6. Műveleti erősítők

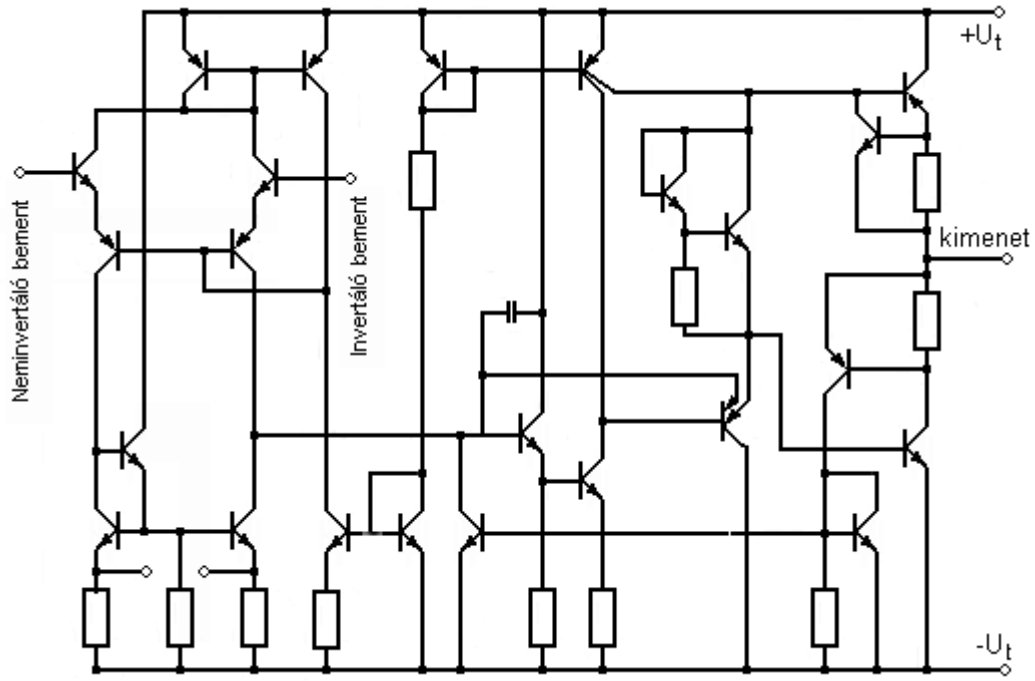
Napjainkban a legelterjedtebben használatos univerzális erősítő a *műveleti erősítő*. A többfokozatú erősítő egy tokban van összeintegrálva. Felépítése, paraméterei széles felhasználási területet biztosítanak.
Egy adott feladat megvalósításához a felhasználónak csak néhány beállító elemmel kell kiegészíteni az alapáramkört.



Az első fokozat a zajelnyomás érdekében két bemenetű, szimmetrikus felépítésű. A végerősítő fokozat azonban aszimmetrikus és egy kimenete van. A két fokozatot illeszti össze a szinteltoló fokozat.
Az erősítőnek bemenetéinek tulajdonsága:

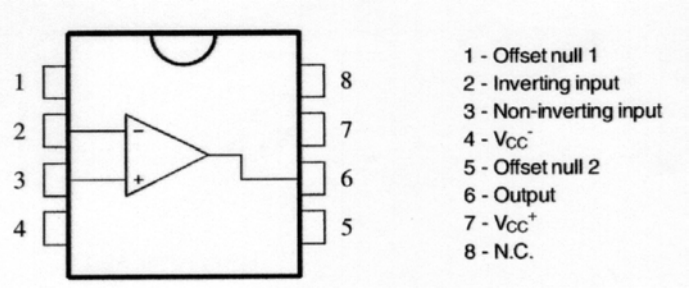
- A ‘+’ -al jelölt bemenet neve *nem invertáló bemenet*, mert az ide kapcsolt jel a kimeneten a bemenetivel azonos fázisban jelenik meg.
- A ‘-’ -al jelölt bemenet neve *invertáló bemenet*, mert az ide kapcsolt jel a kimeneten a bemenetihez képest 180 fokos fázisfordítással jelenik meg.
- A bemenetekre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

A $\mu A741$ típusú műveleti erősítő kapcsolása:



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



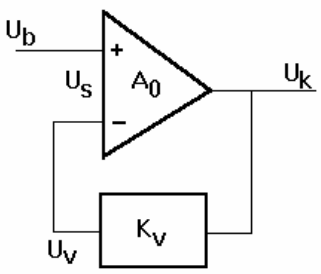


A $\mu A741$ típusú műveleti erősítő néhány jellegzetes adata összehasonlítva az ideális értékekkel:

		ideális érték	**gyakorlati érték**
feszültség erősítési tényező	A_{uo}	végtelen	$\geq 10^4$
sávszélesség	ω_f	végtelen	10 Hz
közös alapú zajelnyomás	CMRR	végtelen	≥ 70 dB
bemeneti ellenállás	R_{be}	végtelen	≥ 10 MΩ
kimeneti ellenállás	R_{ki}	nulla	< 500Ω
tápfeszültség	U_{TT}		±15 V
kivezérelhetőség	U_{kimax}		±13 V
terhelhetőség	I_{kimax}		±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.

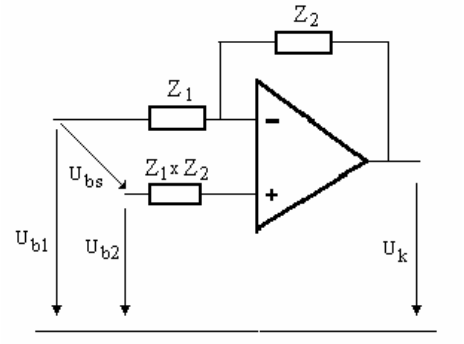
Mivel az $A_0 > 10^4$, így az $A_0K_v >> 1$ feltétel könnyen teljesíthető. Ekkor a visszacsatolt erősítő eredő erősítését csak a visszacsatoló áramkör határozza meg:

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

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

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

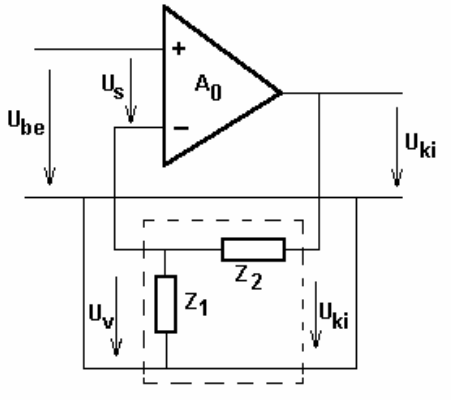
A műveleti erősítő visszacsatoló tagjai (Z_1 és Z_2) valamint a be- és kimenti jelek általában komplex mennyiségek.



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

6.1.1 Neminvertáló erősítő

A szimmetrikus bementek közül csak a *neminvertáló* bementet használjuk:



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

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

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

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

ha $A_0 >> 1$ akkor

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

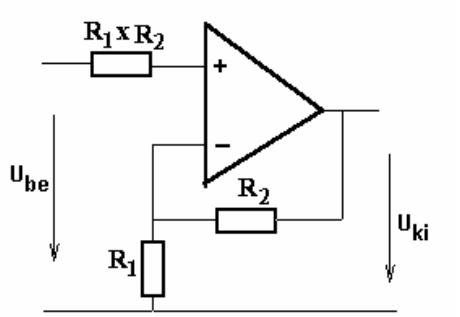
Tehát a negatív visszacsatolású neminvertáló erősítő erősítése a két visszacsatoló impedanciával állítható be:

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

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 impedenciák helyett ellenállások alkalmazhatók ($Z_1 \Rightarrow R_1$ és $Z_2 \Rightarrow R_2$).

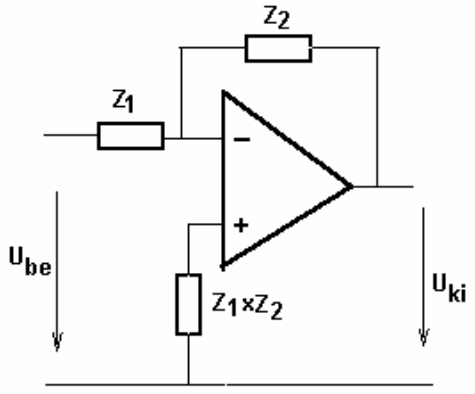


$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Az $R_1 x R_2$ 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:



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

$$U_{ki}=-A_0U_s \Rightarrow U_s-\frac{U_{ki}}{A_0}$$

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

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

ha $A_0 >> 1$ akkor

$$A_v \approx -\frac{A_0}{1+A_0\frac{Z_1}{Z_2}} \approx -\frac{A_0}{A_0\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Az erősítő erősítése:

$$A_v \approx -\frac{1}{K_v} \approx -\frac{Z_2}{Z_1}$$ A kapcsolás 180^0-os fázist fordít!

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

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

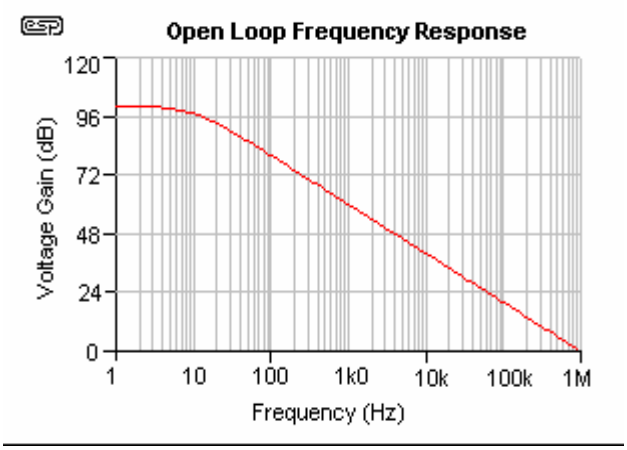
Az $R_1 x R_2$ ellenállás szerepe a külső szimmetria helyreállítása, értéke az erősítést nem befolyásolja!

Levezetés nélkül:

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

6.2 Negatív visszacsatolás műveleti erősítő frekvencia függvénye

A visszacsatolás nélküli műveleti erősítő A_0 erősítése csak szűk frekvencia tartományban érvényes. Ez a felső határfrekvencia meglepően alacsony (kb. 10 Hz)



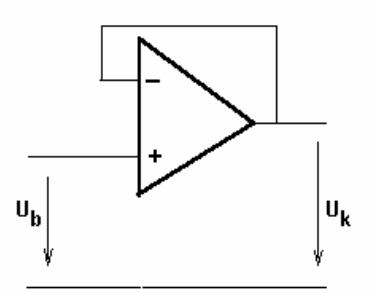
Levezetés nélkül:

$$f_{vH} \cong f_{0H} \frac{A_0}{A_v}$$

Látható, hogy a negatív visszacsatolás hatására amilyen arányban csökken az erősítési tényező, olyan mértékben nő az erősítő sávszélessége.

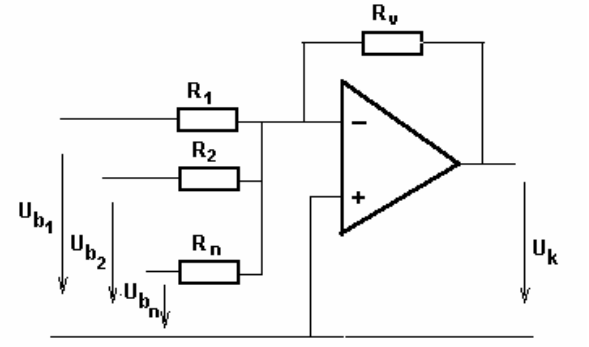
6.3 Feszültségkövető áramkör

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



6.4 Összeadó áramkör

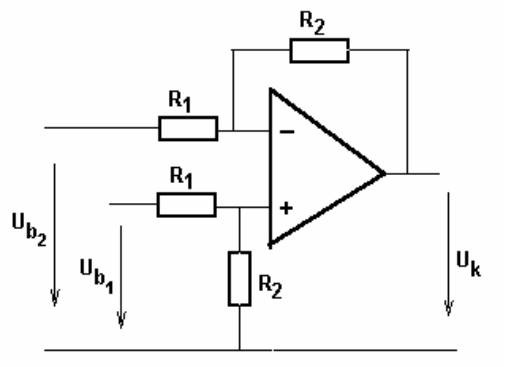
Időfüggvények folyamatos (előjelhelyes) összeadására alkalmas. A bementek száma elvileg korlátlan. A bementi jelek alakjára semmiféle megkötés nincs, de ügyelni kell arra, hogy a kimeneti jel soha ne vigye telítésbe az erősítőt.



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

6.5 Kivonó áramkör

Időfüggvények folyamatos (előjelhelyes) kivonására alkalmas.

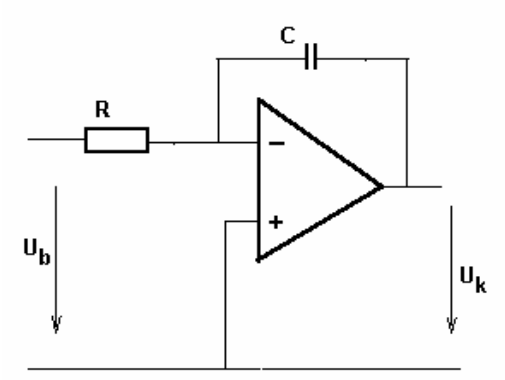


$$U_k = \frac{R_2}{R_1}(U_{b1} - U_{b2})$$

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:

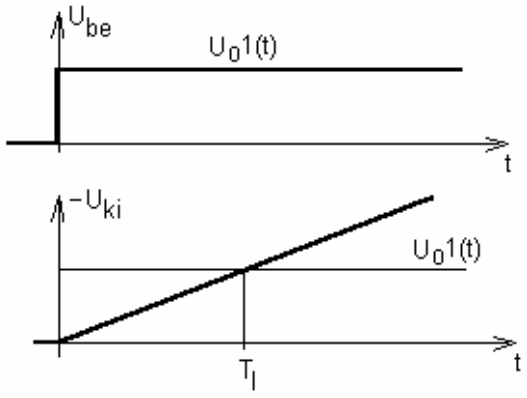


Időben folytonos jelek integrálására alkalmas.

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

Ahol: $T_I = RC$ integrálási időállandó

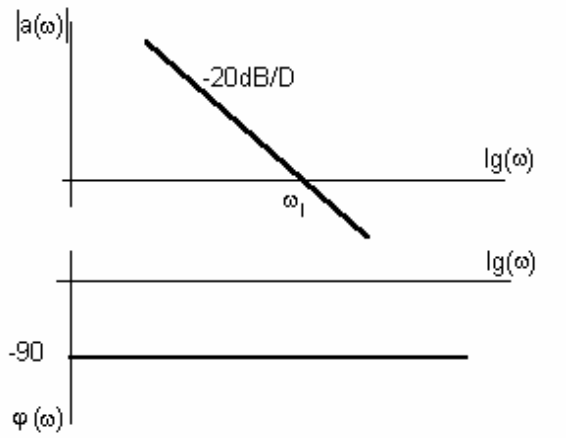
Az egységugrás alakú bemenőjelre adott válaszfüggvény látható a diagramon.
A lineárisan növekvő kimenőjel T_I időpontban éri el a konstans bementi jel nagyságát.



Bode-diagramja:

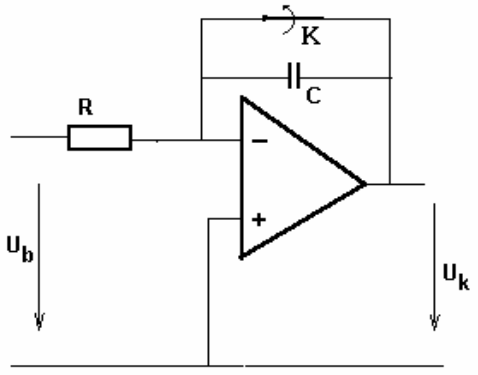
$$A(\omega) = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{\frac{1}{j\omega C}}{R} = -\frac{1}{j\omega RC} = -\frac{1}{j\omega T_I} = -\frac{1}{j\frac{\omega}{\omega_I}} \quad \text{ahol } \omega_I = \frac{1}{T_I}$$

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



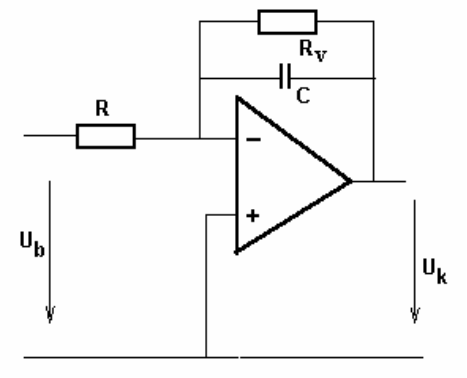
Az ideális integrátor Bode-diagramjából látható, hogy az áramkör erősítése frekvenciafüggő és $\omega = 0$ frekvencián végtelen nagy.
Ezért nulla bemenőjel esetén is előfordulhat, hogy legkisebb offset hiba hatására az ideális integrátor azt konstans bemenőjelként integrálva maximális kimeneti jelet ad.
Fenti hiba kiküszöbölésére két megoldást alkalmaznak.

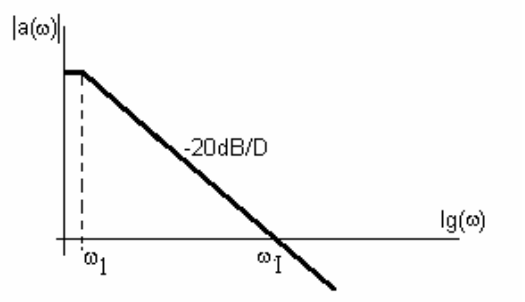
a.) Ideális integrátor kapcsolóval



Az integrátor kondenzátorát áthidaló zárt *K* kapcsoló az integrátor működését mindaddig leállítja, amíg a kapcsoló ki nem nyit.

b.) Valóságos integrátor





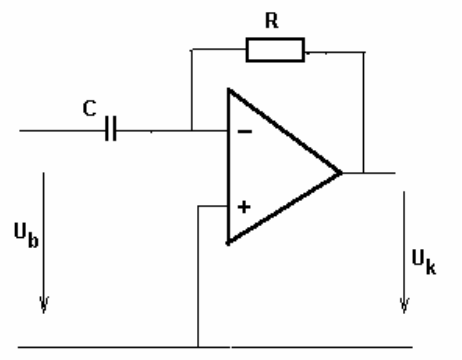
$T_I = RC$ integrálási időállandó továbbra is érvényes, de a Bode-diagramból látható, hogy R_v ellenállás hatására ω = 0 és $\omega_1 = \frac{1}{R_v C}$ frekvencián már nem végtelen az erősítés.

Így az esetleges offset hiba már nem viszi telítésbe az integrátort.
Az integrátorok leggyakoribb alkalmazásai:

- lineárisan növekvő időfüggvény előállítása,
- 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.

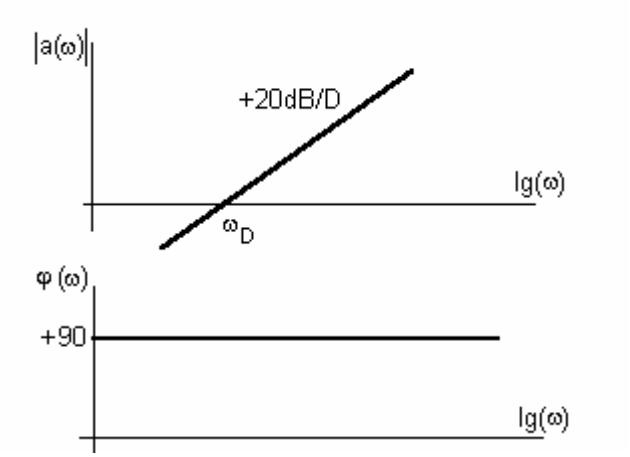


$$U_{ki} = -RC\frac{dU_{be}}{dt} = -T_D\frac{dU_{be}}{dt}$$

A Bode-diagramja:

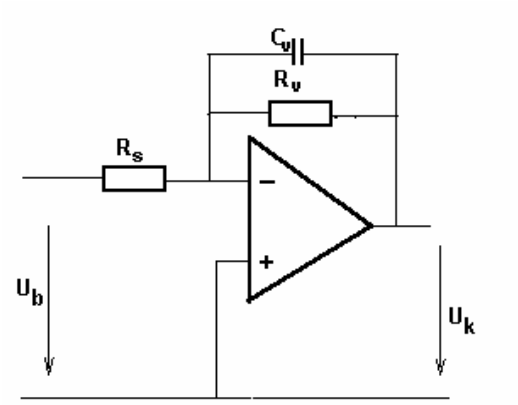
$$A(\omega) = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = -j\omega RC = -j\omega T_D = -j\frac{\omega}{\omega_D}$$

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

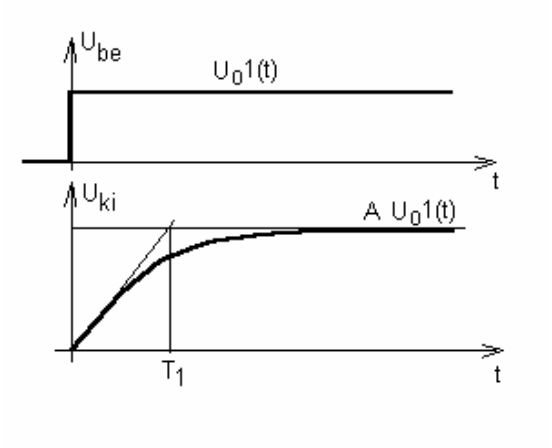


6.8 Késeltető áramkör (aluláteresztő szűrő):

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:

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

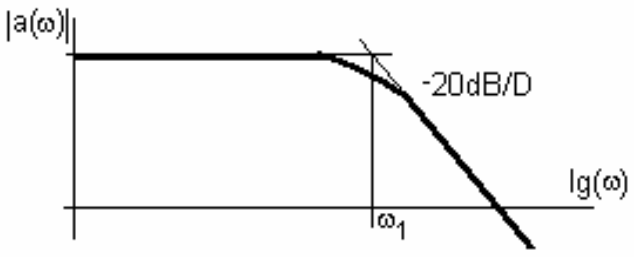
$T_1 = R_v C_v$ a *késleltetés időállandója*, és $A_v = -\frac{R_v}{R_s}$ a késleltető erősítési tényezője.

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

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 ω_1 töréspont frekvencia értéke eltérő.