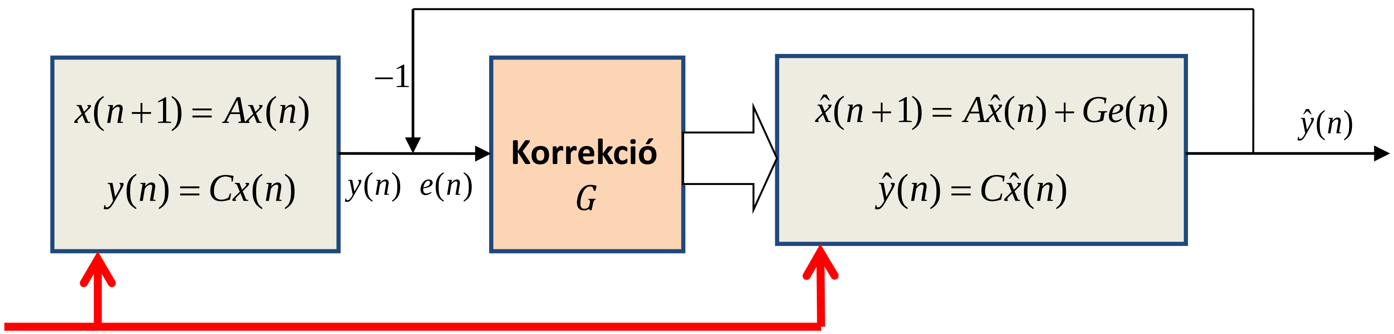
Kiberfizikai rendszerek

A “fizikai” vonatkozásokról …
2. folytatás

2016. november 29.

A befogadó környezet modellezése



$$x(n+1) - \hat{x}(n+1) = Ax(n) - A\hat{x}(n) - Ge(n) = (A - GC)\big(x(n) - \hat{x}(n)\big)$$

Megjegyzések:

1. A megfigyelő elrendezés mindkét modellje „gerjeszthető” egy közös gerjesztéssel. Mivel a modellek lineárisak, a szuperpozíció értelmében a megfigyelő konvergenciája változatlanul megvalósul.
2. Az ábra szerinti megfigyelőt Luenberger megfigyelőnek nevezzük. Luenberger szerint majdnem minden rendszer megfigyelő. A megfigyelő tulajdonság feltétele, hogy a megfigyelő legyen „gyorsabb”, mint a megfigyelt rendszer, különben nem képes követni a változásokat.

A fizikai rendszerek dinamikus viselkedését leíró modell-fajták:

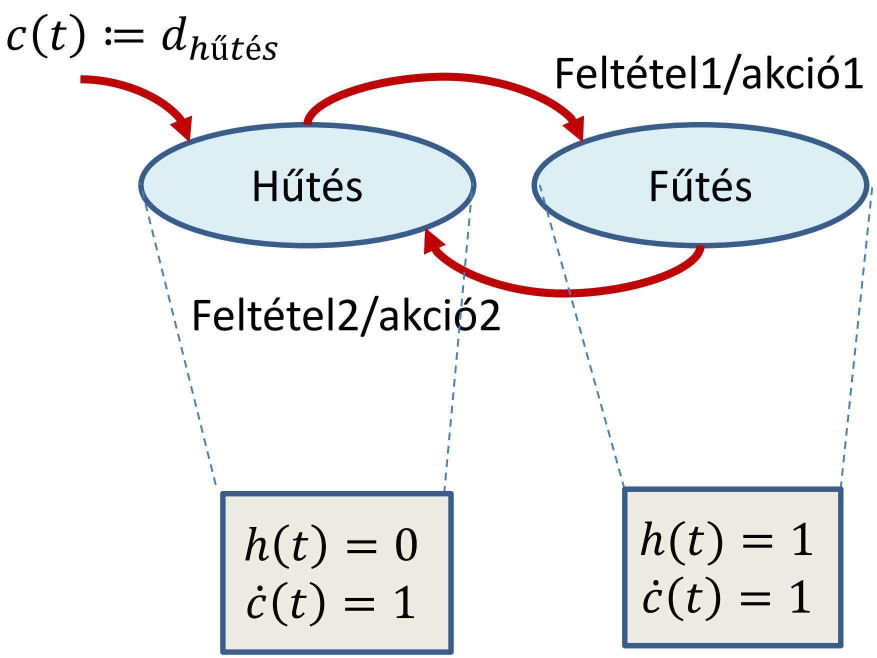
Folytonos rendszerek: időbeli és amplitudóbeli folytonosság → differenciálegyenletek
Diszkrét rendszerek: diszkrét lépések sorozatát hajtják végre → FSM, differenciaegyenletek
Hibrid rendszerek: folytonos és diszkrét rendszerek kombinációja
Egyéb, nem-konvencionális ismeretreprezentációs technikák: pl. , kvalitatív, fuzzy, …

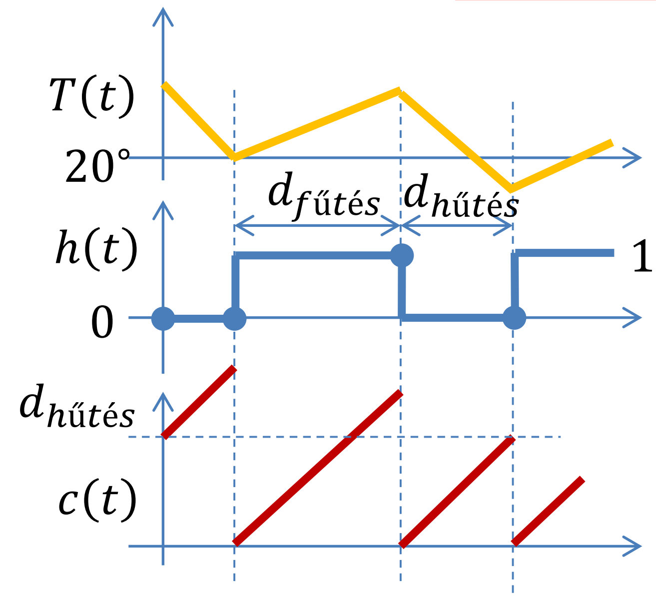
Hibrid rendszerek

A CPS rendszerekben szükség van az idő mérésére, és időzített akciók végrehajtására.

Az **időzített automata (timed automata)** a legegyszerűbb nem-triviális hibrid rendszer.
Az állapotaik mögött (adott időtartamig) mérik az idő múlását: $\forall t \in d_m \quad \boxed{\dot{c}(t) = a}$

Példa: Termosztát hiszterézis helyett időzítéssel





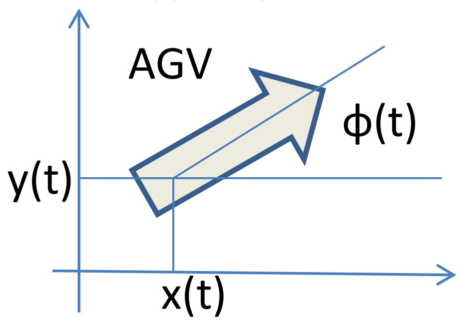
Megjegyzés: $\mathrm{h}(t)$ és $c(t)$ az állapotfinomítás eszközei. Szokás (üzem)módról beszélni. (Modal systems)

Feltétel1/akció1: $T(t) \leq 20 \wedge c(t) \geq d_{hűtés} / c(t) \coloneqq 0$

Feltétel2/akció2: $T(t) \geq 20 \wedge c(t) \geq d_{fűtés} / c(t) \coloneqq 0$

Hibrid rendszerek

Példa: Önjáró targonca (Automated Guided Vehicle, AGV)
Két szabadságfokú jármű, felfestett csík követésére képes. Minden t időpontban a hossztengelye mentén $v(t)$ sebességgel mozog azzal, hogy $\boxed{0 \leq v(t) \leq 10\ km/h}$
A súlypontja körül fordulni is tud $\omega(t)$ szögsebességgel, azzal hogy: $\boxed{-\pi \leq \omega(t) \leq \pi\ rad/sec}$



$$\dot{x}(t) = v(t)cos\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{y}(t) = v(t)sin\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{\phi}(t) = \omega(t)$$

Kétszintű szabályozás: a targonca mindig 10 km/h sebességgel halad.
Négy működési módja van:
balra, jobbra, egyenesen, megállás.

Minden működési módhoz külön differenciálegyenlet tartozik:

egyenesen:
$$\dot{x}(t) = 10cos\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{y}(t) = 10sin\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{\phi}(t) = 0$$

jobbra:
$$\dot{x}(t) = 10cos\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{y}(t) = 10sin\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{\phi}(t) = -\pi$$

balra:
$$\dot{x}(t) = 10cos\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{y}(t) = 10sin\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{\phi}(t) = \pi$$

megállás:
$$\dot{x}(t) = 0$$
$$\dot{y}(t) = 0$$
$$\dot{\phi}(t) = 0$$

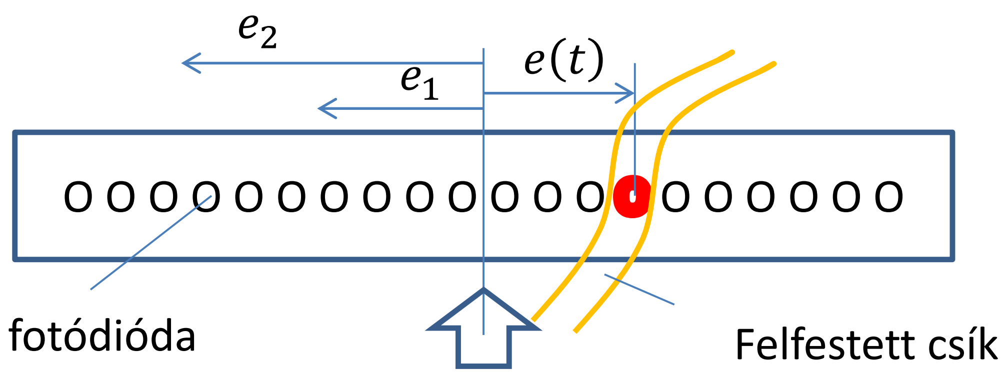
Hibrid rendszerek

A targonca érzékelője:

Kimenőjele: $e(t) = f\big(x(t), y(t)\big)$

$e(t) > 0$ balra tér el.

$e(t) < 0$ jobbra tér el.



A targonca vezérlése:

$|e(t)| < e_1$ egyenesen haladjon tovább!

$0 < e_2 < e(t)$ túlságosan eltér balra, forduljon jobbra!

$0 > -e_2 > e(t)$ túlságosan eltér jobbra, forduljon balra!

Bemeneti események halmaza: $u(t) \in \{stop, start, nincsesemény\}$

Állapotátmenetet generáló feltételek:

$$induljel = \big\{\big(v(t), x(t), y(t), \phi(t)\big) \big| u(t) = start\big\}$$

$$menjegyenesen = \big\{\big(v(t), x(t), y(t), \phi(t)\big) \big| u(t) \neq stop, |e(t)| < e_1\big\}$$

$$menjjobbra = \big\{\big(v(t), x(t), y(t), \phi(t)\big) \big| u(t) \neq stop, e_2 < e(t)\big\}$$

$$menjbalra = \big\{\big(v(t), x(t), y(t), \phi(t)\big) \big| u(t) \neq stop, -e_2 > e(t)\big\}$$

$$álljmeg = \big\{\big(v(t), x(t), y(t), \phi(t)\big) \big| u(t) = stop\big\}$$

Hibrid rendszerek

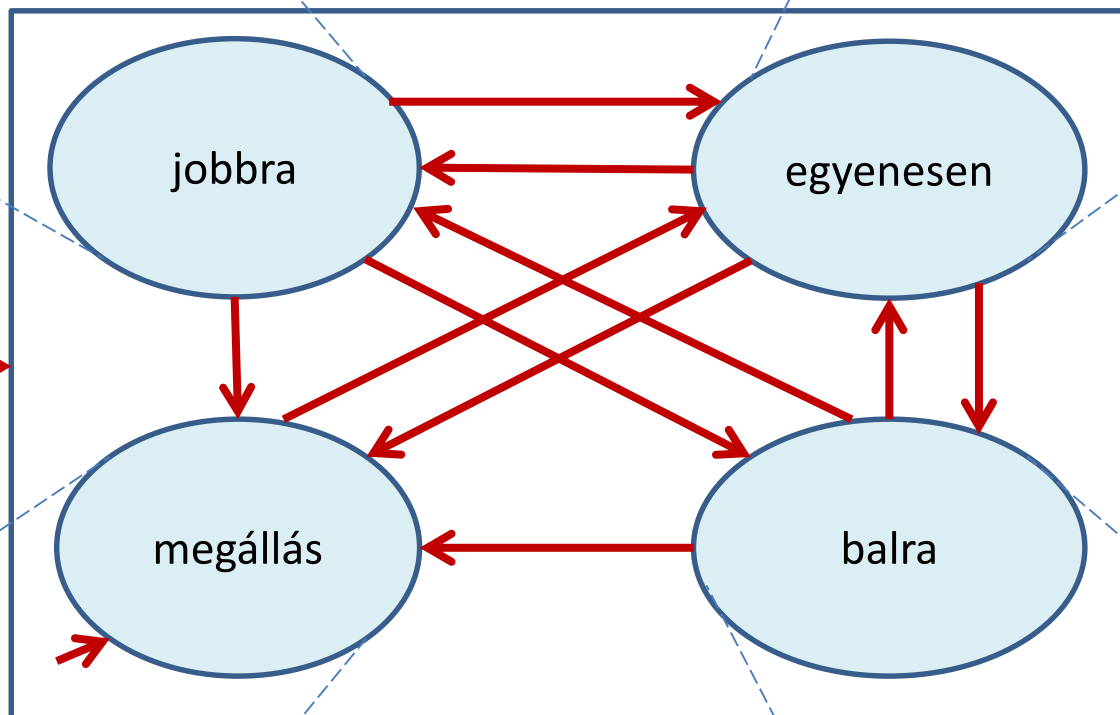
e(t)

$$\dot{x}(t) = 10cos\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{y}(t) = 10sin\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{\phi}(t) = -\pi$$

e(t)

$$\dot{x}(t) = 10cos\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{y}(t) = 10sin\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{\phi}(t) = 0$$

$$u(t) \in \begin{Bmatrix} stop, start, \\ nincsesemény \end{Bmatrix}$$



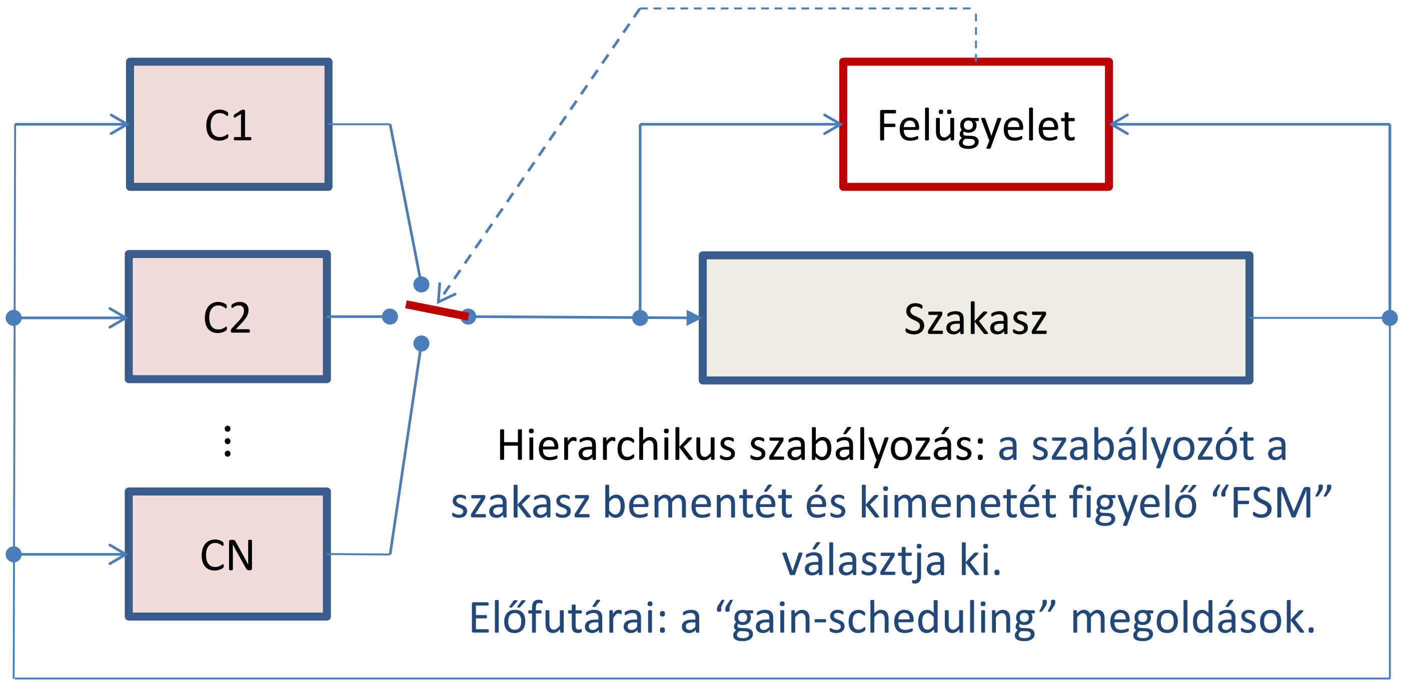
e(t)

$$\dot{x}(t) = 0$$
$$\dot{y}(t) = 0$$
$$\dot{\phi}(t) = 0$$

e(t)

$$\dot{x}(t) = 10cos\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{y}(t) = 10sin\big(\phi(t)\big)$$
$$\dot{\phi}(t) = \pi$$

Hibrid rendszerek: Switching control

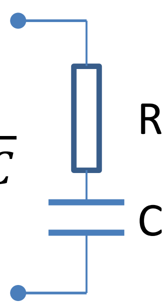


Hierarchikus szabályozás: a szabályozót a szakasz bementét és kimenetét figyelő "FSM" választja ki.
Előfutárai: a "gain-scheduling" megoldások.

Kihívások: (1) Kapcsolgatott rendszer stabilitása (Hibrid rendszerek stabilitása!)
(2) Az átkapcsolások tranziensei.

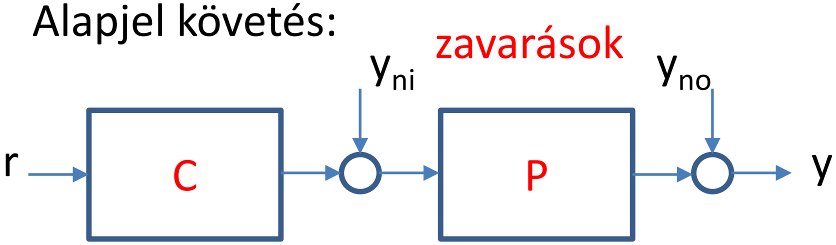
Törekvések: (1) Stabilitás biztosítása a "passzivitás" fenntartásával.
(2) Tranziens menedzsment megvalósítása.

$$Z_{be}(s) = R + \frac{1}{sC}$$

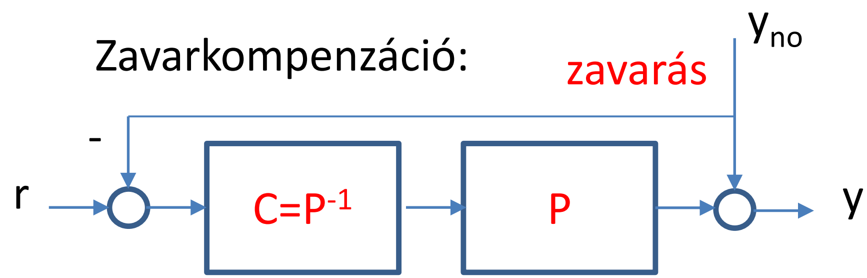


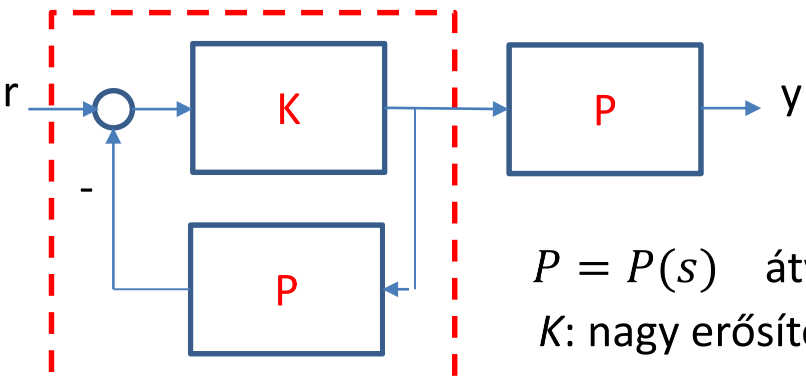
Irányítástechnikai alapok

Alapjel követés:



Zavarkompenzáció:





Folyamat közelítő inverze:

$$\hat{C} = \frac{K}{1+KP} = \frac{1}{\frac{1}{K}+P} \approx \frac{1}{P} = P^{-1}$$

$P = P(s)$ átviteli függvény

K: nagy erősítés

r: alapjel;

r_1: szűrt alapjel;

e: rendelkezőjel;

u: beavatkozójel;

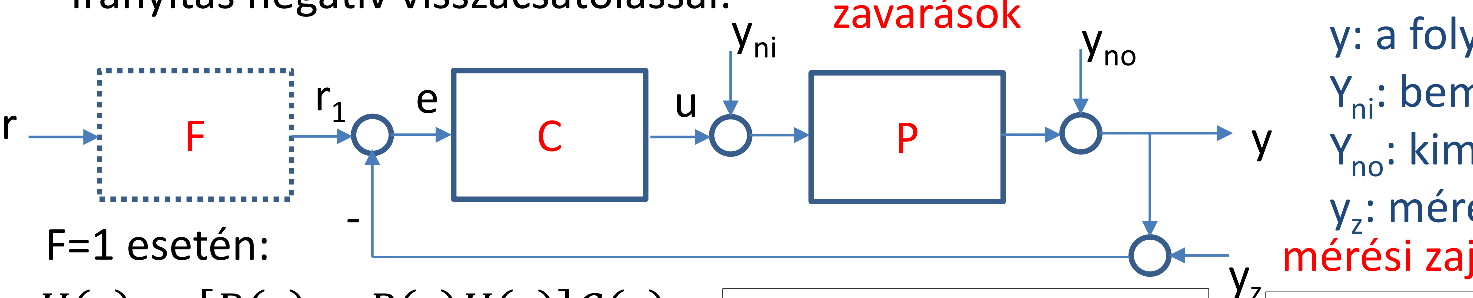
y: a folyamat kimenőjele;

Y_{ni}: bemeneti zavarás;

Y_{no}: kimeneti zavarás;

y_z: mérési zaj

Irányítás negatív visszacsatolással:



F=1 esetén:

$$U(s) = [R(s) - P(s)U(s)]C(s)$$

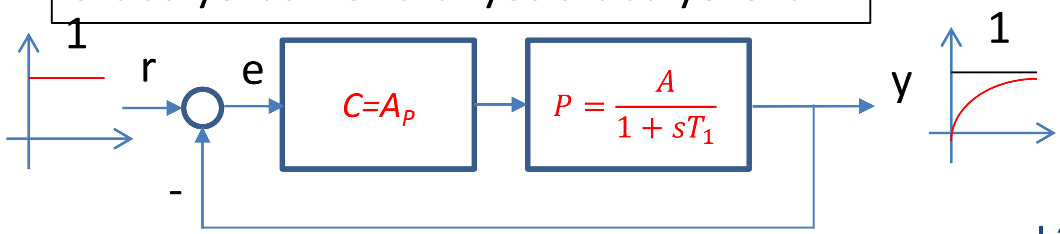
$$U(s)[1 + C(s)P(s)] = R(s)C(s)$$

$$\frac{U(s)}{R(s)} = \frac{C(s)}{1 + C(s)P(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}$$

Irányítástechnikai alapok

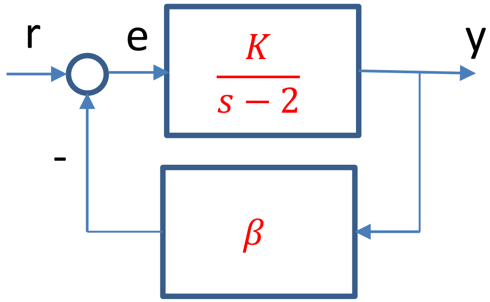
Szabályozási kör arányos szabályozóval:



$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} = \\ = \frac{A_P A}{(1 + A_P A)} \frac{1}{(1 + sT_1/(1 + A_P A))}$$

maradó hiba $e_{áll} = 1/(1 + A_P A)$

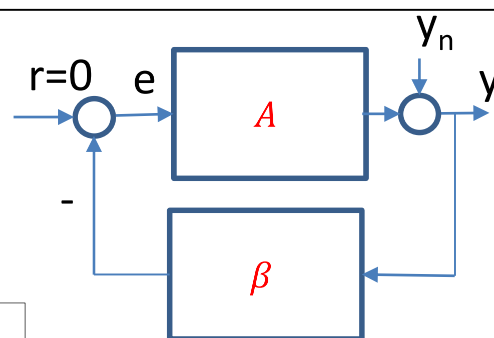
Labilis szakasz stabilizálása:



$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K/(s-2)}{1 + K\beta/(s-2)} = \\ = K/(s + K\beta - 2)$$

Ha $K\beta > 2$, akkor stabilis.

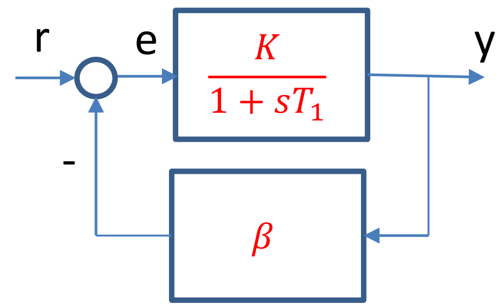
Zavarás hatásának csökkentése:



$$T(s) = \frac{Y(s)}{Y_n(s)} = \frac{1}{1 + A\beta}$$

Csökken a zavarás hatása.

A rendszer gyorsítása:

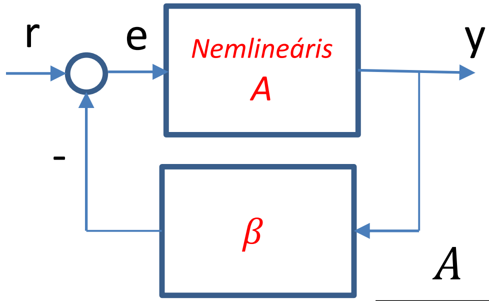


$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K/(1 + K\beta)}{1 + sT_1/(1 + K\beta)}$$

Csökken az időállandó.

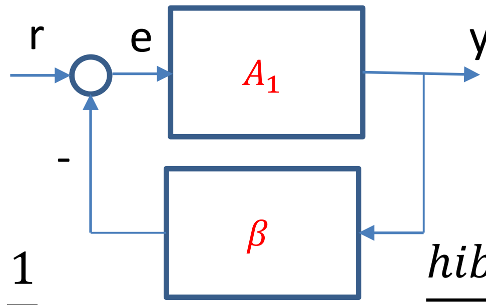
Irányítástechnikai alapok

A visszacsatolás linearizál:



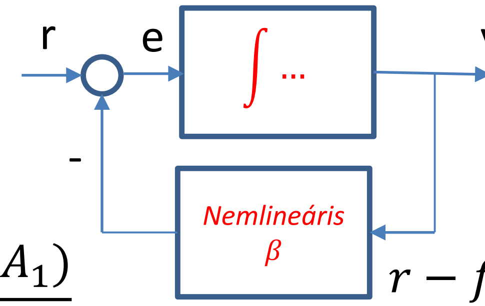
$$\frac{A}{1+A\beta} \approx \frac{1}{\beta}$$

A visszacsatolás csökkenti a paraméter-érzékenységet:



$$\frac{hiba(A_1)}{1+A_1\beta}$$

Integrátor visszacsatolva inverz karakterisztikát valósít meg:

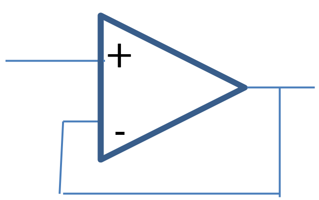


$$r - f(y) = 0$$

$$y = f^{-1}(r)$$

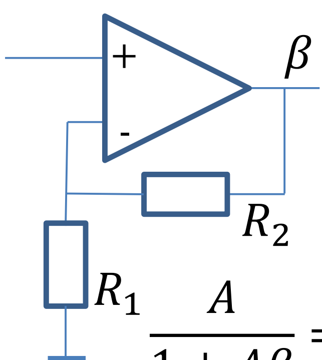
Műveleti erősítő alapkapcsolások:

Követő erősítő:



$$\frac{A}{1+A} = \frac{1}{1+1/A} \approx 1$$

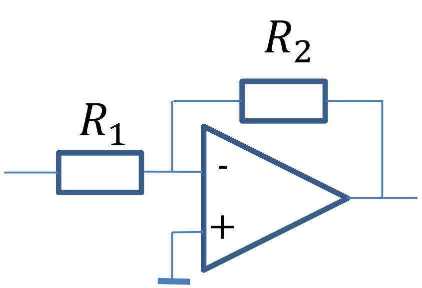
Neminvertáló erősítő:



$$\beta = \frac{R_1}{R_1+R_2}$$

$$\frac{A}{1+A\beta} = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{A\beta}{1+A\beta}$$

Invertáló erősítő:



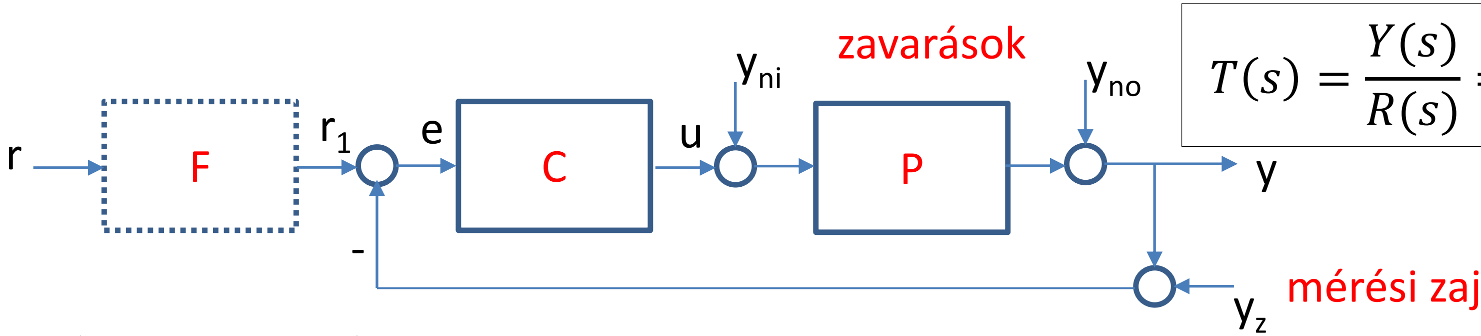
$$\beta = \frac{R_1}{R_1+R_2}$$

$$-\frac{R_2}{R_1}\frac{A\beta}{1+A\beta}$$

Irányítástechnikai alapok: Stabilitás

Stabilitás: egy rendszer azon tulajdonsága, hogy egyensúlyi állapotából kimozdítva újra egyensúlyba képes kerülni.

- Magára hagyott rendszer stabilitása
- Gerjesztett rendszer stabilitása (Bounded Input – Bounded Output: BIBO)
- Ljapunov stabilitás: energia tulajdonságú skalár függvény



$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{F(s)C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}$$

$$\big(1 + C(s)P(s)\big)Y(s) = F(s)C(s)P(s)R(s); \quad 1 + C(s)P(s) = 1 + L(s) = 0$$

$L(s) = \dfrac{N(s)}{D(s)}$: A hurokátviteli függvény. A karakterisztikus egyenlet: $\boxed{D(s) + N(s) = 0}$

Ha ennek gyökei (a pólusok) negatív valós részűek, akkor a zárt szabályozási kör stabil.

Passzivitás: Egy egység passzív, ha nem termel energiát.

Ha $t = 0$-ban energiamentes: $\boxed{\int_0^t P_{in}(\tau)d\tau = \int_0^t u(\tau)y(\tau)d\tau \geq 0}$ $\boxed{\forall t > 0}$

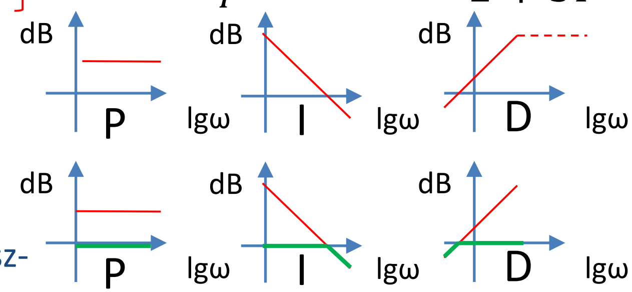
Hagyományos szabályozók

P: proporcionális hatás
I: integráló hatás
D: differenciáló hatás

A PID szabályozó a rendelkezőjel aktuális és múltbéli értékei, ill. a változás meredeksége alapján előrevetített tendenciát is felhasználva számítja a beavatkozójelet.

P, I, D, PI, PD, PID szabályozók:

$$A_P, \quad \frac{1}{sT_I}, \quad sT_D, \text{ ill. } \frac{sT_D}{1+sT}$$

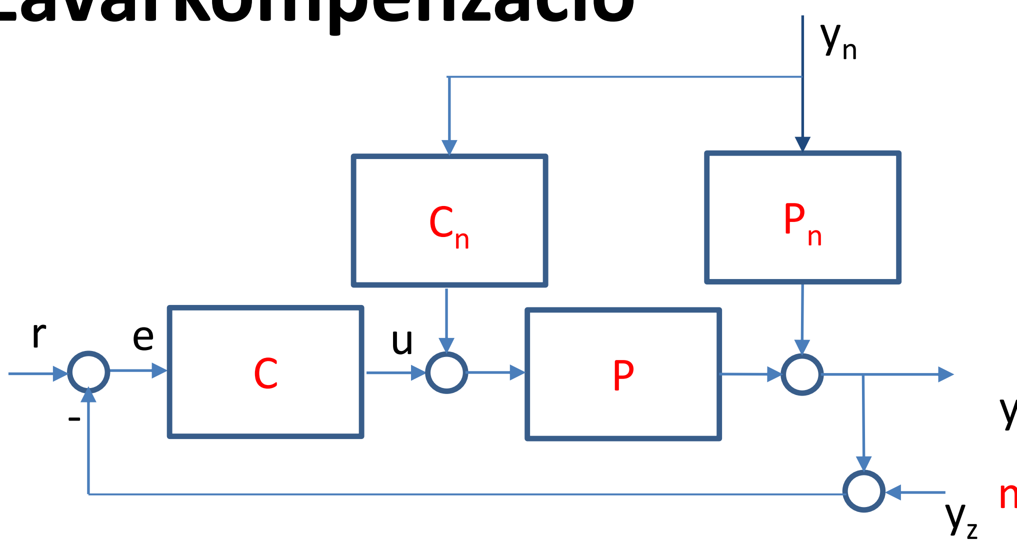


Önmagukban visszacsatolva, azaz : $P(s) = 1$ feltételezésével:

P: $\dfrac{A_P}{1+A_P}$ I: $\dfrac{1}{1+sT_I}$

D: $\dfrac{sT_D}{1+sT_D}, \dfrac{sT_D}{1+s(T_D+T)}$

Zavarkompenzáció



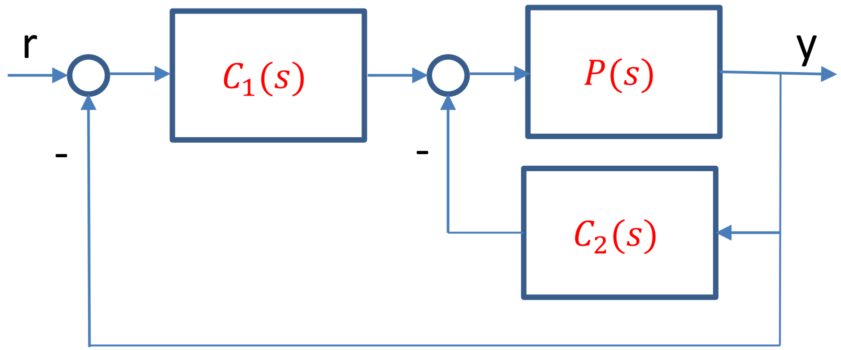
mérési zaj

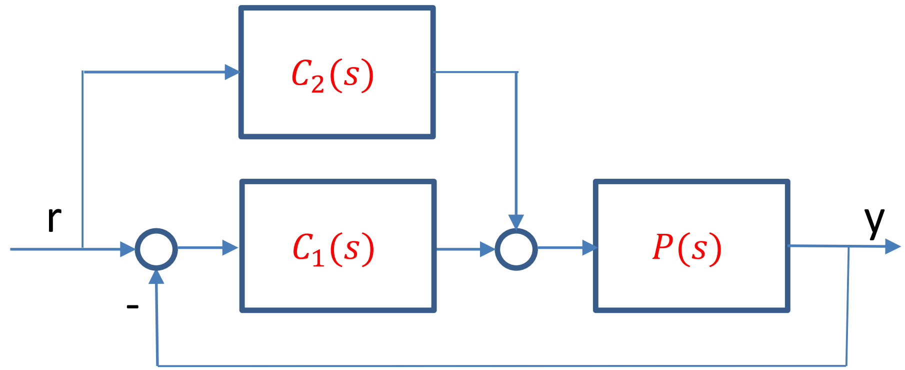
$$\frac{Y(s)}{Y_n(s)} = \frac{P_n(s) + C_n(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}$$

$$P_n(s) + C_n(s)P(s)=0$$

$$C_n(s) = -\frac{P_n(s)}{P(s)}$$

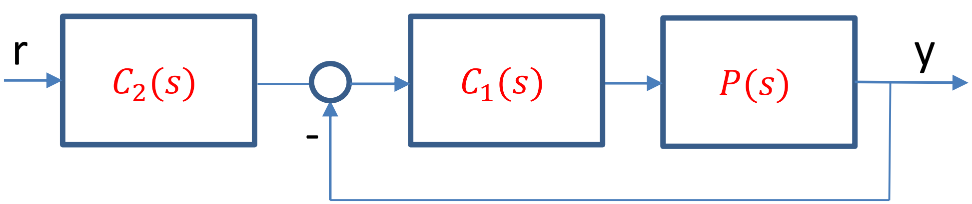
Kétszabadságfokú szabályozók

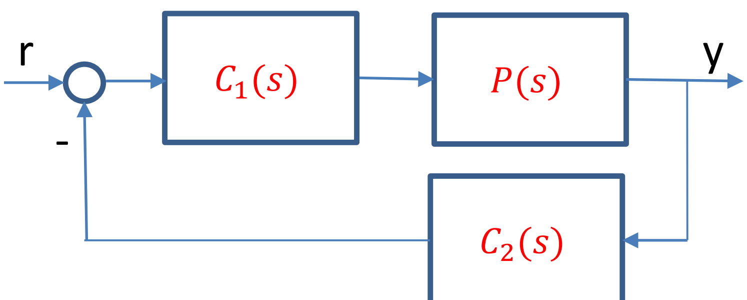




$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_1(s)\dfrac{P(s)}{1+P(s)C_2(s)}}{1+C_1(s)\dfrac{P(s)}{1+P(s)C_2(s)}} = \frac{C_1(s)P(s)}{1+\big(C_1(s)+C_2(s)\big)P(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{(C_1(s)+C_2(s))P(s)}{1+C_1(s)P(s)}$$



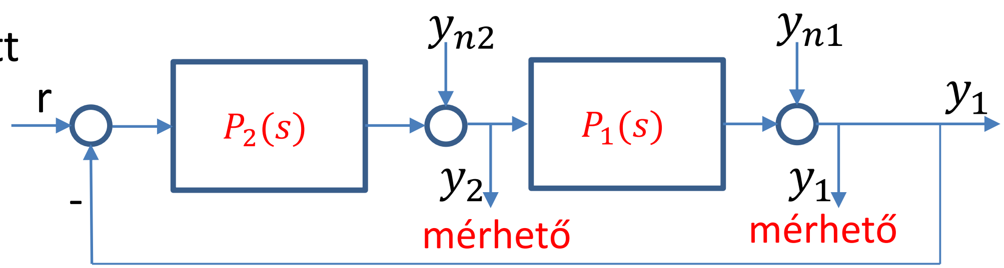


$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_2(s)C_1(s)\,P(s)}{1+C_1(s)P(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_1(s)\,P(s)}{1+C_2(s)C_1(s)P(s)}$$

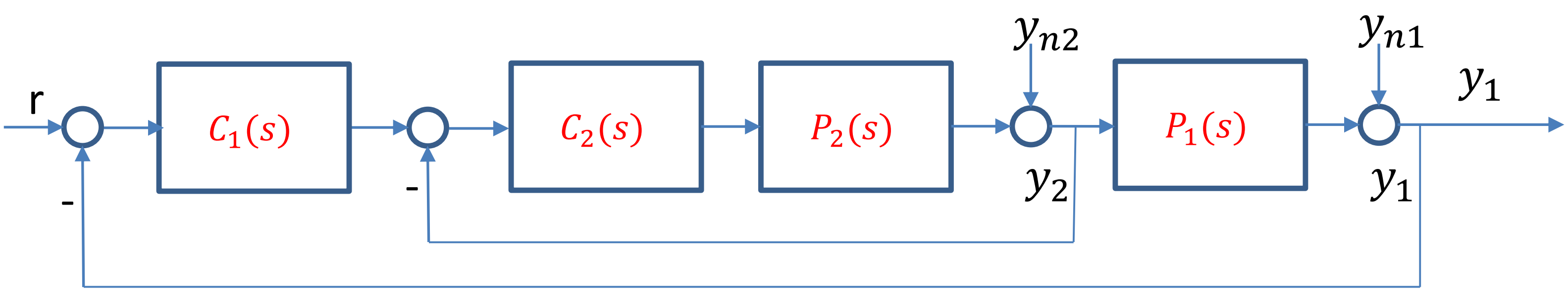
Kaszkád szabályozók

Ha a szabályozott szakasz több részre osztható:



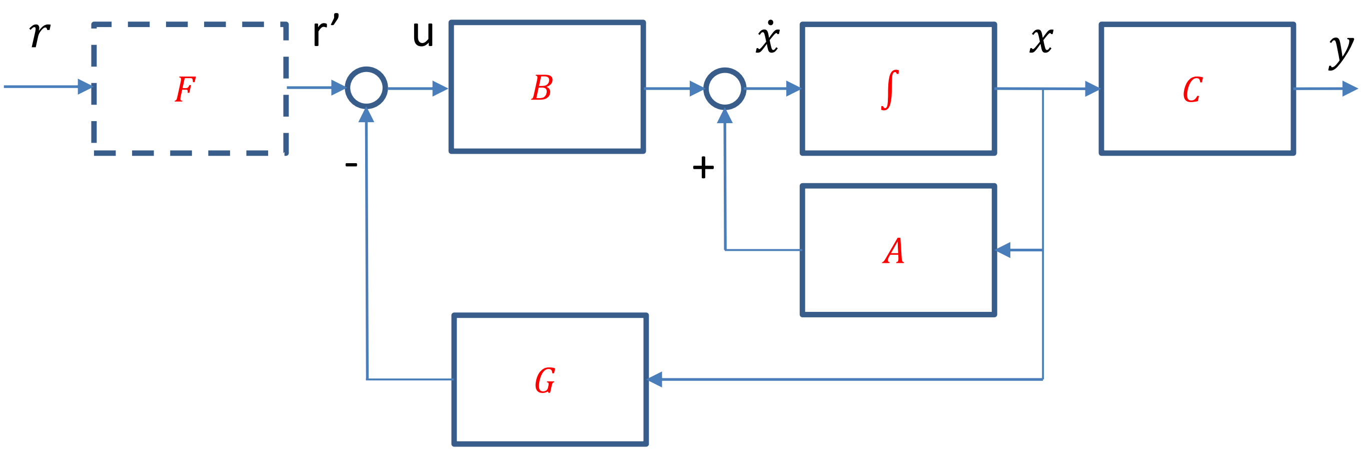
Ilyenkor y_{n2} zavar elhárítása lassú lehet, ha a $P_1(s)$ folyamat lassú.

Megoldás:



Általánosítás: állapot-visszacsatolás:

$$\dot{x} = Ax + B(Fr - Gx) = (A - BG)x + BFr$$



$$y = Cx$$