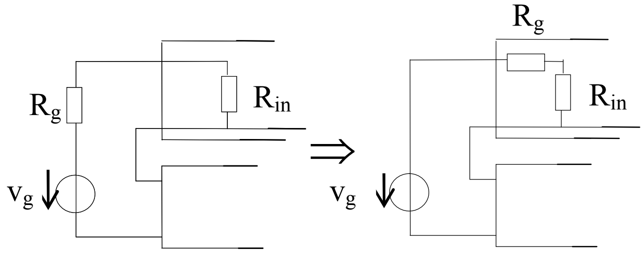
Ha $R_g \neq 0$, akkor $R_g$ –t az erősítőbe tolva a számítást visszavezetjük az $R_g = 0$ esetre (lásd sz ábrát): az erősítő $A_{uü}$-jét módosítani kell az erősítő bemenetén létrejött leosztással: $a_{be}A_{uü}$, ahol:

$A_{be} = \dfrac{R_{be}}{R_g + R_{be}}$).

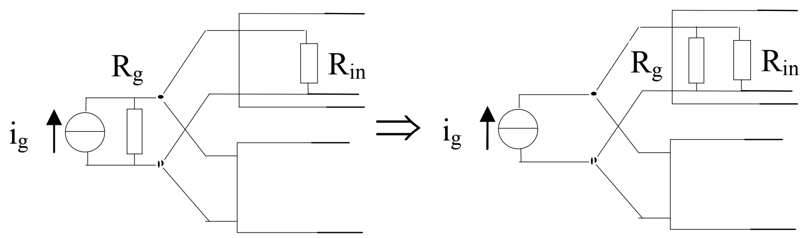



Ezzel:

$$\boxed{R_{ki}^{*} = \frac{R_{ki}}{1 + a_{be}H_{ü}}}$$

Áram-visszacsatolásoknál: $\boxed{R_{ki}^{*} = R_{ki}(1 + a_{be}H_r)}$

ahol $H_r$ a rövidzárási átviteli jellemzővel számított hurokerősítés. A párhuzamos visszacsatolásoknál a bemeneti osztásarány áramosztó képlet szerint alakul: $a_{be} = \dfrac{R_g}{R_g + R_{be}}$ (lásd az alábbi ábrát).

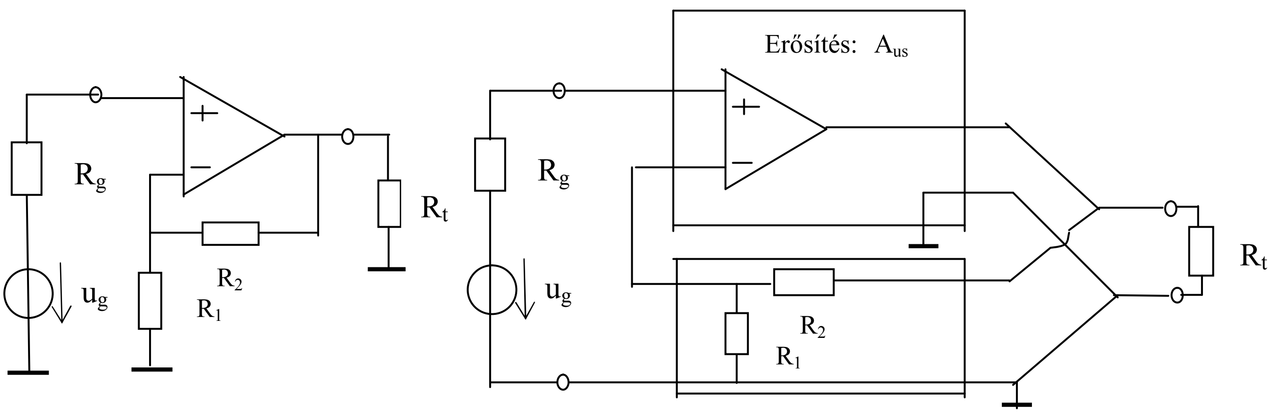


**MEGJEGYZÉSEK**:

## 1. SZÁMÍTÁSI ÖSSZEFÜGGÉSEK ÖSSZEFOGLALÁSA

| H ↘ | FESZÜLTSÉG | ÁRAM | $R^*_{be}$ | $a_{be}$ |
|---|---|---|---|---|
| SOROS<br>$A^*_u = \dfrac{A_u}{1+H}$<br>$Y^*_A = \dfrac{Y_A}{1+H}$<br>$Z^*_A = Z_A; A^*_i = A_i$ | $H = A_u \beta_u$ | $H = Y_A Z_\beta$ | $R_{be}(1+H)$ | $a_{be} = \dfrac{R_{be}}{R_g + R_{be}}$ |
| PÁRHUZAMOS<br>$Z^*_A = \dfrac{Z_A}{1+H}$<br>$A^*_i = \dfrac{A_i}{1+H}$<br>$A^*_u = A_u; Y^*_A = Y_A$ | $H = Z_A Y_\beta$ | $H = A_i \beta_i$ | $\dfrac{R_{be}}{1+H}$ | $a_{be} = \dfrac{R_g}{R_g + R_{be}}$ |
| $R^*_{ki}$ | $\dfrac{R_{ki}}{1+a_{be}H_ü}$<br>S-F: $H_ü = A_{uü}\beta$<br>P-F: $H_ü = Z_{Aü}Y_\beta$ | $R_{ki}(1+a_{be}H_r)$<br>S-Á:<br>$H_r = Y_{Ar}Z_\beta$<br>P-Á: $H_r = A_{ir}\beta_i$ | - | - |

**2.** A műveleti erősítő nem-invertáló alapkapcsolása tulajdonképpen szintén soros feszültség-visszacsatolás (lásd az ábrát).




A visszacsatoló hálózat ugyan nem ideális, azonban az erősítő paraméterei (végtelen bemeneti ellenállás, nulla kimeneti ellenállás) ezzel egyenértékű a helyzetet teremtenek, ezért használhatók az ideális visszacsatoló tagra levezetett képletek.

$$A^*_u = \frac{A_{us}}{1+A_{us}\beta_u} = \frac{1}{\beta_u} = \frac{R_1+R_2}{R_1}, \quad \text{ha} \quad A_{us} \to \infty, \quad \text{és ahol } \beta_u = \frac{R_1}{R_1+R_2}.$$

$$R^*_{be} = R_{be}(1+H) \to \infty$$

$$R^*_{ki} = \frac{R_{ki}}{1+a_{be}H_ü} \to 0 \quad (a_{be} = \frac{R_{be}}{R_g+R_{be}} = 1, \text{ mert } R_{be} = \infty).$$

**Számpéldák a soros feszültség-visszacsatolásra**. (**Gyakorlat**)

**#1.**

Az adott aszimmetrikus erősítő paraméterei: $A_{uü} = 160$, $R_{be} = 10$ k, $R_{ki} = 1$ k; lezárások: $R_g = 1$ k, $R_t = 15$ k.
Előírt paraméterek: $A_u^* = 10$, $R_{be}^* \rangle\ 100$ k, $R_{ki}^* \langle\ 0{,}15$ k. (Cél: ne legyen nagy bemeneti és kimeneti leosztás.)
Feladatok: a.) a szükséges vcs típusa; b.) ideális vissza csatoló tag esetén annak átviteli tényezője; c.) az előírt paraméterek ellenőrzése.

**Megoldás**:

$R_{be}^* \rangle\ R_{be} \rightarrow$ soros visszacsatolás kell;
$R_{ki}^* \langle\ R_{ki} \rightarrow$ feszültség-visszacsatolás kell,
tehát az alkalmazandó kapcsolás: soros feszültség-visszacsatolás (lásd 13. oldal).

$$A_u = A_{uü}\frac{R_t}{R_{ki}+R_t} = 160\frac{15}{1+15} = 150$$

$$\frac{A_u^*}{A_u} = \frac{1}{1+H} = \frac{10}{150} \quad \rightarrow \quad H = 14 \; és \; \beta = \frac{H}{A_u} = \frac{14}{150}$$

$$R_{be}^* = R_{be}(1+H) = 10(1+14) = 150k \quad O.K.$$

$$R_{ki}^* = \frac{R_{ki}}{1+a_{be}A_{uü}\beta} = \frac{1}{1+\frac{10}{11}150\frac{14}{150}} = ... = 0{,}073k \quad O.K.$$

$$ahol \quad a_{be} = \frac{R_{be}}{R_g+R_{be}} = \frac{10}{1+10} = \frac{10}{11}$$

**#2.**

Egy aszimmetrikus erősítő adatai: $R_{be} = 9$ k, $R_{ki} = 0{,}5\ R_t$ . Az erősítőt soros feszültség-visszacsatolással látjuk el.
Mérve a vcs-t erősítő kimeneti ellenállását: $R_{g1} = 1$ k esetén $R_{ki1}^* = 1$ k,
$R_{g2} = 13{,}5$ k esetén $R_{ki2}^* = 2$ k.
Kérdés: $R_{ki}$, $R_{be}^* = ?$

**Megoldás:**

$$1 = \frac{R_{ki}}{1+\frac{9}{10}H_ü} \text{ ahol } a_{be1} = \frac{9}{1+9} = \frac{9}{10}$$

$$2 = \frac{R_{ki}}{1+0{,}4H_ü} \text{ ahol } a_{be2} = \frac{9}{13{,}5+9} = 0{,}4$$

$$\text{Megoldva:} \quad H_ü = 10 \quad \text{amivel:} \quad A_{uü} = \frac{H_ü}{\beta} = \frac{10}{\beta} \quad \text{és} \quad R_{ki} = 10k. \quad \text{Ezzel:}$$

$$A_u = A_{uü}\frac{R_t}{R_{ki}+R_t} = \frac{10}{\beta}\cdot\frac{R_t}{0{,}5R_t+R_t} = \frac{2\cdot 10}{3\beta}$$

$$H = A_u\beta = \frac{2}{3}10 \quad \text{Amivel:}$$

$$R_{be}^* = (1+H)R_{be} = (1+\frac{2}{3}10)9 = 69k$$

## Egypólusú egyenfeszültség-erősítők negatív visszacsatolása

A visszacsatolatlan erősítő erősítése:

$$A = A_0 \frac{1}{1+\frac{s}{\omega_p}}$$

Feltétel: a visszacsatoló hálózat ideális és valós átviteli tényezőjű (β).
A zárt hurkú erősítés:

$$A^* = \frac{A}{1+A\beta} = ... = \frac{A_0}{1+A_0\beta} \frac{1}{1+\frac{s}{\omega_p(1+A_0\beta)}} = A_0^* \frac{1}{1+\frac{s}{\omega_p^*}},$$

$$\text{ahol} \quad A_0^* = \frac{A_0}{1+A_0\beta} \quad \text{és} \quad \omega_p^* = \omega_p(1+A_0\beta),$$

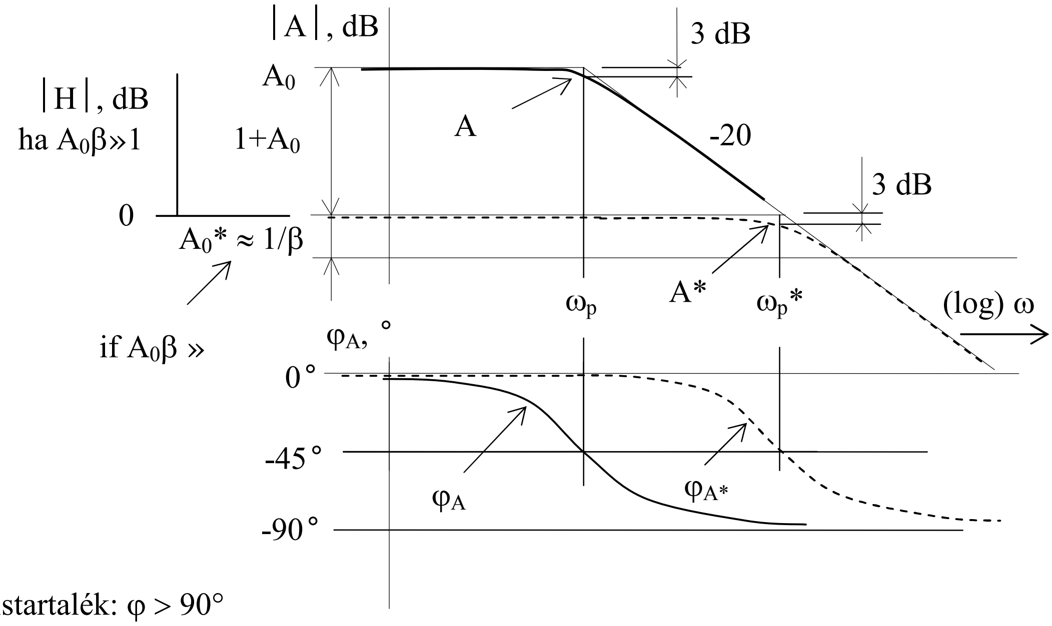
bevezetve a DC hurokerősítést, $H_0 = A_0\beta$-t:

$$A_0^* = \frac{A_0}{1+H_0} \quad \text{és} \quad \omega_p^* = \omega_p(1+H_0).$$

A nyílt hurkú erősítés és a zárt hurkú erősítés matematikai kifejezése azonos felépítésű. A DC erősítés ugyanolyan arányban csökken, mint amilyen arányban a törésponti frekvencia nő. Az úgynevezett erősítés – sávszélesség szorzat (GBP = Gain Bandwidth Product), más néven sávjóság változatlan marad:

$$A_0\omega_p = A_0^*\omega_p^*$$

Bode diagramon:




A fázistartalék: φ > 90°

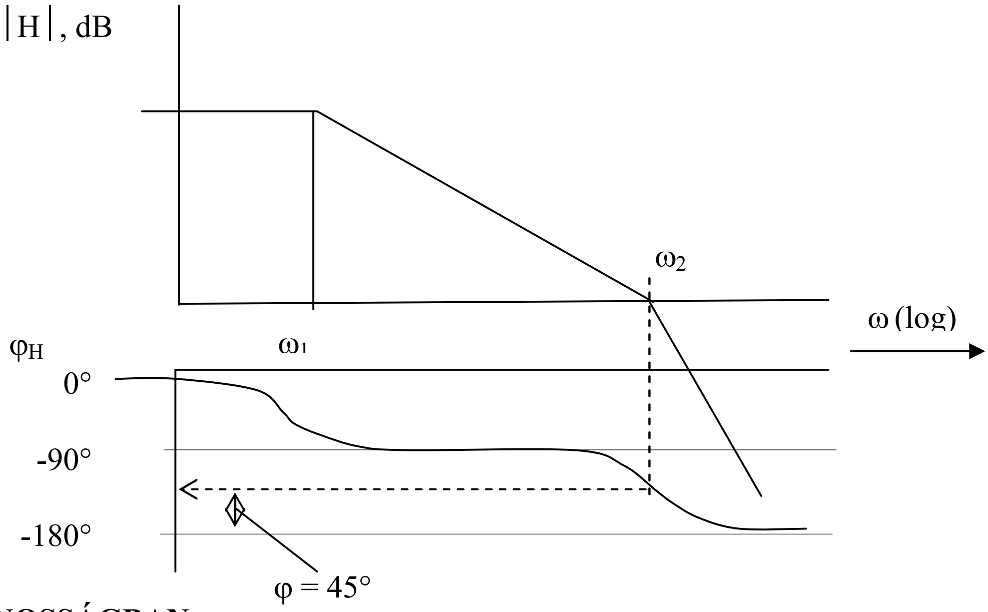
Példa az egypólusú erősítőre: 741 típusú integrált műveleti erősítő, amelynél:

$A_0 = 106$ dB és $\omega_p = 2\pi*5$ r/s

# Kétpólusú erősítők negatív visszacsatolása

**BEVEZETÉS**

Két töréspontos hurokerősítés Bode diagramja, ha a fázistartalék φ = 45°. (A gyakorlat számára fontos eset.)
Feltevés: $\omega_2 >> \omega_1$




**ÁLTALÁNOSSÁGBAN**

A nyílt hurkú erősítés:

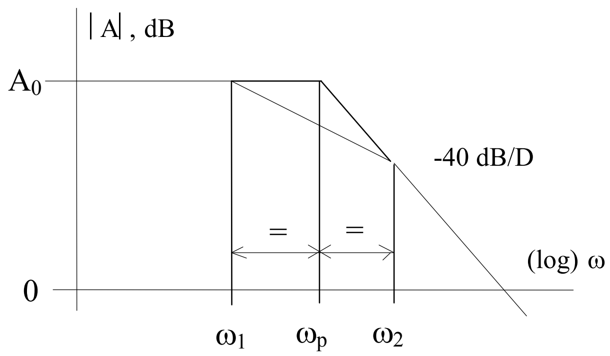
$$A = A_0 \frac{1}{\left(1+\frac{s}{\omega_1}\right)\left(1+\frac{s}{\omega_2}\right)} = A_0 \frac{1}{1+\left(\frac{1}{\omega_1}+\frac{1}{\omega_2}\right)s+\frac{1}{\omega_1\omega_2}s^2}$$

Feltétel: a visszacsatoló hálózat ideális és valós átviteli tényezőjű (β).

A zárt hurkú erősítés (bevezetve a DC hurokerősítést, $H_0 = A_0\beta$-t):

$$A^* = \frac{A}{1+A\beta} = \ldots = \frac{A_0}{1+H_0} \frac{1}{1+\frac{1}{1+H_0}\left(\frac{1}{\omega_1}+\frac{1}{\omega_2}\right)s+\frac{1}{(1+H_0)\omega_1\omega_2}s^2}$$

A matematikai struktúra itt sem változik. A nyílt hurkú erősítésben $\omega_1$ és $\omega_2$ helyett két másik állandót ($Q_p$-t é.s $\omega_p$-t) bevezetve a következő alakot kapjuk (ugyanez az alakja a zárthurkú erősítésnek is az állandókat itt $Q_p^*$ -gal és $\omega_p^*$-gal jelölve):




$$A = A_0 \frac{1}{1+\frac{1}{Q_p\omega_p}s+\frac{1}{\omega_p^2}s^2}$$

ahol $\omega_p$ az ún. pólusfrekvencia és $Q_p$ a pólusjósági tényező. Ezeket az állandókat a következőképpen változtatja meg a visszacsatolás:

$$\omega_p = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \qquad \text{és} \qquad \omega_p^* = \omega_p \sqrt{1 + H_0}$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2}}{\omega_1 + \omega_2} \qquad \text{és} \qquad Q_p^* = Q_p \sqrt{1 + H_0}$$

A nyílt hurkú esetben $Q_p$ lehetséges legnagyobb értéke: 0,5, de a zárthurkú esetben ennél nagyobb is lehet. A következő, minőségileg különböző eseteket különböztetjük meg:

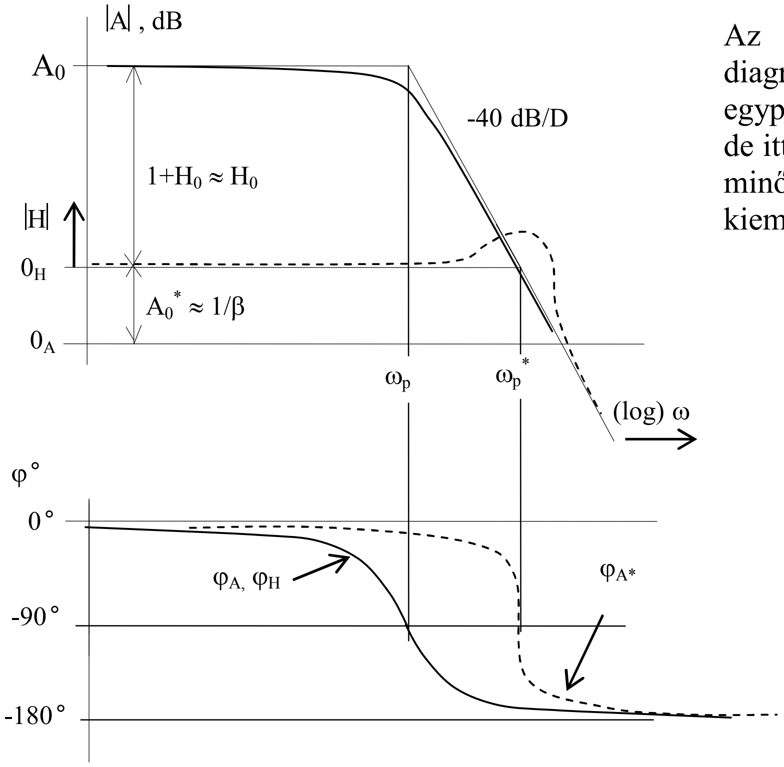
$<$ 2 valós pólus

$Q_p^* = \frac{1}{2}$ kétszeres valós pólus $<$ monoton csökkenő

$>$ konjugált komplex pólus-pár (ennél): $Q_p^* = \frac{1}{\sqrt{2}}$ maximálisan lapos

$>$ kiemeléses

A Bode diagram:




Az aszimptotikus Bode diagramok hasonlóak az egypólusú esetnél felrajzoltakhoz, de itt a tényleges frekvenciamenet minőségileg különbözhet (lásd a kiemelést).