

Elektronika II. laboratórium

5. mérés

AB –osztályú teljesítményerősítő

*Összeállította: Fraskó Ádám,
2021. 02. 24.*

Mérés célja

Teljesítményerősítők megismerése, különböző kapcsolások megvalósítása diszkrét elemekből.

A mérés tartalma:

- B-osztályú komplementer emitterkövető
- AB-osztályú erősítő különböző szinteltoló megoldásokkal
- Műveleti erősítők kimeneti áramának kiterjesztése komplementer tranzisztorpárral

Alkatrészjegyzék

- BD139 / BD140 tranzisztorpár
- BC556; 2db, BC546 tranzistor
- 2db 1N4007 dióda
- 4,7 μ F bipoláris ELKO
- Ellenállások: 12k Ω ; 1,5k Ω ; 750 Ω ; 150 Ω ; 2db 3,9 Ω @2W, 15k Ω ; 33 Ω @5W
- Potenciométer: 1k Ω ; 470 Ω
- μ A741 Műveleti erősítő

Ajánlott irodalom

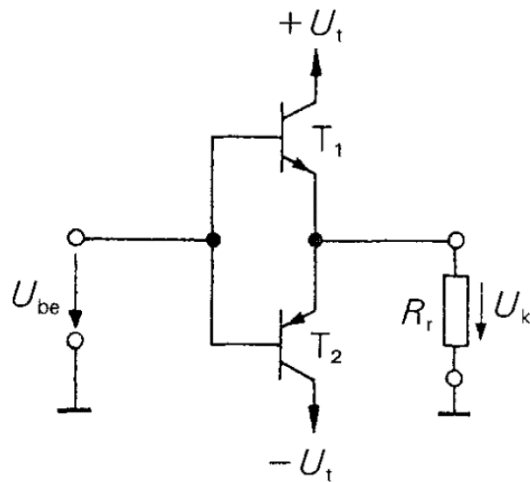
- Tietze-Schenk: Analóg és digitális áramkörök;
 - 12. fejezet – Teljesítményerősítők

1 Elméleti alapok

1.1 Teljesítményerősítők tulajdonságai

A teljesítményerősítők (vagy végfokozatok) olyan erősítő áramkörök, amelyekkel szemben az alapvető követelmény a nagy kimeneti teljesítmény alakhű jelátvitel mellett. A teljesítményerősítők rendszerint kis kimeneti ellenállással rendelkeznek, áramerősítésük nagy, feszültségerősítésük egy, vagy annál kisebb ($A_u \leq 1$). Kapcsolástechnikailag sok különböző végfokozat létezik, a leggyakoribb a komplementer emitterkövető (vagy unipoláris tranzisztorok esetén source-követő), amelyet pl. műveleti erősítők kimeneti fokozataként alkalmaznak.¹ A mérések során is ilyen, diszkrét elemekből megépített áramköröket vizsgálunk.

1.2 Komplementer emitterkövető



1.2.1. ábra - komplementer emitterkövető

A komplementer emitterkövetőt az 1.2.1. ábra szemlélteti. Lényegében két B- osztályú - egy NPN és egy PNP tranzisztorral megvalósított földelt kollektoros erősítő egymással szembefordítva, szimmetrikus tápellátással. Az áramkör $U_{be} - U_{ki}$ karakterisztikáján (1.2.2. ábra) látható, hogy amint U_{be} eléri T_1 (vagy T_2) nyitófeszültségét, a közös emitterpont, azaz a kimenet 0,6 – 0,7V különbséggel követni igyekszik U_{be} feszültséget. Szinuszos vezérlőjel esetén ez azt jelenti, hogy a pozitív félperiódusban T_1 a pozitív tápfeszültség irányába, negatív félperiódusban T_2 a negatív tápfeszültség irányába húzza a terhelő ellenállás feszültségét. Ha a tranzisztorok szaturációs feszültségét elhanyagoljuk, akkor a maximális kimeneti feszültség a pozitív félperiódusban $+U_{táp}$, a negatív félperiódusban pedig $-U_{táp}$.

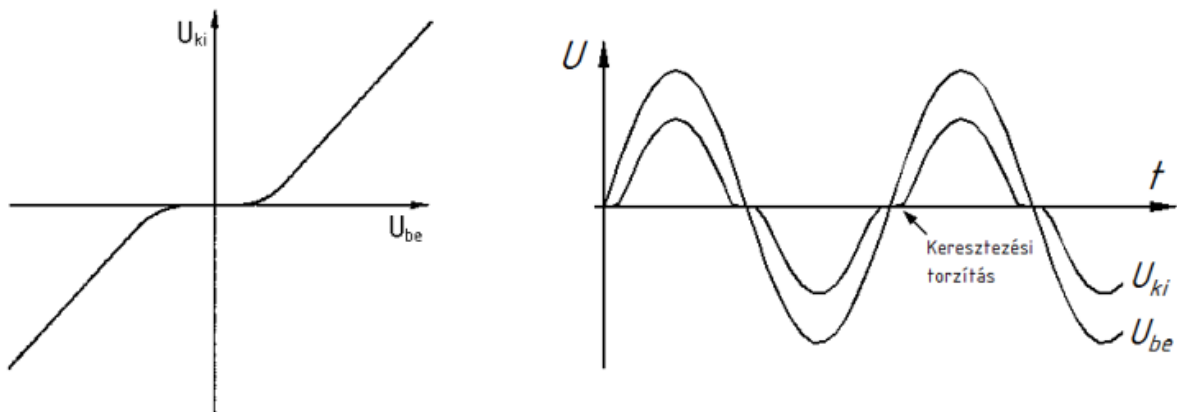
¹ Pl.: a mérésben használt [μA741-es műveleti erősítő](#) kimenetén is egy ilyen áramkör található.

Ez alapján meghatározható a maximális szinuszos kimeneti teljesítmény (szimmetrikus tápellátás esetén):

$$\hat{U}_{ki} \cong +U_{táp} \rightarrow U_{ki_eff} = \frac{+U_{táp}}{\sqrt{2}}$$

$$P_{ki_eff} = \frac{U_{ki_eff}^2}{R_t} = \frac{\frac{+U_{táp}^2}{\sqrt{2}^2}}{R_t} = \frac{+U_{táp}^2}{2R_t}$$

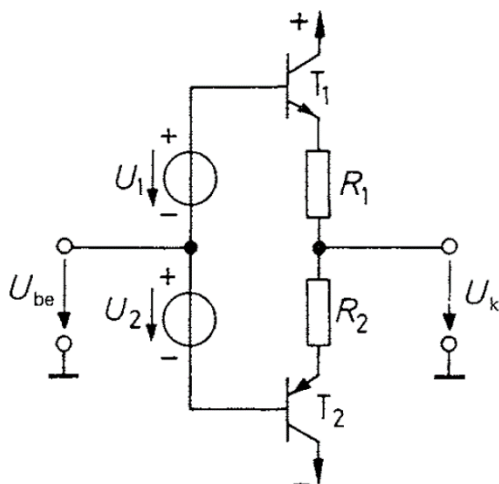
Természetesen a csúcsteljesítmény függ a tranzisztorpár I_{C_max} maximálisan megengedett kollektor-áramától is (katalógusadat). A kapcsolás hátránya, hogy amíg a vezérlő jel nem éri el a nyitófeszültség értékét, addig a kimeneten nem jelenik meg a jel, így a nyitófeszültségnél kisebb amplitúdójú jeleket egyáltalán nem viszi át, az annál nagyobb jeleket pedig a nullátmenetnél eltorzítja (1.2.2. ábra).



1.2.2. ábra - Átviteli karakterisztika és jelátvitel

1.3 AB-osztályú teljesítményerősítők

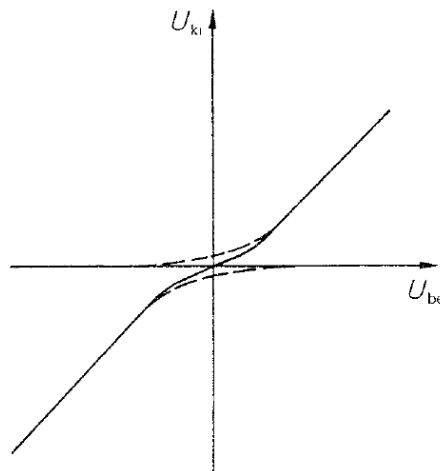
Az előzőekben bemutatott keresztezési torzítás elkerülhető, ha a komplementer emitterkövető tranzisztorait vezéreltlen állapotában is nyitva tartjuk.



1.3.1. ábra - Komplementer emitterkövető munkapont beállítással

Ilyenkor mindkét tranzisztoron ún. munkaponti-, vagy nyugalmi áram folyik. AB-osztályú munkapont esetén ez a nyugalmi áram nagyságrendekkel kisebb, mint a kimeneti áram maximuma vezérelt állapotban. Az 1.3.1. ábra szerinti elrendezésben a komplementer tranzisztorpár ki lett egészítve a munkapont-beállító elemekkel. A nyugalmi (munkaponti) áram a következőképpen számolható:

$$I_{MP} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_1 - U_{BE1}}{R_1}, \quad U_{be} = 0; U_1 = U_2; R_1 = R_2$$



1.3.2. ábra - AB-osztályú erősítő átviteli karakterisztikája

Az átviteli karakterisztikán (1.3.2. ábra) látszik, hogy T_1 és T_2 transzfer görbéje a vízszintes tengelyen eltolódik egymáshoz képest, ezáltal a keresztezési torzítás is csökken. Megállapítható, hogy a munkaponti áram növelésével a torzítás csökkenthető, illetve megszüntethető. Fontos említeni, hogy R_1 és R_2 jelenléte csökkenti a kivezérelhetőséget, hiszen a teljes kimeneti áram átfolyik rajtuk. A végfokozat kimeneti ellenállása jó közelítéssel megegyezik R_1 és R_2 értékével. Az áramkör kivezérelhetősége:

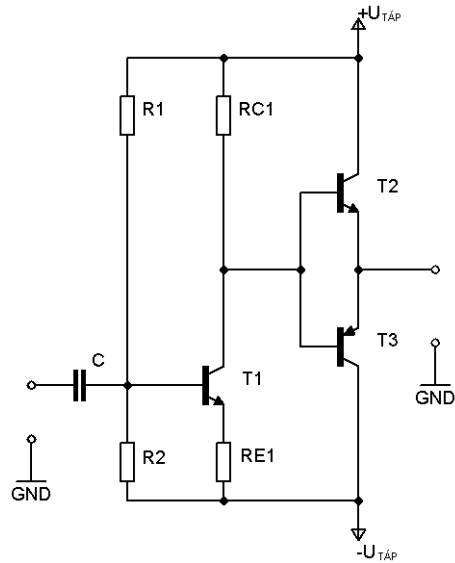
$$\hat{U}_{ki} = U_{táp} - R_1 \cdot I_{kimax}$$

1.4 Meghajtó fokozat

Mivel a földelt kollektoros (emitterkövető) erősítő kapcsolások feszültségerősítése jellemzően 1-nél kisebb, ezért a kívánt kimeneti feszültség szint eléréséhez egy azzal egybeeső bemenő jelet kell számára biztosítanunk. A mérés során ehhez egy egyszerű földelt-emitteres erősítőt használunk, amelyet az 1.4.1. ábra és az 1.4.2 ábra mutat be.

Amint az a kapcsolási rajzokon látható, a földelt-emitteres fokozat mindkét esetben a szimmetrikus tápfeszültségről üzemel, a számítási feladatoknál erre fokozottan ügyeljünk!

B- osztályú végfokozat esetén (1.4.1. ábra) a bemenetet közvetlenül a meghajtó fokozat kimenetére kötjük, ezzel egy egyenáramú (DC) csatolást valósítunk meg. A földelt emitteres fokozat szerepe az erősítésen túl a kimeneti OFFSET feszültség beállítása. Az elemértékeket úgy kell méretezni, hogy a végfokozat bemenetén, vagyis T_1 kollektorán a feszültség 0V legyen, így az OFFSET feszültség is zérus lesz.

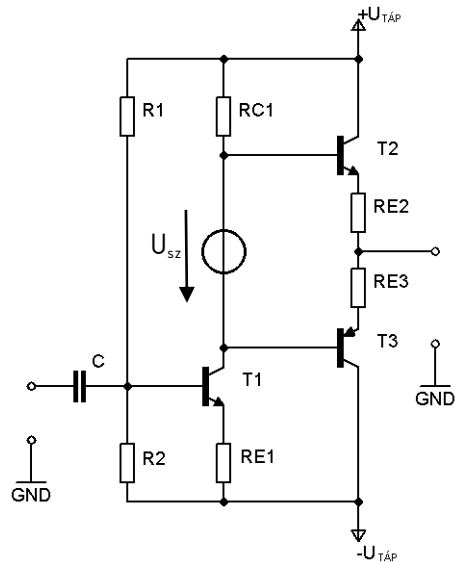


1.4.1. ábra - B-osztályú végfokozat földelt emitteres meghajtó fokozattal

A meghajtó fokozat erősítése a tanultak szerint:

$$A_{U1} \cong -\frac{R_{C1}}{R_{E1}}$$

AB-osztályú végfokozatokhoz való illesztéskor (1.4.2. ábra) a kollektor-körbe (R_{C1} és a kollektor közé) iktatunk egy ún. szinteltolót, amelyet a könnyebb érthetőség kedvéért egy ideális fesz. generátorral szimbolizálunk.



1.4.2. ábra - AB-osztályú végfokozat földelt emitteres meghajtó fokozattal

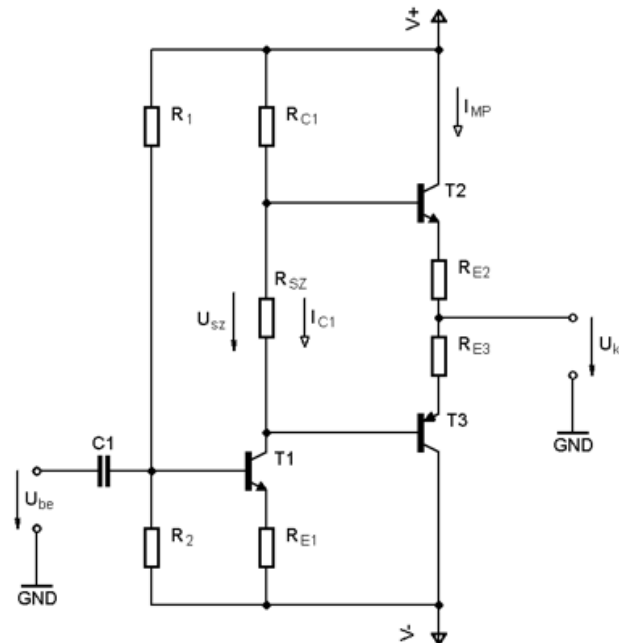
A generátor forrásfeszültsége független a rajta átfolyó áramtól, ezért T_2 és T_3 bázisa között vezérléstől függetlenül állandó feszültség szintet tart. A végfokozat munkaponti árama az alábbi módon határozható meg:

$$I_{MP} = \frac{U_{RE2}}{R_{E2}} = \frac{\frac{U_{SZ}}{2} - U_{BE2}}{R_{E2}}, \quad U_{BE2} = U_{EB3}; \quad R_{E2} = R_{E3},$$

1.5 Szinteltoló megoldások

Az előző fejezetben tárgyalt kapcsoláson a szinteltolót egy ideális feszültséggenerátorral szemléltettük, a valóságban ezt különböző passzív –és félvezető elemekkel oldják meg.

Szinteltoló ellenállással



1.5.1. ábra - Szinteltolás megvalósítása ellenállással

A legegyszerűbben megvalósítható szinteltoló egy – az első fokozat kollektor-körébe helyezett ellenállás. R_{SZ} ellenálláson ekkor T_1 kollektor-árama (I_{C1}) folyik át, melynek hatására U_{SZ} feszültség esik rajta:

$$U_{SZ} = R_{SZ} \cdot I_{C1}$$

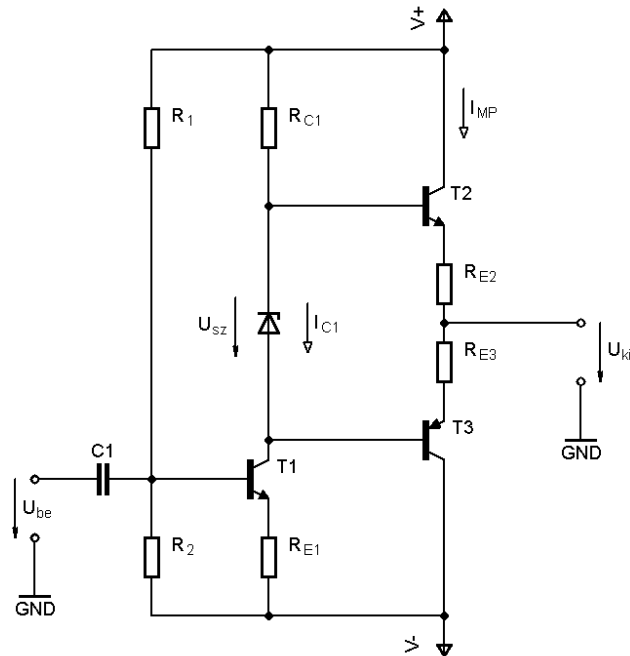
Gyakorlatban ritkán alkalmazzák², mivel vezérelt állapotban R_{SZ} ellenálláson is változik a feszültség, így a tranzisztorpár bázisai közötti feszültségszint sem lesz állandó, ami torzításhoz vezet.

Ez a jelenség kiküszöbölhető az R_{SZ} ellenállással párhuzamosan kapcsolt kondenzátorral.

² Régebben a félvezetők magas ára miatt választották ezt a megoldást, így korabeli kapcsolásokban találkozhatunk ezzel.

Szinteltoló megvalósítása Z-diódával

A torzítás elkerülése végett szinteltolónak olyan áramköri elemre van szükségünk, amelynek két pontja közt átfolyó áram hatására a feszültsége nem változik, erre a célra megfelel egy záró irányban előfeszített Z-dióda is. A tranzisztorpár bázisai között lévő U_{SZ} feszültséget ekkor a dióda letörési feszültsége határozza meg.



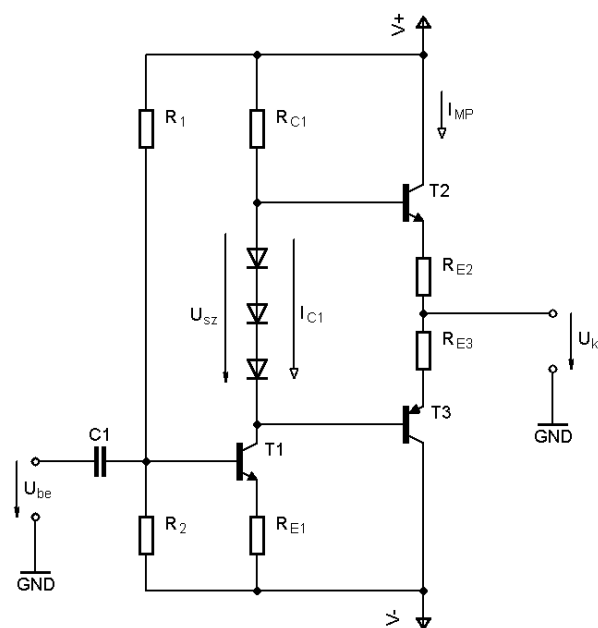
1.5.2. ábra - Szinteltolás megvalósítása ellenállással

Előnye, hogy a szinteltolást egyetlen áramköri elemmel meg tudjuk valósítani, azonban alkalmazásának jelentős gyakorlati hátránya van.:

Mivel $U_{SZ} = U_{BE2} + U_{RE2} + U_{RE3} + U_{EB3}$, ezért minél nagyobb az U_{SZ} feszültség, annál nagyobb feszültség esik $RE2$ és $RE3$ ellenállásra is. Ez jelentős teljesítményvesztést okozhat és csökkenti a kivezérelhetőséget. Zener diódák esetén az elérhető legkisebb névleges letörési feszültség $\sim 2,4V$, ami jóval nagyobb, mint U_{BE2} és U_{EB3} összege ($\sim 1,4V$), ezért ezt a megoldást csak indokolt esetben³ alkalmazzák.

³ Ilyen eset lehet például egy darlington-kapcsolású tranzisztorokból felépített komplementer végfokozat, ahol a bázis-emitter feszültség kétszeres.

Szinteltoló megvalósítása sorba kapcsolt Si-diódákkal



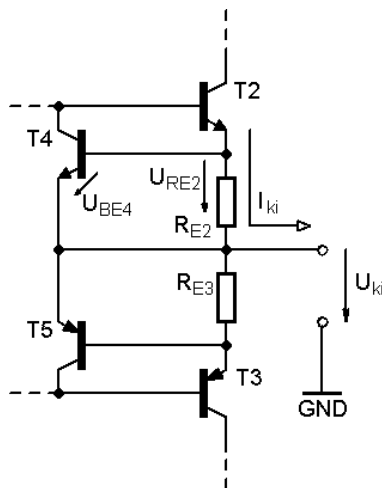
1.5.3. ábra –Szinteltoló sorba kapcsolt Si-diódákkal

A leggyakoribb eset, hogy szinteltolónak sorba kapcsolt, nyitóirányban előfeszített Si-diódákat használnak (1.5.3. ábra). Előnye, hogy a Z-diódás szinteltolóhoz hasonlóan könnyedén megvalósítható. A szinteltoló feszültségét a PN-átmenetek nyitófeszültségeinek összege határozza meg:

$$U_{sz} = U_{D1} + U_{D2} + \dots + U_{Dn} = n \cdot U_D, \text{ ahol } n \text{ a diódák száma.}$$

1.6 Kimeneti áramkorlátozás

Az AB-osztályú végfokozatok „lelke” a kimenetén lévő NPN-PNP tranziszorpár. Különleges paramétereik miatt (pl.: nagy I_{Cmax} ; U_{CEmax} ; P_{tot}) ezek a párba válogatott tranzisztorok meglehetősen drágák, ezért gondoskodnunk kell a megfelelő védelemről. Az esetek többségében egy egyszerű áramkorlátozás is elegendő, az 1.6.1. ábra egy „bázisáram-elszívós” áramkorlátozást mutat be.



1.6.1. ábra – Kimeneti áramkorlátozás

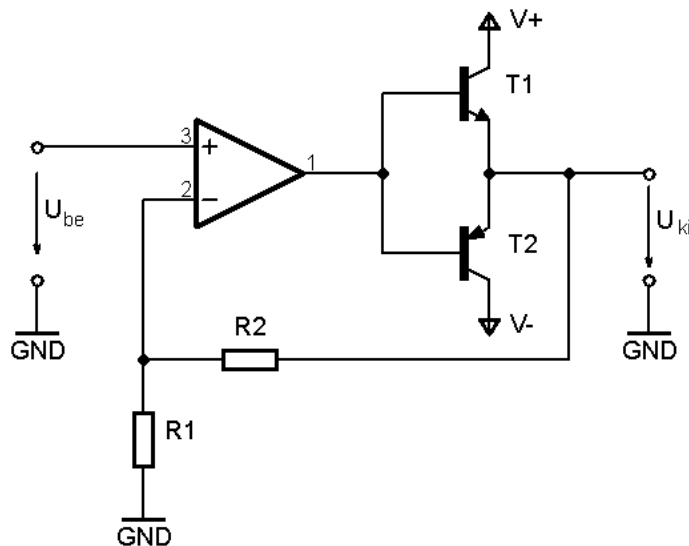
I_{ki} kimeneti áram növekedésével az R_{E2} ellenálláson eső U_{RE2} feszültség is nőni fog. Amint U_{RE2} eléri U_{BE4} nyitófeszültséget ($\sim 0,7V$), T_4 tranzisztor kinyit, és „elszívja” T_2 tranzisztor bázisáramát, így T_2 ennek következtében nem ereszt át nagyobb áramot magán. Számszerűen ez a következőképpen fejezhető ki:

$$I_{KImax} = \frac{U_{BE4}}{R_{E2}}$$

Mivel a végfokozat szimmetrikusan épül fel ($R_{E2}=R_{E3}$), ezért a fenti képlet ellentétes előjellel igaz az „alsó oldalra” ($T_3 - R_{E3} - T_5$) is.

1.7 Műveleti erősítők kimeneti áramának kiterjesztése

Műveleti erősítők használatakor felmerülhet az a probléma, hogy az adott alkalmazáshoz az integrált áramkör végfokozata nem képes kellő nagyságú áramot szolgáltatni. Ilyenkor megoldást jelenthet a következő egyszerű kapcsolás:



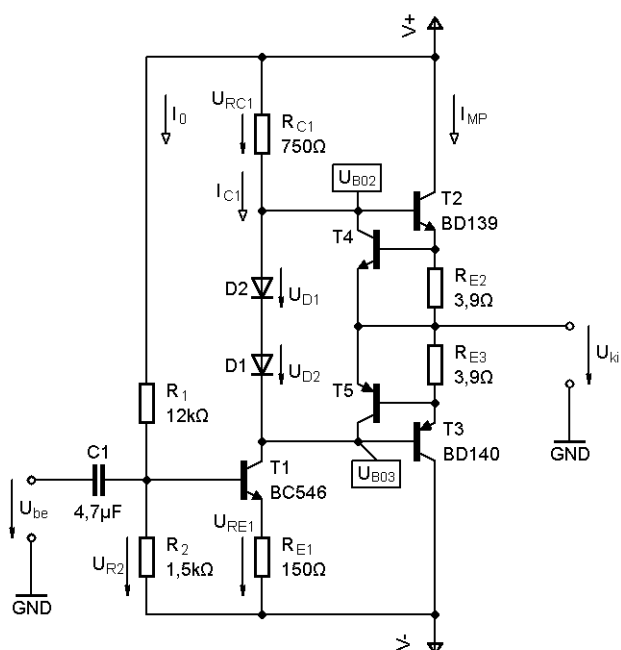
1.7.1. ábra - Műveleti erősítő kimeneti áramának kiterjesztése

A fenti áramkör lényegében egy műveleti erősítővel meghajtott B- osztályú komplementer végfokozat. Amint azt már az 1.2 fejezetben láthattuk, ennek a fokozatnak nagy hátránya a keresztvezési torzítás, azonban ezt a műveleti erősítő tudja kompenzálni. A negatív visszacsatolás révén a műveleti erősítő arra törekszik, hogy az invertáló- és nem-invertáló bemenete között a feszültség 0V legyen, így kimenetén a feszültséget addig növeli, míg ezen két pont feszültsége meg nem egyezik egymással. Ez azt jelenti, hogy a műveleti erősítő kimenete (1-es láb) és a komplementer tranzisztorpár közös emitterpontja (U_{ki}) között egy U_{BE} nyitófeszültségnyi különbség lesz, azaz a műveleti erősítő a legkisebb bemenő jel hatására is kinyitja valamelyik tranzisztert. Az áramkör feszültségerősítése megegyezik a nem-invertáló alapkioscsolásával, azaz:

$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

2 Számítási feladatok

2.1 AB-osztályú végfokozat



Adatok:

$$U_{TAP} = \pm 12V$$

$$R_1 = 12k\Omega; R_2 = 1,8k\Omega; R_{C1} = 750\Omega;$$

$$R_{E1} = 150\Omega; R_{E2} = 3,9\Omega; R_{E3} = 3,9\Omega;$$

$$U_{D1} = U_{D2} = 0,7V;$$

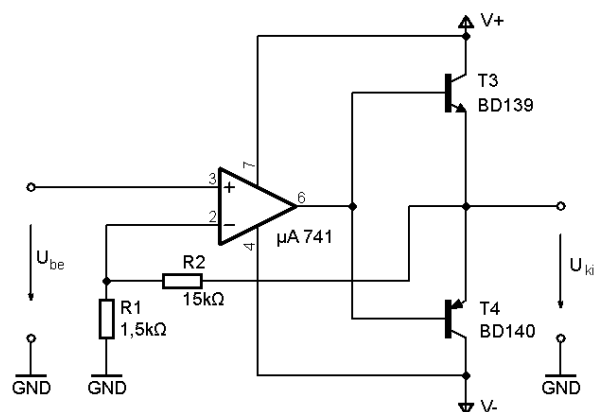
$$U_{BE1} = U_{BE4} = U_{EB5} = 0,6V;$$

$$U_{BE2} = U_{EB3} = 0,6V$$

Számolja ki az alábbiakat:

- $I_0; U_{R2}; U_{RE1}; I_{E1}; I_{C1}; U_{RC}$
- $U_{B02}; U_{B03}; I_{MP}$
- $U_{KI-OFFSET}$
- I_{KI-MAX}

2.2 Műveleti erősítő kimeneti áramának kiterjesztése



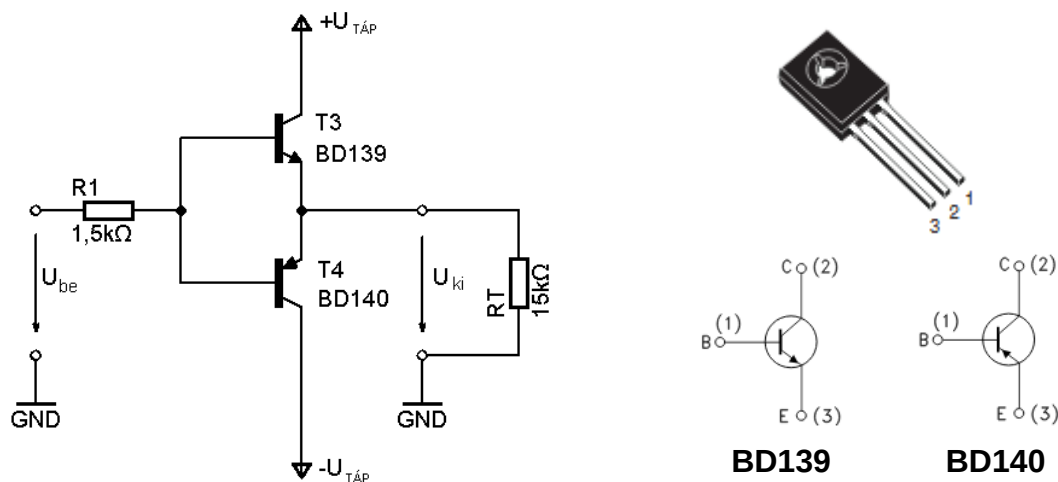
Számolja ki az áramkör erősítését!

3 Mérési feladatok

Ezek az áramkörök meglehetősen érzékenyek a tápfeszültségre és annak terhelhetőségére. Amennyiben valamelyik megépített áramkör kimeneti jelalakján „nem oda illő” elváltozásokat látunk (kiugrások, gerjedés, stb.), akkor a tápfeszültséggel párhuzamosan iktassunk be egy 100nF-os szűrőkondenzátort!

3.1 B-osztályú komplementer emitterkövető vizsgálata

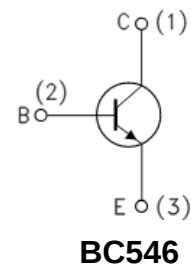
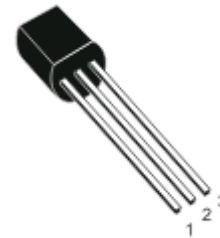
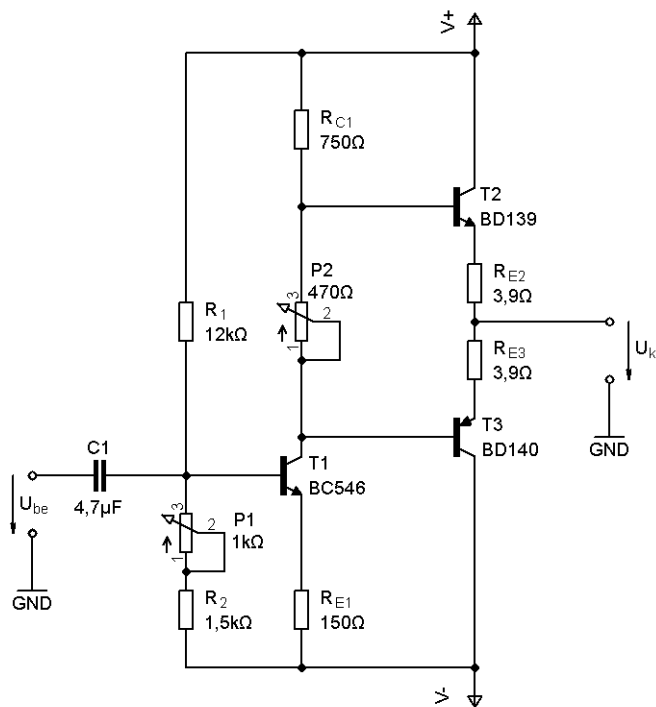
Építse meg az alábbi kapcsolást! Ügyeljen a tranzisztor lábainak helyes bekötésére! A tápfeszültség legyen $\pm 6V$.



Keresztezési torzítás és kivezérelhetőség

- Állítson be a függvénygenerátoron 3V amplitúdójú, 1kHz frekvenciájú szinuszjelet, majd kösse az áramkör bemenetére! Az oszcilloszkópon egyidejűleg ábrázoljuk U_{be} és U_{ki} jeleket!
- Állítsuk a bemeneti jel amplitúdóját a lehető legnagyobb értékre (20V_{pp})! A jel láthatóan torzulni fog, a jegyzőkönyvben adjon magyarázatot erre!
- Ne kapcsoljuk ki az áramkört! Növeljük lassan $+U_{TAP}$ feszültséget és vizsgáljuk a kimeneti jel változását. A jegyzőkönyvben ábrázoljuk a kimeneti jelet $+U_{TAP} = 8V$, illetve 12V esetén!
- Ismételjük meg a fenti mérési pontot $-U_{TAP}$ változtatásával is!

3.2 AB-osztályú erősítő vizsgálata



Munkaponti adatok és a kimeneti OFFSET beállítása

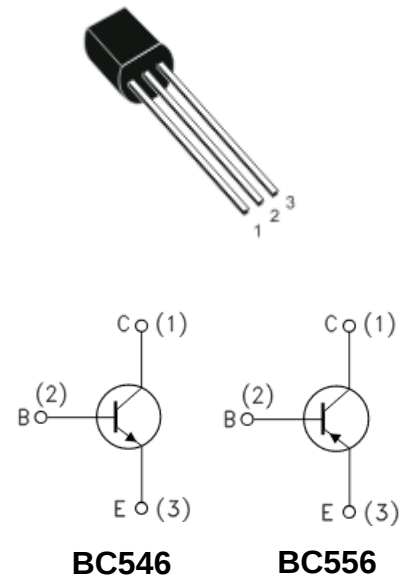
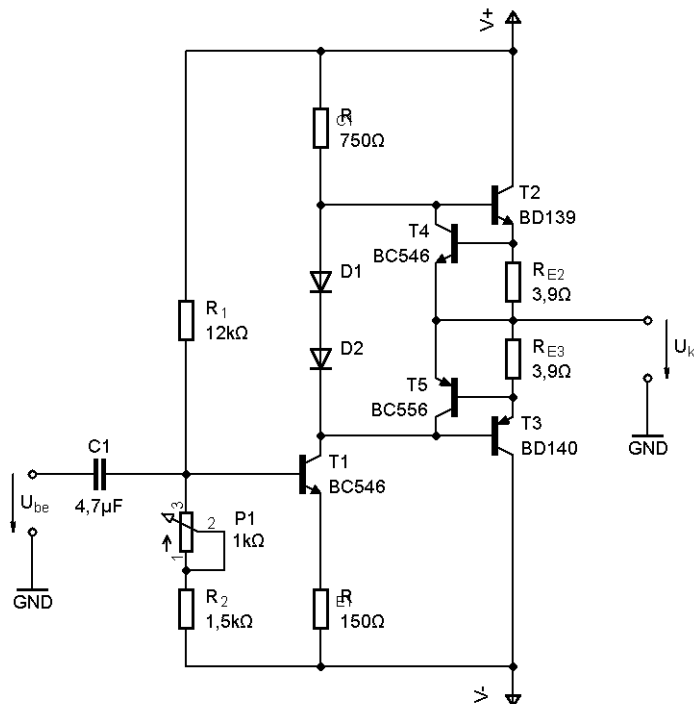
- Építsük meg a mérőkört és adjunk rá $\pm 12\text{V}$ tápfeszültséget! Az áramkörben minden potenciométer legyen 0Ω -ra állítva! Ellenőrizzük multiméterrel a következő munkaponti feszültségeket: U_{R2} ; U_{RE1} ; U_{RC1} ; U_{C0} ; $U_{KI-OFFSET}$. Hasonlítsa össze a számolt értékekkel!
- Állítsuk be P_1 potenciométerrel a kimeneti OFFSET feszültséget 0V -ra! A mérést multiméterrel, vagy oszcilloszkóppal is elvégezhetjük.

B –és AB osztályú működés vizsgálata

- Adjunk a bemenetre a függvénygenerátorról 1V amplitúdójú szinuszjelet, és az oszcilloszkópon egyidejűleg ábrázoljuk U_{be} és U_{ki} jeleket! A terhelés legyen $15\text{k}\Omega$!
- Kezdjük el lassan állítani P_2 potenciométer segítségével a végfokozat munkapontját addig a pontig, ameddig a keresztelési torzítás el nem tűnik. *Eközben a kimeneti OFFSET feszültség is változni fog, ezt a P_1 potenciométerrel állítsuk vissza 0V -ra!*
- Kapcsoljuk ki a tápegységet, és cseréljük ki a P_2 potenciométert 2db sorba kapcsolt $1\text{N}4007$ -típusú diódára! *Üzembe helyezés után a kimeneti OFFSET-et ismét állítsuk be 0V -ra!*
- A bemeneti jelet növeljük addig, amíg a kimenet nem kezd eltorzítani. Mérjük meg az áramkör kivezérelhetőségét külön az alsó –és a felső félhullámra! Melyik fokozat okozza az eltérést?
- A bemenő jel ismét legyen 1V amplitúdójú! Kapcsoljunk az áramkör kimenetére a 33Ω -os ellenállást, és figyeljük meg a jel változását. Mi okozza a kimeneti feszültség és a kivezérelhetőség csökkenését?

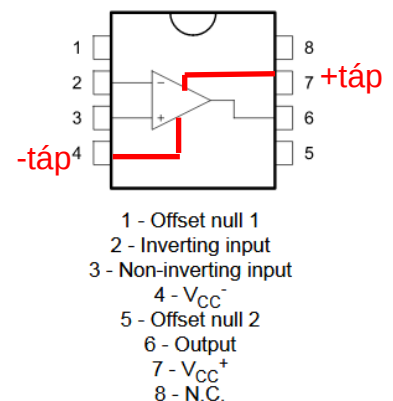
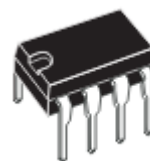
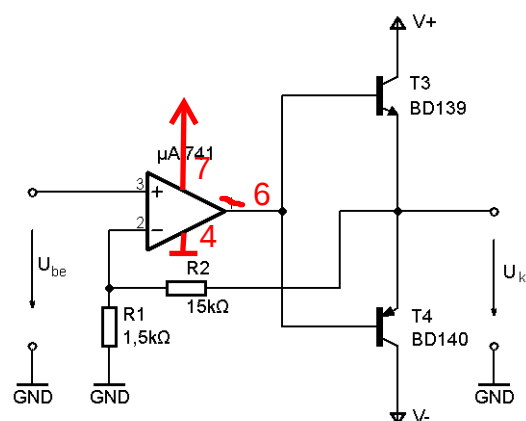
Kimeneti áramkorlátozás megvalósítása

Egészítsük ki a meglévő áramkörünket a következőképpen:



Az áramkör kimenetére kapcsoljuk rá a 33Ω -os ellenállást és a bemeneti jelet változtassuk addig, amíg a kimeneti áram korlátozása nem válik láthatóvá! A Kimeneti csúcsfeszültség mért értékéből és a terhelő ellenállásból számoljuk ki a kimeneti áram felső határát az $I_{KI-MAX} = \frac{U_{KI-MAX}}{R_t}$ képlettel!

3.3 Műveleti erősítők kimeneti áramának kiterjesztése komplementer tranzisztorpárral



Építse meg a fenti áramkört! A tápfeszültség legyen $\pm 12V$, a bemeneti jel amplitúdóját pedig állítsuk 600mV-ra!

Ábrázolja a be- és kimeneti jelalakot terhelés nélkül, majd 33Ω terheléssel! Mekkora lesz az áramkör kivezérelhetősége terheléssel, illetve anélkül?

4 Ellenőrző kérdések

1. Rajzoljon egy egyszerű B-osztályú komplementer emitterkövető kapcsolást! Mi a hátránya ennek az áramkörnek?
2. Rajolja le a komplementer emitterkövető átviteli karakterisztikáját, valamint a ki-és bemeneti jelalakokat szinuszos vezérlőjel esetén!
3. Mi határozza meg a komplementer emitterkövető kivezérelhetőséget?
4. Rajzoljon egy egyszerű AB-osztályú teljesítményerősítőt és ismertesse átviteli karakterisztikáját!
5. Milyen szinteltoló megoldásokat ismer? Melyek az egyes szinteltolók előnyei/hátrányai?
6. Rajzoljon egy AB-osztályú végfokozatot kimeneti áramkorlátozással! Mekkora lesz a maximális kimeneti áram, ha az ellenállások értéke $3,9\Omega$ és $U_{BE}=0,6V$?
7. Milyen módszerrel terjeszthető ki a műveleti erősítők kimeneti árama?