



Dr. Nemes József

Erősítő áramkörök, jellemzőik II.

NSZFI
NEMZETI SZAKKÉPZÉSI
ÉS FELNŐTTKÉPZÉSI INTÉZET

A követelménymodul megnevezése:

Elektronikai áramkörök tervezése, dokumentálása

A követelménymodul száma: 0917-06 A tartomelem azonosító száma és célcsoportja: SzT-040-50

ERŐSÍTŐ ÁRAMKÖRÖK, JELLEMZŐIK II.

ESETFELVETÉS – MUNKAHELYZET

Az „Erősítő áramkörök, jellemzőik I.” részben megismertük az elektronikus erősítő alapkötésűsöket. Ez az egy fokozat azonban az esetek döntő részében nem elég nagy erősítést biztosít számunkra. Így, ha készítettünk egy hangfrekvenciás erősítő köötölést egy tranzisztorral egy fejhallgatóhoz, akkor azt tapasztalhatjuk, hogy a fejhallgató hangereje nagyon gyenge. Milyen lehetőségeink vannak, hogy az erősítésünk növekedjen?

SZAKMAI INFORMÁCIÓTARTALOM

Többsokozatú erősítők

Visszacsatolások

Az erősítők frekvenciafüggése

Nagyjelű erősítők

1. Többfokozatú erősítők

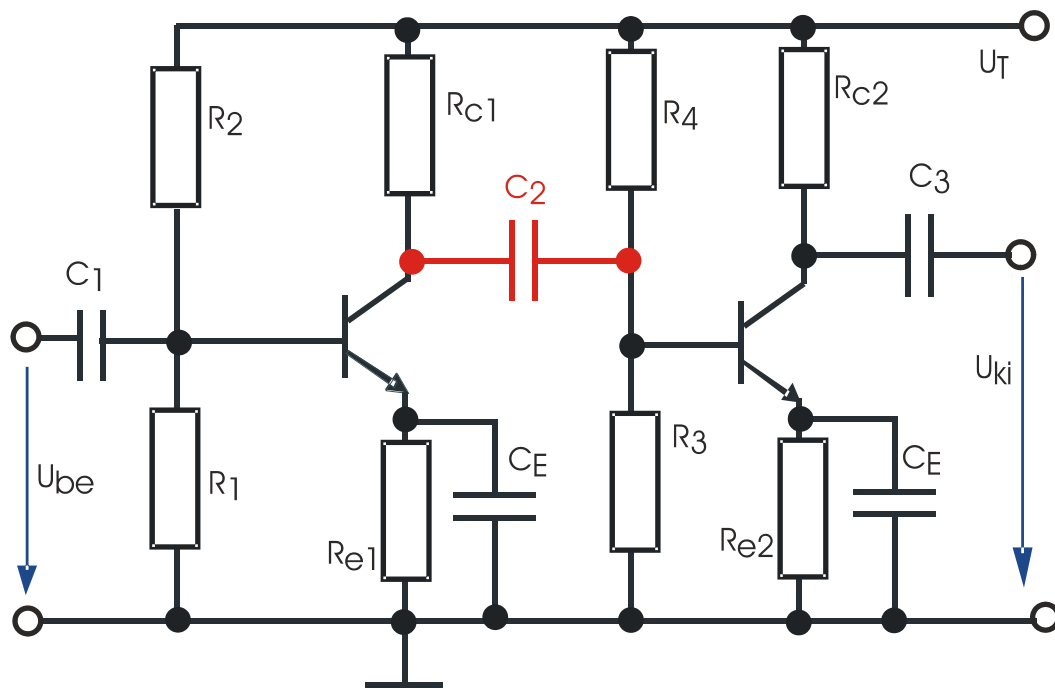
A gyakorlati alkalmazások nagy részében egyetlen erősítőfokozat erősítése nem elegendő. Többfokozatú erősítőt kell alkalmazni akkor is, ha egy fokozat erősítése elegendő, de a bemeneti vagy a kimeneti ellenállás értéke nem megfelelő.

Két erősítőfokozat összekapcsolását csatolásnak nevezzük.

Csatolásfajták:

1. RC csatolás,
2. közvetlen csatolás (emittercsatolás),
3. közvetlen csatolás (kollektorkapcsolás),
4. transzformátoros csatolás.

RC csatolás



1. ábra RC csatolású erősítő

A C_2 kondenzátor egyenáramú szempontból elválasztja a fokozatokat egymástól. Minden egyes fokozat munkapontját saját bázisosztó állítja be.

Hátránya: az erősítés frekvenciafüggő, mivel C_2 a 2. fokozat bemeneti ellenállásával felüláteresztő szűrőt alkot.

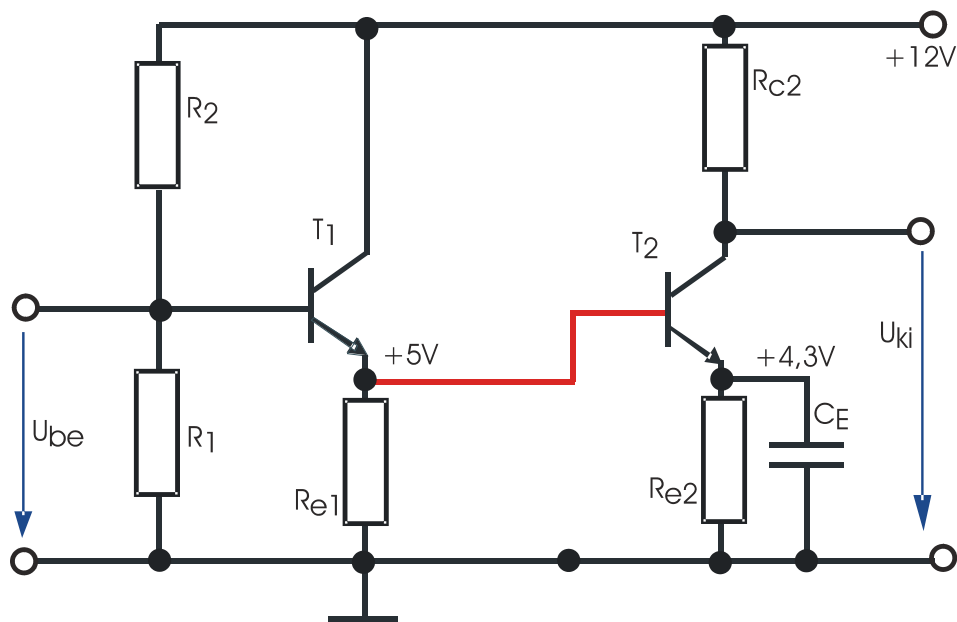
Előnye: a munkapontok egymástól függetlenek.

Közvetlen csatolás (emittercsatolás)

A T2 bázis-előfeszültsége a két emitter-ellenállás feszültségének különbsége.

Hátránya: T2 munkapontja T1-től függ.

Előnye: frekvenciafüggetlen csatolás, egyenfeszültség erősítéssel. T1 kis kimeneti ellenállású kollektor-kapcsolásban működik.



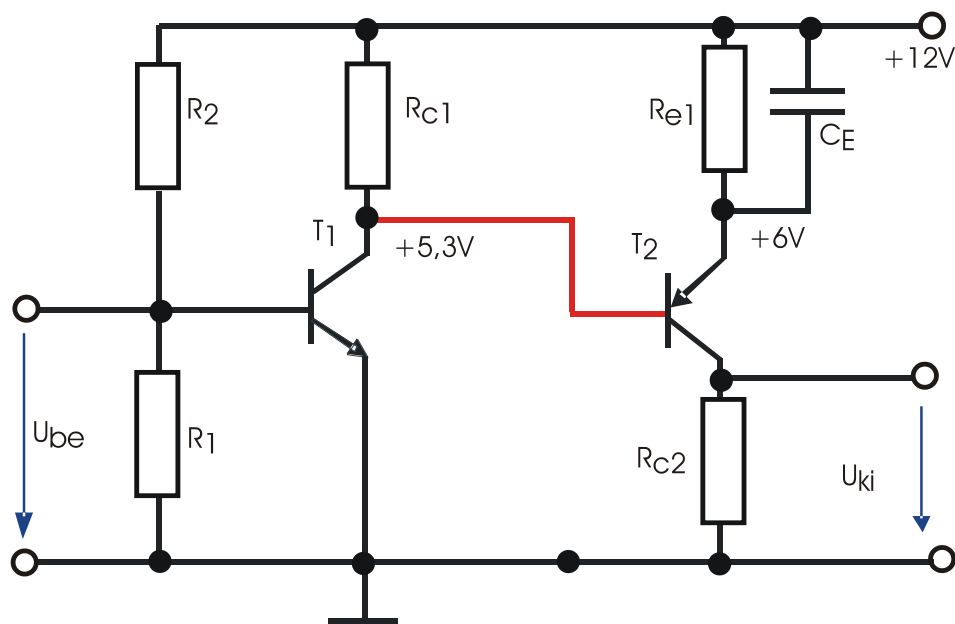
2. ábra. Közvetlen csatolású erősítő

Közvetlen csatolás (kollektorkapcsolás)

T2 bázis-előfeszültsége U_{CE1} (5,3 V) és U_{RE1} (6 V) különbsége. Mindkét tranzisztor emitterkapcsolásban működik.

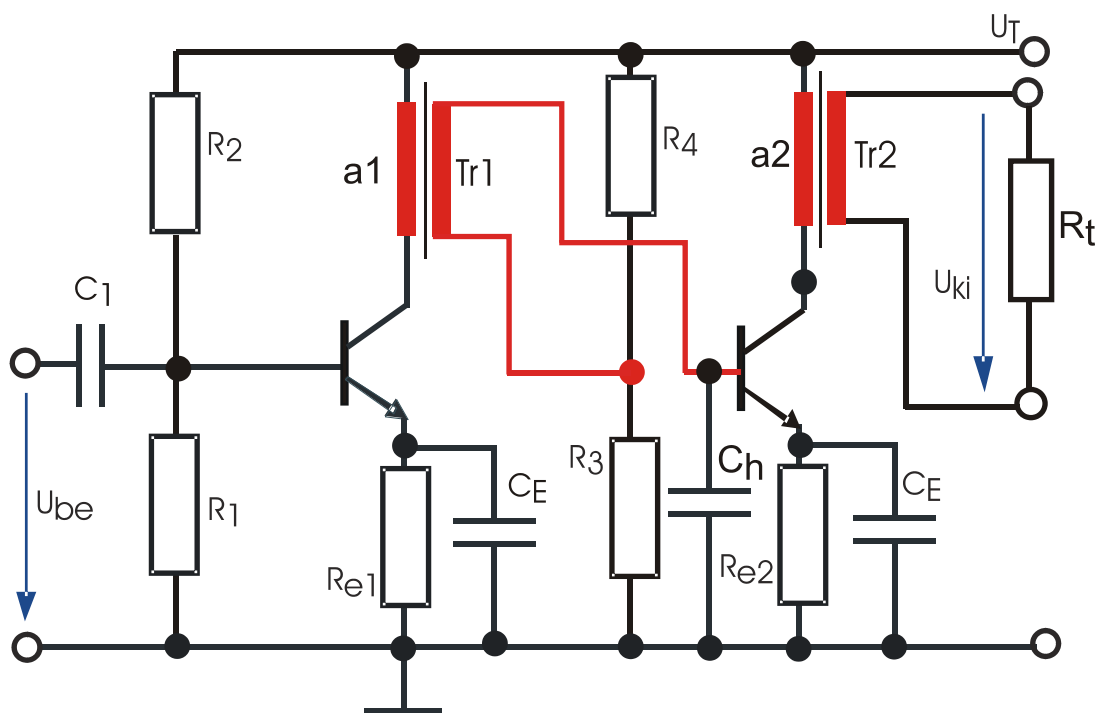
Hátránya: T2 munkapontja függ T1-től. T2 emitter-ellenállása nagy (feszültségvesztés).

Előnye: frekvenciafüggetlen csatolás, egyenfeszültség-erősítéssel.



3. ábra. Közvetlen csatolás (kollektorkapcsolás)

Transzformátoros csatolás



4. ábra. Transzformátoros csatolású erősítő

A transzformátor egyenáramú szempontból elválasztja egymástól a fokozatokat.

Hátránya: a transzformátor drága, nagy és nehéz. A vasmag nemlineáris mágnesezési görbéje miatt az erősítendő szinuszos jel alakja eltorzul, nagyfrekvencián pedig a transzformátor frekvenciafüggése miatt csökken az átvitel, vagyis a kimenőjel nagysága.

Előnye: teljesítményillesztés lehetséges. A munkapontok függetlenek egymástól.

Eredő erősítés

A láncba kapcsolt erősítőfokozatok eredő erősítése az egyes fokozatok erősítésének szorzata: $A_{Ue} = A_{U1} \cdot A_{U2} \cdot A_{U3} \cdot \dots \cdot A_{Un}$

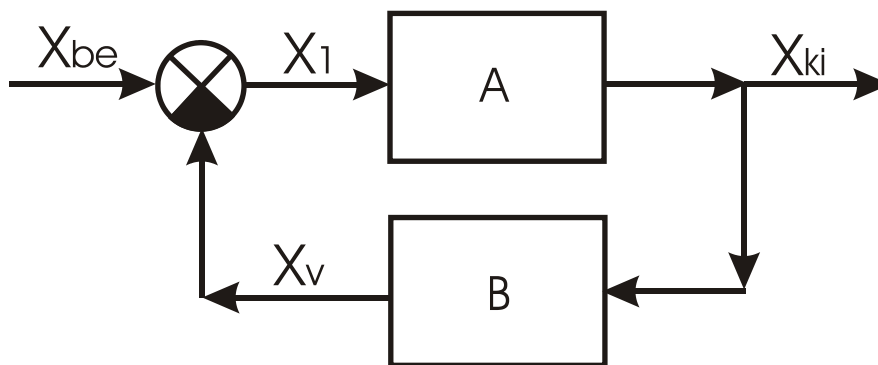
Az eredő erősítés dB-ben kifejezett értéke: $A_{Ue}^{dB} = A_{U1}^{dB} + A_{U2}^{dB} + A_{U3}^{dB} + \dots + A_{Un}^{dB}$

Az eredő bemeneti ellenállás az első fokozat bemeneti ellenállása, a kimeneti ellenállás pedig az utolsó fokozat kimeneti ellenállása lesz.

$$R_{ebe} = R_{be1}; \quad R_{eki} = R_{kiutolsó}$$

2. Visszacsatolások

Ha egy erősítő kimeneti feszültségének egy részét visszavezetjük a bemenetre, akkor visszacsatolásról beszélünk.



5. ábra. A visszacsatolás hatáslánca

A hatáslánc elemei:

- Az X mennyiségek a jelek, lehetnek feszültségek vagy áramok. Az X_{be} bemeneti jel, az X_v visszacsatolt jel, az X_1 vezérlőjel.
- Az erősítő, amelynek átvitele $A = \frac{X_{ki}}{X_1}$
- A visszacsatoló hálózat, amelynek feladata a kimeneti jel egy részének visszajuttatása a bemenetre. A visszacsatolási tényező $B = \frac{X_v}{X_{ki}}$
- A visszacsatolással módosított jellemzőkkel rendelkező erősítő átvitele $A_v = \frac{X_{ki}}{X_{be}}$.

Ha a visszavezetett feszültség a bemeneten lévővel azonos fázisban van, akkor pozitív visszacsatolás van, ha ellenfázisban van, akkor negatív visszacsatolásról beszélünk.

Negatív visszacsatolás

Negatív visszacsatolás esetén a feszültségerősítés kisebb, mert a bázis–emitter feszültség és a visszacsatolt feszültség eredője kisebb, mint a bemeneti feszültség.

A vezérlőjel $X_1 = X_{be} - X_v$, így az erősítő kimeneti jele, ennek erősítésszerese, $X_{ki} = A \cdot (X_{be} - X_v) = A \cdot X_{be} - A \cdot X_v \Rightarrow X_{ki} = A \cdot X_{be} - A \cdot B \cdot X_{ki}$.

A visszacsatolt átvitel: $A_v = \frac{X_{ki}}{X_{be}} = \frac{A}{1 + B \cdot A}$.

A visszacsatolás mértéke: $1 + BA$ mennyiség, amely az erősítés csökkenését határozza meg.

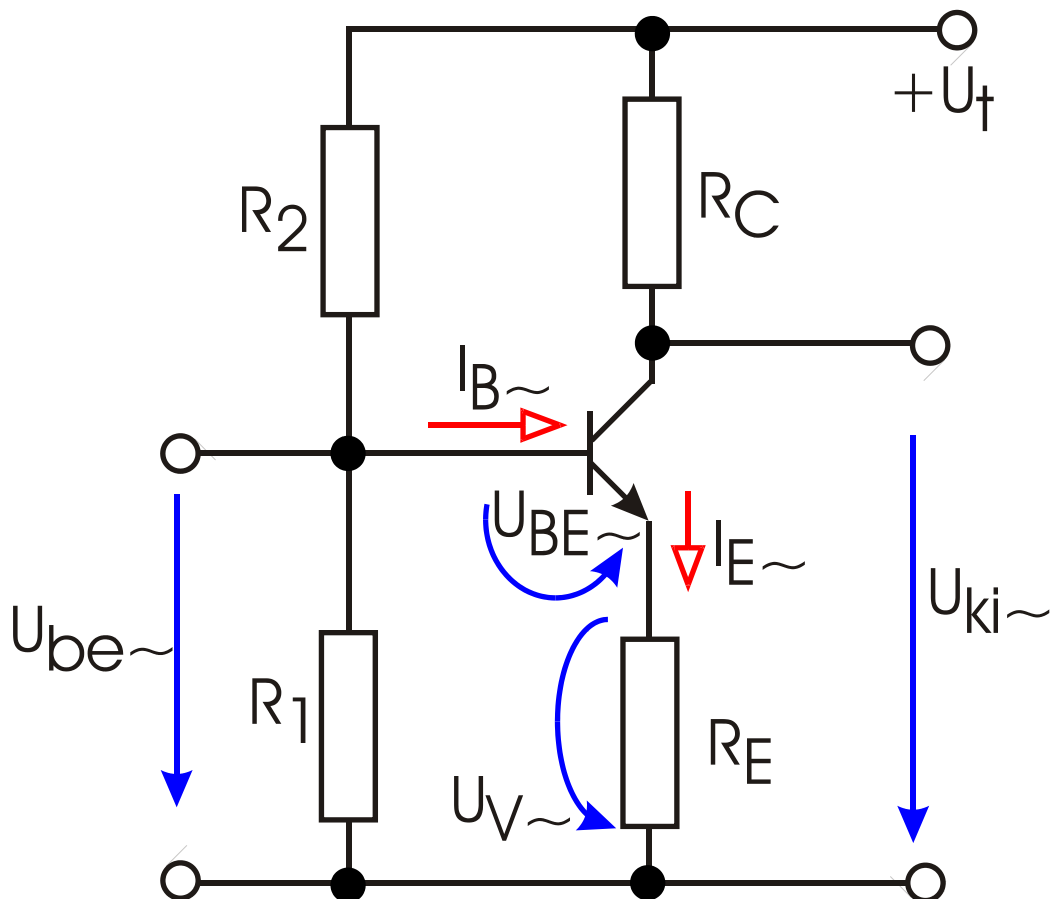
Hurokerősítés: $H = BA$.

Negatív visszacsatolás esetén a torzítási tényező az erősítéssel azonos arányban csökken.

Negatív visszacsatolás típusai:

- áram–visszacsatolás,
- feszültség–visszacsatolás.

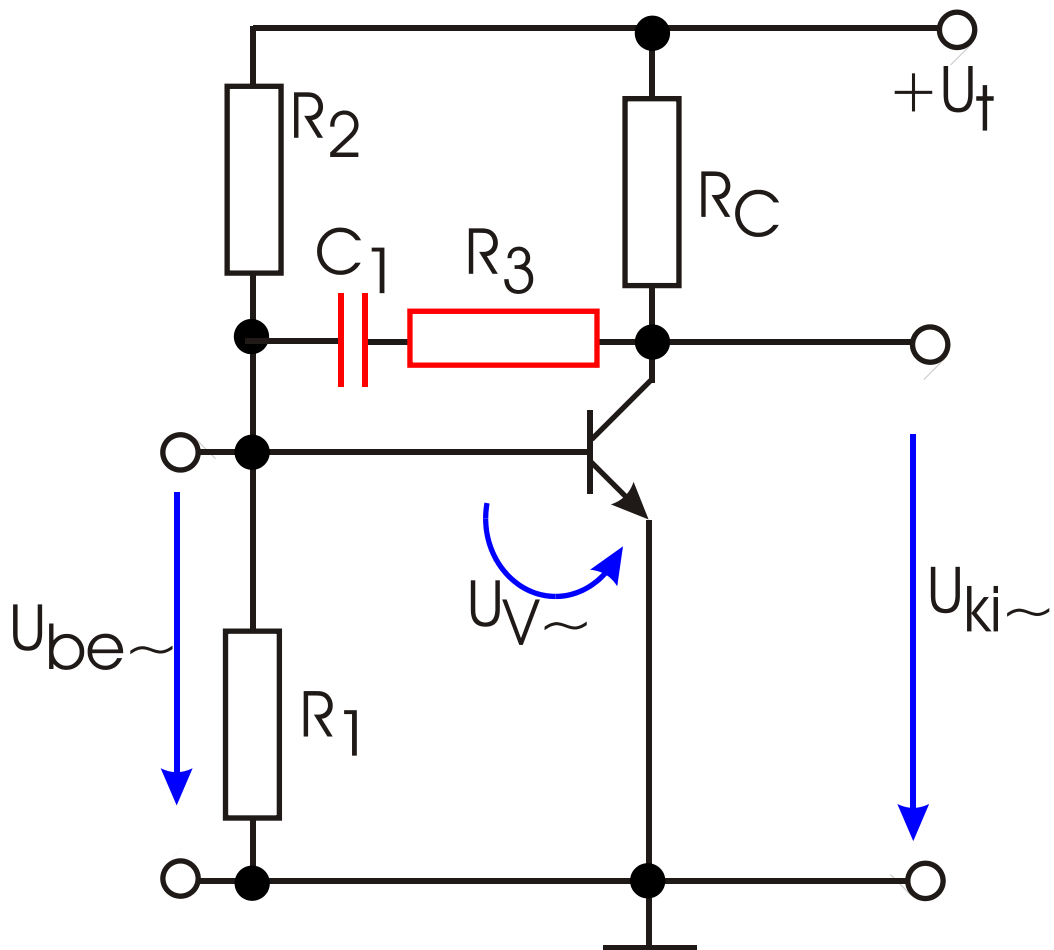
Az áram–visszacsatolást az emitterkörben elhelyezett ellenálláson átfolyó emitteráram hozza létre. A váltakozó áramú visszacsatolással együtt egyenáramú visszacsatolás is létrejön, ezáltal a munkapont stabilizálódik. Ha a váltakozó áramú visszacsatolást kisebbre kívánják beállítani, mint az egyenáramú visszacsatolást, akkor az emitterkörbe helyezett ellenállást részben, vagy teljesen át kell hidalni egy kondenzátorral. A teljes áthidaláskor, feltéve, hogy $R_E > X_C$, a váltakozó áramú visszacsatolás megszűnik.



6. ábra. Negatív áram-visszacsatolás

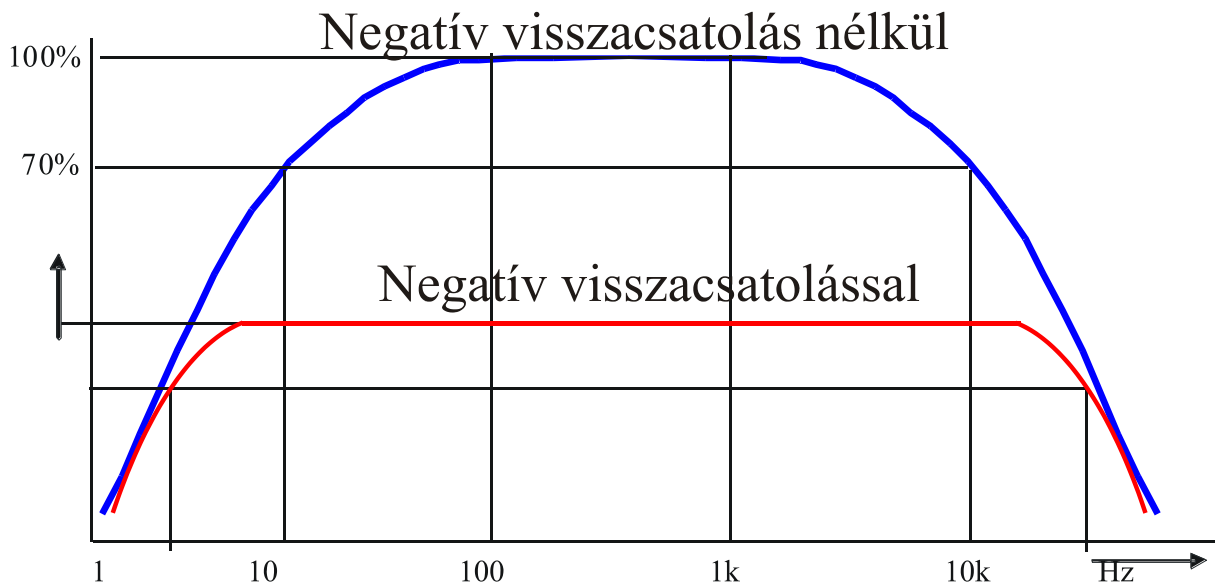
A negatív áram-visszacsatolást soros visszacsatolásnak is nevezik, mert a bemenetre adott feszültség és a visszacsatolt feszültség sorba kapcsolódik. Az eredő vezérlőfeszültség a visszacsatolás miatt kisebb, mint a bemeneti feszültség. Ezáltal a bemeneti ellenállás látszólag megnő. A soros negatív visszacsatolás speciális esete a kollektorkapcsolás.

Feszültség-visszacsatolásnál a kimeneti feszültséget egy vagy két erősítőfokozattal előbbre vezetik vissza. Az egy erősítőfokozattal való visszavezetést párhuzamos visszacsatolásnak is nevezik, mert a bemenetre adott feszültség és a visszacsatolt feszültség párhuzamosan kapcsolódik. Ezért a bemeneti áram egy része átfolyik a visszacsatoló ágon is, és a bemeneti ellenállás látszólag lecsökken.



7. ábra. Negatív feszültség-visszacsatolás

A visszacsatolt fokozat sávszélessége a visszacsatolás hatására megnő. Az alsó és felső határfrekvencia közelében az erősítés csökken, ezáltal a visszacsatolt feszültség is kisebb. Ennek következtében a határfrekvenciák kitolódnak, és az átviteli tartományban a csillapítási torzítások kisebbek.



8. ábra. Erősítő átviteli karakterisztikája negatív visszacsatolással és anélkül

A negatív visszacsatolás csökkenti a lineáris és a nemlineáris torzítást.

Pozitív visszacsatolás

Pozitív visszacsatolásnál a vezérlőjel értékét a visszacsatolt és a bemeneti jel összege adja:

$$X_1 = X_{be} + X_v$$

Tehát a visszacsatolt átvitel értéke:

$$A_v = \frac{A}{1 - B \cdot A}$$

A $H = B \cdot A$ hurokerősítés nagyságától függően három eset lehetséges:

- $H < 1$, ilyenkor a visszacsatolt átvitel nagyobb lesz, mint az eredeti átvitel.
- $H > 1$, eset fizikailag azt jelenti, hogy a visszacsatolt jel nagyobb, mint amekkora a kimeneti jel létrehozásához szükséges lenne. Ennek következménye állandóan növekvő kimeneti feszültség.
- $H = 1$, akkor a visszacsatolás mértéke éppen nulla, vagyis matematikailag a visszacsatolt átvitel végtelen. Az erősítőnek erre az állapotára azt mondjuk, hogy az erősítő gerjed. Ez nem megengedett, így az erősítő nem használható.

Az erősítéstechnikában pozitív visszacsatolást nem használunk.

Összefoglalás:

A visszacsatolás célja, hogy az erősítő tulajdonságait az erősítő felhasználási céljának megfelelően módosítsa.

A leggyakrabban előforduló célok:

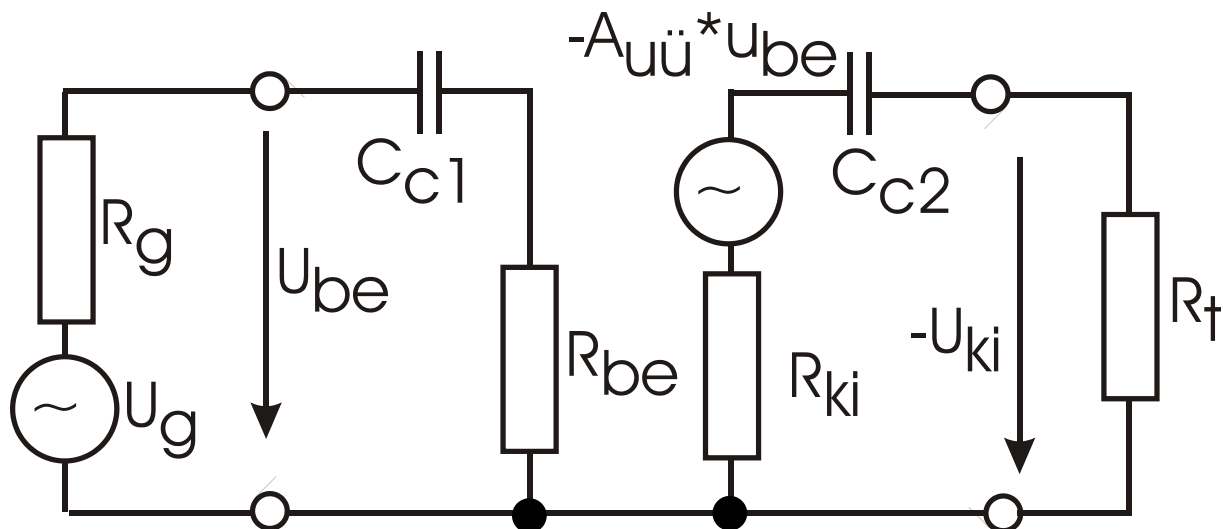
- nagy bemeneti ellenállású erősítő készítése,
- kis kimenetű ellenállású erősítő készítése,
- nagy bemeneti és kis kimeneti ellenállású erősítő készítése,
- nagy feszültségerősítés, nagy bemeneti és kis kimeneti ellenállás megvalósítása.

3. Az erősítők frekvenciafüggése

Az erősítés változása kisfrekvencián

A közös emitteres erősítő alkapcsolásokban, kisfrekvenciás tartományban a csatolókondenzátorok és az emitterkondenzátor okoz frekvenciafüggést és fázistolást.

A csatolókondenzátorok hatásának vizsgálata kisfrekvenciás helyettesítő kép alapján történik.



9. ábra. A közös emitteres alkapcsolás kisfrekvenciás helyettesítő képe

Az erősítő bemeneti körében a C_{c1} csatolókondenzátor, a bemeneti ellenállás és a generátor-ellenállás soros RC-tagot alkot. A kimeneti körben a C_{c2} csatolókondenzátor, a kimeneti ellenállás és a terhelés alkot soros RC-tagot.

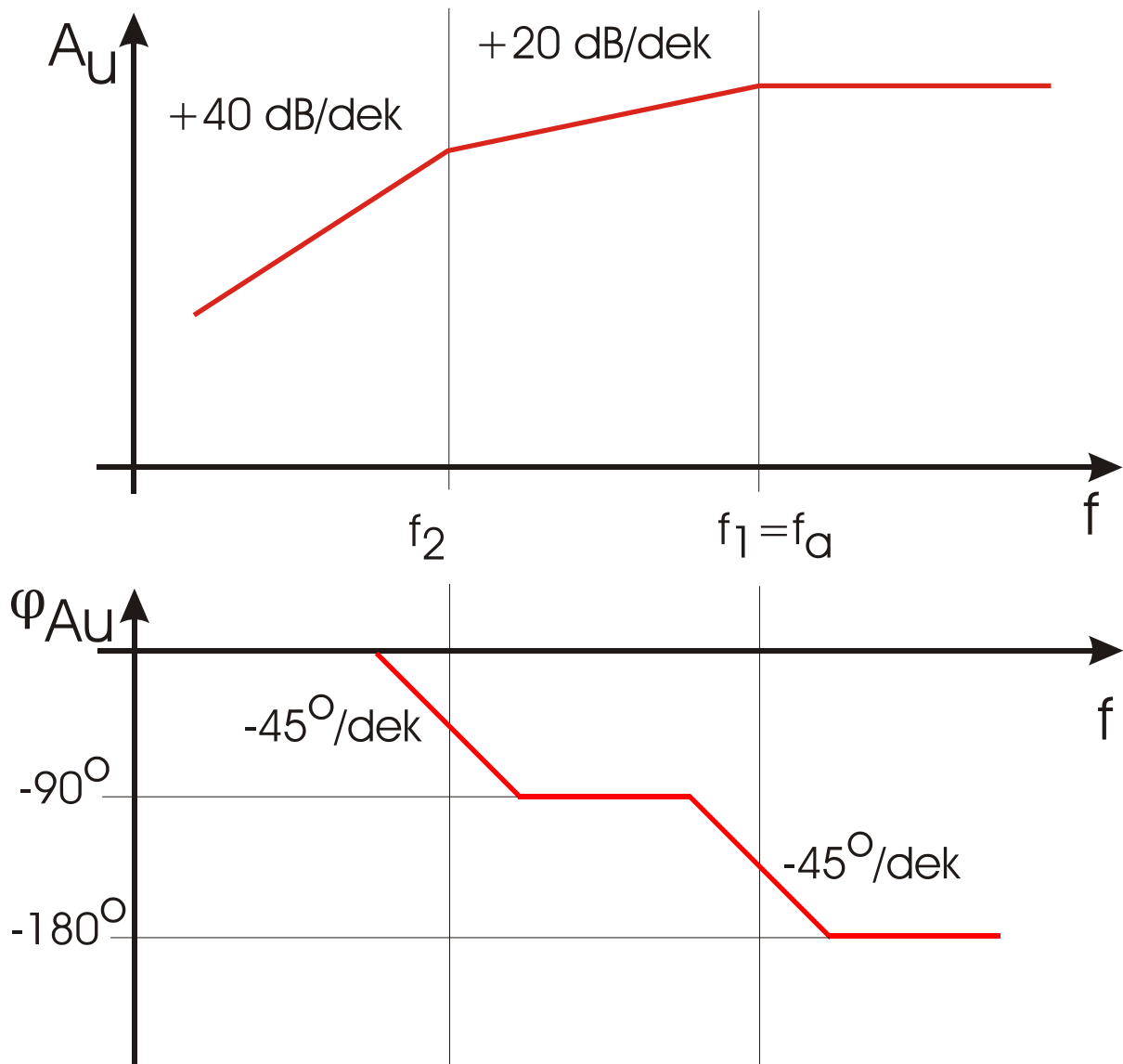
Ez alapján a bemeneti kör határfrekvenciája:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{c1} \cdot (R_{be} + R_g)}$$

A kimeneti kör határfrekvenciája:

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{c2} \cdot (R_{ki} + R_t)}$$

Mindkét határfrekvencián külön-külön az átvitel éppen 3 dB-lel csökken.



10. ábra. A csatolókondenzátorok hatása

A határfrekvenciánál kisebb frekvenciákon mindkét RC-tag 20 dB/dekád értékkel változtatja az erősítő erősítését.

Az RC-tagok egyenként $+45^\circ$ -os fázistolást okoznak határfrekvenciájukon az erősítő eredeti fázistolásához képest.

A határfrekvenciák környezetében a fázistolás változása $45^\circ/\text{dekád}$, a változás RC-tagonként maximálisan $+90^\circ$.

Az alsó határfrekvencia csökkentése érdekében lehetőleg nagy csatolókondenzátort és nagy ellenállást kell alkalmazni.

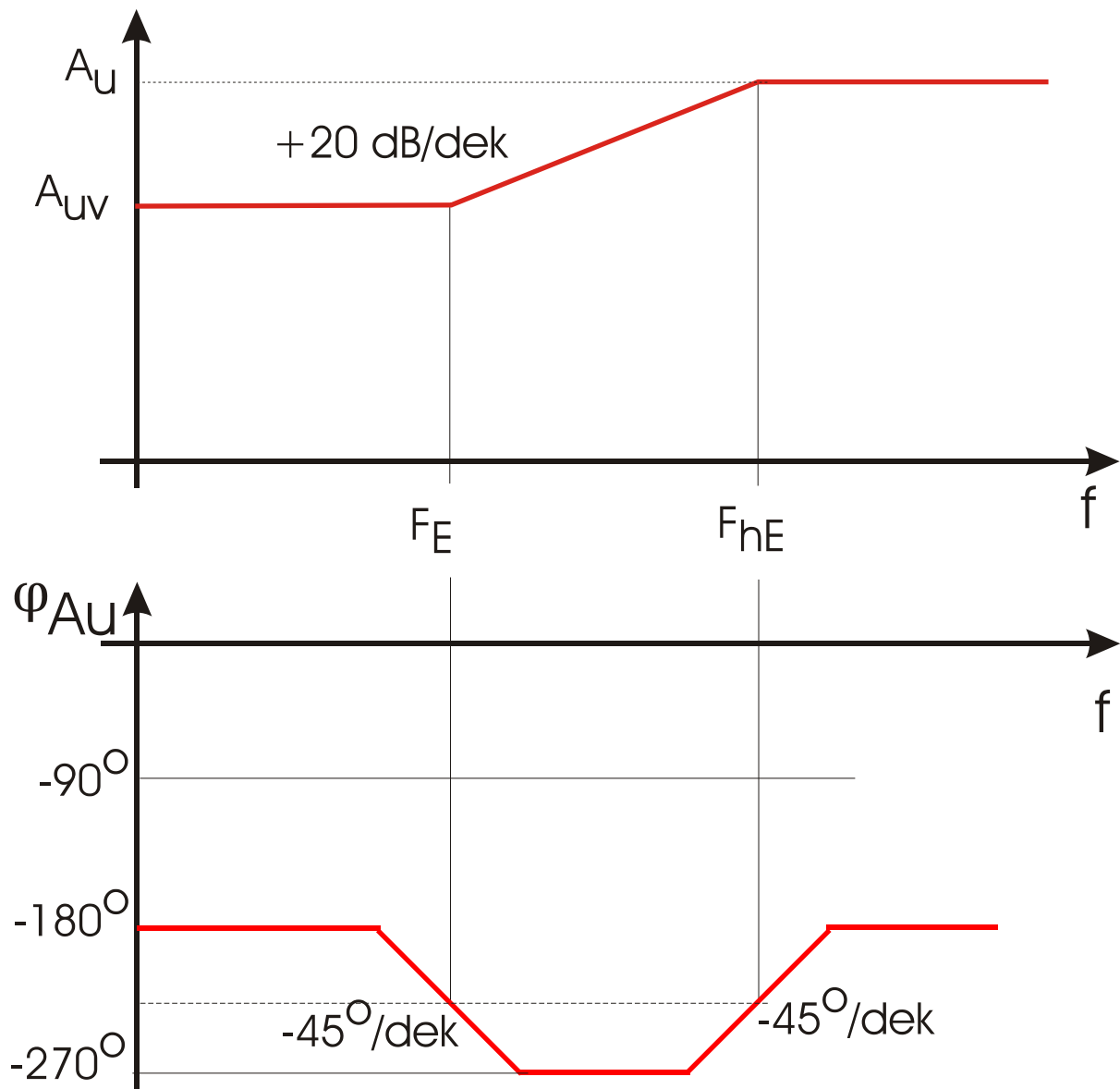
Az emitterkondenzátor az emitter-ellenállással párhuzamos RC-tagot alkot. A frekvencia csökkenésével a kapacitív reaktancia egyre nő, egészen kis frekvenciákon olyan nagy értékűvé válik, hogy szakadásnak tekinthető az R_E ellenállás mellett. Ilyenkor tehát, az emitter-ellenállás nincs rövidre zárva váltakozó áramú szempontból. Az a frekvencia, amely alatt ez igaz, az f_E emitterkörü határfrekvencia, amelynek értéke

$$f_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_E \cdot R_E}$$

Az emitterkörü határfrekvencia alatt az erősítő egy soros, negatív áram-visszacsatolással rendelkező kapcsolás, amelynek erősítése:

$$A_{uv} = \frac{A_u}{1 + \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot R_E}$$

Az f_E frekvencia mellett, az erősítés 20 dB/dekád értékkel növekszik addig, amíg eléri a közepes frekvenciákon érvényes értéket.



11. ábra. Az emitterkondenzátor miatti frekvenciafüggés

Az ehhez tartozó frekvencia az f_{hE} törésponti frekvencia, amelynek értéke:

$$f_{hE} = f_E \cdot \frac{A_u}{A_{uv}}$$

A párhuzamos $R_E C_E$ -tag miatt a fázistolás az f_E frekvencián -45° , csökkentve a frekvenciát $45^\circ/\text{dekáddal}$, maximálisan 90° -os fázistolást okozva. Az f_E frekvencia környezetében a fázistolás változása ellentétes irányú.

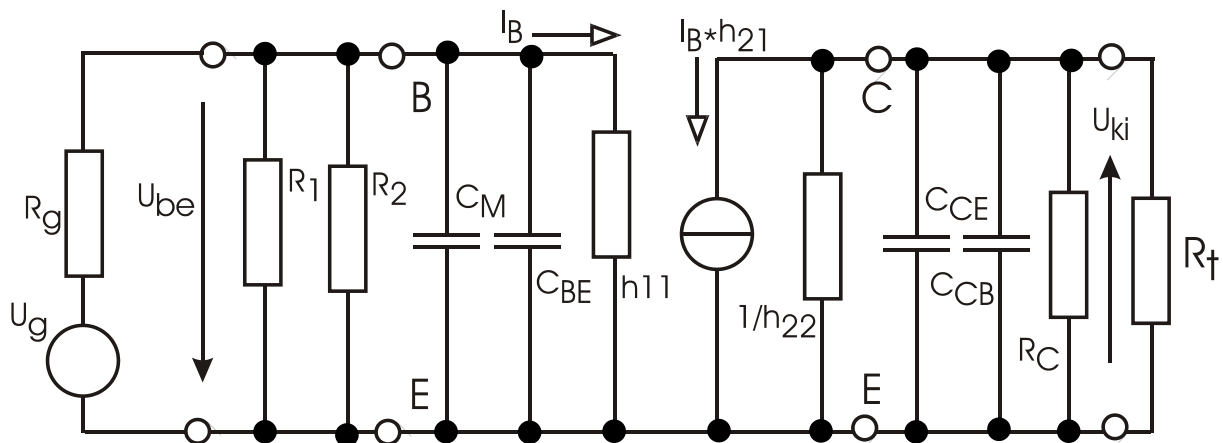
A közös emitteres erősítő erősítésének kisfrekvenciás változását a csatolókondenzátorok, és az emitterkondenzátor együttesen határozzák meg.

A négy határfrekvencia közül a legnagyobb az erősítő alsó határfrekvenciája.

Az erősítés változása nagyfrekvencián

A kis- és közepes frekvenciák tartományában a tranzisztorok elektródái között meglévő kapacitások reaktanciája olyan nagy, hogy az szakadásnak tekinthető, ezért az erősítő működését nem befolyásolja. Nagyfrekvenciás tartományban a reaktancia egyre csökken, ezért a tranzisztort vezérlő bemeneti váltakozó áram, és a kimeneti áram egy része ezeken a kapacitásokon folyik el. Csökken ezért a tranzisztort ténylegesen vezérlő áram nagysága, és a terhelésre jutó áram nagysága is. Az elektróda kapacitásokon kívül befolyásolják az erősítő működését az áramkörök megépítésekor jelentkező szerelés és szórt kapacitások, valamint a terhelő-ellenállás mellett jelentkező esetleges kapacitás. Ezek együttes hatását a kimeneten jelentkező C_t terhelőkapacitással vesszük figyelembe. Az elektróda kapacitások és a terhelőkapacitás jelenléte miatt változnak a tranzisztorral felépített erősítők jellemzői. Az a frekvencia, amely felett ezek a változások már számottevőek, az erősítő felső határfrekvenciája.

A változások vizsgálatához a felső határfrekvencia környezetében, ill. felette, a tranzisztorok nagyfrekvenciás helyettesítő képét használjuk.



12. ábra. A közös emitteres kapcsolás nagyfrekvenciás helyettesítő képe

A bemeneti körben a C_{BE} és C_M Miller-kapacitásból számítható bemeneti kapacitással párhuzamosan kapcsolódnak az R_g , R_1 , R_2 és h_{11} ellenállások, ezért a bemeneti kör határfrekvenciája:

$$f_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{be} \cdot (R_g \times R_{be})} \text{ ahol } C_{be} = C_{BE} + C_M \text{ és } R_{be} = R_1 \times R_2 \times h_{11}.$$

A kimeneti kör határfrekvenciája a helyettesítő kép alapján:

$$f_{ki} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (C_{ki} + C_t) \cdot (R_{ki} \times R_t)} \text{ ahol } C_{ki} = C_{CB} + C_{CE} \text{ és } R_{ki} = \frac{1}{h_{22}} \times R_C.$$

Mindkét határfrekvencia felett az erősítés külön-külön 20 dB/dekáddal csökken. A fázistolás mindkét határfrekvencián külön-külön az eredetihez képest -45° -kal változik, környezetében 45° /dekáddal csökken, maximálisan 90° -kal.

Az erősítő felső határfrekvenciája a ki- és bemeneti határfrekvencia közül a kisebbik.

Az erősítők sávszélessége, szélessávú erősítők.

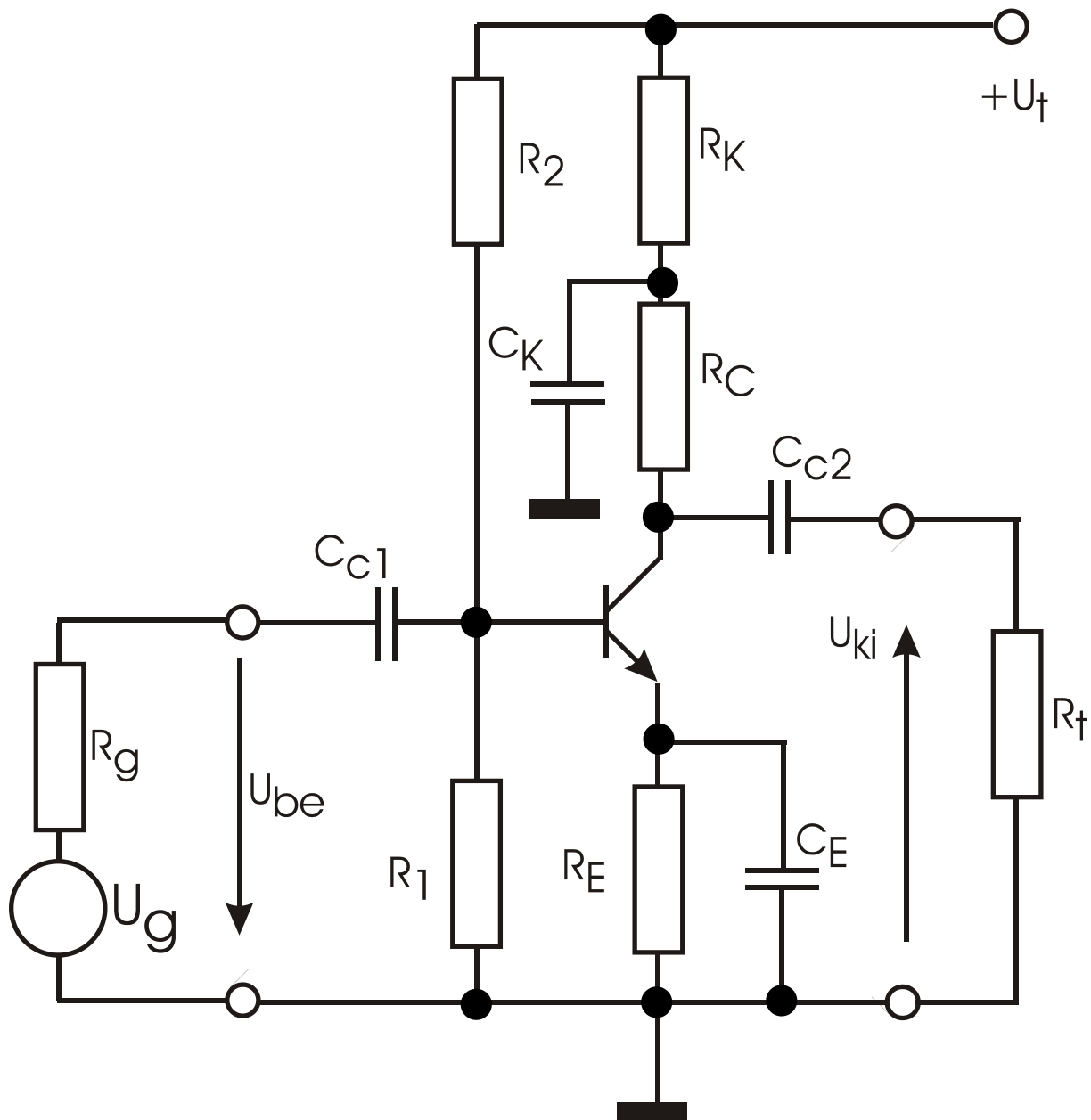
Az erősítők kis- és nagyfrekvenciás tartományában jelentkező frekvenciafüggést együttesen figyelembe véve meghatározható az a frekvenciatartomány, amelyen belül az erősítés mértéke frekvenciafüggetlen. Ezt a frekvenciatartományt az erősítő sávszélességének nevezzük, és B -vel jelöljük, és az eredményt Hz-ben kapjuk.

$$B = f_f - f_a .$$

A közepes frekvenciákhoz viszonyítva a határfrekvenciákon a mért erősítés -3 dB-lel csökken. Viszonyszámban kifejezve az erősítés $\sqrt{2}$ -ed részével 0,707 szerezére csökken. Az erősítő fázistolása a közepes frekvenciákon mérhető fázistoláshoz képest 45° -kal változik.

Sávszélesség növelése kompenzációval

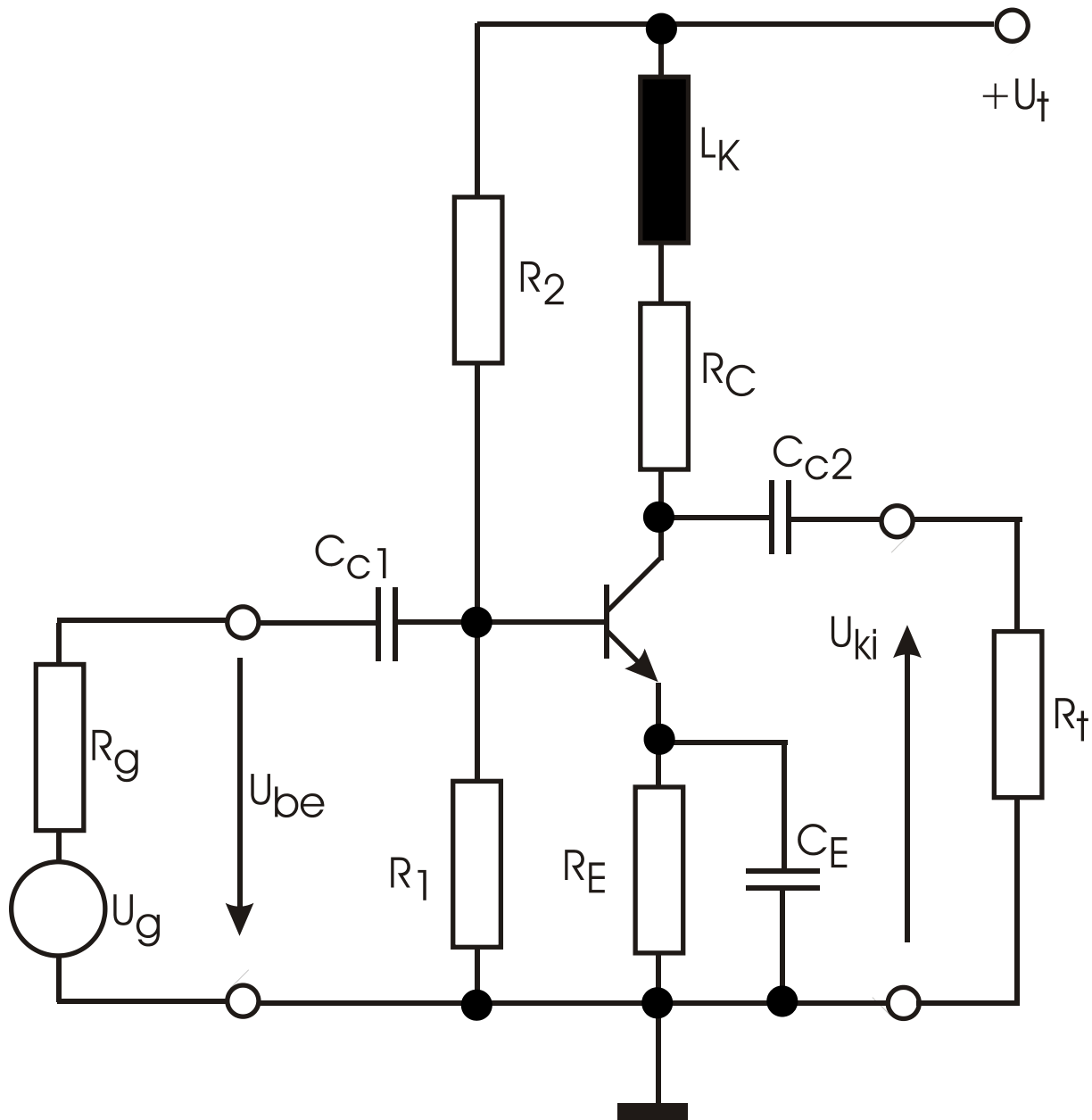
Kompenzációval az alsó, ill. a felső határfrekvenciákon jelentkező erősítés-csökkenést egyenlítjük ki, az adott lehetséges határok között.



13. ábra. Kompenzálás kisfrekvencián

A C_K kompenzáló kapacitás párhuzamosan kapcsolódik az R_K ellenállással váltakozó áramú szempontból. A két kompenzáló elem értéke olyan, hogy az erősítő frekvenciafüggetlen tartományában a C_K rövidre zárja váltakozó áramú szempontból R_K -t, így az nem befolyásolja az erősítő tulajdonságait. Az alsó határfrekvencia alatt azonban a frekvencia csökkenésével egyre inkább nő az általa képviselt reaktancia. Ez párhuzamosan kapcsolódva az R_K -val egy Z_K impedanciát képvisel. Az R_K munkaellenállással sorba kapcsolódó Z_K növeli az erősítő erősítését, mert a munkaellenállás értékével arányosan változik az erősítés. Mivel a változást RC-tag (C_K , R_K) hozza létre, ezért a változás mértéke dekádonként 20 dB. A frekvencia csökkenésével addig nő az erősítés, amíg a kapacitív reaktancia olyan nagy lesz, hogy a párhuzamos kapacitás miatt $Z_K \cong R_K$ állandó. Az a frekvencia lesz az f_{ak} kompenzált alsó határfrekvencia, amelyen ez bekövetkezik.

Nagyfrekvenciás kompenzálás



14. ábra. Nagyfrekvenciás kompenzálás

A kompenzáló induktivitás párhuzamosan kapcsolódik a tranzisztor kapacitásaiból származó C_{ki} kimeneti kapacitással, és a következő fokozat bemeneti kapacitásával, mint C_t terhelő kapacitással. A C_{ki} , C_t és L_K elemek párhuzamos rezgőkört alkotnak. Helyesen megválasztva L_K értékét, a rezgőkör átviteli jelleggörbéjének kezdeti szakasza éppen kiegyenlíti az eredeti f_f frekvencián kezdődő erősítéscsökkenést. A rezonancia L_K -val történő helyes megválasztása mellett a jó kompenzálás feltétele, hogy a rezgőkör jósági tényezője is megfelelő legyen. Az optimális jósági tényezőnél nagyobb túlkompenzálást okoz, a kisebb pedig nem érhető el a legnagyobb felső határfrekvencia.

4. Nagyjelű erősítők

Feladata: a terhelő–ellenállásra a lehető legnagyobb feszültséget, vagy teljesítményt adja le. Ennek megfelelően a nagyjelű erősítők két fajtája, a nagyjelű feszültségerősítők és a teljesítményerősítők. Jellemzőjük, hogy a felhasznált tranzisztorok vezérlése nem a munkapont kis környezetében történik, hanem igénybe vesszük a teljes kivezérlési tartományt. A nagyjelű vezérlés miatt a tranzisztor már nem tekinthető lineáris erősítőelemnek, tehát nem helyettesíthető h paraméteres helyettesítő képével.

Nagyjelű feszültségerősítők

A tranzisztorok vezérlése kis kollektoráram mellett olyan nagy bemeneti feszültséggel történik, amely a terhelésre jutó kollektor–emitter feszültséget a teljes kivezérlési tartományba változtatja. A kis kollektoráram miatt a terhelésre jutó teljesítmény kicsi, a feszültség viszont a lehető legnagyobb. Az ilyen erősítőket használjuk az oszcilloszkópokban, a katódsugárcsövek eltérítő lemezeinek vezérlésére, a televíziók képcsövének vezérlésére, és ilyen erősítőket találunk az integrált műveleti erősítőkben kimeneti fokozatként.

Teljesítményerősítők

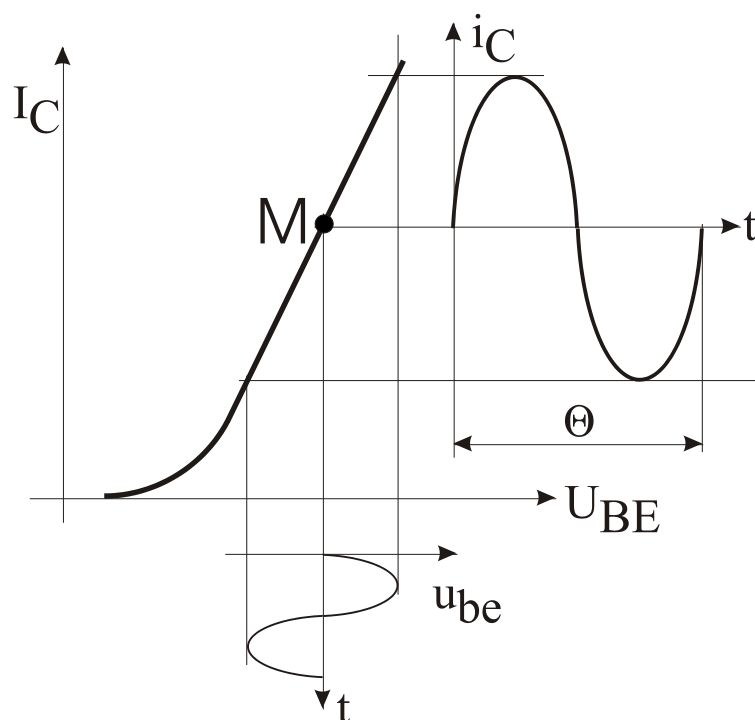
Annak érdekében, hogy a terhelő–ellenállásra a lehető legnagyobb teljesítmény jusson, a munkapont helyes megválasztásával a maximális kivezérelhetőséget a tranzisztor kollektor árama, és kollektor–emitter feszültsége esetében is biztosítani kell. Ahhoz, hogy a tranzisztor által előállított teljesítmény teljes egészében eljusson a terhelésre, a terhelést illeszteni kell az erősítőhöz. A nagyjelű vezérlés miatt a tranzisztor jelleggörbéit már nem tekinthetjük lineárisnak, ezért a kimeneti jel torzított lesz. A munkapont beállításánál ezért, a maximális kimeneti teljesítmény elérése mellett, törekedni kell a minimális torzításra is.

A teljesítményerősítők, a tápegységből felvett egyenáramú teljesítményből, a vezérlés hatására váltakozó áramú teljesítményt állítanak elő.

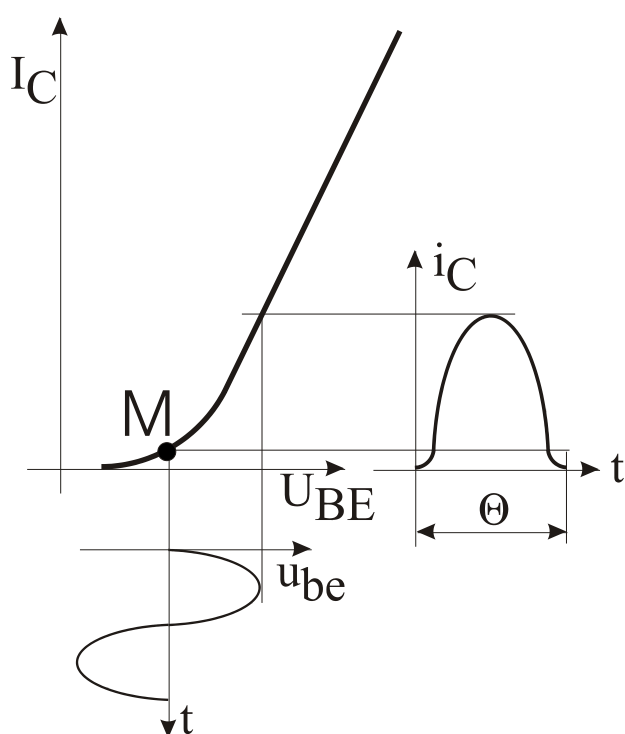
A teljesítményerősítő hatásfoka az erősítő által szolgáltatott P_{ki} kimeneti teljesítmény, és a tápegységből felvett P_f egyenáramú teljesítmény hányadosa.

$$\eta = \frac{P_{ki}}{P_f} \cdot 100 \text{ [\%]}.$$

A tápegységből felvett, de kimeneti teljesítményként nem hasznosított teljesítmény a tranzisztoron hővé alakul, disszipálódik. A disszipációs teljesítmény: $P_d = P_{ki} - P_f$.

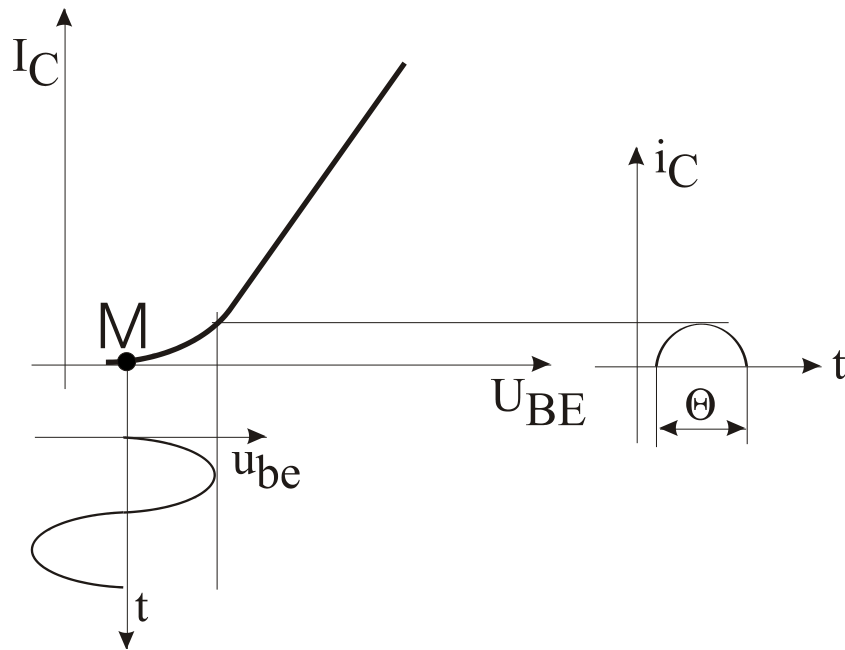


15. ábra. „A” osztályú munkapont

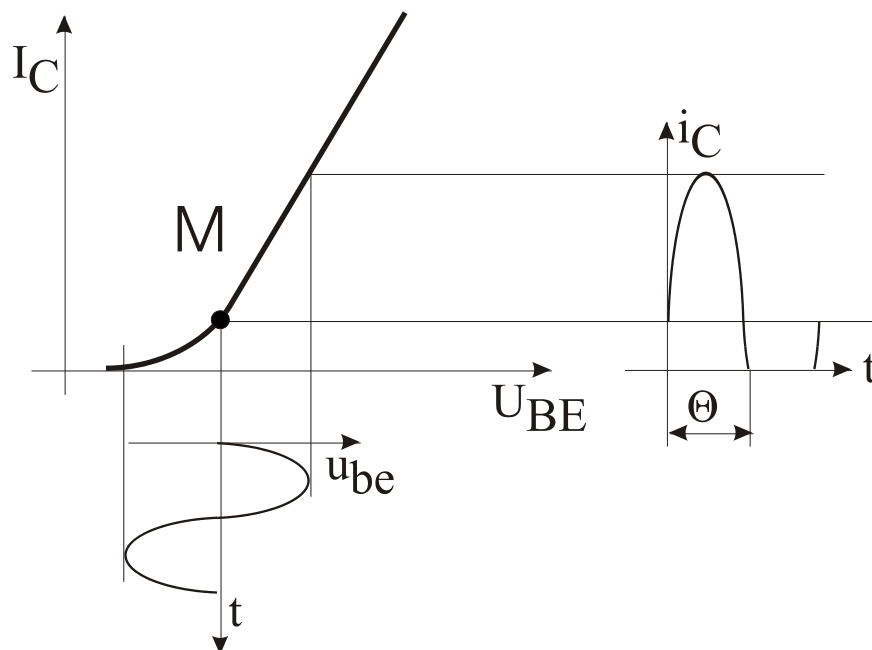


16. ábra. „B” osztályú munkapont

A megismert jellemzők értékének mindegyike attól függ, hogy a jelleggörbén hol választjuk meg a munkapontot. A munkapont helyétől függően a teljesítményerősítőket A, B, AB és C osztályba soroljuk. Az A, a B és az AB osztályú erősítőket legtöbbször hangerősítőként használjuk, bemeneti jelük hangfrekvenciás szinuszos jel, terhelő-ellenállásuk pedig hangszóró. A C osztályú erősítők elsősorban a nagyteljesítményű adóberendezésekben használatosak.



17. ábra. „C” osztályú munkapont



18. ábra. „AB” osztályú munkapont

Ellenütemű kapcsolások

Feladata: a hasznos teljesítmény növelése, ill. a hatásfok javítása.

Megfelelő méretezéssel nemlineáris torzításuk kisebb, mint az A osztályú végfokozatoké. A tranzisztor munkaegyesén felvett munkapont helyzetétől függő hatásfok főleg a telepes üzemű készülékeknél fontos szempont.

Vezérlés hatására mindkét tranzisztoron egy félperiódusnak megfelelő áram folyik, amelyek középértéke: $I_{CE} = \frac{I_{C \max}}{\pi}$.

Az erősítő kivezérése használat közben a kivezérés nélküli állapottól a maximális kivezérhetőség határáig változhat, ezért az éppen aktuális kivezérés jellemzésére célszerű bevezetni a vezérlési tényezőt. A v vezérlési tényező a mindenkor u_{be} bemeneti feszültség és a maximális kivezéréshez tartozó $u_{be \max}$ bemeneti feszültség hányadosa.

$$v = \frac{u_{be}}{u_{be \max}}.$$

A tápegységből felvett teljesítmény a két tranzisztorra együttesen:

$$P_f = 2 \cdot v \cdot U_T \cdot \frac{I_{C \max}}{\pi}.$$

Ha nem vezéreljük a kapcsolást ($v = 0$), akkor $P_f = 0$.

A kimeneti teljesítmény a tranzisztorok áramainak és feszültségeinek effektív értékéből számítható, mindkét mennyiség tényleges értékét függővé téve a vezérlés nagyságától

$$P_{ki} = v \cdot \frac{U_{CE \max}}{\sqrt{2}} \cdot v \cdot \frac{I_{CE \max}}{\sqrt{2}} = \frac{v^2}{2} \cdot U_T \cdot I_{C \max}.$$

A „B” osztályú erősítő hatásfoka:

$$\eta = \frac{P_{ki}}{P_f} = \frac{\frac{v^2}{2} \cdot U_T \cdot I_{C \max}}{v \cdot \frac{2}{\pi} \cdot U_T \cdot I_{C \max}} = \frac{v \cdot \pi}{4} = 0.785 \cdot v.$$

Maximális kivezérésnél a kifejezés szerint, a „B” osztályú erősítő hatásfoka 78.5%-os. A teljes kivezérésnél kisebb bemeneti jel esetén a hatásfok arányosan csökken.

A disszipációs teljesítmény:

$$P_D = P_f - P_{ki} = v \cdot \frac{2}{\pi} \cdot U_T \cdot I_{C \max} - \frac{v^2}{2} \cdot U_T \cdot I_{C \max},$$

$$P_D = U_T \cdot I_{C \max} \cdot \left(v \cdot \frac{2}{\pi} - \frac{v^2}{2} \right)$$

A tranzisztoron létrejövő disszipáció a $v = 0.6$ (60%-os) vezérlés mellett a legnagyobb.

Az ellenütemű B osztályú végfokozatok kivezélés nélkül nem vesznek fel egyenáramú teljesítményt. Hatásfokuk teljes kivezélés esetén megközelítik a 70%-ot.

TANULÁSI RÁNYÍTÓ

Ez a tartalomelem igényli az előismereteket.

Ilyenek az

- elektrotechnikai alapfogalmak,
- passzív és aktív áramkört alkatrészek,
- a félvezető áramkört elemek,
 - félvezető diódák,
 - tranzisztorok,
- az elektronikai alapáramkörök ismerete:
 - kétpólusok,
 - négypólusok,
- erősítő alapkapsolások,
- elektronikai áramkörök szerelési technológiái.

A tananyag vázlata megmutatja azt a négy feladatcsoportot, amelyet végre kell hajtani a tananyag elsajátításához:

- többfokozatú erősítők,
- visszacsatolások,
- az erősítők frekvenciafüggése,
- nagyjelű erősítők.

A tartalomelem feldolgozása során használja a következő elektronikus elérhetőséget:

<http://eki.sze.hu/ejegyzet/ejegyzet/BorbelyG/keret.html>

<http://www.elektroncso.hu/cikkek.php> – Ezt az oldalt annak célszerű tanulmányozni, akit nem a félvezető alapú, hanem az elektroncsőből építendő erősítők érdekelnek.

Nagyfrekvenciás hangolt erősítőkről a http://www.puskas.hu/r_tanfolyam/erositok.pdf címen a 20–25. oldalon talál bővebb leírást.

Bővítse ismereteit a szakkönyvek, a szakfolyóiratok és az internet segítségével!

ÖNELLENŐRZŐ FELADATOK

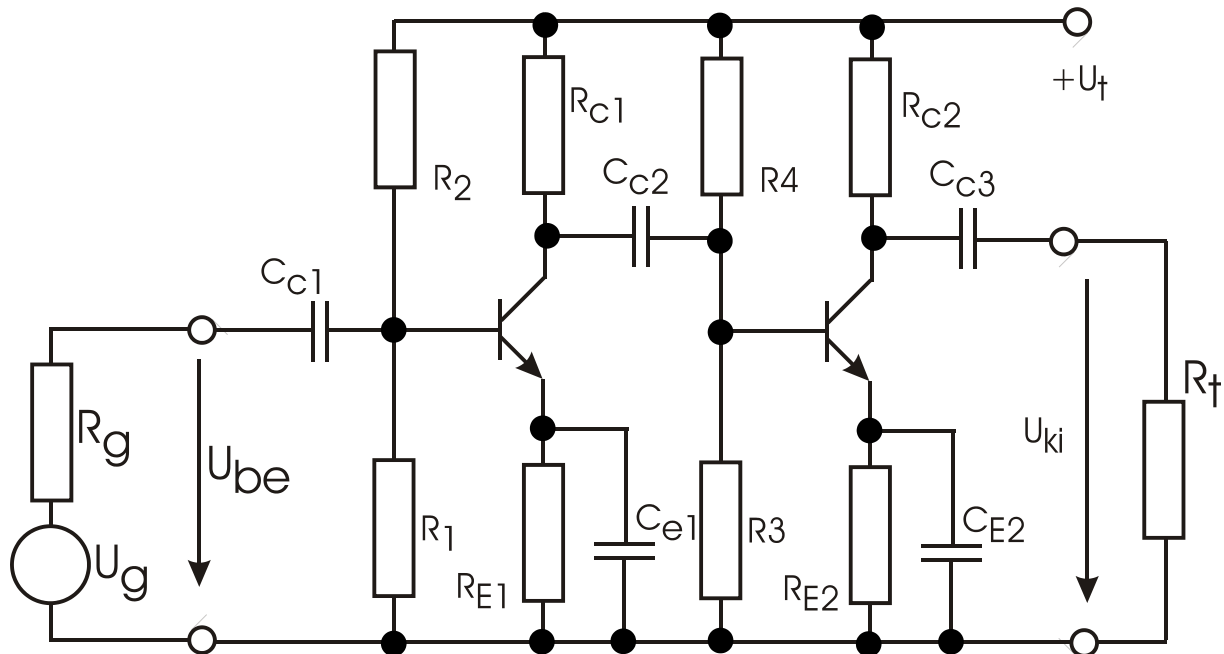
1. feladat

Egy RC csatolású, kétfokozatú erősítő esetében számítsa ki a munkapont beállító ellenállások értékeit, az eredő be- és kimeneti ellenállást, a feszültségerősítést üresjárásban és terhelés mellett, valamint az áramerősítést!

Adatok:

$$U_{CE01} = 5V, I_{C01} = 3mA, B_1 = 100, U_{BE01} = 0.6V, U_{CE02} = 6V, I_{C02} = 5mA, B_2 = 125,$$

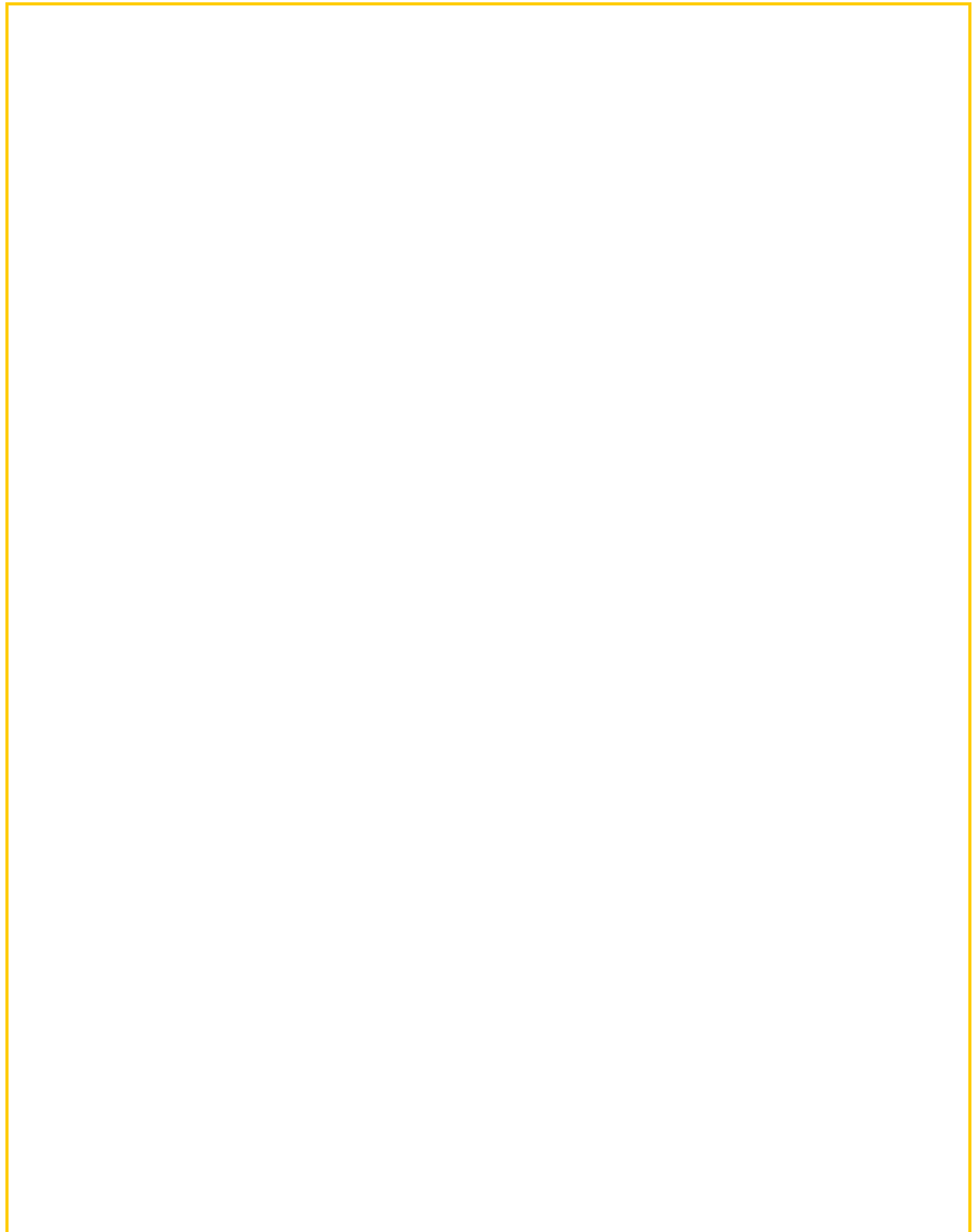
$$U_{BE02} = 0.7V, R_{C1} = 1k\Omega, R_{C2} = 620k\Omega, R_1 = 1k\Omega, U_T = 10V.$$



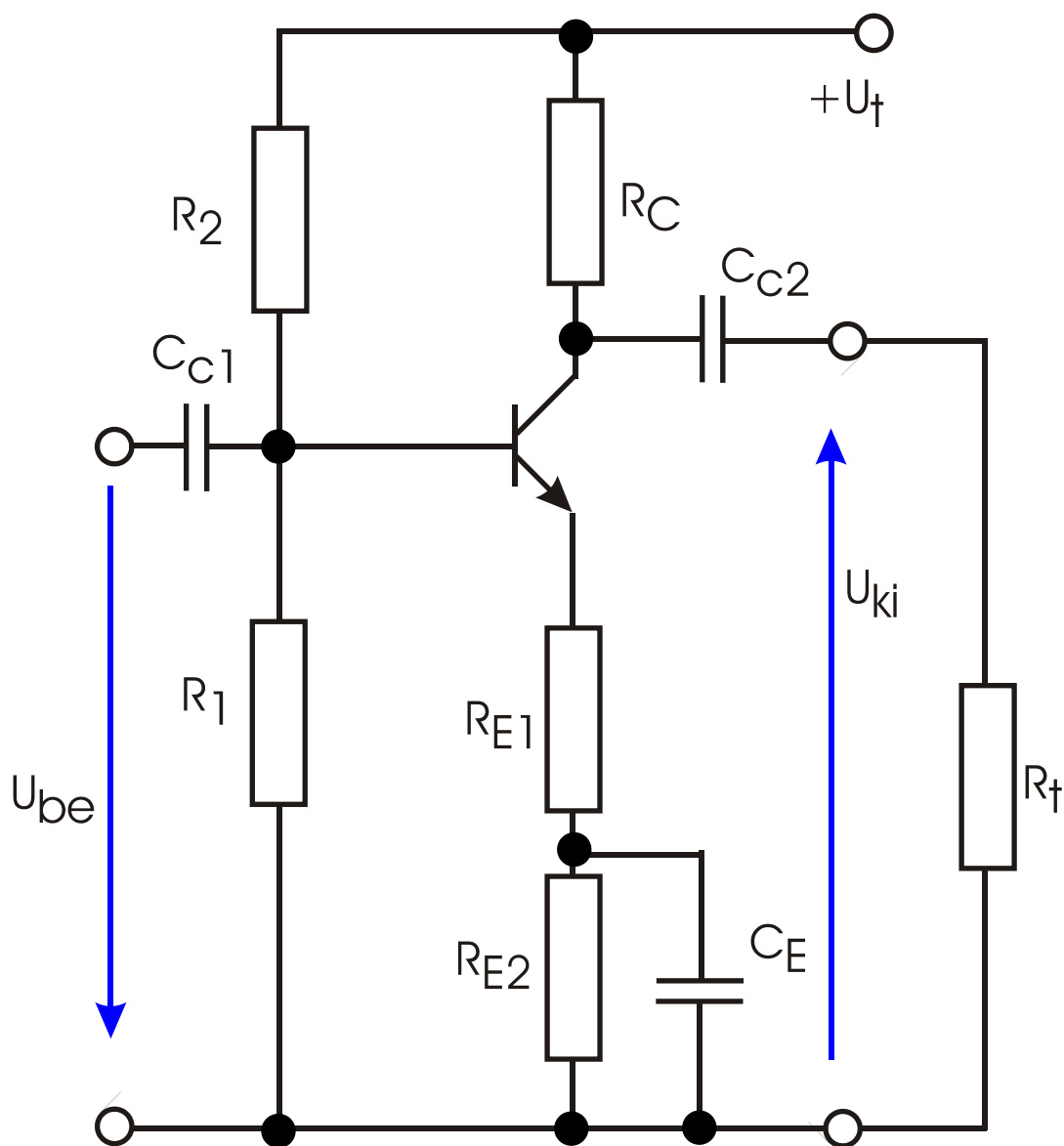
19. ábra. RC csatolású kétfokozatú erősítő

A T1 tranzisztor h paramétereit: $h_{111} = 1.2k\Omega$, $h_{211} = 110$, $h_{221} = 5 \cdot 10^{-5} S$.

A T2 tranzisztor h paramétereit: $h_{112} = 2.4k\Omega$, $h_{212} = 150$, $h_{222} = 2 \cdot 10^{-5} S$.

**2. feladat**

Számítsa ki a képen látható soros negatív áram-visszacsatolással ellátott erősítő munkapont-beállító ellenállásainak értékét, és a helyettesítő kép felrajzolása után a váltakozó áramú jellemzőket!



20. ábra. Soros negatív áram-visszacsatolás

Adatok:

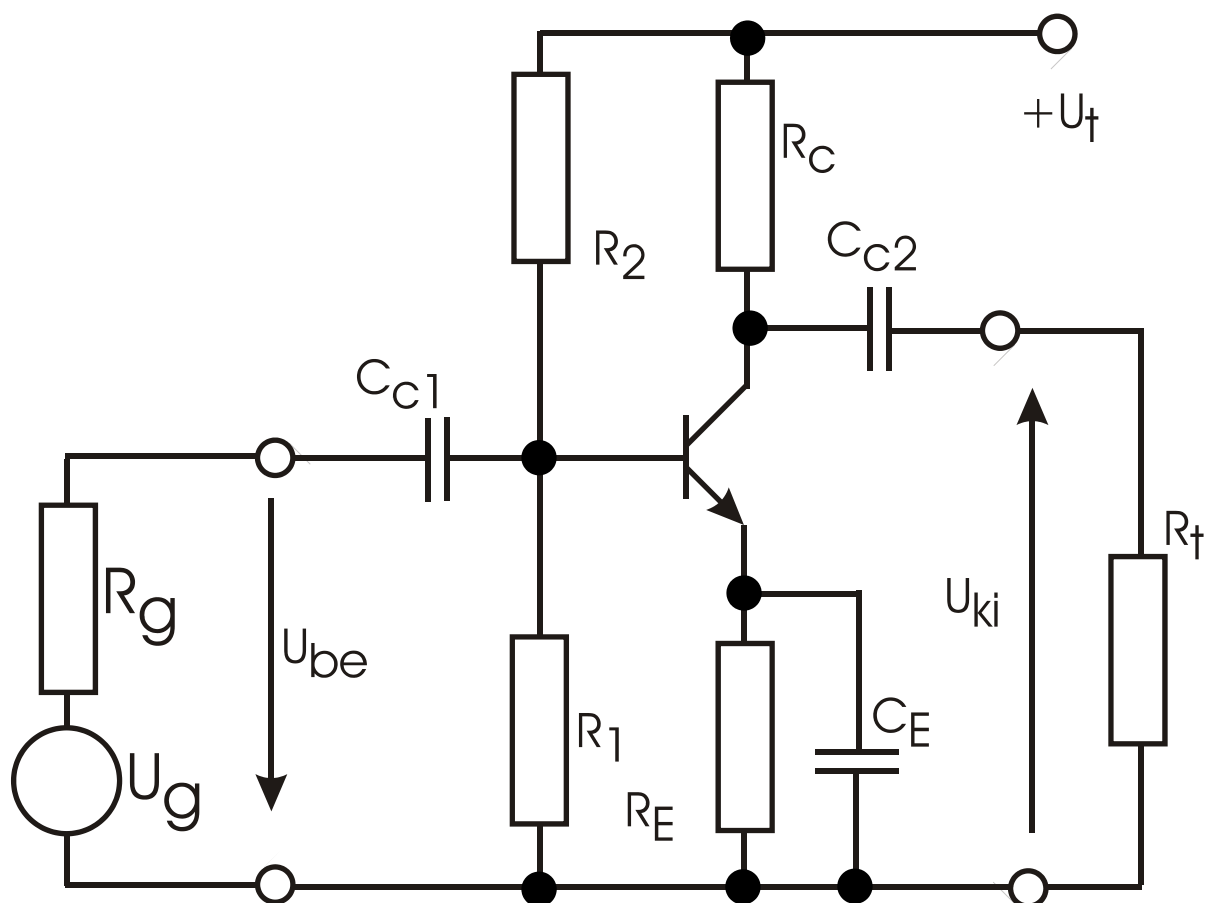
$U_T = 12V$, $U_{CE0} = 5.5V$, $I_{C0} = 2mA$, $U_{BE0} = 0.6V$, $I_{B0} = 30\mu A$, $R_C = 2.7k\Omega$, $R_{E2} = 220\Omega$,
 $R_t = 4k\Omega$, $h_{21} = 210$, $h_{11} = 3.2k\Omega$, $h_{22} = 10^{-5}S$.

3. feladat

Számítsa ki az ábrán látható közös emitteres erősítő alsó határfrekvenciáját! Rajzolja fel az erősítő erősítésének és fázistolásának diagramját a határfrekvencia környezetében!

Adatok:

$$R_E = 330 \, \Omega, R_C = 820 \, \Omega, R_1 = 6.8 \, k\Omega, R_2 = 27 \, k\Omega, h_{11} = 2.7 \, k\Omega, h_{21} = 210, h_{22} = 5 \cdot 10^{-5} \, S, R_t = 4 \, k\Omega, R_g = 200 \, \Omega, C_{C1} = 20 \, \mu F, C_{C2} = 20 \, \mu F, C_E = 100 \, \mu F.$$



21. ábra. Közös emitteres erősítő

**4. feladat**

Rajzolja fel egy közös emitteres erősítő nagyfrekvenciás helyettesítő képét, és számítsa ki a felső-határfrekvenciát! Rajzolja fel a kapcsolás nagyfrekvenciás átvitelét és fázistolását!

Adatok:

$$R_g = 600 \, \Omega, R_1 = 8.8 \, \text{k}\Omega, R_2 = 42 \, \text{k}\Omega, R_c = 2 \, \text{k}\Omega, R_t = 4.7 \, \text{k}\Omega, h_{11} = 3.5 \, \text{k}\Omega, h_{21} = 250,$$

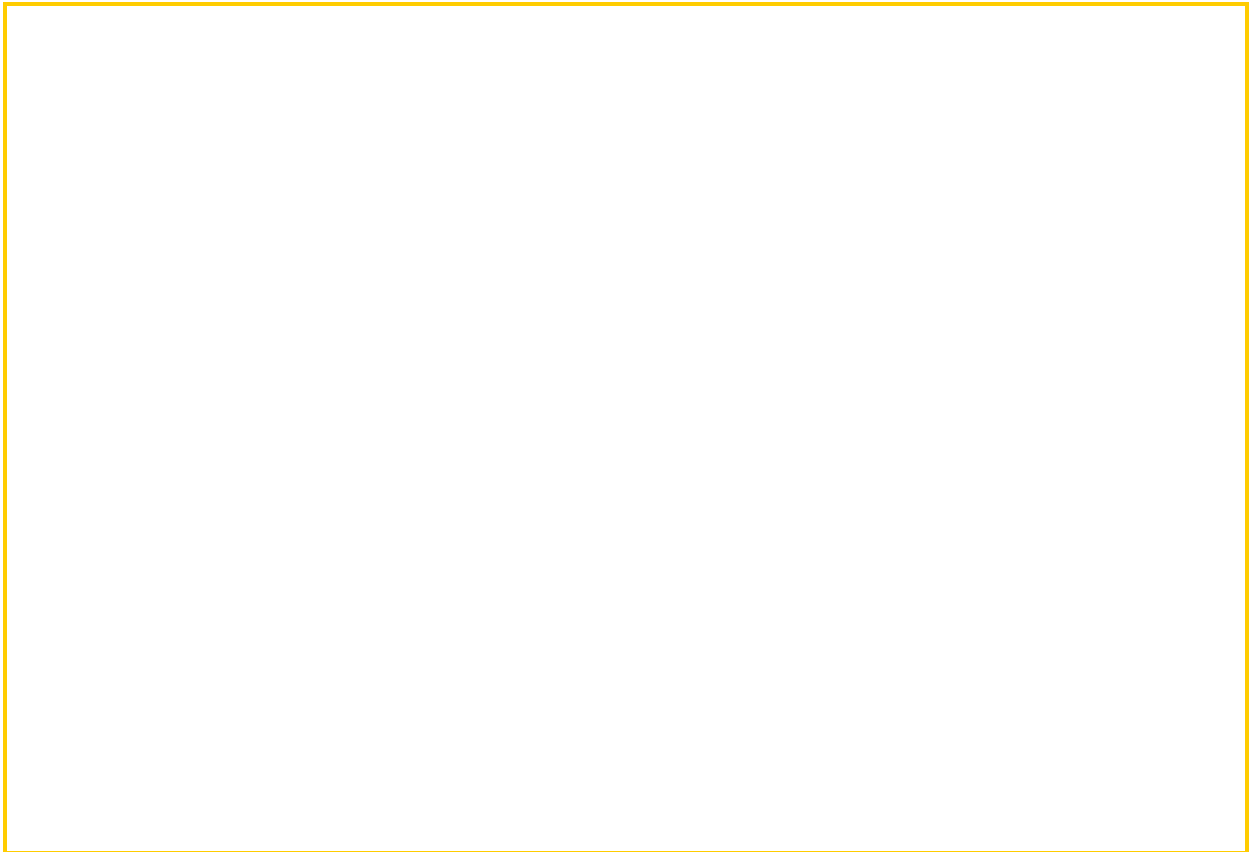
$$h_{22} = 5 \cdot 10^{-5} \, \text{S}, C_{BE} = 4 \, \text{pF}, C_{CB} = 6 \, \text{pF}, C_{CE} = 12 \, \text{pF}.$$

5. feladat

Egy „B” osztályú beállításban működő, ellenütemű teljesítményerősítőt 80%-os kivezérléssel működtetünk. Számítsa ki a tápegységből felvett, és a terhelésre leadott teljesítményt, ill. az erősítő disszipációját és hatásfokát! Határozza meg, hogy mekkora maximális disszipációs teljesítményű tranzisztorokat kell használni!

Adatok:

$$I_{C\max} = 4.5\text{ A}, U_T = 30\text{ V}, \nu = 0.8$$



MEGOLDÁSOK

1. feladat

Az első fokozat munkapont-beállító ellenállásainak méretezése:

$$U_T = I_{C01} \cdot R_{C1} + U_{CE01} + I_{C01} \cdot R_{E1}$$

$$R_{E1} = \frac{U_T - I_{C01} \cdot R_{C1} - U_{CE01}}{I_{C01}} = \frac{10 - 3 - 5}{3 \cdot 10^{-3}} = 667 \, \Omega.$$

$$U_{B01} = I_{C01} \cdot R_{E1} + U_{BE01} = 2 + 0.6 = 2.6V.$$

$$I_{B01} = \frac{I_{C01}}{\beta_1} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{100} = 3 \cdot 10^{-5} = 30 \, \mu A.$$

$$R_1 = \frac{U_{B01}}{9 \cdot I_{B01}} = \frac{2.6}{2.7 \cdot 10^{-4}} = 9.63 \cdot 10^3 = 9.63 \, k\Omega.$$

$$R_2 = \frac{U_T - U_{B01}}{10 \cdot I_{B01}} = \frac{10 - 2.6}{3 \cdot 10^{-4}} = 2.466 \cdot 10^4 = 24.66 \, k\Omega.$$

A második fokozat munkapont-beállító ellenállásainak méretezése:

$$U_T = I_{C02} \cdot R_{C2} + U_{CE02} + I_{C02} \cdot R_{E2}$$

$$R_{E2} = \frac{U_T - I_{C02} \cdot R_{C2} - U_{CE02}}{I_{C02}} = \frac{10 - 3.1 - 6}{5 \cdot 10^{-3}} = 1.8 \cdot 10^2 = 180 \, \Omega.$$

$$U_{B02} = I_{C02} \cdot R_{E2} + U_{BE02} = 0.9 + 0.7 = 1.6V.$$

$$I_{B02} = \frac{I_{C02}}{\beta_2} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{125} = 4 \cdot 10^{-5} = 40 \, \mu A.$$

$$R_3 = \frac{U_{B02}}{9 \cdot I_{B02}} = \frac{1.6}{3.6 \cdot 10^{-4}} = 4.44 \cdot 10^3 = 4.44 \, k\Omega.$$

$$R_4 = \frac{U_T - U_{B02}}{10 \cdot I_{B02}} = \frac{10 - 1.6}{4 \cdot 10^{-4}} = 2.1 \cdot 10^4 = 21 \, k\Omega.$$

A fokozatok be- és kimeneti ellenállásai:

$$R_{be1} = R_1 \times R_2 \times h_{111} = 9.63 \times 24.66 \times 1.2 = 1.02 \, k\Omega$$

$$R_{ki1} = \frac{1}{h_{221}} \times R_{C1} = 20 \times 1 = 0.9523 = 952.3 \, \Omega.$$

$$R_{be2} = R_3 \times R_4 \times h_{112} = 4.44 \times 21 \times 2.4 = 1.45 \, k\Omega.$$

$$R_{ki2} = \frac{1}{h_{222}} \times R_{C2} = 50 \times 0.62 = 0.6124 = 612.4 \, \Omega.$$

A fokozatok feszültség- és áramerősítései:

$$A_{u1} = -\frac{h_{211}}{h_{111}} \cdot (R_{ki1} \times R_{be2}) = -\frac{110}{1.2 \cdot 10^3} (952.3 \times 1.45 \cdot 10^3) = -52.64.$$

$$A_{u2\bar{u}} = -\frac{h_{212}}{h_{112}} \cdot R_{ki2} = -\frac{150}{2.4 \cdot 10^3} \cdot 612.4 = -38.27$$

$$A_{u2} = -\frac{h_{212}}{h_{112}} \cdot (R_{ki2} \times R_t) = -\frac{150}{2.4 \cdot 10^3} \cdot (612.4 \times 10^3) = -23.73$$

$$A_{i1} = |A_{u1}| \cdot \frac{R_{be1}}{R_{be2}} = 52.64 \cdot \frac{1.02}{1.45} = 37.03$$

$$A_{i2} = |A_{u2}| \cdot \frac{R_{be2}}{R_t} = 23.73 \cdot \frac{1.45}{1} = 34.41$$

Az eredő váltakozó áramú jellemzők:

$$R_{bee} = R_{be1} = 1.02 \text{ k}\Omega; R_{kie} = R_{ki2} = 612.4 \Omega.$$

$$A_{u\bar{u}e} = A_{u1} \cdot A_{u2\bar{u}} = -52.64 \cdot (-38.27) = 2014.8$$

$$A_{ue} = A_{u1} \cdot A_{u2} = -52.64 \cdot (-23.73) = 1249.15$$

$$-A_{ie} = A_{ue} \cdot \frac{R_{bee}}{R_t} = A_{i1} \cdot A_{i2} = 1274.13$$

2. feladat

$$U_T = I_{C0} \cdot R_C + U_{CE0} + I_{C0} \cdot (R_{E1} + R_{E2})$$

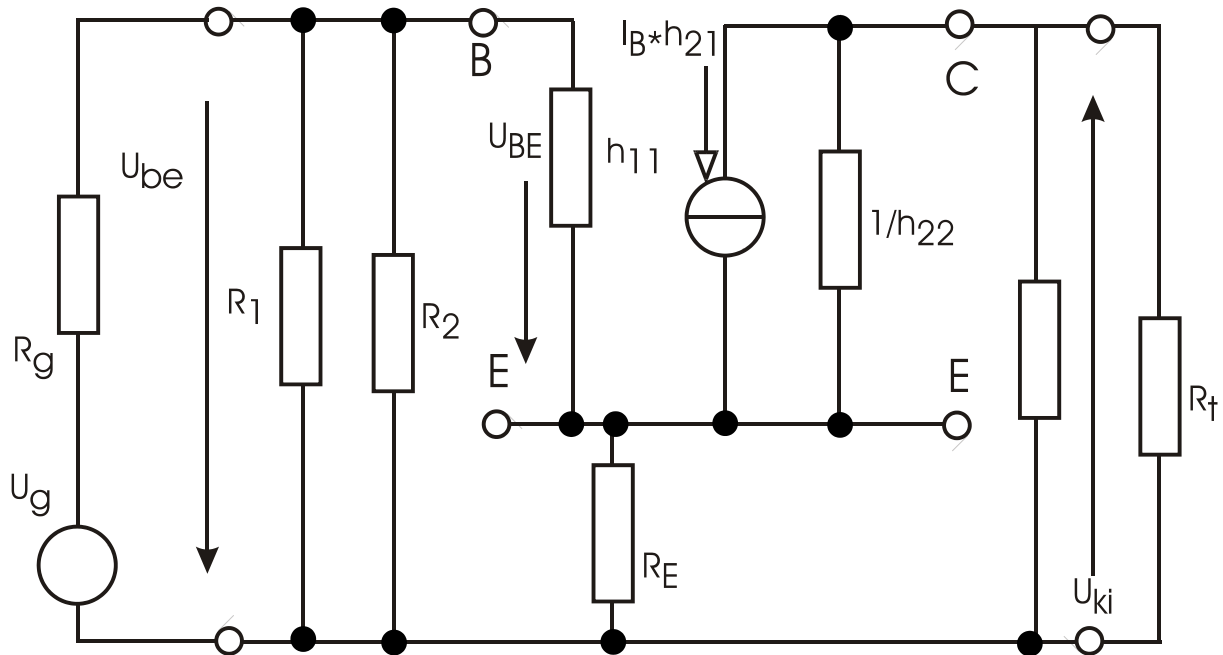
$$R_{E1} + R_{E2} = \frac{U_T - I_{C0} \cdot R_C - U_{CE0}}{I_{C0}} = \frac{12 - 2 \cdot 2.7 - 5.5}{2} = 0.55 \text{ k}\Omega$$

$$R_{E1} = 550 - 220 = 330 \Omega$$

$$U_{B0} = I_{C0} \cdot (R_{E1} + R_{E2}) + U_{BE0} = 2 \cdot 0.55 + 0.6 = 1.7 \text{ V}.$$

$$R_1 = \frac{U_{B0}}{9 \cdot I_{B0}} = \frac{1.7}{2.7 \cdot 10^{-4}} = 6.29 \cdot 10^3 = 6.3 \text{ k}\Omega.$$

$$R_2 = \frac{U_T - U_{B0}}{10 \cdot I_{B0}} = \frac{12 - 1.7}{3 \cdot 10^{-4}} = 3.43 \cdot 10^4 = 34.3 \text{ k}\Omega$$



22. ábra. Az erősítő helyettesítő képe

Az erősítő váltakozó áramú jellemzői visszacsatolás nélkül:

$$R_{be} = R_1 \times R_2 \times h_{11} = 6.3 \times 34.3 \times 3.2 = 2 \text{ k}\Omega.$$

$$R_{ki} = \frac{1}{h_{22}} \times R_C = 100 \times 2.7 = 2.63 \text{ k}\Omega.$$

$$A_u = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \left(\frac{1}{h_{22}} \times R_C \times R_t \right) = -\frac{210}{3.2} \cdot (2.63 \times 4) = -104.13.$$

$$A_i = |A_u| \cdot \frac{R_{be}}{R_t} = 104.13 \cdot \frac{2}{4} = 52.06$$

A visszacsatolt erősítő jellemzői:

$$R_{bev} = R_1 \times R_2 \times h_{11} \cdot \left(1 + \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot R_{E2} \right) = 6.3 \times 34.3 \times 3.2 \left(1 + \frac{210}{3.2} \cdot 0.22 \right)$$

$$R_{bev} = 4.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_{kiv} \cong R_C = 2.63 \text{ k}\Omega.$$

$$A_{uv} = \frac{A_u}{1 + \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot R_{E2}} = -\frac{104.13}{1 + \frac{210}{3.2} \cdot 0.22} = -6.745$$

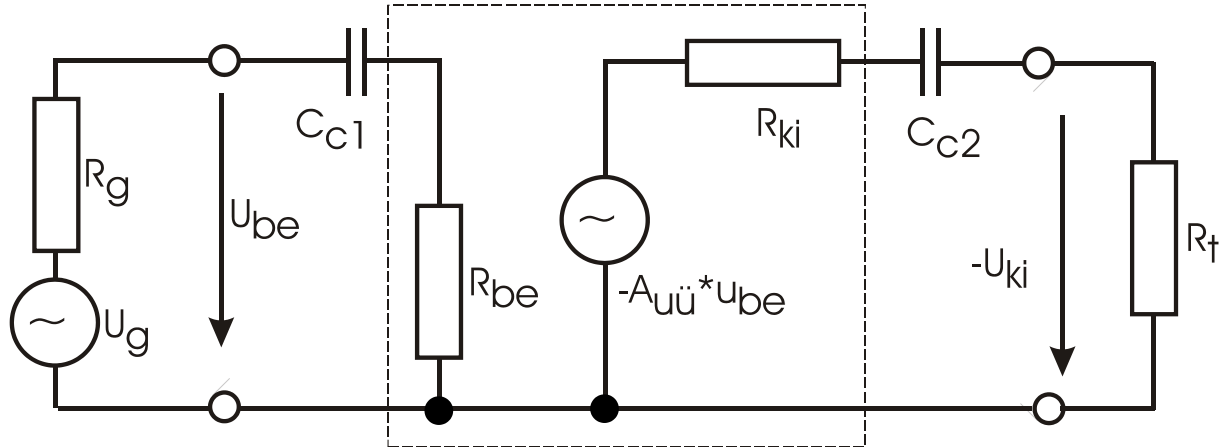
$$A_{iv} = |A_{uv}| \cdot \frac{R_{bev}}{R_t} = 6.745 \cdot \frac{4.8}{4} = 8.1$$

3. feladat

A csatolókondenzátorok hatásának számítása:

$$R_{be} = R_1 \times R_2 \times h_{11} = 6.8 \times 27 \times 2.7 = 1.8 k\Omega.$$

$$R_{ki} = \frac{1}{h_{22}} \times R_C = 20 \times 0.82 = 0.787 = 787 \Omega.$$



23. ábra. A kapcsolás kisfrekvenciás helyettesítő képe

A határfrekvenciák a helyettesítő kép alapján:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{c1} \cdot (R_{be} + R_g)} = \frac{1}{6.28 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot (1.8 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^2)} = 3.98 \text{ Hz}.$$

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{c2} \cdot (R_{ki} + R_t)} = \frac{1}{6.28 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot (7.87 \cdot 10^2 + 4 \cdot 10^3)} = 1.66 \text{ Hz}$$

Az emitter kondenzátor hatásának számítása:

$$f_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_E \cdot C_E} = \frac{1}{6.28 \cdot 3.3 \cdot 10^2 \cdot 10^{-4}} = 4.82 \text{ Hz}.$$

$$A_u = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \left(\frac{1}{h_{22}} \times R_C \times R_t \right) = -\frac{210}{2.7} \cdot (20 \times 0.82 \times 4) = -51.19$$

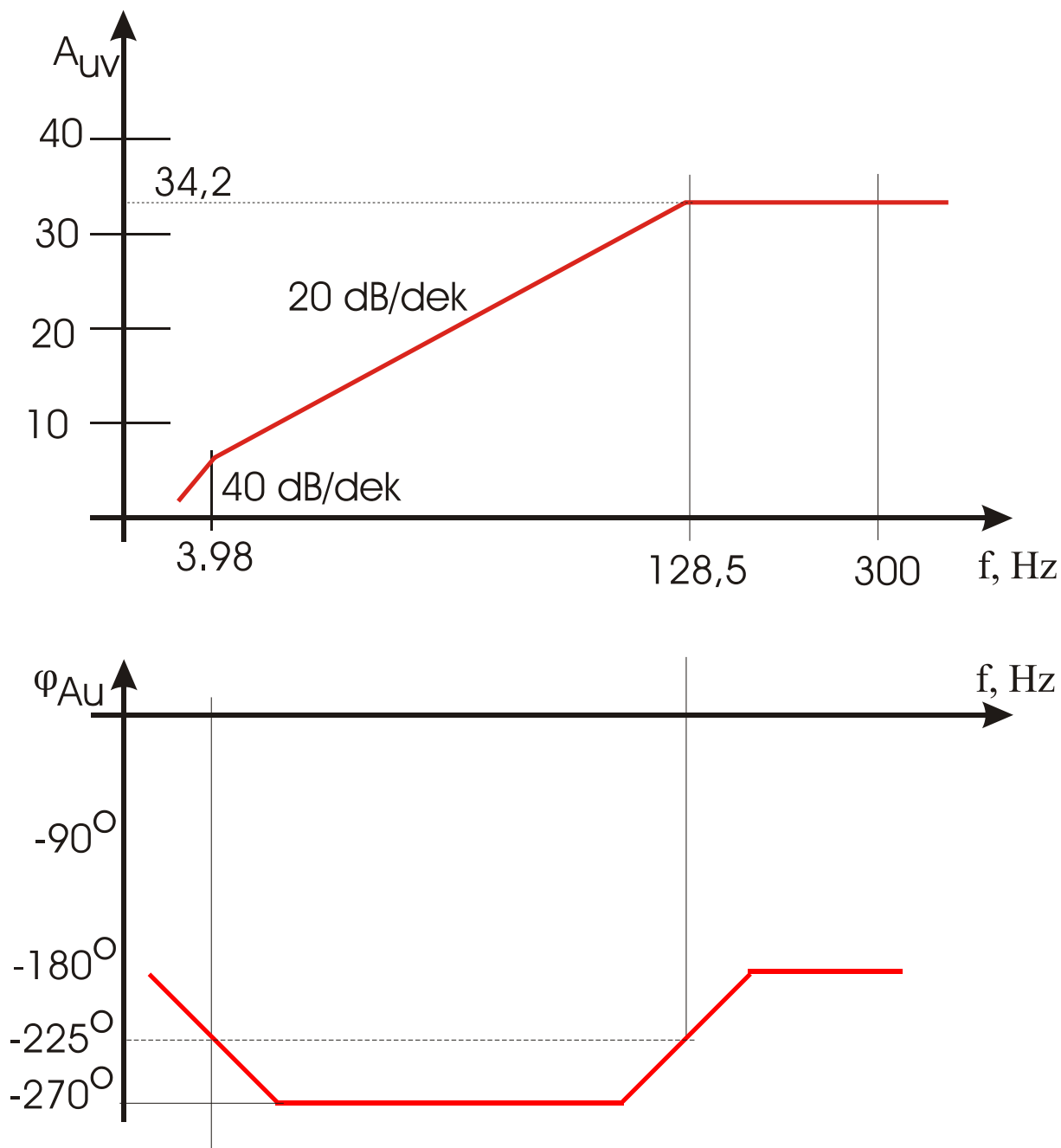
$$A_u^{dB_r} = 20 \cdot \lg 51.14 = 34.2 \text{ dB}_r$$

$$A_{uv} = \frac{A_u}{1 + \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot R_E} = \frac{-51.19}{1 + \frac{210}{4.7} \cdot 0.33} = -1.92$$

$$A_{uv}^{dB_r} = 20 \cdot \lg 1.91 = 5.66 \text{ dB}_r$$

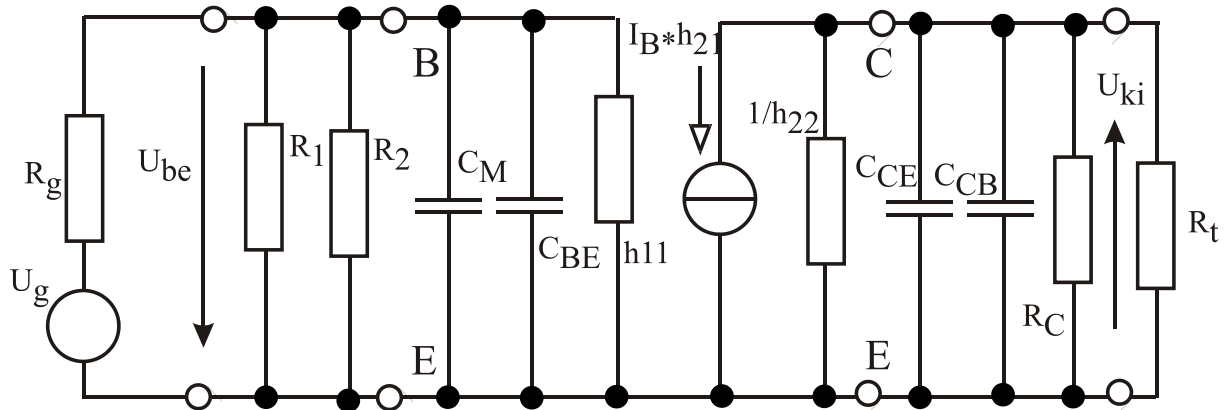
$$F_{hE} = f_E \cdot \frac{A_u}{A_{uv}} = 4.82 \cdot \frac{51.19}{1.92} = 128.5 \text{ Hz}.$$

Az erősítő alsó határfrekvenciája az f_1 , f_2 , f_{hE} frekvenciák közül a legnagyobb. Tehát $f_a = f_{hE} = 128.5 \text{ Hz}$.



24. ábra. Az erősítő diagramja

4. feladat



25. ábra. Az erősítő nagyfrekvenciás helyettesítő képe

$$R_{be} = R_1 \times R_2 \times h_{11} = 8.8 \times 42 \times 3.5 = 2.36 \text{ k}\Omega.$$

$$R_{ki} = \frac{1}{h_{22}} \times R_C = 20 \times 2 = 1.82 \text{ k}\Omega.$$

$$A_u = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot (R_{ki} \times R_t) = -\frac{250}{3.5} \cdot (1.8 \times 4.7) = -93.6$$

$$A_u^{dB} = 20 \lg 93.6 = 39.4 \text{ dB}_r.$$

$$C_M = (1 - A_u) C_{CB} = (1 + 93) \cdot 6 = 568 \text{ pF}.$$

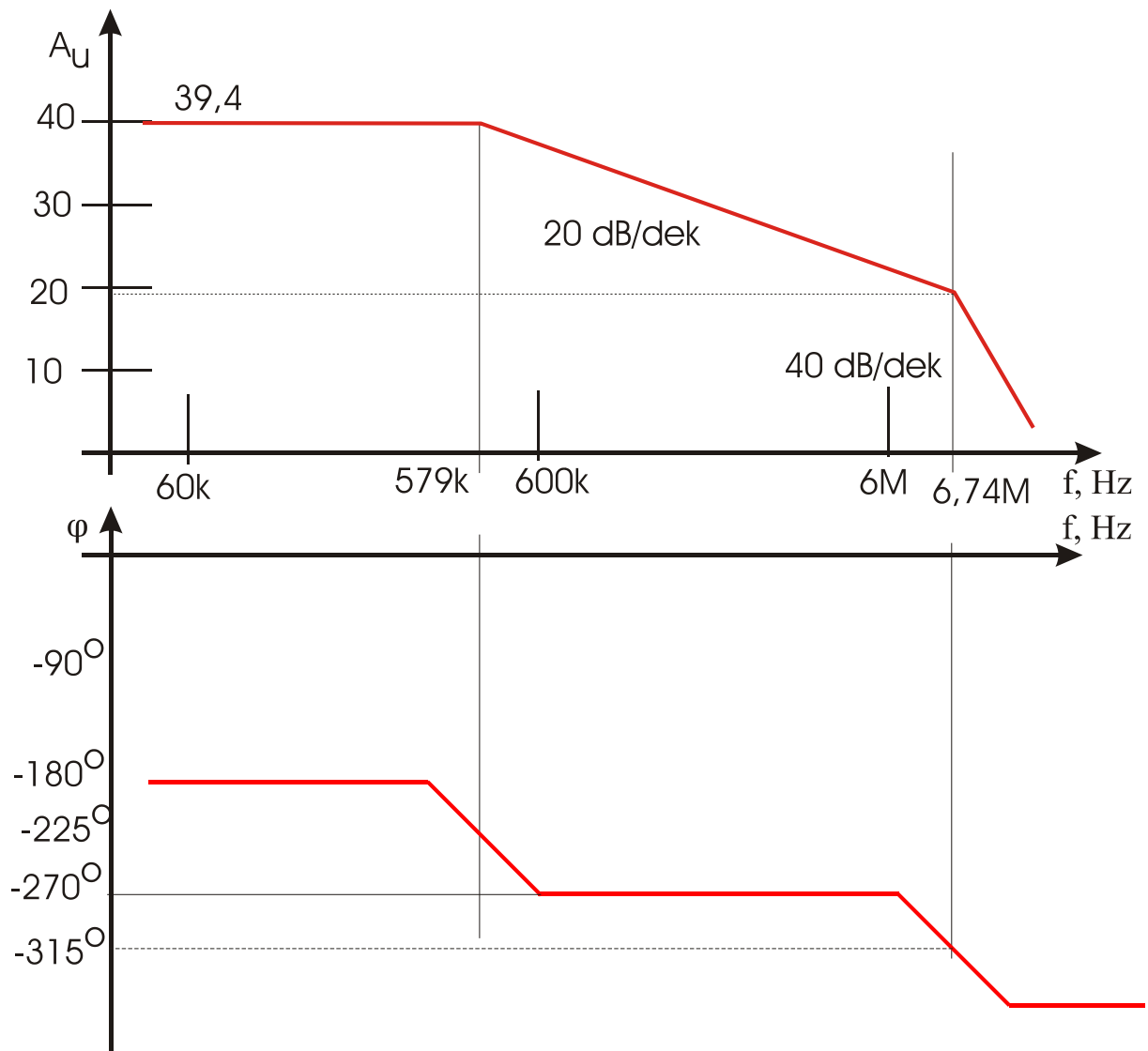
$$f_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (R_{be} \times R_g) \cdot (C_M + C_{BE})} = \frac{1}{6.28 \cdot (6 \cdot 10^{-2} \times 2.36 \cdot 10^3) \cdot (5.68 \cdot 10^{-10} + 4 \cdot 10^{-12})} =$$

$$= 5.79 \cdot 10^5 = 579 \text{ kHz}$$

$$f_{ki} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (R_{ki} \times R_t) \cdot (C_{CE} + C_{CB})} = \frac{1}{6.28 \cdot (1.82 \cdot 10^3 \times 4.7 \cdot 10^3) \cdot (1.2 \cdot 10^{-11} + 6 \cdot 10^{-12})} =$$

$$= 6.74 \cdot 10^6 = 6.74 \text{ MHz}$$

$$f_f = f_{be} = 579 \text{ kHz}$$



26. ábra. Az erősítő nagyfrekvenciás átvitele és fázistolása

5. feladat

$$P_f = 2 \cdot v \cdot U_T \cdot \frac{I_{C_{\max}}}{\pi} = 2 \cdot 0.8 \cdot 30 \cdot \frac{4.5}{3.14} = 68.79 \text{ W}.$$

$$P_{ki} = \frac{v^2}{2} \cdot U_t \cdot I_{C_{\max}} = 0.32 \cdot 30 \cdot 4.5 = 43.2 \text{ W}.$$

$$P_D = P_f - P_{ki} = 68.8 - 43.2 = 25.6 \text{ W}.$$

$$\eta_{\max} \leq \frac{\pi}{4} = 0.785$$

$$\eta = 0.875 \cdot v = 0.875 \cdot 0.8 = 0.7 \Rightarrow \eta = 70 \%.$$

A tranzisztor maximális disszipációja:

$$P_{D_{\max}} \cong 0.2 \cdot U_T \cdot I_{C_{\max}} = 0.2 \cdot 30 \cdot 4.5 = 27 \text{ W}.$$

IRODALOMJEGYZÉK

FELHASZNÁLT IRODALOM

Zombori Béla: Elektronika. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2004.

Zombori Béla: Elektronikai feladatgyűjtemény. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003.

AJÁNLOTT IRODALOM

Bikki János – Pánczél Béla: Elektronikai gyakorlatok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2005.

Réti Gyula: Elektronikus gyakorlatok, Analóg áramkörök. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003.

Szücs Lászlóné: Elektronikus áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1999.

U. Tietze – Ch. Scenk: Analóg és digitális áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1990.

<http://bsselektronika.hu/>

<http://eki.sze.hu/ejegyzet/ejegyzet/BorbelyG/keret.html>

A(z) 0917–06 modul 040 számú szakmai tankönyvi tartalomeleme
felhasználható az alábbi szakképesítésekhez:

A szakképesítés OKJ azonosító száma:	A szakképesítés megnevezése
54-523-01-0000-00-00	Elektronikai technikus

A szakmai tankönyvi tartalomelem feldolgozásához ajánlott óraszám:
12 óra

A kiadvány az Új Magyarország Fejlesztési Terv
TÁMOP 2.2.1 08/1–2008–0002 „A képzés minőségének és tartalmának
fejlesztése” keretében készült.
A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap
társfinanszírozásával valósul meg.

Kiadja a Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet
1085 Budapest, Baross u. 52.
Telefon: (1) 210–1065, Fax: (1) 210–1063

Felelős kiadó:
Nagy László főigazgató