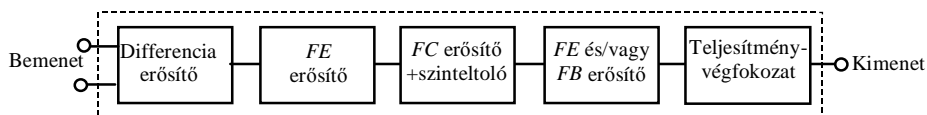


6. MŰVELETI ERŐSÍTŐK

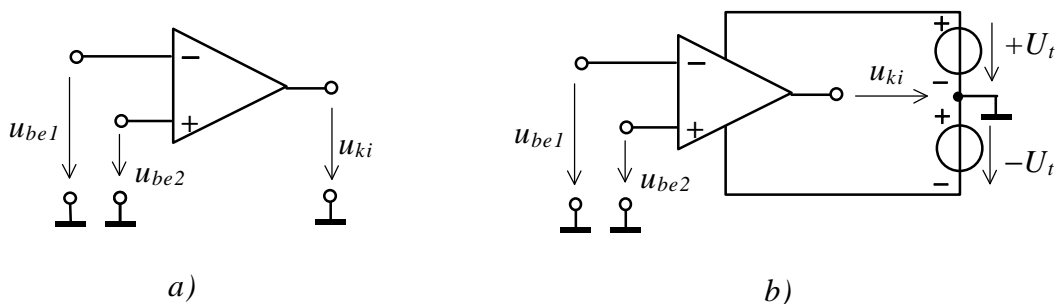
A műveleti erősítők integrált áramköri technikával készült szimmetrikus bemenetű és aszimmetrikus kimenetű egyenfeszültség-erősítők. A közel ideális paraméterek biztosítása érdekében a műveleti erősítő több áramköri egységből áll. A 6.1. ábrán a műveleti erősítő tömbvázlata látható.



6.1. ábra. Általános felépítésű műveleti erősítő tömbvázlata.

Az integrált műveleti erősítő két földfüggetlen bemenettel és a földhöz képest egy kimenettel rendelkezik (6.2. ábra). A műveleti erősítőnek a (-) jelű az invertáló, a (+) jelű a neminvertáló bemenete és általában két tápforrással működtethető.

A műveleti erősítő jelképi jelölése és a tápfeszültség kialakítása látható a 6.2. ábrán. A jelképi jelölésen gyakran nincsenek feltüntetve a tápforrások kivezé-
tései, amelyek természetesen minden esetben szükségesek.



6.2. ábra. Műveleti erősítő a) jelképi jelölése és b) tápfeszültség kialakítása.

A műveleti erősítő vezérelhető

- szimmetrikus bemeneti jellel
- közös bemeneti jellel
- aszimmetrikus vezérlőjellel.

A műveleti erősítő legfontosabb áramköri jellemzőit a gyártó cégek katalógusokban ismertetik.

A legfontosabb paraméterek:

- A_{u0} : nyílthurkú feszültségerősítés (Open loop voltage gain): szimmetrikus bemeneti jellel, üresjárásban, visszacsatolás nélkül, kisfrekvencián mért érték.
- E_k : közösjel-elnyomási tényező (Common mode rejection ratio, *CMRR*).
- R_{bes} : bemeneti szimmetrikus ellenállás (Input impedance).
- R_{ki} : kimeneti ellenállás.
- f_0 : az a frekvencia érték, ahol a feszültségerősítés a kisfrekvencián mért értékhez képest 3 dB-lel csökken.
- f_1 : az egységnyi erősítéshez tartozó frekvencia.
- I_b : nyugalmi bemeneti áram (Input bias current): az integrált műveleti erősítő bemeneti differenciálerősítőjének munkaponti bázisárama.
- I_{b0} : bemeneti ofszet áram (Input offset current): az a bemeneti szimmetrikus áram, amely az $U_{ki} = 0$ nyugalmi kimeneti feszültség beállításához szükséges.
- U_{b0} : bemeneti ofszet feszültség (Input offset voltage): az a bemeneti szimmetrikus feszültség, amely az $U_{ki} = 0$ nyugalmi kimeneti feszültség beállításához szükséges.
- $i_{d0} \left[\frac{nA}{C^\circ} \right]$: bemeneti hőmérsékleti áram-drift (Input offset current drift): a bemeneti ofszet áram hőmérsékleti tényezője.
- $u_{d0} \left[\frac{\mu V}{C^\circ} \right]$: bemeneti hőmérsékleti feszültség-drift (Input offset voltage drift): a bemeneti ofszet feszültség hőmérsékleti tényezője.
- $\pm U_t$: tápfeszültség tartomány.
- U_{bemax} : a megengedhető maximális bemeneti feszültség, általában a tápfeszültség értékével megegyezik.
- U_{kimax} : a maximális kimeneti feszültség, általában 1-2 V-tal kisebb, mint a tápfeszültségek.
- I_{kimax} : maximális kimeneti áram. A korszerű típusok rövidzárvédelemmel vannak ellátva.
- P_0 : nyugalmi teljesítményfelvétel.
- P_{dmax} : maximális disszipált teljesítmény.
- S : a kimeneti feszültség maximális változási sebessége (Slew rate), definíciója:

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

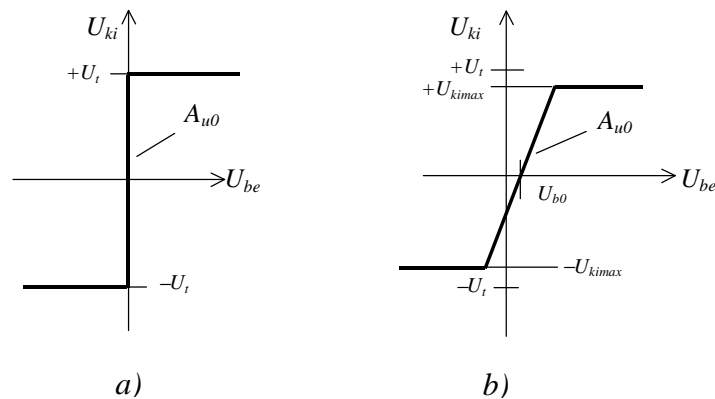
Az ideális műveleti erősítő

- végtelen nagy bemeneti ellenállással
- végtelen nagy nyílthurkú erősítéssel
- végtelen nagy közös feszültségelnyomási tényezővel
- nulla kimeneti ellenállással
- nulla ofszet értékekkel
- nulla drift értékekkel
- tápfeszültséggel megegyező maximális kimeneti feszültséggel
- frekvenciafüggetlen átvittel közelíthető.

A valóságos műveleti erősítő

- nagy nyílthurkú erősítéssel ($A_{u0} = 10^3 \dots 10^7$)
- nagy bemeneti ellenállással ($R_{bes} = 10 \text{ k}\Omega \dots 5 \text{ M}\Omega$, $R_{bek} > 100R_{bes}$)
- közel nulla kimeneti ellenállással ($R_{ki} = 10 \text{ }\Omega \dots 200 \text{ }\Omega$)
- nagy közös feszültségelnyomási tényezővel ($E_{ku} > 10^3$)
- ofszet értékekkel ($I_{b0} = 1 \text{ nA} \dots 1 \text{ }\mu\text{A}$, $U_{b0} = 1 \dots 5 \text{ mV}$)
- drift értékekkel ($i_{d0} = (0,1 \dots 10) \frac{\text{nA}}{^\circ\text{C}}$, $u_{d0} = (0,5 \dots 5) \frac{\mu\text{V}}{^\circ\text{C}}$)
- a tápfeszültségnél 1-2 V-tal kisebb maximális kimeneti feszültséggel
- frekvenciafüggő átvittel ($f_0 = 1 \text{ Hz} \dots 100 \text{ MHz}$) rendelkezik.

A 6.3 a) ábrán az ideális, a 6.3 b) ábrán a nemideális műveleti erősítő transzfer karakterisztikája látható.

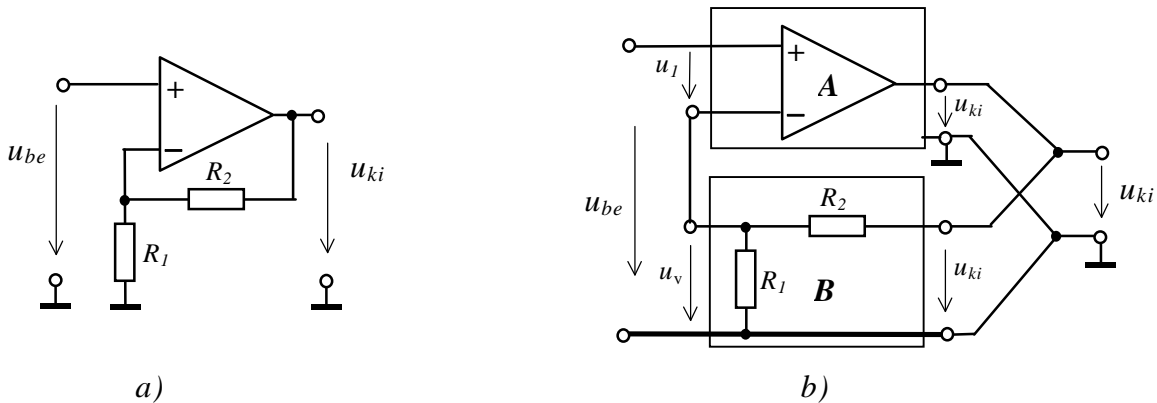


6.3. ábra. Műveleti erősítő a) ideális és b) valóságos transzfer karakterisztikája.

6.1. MŰVELETI ERŐSÍTŐK ALKALMAZÁSAI

6.1.1. Neminvertáló erősítő kapcsolás

A műveleti erősítő neminvertáló bemenetét aszimmetrikus jel vezérli, az invertáló bemenetre a kimeneti feszültséggel arányos visszacsatolt feszültség kapcsolódik.



6.4. ábra. Neminvertáló műveleti erősítő.

A szemléltetés érdekében az erősítő kapcsolási rajza átalakítható a 6.4.b ábra szerint, amelyen könnyen felismerhető a 2. fejezetben ismertetett soros feszültség visszacsatolás. Az A erősítőnek a műveleti erősítő, a B visszacsatoló tagnak az R_1 és az R_2 ellenállásokból kialakított feszültségosztó hálózat feleltethető meg.

Az A erősítő feszültségerősítése megegyezik a műveleti erősítő A_{u0} nyílthurkú feszültségerősítésével.

A B visszacsatoló tag feszültségerősítése:

$$B_u = \frac{u_v}{u_{ki}}. \quad (6.1)$$

Az u_v visszacsatolt feszültség:

$$u_v = u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.2)$$

A 6.2 összefüggést a 6.1 egyenletbe visszahelyettesítve a B_u erősítés

$$B_u = \frac{u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{u_{ki}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.3)$$

összefüggéssel adható meg.

A visszacsatolt rendszer A'_u eredő feszültségerősítése:

$$A'_u = \frac{A_u}{1 + A_u B_u} = \frac{A_{u0}}{1 + A_{u0} B_u}, \quad (6.4)$$

amely átalakítható az

$$A'_u = \frac{A_{u0}}{1 + A_{u0} B_u} = \frac{\frac{A_{u0}}{A_{u0}}}{\frac{1}{A_{u0}} + B_u} = \frac{1}{\frac{1}{A_{u0}} + B_u} \quad (6.5)$$

alakra. Ideális műveleti erősítőt feltételezve, a feszültségerősítése végtelen nagynak tekinthető: $A_{u0} \rightarrow \infty$, ezért a visszacsatolt rendszer eredő erősítése az

$$A'_u = \frac{1}{\frac{1}{\infty} + B_u} \approx \frac{1}{B_u} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6.6)$$

összefüggéssel adható meg. Megállapítható, hogy a visszacsatolt rendszer eredő erősítését a visszacsatoló hálózat áramköri paraméterei határozzák meg, és független a műveleti erősítő paramétereitől.

A visszacsatolt rendszer eredő bemeneti ellenállása:

$$R'_{bes} = R_{bes} (1 + A_{u0} B_u) = R_{bes} (1 + H). \quad (6.7)$$

A visszacsatolt rendszer eredő kimeneti ellenállása:

$$R'_{ki} = \frac{R_{ki}}{1 + H_{ii}}, \quad H_{ii} \cong H. \quad (6.8)$$

Az erősítő kapcsolás feszültségerősítését a visszacsatolásokra vonatkozó összefüggéseken kívül ún. „műveleti erősítő” szemlélettel is meg lehet határozni.

A műveleti erősítő erősítése:

$$A_{u0} = \frac{u_{ki}}{u_{bes}}. \quad (6.9)$$

Mivel az ideális erősítő erősítése végtelen nagynak feltételezhető, ebből adódik, hogy a szimmetrikus bemeneti feszültség $u_{bes} = 0$.

Ha $u_{bes} = 0$, akkor a két bemenet földhöz képesti feszültsége megegyezik: $u_p = u_n$.

A pozitív bemenet feszültsége: $u_p = u_{be}$, a negatív bemenet feszültsége: $u_n = u_v$, tehát $u_{be} = u_v$.

Az u_v visszacsatolt feszültség:

$$u_v = u_{be} = u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.10)$$

A visszacsatolt rendszer eredő feszültségerősítése az

$$\mathbf{A}'_{\mathbf{u}} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6.11)$$

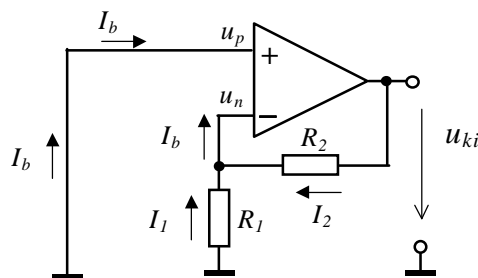
összefüggéssel határozható meg.

6.1.2. Műveleti erősítők munkapont beállítása

A műveleti erősítők munkapont beállításának feladata

- a nyugalmi bemeneti áram biztosítása
- a bemeneti offset kiegyenlítése
- a drift minimalizálása
- a közös feszültség beállítása.

A műveleti erősítővel megvalósított kapcsolásokban minden esetben biztosítani kell a nyugalmi áram kialakulását. A munkaponti viszonyok vizsgálata a 6.5. ábra alapján elvégezhető.



6.5. ábra. Műveleti erősítő munkaponti viszonyainak vizsgálata.

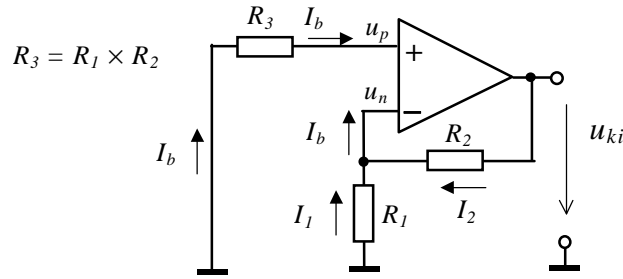
A neminvertáló erősítő kapcsolás invertáló és neminvertáló bemenetén $u_{be} = 0$ bemeneti feszültség esetén egyaránt I_b egyenáram folyik. A műveleti erősítő minden egyéb szempontból ideálisnak tekinthető, ezért az erősítő végtelen nagy feszültségerősítése miatt az u_{ki} kimeneti feszültség bármely értékéhez $u_{bes} = 0$ érték tartozik, tehát $u_n = u_p = 0$. Emiatt az R_1 ellenálláson folyó I_1 áram nulla, tehát az invertáló bemenet I_b nyugalmi egyenárama szükségszerűen megegyezik az R_2 ellenálláson folyó I_2 árammal, amely a kimeneten

$$u_{ki} = I_b R_2 \quad (6.12)$$

feszültséget hoz létre. Ez a hibafeszültség megszüntethető a neminvertáló bemenetre kapcsolt

$$R_3 = R_1 \times R_2 \quad (6.13)$$

értékű ellenállás alkalmazásával (6.6. ábra).



6.6. ábra. Műveleti erősítő munkapont beállítása.

Ebben az esetben a neminvertáló bemenet u_p feszültsége:

$$u_p = -I_b R_3. \quad (6.14)$$

Mivel $u_p = u_n$, így az R_1 ellenálláson folyó áram

$$I_1 = -\frac{u_n}{R_1} = \frac{I_b R_3}{R_1} = I_b \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.15)$$

A visszacsatoló ellenálláson folyó áram a csomóponti törvény alapján:

$$I_2 = I_b - I_1. \quad (6.16)$$

A kimeneti feszültség:

$$u_{ki} = u_n + I_2 R_2 = -I_b \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \left(I_b - I_b \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) R_2. \quad (6.17)$$

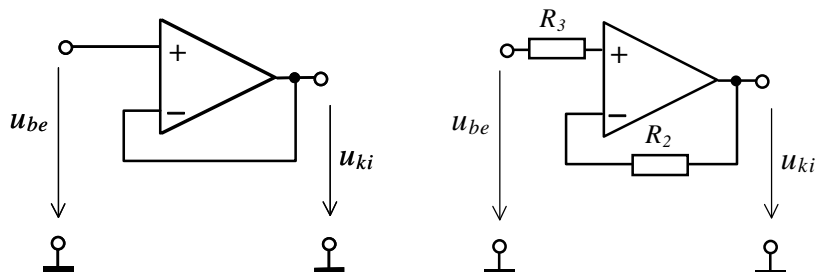
A matematikai átalakítások elvégzése után látható, hogy a kimeneti feszültség értéke

$$u_{ki} = 0, \quad (6.18)$$

tehát az R_3 ellenállás alkalmazásával a hibafeszültség megszüntethető.

6.1.3. Feszültségkövető erősítő

Feszültségkövető erősítő neminvertáló erősítóből származtatható $R_1 = \infty$ helyettesítéssel.



6.7. ábra. Feszültségkövető erősítő.

Mivel az u_v visszacsatolt feszültség megegyezik az u_{ki} kimeneti feszültséggel, ezért a visszacsatoló tag feszültségerősítése $B_u = 1$.

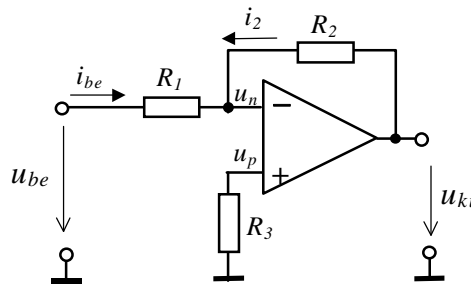
A feszültségkövető erősítő feszültségerősítése:

$$A'_u = \frac{1}{B_u} = 1, \quad (6.19)$$

a kimeneti feszültség megegyezik a bemeneti feszültséggel. A feszültségkövető erősítő feladata az impedancia illesztés.

6.1.4. Invertáló erősítő kapcsolás

A műveleti erősítő invertáló bemenetét az u_{be} aszimmetrikus bemeneti feszültség vezérli, az erősítő kapcsolás paramétereit a negatív visszacsatolás határozza meg. Az invertáló erősítő kapcsolási rajza a 6.6. ábrán látható.



6.8. ábra. Invertáló erősítő kapcsolás műveleti erősítővel.

Mivel az ideális erősítő erősítése végtelen nagynak feltételezhető, ebből adódik, hogy a szimmetrikus bemeneti feszültség $u_{bes} = 0$, a két bemenet földhöz képesti feszültsége megegyezik: $u_p = u_n$. Mivel $u_p = 0$, ezért $u_n = 0$, az R_3 ellenálláson nem folyik áram, a kapcsolásnak ez a pontja *virtuális földponton* van.

Az ideális erősítő bemeneti ellenállása végtelen nagy, így a műveleti erősítőbe nem folyik be áram: $i_p = i_n = 0$, ezért az i_{be} bemeneti áram a visszacsatoló ellenállás áramával megegyezik: $i_{be} = -i_2$.

A bemeneti áram:

$$i_{be} = \frac{u_{be}}{R_1}. \quad (6.20)$$

A visszacsatoló ellenálláson folyó áram:

$$i_2 = \frac{u_{ki}}{R_2}. \quad (6.21)$$

Mivel $i_{be} = -i_2$, ezért

$$\frac{u_{be}}{R_1} = -\frac{u_{ki}}{R_2}. \quad (6.22)$$

Ebből az összefüggésből a kapcsolás eredő feszültségerősítése:

$$A'_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (6.23)$$

A negatív előjel utal arra, hogy a kimeneti feszültség ellentétes előjelű a bemeneti feszültséghez képest.

Az invertáló erősítő bemeneti ellenállása:

$$R_{be} = \frac{u_{be}}{i_{be}} = R_1, \quad (6.24)$$

a kimeneti ellenállása pedig

$$R_{ki} = 0 \quad (6.25)$$

értékű.