

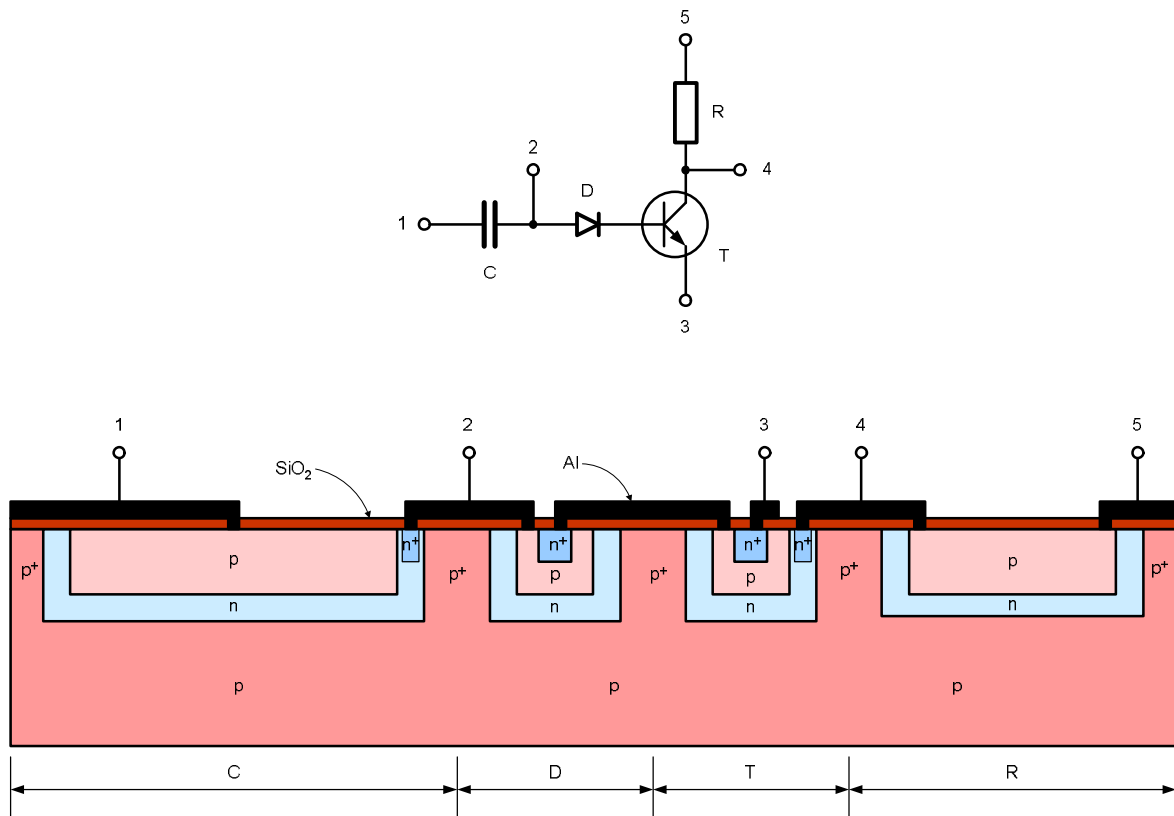
## 2. Műveleti erősítők

### 2.1 Alapfogalmak

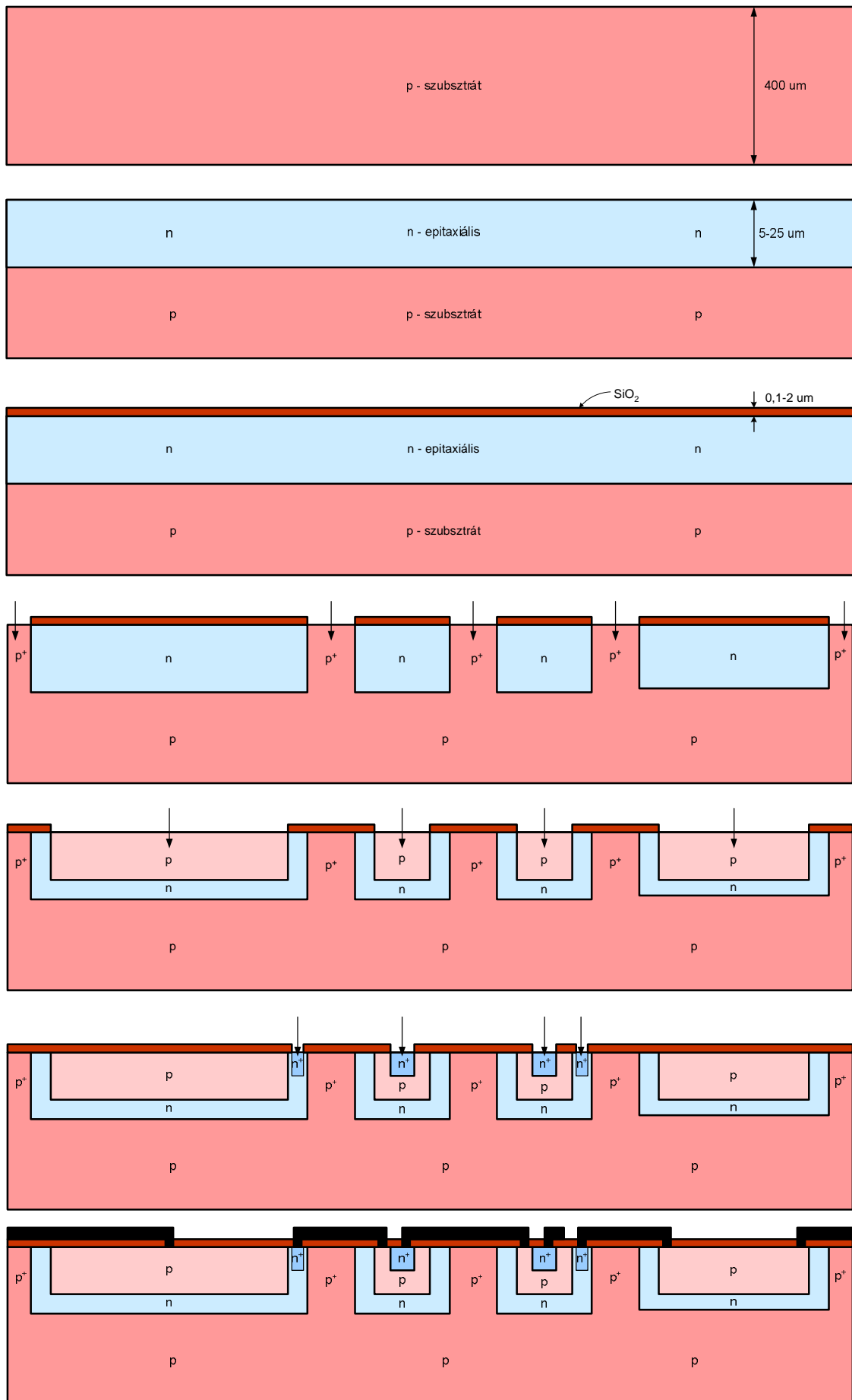
A műveleti erősítők, különleges tulajdonságokkal rendelkező egyenáramú erősítők. Elnevezésük onnan ered, hogy eredetileg az analóg számítástechnika és szabályozástechnika alkalmazásaira készültek, matematikai műveletek végzésére, feszültségekkel vagy áramokkal. A korszerű monolit integrált áramkörös technológiák megjelenésével előállításuk költsége nagyon lecsökkent, és a nagy darabszámok következtében árszintjük is igen alacsonnyá vált. Az alacsony beszerzési ár lehetővé tette a műveleti erősítők széles körű elterjedését és felhasználási területük bővülését: gyakorlatilag minden olyan helyen alkalmazhatóak, ahol villamos jeleket kell erősíteni kis kimeneti teljesítmény esetén.

A monolit integrált áramkörös technológia során az egész áramkört egy szilícium félvezető kristályon alakítják ki, tehát egyetlen tömbből (*monolit*) áll. A tervezés és gyártás során arra törekednek, hogy az adott áramkört minimális felületű félvezető lapkán valósítsák meg. A felhasznált felület csökkentésére - az elemsűrűség növelésére - irányuló erőfeszítések azt eredményezték, hogy a legtöbb esetben, egyszerű ellenálláshálózatok helyett bonyolult tranzisztoros kapcsolásokat alkalmaznak. Ennek oka egyszerű: egy nagy értékű ellenállás sokkal nagyobb szilíciumfelületet foglal el mint egy tranzisztor. Például egy  $1\text{ k}\Omega$  nagyságú ellenállás kétszer akkora felületet foglal el, mint egy közepes tranzisztor. Hasonló problémák vannak a kondenzátorok esetében is: egy  $10\text{ pF}$  értékű kondenzátor háromszor akkora felületet igényel, mint egy közepes tranzisztor.

A 2.1 ábra a monolit integrált áramkörök gyártástechnológiai sajátosságaiba enged bepillantást. Az ábrán egy egyszerű (egy-egy ellenállást, kondenzátort, diódát és tranzisztort tartalmazó) többkiveztéses kapcsolás monolit szilíciumlapkán létrehozott áramkörét láthatjuk. Megfigyelhető az alkotó komponensek relatív méretkülönbsége, a különböző rétegek elhelyezkedése, valamint az egyes komponensek struktúrája. A 2.2 ábra a gyártástechnológia 7 lépését részletezi.



2.1 ábra Monolit integrált áramkör



**2.2 ábra** Monolit integrált áramkörök gyártástechnológiája

Az említett gyártástechnológiai okok olyan kapcsolástechnikai megoldások kidolgozását tették szükségessé, melyek alkalmasak a diszkrét elemekkel megvalósított kapcsolásokban használt polarizáló hálózatok helyettesítésére. Ezek a megoldások ugyanakkor lehetővé tették olyan minőségi jellemzők elérését, amelyek diszkrét elemekkel megvalósított áramkörök esetében nem lehetségesek. A mai felhasználókat már kevésbé érdekli a műveleti erősítők belső felépítése, csak az a fontos hogy hogyan lehet velük meghatározott paraméterekkel rendelkező áramkört tervezni és megépíteni.

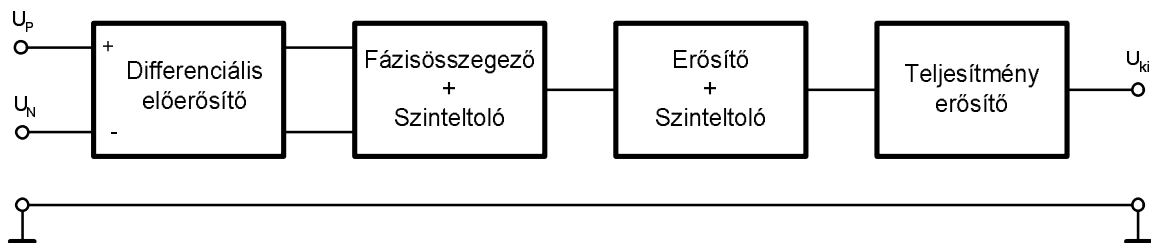
### 2.1.1 Egyenáramú erősítés

A műveleti erősítők jellemzője, hogy a *lassan változó* (egyenfeszültségű), *igen kis amplitudójú* feszültségek és áramok nagyon nagy erősítésére is alkalmasak. Az egyenáramú erősítők nagyon fontos adata az a legkisebb jelszint, amelyen még erősítést lehet elérni, valamint a munkapont eltolódása amelyet *nullpontvándorlásnak* (**drift**) is neveznek.

A legkisebb jelszint a tranzisztor zajától függ. Ez a zaj csökkenthető egyrészt kis zajú tranzisztorok alkalmazásával, másrészt a munkapont optimális megválasztásával. Az erősítők nullpontvándorlása az a jelenség, amely során a tápfeszültség vagy a környezeti hőmérséklet megváltozása következtében az erősítőelemek munkapontja eltolódik és így paraméterei is megváltoznak. A közvetlen (galvanikus) csatolás, valamint a nagy erősítés miatt a bemeneti áram kicsi megváltozása is nagy változást idéz elő a kimeneti jelben. Ez a műveleti erősítők ellentmondása: egyenáramú erősítőknek egyenáramú jelet kell erősíteniük, de az egyenlőfeszültségek változásainak felerősítése már kellemetlen következményekkel jár.

### 2.1.2 Műveleti erősítők belső felépítése

Egy műveleti erősítő felépítését a 2.3 ábrán látható tömbvázlat szemlélteti.



2.3 ábra Műveleti erősítő belső felépítése

A bemeneti fokozat differenciálerősítője nagy érzékenységet és feszültségerősítést biztosít. A következő fokozatban található fázisösszegező áramkör a differenciálerősítő szimmetrikus kimeneti jelét aszimmetrikussá alakítja, amelyet szintillesztés után egy feszültségerősítő fokozat erősít megfelelő szintre. A kimeneti végerősítő fokozat egy újabb szinteltoló fokozaton keresztül kapja a vezérlőjelet. A kimenetet a túlterhelés ellen áramkorlátozó elektronika védi.

A drift kis szinten tartására a bemeneten mindig differenciálerősítőt alkalmaznak. Mivel a kimeneten nincs szükség földszimmetrikus feszültségre, a szimmetrikus bemeneti áramkört átalakítják aszimmetrikussá. A szimmetrikus fokozatok erősítésének olyan nagyoknak kell lennie, hogy a bemeneti fokozat felerősített jele mellett az aszimmetrikus fokozatok driftje elhanyagolható értékű legyen.

## 2.2 Integrált műveleti erősítők jellemző tulajdonságai

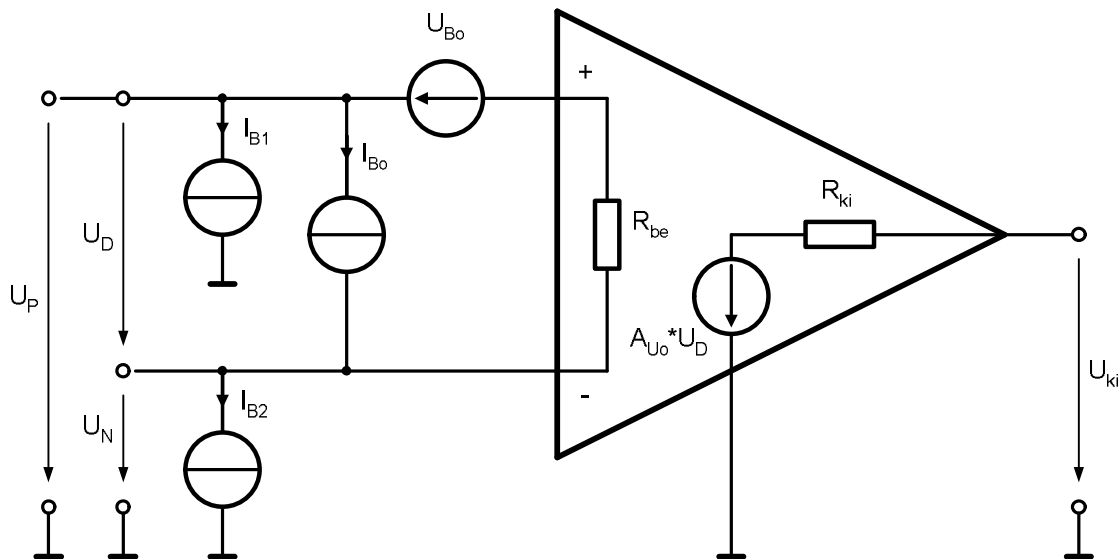
A 2.4 ábrán látható a kis vezérlő jelszinttel és kisfrekvencián működő műveleti erősítő helyettesítő képe, ahol:

$I_{B1}, I_{B2}$  - a bemeneti differenciálerősítő munkaponti áramai

$U_{B0}$  - a bemeneti offset feszültség

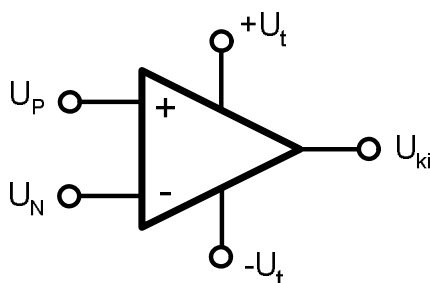
$R_{be}, R_{ki}$  - a bemeneti és kimeneti ellenállások

$A_{uo}$  - üresjárási feszültségerősítés



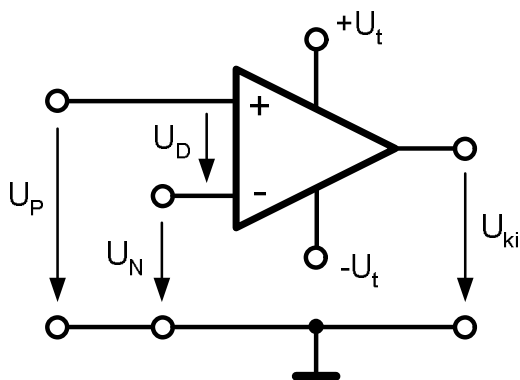
**2.4 ábra** Műveleti erősítő kisfrekvenciás helyettesítő képe

Az integrált műveleti erősítők szabványos rajzjele a 2.5 ábrán látható. A "-" jelű bemenetet invertáló vagy fázisfordító bemenetnek nevezik, mivel erre a bemenetre kapcsolt  $U_N$  feszültség, a kimeneten felerősítve, de fordított polaritással, illetve szinuszos feszültség esetén  $180^\circ$ -os fáziseltolással jelenik meg. A "+" jelű bemenetet nem invertáló vagy nem fázisfordító bemenetnek nevezik, mivel erre a bemenetre kapcsolt  $U_P$  feszültség, a kimeneten felerősítve és azonos polaritással, illetve azonos fázishelyzetben jelenik meg.



**2.5 ábra** Műveleti erősítő rajzjele

Működés szempontjából a műveleti erősítő szimmetrikus tápfeszültséget ( $+U_t$ ,  $-U_t$ ) igényel a vonatkoztatási ponthoz képest. Minden feszültség erre a közös pontra vonatkozik, amelyet a kapcsolási rajzokon feltüntetnek (2.6 ábra). Ez általában a testpont.



**2.6 ábra** Műveleti erősítő vonatkoztatási pontjai és feszültségei

### 2.2.1 Jellemző paraméterek

A kisműveleti erősítők legfontosabb paraméterei a következők:

**a) Bemeneti munkaponti áram (input bias current):  $I_B$**

A műveleti erősítő bemeneti munkaponti árama a bemeneti differenciálerősítő munkaponti bázisáramainak számtani középértéke:

$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

**b) Bemeneti ofsztet áram (input offset current):  $I_{B0}$**

A műveleti erősítő bemeneti ofsztet árama az a szimmetrikus bemeneti áram, amely a nulla kimeneti feszültség eléréséhez szükséges:

$$I_{B0} = I_{B1} - I_{B2}, \quad \text{ha } U_{ki} = 0$$

**c) Bemeneti ofsztet feszültség (input offset voltage):  $U_{B0}$**

A műveleti erősítő bemeneti ofsztet feszültsége az a szimmetrikus bemeneti feszültség, amely a kimeneten nulla feszültséget hoz létre.

**d) Bemeneti ellenállás (input impedance):  $R_{be}$**

A műveleti erősítő bemeneti ellenállása a szimmetrikus bemeneti feszültség és a szimmetrikus bemeneti áram hányadosa.

$$R_{be} = \frac{U_D}{I_B}$$

**e) Kimeneti ellenállás (output impedance):  $R_{ki}$**

A műveleti erősítőkimeneti ellenállása az üresjárású kimeneti feszültség és a rövidzárású kimeneti áram hányadosa.

$$R_{ki} = \frac{U_{ki-ii}}{I_{ki-r}}$$

**f) Üresjárású (nyílt hurkú) feszültségerősítés ( ):  $A_{uo}$**

A nyílt hurkú feszültségerősítés a műveleti erősítő terheletlen kimenettel, visszacsatolás nélkül, szimmetrikus bemeneti jellel mért feszültségerősítése.

$$A_k = \frac{U_{ki}}{U_D}$$

**g) Közös módusú feszültségerősítés ( ):  $A_{uk}$**

A közös módusú feszültségerősítés a műveleti erősítő terheletlen kimenettel, visszacsatolás nélkül, közös módusú bemeneti jellel mért feszültségerősítése.

$$A_{uk} = \frac{U_{ki}}{U_K}$$

**h) Közös módusú feszültségelnyomási tényező (CMMR-Common Mode Rejection Ratio):  $G$**

A közös módusú feszültségelnyomási tényező a nyílt hurkú differenciális erősítés és a nyílt hurkú közös módusú erősítés hányadosa.

$$G = \frac{A_{u0}}{A_{uk}}, \quad \text{logaritmikus kifejezése: } G = 20 \cdot \lg \frac{A_{u0}}{A_{uk}} \quad [\text{dB}]$$

**i) Bemeneti közös módusú feszültségtartomány:  $U_{Kmax}$**

A bemeneti közös módusú feszültség maximális pozitív és negatív csúcserőértéke.

**j) Bemeneti differenciális feszültségtartomány:  $U_{Dmax}$**

A differenciális bemeneti feszültség maximális értéke, amelyet a műveleti erősítő károsodás nélkül elvisel.

**k) Maximális kimeneti feszültség:  $U_{ki\ max}$**

A kimeneti feszültség pozitív és negatív csúcsértékének maximuma, meghatározott terhelőellenállás esetén.

**l) Maximális kimeneti áram:  $I_{ki\ max}$**

Az a maximális pozitív és negatív kimeneti csúcsáram, amellyel az erősítőt terhelni szabad.

**m) Sávszélesség:  $f_o$**

Az a frekvencia, amelynél a nyílthurkú feszültségerősítés értéke 3 dB-lel csökken.

**n) Egységnyi erősítés határfrekvenciája:  $f_1$**

Az a frekvencia, amelynél a nyílt hurkú feszültségerősítés értéke egységnyire csökken.

A műveleti erősítő feszültségerősítésének csökkenése a frekvencia növekedésével, két tényezőnek tulajdonítható:

- a belső felépítésben található pn átmenetek parazitakapacitásainak hatása
- a félvezető szerkezetben a kissebségi töltéshordozók tárolása révén keletkező hatás

**o) A kimeneti feszültség legnagyobb változási sebessége (slew rate):  $S$**

Az  $S$  paraméter az erősítő kimeneti feszültségének maximális változási sebességét adja meg, bemeneti egységugrás esetén. A jelváltozási sebesség a nullaátmenetnél a legnagyobb.

$$S = \left. \frac{dU_{ki}}{dt} \right|_{\max}$$

**p) Tápfeszültség tartomány:  $\pm U_T$**

A műveleti erősítő szimmetrikus tápfeszültség ellátásának maximális és minimális értéke.

**q) Tápáramfelvétel:  $I_T$**

A műveleti erősítő működéséhez szükséges tápfeszültségből felvett áram, ha a kimeneti feszültség nulla (vezérlés nélküli állapot) és a kimenet terheletlen állapotban van.

**r) Nyugalmi teljesítményfelvétel:  $P_o$**

A műveleti erősítő működéséhez szükséges tápfeszültségből felvett teljesítmény, ha a kimeneti feszültség nulla (vezérlés nélküli állapot) és a kimenet terheletlen állapotban van.

**s) Maximális teljesítménydisszipáció:  $P_{D\ max}$**

A műveleti erősítő vezérelt állapotában az áramkörön disszipálható összteljesítmény.

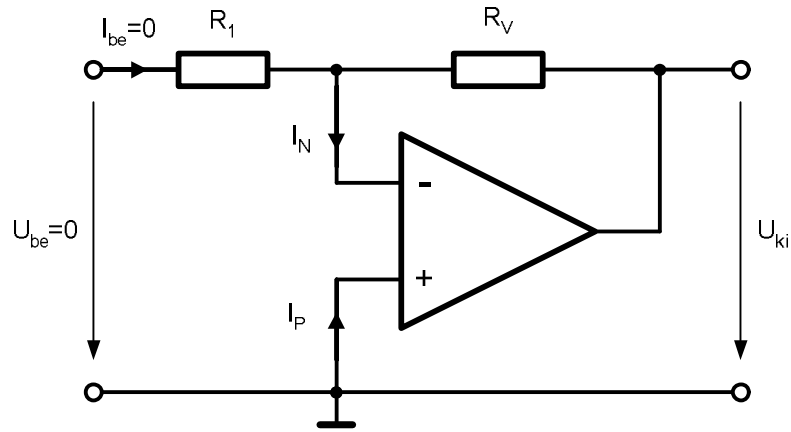
**t) Üzemi hőmérséklet-tartomány:  $T_{\ddot{u}}$**

Az a környezeti hőmérséklet tartomány, amelyben a katalógusban megadott üzemi paraméterek garantáltak tekinthetők.

### 2.3 Munkapont beállítás

A műveleti erősítők munkapont beállításán a bemeneti nyugalmi áram biztosítását, az offszet feszültség és az offszet áram kompenzálását értjük. A 2.7 ábrán látható kapcsolásban, a bemeneti nyugalmi áram az invertáló bemenetre a kimenet felől, a nem invertáló bemenetre pedig a test felől folyik. Megfigyelhető, hogy az erősítő áramkör kimenetén egy nullától különböző feszültség lép fel akkor is, ha a bemeneti feszültség nulla:

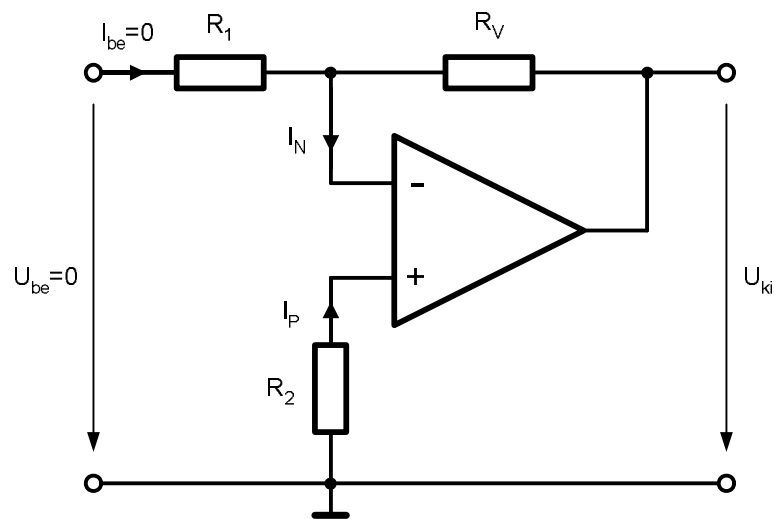
$$U_{ki} = I_N \cdot R_V$$



**2.7 ábra** A bemeneti nyugalmi áram hatása a kimenetre

A kimeneten fellépő hibafeszültség kiküszöbölhető, ha a nem invertáló bemenet potenciálját a földponthoz képest megemeljük az invertáló bemenet potenciálszintjére. Ez megvalósítható egy, a földpont és a nem invertáló bemenet közé kapcsolt ellenállással, amely értéke a kimeneti nulla feszültség feltételéből adódik (2.8 ábra).

$$R_2 = R_1 \times R_V$$



**2.8 ábra** A bemeneti nyugalmi áram kompenzálása

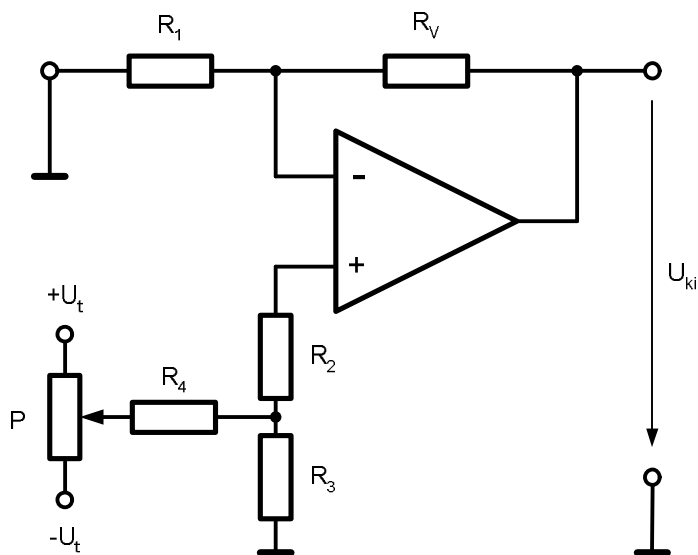
Abban az esetben, ha a két bemeneti nyugalmi áram értéke nem azonos, a kimeneti feszültséget a következő képpen lehet kiszámolni:

$$U_{ki} \approx R_V \cdot (I_N - I_P) = R_V \cdot I_D$$

A fenti összefüggésből következik, hogy célszerű minnél kisebb offset áramú műveleti erősítőt választani, és megfigyelhető, hogy nem érdemes túl nagy értékű visszacsatoló ellenállást alkalmazni.

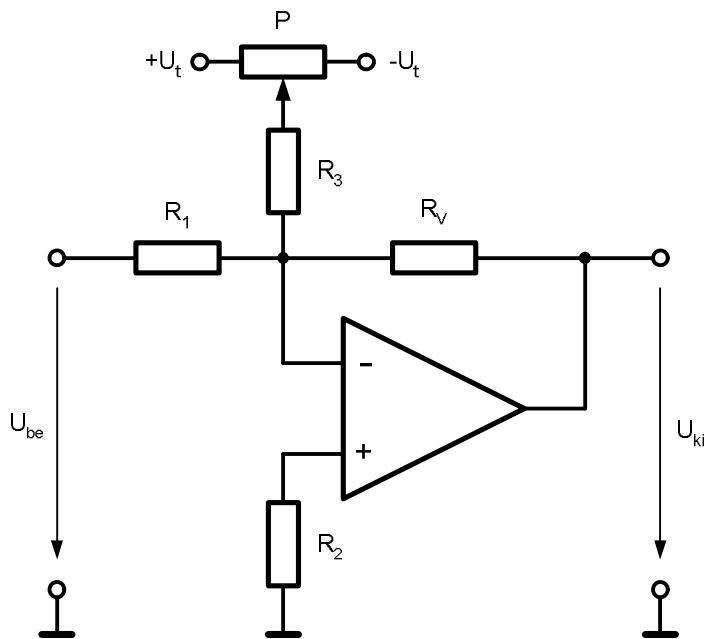
#### 2.4 Bemeneti offset

A műveleti erősítők nem szimmetrikus bemenetifeszültség-igénye bizonyos esetekben igen nagy értékű kimeneti hibafeszültséget képes létrehozni. A bemeneti offset feszültség kompenzálás a kimeneten jelentkező hibafeszültség megszüntetését célozza. Az integrált műveleti erősítők egy része rendelkezik beépített offsetkompenzáláshoz szükséges csatlakozópontokkal, amelyek segítségével általában a bemeneti differenciálerősítő potenciálviszonyai változtathatók meg. Abban az esetben, ha a műveleti erősítő nem rendelkezik offsetkompenzáló kivezetésekkel, külső polarizáló áramköröket alkalmaznak az offsetkompenzálás megvalósítására (2.9 ábra).



**2.9 ábra** Műveleti erősítők ofszet feszültség kompenzálása

A kompenzálás eredményes, ha rövidrezárt bemenet mellett a potenciométer megfelelő beállításával nulla kimeneti feszültséget kapunk. A gyakorlatban az ofszetfeszültség-kompenzálás csak akkor lehetséges, ha a műveleti erősítő két bemenetének áramigénye azonos. Ha ez a feltétel nem valósul meg, akkor áramkompenzálást kell alkalmazni a nulla kimeneti feszültség elérésére. A 2.10 ábra az áramkompenzálás egy lehetséges megoldását szemlélteti.



**2.10 ábra** Műveleti erősítők ofszet áram kompenzálása

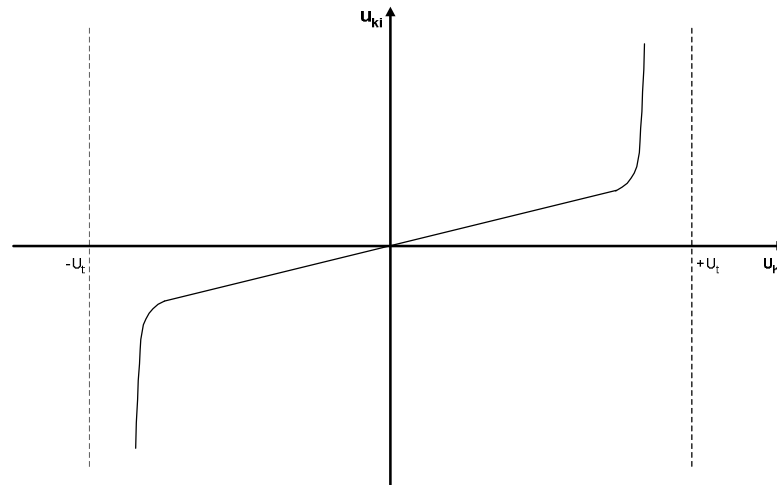
A potenciométer csúszóérintkezőjén folyó áram az egyik bemenet nyugalmi áramát növeli, a másik bemenet nyugalmi áramát pedig csökkenti. Az áramkompenzálás akkor tekinthető eredményesnek, ha a potenciométer megfelelő beállításával a kapott ofszet áram kiegyenlíti a bemenetek eltérő áramigényét, és a kimeneti feszültség nulla lesz.

### 2.5 Közös módusú jelerősítés

Ha a műveleti erősítő mindkét bemenetére ugyanazt az  $U_K = U_P = U_N$  feszültséget adjuk, akkor  $U_D=0$  (2.6 ábra). Az ilyen közös módusú vezérlésnél  $U_{ki} = 0$ -nak kellene lenni, azonban ez a valóságos műveleti erősítőknél nem teljesül, mert a közös módusú erősítés nem pontosan nulla, sőt



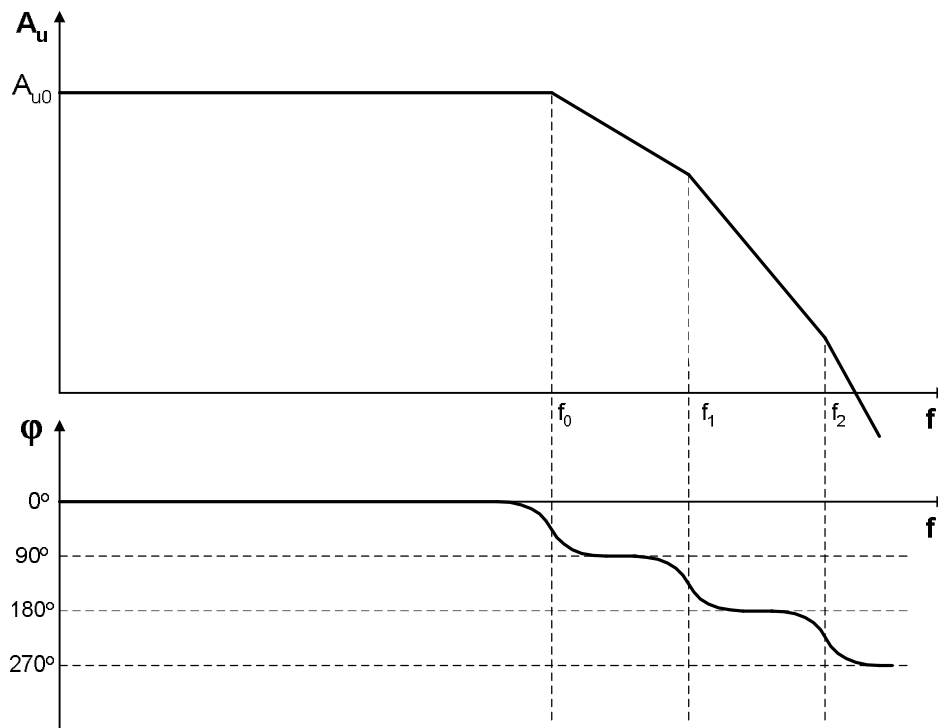
a nagyobb közös módusú bemeneti feszültségnél meredeken nő (2.11 ábra). A kihasználható tartományt közös módusú kivezérelhetőségnek nevezzük. Ez a tartomány rendszerint 2 V-al kisebb mint a pozitív illetve a negatív tápfeszültség.



**2.11 ábra** Kimeneti feszültség a közös módusú bemeneti feszültség függvényében

## 2.6 Frekvenciakompenzálás

A 2.12 ábra egy nyílt hurkú műveleti erősítő feszültségerősítésének és fázistolásának frekvenciafüggését ábrázolja. Gyakorlatilag arról van szó, hogy az áramkör ellenállásai a szórt parazita kapacitásokkal együtt magassabb fokú aluláteresztő szűrőként működnek és a frekvenciamenetben töréspontokat hoznak létre. Minden egyes töréspont a nagyobb frekvenciák irányában 20 dB/dekád erősítéscsökkenést és  $-90^\circ$ -os fázistolást hoz létre.

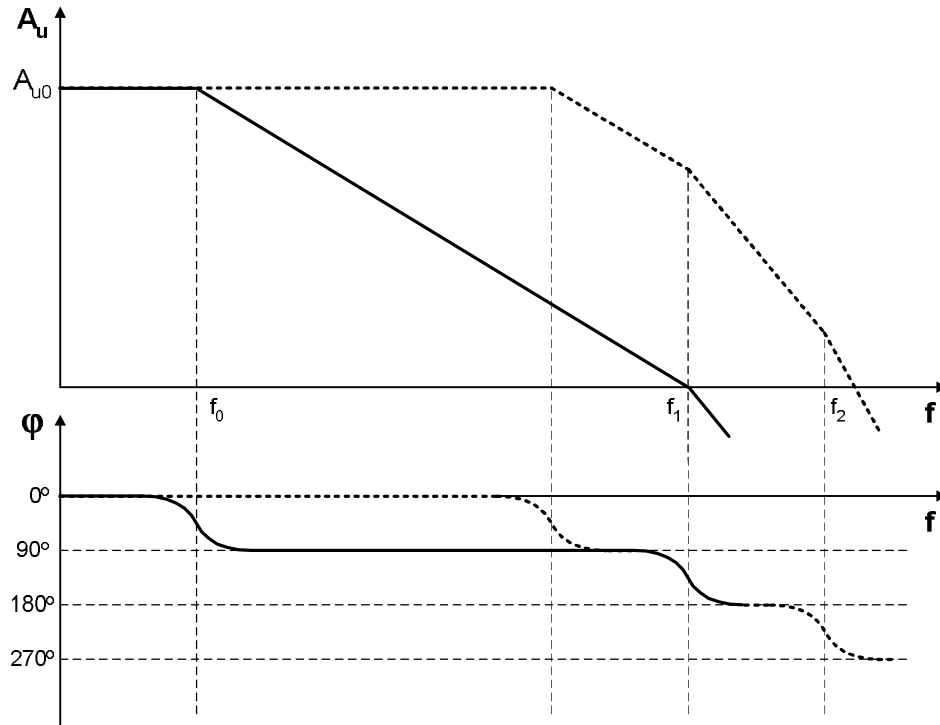


**2.12 ábra** Műveleti erősítők amplitúdó- és fázisjelleggörbéje

Az  $f_0$  frekvenciaérték fölött a legkisebb határfrekvenciájú RC tag határozza meg a frekvenciamenetet, ezáltal az erősítés 20dB/dekád meredekséggel csökken, és a kimeneti feszültség  $90^\circ$ -al késik a bemeneti feszültséghez viszonyítva. Az  $f_1$  frekvenciaérték fölött egy másik

aluláteresztő szűrő kezd érezteni hatását. Ennek következtében az erősítés már 40dB/dekád meredekséggel fog csökkenni, ugyanakkor a fázistolás a be- és kimeneti feszültségek között  $-180^\circ$  lesz. Az  $f_2$  frekvenciaérték fölött egy újabb aluláteresztő parazita szűrő kezd befolyásolni a frekvenciamenetet, és így tovább. Ez gyakorlatban azt jelenti, hogy már a második frekvenciatörés után a műveleti erősítő invertáló és nem invertáló bemenetének a szerepe felcserélődik. A negatív visszacsatolás - amely a kimeneti jellel arányos jelet mindig a fázifordító bemenetre vezet vissza - ebben a frekvenciatartományban átalakul pozitív visszacsatolássá és az erősítő begerjed (oszillál).

A műveleti erősítők frekvenciakompenzálása a gerjedésmentesség biztosítását szolgálja. A kompenzálás a gyakorlatban külső elemek csatlakoztatásából áll, amelyek segítségével egy alacsony frekvenciás töréspontot hozunk létre a frekvenciamenetben (2.13 ábra). Ezáltal az átviteli jellemzőket döntően ez a töréspont fogja meghatározni.



**2.13 ábra** Kompenzált erősítő frekvenciamenete

Megfigyelhető, hogy az elsőfokú aluláteresztő szűrő határfrekvenciáját egy külső kompenzáló kondenzátorral lecsökkentjük úgy, hogy az erősítés abszolút értéke egységnyi értéket érjen el, mielőtt a második töréspont fázistolása hatásossá válik. A mesterségesen létrehozott töréspont - vagyis a frekvenciakompenzálás - már alacsony frekvenciákon is erősítés-csökkenést okoz és jelentősen csökken a nyílt hurkú szávészélesség is, de hát valamit valamiért ☺. A fázistolás mértéke már kis frekvencián  $90^\circ$ -ra nő a kompenzálás miatt, nagyobb frekvencián azonban ugyanennyi marad, gerjedésmentességet biztosítva az erősítő számára.

Az integrált műveleti erősítők a frekvenciakompenzálás szempontjából két csoportra oszthatók:

- belső kompenzálással rendelkező erősítők: a relatív kis határfrekvenciát a gyártás során alakítják ki
- belső kompenzálással nem rendelkező erősítők: határfrekvenciát egy külsőkompenzálóhálózat segítségével alakítjuk ki, amely adatait az adott műveleti erősítő adatlapja tartalmazza

A gyakorlatban, a változó visszacsatolási körülmények között is stabilan működő műveleti erősítők fázistolásának az  $A_{uv} > 1$  feltételnek megfelelő tartományban  $120^\circ$ -nál kisebbnek kell lennie. Ekkor a fázistartalék  $60^\circ$ -nál nagyobb lesz.

## 2.7 Zajviszonyok

Ha az elektromos jel nem tartalmaz számunkra hasznos információt, akkor zavaró jelnek, röviden zajnak nevezzük. A zavaró jelek egy részének időfüggvénye periodikus, másik részének időbeli lefolyása rendszertelen, véletlenszerű folyamatok eredménye.

### 2.7.1 A zajok forrásai

A zavaró jeleket első megközelítésben két csoportra oszthatjuk:

- Az első csoport jelenségei azért lépnek fel, mert az elektronikus áramkörök a környezet befolyása alatt állnak. Mivel az elektronikus berendezések megfelelő intézkedéssel megvédhetők a külső befolyásokkal szemben, ezek a zajforrások elvileg kiküszöbölhetők.
- A második csoportba olyan zavaró jelenségek tartoznak, amelyek elvileg sem tüntethetők el. Ezek alapja a termodinamika harmadik főtétele, amely szerint minden rendszer energiája egyensúlyi állapotban is ingadozásokat mutat a makroszkopikus törvények által megszabott közepes érték körül. A termodinamikailag jelentkező elektromos energia az áram vagy a feszültség értékének az ingadozását jelenti, ez a töltéshordozók rendezetlen mozgásának az eredménye. Ezek a zavaró jelek minden ohmos ellenállásban, illetve ohmos veszteségű passzív elemekben és az aktív félvezető elemekben is fellépnek.

A rendezetlen elektronmozgásból eredő zajok több típusát különböztetjük meg:

- **Termikus zaj:** a töltéshordozók rendezetlen hőmozgásának a következménye. Ez a rendezetlen mozgás létrehozza az  $I_z$  termikus zajáramot és egy  $R$  ellenállású vezetón áthaladva az  $U_z = I_z \cdot R$  termikus zajfeszültséget. Minden  $R$  értékű ellenállás a hőmozgás miatt egy zajgenerátornak tekinthető, amely egy illesztett terhelésen az abszolút hőmérséklettel ( $T$ ) és a sáv szélességgel ( $B$ ) egyenesen arányos átlagos teljesítményt ad le:  $P_{zaj} = k \cdot T \cdot B$ , ahol  $k$  a Boltzmann állandó.
- **Sörétzaj:** az a jelenség amely félvezető eszközökben kíséri az áramot. A töltéshordozók potenciálkülönbönet - pn átmeneten - való áthaladása idézi elő. Nagysága fordítottan arányos a frekvenciával és az áram növekedése esetén növekszik.
- **Villodzási zaj:** az elektronikai alkatrészek nemtökéletes gyártástechnológiájának következménye. A működési frekvencia csökkenése növeli a zaj nagyságát.

### 2.7.2 A zajtényező

Az erősítő zajosságának jellemzésére a  $Z_v$  **jel/zaj viszonyt** és az  $F$  **zajtényezőt** adják meg. A jel/zaj viszony a jelteljesítmény és a zajteljesítmény dB-ben kifejezett hányadosa:

$$Z_v = 10 \cdot \lg \frac{P_{jel}}{P_{zaj}}$$

A zajtényezőt a be és kimenetre vonatkoztatott jel/zaj viszony hányadosa adja meg:

$$F = \frac{Z_{vbe}}{Z_{vki}} = \frac{1}{A_p} \cdot \frac{P_{zajki}}{P_{zajbe}}, \quad \text{ahol } A_p = \frac{P_{jelki}}{P_{jelbe}} \text{ a teljesítményerősítés.}$$

A zajtényező kifejezése dB-ben:

$$F_{[dB]} = 10 \cdot \lg F$$

Egy erősítő zajtényezőjét főleg az alkalmazott erősítőelem szabja meg. Többfokozatú erősítők zaját elsősorban a bemeneti fokozat zajtényezője határozza meg, mivel ennek a zaját a többi fokozat is erősíti. Ezért az erősítők bemeneti fokozatában kis zajú tranzisztorokat és a zaj szempontjából optimális munkapont beállítást alkalmazunk.

## 2.8 Ideális műveleti erősítő

A műveleti erősítőkkel végzett számításokat megkönnyíti, ha a továbbiakban a műveleti erősítőt ideálisnak tekintjük. Ideális műveleti erősítő a gyakorlatban nem létezik, viszont tulajdonságait a modern műveleti erősítőkkel meg tudjuk közelíteni. Ideális esetben, ha az invertáló és nem invertáló bemenetre azonos feszültség szintet kapcsolunk, akkor a kimeneti feszültségnek nullának kell lennie, mivel  $U_D$  differenciális feszültség nulla.

$$U_{ki} = A_{u0} \cdot (U_P - U_N) = A_{u0} \cdot U_D = 0$$

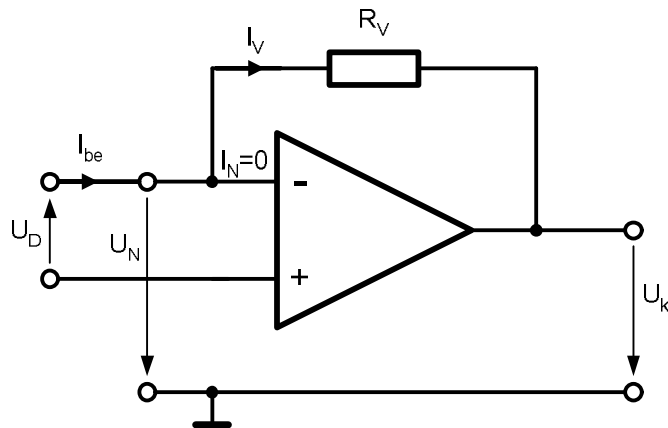
Ideális műveleti erősítők esetén a közös módusú erősítés ( $A_{uk}$ ) nulla, a közös módusú elnyomás értéke végtelen nagy, torzítások nem lépnek fel, zajtényezője nulla, és paraméterei nem függenek a környezeti hőmérséklettől vagy a tápfeszültség ingadozásától.

## 2.9 Visszacsatolás alkalmazása műveleti erősítőknél

Egy műveleti erősítő áramkör visszacsatoltnak tekinthető, ha vezérlőjelét nem csak a bemenetről a kimenetre továbbítja, hanem a kimenetéről a bemenete felé is. Mivel az első átvitel a műveleti erősítő belső tulajdonságainak köszönhető, a visszacsatolás megvalósítható egy külső visszacsatoló hálózat segítségével, amelyen a kimeneti jel egy részét visszavezetjük a bemenetre. Abban az esetben amikor a visszacsatolt feszültség kivonódik a bemeneti jelből, negatív visszacsatolásról beszélünk:

$$A_{uv} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{A_u}{1 + \beta \cdot A_u}$$

Vizsgáljunk meg egy egyszerű, de a gyakorlatban sokszor előforduló megoldást, amikor a visszacsatoló hálózat egy  $R_v$  ellenállásból áll (2.14 ábra). Figyelembe véve, hogy a műveleti erősítő ideális ( $I_N=0$ ):  $I_{be} = I_v$



2.14 ábra Műveleti erősítő negatív visszacsatolása ellenállással

A bemeneti áram teljes egészében áthalad a visszacsatoló  $R_v$  ellenálláson, tehát független az  $R_v$  ellenállás értékétől. Alkalmazva Kirchhoff törvényét a kimeneti vonalon:

$$U_{ki} = U_N - R_v \cdot I_v$$

$$U_{ki} = U_N - R_v \cdot I_{be}$$

A kapott összefüggések érvényesek maradnak függetlenül attól, hogy milyen áramkört kapcsolunk a műveleti erősítő bemenetére és kimenetére. Az áramkör bemeneti ellenállása nulla, mivel  $U_D = 0$ :

$$R_{be} = \frac{U_{be}}{I_{be}} = -\frac{U_D}{I_v} = 0$$

## 2.10 Katalógusadatok

A tervezés és előállítás során a gyártók arra törekednek, hogy minnél jobban megközelítsék az ideális erősítők tulajdonságait, és ez lehetővé teszi, hogy a gyakorlati számítások többségében a valóságos műveleti erősítőket ideálisnak tekinthessük.

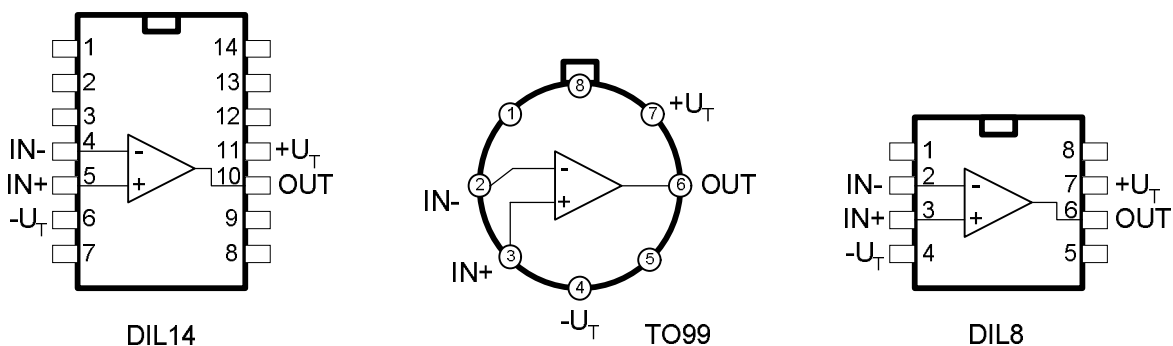
Jelenleg a műveleti erősítők gyártása terén a következő paramétereket sikerült elérni:

- Nyílt hurkú feszültségerősítés:  $A_{u0} > 10^5 - 10^7$
- Bemeneti ellenállás:  $R_{be} \approx 2M\Omega$  (bipoláris T),  $R_{be} > 2T\Omega$  (FET)
- Kimeneti ellenállás:  $R_{ki} \approx 50\Omega$
- Működési frekvenciatartomány: 0Hz - 100MHz
- Közös módusú elnyomás:  $G > 10^6$  ( $\geq 120dB$ )
- Közös módusú erősítés:  $A_{uk} < 0,2$
- Bemeneti hibafeszültség:  $< 0,5 \text{ mV}$
- Bemeneti hibaáram:  $< 30\text{pA}$
- Bemeneti áram:  $< 10\text{pA}$
- Bemeneti feszültségdrift:  $< 0,5 \text{ uV/K}$
- Bemeneti áramdrift:  $< 0,5 \text{ nA/K}$
- Bemeneti zajfeszültség:  $< 10 \text{ nV}/\sqrt{Hz}$
- Kimeneti zajfeszültség:  $U_{zaj} < 2\mu V$

A jellemző adatok megadott értékei csak meghatározott feltételek között érhetőek el (pl. adott tápfeszültség esetén vagy adott hőmérséklet tartományban). Természetesen nem lehet minden optimális adatot egyidejűleg egy erősítővel teljesíteni, ezért minden esetben kompromisszumos megoldás szükséges. Ennek ellenére a különböző tulajdonságokkal rendelkező műveleti erősítők választéka a gyakorlatban előforduló minden alapvető követelményt képes kielégíteni.

## 2.11 Tokozás és bekötés

A műveleti erősítők kivezetéseinek sok típusa azonos elrendezését a 2.15 ábra szemlélteti. Különbségek általában csak az ofszetkiegyenlítési és frekvenciakompenzálási pontoknál jelentkeznek.



2.15 ábra Műveleti erősítők több típusára érvényes tokozás és bekötési vázlat