

# 1. Mérés

## Áramkör építési gyakorlat I.

2018.02.06.

Összeállította: Mészáros András

Annak ellenére, hogy az elmúlt időkben az analóg áramkörök egyre inkább háttérbe szorultak, vannak továbbra is olyan rendszerek, ahol elengedhetetlenek, továbbá a digitális jelfeldolgozás (pl.: FPGA, DSP) értelmezéséhez szükséges bizonyos áramkörök analóg működésének megértése. Ezáltal az elkövetkező mérés egyrészt segít rávilágítani arra, hogy bizonyos bonyolult matematikai vagy precíziós műveletek mennyire egyszerűek analóg alapáramkörökkel, továbbá megalapozza a digitális jelfeldolgozás során használatos programozási metódusokat.

Az első foglalkozás útmutatója az alábbi mérendő áramköröket tartalmazza:

- Aktív szinteltoló,
- Súlyozott összeadó áramkör,
- Kivonó áramkör,
- „Farok csóválja a kutyát” erősítő,

### **Alkatrész jegyzék:**

- LM741 1db,
- BC337 2db,
- 100Ω ellenállás 1db,
- 1k ellenállás 1db,
- 2k2 ellenállás 2db,
- 10k ellenállás 4db,
- 180Ω/2W ellenállás 2db,
- 10k potenciométer 2db,
- 470nF kondenzátor 2db.

### **Megjegyzés:**

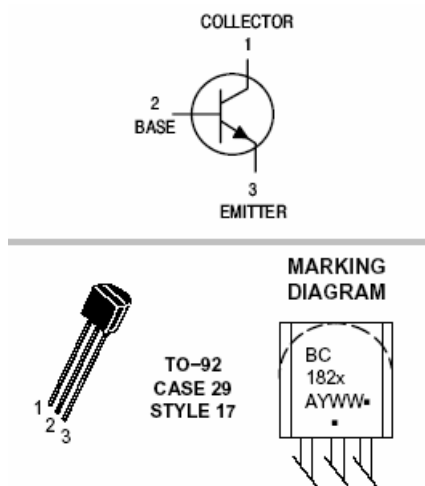
Az elkövetkező mérőkapcsolások esetén előfordulhat, hogy bizonyos paramétert az oktató fog megadni vagy módosítani. Ahol erre külön figyelmeztet az útmutató, ott minden esetben a mérésvezetővel egyeztetni kell az áramkör megépítése előtt.

*A legtöbb műveleti erősítő kapcsolás megépíthető aszimmetrikus táplálással is, ekkor azonban a kapcsolatban szereplő földpontokat fel kell emelni féltáp feszültségre (ellenállások alkotta feszültségosztóval).*

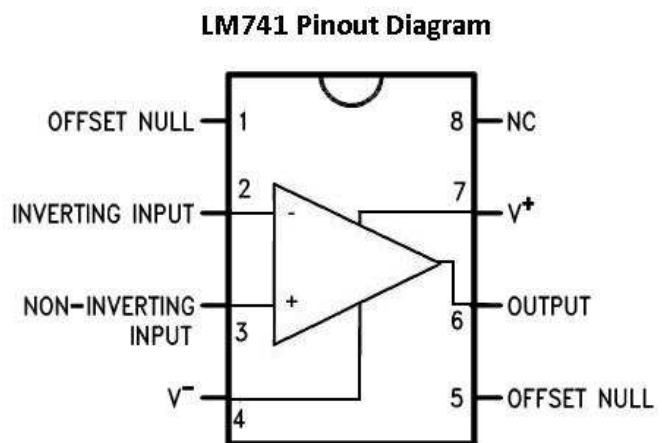
## 1.0 Bipoláris tranzisztor és műveleti erősítő vizsgálata

Nem pusztán a laboratóriumi foglalkozások során, hanem egyéb tevékenységek alkalmával is mindig meg kell győződni a rendelkezésre állók aktív eszközök működésének helyességéről (frissen vásárolt alkatrészek esetén is!), valamint arról, hogy az adatlapban foglaltak ellenére hogyan viselkednek a valóságban.

**a,** Ellenőrizzük le a méréshez mellékelt bipoláris tranzisztorok (BC337) épségét úgy, hogy a HM8012 multiméter dióдавizsgáló üzemmódjában megmérjük a tranzisztor bázis-emitter feszültségét! (A mérést a műszer úgy végzi, hogy 1,00mA-es áramgenerátorral táplálja meg a bázis-emitter diódát és a rajta eső feszültséget méri.) Ügyeljünk a helyes bekötésre, mivel a három kivezetés közül kettő között is mérhetünk értéket, mivel a kollektor-bázis zárióirányú dióda is kimérhető! Tudván, hogy gyengeáramon és kisfrekvencián manapság csak szilícium-alapú tranzisztorokat alkalmaznak, tudhatjuk, hogy mekkora a várható körülbelüli  $U_{BE}$  érték.



1. ábra: BC337 tranzisztor bekötése



2. ábra: LM741 lábkiosztása

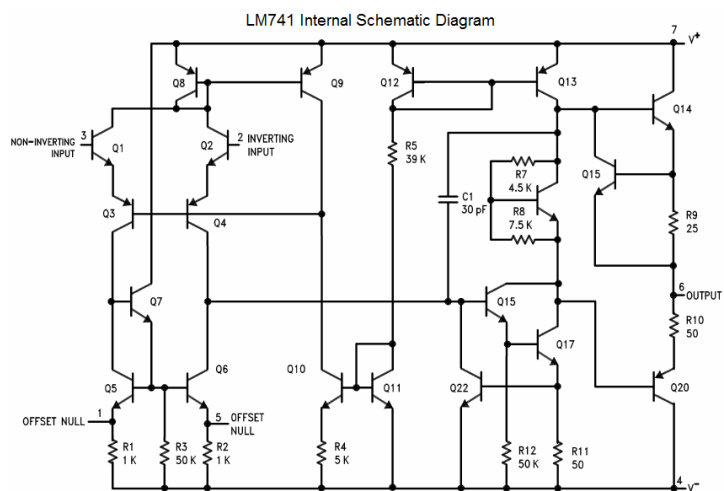
**b,** Ellenőrizzük a méréshez használandó műveleti erősítő (operational amplifier /opamp/; LM741) működőképességét!

A műveleti erősítő ellenőrzésének lépései:

1. Adjunk az opamp tápáigaira  $\pm 10V$  feszültséget; jobbik esetben nem viszi zárlatba a tápegységet, ha mégis, természetesen hibás.

A katalógusban megadott (30mA) maximális tápáramnál valamivel nagyobb áramkorlátot előzetesen állítsunk be mindkét tápegységen!

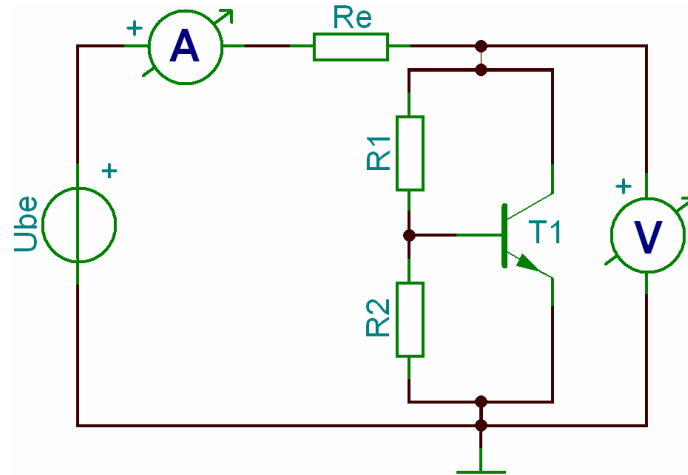
2. Vizsgáljuk meg az opampot nullkomparátorként, mivel úgy nincs szükség egyéb alkatrészre; adjunk az egyik tetszőleges bemenetre ofszet feszültség nélküli, kb 1kHz-es szinuszjelet, a másik bemenetet pedig tegyük földpotenciálra. Így a kimeneten négyszögjelnek kell megjelenie.



3. ábra: Az LM741 belső felépítése (Texas Instruments)

## 1.1 Aktív szinteltoló

Az első mérendő kapcsolás az úgy nevezett aktív szinteltoló, más néven kiterjesztett karakterisztikájú tranzisztor, sematikus ábrája és a köré építendő mérőelrendezés a **4. ábrán** látható.



4. ábra: Kiterjesztett karakterisztikájú tranzisztor

Első pillantásra egy földelt emitteres (kollektoros) kapcsolásnak vélhető, azonban a gyakorlatban kétpólusként alkalmazzák. Növekvő  $U_{be}$  bemeneti feszültség esetén az  $U_{be}-U_{ki}$  feszültségek viszonya lineáris, az  $R_e$  és  $R_1+R_2$  ellenállások osztásarányával írható le. Azonban amint a bemeneti feszültség akkora szintet ér el, hogy  $R_2$  ellenálláson kellően nagy feszültség jön létre ahhoz, hogy a  $T_1$  tranzisztor bázis-emitter diódája kinyisson (nyitni kezdjen), a kimeneti karakterisztika és vele együtt a körben folyó áram sem lesz lineáris a továbbiakban. A kiterjesztett karakterisztikájú tranzisztor, mint kétpólus, nagyon hasonlóan fog viselkedni a Zener-diódához azon különbségekkel, hogy egyrészt nyitóirányú bekötést igényel, másrészt a bázisosztó ellenállásaival változtatható a jelleggörbéje, pontosabban szólva a letörési feszültsége.

$$U_{R1} = (I_B + I_{R2}) \cdot R_1 = \left( I_B + \frac{U_{BE}}{R_2} \right) \cdot R_1$$

$$U_{ki} = U_{R1} + U_{R2} = \left( I_B + \frac{U_{BE}}{R_2} \right) \cdot R_1 + U_{BE}$$

$$U_{ki} = R_1 \cdot I_B + \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{BE} + U_{BE} = U_{BE} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + I_B \cdot R_1$$

Amennyiben nagy áramerősítési tényezőjű tranzisztort alkalmazunk, úgy a bázisáram hanyagolhatóvá válik, ekkor a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = U_{BE} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

A kimeneti dinamikus ellenállás ( $r_{ki}$ ) az alábbi módon határozható meg:

$$r_{ki} = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta I_C}$$

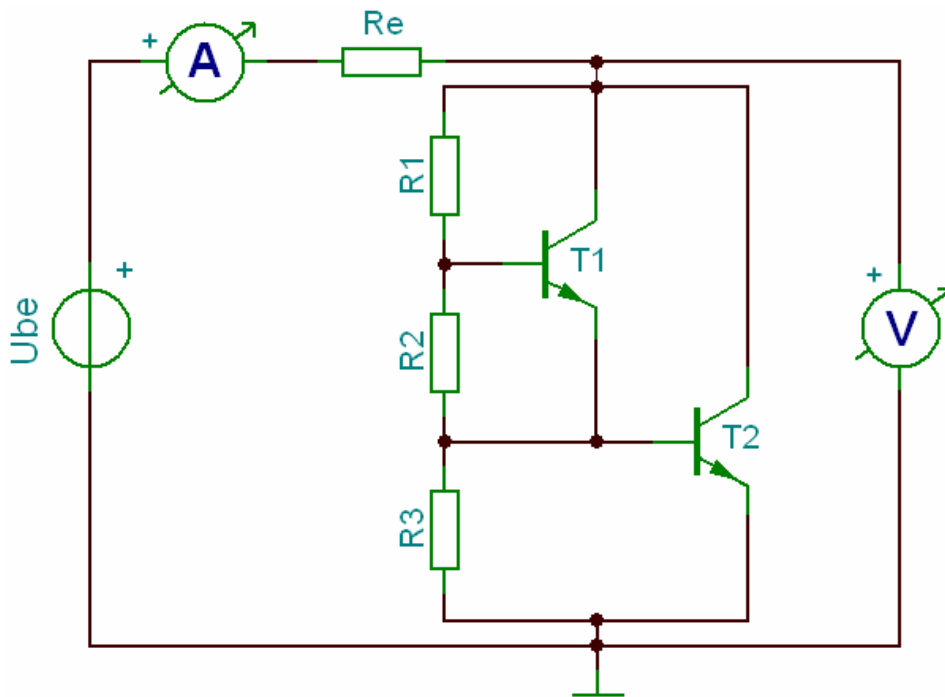
A kollektoráram változása a meredekség, illetve az  $U_{BE}$  feszültségváltozásának szorzata (a korábbi kimeneti feszültség formulájából visszahelyettesítve):

$$\Delta I_C = gm \cdot \Delta U_{BE} = gm \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \Delta U_{ki}$$

Behelyettesítve a kollektoráram változását a dinamikus ellenállás képletébe:

$$r_{ki} = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta I_C} = \frac{1}{gm} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

A kimeneti dinamikus ellenállás értéke tovább javítható, ha kétfokozatúvá tesszük a szinteltolót oly módon, hogy tovább bővítjük egy  $R_3$  és egy  $T_2$  tranzisztorral. Gyakorlatilag létrehozunk egy aktív szinteltolót, melynek a korábbi  $R_1$  ellenállása maga is egy szinteltoló:



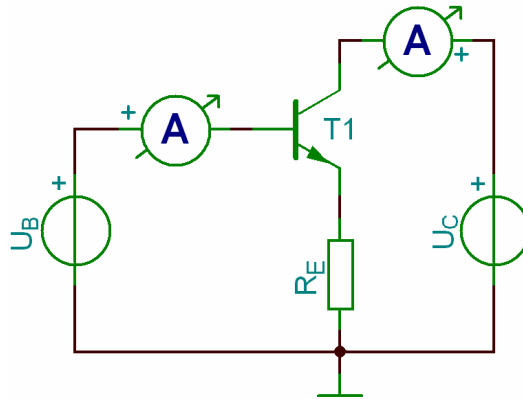
5. ábra: Csökkentett dinamikus ellenállású aktív szinteltoló

$$r_{ki}' = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta I_{C2}} = \frac{1}{gm} \cdot \left( 1 + \frac{r_{ki}}{R_3} \right)$$

A BC337-es tranzisztor bétája kellően nagy ahhoz (100-600), hogy a feladathoz tartozó számítások során hanyagolható legyen.

A gyakorlati tapasztalat azonban az, hogy az **5. ábra** szerinti kapcsolás kimeneti ellenállása kimutatható, akár számottevő függést mutat a bétától. Ennek igazolása céljából a méréshez használt két tranzisztor bétáját meg kell határozni. Ebből adódóan ügyeljünk arra, hogy a mérés során jól elkülönítve kezeljük a két tranzisztort, és ne keverjük össze!

A tranzisztorok áramerősítési tényezőjének meghatározására egy nagyon egyszerű megoldást alkalmazunk: a tranzisztor bázisával és kollektorával egyaránt sorba kötünk egy-egy árammérőt, az emitterével pedig egy ellenállást a hőmegfűtés meggátolásának érdekében.



6. ábra: Áramerősítési tényező mérése

**Méréshez szükséges adatok:**

$T_1, T_2$ : BC337

$U_B = 5V$

$U_C = 15V$

$R_E = 1k\Omega$

\* A  $\beta$  a kollektor- és bázisáram hányadosaként határozandó meg.

\*A mérés 10 másodperc környéki időt kíván a munkapont stabilizálódásához.

**Mérési feladatok:**

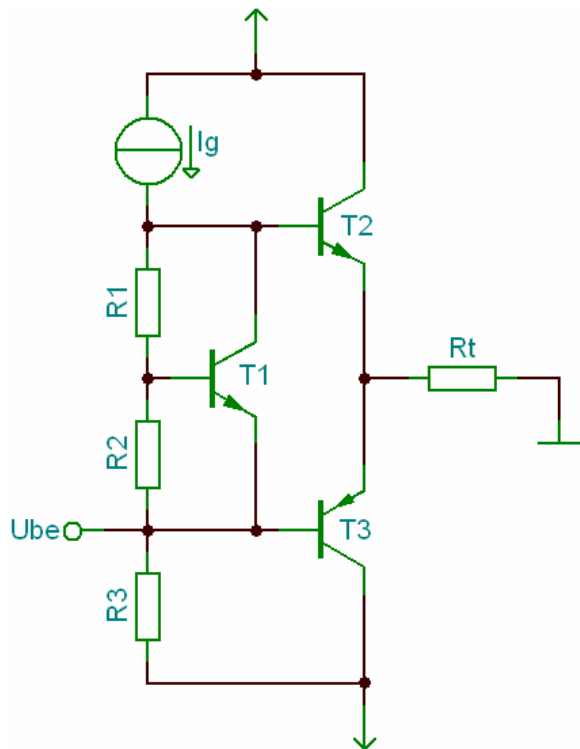
1. Valósítsuk meg a 6. ábra szerinti mérési elrendezést. A báziskörben található árammérő  $\mu A$  (legpontosabb) méréshatárban legyen, a kollektorköri pedig mA-ben (három tizedesjegy).

2. Határozzuk meg mindkét tranzisztor  $\beta$  áramerősítési tényezőjét!

Az aktív szinteltoló tehát a tranzisztor BE-átmenetének nyitását követően közel állandó feszültséget tart kollektora és emittere között.

Ennek megfelelően a fő felhasználási területei:

- Programozható referenciazfeszültség,
- B- és AB-osztályú erősítők munkapontbeállítása (3. és 7. ábra),
- Műveleti erősítők fázisösszegzője és további fokozatai közti munkapont-illesztés.



7. ábra: Példa az aktív szinteltoló alkalmazására

#### Méréshez szükséges adatok:

$T_1, T_2$ : BC337

$U_{be}$  0-20V<sub>DC</sub>

$R_e = 1k\Omega$

$R_1 = 10k\Omega$

$R_2 = R_3 = 2,2k\Omega$

#### Mérési feladatok:

1. Valósítsuk meg a 4. ábra szerinti szinteltolót, majd vegyük fel az  $U_{be}$ - $U_{ki}$  és az  $U_{ki}$ - $I$  karakterisztikáit!
2. Határozzuk meg a kimeneti dinamikus ellenállást mindkét tranzisztorral!
3. Valósítsuk meg a 5. ábra szerinti kéttranzisztoros szinteltolót, majd vegyük fel az  $U_{be}$ - $U_{ki}$  és az  $U_{ki}$ - $I$  karakterisztikáit!
4. Határozzuk meg a kimeneti ellenállást (a tranzisztorok felcserélésével is!)

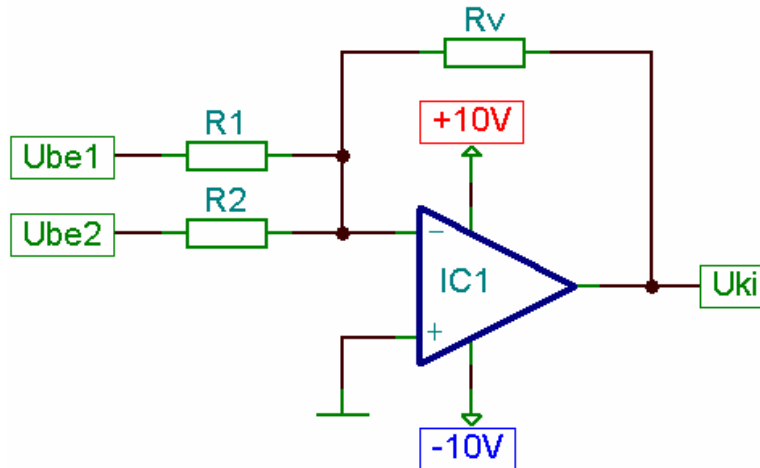
A kimeneti dinamikus ellenállás meghatározásakor ne feledjük, hogy az árammérő a tranzisztor  $I_C$  (vagy  $I_{C2}$ ) kollektorárama mellett a bázisosztó áramát is méri, így azzal számolásakor kompenzálni kell! A mérés útján kapott értékekből történő számítás módja (a vesszős értékek két mérési eredményt reprezentálnak a szinteltoló dinamikus tartományában, vagyis ahol már közel állandó a kimeneti feszültség:

$$r_D = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta I_C} = \left| \frac{U_{ki}' - U_{ki}''}{I_C' - I_C''} \right|$$

Részletesebben erről emlékeztetőül az Elektronika I. laboratóriumi útmutatóban.

## 1.2 Súlyozott összeadó áramkör

Az analóg összeadó kapcsolás akár végtelen számú analóg jel összeadására is képes; a gyakorlatban természetesen leginkább kettő bemenettel szokás alkalmazni (erre példa a **2. foglalkozáson** mérésre kerülő precíziós kétutas egyenirányító), de D/A konverterben is alkalmazzák. A mérendő kapcsolás a **8. ábrán** látható.



8. ábra: Súlyozott analóg összeadó két bemenettel

A kimeneti feszültség meghatározásához ismerni kell a virtuális földpontba ( $U_v$ ) befolyó, és onnan elfolyó áramokat, azaz a virtuális nulla pont csomóponti egyenletét. Két bemenet esetén:

$$I_1 + I_2 - I_v = 0$$

Mivel a „lelke mélyén” ez az áramkör egy invertáló erősítő, mindössze több bemenettel, ezért annak erősítéséből, valamint az előbbi egyenletből kifejezhető:

$$U_{ki} = - \left( U_{be1} \cdot \frac{R_v}{R_1} + U_{be2} \cdot \frac{R_v}{R_2} \right)$$

### **Méréshez szükséges adatok:**

IC: LM741 ( $U_i = \pm 10V$ )

$R_1 = R_2 = R_v = 10k\Omega$

$P = 10k\Omega$ .

A tetszőleges bemeneti feszültség előállítása potenciométerrel történjen úgy, hogy a potenciométer két végpontját +10V és -10V feszültségre kötjük, így a csúszkát kezelve kimenetként megkapjuk az ezen két határérték között állítható egyenfeszültséget.

### **Mérési feladatok:**

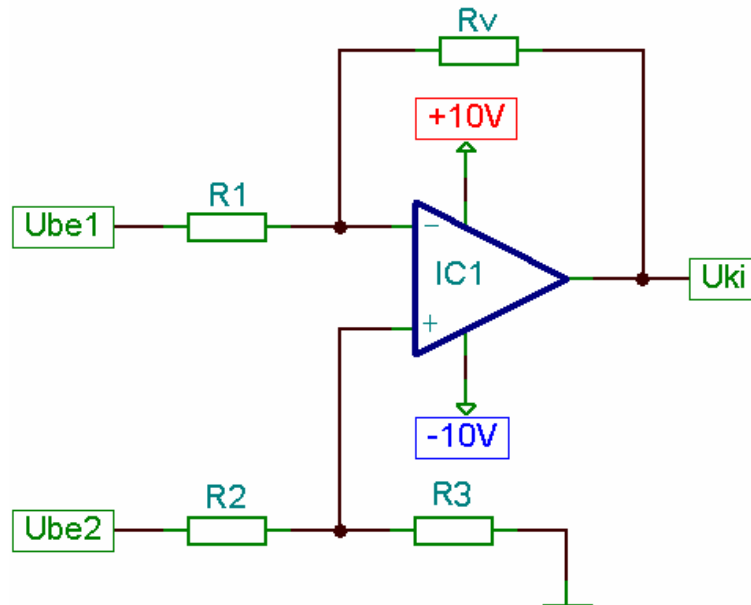
1. Adjunk a két bemenetre potenciométerekkel beállított,  $\pm 10V$  feszültség közé eső tetszőleges értékeket, majd mérjük meg azokat és a kimeneti feszültséget. A kapott értéket számítással is igazoljuk!

2. Adjunk az egyik bemenetre tetszőleges DC feszültséget, a másik bemenetre pedig 1kHz, 2V amplitúdójú szinusz jelet. Vizsgáljuk meg a kimeneti jelalakot (oszilloszkóp bemenete legyen DC üzemmódban!).

### 1.3 Analóg különbségképző (kivonó) áramkör

Az analóg különbségképző szabályozási körökben jól használható áramkör; ha a nem invertáló bemenetre egy referenciaértéket (alapértéket) kapcsolunk, az invertáló bemenetre pedig a végrehajtó szervektől visszaérkező hibajel, akkor a kimeneten megjelenő jel lesz a hibajel (hibafeszültség). Egyszerűbb értéktartó szabályozási rendszerekhez alkalmazható, illetve szimmetrikus bemeneti feszültségből aszimmetrikus kimenetet lehet vele létrehozni (pl.: Wheatsone-híd kimeneteiből).

Az alapkapcsolást, egyben a mérendő kört a **9. ábra** ismerteti.



9. ábra: Analóg különbségképző

A különbségképző működésének a következő:

1. Legyen az  $R_1$  ellenálláson folyó áram  $I_1$ , a rajta eső feszültség  $U_1$ ,  $R_2$  ellenálláson folyó áram  $I_2$ , a rajta eső feszültség  $U_2$  és így tovább.
2. Legyen az invertáló bemenet potenciálja  $U_-$ , a nem invertáló bemeneté pedig  $U_+$ .
3. Feltételezzük, hogy a műveleti erősítő bemeneteinek árama zérus ( $I_+ = I_- = 0$ ).
4. Mivel a műveleti erősítő nem invertáló bemenetére nincs visszahatása a kimenetnek (ebben az ágba nincs visszacsatolás), ezért felírhatjuk a mindenkor érvényes képletet:

$$U_+ = U_{be2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

5. A műveleti erősítő mindig arra törekszik, hogy a két bemenete azonos potenciálú legyen (ez csak negatív visszacsatolás mellett valósulhat meg!), vagyis  $U_- = U_+$ .



6. Ha  $U_{be2}=0$ , akkor:

$$U_{ki} = -U_{be1} \frac{R_v}{R_1}$$

7. Ha  $U_{be1}=0$ , akkor:

$$U_{ki} = U_{be2} \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_v}{R_1} \right)$$

8. Összegezve:

$$U_{ki} = -U_{be1} \left( \frac{R_v}{R_1} \right) + U_{be2} \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_v}{R_1} \right)$$

Ha  $R_1=R_2$  és  $R_3=R_v$ , akkor az  $U_{ki}$  kimeneti feszültség a **III. képlet** alapján számítható:

$$U_{ki} = \frac{R_v}{R_1} (U_2 - U_1)$$

*III. képlet: Analóg különbségképző egyszerűsített  $U_{ki}$  képlete*

**Méréshez szükséges adatok:**

IC: LM741 ( $U_i = \pm 10V$ )

$R_1=R_2=R_3=R_v=10k\Omega$

$P=10k\Omega$ .

\*Az esetleges gerjedés elkerülésének érdekében a pozitív táp és a föld ( $+U_i - GND$ ) és a negatív táp és a föld ( $-U_i - GND$ ) közé is tegyünk 1-1 470nF-os kondenzátort! (Nem csak a mérés során, hanem minden esetben, ha gerjedne a műveleti erősítő!)

**Mérési feladatok:**

1. Tegyük földpotenciálra a két bemenetet ( $U_{be1}$  és  $U_{be2}$ ), majd mérjük meg az erősítő kimeneti offset feszültségét!

2. Az invertáló bemenetre ( $U_{be1}$ ) vezessünk rá 2V amplitúdójú 1kHz-es szinusz jelet, a nem invertáló bemenetre pedig 10k $\Omega$  potenciométerrel beállított tetszőleges egyenfeszültséget.

Mérjük meg a kimeneti feszültséget oszcilloszkóppal DC üzemmódban!

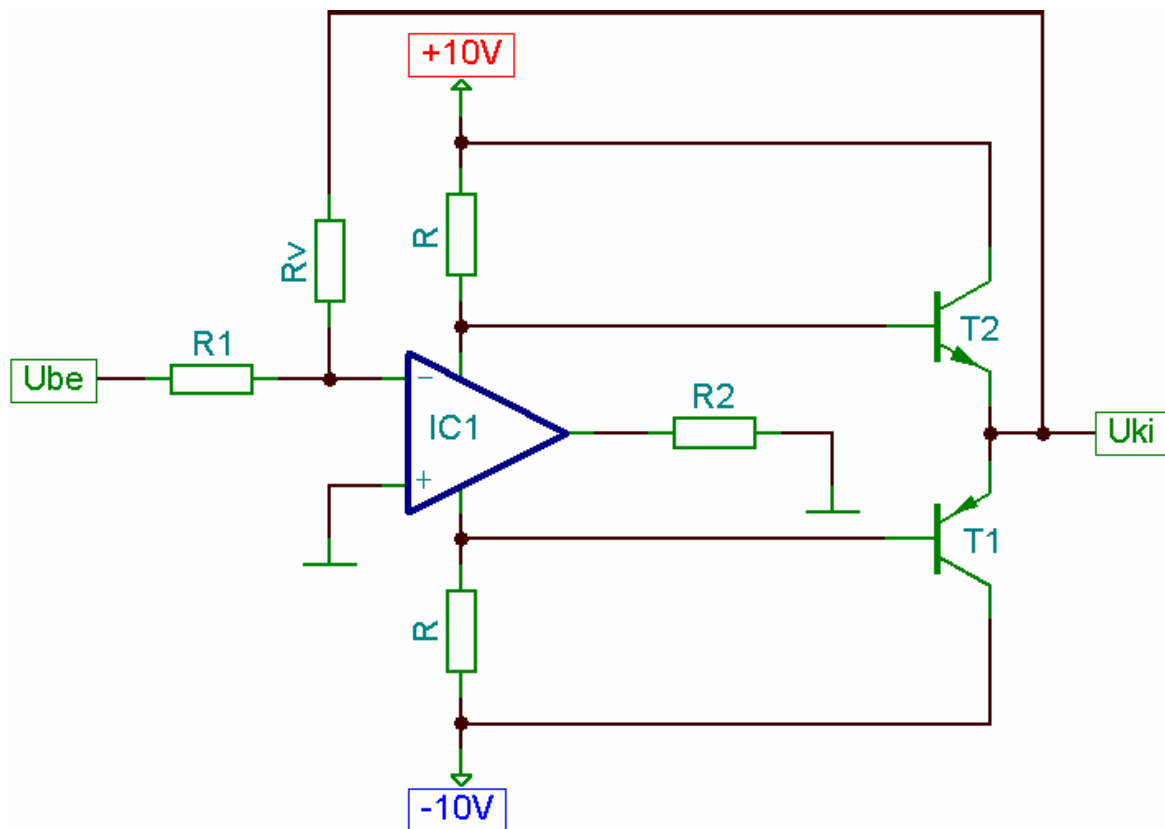
3. Cseréljük fel  $U_{be1}$  és  $U_{be2}$  pontokat, majd ismételjük meg a 2. mérési pontot!

## 1.4 „Farok csóválja a kutyát” típusú erősítő

Normál üzem esetén a műveleti erősítők kimenetét használjuk kimenetnek, azonban ezen kivételes alkalmazás esetén a műveleti erősítő azon tulajdonságát aknázzuk ki, hogy amennyiben a kimenetet földre tesszük (vagy kis értékű ellenállással terheljük), akkor az erősítő a tápágait a bemeneti jel és az erősítés függvényében magával fogja rántani. Ily módon az erősítő egyes tápágaiban a bemenetre kapcsolt szinusz jel megfelelő félhullámai fognak megjelenni áramváltozás formájában.

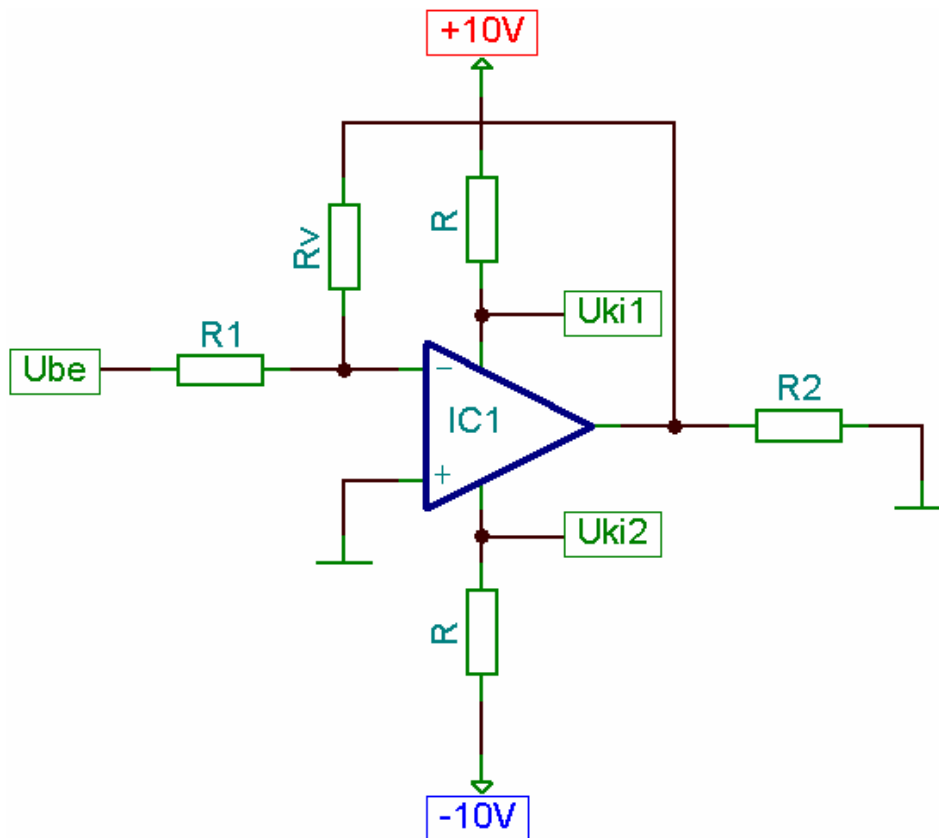
Ahhoz, hogy az áramváltozásból kimeneti feszültségváltozást hozzunk létre, úgy a tápágakkal sorosan kapcsolt R ellenállásokat kell alkalmazni. A legjobb hatásfok és legkisebb torzítás elérése végett minden esetben célszerű szimmetrikus táplálás mellett alkalmazni.

A kapcsolást főleg hangfrekvenciás tartományban használják ellenütemű teljesítményerősítők meghajtására. Erre látható példa a **10. ábrán**. Ebben az esetben ügyelni kell arra, hogy R ellenállások értéke úgy kerüljön megválasztásra, hogy biztosítani tudják a műveleti erősítő nyugalmi áramát, amely rend szerint katalógus adat, illetve a tranzisztorok bázisáramát egyaránt.



10. ábra: Példa a „farok csóválja a kutyát” típusú erősítőre

A mérendő kapcsolás részét nem képezi az ellenütemű végfokozat, az egyszerűsített változat a **11. ábrán** látható. Jól megfigyelhető a két kapcsolásban egy fontos különbség, hogy a bemenetre érkező visszacsatoló jelnek mindig a teljes erősítő kapcsolás kimenetéről kell érkeznie, különben a jel erősen torzított lesz. Mivel a kapcsolás B osztályú fokozatok meghajtására hivatott, ezért a kimeneti jelben mindkét esetben keresztezési torzítás fog fellépni.



11. ábra: A „farok csóválja a kutyát” erősítő mérési elrendezése

**Méréshez szükséges adatok:**

IC: LM741 ( $U_i = \pm 10V$ )

$R_1 = 1k\Omega$

$R_v = 10k\Omega$

$R = 180\Omega/2W$

$R_2 = 100\Omega$

\*A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

**Mérési feladatok:**

1. Adjunk a bemenetre akkora amplitúdójú, 1kHz körüli szinusz jelet, ami nem vezérli túl a két kimenet egyikét sem, ily módon meghatározva a maximális kivezérelhetőséget!
2. A két kimenetet vezessük az oszcilloszkópra, majd rögzítsük a jelalakokat először külön-külön, majd a két jel összegeként is (analog oszcilloszkópon ADD, digitálison pedig a MATH menüben).
3. Vizsgáljuk meg a keresztelési torzítás jelenségét külön-külön és összegző módban is (amennyiben kimutatható nagyságú; a látottakat mindenképpen magyarázzuk)!
4. Amennyiben a két kimeneti félhullám csúcspontjai között számottevő eltérés van, úgy azt is rögzítsük, magyarázzuk.

## **1.5 Ellenőrző kérdések:**

1. Ismertesse a kiterjesztett karakterisztikájú tranzisztor működését!
2. Adja meg az aktív szinteltoló kimeneti feszültségének képletét (és kapcsolási rajz)!
3. Adja meg az aktív szinteltoló kimeneti ellenállásának formuláját!
4. Ismertesse az aktív szinteltoló kimeneti ellenállásának mérési módját!
5. Mondjon példát a kiterjesztett karakterisztikájú tranzisztor alkalmazására!
6. Ismertesse a súlyozott összegző működését (képlet, kapcsolási rajz)!
7. Mondjon példát a súlyozott összegző alkalmazására!
8. Ismertesse az analóg különbségképző működését (végképlet, kapcsolási rajz)!
9. Vezesse le az analóg különbségképző működését (kapcsolási rajzzal)!
10. Ismertesse a „farok csóválja a kutyát” típusú erősítő működését (kapcsolási rajzzal)!