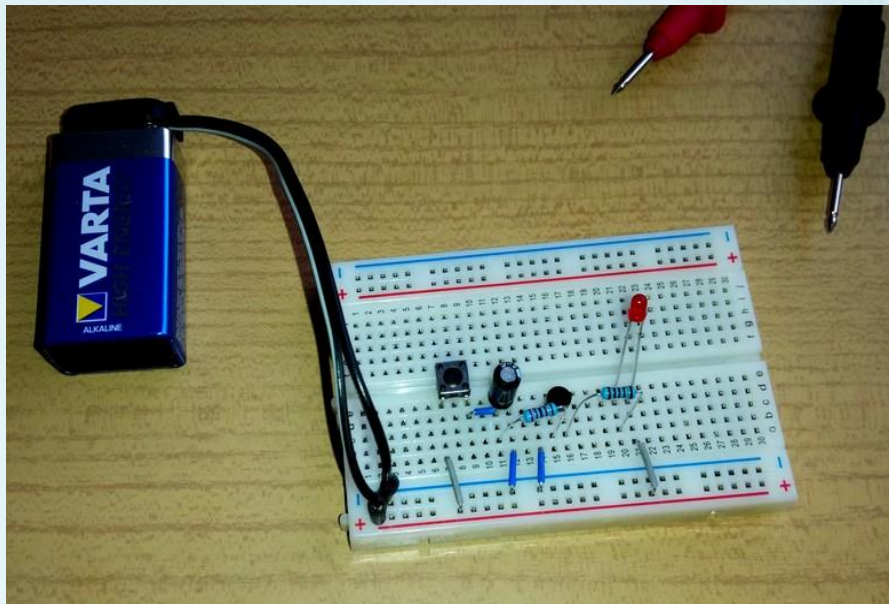


Hobbi Elektronika



*Bevezetés az elektronikába:
Műveleti erősítők - 1. rész*



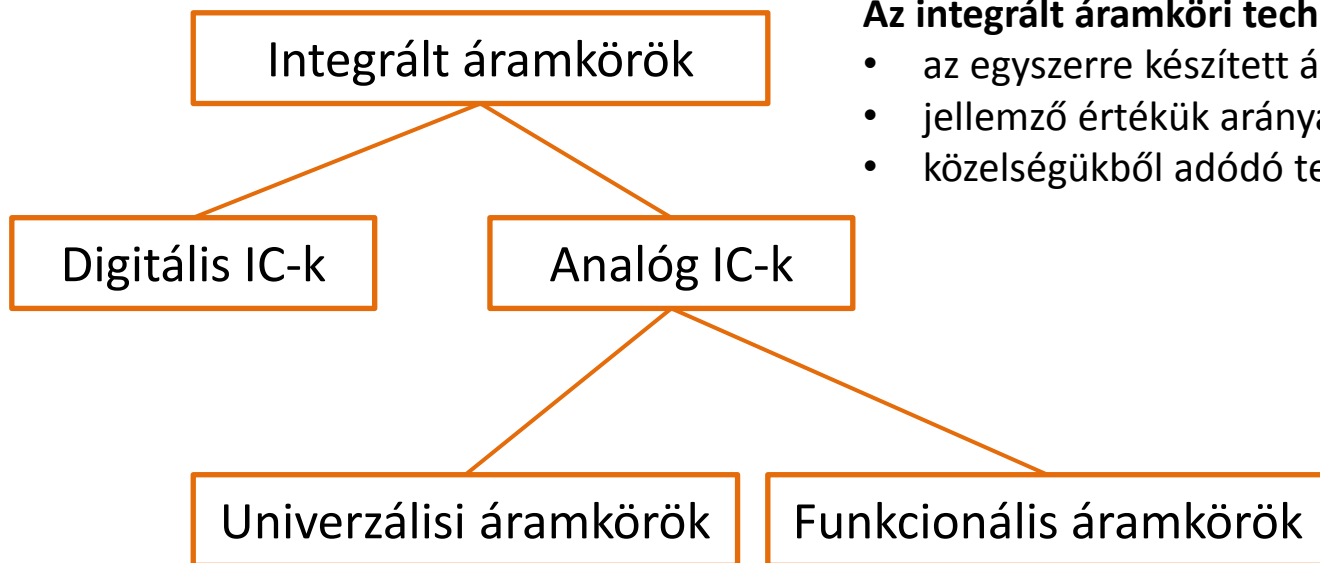
Felhasznált irodalom

- ❑ Sulinet Tudásbázis: [A műveleti erősítők alapjai, felépítése, alkapcsolások](#)
- ❑ Berta Miklós: [Műveleti erősítők alkapcsolásai, A Miller effektus](#)
- ❑ Mike Gábor: [Mérőerősítők](#)
- ❑ Electronics Tutorials: [Operational Amplifier Basics](#)
- ❑ Talking Electronics: [The OP-AMP](#)
- ❑ Texas Instruments: [Application of Rail-to-Rail Operational Amplifiers - SLOA039A](#)
- ❑ Varga Zoltán: [Forrasztó páka vezérlés](#) (BSS Elektronika)



Integrált áramkörök

Az elektronikai ipar nagy iramú fejlődése hozta létre a **mikroelektronikát** és ezen belül az **integrált áramköri technikát** is (Jack Kilby, Texas Instruments 1958 – az első félvezető IC). Az integrált áramkör (angolul: Integrated Circuit, röviden IC) fő jellemzője, hogy az áramköri aktív és passzív elemek egy-egy csoportját és az ezeket egybefoglaló összekötéseket egyidejűleg, azonos gyártástechnológiával hozzák létre.



Az integrált áramköri technológia előnyeirez tartozik:

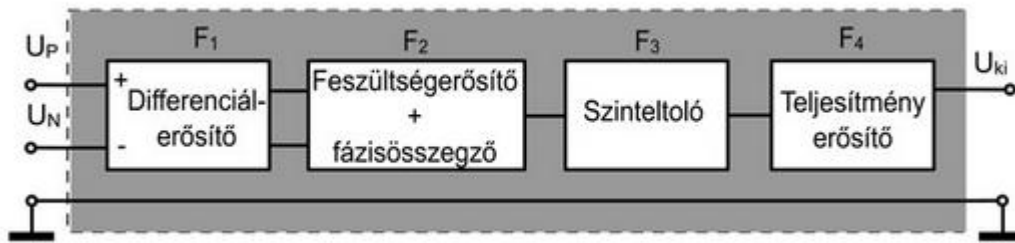
- az egyszerre készített áramköri elemek egyformasága
- jellemző értékük arányának állandósága
- közelségükből adódó termikus csatoltsága.

Az univerzális áramkörök közül kiemelkedő jelentősége van az **integrált műveleti erősítőknek**, amelyek a mérés- és irányítástechnika, híradástechnikai rendszerek univerzális elemeként tekinthetők.

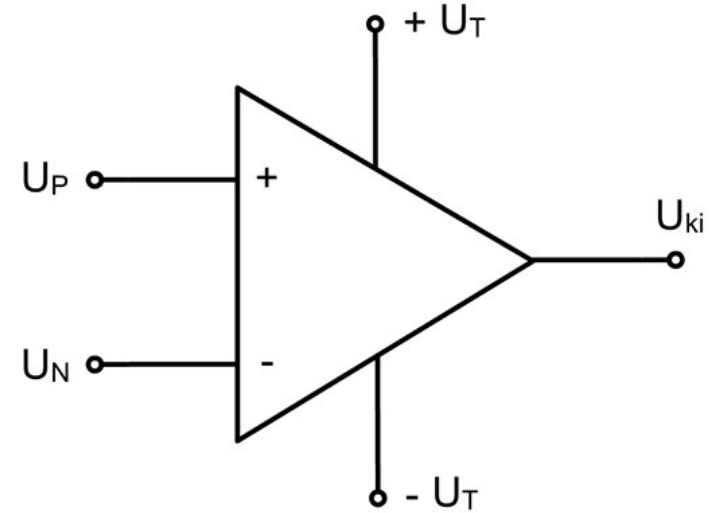
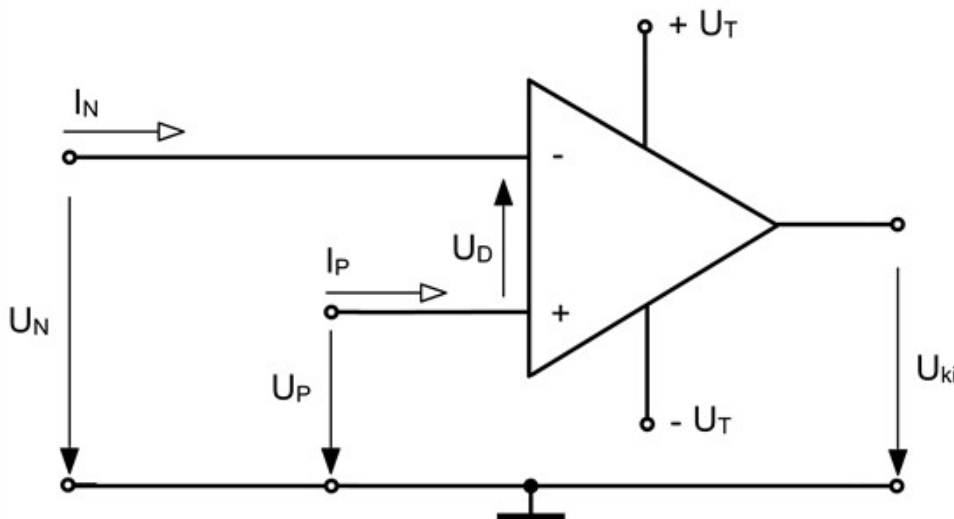


A műveleti erősítő

A műveleti erősítők egyen- és váltakozó feszültségű jelek erősítésére is alkalmasak. Fontos feladat az „elmászás” (drift) alacsony értéken tartása, ezért bemenetükön kivétel nélkül differenciálerősítőt alkalmazunk.



A műveleti erősítő vázlatos felépítése és rajzjele



- + A neminvertáló bemenet
- Az invertáló bemenet

A feszültségek vonatkoztatási pontja a tápegység közös pontja (GND)



Differenciál-erősítő

A differenciálerősítő két párhuzamosan kapcsolt, emitter-kapcsolású fokozatból áll.

A szimmetrikus kimeneti feszültség (U_{kis}) a két kollektor között jelenik meg.

Az ideális differenciálerősítőben a két tranzisztor paraméterei és a megfelelő ellenállások tökéletesen egyformák, tehát felépítésében és tulajdonságaiban szimmetrikus a kapcsolás.

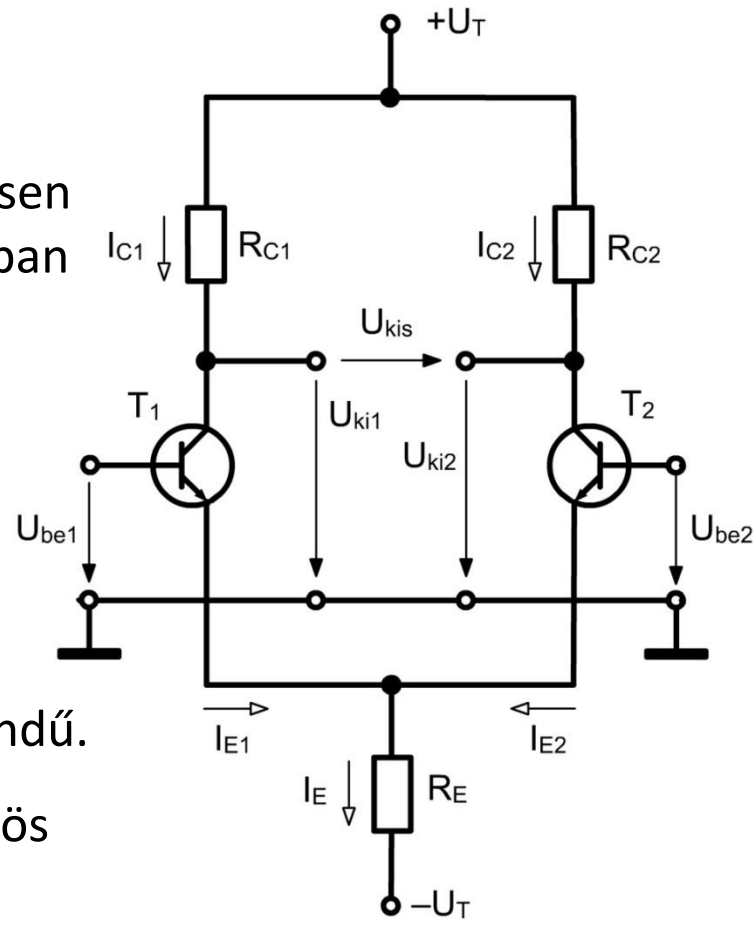
A közös módusú jel erősítése:

$$A_{UK} = \frac{\Delta U_{ki1}}{\Delta U_k} = \frac{\Delta U_{ki2}}{\Delta U_k} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{R_C}{R_E}$$

A reális erősítőknél $A_{UK} \approx 10^{-3}$, míg a szimmetrikus jel erősítése $A_{US} \approx 10^2$ nagyságrendű.

A kettő aránya az erősítő minőségét jellemzi: Közös

módusú elnyomási tényező, $CMRR = \frac{A_{US}}{A_{UK}}$



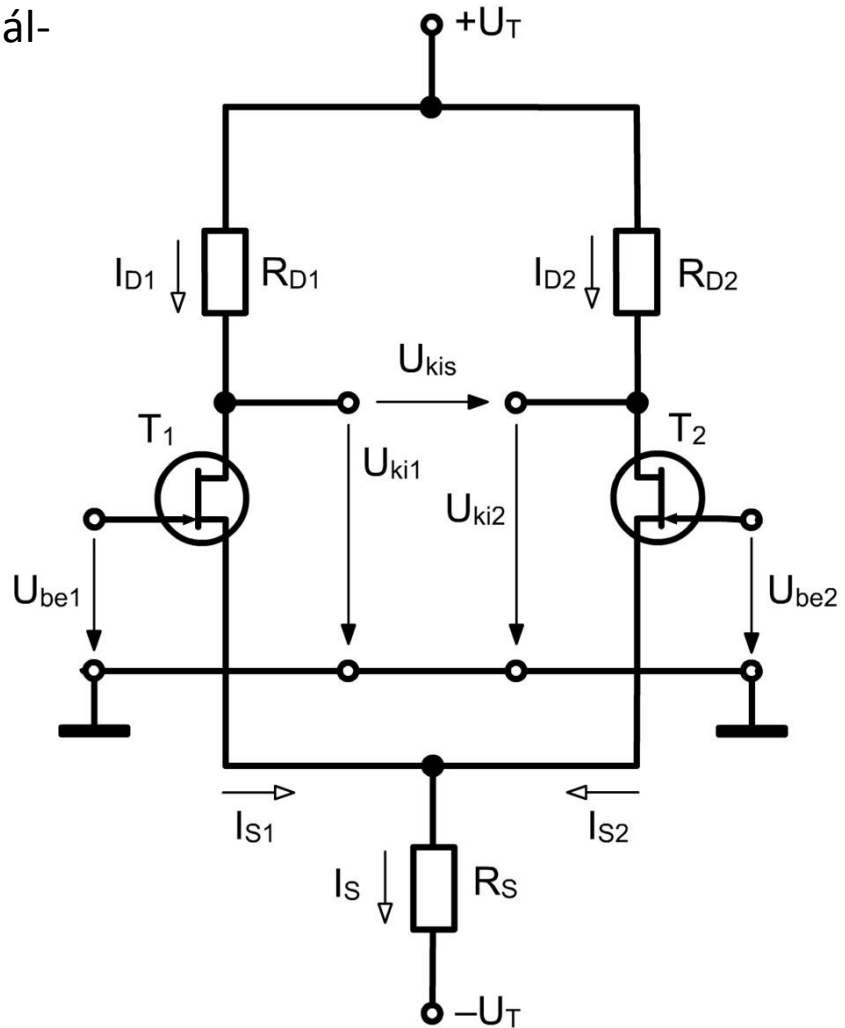


FET-es differenciálerősítő

A műveleti erősítők bemeneti fokozata
térvezérlésű tranzisztorral felépített differenciál-
erősítő is lehet

Főbb előnyök:

- Nagy bemeneti ellenállás
- Gyors(abb) működés

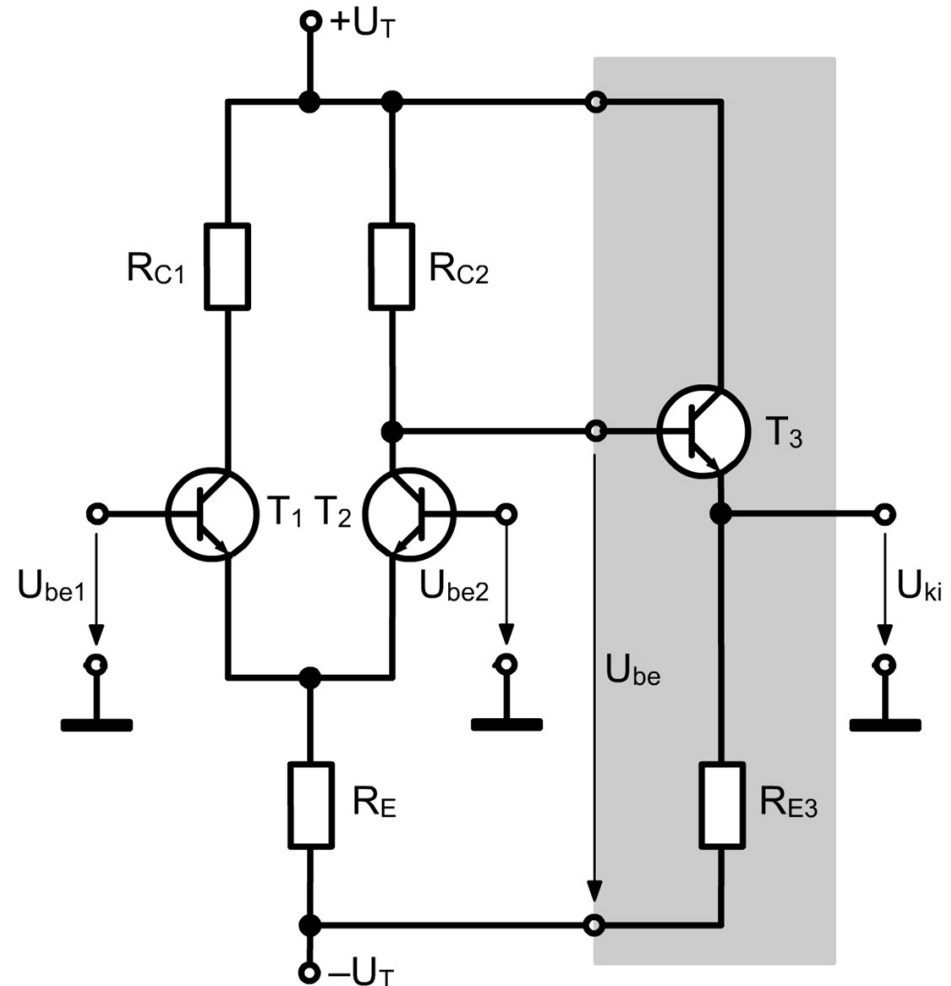




Fázisösszegző áramkör

Az integrált erősítők többfokozatúak és szimmetrikus bemenetűek. Kimeneti fokozatuk azonban többnyire aszimmetrikus (mert a terhelés egyik végpontja többnyire földelt).

Ezért az erősítőn belül a szimmetrikus és aszimmetrikus fokozatot egymáshoz csatolni kell. Ezt a feladatot látja el a fázisösszegző áramkör.



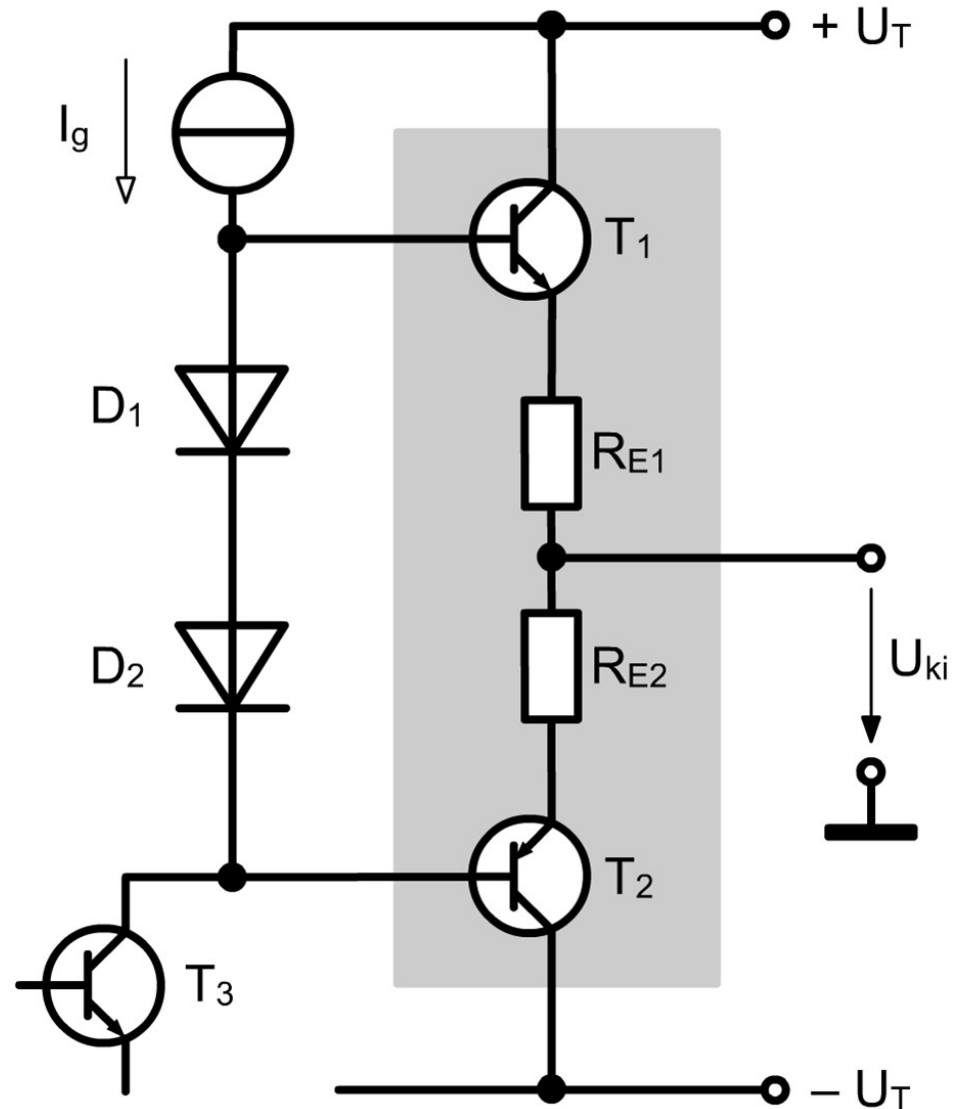


Kimeneti fokozat

Az integrált áramkörök végerősítő fokozatától kis kimeneti ellenállást, nagy kivezérelhetőséget és lehetőleg kis torzítást kívánunk.

Kimeneti fokozataként leggyakrabban komplementer tranzisztoros emitterkövető erősítőt alkalmaznak.

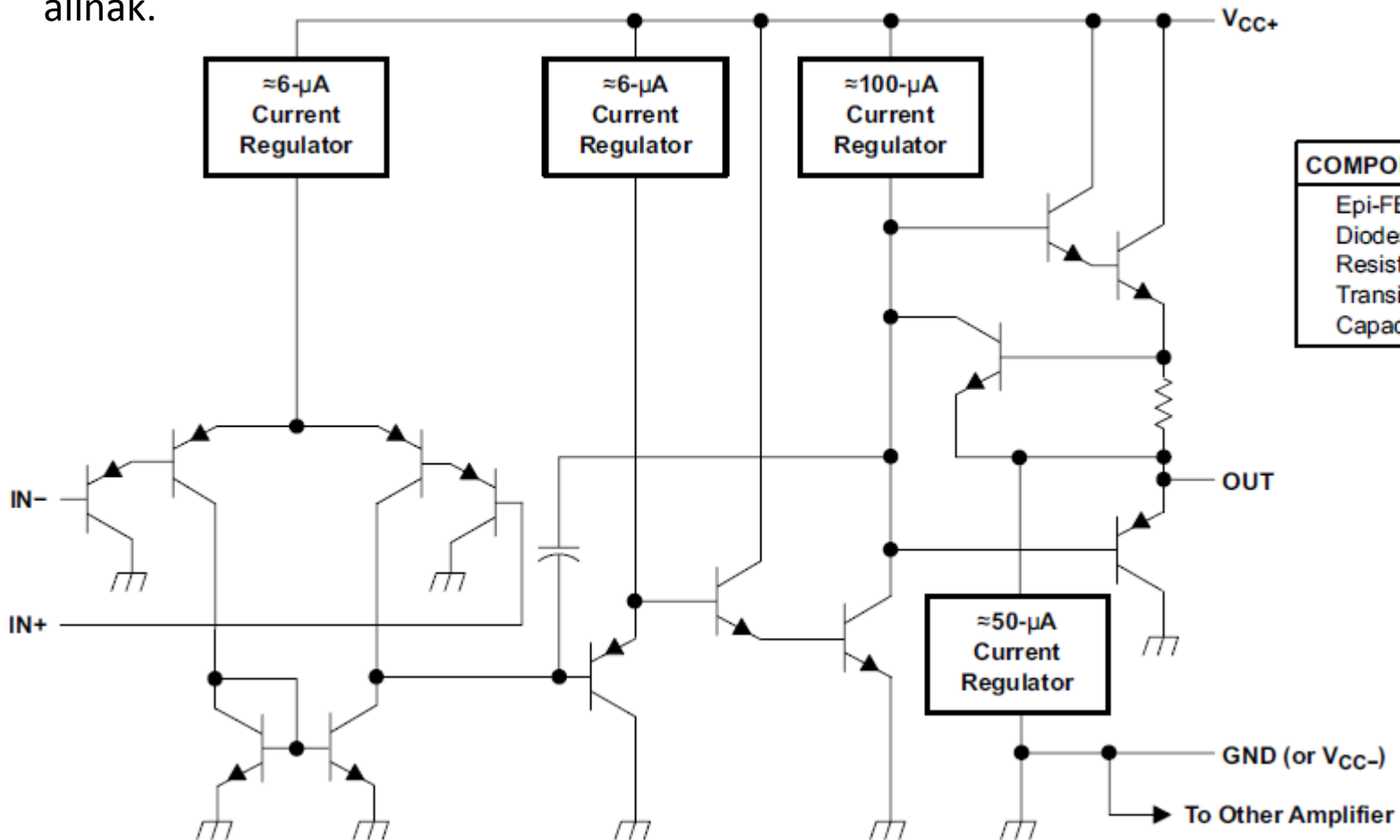
Kettős tápfeszültség alkalmazása esetén, vezérlés nélkül az erősítő kimenetén feszültség nem jelenik meg.





LM2904 vázlatos felépítése

A valóságban a műveleti erősítők egy kicsit bonyolultabbak (ellenállás helyett áramgenerátor vagy áramtükör), a paraméterek javítása érdekében több alkatrészből állnak.



COMPONENT COUNT	
Epi-FET	1
Diodes	2
Resistors	7
Transistors	51
Capacitors	2

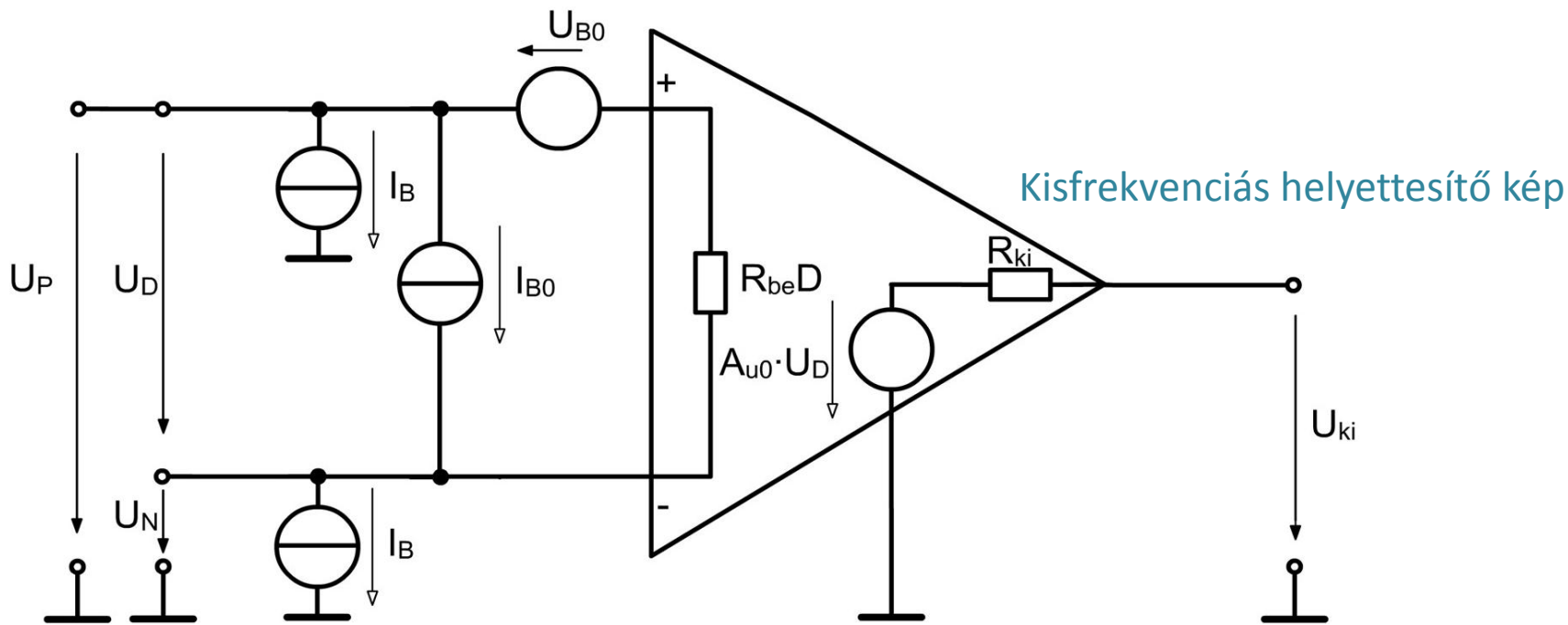


Műveleti erősítők jellemzői

Nyílthurkú erősítés (A_0) – Visszacsatolás nélkül $U_{ki} = A_0 \cdot (U_p - U_n)$. Ideális erősítőnél $A_0 = \infty$, reális esetekben $A_0 \approx 20\,000 - 200\,000$ közötti érték.

Bemenő impedancia, (R_{be}) – Alacsony frekvencián a szimmetrikus bemeneti feszültség és a szimmetrikus bemeneti áram hányadosa. (Ideális esetben végtelen).

Kimeneti impedancia, (R_{ki}) – Az ideális műveleti erősítő kimeneti impedanciája nulla, azaz ideális feszültséggenerátorként viselkedik. A kimeneti impedancia növekvő terhelő áramnál csökkenti a kimeneti feszültséget. Reális esetben $100\ \Omega - 20\ \text{k}\ \Omega$ közötti érték.



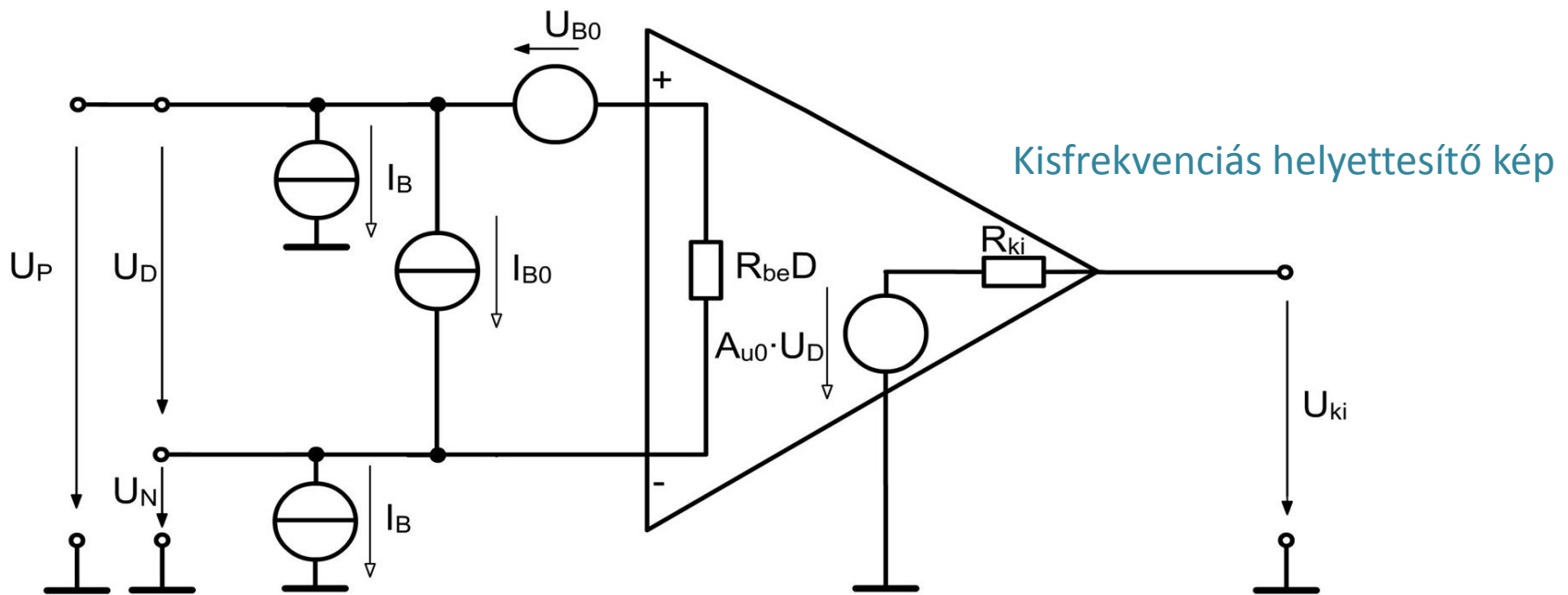


Műveleti erősítők jellemzői

Bemeneti munkaponti áram, (I_B) – A bemeneti differenciálerősítő munkaponti bázisáramainak számtani középértéke.

Bemeneti ofszet áram (I_{B0}) – Az a szimmetrikus bemeneti áram, amely nulla kimeneti feszültség eléréséhez kell.

Bemeneti ofszet feszültség (U_{B0}) – Az a szimmetrikus bemeneti feszültség, amely nulla kimeneti feszültség eléréséhez kell.





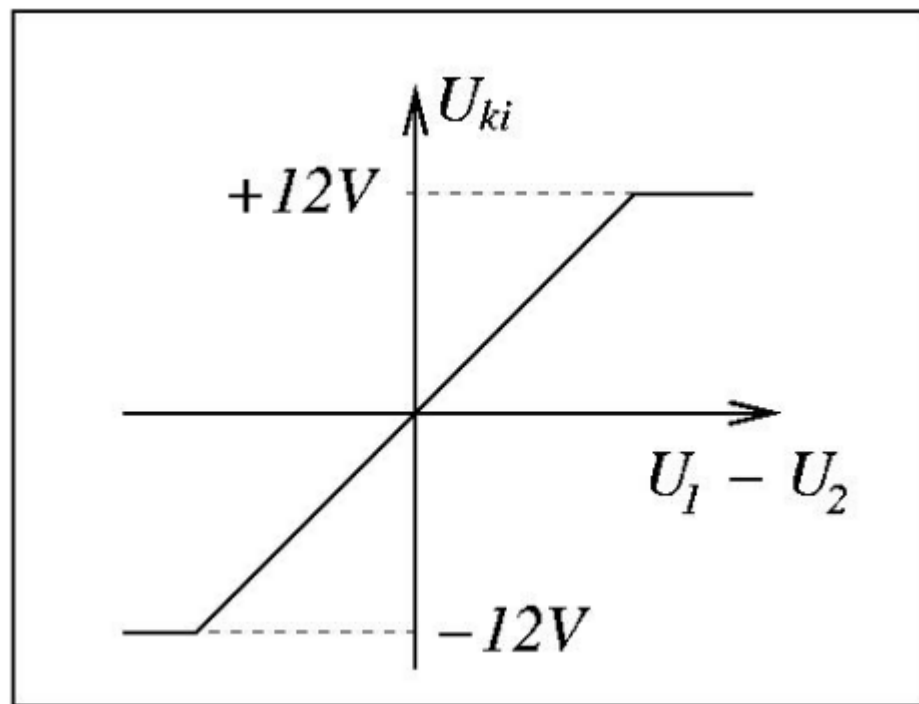
Műveleti erősítők jellemzői

A tápfeszültség tartomány ($\pm U_T$) – a műveleti erősítő szimmetrikus tápfeszültségének maximális és minimális értéke. Egyes esetekben lehet "aszimmetrikus" táplálást is használni (pl. +5 V és 0 V).

Lineáris tartomány – azt a tartományt, ahol az $U_{ki} = A_0 \cdot (U_p - U_n)$ egyenlet érvényesül, „lineáris” működési tartománynak nevezzük. Ezen a tartományon kívül a műveleti erősítő telítésbe megy és a feszültség független lesz a bemeneti feszültségektől.

Megjegyzések:

- Nagy erősítés esetén a bemenetre nézve nagyon kicsi lesz a lineáris működési tartomány. Például $A_0 = 10^6$ esetén mindössze $\pm 12 \mu\text{V}$.
Visszacsatolással természetesen csökkenthető az erősítés és növelhető a lineáris működési tartomány.
- A **rail-to-rail** műveleti erősítők esetében a ki- és bemeneti feszültségek a teljes tápfeszültség tartományában mozoghatnak, de a telítés közelében ($\sim 100 \text{ mV}$ -ra a tápfeszültségtől) a karakterisztika elgörbül...

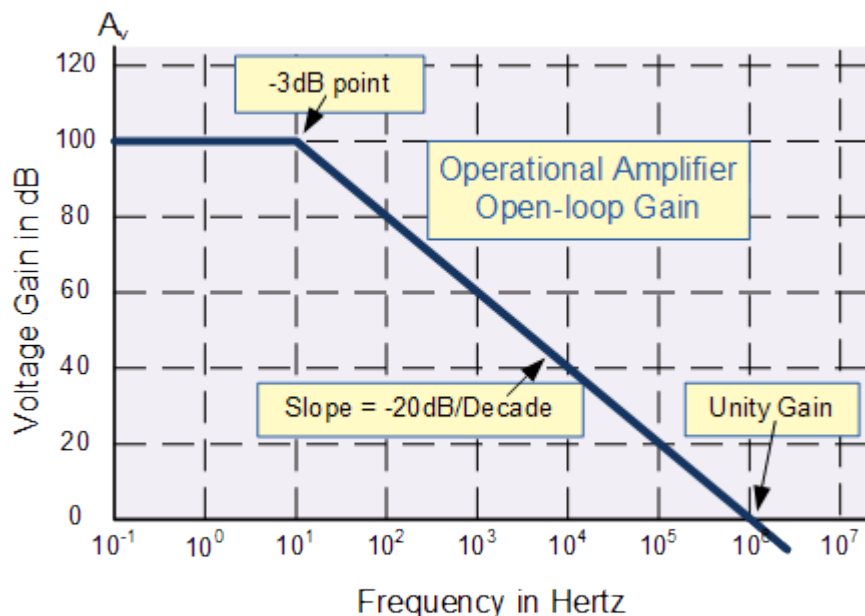


A műveleti erősítő egyenáramú karakterisztikája



Erősítés és sáv szélesség

A reális műveleti erősítők frekvenciamenetéből látható, hogy az erősítés és a sáv szélesség szorzata állandó: $GBP = \text{erősítés} \times \text{sáv szélesség} = A \times BW$. Az ábrán például $GBP = 10^6$.



A decibel (dB) egy viszonyszám.
Az A feszültségerősítés $A = U_{KI} / U_{BE}$,
decibelben kifejezve: $20 \cdot \lg \left(\frac{U_{KI}}{U_{BE}} \right)$

Például $A = 10^5$ erősítés = 100 dB

Például a fenti ábra szerint 100kHz-es (10^5 Hz) sáv szélességhez 20dB vagyis 10-szeres erősítés tartozik: $GBP = 10 \times 100\,000\text{Hz} = 1\,000\,000$.

Hasonló módon leolvashatjuk, hogy 1 kHz-es sáv szélességhez 60 dB vagyis 1000-szeres erősítés tartozik: $GBP = 1\,000 \times 1\,000 = 1\,000\,000$.

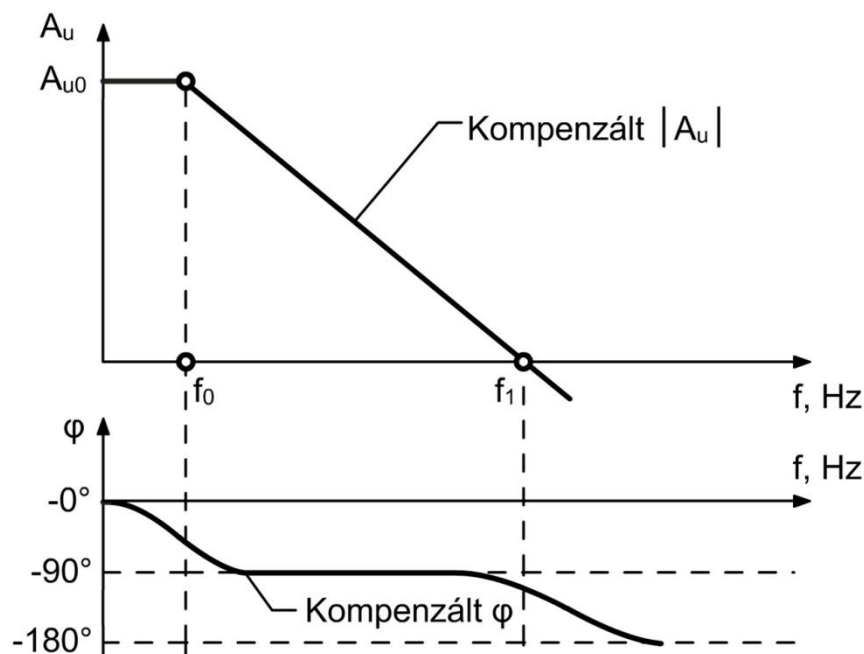
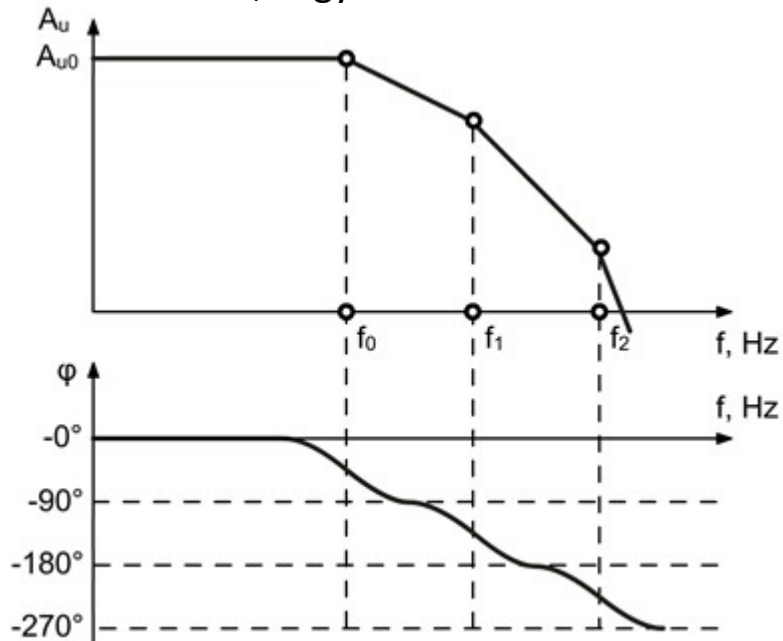


A műveleti erősítők frekvenciakompenzálása

A valóságos műveleti erősítők **nyílthurkú erősítése** és **fázistolása** frekvenciafüggő: az áramkörben szereplő ellenállások és a parazita kapacitások magasabb fokú aluláteresztő szűrőt képeznek, és a frekvenciamenetben töréspontokat hoznak létre.

f_0 frekvencia fölött a legnagyobb RC időállandó dominál, az erősítés 20 dB/dekáddal esik, a fázistolás 90°

f_1 frekvencia fölött egy másik RC időállandó is érezteti hatását, az erősítés 40 dB/dekáddal esik, a fázistolás 180° . A bemenetek szerepe felcserélődik, a negatív visszacsatolás pozitívba fordul, az erősítő begerjed. **A frekvenciakompenzálás célja** az, hogy egy mesterségesen létrehozott alacsonyfrekvenciájú törésponttal a további töréspontok megjelenését és így a gerjedést megakadályozzuk. A kompenzálás történhet belső, vagy külső elemekkel.



Kompenzálatlan és kompenzált erősítő amplitúdó és fázismenet ábrája



LM2904: kettős műveleti erősítő

LM2904

Két műveleti erősítő egy 8 lábú tokban

Aszimmetrikus táplálás: 3 V – 26 V

Szimmetrikus táplálás: $\pm 1,5$ V – ± 13 V

Bemeneti ofszet feszültség: tipikusan 2 mV

Bemeneti ofszet áram: tipikusan 2 nA

Bemeneti munkaponti áram: tip. 20 nA

Rail-to rail bemenet, max. tip. 22-23 V kimenet

Egységnyi erősítés határfrekvenciája: 0,7 MHz

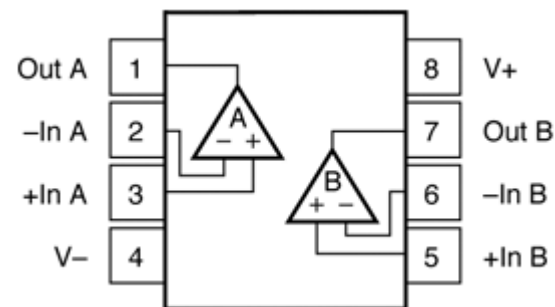
Nyílthurkú erősítés: 25 000 – 100 000

CMRR: 50 – 80 dB (316 – 10 000-szeres)

Kimeneti áram: -20 mA – -30 mA (source)

10 mA – 20 mA (sink)

Üresjárású áramfelvétel: 0,7 mA – 1.2 mA

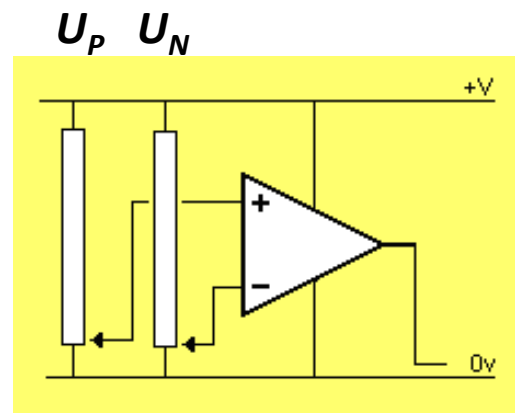




Komparátor

A visszacsatolatlan erősítő komparátorként is használható:

1. A kimenet akkor magas, ha a neminvertáló bemenet U_p feszültsége meghaladja az invertáló bemenet U_N feszültségét.
2. Kis (mV nagyságrendű) különbség elegendő az átbillenéshez a nagy erősítés miatt.
3. Hiszterézis biztosításához pozitív visszacsatolást kell alkalmazni.

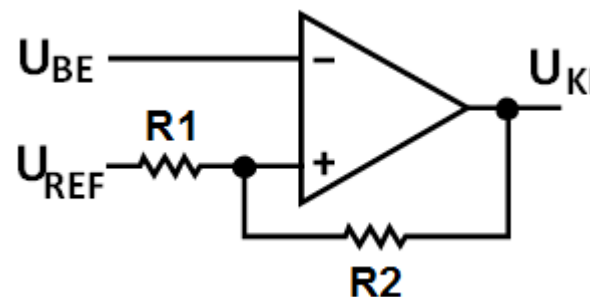


Komparátor hiszterézissel

A hiszterézis mértéke: $U_{hist} = U_S \cdot R1 / (R1 + R2)$
ahol U_S a kimenet „lengése” (swing). A képlet akkor érvényes, ha U_{REF} forrásának belső ellenállása jóval kisebb, mint $R1$.

Az alsó és felső határ nem szimmetrikus U_{REF} körül:

$$U_H = \frac{R2 \cdot U_{REF} + R1 \cdot U_+}{R1 + R2} \quad \text{és} \quad U_L = \frac{R2 \cdot U_{REF} + R1 \cdot U_-}{R1 + R2}$$



ahol U_H és U_L a felső és alsó billenési szint, U_+ és U_- pedig a maximális és minimális kimenőjel.

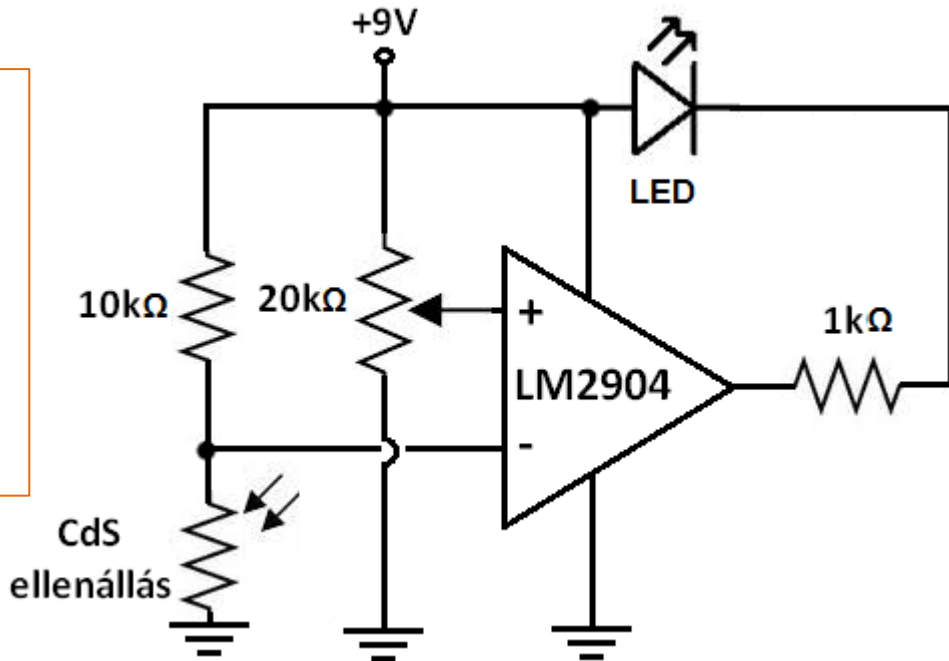


Sötétedésjelző áramkör

Hiszterézis nélküli komparátor módban használjuk az **LM2904** műveleti erősítőt. A táplálás itt aszimmetrikus, s kihasználtuk, hogy 5 V-nál magasabb tápfeszültséget is használhatunk.

- ❖ Megvilágított állapotban a *CdS* ellenállás értéke 1-2 k Ω , így a referencia középállásában $U_N < U_P$, a kimenet magas állapotban van, a LED nem világít.
- ❖ Sötétedéskor a *CdS* ellenállás értéke 10-200 k Ω , így a referencia középállásában $U_N > U_P$, a kimenet alacsony állapotban van, a LED világít.

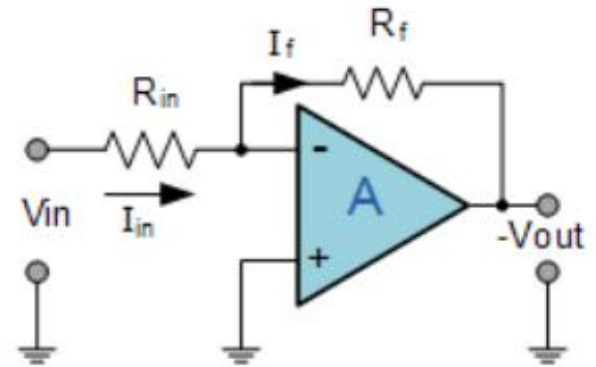
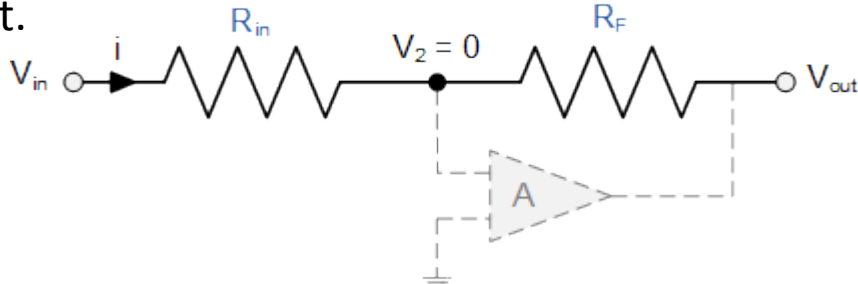
Megjegyzés: Ennél az IC-nél talán előnyösebb a bemenetek felcserélésével megfordítani a logikát, ekkor a LED-et a föld felé lehet kötni (lehúzás helyett felhúzás), amikor az IC nagyobb kimenő áramot tud nyújtani.





Invertáló erősítő

Az erősítő kapcsolások lényeges eleme, hogy külső elemekkel állítjuk be az erősítést. **Negatív visszacsatolás** = a visszacsatolt jel ellentétes fázisú a bejövő jelhez képest.

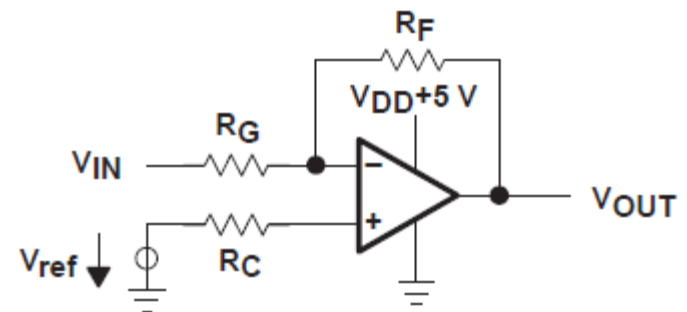


$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

- ❖ Ideális erősítő esetén nincs munkaponti áram $I_B = 0$, $I_f = -I_{in}$
- ❖ A visszacsatolás miatt $U_p = U_n$, az invertáló bemenet „virtuális földpont”. $\frac{V_{in}}{R_{in}} = -\frac{V_{out}}{R_f}$

A zárthurkú erősítés: $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_{in}}$

Aszimmetrikus táplálásnál az invertáló erősítő esetében a neminvertáló bemenetet nullától különböző értékre (pl. fél tápfeszültség) kell kötni!



$$V_{OUT} = -\frac{R_F}{R_G} V_{IN} + \frac{R_F}{R_G} V_{ref} + V_{ref}$$



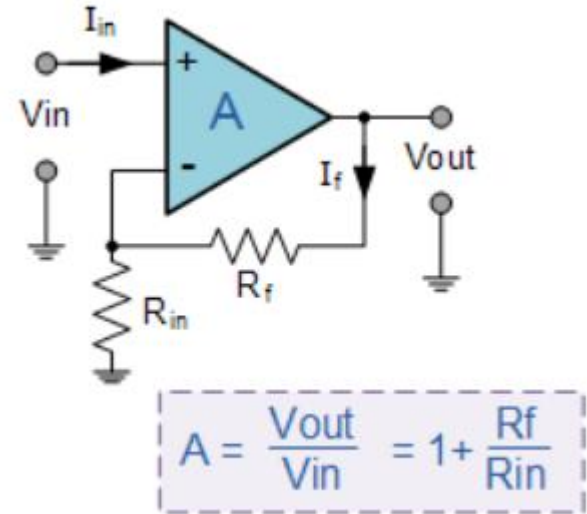
Neminvertáló erősítő

A neminvertáló erősítő esetében a kimenőjel adott arányú hányadát visszacsatoljuk az invertáló bemenetre:

$$V_N = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_f} \cdot V_{out}$$

Ideális erősítőt feltételezve $V_N = V_{in}$ lesz, így az erősítés könnyen kifejezhető:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_{in} + R_f}{R_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$



Ez a kapcsolás változtatás nélkül használható aszimmetrikus táplálás esetén is!



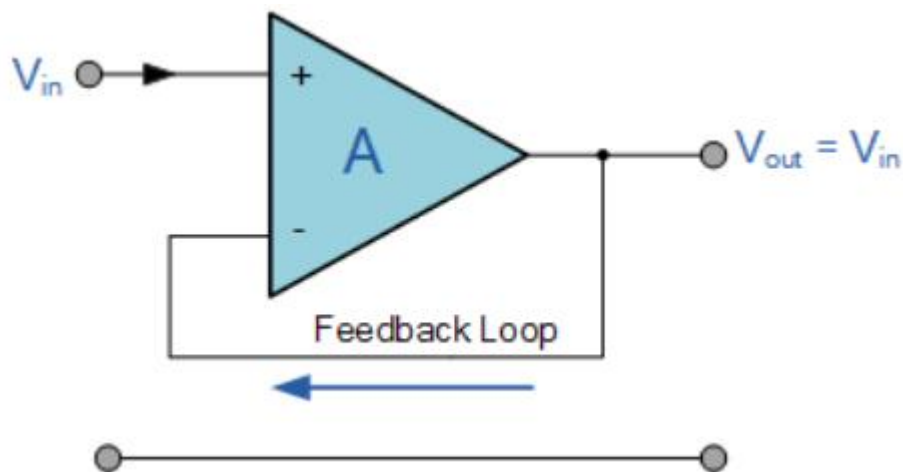
Feszültségkövető

A neminvertáló erősítők speciális esete a feszültségkövető kapcsolás, melynek erősítése

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

A kapcsolás jellemzője, hogy a bemeneti ellenállás nagy, a kimeneti ellenállás kicsi, így elterjedten használják olyan helyeken, ahol a cél az impedancia illesztés (bufferelés).

Ehhez hasonló kapcsolást a digitális áramköröknél is használnak, kábelmeghajtó vagy buszmeghajtó áramköröknél!

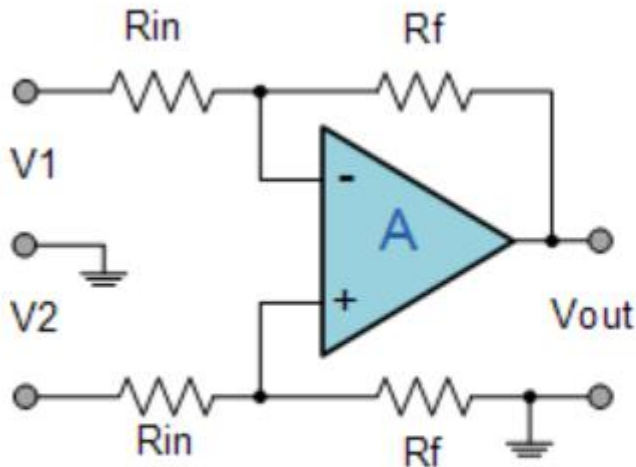




Különbségképző és összegző áramkör

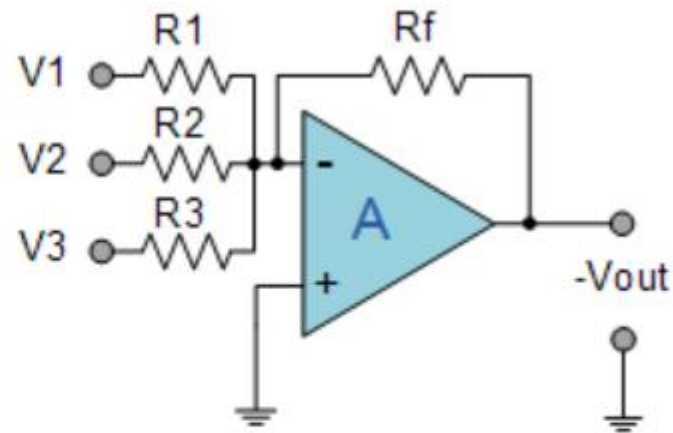
- ❑ A különbségképző és összegző áramkör fontos szerepet tölt be a szabályozástechnikában, de ez az alapja az egyszerű offsetkiegyenlítésnek is.
- ❑ Az összegző kapcsolás bemeneteinek bináris súlyozásával digitálisan vezérelhető kimenetet (Digital-Analog Converter, DAC) is kialakíthatunk.
- ❑ A különbségképző bemeneteinek bufferelésével a mérőerősítőhöz (Instrumentation Amplifier) jutunk el.

Differential Op-amp



$$V_{out} = \frac{R_f}{R_{in}} (V_2 - V_1)$$

Summing Op-amp

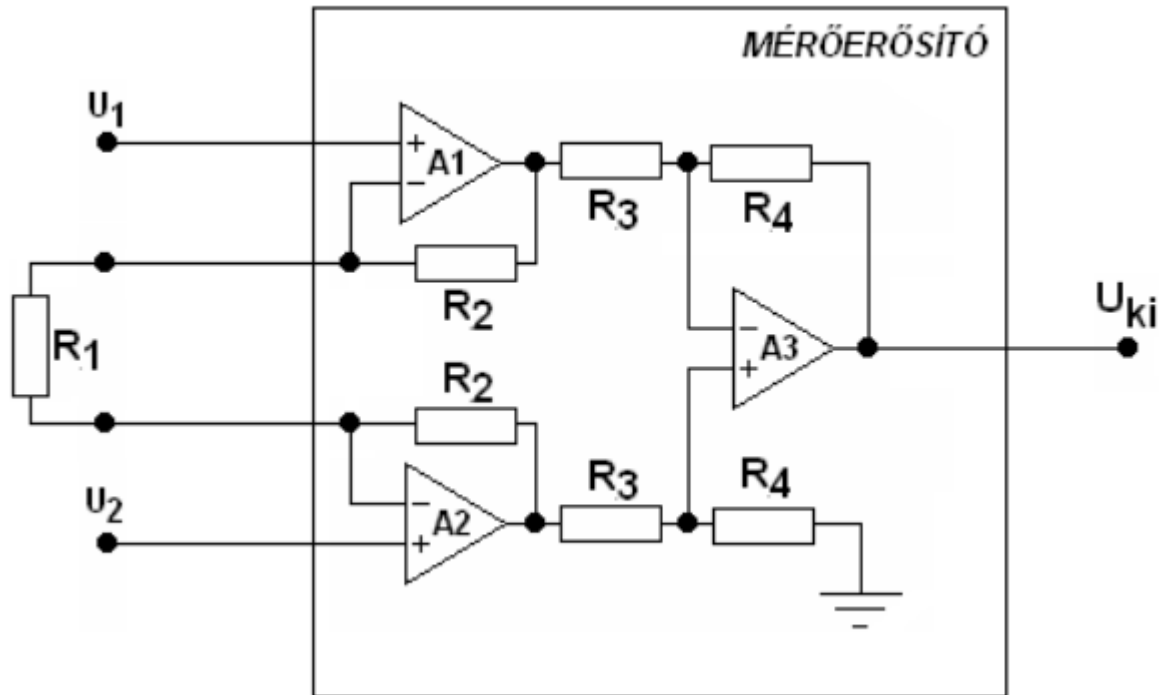


$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3\right)$$



Mérőerősítők

A mérőerősítők nagy bemeneti impedanciájú, szimmetrikus bemenetű, változtatható erősítésű egységek, melyek szimmetrikus, kis értékű (általában egyen-) feszültségek erősítésére alkalmasak úgy, hogy a szimmetrikus jelet erősítve, a közös módusú jelet nagy mértékben elnyomják. Három műveleti erősítőből is megépíthető, de gyártják egy tokban, lézertrimmelésű ellenállásokkal (pl. INA128, INA129).



$$\text{Az erősítés: } A_V = \frac{U_{ki}}{U_2 - U_1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_4}{R_3}$$



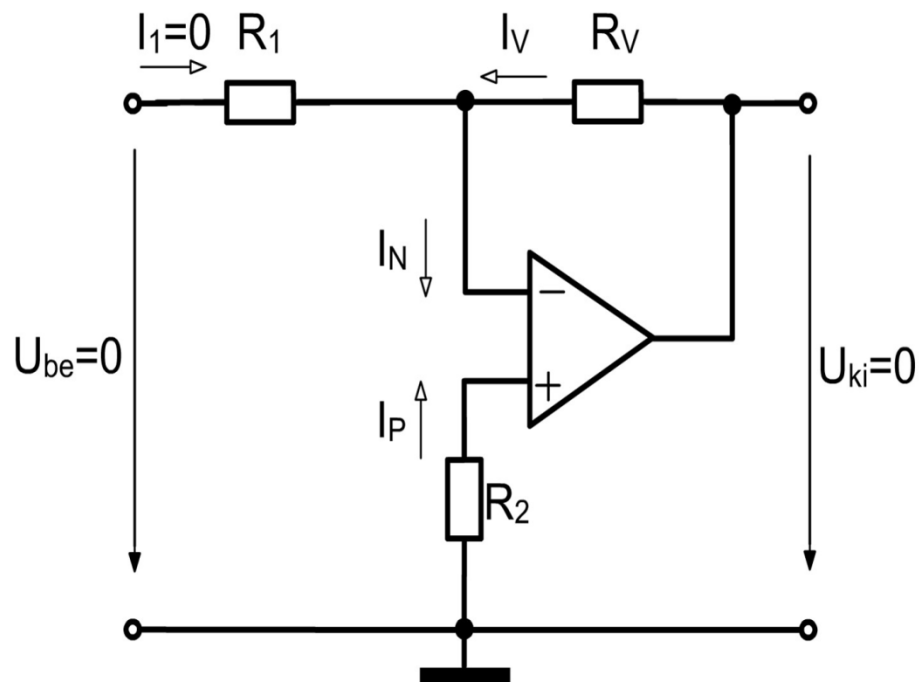
Munkapont beállítása

A **nem ideális műveleti erősítők** megfelelő működéséhez gondoskodni kell a munkapont beállításáról és az ofszet feszültség, illetve áram kiegyenlítéséről.

Ha az ábrán látható kapcsolásban R_2 nem szerepelne, a kimeneten az I_N bemeneti nyugalmi áram miatt nulla bemenő feszültség mellett $U_{KI} = I_N \cdot R_V$ hibafeszültséget mérnénk. A hibafeszültség megszüntetéséhez a neminvertáló bemenet potenciálját meg kell emelni.

A bemeneti nyugalmi áram a nem invertáló bemenetre a közös pont felől, az invertáló bemenetre a kimenet felől folyik.

Ahhoz, hogy a kimeneti feszültség nulla értékű legyen, teljesülni kell az $R_2 = R_1 \times R_V$ feltételnek.

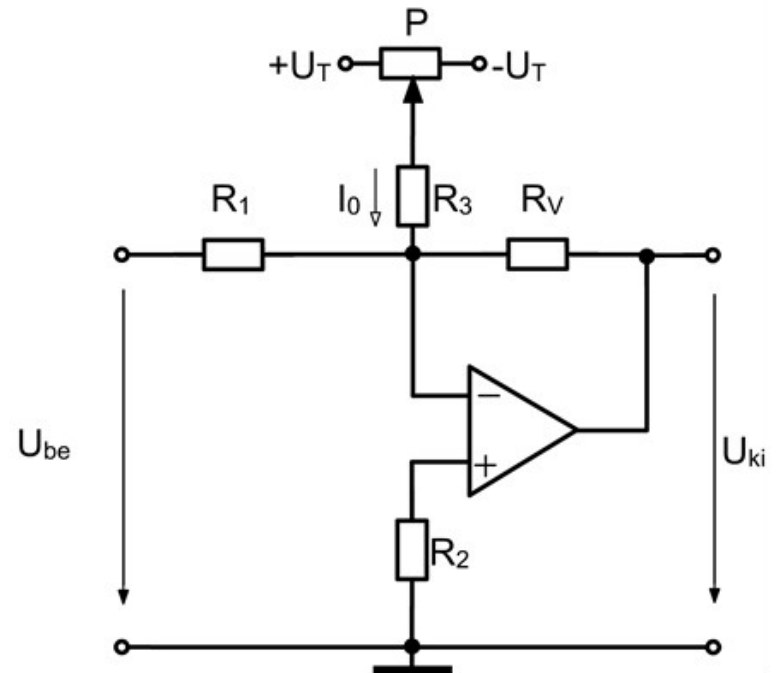
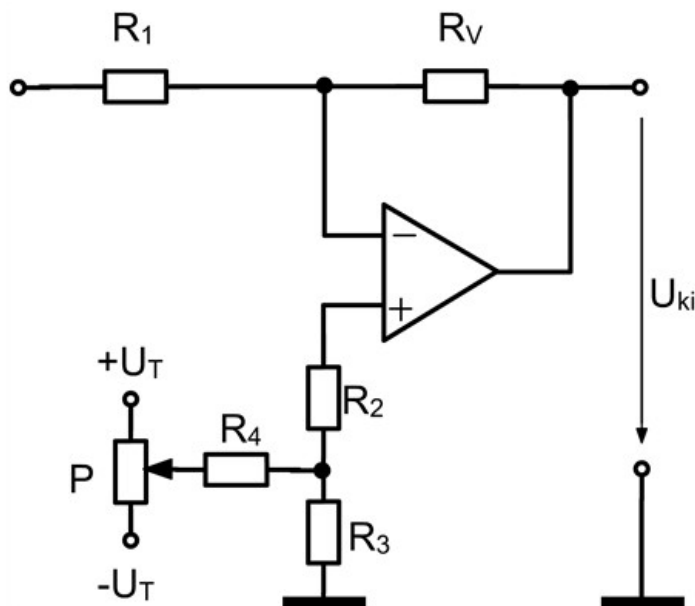




Ofszetkiegyenlítés

Az ofszetfeszültség kiegyenlítése (baloldali ábra) akkor hatásos, ha a két bemenet árama azonos.

Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor **áramkompenzálást** kell végrehajtani (jobboldali ábra). A potenciométer állításával az egyik bemenet nyugalmi áramát növeli, a másikat csökkenti.



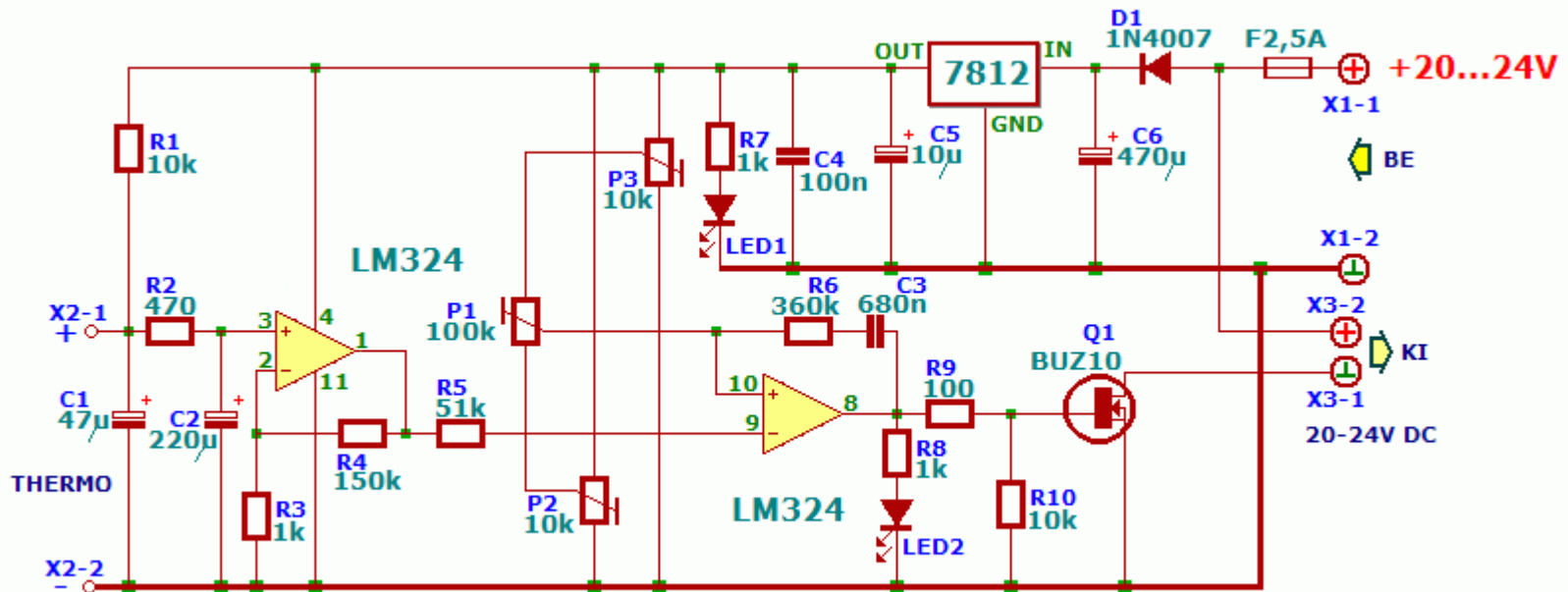


Forrasztópáka fűtésszabályozás

Egy gyakorlati példa: hőelemes forrasztópáka fűtésszabályozója

Az első fokozat a hőelem jelét erősíti fel (kb. 150 –szeres neminvertáló erősítés). A második műveleti erősítő analóg komparátorként működik (a fűtés be- és kikapcsolását vezérli), a hőelem jelét hasonlítja össze a P1-gyel beállított referencia feszültséggel. P2 és P3 a referencia feszültség alsó és felső határát állítja be. A C3 R6 pozitív visszacsatolás az átbillentés gyorsítására szolgál.

Megjegyzés: Q1 rajzjele pontatlan, a BUZ10 növekményes módusú N-csatornás FET.



<http://bsselektronika.hu>