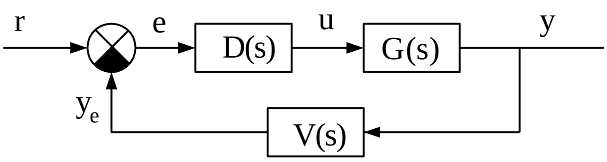
A negatív visszacsatolás

Szabályozáskor az alapjelen kívül a szabályozott jellemző tényleges értékét is figyelembe vesszük a folyamatba való beavatkozás során. A szabályozás egyszerűsített blokkvázlatát az ábrán látjuk, ahol G(s) a folyamat (process) átviteli függvénye, D(s) a szabályozó (controller) átviteli függvénye, V(s) a szenzor átviteli függvénye.



A szabályozási körben a következő jeleket értelmezzük:

r:	alapjel	(reference signal)
y:	szabályozott jellemző	(output signal, controlled variable)
e:	rendelkezőjel	(error signal)
u:	beavatkozójel	(control signal)
y_e:	ellenőrzőjel	(sensor output, measured output)

A későbbiekben gyakran lesz szükségünk a szabályozási kör két adott pontja között értelmezett átviteli függvényre. Ezek közül a leggyakrabban alkalmazott átviteli függvény a szabályozott jellemző és az alapjel között értelmezett T(s)=Y(s)/R(s) „*a zárt szabályozási kör eredő átviteli függvénye*”, vagy más néven a „*kiegészítő érzékenységi függvény*”. Meghatározásához egyéb, a rendszert befolyásoló (zavaró) jelektől eltekintünk. A levezetés során az alábbi elemi összefüggéseket használjuk fel:

E(s)=R(s)-Ye(s)
U(s)=D(s)E(s)
Y(s)=G(s)U(s)
Ye(s)=V(s)Y(s)

A szabályozott jellemzőt egyszerűen felírhatjuk, ha nyomon követjük a blokkdiagramot:

$$Y(s) = \overbrace{D(s)\underbrace{[R(s) - \underbrace{V(s)Y(s)}_{Y_e(s)}]}_{E(s)}}^{U(s)}G(s)$$

Kifejezve a szabályozott jellemző Y(s) *Laplace*-transzformáltját:

$$Y(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)V(s)}R(s)$$

Innen a szabályozási kör alapjelre vonatkozó eredő átviteli függvénye (*kiegészítő érzékenységi függvény*):

$$T(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)V(s)}$$

Megjegyzendő, hogy a számlálóban az előremenő ág (a bemenet és a kimenet közötti szakasz) eredő átviteli függvénye, míg a nevezőben 1+ a felnyitott hurok (Loop) L(s)=D(s)G(s)V(s) eredő átviteli függvénye szerepel.

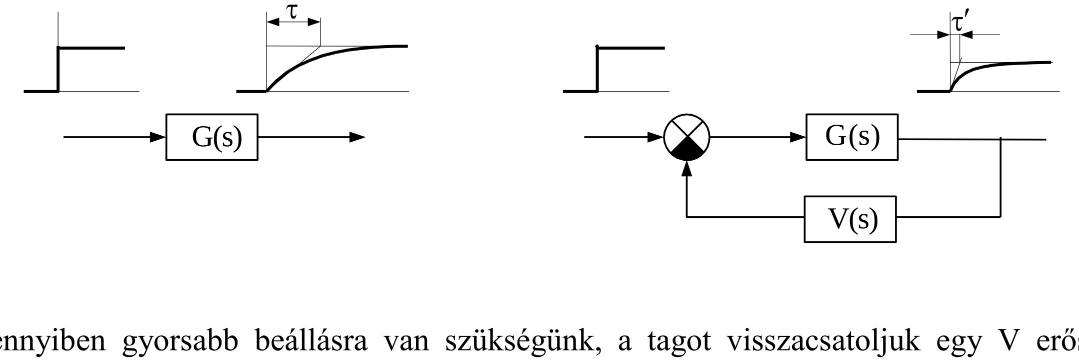
Számos szakkönyv a szabályozott jellemzőt közvetlenül vezeti vissza a szabályozási kör elejére, ami V=1 statikus erősítésű, késleltetés-mentes és dimenziókat figyelmen kívül hagyó szenzor meglétét tételezi fel („Merev visszacsatolás”). Ez a tárgyalásmód a valódi folyamat egyszerűsített vizsgálatát jelenti, ahol a szabályozási körben csupán dimenziómentes számok jellemzik a tényleges fizikai jeleket. Mivel a kérdéssel nap – mint - nap foglalkozó szakemberek számára ez az egyszerűsített tárgyalásmód természetes, ezért a témával foglalkozó szakkönyvek sajnálatosan nem tárgyalják megfelelő részletességgel azt az elmélyültebb gondolkodást igénylő folyamatot, melynek során a valós fizikai rendszerekben fizikálisan észlelhető jelektől eljutunk ehhez az absztrakcióhoz. Ennek hiányában azonban a megszerzett elméleti tudás sajnos nem ültethető át a gyakorlatba, ezért a későbbiekben példán mutatjuk be ezt a modellezési folyamatot. Merev visszacsatolás esetén V(s)=1, így az egyszerűbb $T(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)}$ alakhoz jutunk.

Megjegyezzük, hogy létezik pozitív visszacsatolás is, amikor gyors átmenetek (Smitt-trigger), vagy önfenntartó rezgések létrehozása a cél (oszcillátorok). Pozitívan visszacsatolt folyamat eredő átviteli függvénye megegyezik a negatív visszacsatolásra levezetett összefüggéssel, csupán a nevezőben (+) helyett (–) írandó.

A negatív visszacsatolás hatásai

a) Javítja a tranziens viselkedést (gyorsít)
Példa

Tételezzünk fel egy $G(s) = \frac{1}{s + a}$ egytárolós arányos tagot, melyre 1(t) ugrásbemenetet működtetünk. Az exponenciálisan változó kimenőjel időállandója ekkor $\tau = 1/a$.



Amennyiben gyorsabb beállásra van szükségünk, a tagot visszacsatoljuk egy V erősítésű arányos tagon keresztül. A visszacsatolt szabályozási kör eredő átviteli függvénye

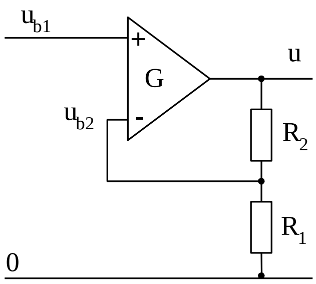
$$T(s) = \frac{\frac{1}{s+a}}{1+V\frac{1}{s+a}} = \frac{1}{s+(a+V)}$$

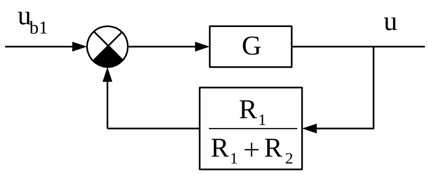
Sokkal gyorsabb felfutású kimenőjelet kaptunk, a megváltozott időállandó $\tau' = 1/(a+V)$ értékre csökkent. Megjegyzendő, hogy a kimenőjel állandósult értéke is megváltozott (csökkent).

b) Csökkenti a folyamat érzékenységét a paraméterváltozásokra

Példa

Egy nem fázisfordító, negatív visszacsatolású műveleti erősítő kapcsolása az ábrán látható. A műveleti erősítő a két bemenetére vezetett feszültség különbségét a G-szeresére erősíti: $u=G(u_{b1}-u_{b2})$ (differenciális erősítés).





A műveleti erősítő G statikus erősítése (<u>G</u>*ain*) a $10^5 \ldots 10^7$ nagyságrendbe esik és meglehetősen nagy szórást mutat. Visszacsatoló tagként egy $V(s)=R_1/(R_1+R_2)$ átviteli tényezőjű „terheletlen feszültségosztót” alkalmazunk, melynek kimenő jelét a műveleti erősítő invertáló bemenetére vezetjük. A visszacsatolt szabályozási kör eredő átviteli függvénye:

$$T(s) = \frac{G}{1+G\frac{R_1}{R_1+R_2}} = \frac{G(R_1+R_2)}{R_1+R_2+GR_1} = \frac{R_1+R_2}{\frac{R_1+R_2}{G}+R_1}$$

Mivel $G \gg (R_1+R_2)$, ezért a nevező első tagja elhanyagolható. A nem invertáló visszacsatolt műveleti erősítő erősítése gyakorlatilag

$$T = 1+\frac{R_2}{R_1}.$$

Legyen $R_1=R_2=10$ kΩ, a műveleti erősítő nyílthurkú erősítési tényezője pedig $G=10^6$. A visszacsatolt erősítő erősítése ekkor

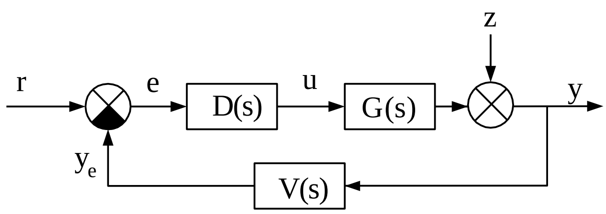
$$T(s) = \frac{R_1+R_2}{\frac{R_1+R_2}{G}+R_1} = \frac{20000}{\frac{20000}{1000000}+10000} = 1{,}999996$$

Ha hőmérsékletváltozás, tápfeszültség-változás, vagy öregedés következtében megváltozna a műveleti erősítő nyílthurkú erősítése pl. $G=10^5$-re, akkor a visszacsatolt erősítő erősítése mindössze

$$T(s)=\frac{R_1+R_2}{\dfrac{R_1+R_2}{G}+R_1}=\frac{20000}{\dfrac{20000}{100000}+10000}=1{,}999960$$

értékre módosulna. A változás mindössze 0,0018%, jóllehet a paraméter (az erősítő G nyílthurkú erősítésének) változása 1000%-os volt!

c) Csökkenti a zavarás hatását



A zavarójelre értelmezett átviteli függvény (számlálóban a zavarás helye és a kimenet közötti szakasz átviteli függvénye, vagyis 1 áll)

$$T_z(s)=\frac{Y(s)}{Z(s)}=\frac{1}{1+D(s)G(s)V(s)}$$

A kimenetre csupán a zavarjel 1/(1+L(s)) szerese jut.

d) Inverz átviteli függvény valósítható meg vele

Legyen az invertálandó átviteli függvény V(s)=s+a, amit a visszacsatoló ágba helyezünk. Az előremenő ágba nagy G erősítésű arányos tagot helyezünk. A szabályozási kör eredő átviteli függvénye

$$T(s)=\frac{G}{1+G(s+a)}=\frac{1}{\dfrac{1}{G}+s+a}$$

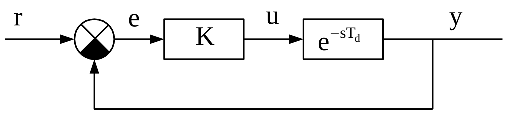
Mivel (1/G)→0, ezért a nyert átviteli függvény valóban az eredeti átviteli függvény inverze.

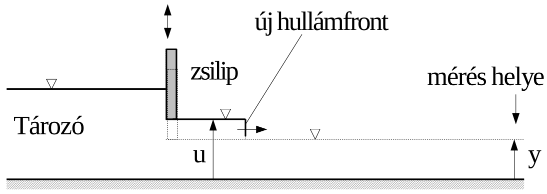
e) Stabilitási problémát okozhat

A negatív visszacsatolás számos előnyös tulajdonsága mellett rendelkezik egy komoly hátránnyal is, amit most egy leegyszerűsített példán mutatunk be.

Példa

Tételezzük fel, hogy a szabályozni kívánt folyamat nagy késleltetési idővel rendelkezik. Képzeljünk el egy hosszú, állandó keresztmetszetű öntözőcsatornát, amelyben szállított víz szintjét csak a csatorna végén tudjuk mérni, míg a víz mennyiségét a távoli zsilip fel-le való mozgatásával tudjuk szabályozni. Tételezzünk fel arányos szabályozót K=2 statikus erősítési tényezővel, a holtidős folyamat (vízszint változása a zsilip és a csatorna vége között) átviteli függvénye pedig $G(s) = e^{-sT_d}$, T_d=100 s holtidővel. A beavatkozó szervről tételezzük fel, hogy nagyon rövid idő (pl. 5s) alatt képes a zsilipet a kívánt helyzetbe állítani.



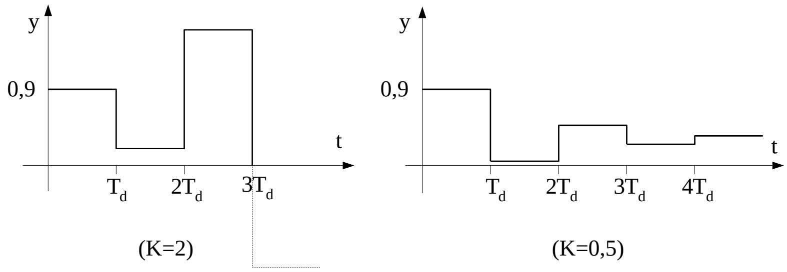


Tételezzük fel, hogy a vizsgálat kezdetén a folyamat egyensúlyi állapotból indul: a vízszint a csatorna végén és a zsilipnél is $u_0=y_0$=0,9m. Azt szeretnénk elérni, hogy a vízszint a kifolyásnál legyen 1m. Ezért az alapjelet r=1 értékre állítjuk.
A kialakuló vízszint (y), valamint a rendelkezőjel (e) alakulása az egyes időintervallumokban a táblázat szerint alakul:

T	$e_i=r-y_i$	$y_i=Ke_{i-1}$
0-T_d	0,1	0,9
T_d -2T_d	0,8	0,2
2T_d -3T_d	-0,6	1,6
3T_d -4T_d	2,2 fizikailag lehetetlen	-1,2 fizikailag lehetetlen

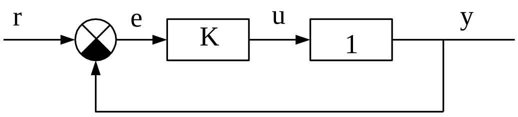
Az első 0-T_d intervallumban a vízszint 0,9m, ennek megfelelően a rendelkezőjel 1-0,9=0,1, a vízszint a zsilipnél 5 s alatt u=0,2m-re áll be, miközben a csatorna végén a vízszint még további 95 s-ig 0,9m marad. Amint a lecsökkent vízszint T_d idő alatt a csatorna végére ér (y=0,2m), elkezdődik a T_d-2T_d intervallum. A rendelkezőjel megnő 0,8-ra és a zsilip 5 s alatt u=1,6m magasságig nyílik. Ez a vízmagasság azonban csak újabb T_d időkésés után lesz csak mérhető a csatorna végén. A probléma abban áll, hogy az alatt a T_d holtidő alatt, amíg a víz a zsiliptől a csatorna végéig ér, a szabályozásnak nincs hatása a folyamatra. A vízszint láthatóan nem az egyensúlyi állapot felé közeledik, hanem oszcilláló mozgással távolodik attól. A szabályozás labilis, nem tölti be faladatát!

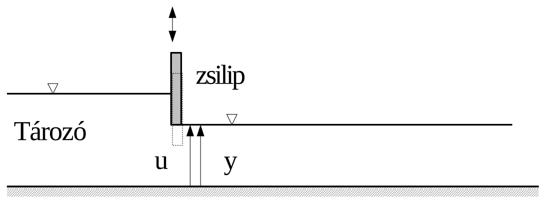
Amennyiben a szabályozó statikus erősítését K=0,5 értékre csökkentjük, a szabályozás stabil lesz és a vízszint egy adott értékhez (bár nem a célul tűzött értékhez) közeledik.



A negatív visszacsatolású szabályozási kör stabilitásvesztését a szabályozandó folyamatnak a szabályozási időhöz képesti nagy T_d holtideje, illetve ebből adódó fázistolása okozta. Hasonló probléma fordult elő pl. a Mars kutatására alkalmazott szondánál is, ahol a rádióhullámok késleltetési ideje 8s. A leggyakoribb stabilitási probléma azonban a digitális szabályozásoknál lép fel, amikor a mintavétel frekvenciája kicsi a rendszer dinamikájához képest.

Nézzük meg, hogy holtidő nélküli esetben, mikor a mérés és a beavatkozás azonos helyen történik, hogyan alakul a vízszint.





Az első pillanatban a rendelkezőjel e=1-0,9=0,1 aminek K-szorosa 0,2m vízszintet eredményezne (mint előbb). A vízszint tehát most is csökkenni kezd 0,9m-ről lefelé, de mielőtt elérné a 0,2 métert, a szabályozó folyamatosan beavatkozik a folyamatba, hiszen a folyamatosan változó vízszint a rendelkezőjelet folyamatosan változtatja. Amikor a vízszint pl. 0,7m-ig csökken, az ahhoz tartozó szabályozott jellemző értéke y=2(1-0,7)=0,6m-re módosul. A vízszint tehát 0,6 és 0,7m között fog állandósulni 1 s alatt. Pontosan is meghatározhatjuk az állandósult vízszintet, ha kiszámítjuk a zárt szabályozási kör eredő átviteli függvényét:

$$T(s) = \frac{K}{1+K} = \frac{2}{3}$$

Egységugrás bemenetet működtetve, a végérték-tétellel a következő eredményt kapjuk:

$$y_{s-s} = \lim_{s \to 0} s \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{s} = \frac{2}{3}$$

Ahogy az egyszerű gondolatmenetből is kaptuk, a vízszint y=0,66m-nél állandósul. (Felmerülhet a kérdés, hogy miért tér el a vízszint ilyen nagymértékben a célul tűzött 1m-hez képest? A K értékének növelésével, pl. K=100 választásával a vízszint állandósult értéke már 100/101 m lesz, vagyis kevesebb, mint egy százalékkal tér el a célul tűzött értéktől. Azonban K értékét, mint láttuk, holtidőt vagy egyéb fázistolást okozó folyamatoknál nem lehet korlátlanul növelni a stabil működés veszélyeztetése nélkül!)