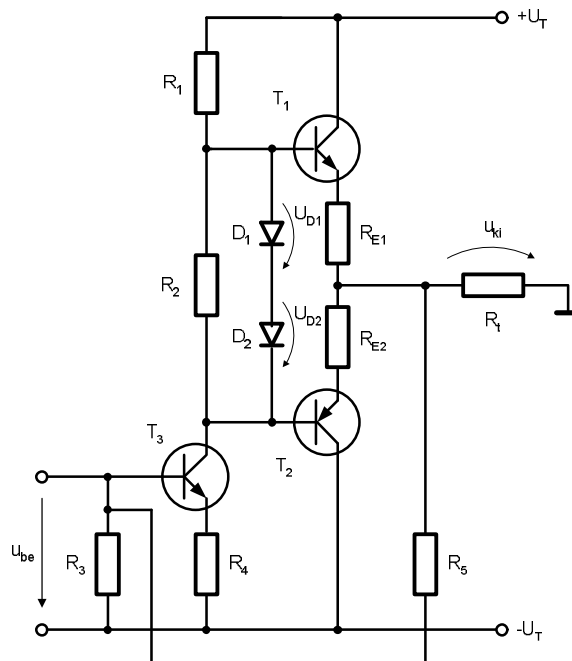
1.7.3 Komplementer teljesítményerősítők

Az ellenütemű vezérlést igen egyszerűen lehet megoldani komplementer tranzisztorok segítségével. Ebben az esetben nincs szükség a bemeneti fázisfordító transzformátorra, mivel a vezérlőjel pozitív félperiódusa az NPN, míg a negatív félperiódusa a PNP tranzisztort nyitja ki és vezérli. Az 1.65 ábra B osztályú komplementer emitterkövetővel felépített ellenütemű teljesítményerősítő elvi kapcsolását szemlélteti. A kis kimeneti ellenállással rendelkező komplementer emitterkövető a kettős tápegység alkalmazása miatt nem igényel kimeneti transzformátort.



1.65 ábra B osztályú komplementer végerősítő elvi kapcsolása

A B osztályú üzemmódból adódó átváltási torzítás lényegesen kisebb az 1.66 ábrán látható AB osztályú komplementer végerősítő esetén. A teljesítménytranzisztorok munkapontját a D_1 és D_2 nyitóirányban polarizált diódákkal állítják be. A diódákon eső feszültség a T_1 és T_2 tranzisztorokat előfeszítve kis értékű munkaponti áramot eredményez. A diódák kis értékű ellenállása viszont, váltakozó áramú szempontból gyakorlatilag rövidre zárja a két tranzisztor bázisát.

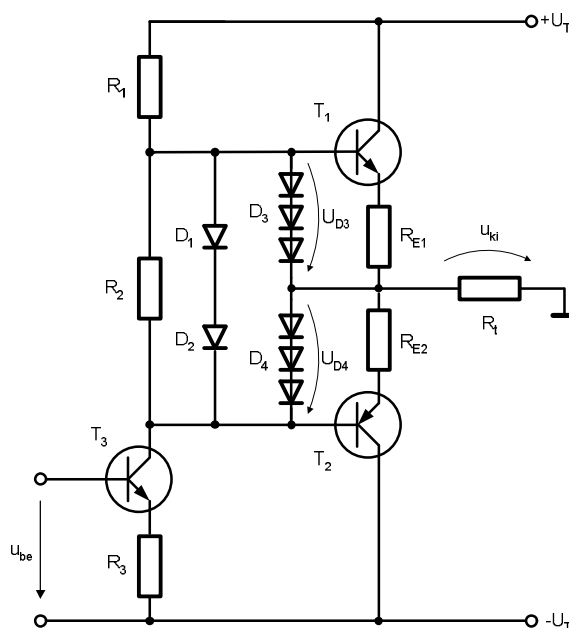


1.66 ábra AB osztályú komplementer végerősítő elvi kapcsolása

A munkapont stabilitását a D_1 és D_2 diódák, valamint az áram-visszacsatolás révén az R_{E1} és R_{E2} emitterellenállások biztosítják. Az áramkör stabilitását az R_5 ellenállással megvalósított párhuzamos negatív feszültség-visszacsatolás is növeli, ugyanakkor hatékonyan csökkenti a fellépő torzításokat. A kimeneti teljesítmény növelése csak nagyobb áramerősítésű tranzisztorok alkalmazásával lehetséges (pl. Darlington tranzisztorokkal).

1.7.4 Túlterhelés elleni védelem

A teljesítményerősítő tranzisztorok, kis kimeneti ellenállásuk miatt, túlterhelés, vagy rövidzár esetén könnyen tönkremehetnek. A viszonylag drága teljesítménytranzisztorok védelme érdekében a kimeneti áramot egy elektronikus áramkörrel meghatározott maximális értékre korlátozzuk. Az 1.67 ábra AB osztályú komplementer teljesítményerősítő elektronikus áramhatárolását szemlélteti, sorbakötött diódák alkalmazásával. A kimeneti áram maximális értékét a D_3 és D_4 diódasorokon fellépő feszültség határozza meg.



1.67 ábra Diódás áramkorlátozó kapcsolás

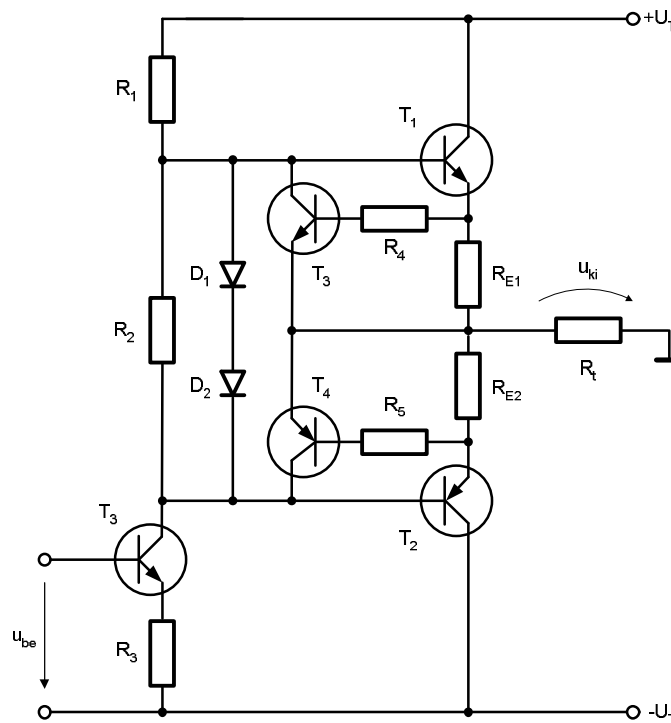
A maximális kimeneti áram, ha n -el jelöljük a sorbakötött diódák számát:

$$I_{ki1\max} = \frac{U_{D3} - U_{BE1}}{R_{E1}} \cong \frac{0,7V}{R_{E1}} \cdot (n-1), \quad \text{ha } n=3 \Rightarrow I_{ki1\max} \cong \frac{1,4V}{R_{E1}}$$

$$I_{ki2\max} = \frac{U_{D4} - U_{BE2}}{R_{E2}} \cong \frac{0,7V}{R_{E2}} \cdot (n-1), \quad \text{ha } n=3 \Rightarrow I_{ki2\max} \cong \frac{1,4V}{R_{E2}}$$

Az 1.68 ábra az áramhatárolás megvalósításának egy másik lehetőségét szemlélteti tranzisztorok alkalmazásával. A teljesítménytranzisztorok emitter-ellenállásain fellépő feszültség egyenesen arányos a tranzisztorok emitteráramával. Ha ez a feszültségesés túllépi a kb. 0,7 V-ot, a T_3 és T_4 tranzisztorok kinyitnak és a teljesítménytranzisztorok bázisáramának egy részét elvezetik. Ennek hatására a teljesítménytranzisztorok bázisáramának a növekedése megszűnik. A maximális kimeneti áram:

$$I_{ki1\max} \cong \frac{0,7V}{R_{E1}} \quad \text{és} \quad I_{ki2\max} \cong \frac{0,7V}{R_{E2}}$$



1.68 ábra Tranzisztoros áramkorlátozó kapcsolás