

## 6. Műveleti erősítők

Napjainkban a legelterjedtebben használatos univerzális erősítő a *műveleti erősítő*. A többfokozatú erősítő egy tokban van *összeintegrálva*. Felépítése, paraméterei széles felhasználási területet biztosítanak.

Egy adott feladat megvalósításához a felhasználónak csak néhány beállító elemmel kell kiegészíteni az alapáramkört.

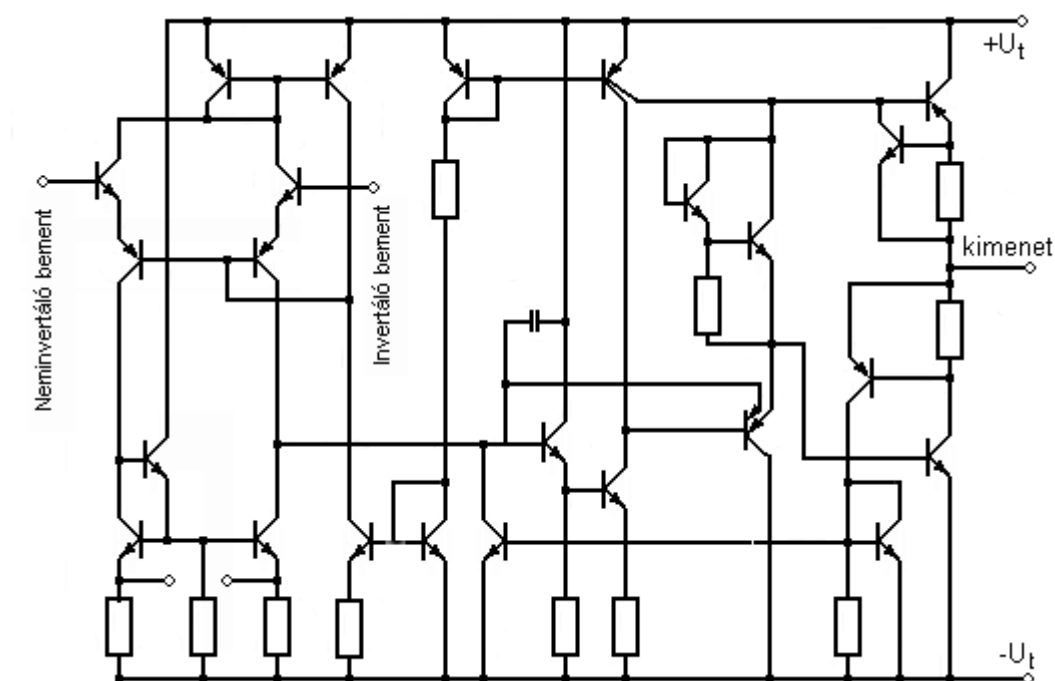


Az első fokozat a zajelnyomás érdekében szimmetrikus felépítésű (két bemenetű). A végerősítő fokozat azonban aszimmetrikus és egy kimenete van. A két fokozatot illeszti össze a szinteltoló fokozat.

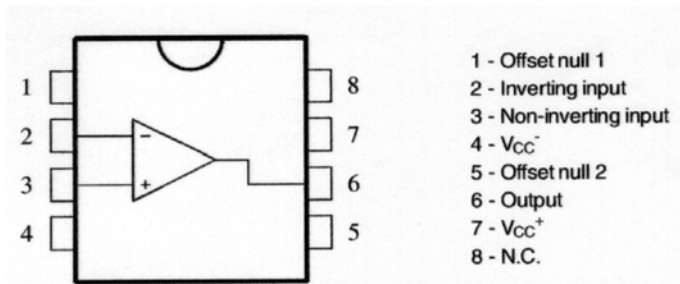
Az erősítőnek bemeneteinek tulajdonsága:

- A '+' -al jelölt bemenet neve *nem invertáló bemenet*, mert az ide kapcsolt jel a kimeneten a bemenetivel azonos fázisban jelenik meg.
- A '-' -al jelölt bemenet neve *invertáló bemenet*, mert az ide kapcsolt jel a kimeneten a bemenetihez képest 180 fokos fázisfordítással jelenik meg.
- A bemenetekre egyidejűleg is kapcsolhatunk jelet, ekkor a kimeneten a jelek előjeles különbségét kapjuk.

Egy nagyon elterjedt műveleti erősítő ( $\mu A741$ ) kapcsolása:



A  $\mu A741$  típusú műveleti erősítő tokozása és lábkiosztása:

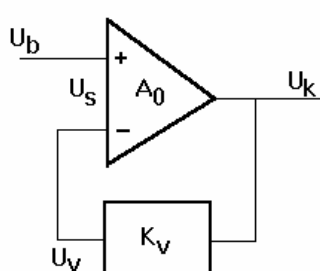


A  $\mu A741$  típusú műveleti erősítő néhány jellegzetes adata összehasonlítva az ideális értékekkel:

		ideális érték	gyakorlati érték
feszültség erősítési tényező	$A_{uo}$	végtelen	$\geq 10^4$
sávszélesség	$\omega_f$	végtelen	10 Hz
közös alapú zajelnyomás	CMRR	végtelen	$\geq 70$ dB
bemeneti ellenállás	$R_{be}$	végtelen	$\geq 10$ M $\Omega$
kimeneti ellenállás	$R_{ki}$	nulla	$< 500\Omega$
tápfeszültség	$U_{TT}$		$\pm 15$ V
kivezérelhetőség	$U_{kimax}$		$\pm 13$ V
terhelhetőség	$I_{kimax}$		$\pm 20$ mA
Offset fesz. és áram	$U_{bo}, I_{bo}$		$< 10$ mV, $< 2$ nA

### 6.1 Műveleti erősítők negatív visszacsatolása

A műveleti erősítőt lineáris erősítőként mindig negatív visszacsatolással használjuk.



$$U_s = U_{be} - U_v$$

$$U_{ki} = A_0 U_s$$

$$U_v = K_v U_{ki}$$

$$U_{ki} = A_0 (U_{be} - K_v U_{ki}) = A_0 U_{be} - A_0 K_v U_{ki}$$

$$U_{ki} (1 + A_0 K_v) = A_0 U_{be}$$

Ebből kirendezve a visszacsatolt erősítő eredő erősítése:

$$A_v = \frac{U_k}{U_b} = \frac{A_0}{1 + A_0 K_v}$$

Az  $A_0 K_v = H$  az erősítő nyílthurkú erősítése.

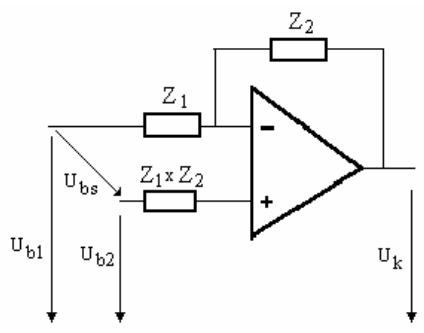
Mivel az  $A_0 > 10^4$ , így az  $A_0 K_v \gg 1$  feltétel könnyen teljesíthető. Ekkor a visszacsatolt erősítő eredő erősítését csak a visszacsatoló áramkör határozza meg:

$$A_v \cong \frac{1}{K_v}$$

A negatív visszacsatolás további eredménye, hogy a visszacsatolt erősítő stabilitása szintén csak a visszacsatoló áramkör stabilitásától függ:

$$\frac{\Delta A_v}{A_v} \cong \frac{\Delta K_v}{K_v}$$

A műveleti erősítő visszacsatoló tagjai ( $Z_1$  és  $Z_2$ ) valamint a be- és kimeneti jelek általában komplex mennyiségek.

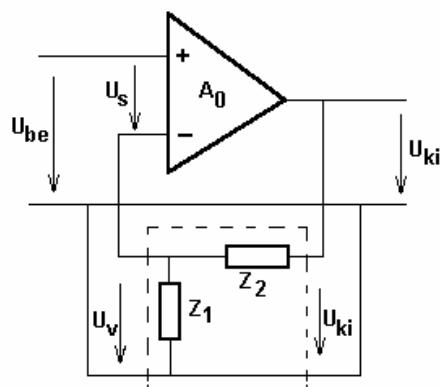


A két aszimmetrikus bementi jel különbsége az a szimmetrikus bementi jelösszetevő, amelyet az erősítő felerősít:

$$\vec{u}_{bs} = \vec{u}_{b1} - \vec{u}_{b2} \text{ és } \vec{u}_k = A_v \vec{u}_{bs}$$

### 6.1.1 Neminvertáló erősítő

Neminvertáló erősítőt kapunk, ha a bementek közül csak a *neminvertáló* bementet használjuk:



A  $K_v$  visszacsatoló áramkör egy osztó. Az ábra alapján felírható egyenletek:

$$U_v = U_{ki} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$U_{ki} = A_0 U_s \quad \text{és} \quad U_s = U_{be} - U_v$$

$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{A_0}{1 + A_0 \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}} \quad \text{legyen} \quad K_v = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

ha  $A_0 \gg 1$  akkor

$$A_v \approx \frac{1}{K_v} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

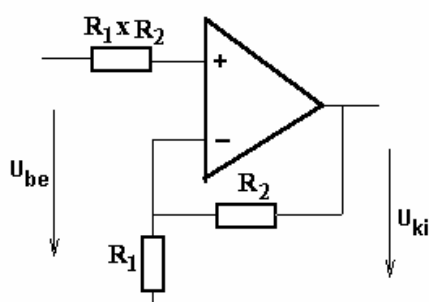
Tehát a negatív visszacsatolású neminvertáló erősítő erősítése a két visszacsatoló impedanciával állítható be:

$$A_v \approx 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

A negatív visszacsatolás az erősítő be- és kimeneti impedanciáját is előnyösen változtatja meg.

$$Z_{be} = (1 + H)Z_{be0} \quad \text{és} \quad Z_{ki} = \frac{Z_{kio}}{1 + H}$$

Lineáris (proporcionális) erősítőként, az impedanciák helyett ellenállások alkalmazhatók



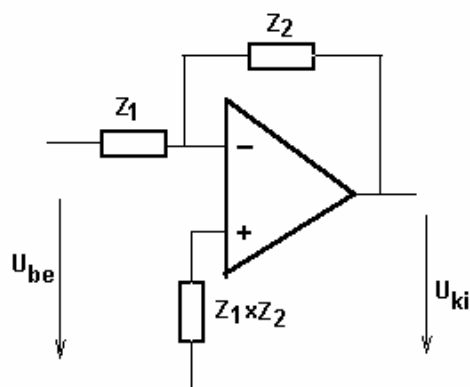
$$Z_1 \Rightarrow R_1 \quad \text{és} \quad Z_2 \Rightarrow R_2$$

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Az  $R_1 \times R_2$  ellenállás szerepe a külső szimmetria helyreállítása, értéke az erősítést nem befolyásolja!

### 6.1.2 Invertáló erősítő

A szimmetrikus bementek közül csak az *invertáló* bementet használjuk:



$$\frac{U_{be} - U_s}{Z_1} = - \frac{U_{ki} - U_s}{Z_2}$$

$$U_{ki} = -A_0 U_s \Rightarrow U_s = -\frac{U_{ki}}{A_0}$$

$$\frac{U_{be} - \frac{U_{ki}}{A_0}}{Z_1} = - \frac{U_{ki} - \frac{U_{ki}}{A_0}}{Z_2}$$

$$A_v = - \frac{U_{ki}}{U_{be}} = - \frac{A_0}{1 + (1 + A_0) \frac{Z_1}{Z_2}}$$

ha  $A_0 \gg 1$  akkor

$$A_v \approx - \frac{A_0}{1 + A_0 \frac{Z_1}{Z_2}} \approx - \frac{A_0}{A_0 \frac{Z_1}{Z_2}} \quad \text{felismerhető, hogy ekkor: } K_v = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Az erősítő erősítése:

$$A_v \approx - \frac{1}{K_v} \approx - \frac{Z_2}{Z_1} \quad \text{A kapcsolás } 180^\circ \text{-os fázist fordít!}$$

Lineáris (proporcionális) erősítőként, az impedanciák helyett ellenállások alkalmazhatók ( $Z_1 \Rightarrow R_1$  és  $Z_2 \Rightarrow R_2$ ).

$$A_v \approx - \frac{R_2}{R_1}$$

Az  $R_1 \times R_2$  ellenállás szerepe a külső szimmetria helyreállítása, értéke az erősítést nem befolyásolja!

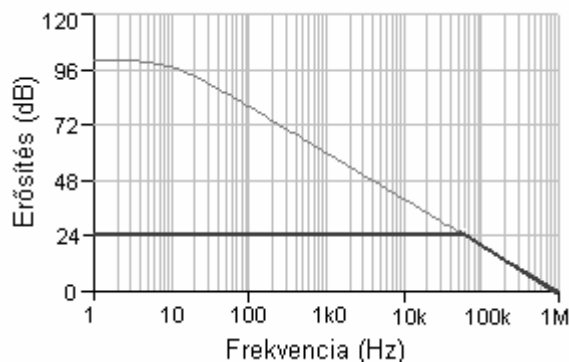
Levezetés nélkül:

$$Z_{be} \approx Z_1 \quad \text{és} \quad Z_{ki} = \frac{Z_{ki0}}{1 + H}$$

## 6.2 Negatív visszacsatolás műveleti erősítő frekvencia függvénye

A visszacsatolás nélküli műveleti erősítő  $A_0$  erősítése csak szűk frekvencia tartományban érvényes. A felső határfrekvencia NVCS nélkül meglepően alacsony ( kb. 10 Hz). Vágási meredeksége:  $20\text{dB} / \text{dekád}$ .

Ahogy az erősítés csökken a NVCS hatására, úgy felső határfrekvencia is megnő:

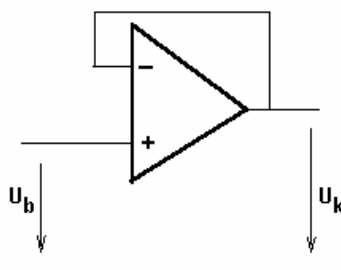


Az összefüggés (evezetés nélkül):  $f_{vH} \cong f_{0H} \frac{A_0}{A_v}$

A fenti karakterisztikából leolvasható, hogy miközben például az erősítés  $98dB$ -ről  $24dB$ -re csökken, a felső határfrekvencia  $10Hz$ -ről  $60kHz$ -re növekszik.

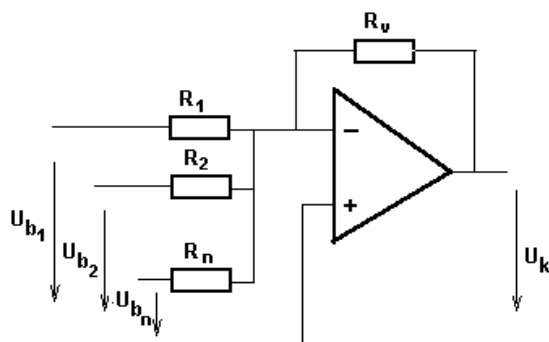
### 6.3 Feszültségkövető áramkör

Neminvertáló típusú erősítő. Erősítési tényezője  $A_v \approx +1$ . Alkalmazását a nagy bementi és kis kimeneti ellenállása indokolja.



### 6.4 Összeadó áramkör

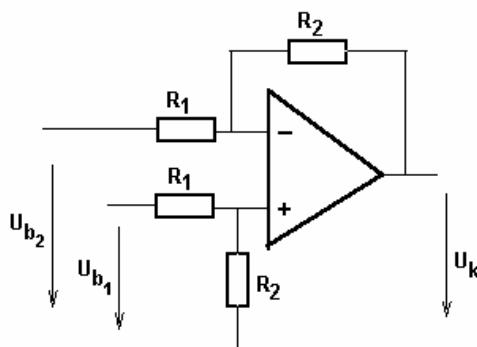
Időfüggvények folyamatos (előjelhelyes) összeadására alkalmas. A bementek száma elvileg korlátlan. A bementi jelek alakjára semmiféle megkötés nincs, de ügyelni kell arra, hogy a kimeneti jel soha ne vigye telítésbe az erősítőt.



$$U_k = - \left[ \frac{R_v}{R_1} U_{b1} + \frac{R_v}{R_2} U_{b2} + \dots + \frac{R_v}{R_n} U_{bn} \right]$$

## 6.5 Kivonó áramkör

Időfüggvények folyamatos (előjelhelyes) kivonására alkalmas.

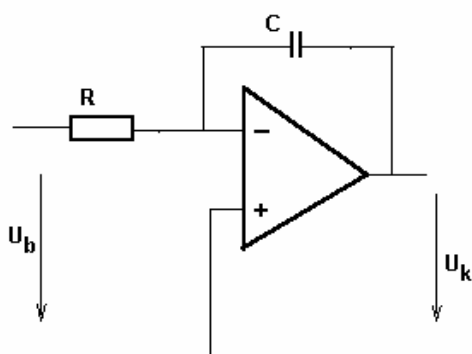


$$U_k = \frac{R_2}{R_1}(U_{b1} - U_{b2})$$

A bementi jelek alakjára semmiféle megkötés nincs, de ügyelni kell arra, hogy a kimeneti jel soha ne vigye telítésbe az erősítőt.

## 6.6 Integráló áramkör (ideális)

A visszacsatoló ágban frekvenciafüggő elem, egy kondenzátor van:



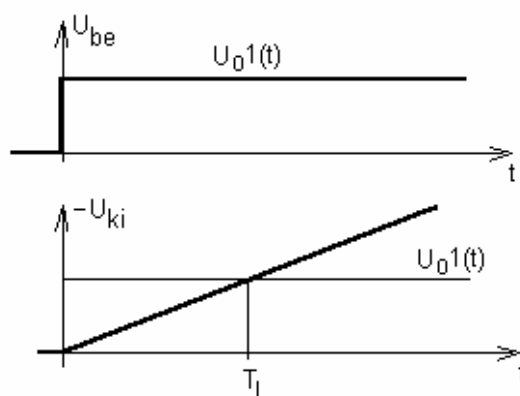
Időben folytonos jelek integrálására alkalmas.

$$U_{ki} = -\frac{1}{T_I} \int U_{be}(t) dt$$

Ahol:  $T_I = RC$  integrálási időállandó

Az egységugrás alakú bemenőjelre adott válaszfüggvény látható a diagramon.

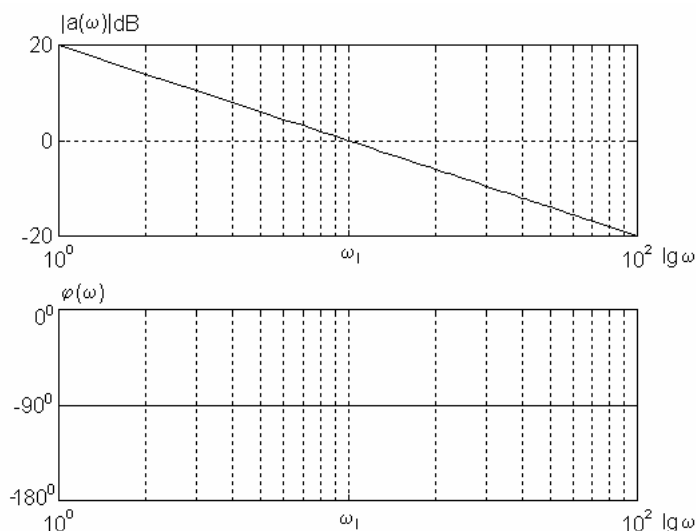
A lineárisan növekvő kimenőjel  $T_I$  időpontban éri el a konstans  $U_0$  bementi jel nagyságát.



Bode-diagramja:

$$A(\omega) = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{1}{j\omega C} = -\frac{1}{j\omega RC} = -\frac{1}{j\omega T_i} = -\frac{1}{j\frac{\omega}{\omega_i}} \quad \text{ahol } \omega_i = \frac{1}{T_i}$$

$$|a(\omega)| = -20 \lg \frac{\omega}{\omega_i} \quad \text{és} \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$$

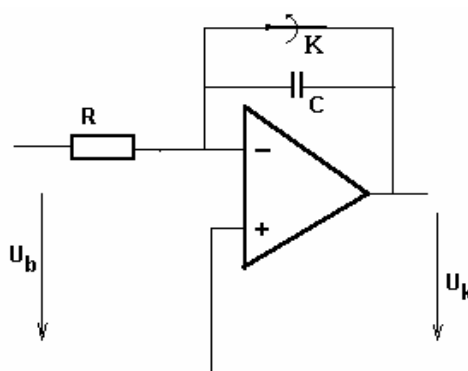


Az ideális integrátor Bode-diagramjából látható, hogy az áramkör erősítése frekvenciafüggő és  $\omega = 0$  frekvencián végtelen nagy.

Ezért nulla bemenőjel esetén is előfordulhat, hogy legkisebb offset hiba hatására az ideális integrátor azt konstans bemenőjelként integrálva maximális kimeneti jelet ad.

Fenti hiba kiküszöbölésére két megoldást alkalmaznak.

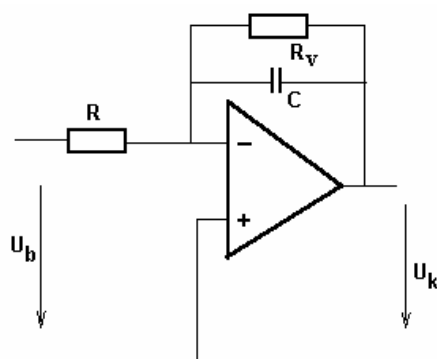
a.) Ideális integrátor kapcsolóval



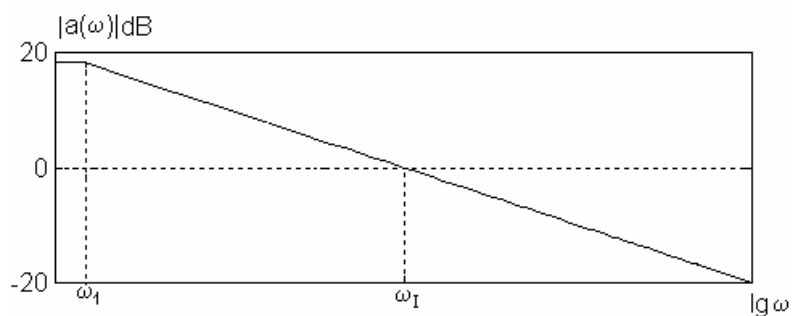
Az integrátor kondenzátorát áthidaló zárt  $K$  kapcsoló az integrátor működését mind addig megakadályozza, amíg a START kapcsoló ki nem nyit.



### b.) Valóságos integrátor



$T_i = RC$  integrálási időállandó továbbra is érvényes, de a Bode-diagramból látható, hogy  $R_v$  ellenállás hatására  $\omega = 0$  és  $\omega_1 = \frac{1}{R_v C}$  frekvencián már nem végtelen az erősítés. Így az esetleges offset hiba már nem viszi telítésbe az integrátort.

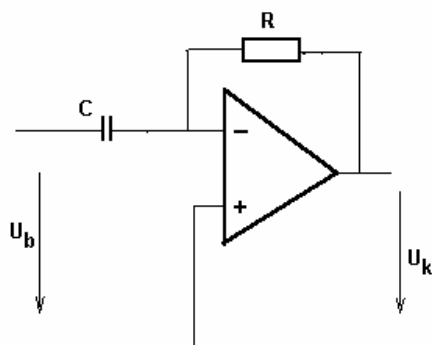


Az integrátorok leggyakoribb alkalmazásai:

- lineárisan növekvő időfüggvény előállítás,
- lassan változó hasznos jelekre szuperponálódott csipkeszerű zavarjelek szűrése (simítása).

### 6.7 Differenciátor

A differenciáló áramkört nagyon ritkán alkalmazzák, mert a hirtelen, ugrásszerű változásokat (a zavarjele nagy része ilyen) nagyon kiemeli és így az erősítő könnyen telítésbe megy.

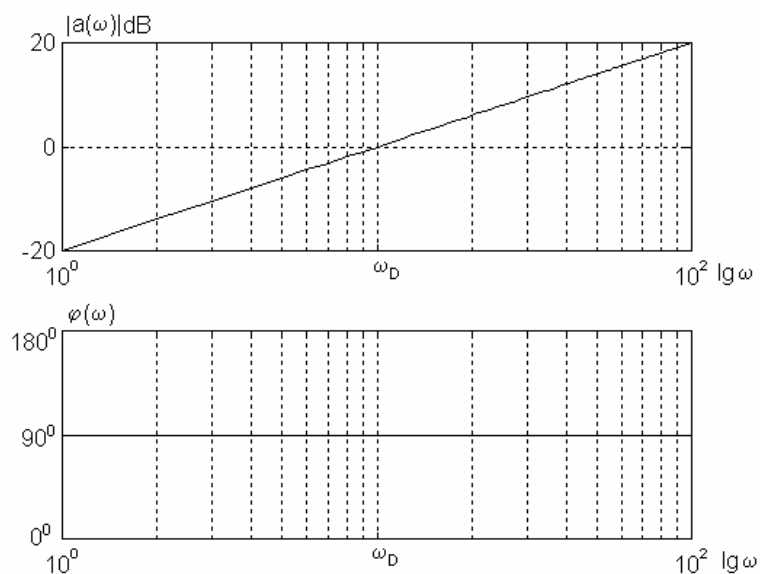


$$U_{ki} = -RC \frac{dU_{be}}{dt} = -T_D \frac{dU_{be}}{dt}$$

A Bode-diagramja:

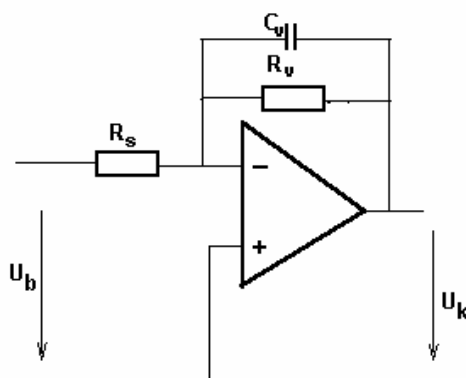
$$A(\omega) = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = -j\omega RC = -j\omega T_D = -j\frac{\omega}{\omega_D}$$

$$|a(\omega)| = -20 \lg \frac{\omega}{\omega_D} \quad \text{és} \quad \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}$$

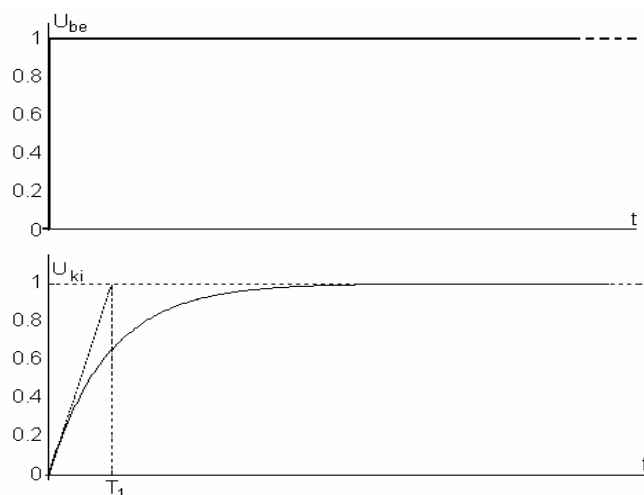


### 6.8 Késleltető áramkör (aluláteresztő szűrő):

A késleltető áramkör valójában aluláteresztő szűrő. A kapcsolás a valós integrátorra is hasonlít, de mások az elemek értékének arányai (lásd. Bode-diagramjuk).



A gyakorlatban egységugrás alakú bementi jelekkel használják. Ha az egységugrás nagysága  $U_0$ , akkor:



A levezetés nélkül:

$$U_k = -U_0 \frac{R_v}{R_s} \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_v C_v}} \right)$$

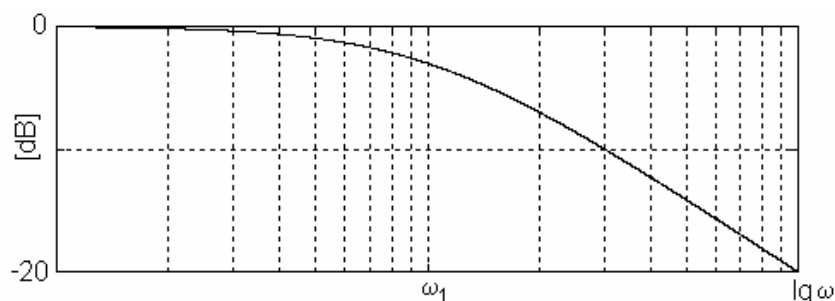
$T_1 = R_v C_v$  a késleltetés időállandója, és  $A_v = -\frac{R_v}{R_s}$  a késleltető erősítési tényezője.

$$U_k = A_v U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right)$$

A késleltető Bode-diagramja:

$$A_v(j\omega) = \frac{U_k(j\omega)}{U_b(j\omega)} = \frac{R_v \times \frac{1}{j\omega C}}{R_s} = \frac{R_v}{R_s} * \frac{1}{1 + j\omega RC} = A_v \frac{1}{1 + j\omega T_1} = A_v \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_1}}$$

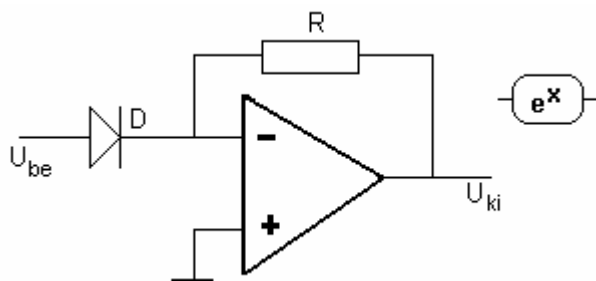
ahol  $A_v = \frac{R_v}{R_s}$  és  $\omega_1 = \frac{1}{T_1}$



A késleltető Bode-diagramja első látásra nagyon hasonlít a valós integrátor diagramjához. Vegyük azonban észre, hogy az  $\omega_1$  törésponti frekvencia értéke nagyságrendileg eltérő.

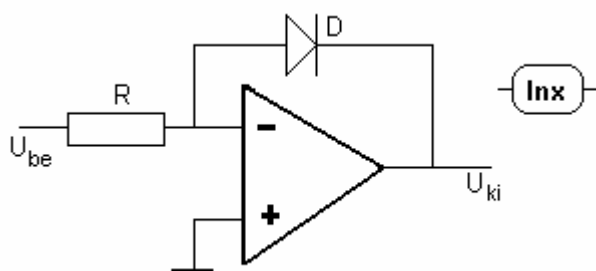
### 6.90 Exponenciális erősítő

Mint ismeretes, a félvezető dióda nyitóirányú karakterisztikája exponenciális. Ezt használhatjuk ki exponenciális erősítő építésére.



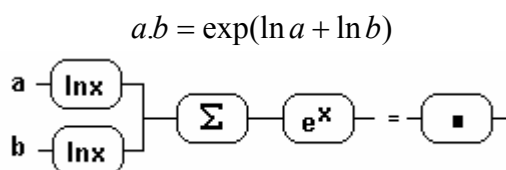
### 6.10 Logaritmikus erősítő

A visszacsatoló ágban inverz-hatás valósítható meg az soros ágéhoz képest. Így logaritmikus erősítő is építhető:

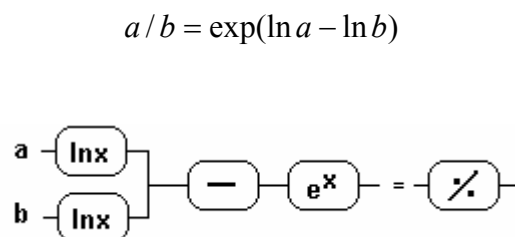


### 6.11 Műveletek alapkapcsolásokkal

- Analóg jelek előjeles szorzása:

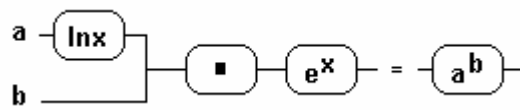


- Analóg jelek előjeles osztása



- Analóg jelek előjeles hatványozása

$$a^b = \exp(b \cdot \ln a)$$



- Analóg jelek hatványozása

$$\sqrt[b]{a} = \exp\left(\frac{\ln a}{b}\right)$$

