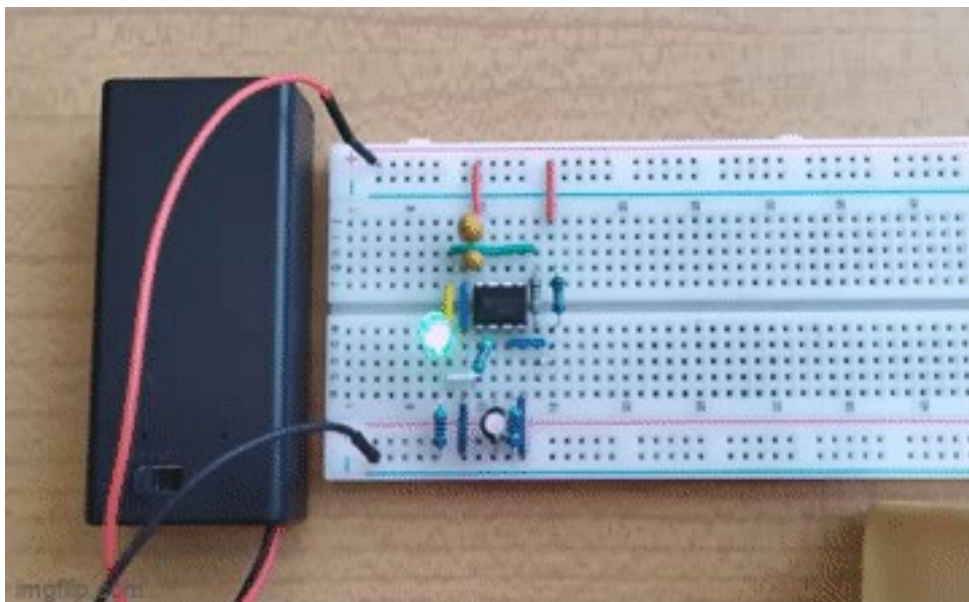


Bevezetés az elektronikába



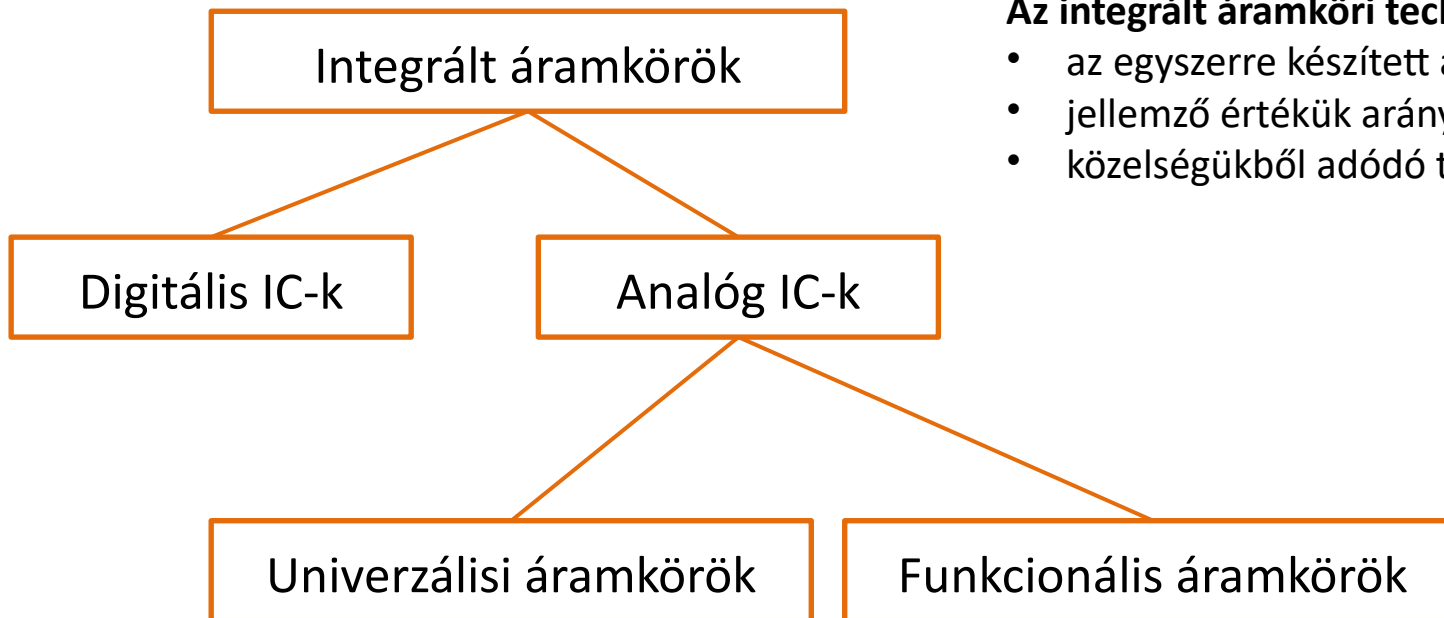
14. Műveleti erősítők – 1. rész

Felhasznált és ajánlott irodalom

- ❑ Sulinet Tudásbázis: [A műveleti erősítők alapjai, felépítése, alkapcsolások](#)
- ❑ Borbély Gábor: [Elektronika II](#)
- ❑ Berta Miklós: [Műveleti erősítők alkapcsolásai, A Miller effektus](#)
- ❑ Mike Gábor: [Mérőerősítők](#)
- ❑ Electronics Tutorials: [Operational Amplifier Basics](#)
- ❑ Talking Electronics: [The OP-AMP](#)
- ❑ Texas Instruments: [Analog Engineer's Circuit Cookbook: Amplifiers](#)
- ❑ Texas Instruments: [Op Amps for Everyone](#)
- ❑ Paul Falstad: [Circuit Simulator Applet](#)
- ❑ 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



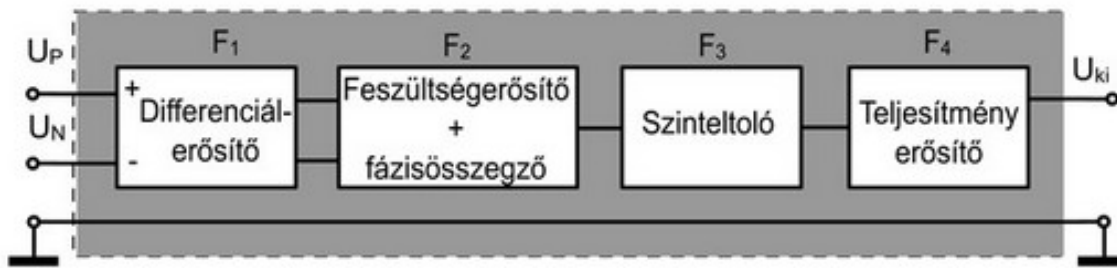
Az integrált áramköri technológia előnyeirez tartozik:

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

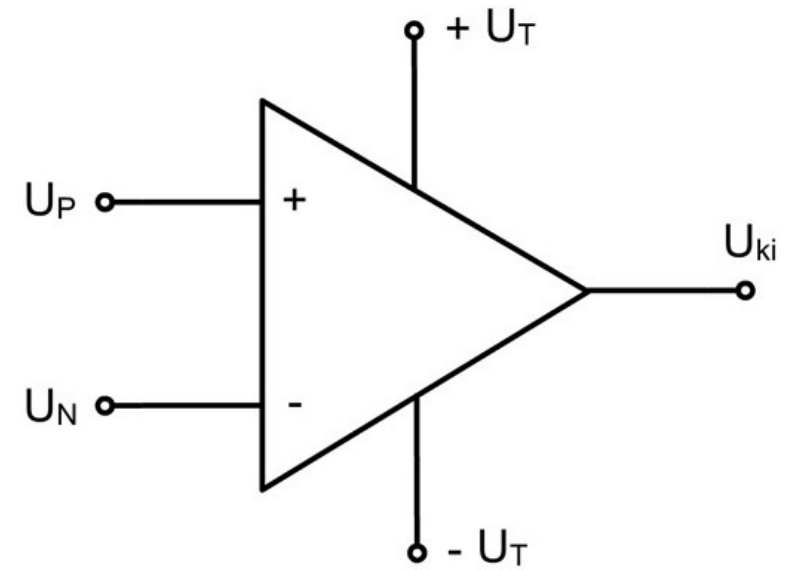
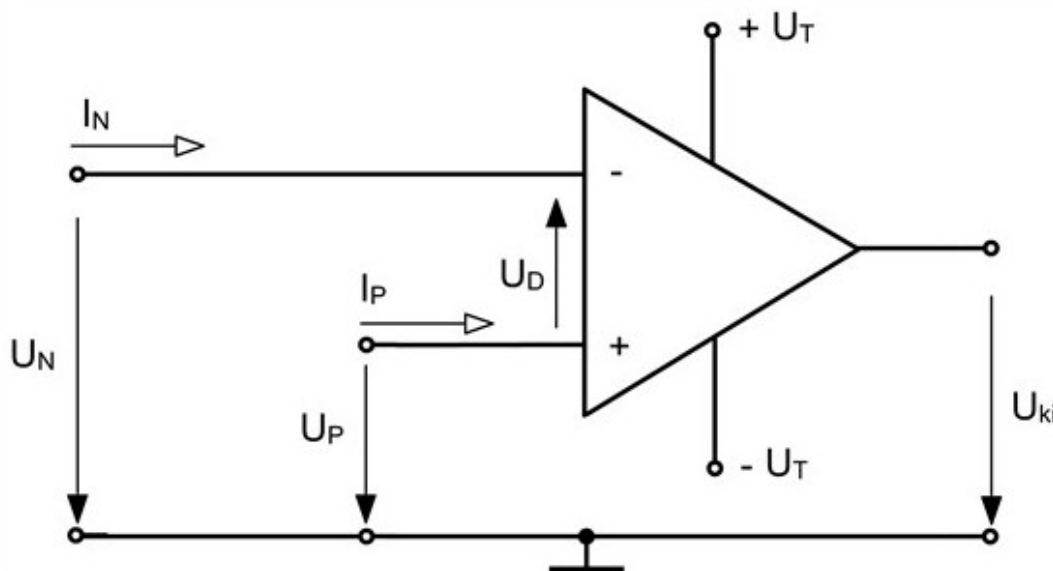
Az univerzális áramkörök közül kiemelkedő jelentősége van az **integrált műveleti erősítőknek**, amelyek a mérés- és irányítástechnika, híradástechnikai rendszerek univerzális elemeként tekinthetők.

A műveleti erősítők felépítése

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

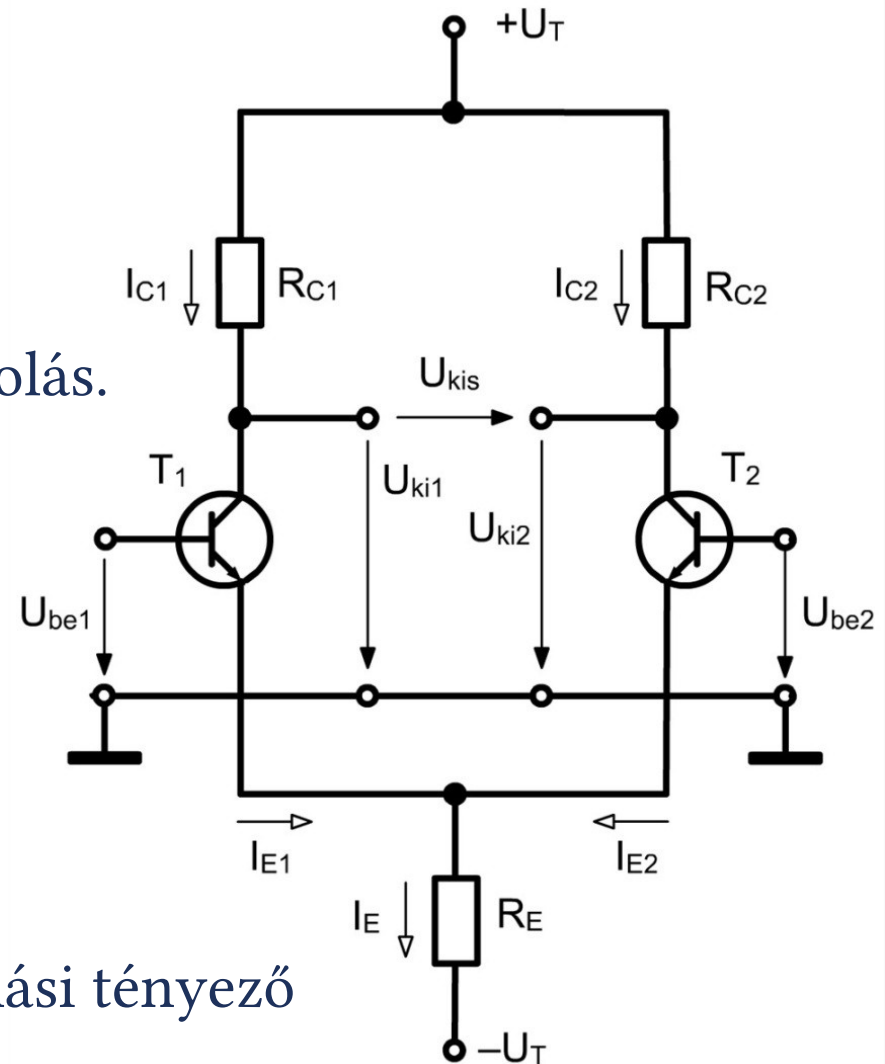
A feszültségek vonatkoztatási pontja a tápegység közös pontja (GND)

A differenciálerősítő

- 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:

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

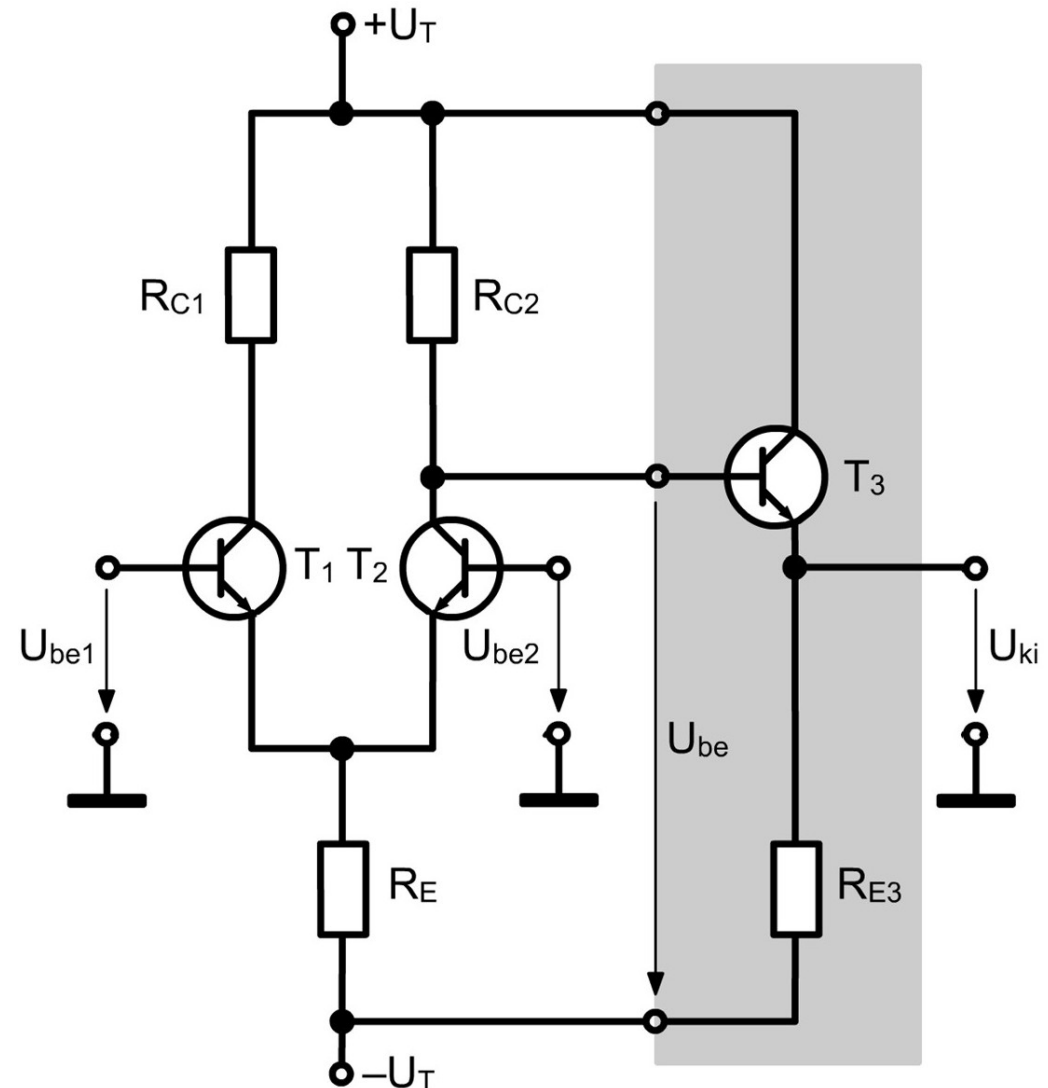
- A reális erősítőknél $A_{UK} \approx 10^{-3}$, míg a szimmetrikus jel erősítése $A_{US} \approx 10^2$ nagyságrendű
- A kettő aránya a közös módusú elnyomási tényező



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.

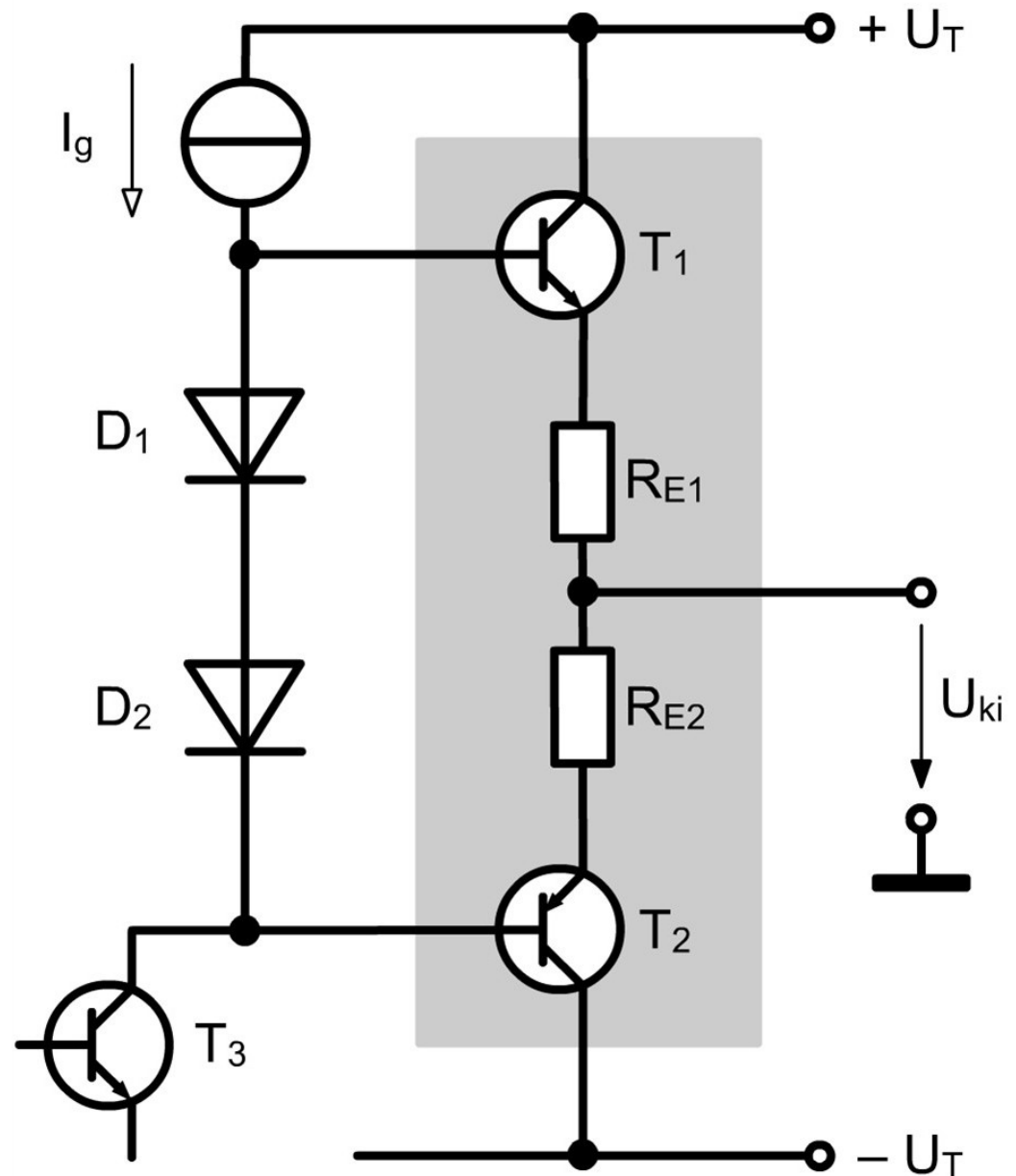


Kimeneti fokozat

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

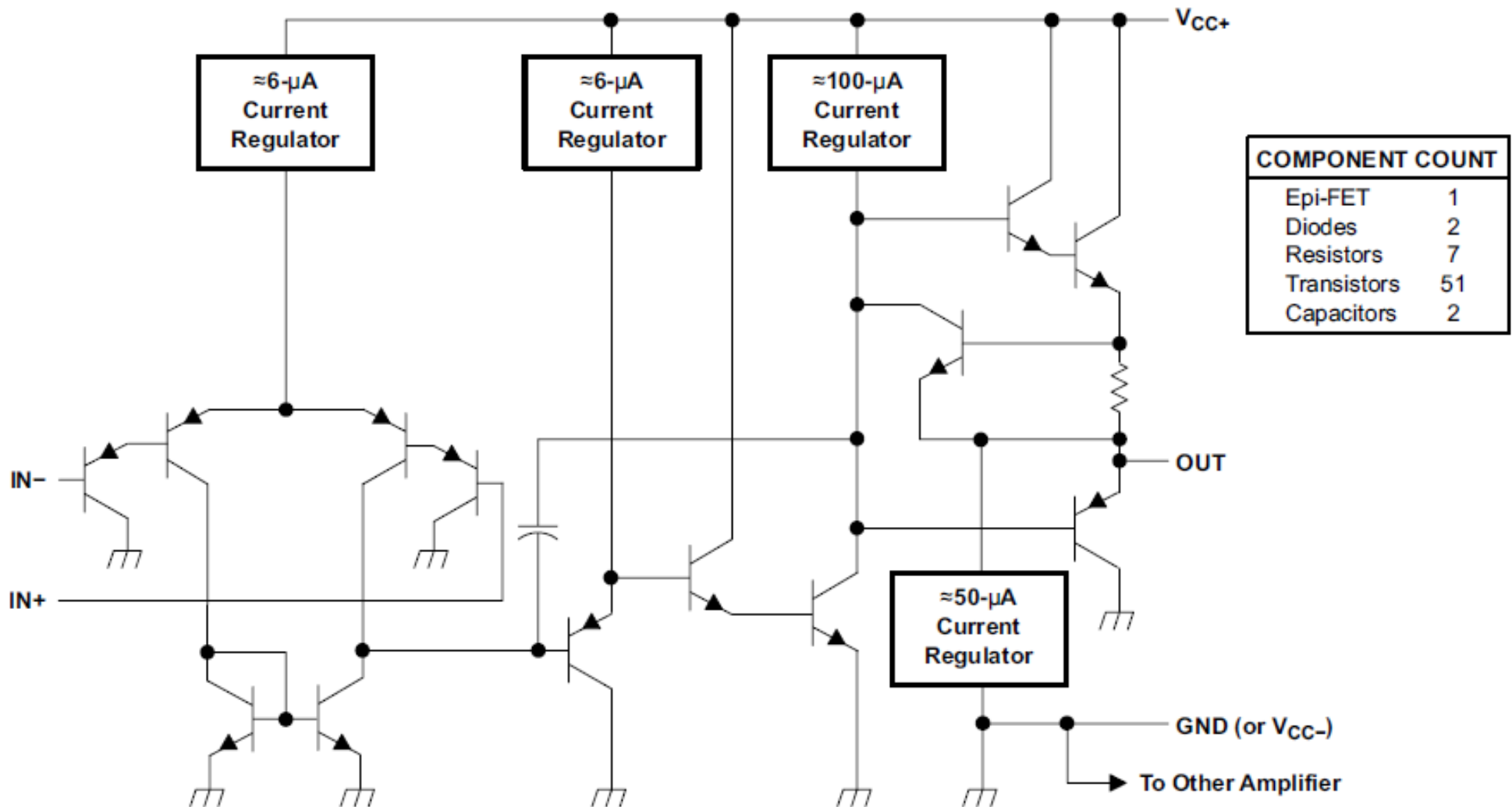
Kimeneti fokozataként leggyakrabban komplementer tranzisztoros emitterkövető erősítőt alkalmaznak.

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



Az LM2904 vázlatos felépítése

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

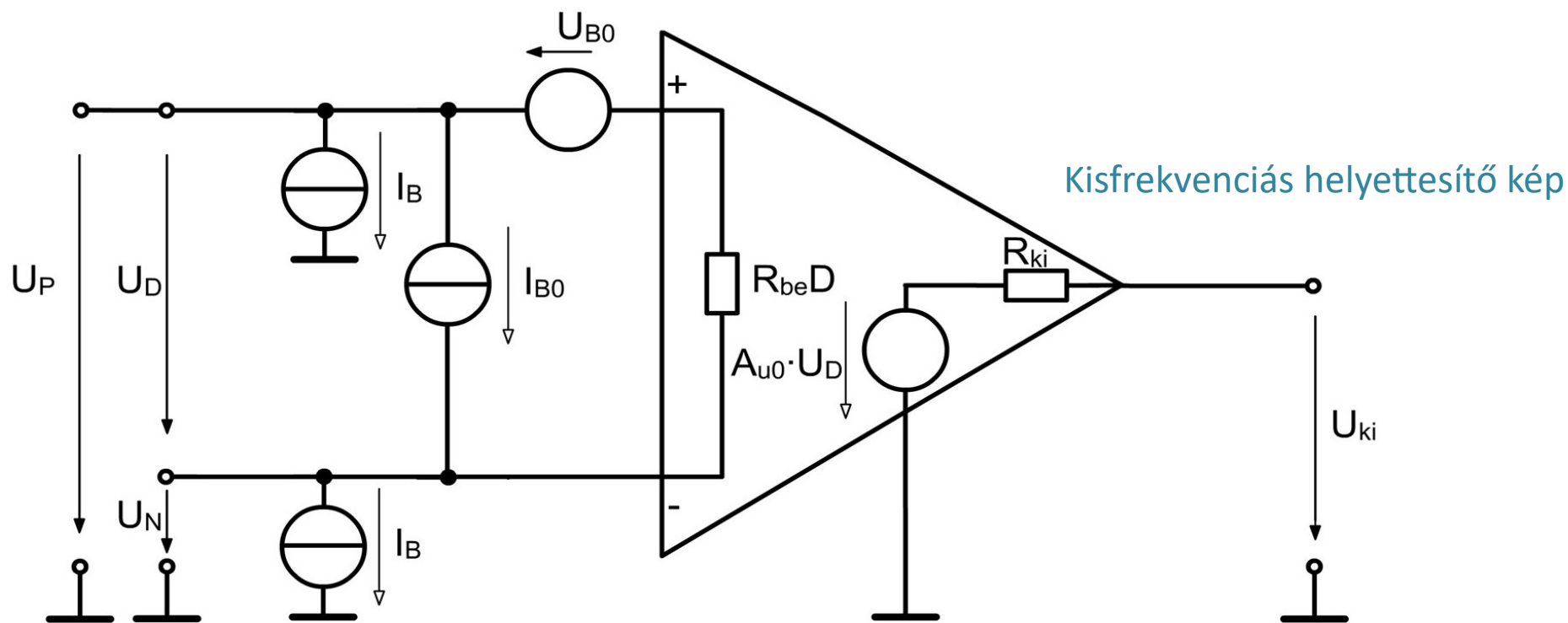


Műveleti erősítők jellemzői

Nyílthurkú erősítés (A_0) – Visszacsatolás nélküli erősítés. 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.

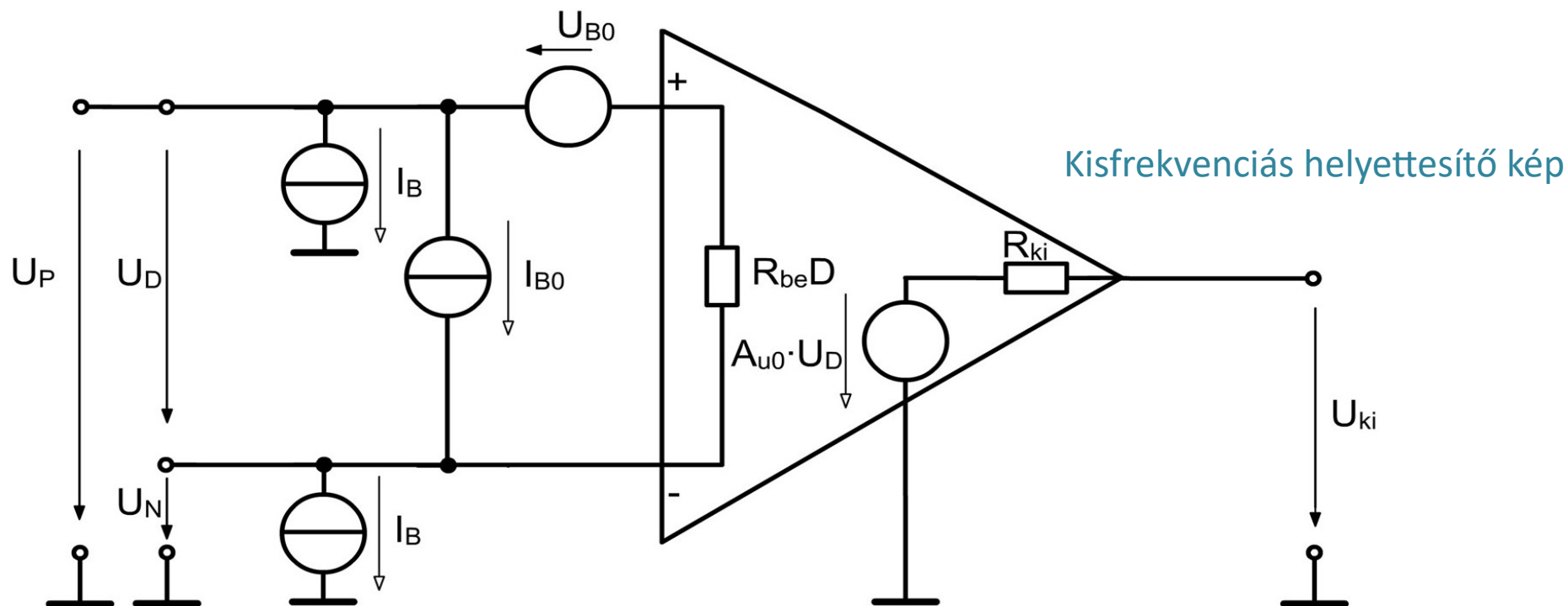


Műveleti erősítők jellemzői

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.



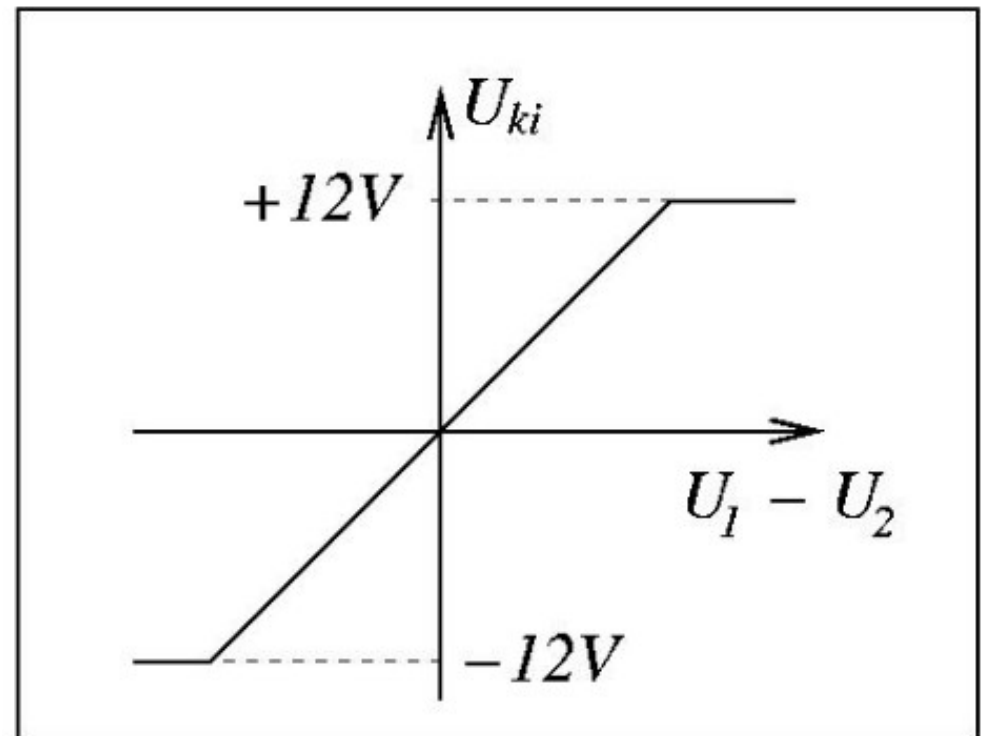
Műveleti erősítők jellemzői

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 egyenlet érvényesül, „lineáris” működési tartománynak nevezzük. Ezen a tartományon kívül a műveleti erősítő telítésbe megy és a feszültség független lesz a bemeneti feszültségektől.

Megjegyzések:

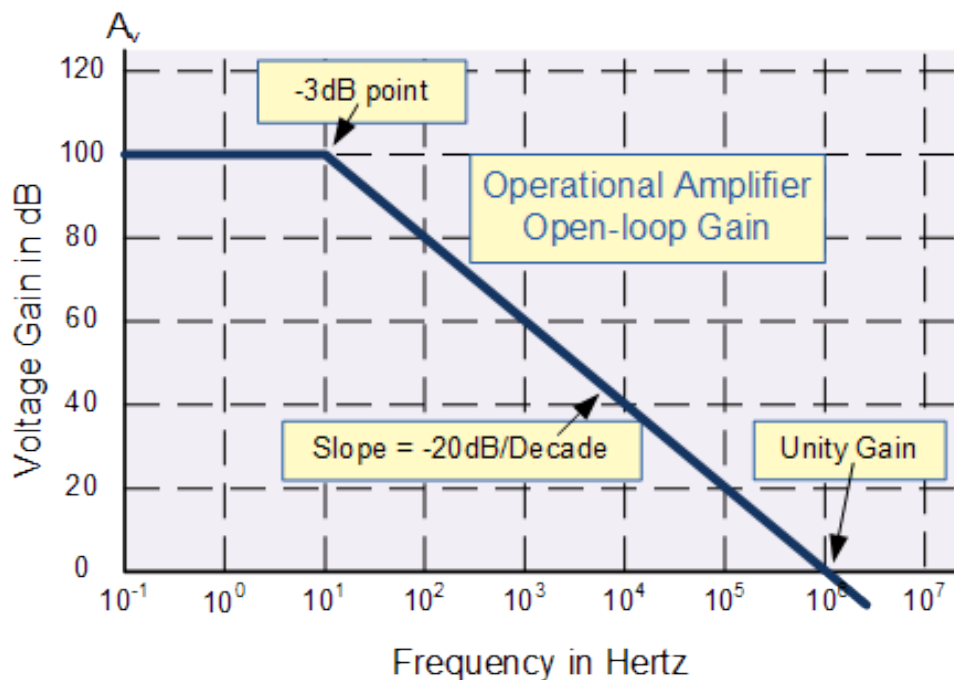
- Nagy erősítésnél a bemenetre nézve nagyon kicsi lesz a lineáris működési tartomány. Például $A_o = 10^6$ esetén mindössze $\pm 12 \mu\text{V}$. Visszacsatolással csökkenthető az erősítés és növelhető a lineáris működési tartomány.
- A **rail-to-rail** műveleti erősítők esetében a ki- és bemeneti feszültségek 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 sávszélesség

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



A decibel (dB) egy viszonyszám.
Az A feszültségerősítés $A = U_{KI} / U_{BE}$,
decibelben kifejezve:

Például $A = 10^5$ erősítés = 100 dB

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

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

LM2904 - két műveleti erősítő egy tokban

LM2904

Két műveleti erősítő egy 8 lábú tokban

Aszimmetrikus táplálás: 3 V – 26 V

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

Bemeneti offset feszültség: tipikusan 2 mV

Bemeneti offset 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

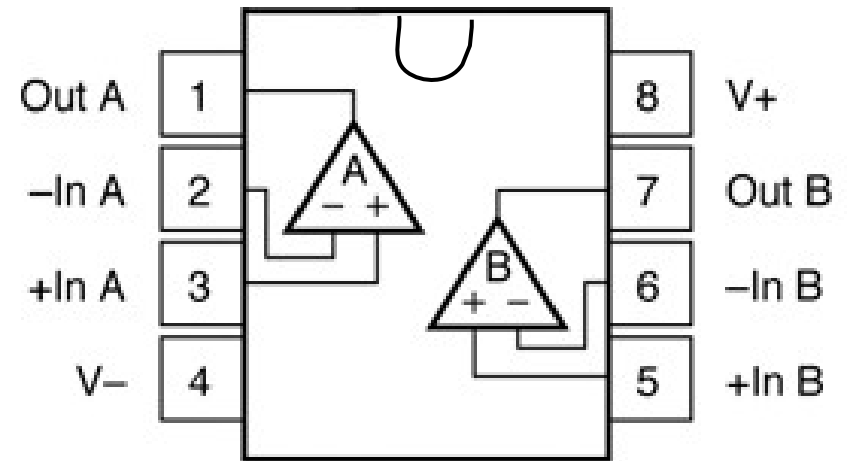
Nyílthurkú erősítés: 25 000 – 100 000

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

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

10 mA – 20 mA (sink)

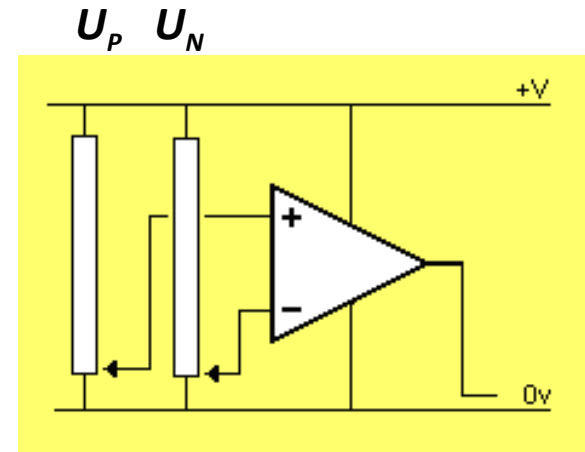
Üresjárású áramfelvétel: 0,7 mA – 1.2 mA



Feszültség 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.

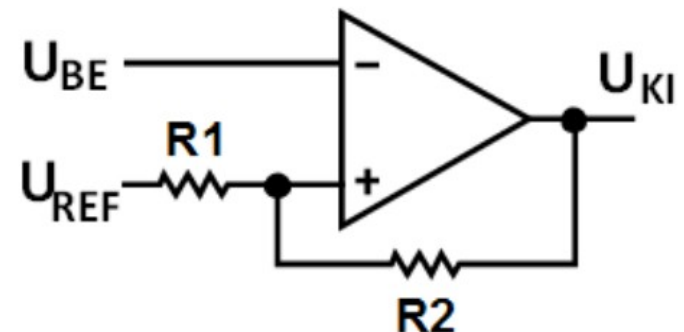


Komparátor hiszterézissel

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:

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



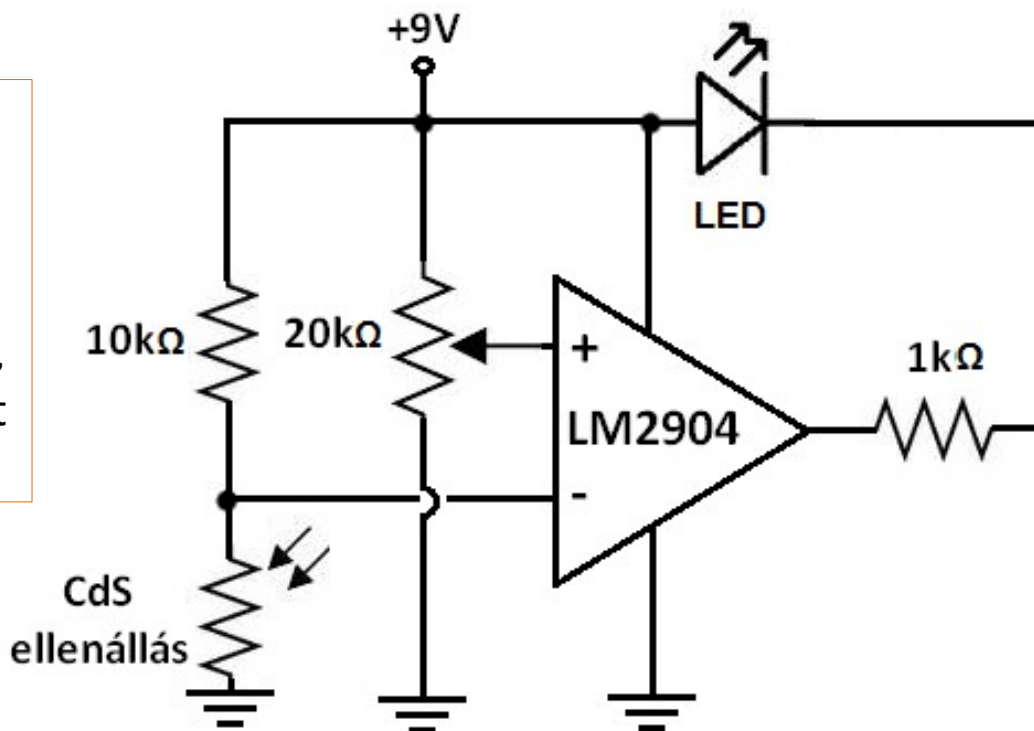
ahol U_H és U_L a felső és alsó billenési szint, U_+ és U_- pedig a maximális és minimális kimenőjel.

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.

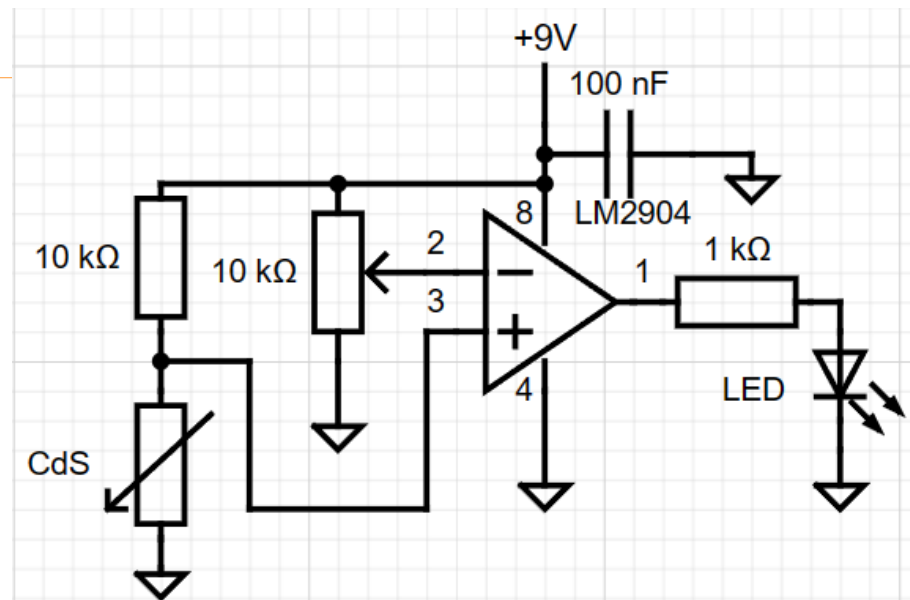
- ❖ Megvilágított állapotban a *CdS* ellenállás értéke 1-2 k Ω , így a referencia középállásában $U_N < U_P$, a kimenet magas állapotban van, a LED nem világít.
- ❖ Sötétedéskor a *CdS* ellenállás értéke 10-200 k Ω , így a referencia középállásában $U_N > U_P$, a kimenet alacsony állapotban van, a LED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

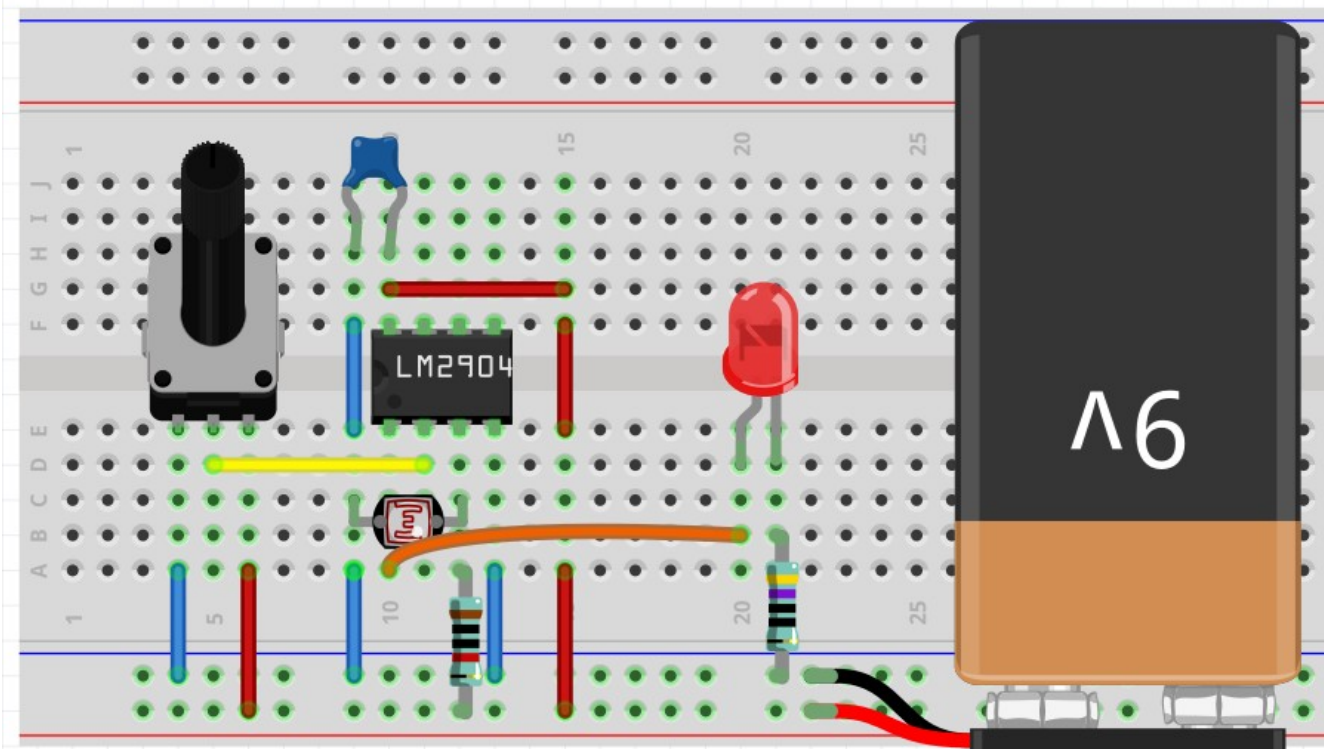


Sötétedésjelző áramkör

- Építsük meg a módosított kapcsolást!
- Jegyezzük meg, hogy az integrált áramkörök tápfesz bemenete és a közös pont közé mindig kössünk legalább egy 100 nF-os kondenzátort! Még jobb, ha vele párhuzamosan egy 10 μ F-os kondenzátort is kötünk...

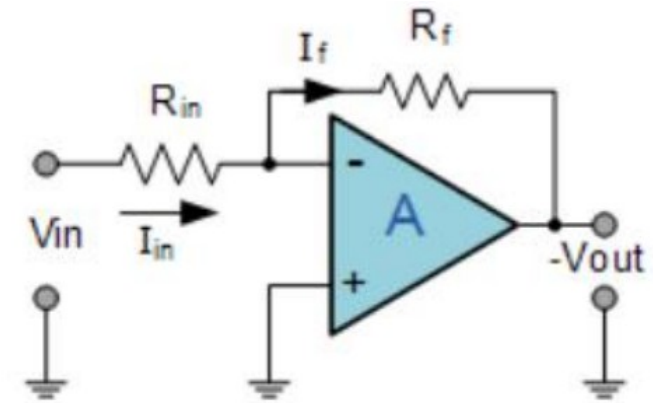
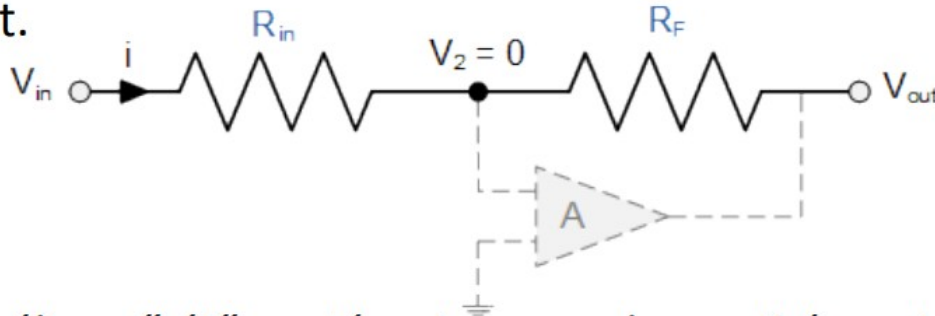


- A kapcsolási szintet a potméterrel állíthatjuk be
- Ha csökken a fény, akkor a CdS ellenállás értéke növekszik, s amikor a neminvertáló bemeneten a jelszint nagyobb lesz, mint a billenési szint, akkor a kimenet magas szintre vált és kigyullad a LED (alkonyati világítás)



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.

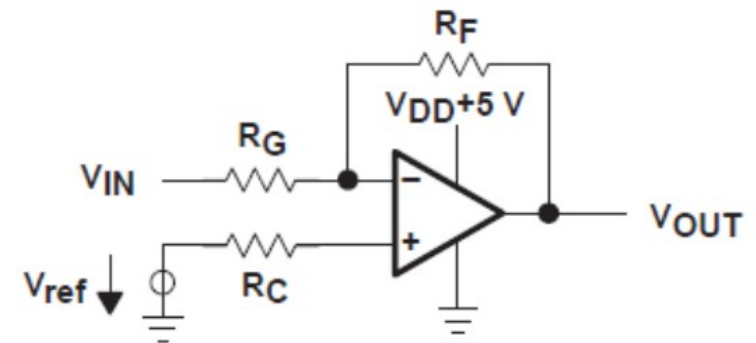


$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

- ❖ 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”. $\frac{V_{in}}{R_{in}} = -\frac{V_{out}}{R_f}$

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

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



$$V_{OUT} = -\frac{R_f}{R_g} V_{IN} + \frac{R_f}{R_g} V_{ref} + V_{ref}$$

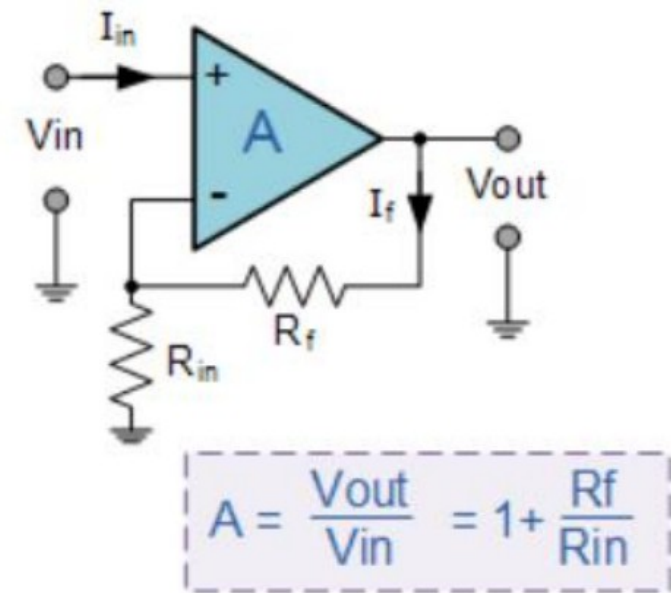
Neminvertáló erősítő

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!

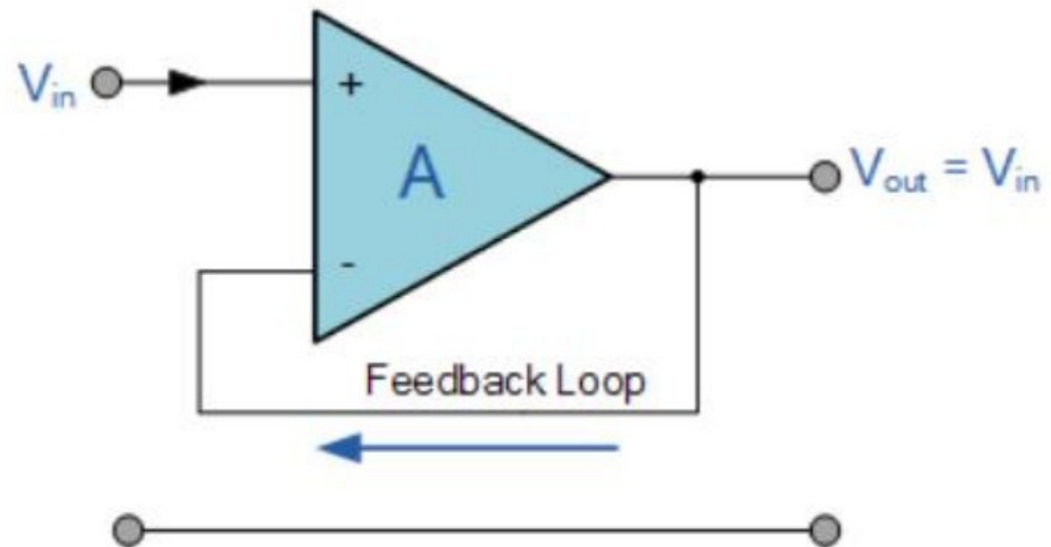
Feszültségkövető

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).

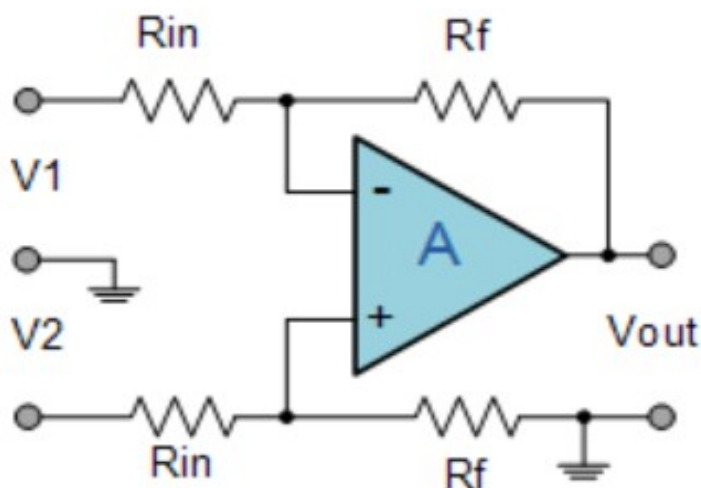
Ehhez hasonló kapcsolást a digitális áramköröknél is használnak, kábelmeghajtó vagy buszmeghajtó áramköröknél!



Különbségképző és összegző áramkörök

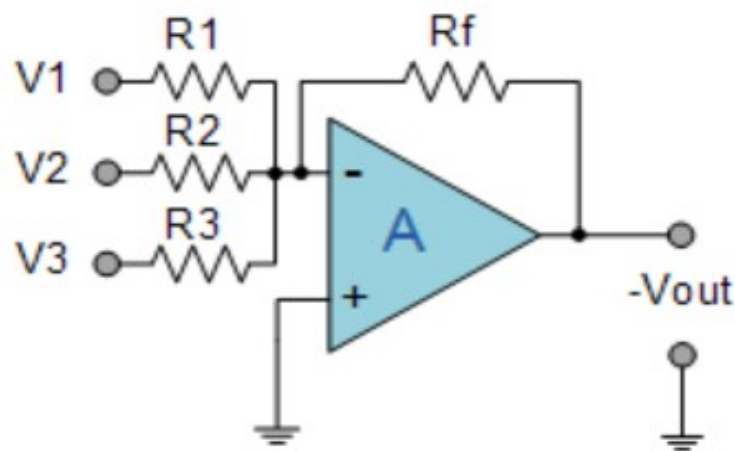
- ❑ A különbségképző és összegző áramkör fontos szerepet tölt be a szabályozástechnikában, de ez az alapja az egyszerű offsetkiegyenlítésnek is
- ❑ Az összegző kapcsolás bemeneteinek bináris súlyozásával digitálisan vezérelhető kimenetet (Digital-Analog Converter, DAC) is kialakíthatunk.
- ❑ A különbségképző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



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

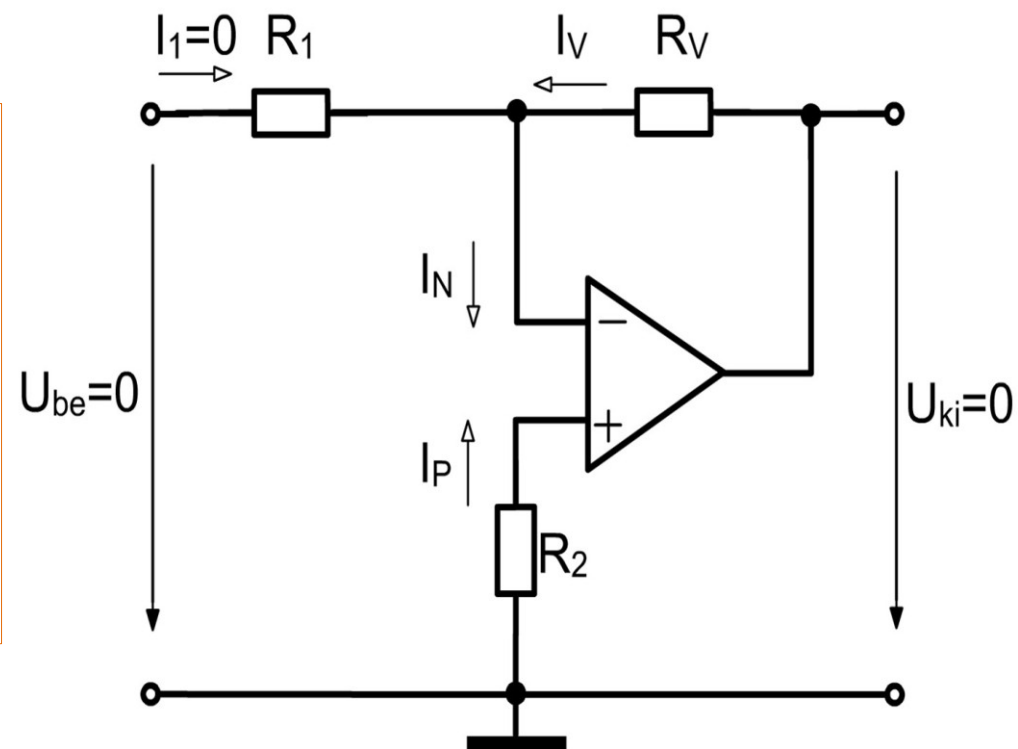
Munkapont beállítása

A **nem ideális műveleti erősítők** megfelelő működéséhez gondoskodni kell a munkapont beállításáról és az offset 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 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.

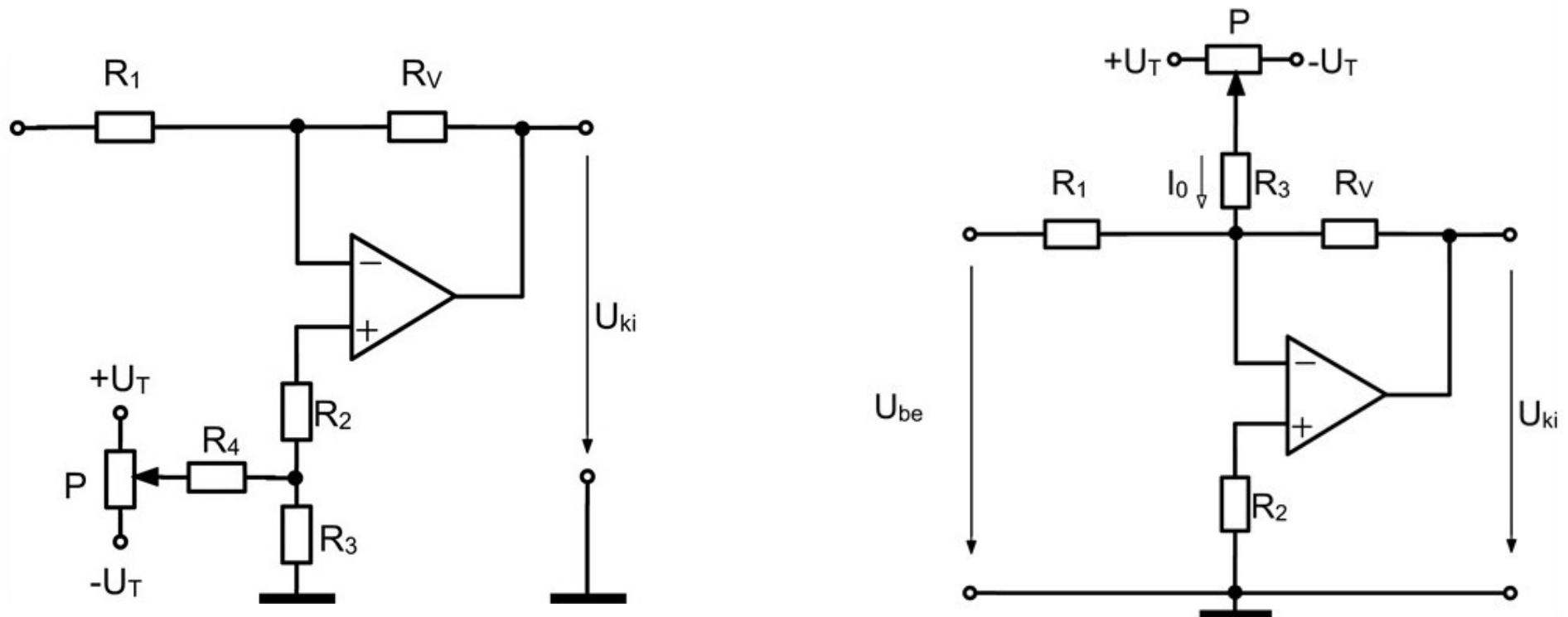
Ahhoz, hogy a kimeneti feszültség nulla értékű legyen, teljesülni kell az $R_2 = R_1 \times R_v$ feltételnek
(R_2 az R_1 és R_v párhuzamos eredője)



Ofszetkiegyenlítés

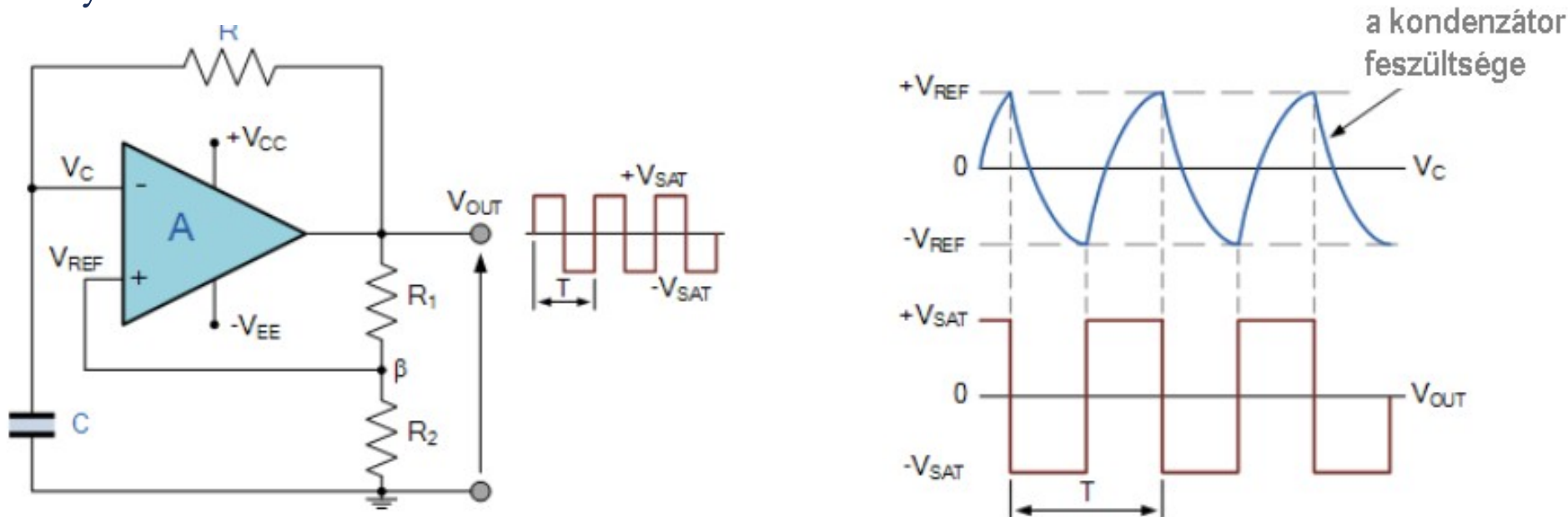
Az ofszetfeszültség kiegyenlítése (baloldali ábra) akkor hatásos, ha a két bemenet árama azonos.

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



Relaxációs oszcillátor

- Induláskor a kimenet magas, a kondenzátor töltődni kezd. Ez addig tart, amíg a kondenzátor V_C feszültsége meg nem haladja a $+V_{REF}$ felső küszöbszintet. Ekkor a kimenet átbillen, s a kondenzátor áttöltődése megkezdődik.
- A kondenzátor áttöltése addig tart, amíg a V_C feszültség értéke a $-V_{REF}$ alsó küszöbszint alá nem csökken. Ekkor a kimenet ismét átbillen, s a töltési folyamat kezdődik előlről...



$$T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) \quad \text{ahol} \quad \beta = \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

A relaxációs oszcillátor szimulációja

Link: www.falstad.com/circuit/e-relaxosc.html

Az ábrán látható adatokkal:

$$T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)$$

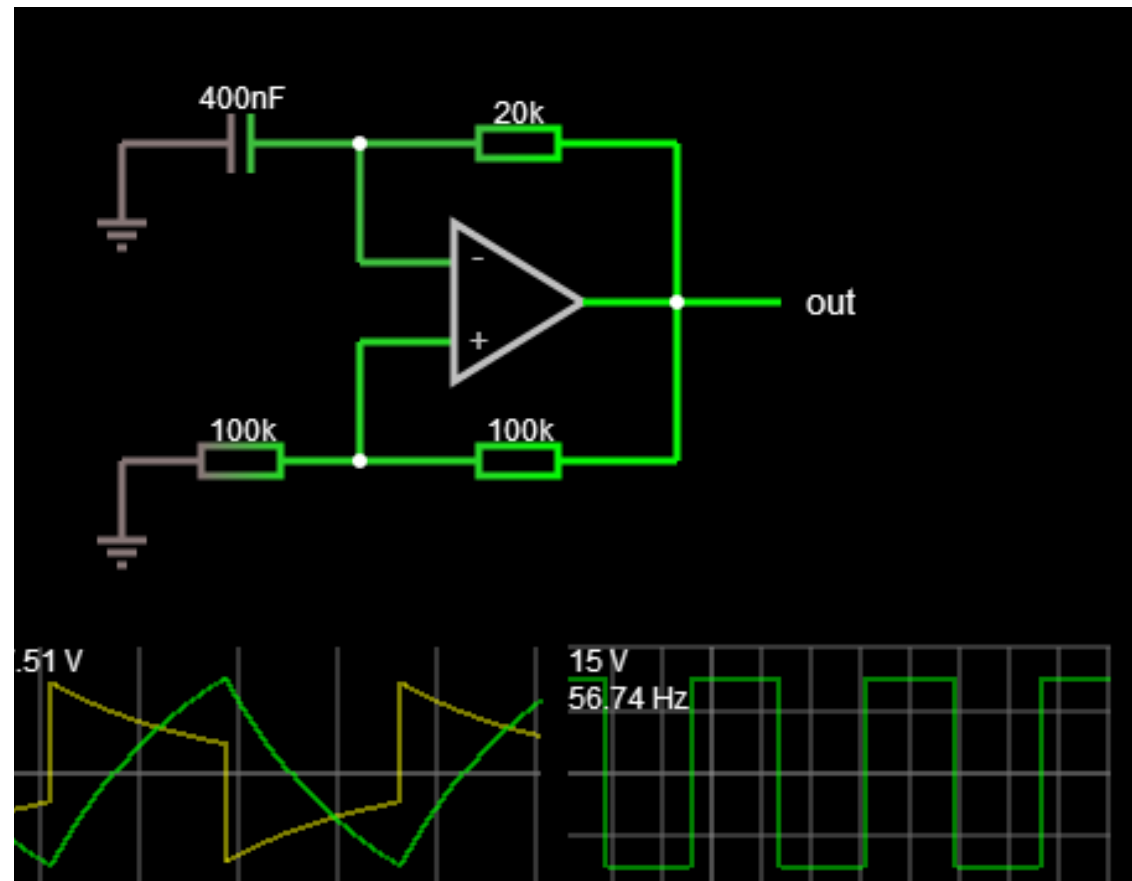
$$\text{ahol } \beta = \frac{100k}{100k+100k} = 0,5$$

$$T = 2,197 \cdot 400 \text{ nF} \cdot 20 \text{ k}\Omega \approx 17,6 \text{ ms}$$

$$f = 1 / T \approx 56,9 \text{ Hz}$$

Az eredeti mintapéldában 20 k Ω helyett 10 k Ω szerepel, így ott a frekvencia kétszer nagyobb, kb. 113,8 Hz.

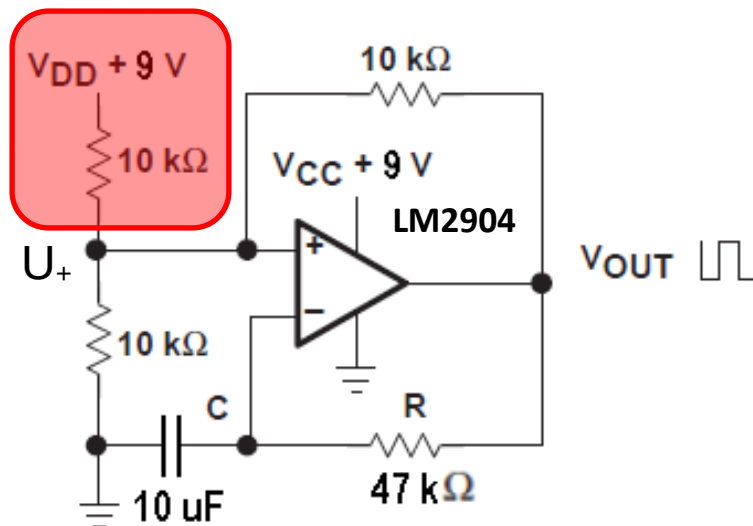
A keltett frekvencia meghallgatható a szimulátorban a PLAY gombra kattintva!



Relaxációs oszcillátor unipoláris táplálással

- Unipoláris táplálás esetén a kimenet a pozitív tápfeszültség és 0 között mozoghat. A megfelelő munkapont biztosításához a neminvertáló bemenet nyugalmi szintjét el kell tolni az ábrán pirossal jelzett ellenállás segítségével.

- ❖ Amikor a kimenet magas szinten van, U_+ a tápfeszültség $2/3$ -a lesz: az osztó felső tagja két párhuzamosan kapcsolt $10\text{ k}\Omega$ -os ellenállás lesz, az alsó tag pedig egy $10\text{ k}\Omega$ -os ellenállás
- ❖ Amikor a kimenet alacsony szinten van, U_+ a tápfeszültség $1/3$ -a lesz: az osztó alsó tagja két párhuzamosan kapcsolt $10\text{ k}\Omega$ -os ellenállás lesz, az alsó tag pedig egy $10\text{ k}\Omega$ -os ellenállás



$$f \approx \frac{1}{0.00014(R C)^{0.3} + 1,4 R C}$$

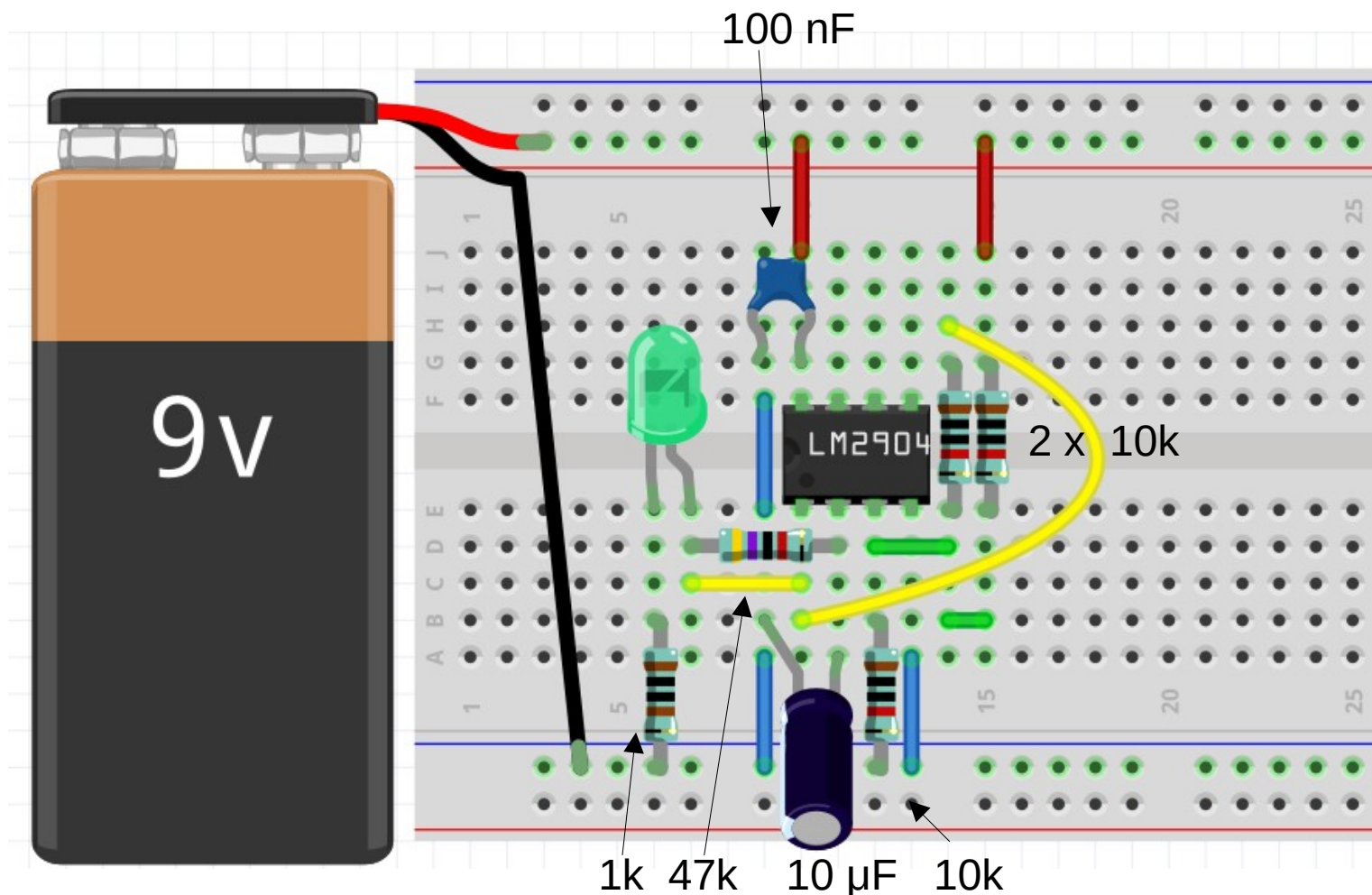
$$\begin{aligned} \text{Esetünkben } T &\approx 1,4 * 10^{-5} \text{ F} * 47 * 10^3 \Omega = 0,685 \text{ s} \\ f &= 1/T \approx 1,5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Relaxációs oszcillátor unipoláris táplálással

- Az előző oldali kapcsolást próbapanelon is megépíthetjük. A kimenetre egy LED-et kössünk, 1 k Ω áramkorlátozó ellenállással.

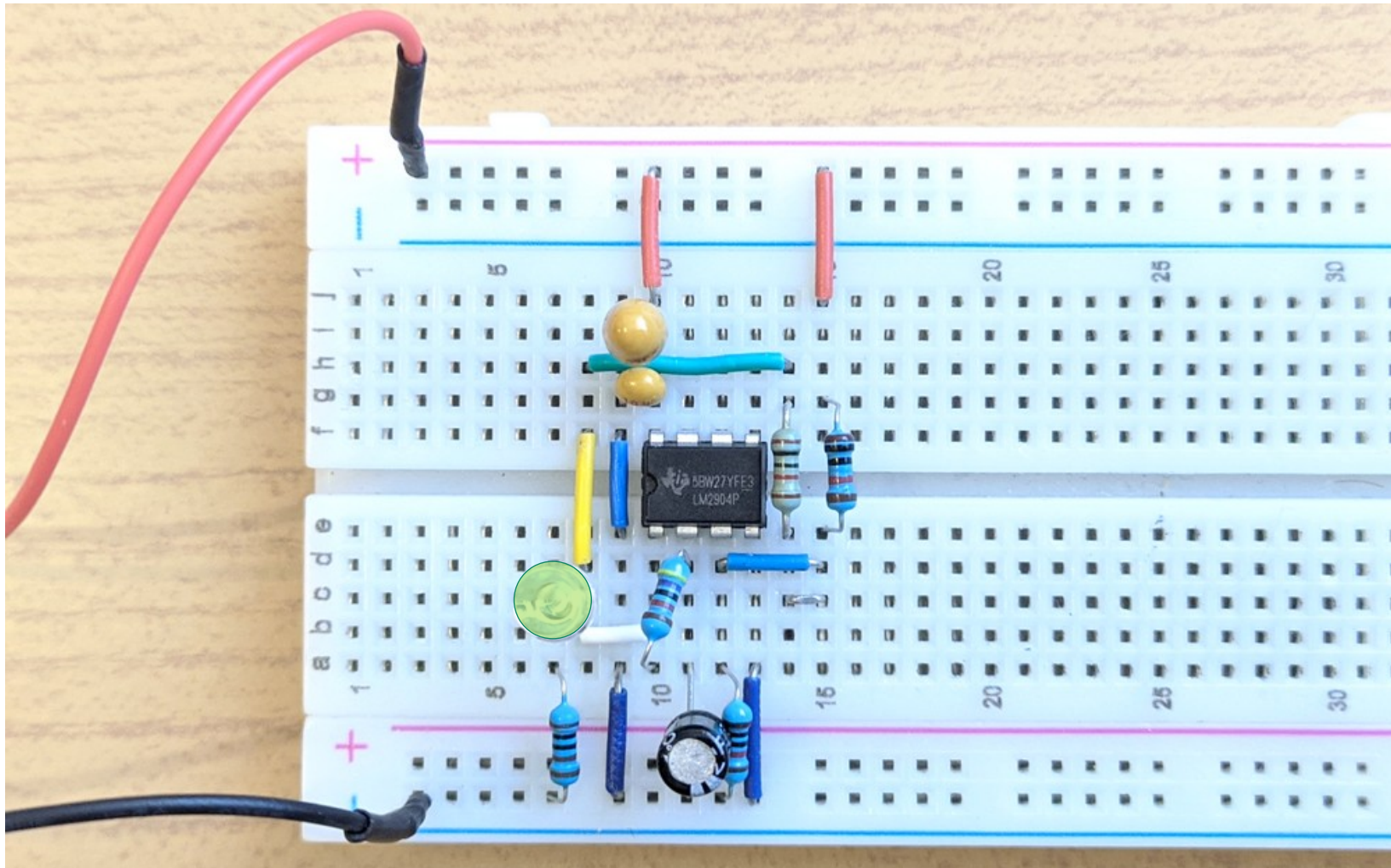
Alkatrészlista:

- 1db próbapanel
- 1 db LM2904 IC
- 1 db LED
- 1 db 1 k Ω ellenállás
- 3 db 10 k Ω ellenállás
- 1 db 47 k Ω ellenállás
- 1 db 10 μ F kondenzátor
- 1 db 9V-os elem
vezetékek



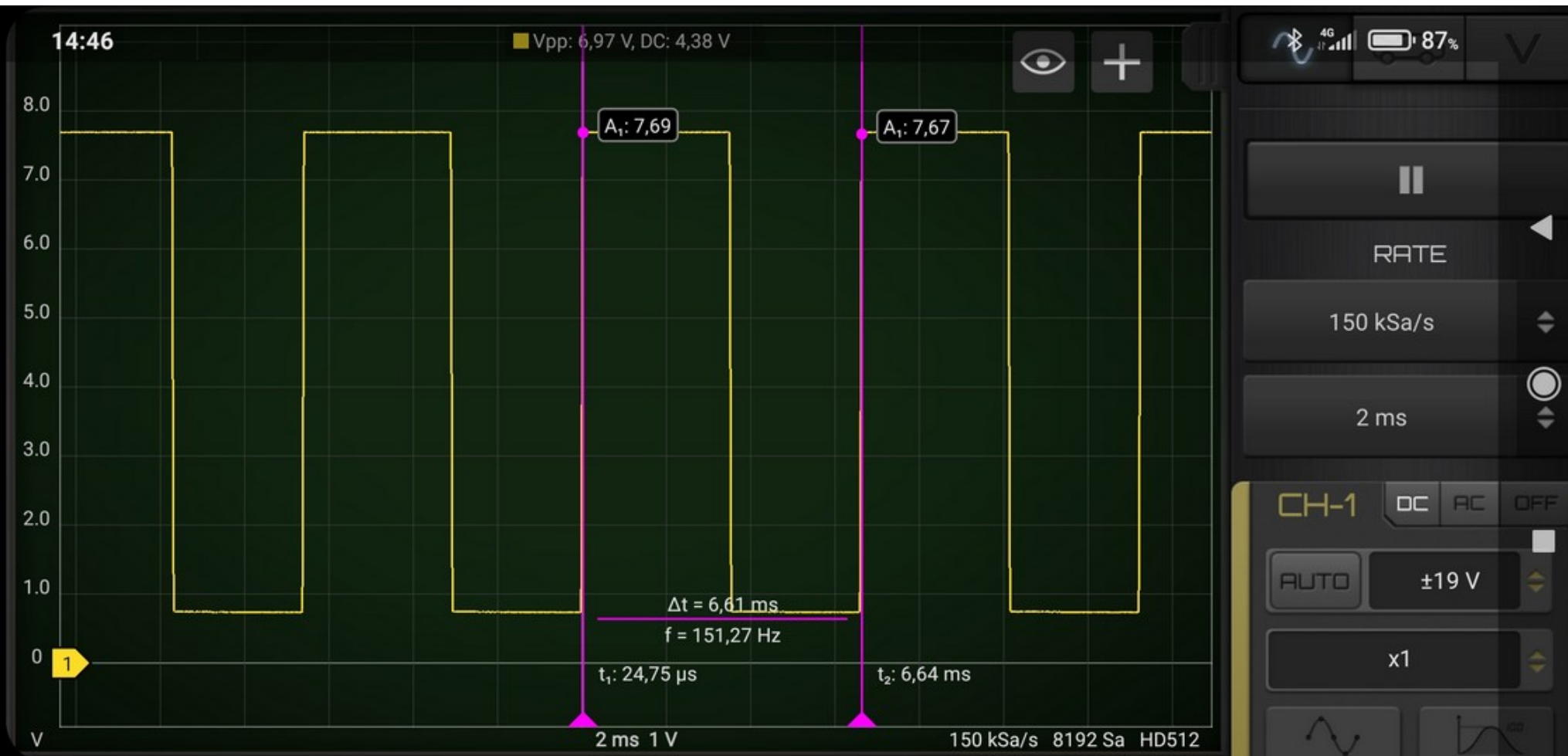
Relaxációs oszcillátor unipoláris táplálással

- A képen az előző oldali elrendezéstől egy kicsit eltértünk, de a kapcsolás ugyanaz maradt



Relaxációs oszcillátor unipoláris táplálással

- Ha a relaxációs oszcillátor frekvenciáját meghatározó RC tagban a kondenzátort $10\ \mu F$ -ról $10\ nF$ -ra csökkentjük, akkor a jel T periódusideje is ugyanilyen arányban csökken, az f frekvencia pedig megnő ($f = 1/T$)
- Esetünkben a jel frekvenciája $1,5\ Hz$ -ről kb. $150\ Hz$ -re növekszik



Ellenállás színkódok

