

# Kiberfizikai rendszerek

Az adat- és jelfeldolgozási vonatkozásokról ...

2017. október 3.

# Adatfajták

- **Nyers adat:** A szenzorok kimenete az ún. nyers adat. A nyers adatokat átlagolni szoktuk zajcsökkentési célból.
- **Mért adat:** A nyers adatokat kalibráljuk, és szabványos mértékegységet rendelünk hozzájuk. Ez a folyamat a jelkondicionálás, melynek eredménye a mért adat.
- **Egyeztetett adat:** A mért adatokat további vizsgálatnak vetjük alá: hihetőség-vizsgálat, kiugró adatok kiszűrése, stb.

*Szintaktikus egyeztetés:* a mért érték kontextusának vizsgálata nélkül.

*Szemantikus egyeztetés:* a mért érték kontextusának vizsgálatával.

- **Mérési bizonytalanság:** a mért adat minőségjellemzője. A mért érték körüli tartomány, amelyről feltételezzük, hogy abban a valódi érték valamekkora valószínűséggel fellelhető.

**GUM:** *Guide to the expression of uncertainty in measurement*

*Számszerűsítése:* a becsült szórással.

(A típus: szórás a mérésből, B típus: szórás az a priori ismeretből)

**Konkrét számérték** *specifikált szórásszám (1(68%), 2(95.4%), 3(99.7%)) vagy konfidenciaszint (90%, 95%, 99%) megadásával.*

# Mérőeszközök pontossága



- A mérőeszközök bizonytalansága **katalógusadat**.
- **Mutatós műszer** bizonytalanságát az ún. pontossági osztállyal adjuk meg:

$$o.p. = \frac{\Delta x}{x_{\text{végérték}}} 100\%. \text{ Itt } \Delta x \text{ a mutatott érték bizonytalansága, } x_v \text{ a végérték.}$$

A mért  $x_i$  százalékos relatív hibája:  $h_{x_i} = \frac{\Delta x}{x_i} 100\% = \frac{x_{\text{végérték}}}{x_i} o.p.$



A műszerek laboratóriumi kivitelben 0,2 és 0,5 pontossági osztályban, üzemi kivitelben legtöbbször 1, 1,5 és 2,5 pontossági osztályban készülnek.

# Mérőeszközök pontossága

## Átalakítók pontossága és hibái

**Számjegyes kijelzésű műszerek bizonytalansága** az ún. átalakítási és a kvantálási hibák összege.

- A méréshatárra vonatkozó relatív hiba:

$$h_{\text{átalakítási}_1} = h_{a_1} = \pm \frac{\Delta x_1}{x_{\text{végérték}}} 100.$$

Ez a mért értékre vonatkoztatva:

$$h'_{\text{átalakítási}_1} = h'_{a_1} = h_{\text{átalakítási}_1} \frac{x_{\text{végérték}}}{x_i}.$$

- A mért értékre vonatkozó relatív hiba:

$$h_{\text{átalakítási}_2} = h_{a_2} = \pm \frac{\Delta x_2}{x_i} 100\%.$$

- A kvantálási hiba relatív értéke:

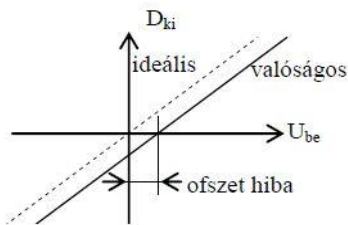
$$h_{\text{kvantálási}} = h_k = \pm \frac{1}{N} 100\%, \text{ ahol } N \text{ a kijelzett szám.}$$

**Példa:** DVM 10 V-os méréshatárban  $x_i = 6.523$  V-ot mutat. A műszerkönyv adatai:  $\pm 0.1\%$  a méréshatárra vonatkozó hiba,  $\pm 0.2\%$  a mért értékre vonatkozó hiba,  $\pm 1$  az utolsó számjegy bizonytalansága. Ezzel:

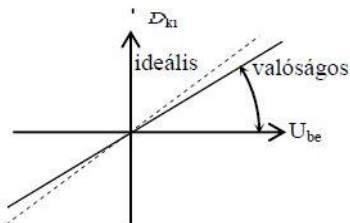
$$h'_{a_1} = \pm 0.1\% \frac{x_v}{x_i} = \pm 0.1\% \frac{10}{6.523} = \pm 0.16\%, \quad h_{a_2} = \pm 0.2\%, \quad h_k = \pm \frac{1}{6523} 100\% = \pm 0.016\%$$

$$h_{x_i} = \pm [0.16 + 0.2 + 0.016]\% = \pm 0.376\% = \pm 0.2\% \pm 11 \text{ digit}$$

- Ofszethiba:

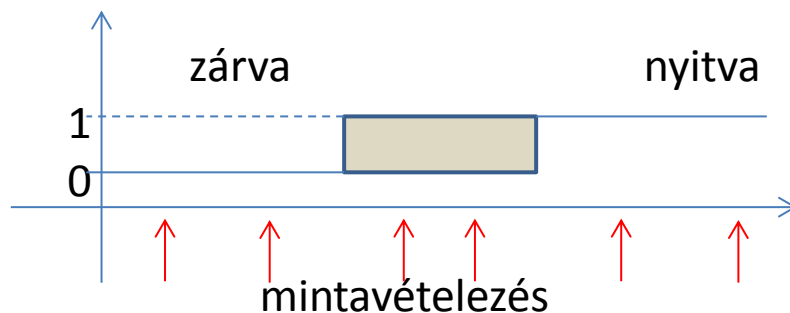


- Erősítési hiba:



# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

- **Real-time változók** (RT entities): állapotváltozók, mint pl. folyadék áram, szabályozó alapjele, szabályozó szelep kívánt pozíciója. Vannak statikus és időben változó, dinamikus attribútumai.
- Minden *RT változó* annak az alrendszernek az ún. befolyásolhatósági tartományában (sphere of control, SOC) van, amelyik jogosult értékét megváltoztatni. Azon kívülről a *RT változó* csak olvasható.
- Egy *RT változó* lehet diszkrét vagy folytonos értékű.
- A diszkrét *RT változó* lehet definiálatlan. Példa: nyíló garázsajtó: nincs se nyitva, se csukva.



# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

- **Megfigyelések:** a RT változó értékei adott időpont(ok)ban.
  - **Megfigyelés** =<név, megfigyelési idő, érték>
- **Megfigyelések elosztott rendszerekben:** ha nincs globális óra, akkor az időbélyeg használhatósága korlátozott, megfigyelési időnek sokszor az üzenet érkezési idejét veszik. Ezzel jelentős hibát okozhatunk az állapotbecslésben.
- **Indirekt megfigyelések:** sokszor a megfigyelendő mennyiség közvetlenül nem férhető hozzá. Ilyenkor közvetett megfigyeléseket végzünk modellek felhasználásával. (Például belső hőmérséklet megfigyelése a felszínen elhelyezett érzékelőkkel).
- **Állapot megfigyelések:** minden megfigyelés önállóan értelmezhető értéket ad. Jellemzően periodikus mintavételezéssel végezzük.
- **Esemény megfigyelések:** az esemény adott időpontban bekövetkező állapotváltozás. Mivel maga a megfigyelés is egy esemény, ezért nem lehetséges egy esemény közvetlen megfigyelése az irányított objektumban, csak annak következményeit tudjuk megfigyelni.

# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

- **Real-time változók képe** (RT images): a RT változó megfeleltetése a számítógépes programban, amelynek értelmezzük az időbeni és az amplitúdó szerinti pontosságát, valamint az időbeni érvényességét. Egy RT változó képe aktuális állapot, ill. esemény megfigyelés, vagy állapot becslés.
- **Real-time objektumok** (RT objects): Egy RT objektum az elosztott rendszer csomópontján belül egy olyan tároló, amely egy RT változót, vagy annak képét tartalmazza. Minden ilyen objektumhoz tartozik egy előírt pontosságú óra. Amikor ez üt, egy objektum eljárás aktiválására kerül sor. Ha ez periodikus, akkor szinkron RT objektumról beszélünk. Elosztott RT objektumról beszélünk, ha a különféle csomópontokban másolat formájában van jelen. Erre jó példa a globális óra, amelynek  $IT$  együttfutású (az órák által mutatott értékek legnagyobb eltérése  $IT$ ) másolatait hozzuk létre az egyes csomópontokban.

# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

- **Időbeni pontosság:** A megfigyelések révén szerzett információ időbeni megjelenése a számítógépes programban és tényleges megfigyelés tényleges időpontja óhatatlanul eltérnek egymástól. Az időbeni pontosság azzal a  $d_{pontosság}$  intervallummal definiálódik, amelyhez tartozóan bekövetkező amplitúdó hiba még éppen elviselhető a vezérelt rendszer szempontjából.
- **Példa:** az alábbi táblázatban néhány gépjármű motor jellemző szerepel együtt a megkívánt amplitúdó pontossággal és az ennek megfeleltethető időintervallumokkal.

RT kép a számítógépben	max. változás	pontosság	időbeni pontosság
Dugattyú pozíció	6000 ford/perc	0.1°	3μsec
Gázpedál pozíció	100%/sec	1%	10 msec
Motor terhelés	50%/sec	1%	20 msec
Olaj és hűtővíz hőmérséklet	10%/perc	1%	6 sec

Az RT képek pontossági intervallumai között több, mint 6 nagyságrend eltérés van. A dugattyú pozíció esetében ez a pontosság praktikusán csak állapotbecsléssel (a programon belüli jóslással) lehetséges.



# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

A megfigyelés és a felhasználás között eltelt idő egy  $v$  változó esetén a következő hibát okozza:

$$hiba(t) \cong \frac{dv(t)}{dt} \left[ C(t_{felhasznáás}) - C(t_{megfigyelés}) \right]$$

Ha egy időben pontos RT képet használunk, akkor a *worst-case* hiba:

$$hiba = \underbrace{\max}_{\forall t} \left| \frac{dv(t)}{dt} \right| d_{pontosság}$$

Kiegyensúlyozott tervezés esetén ez utóbbi az amplitúdó mérési hiba nagyságrendjébe kell essen. Ahhoz, hogy az RT képre alapozott számításaink pontosak legyenek, be kell tartanunk az alábbi feltételt

$$\left| C(t_{felhasznáás}) - C(t_{megfigyelés}) \right| \leq d_{pontosság}$$

# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

Egy periódikusan frissített RT képet *parametrikusnak*, vagy *fázis-érzéketlennek* hívunk, ha

$$d_{\text{pontosság}} > (d_{\text{frissítés}} + WCET_{\text{üzenet továbbítás}}).$$

A parametrikus RT kép a vevő oldalon bármikor felhasználható anélkül, hogy a beérkezés és a felhasználás fázisviszonyait mérlegelni kellene: még a pontossági időn belül megjön a frissítés.

Egy periodikusan frissített RT képet *fázis-érzékenynek* hívunk, ha

$$WCET_{\text{üzenet továbbítás}} < d_{\text{pontosság}} < (d_{\text{frissítés}} + WCET_{\text{üzenet továbbítás}}).$$

Ilyenkor nem biztos, hogy a pontossági időn belül megjön a frissítés, ezért a frissítés és a felhasználás idejére oda kell figyelni.

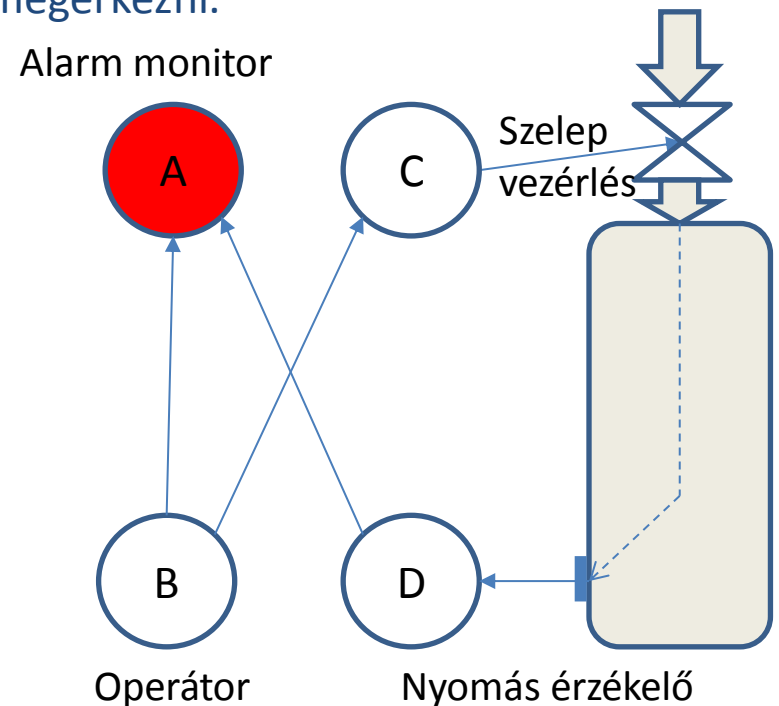
**Példa:** A fenti táblázatban szereplő gázpedál pozíció továbbítási ideje 4 msec. Ha ekkor a periodikus lekérdezés üteme kisebb, mint 6 msec, akkor az RT kép *parametrikus*, ha pedig pl. 8 msec, akkor pedig *fázis-érzékeny*.

A fázis érzékenységet megfelelő mintavételi frekvenciával, vagy állapotbecslés alkalmazásával kerülhetjük el.

# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

**Állandóság (Permanence).** Jelentése: megmarad/stabilizálódik/érvényessé válik az üzenet állapota. Egy üzenet akkor válik állandóvá/megmaradóvá/érvényessé, amikor a vevő csomópont tudja, hogy minden, a jelen üzenet küldési ideje előtt elküldött üzenet már meg kellett érkezzen, vagy sosem fog megérkezni.

**Példa:** Egy tartályban lévő nyomást monitorozunk egy elosztott rendszerrel. **A** csomópont: alarm monitor, **B** csomópont: operátor, **C** csomópont: szabályzó szelep, **D** csomópont: nyomás érzékelő. Lehetséges üzenetek:  $M_{DA}$ : jelzi, hogy a nyomás hirtelen megváltozott,  $M_{BC}$ : operátori parancs a változtatásra,  $M_{BA}$ : nincs alarm helyzet, mert operátori beavatkozás volt. Van egy eltakart, a fizikai rendszer működéséből adódó csatorna a szelep és a nyomásérzékelő között. Téves riasztás jöhet létre, ha a  $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$  láncon gyorsabban fut végig az információ, mint a  $B \rightarrow A$  láncon. Ennek elkerülése érdekében az alarm monitor minden akcióját késleltetni kell. (Bizonyos akciók visszavonhatatlanok: pilóta katapultál, lőfegyver elsül, stb.)



Vegyük észre, hogy maga a technológia  
Is kommunikációs csatornát valósít meg!

# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

**Akció késleltetési idő:** (action delay) amíg érvényessé nem válik az üzenet (ezt mindig ki kell várni). Számítása, ha (1) van globális óra:

$$t_{\text{érvényes}} = t_{\text{küld}} + d_{\text{max}} + 2g,$$

ahol  $g$  az óra felbontása, ha (2) nincs globális óra:

$$t_{\text{érvényes}} = t_{\text{küld}} + 2d_{\text{max}} - d_{\text{min}} + g_l,$$

ahol  $g_l$  a lokális óra felbontása. Látható, hogy a második esetben  $d_{\text{max}} - d_{\text{min}}$  idővel többet kell várni, mert valójában a küldés ideje nem ismert, míg az első esetben a küldés időpontja az üzenet részeként elküldhető.

## **Megjegyzés:**

- (1) Az akció késleltetési idő számítására vonatkozó gondolatmenet megértését segíti, ha elképzelünk egy külső megfigyelőt, aki minden időpontot ismer, és tisztában van azzal is, hogy az egyes csomópontokban mi ismert és mi nem.
- (2) Egy RT kép csak az állandóság bekövetkezése után használható. Ha ez nagyobb, mint az RT kép időbeni pontossága, akkor csak az állapotbecslés segíthet.

# Mennyiségek, változók valós idejű rendszerekben

**Idempotencia:** Ha ugyanaz az üzenet – tipikusan hibatűrési céllal – többször is megérkezik ugyanarra a csomópontra, akkor ezt az üzenethalmazt idempotensnek nevezzük, ha a többszöri azonos üzenet hatása ugyanaz, mint az egyszerié. Ez a fogalom azért fontos, mert ha az üzenet úgy konstruáljuk meg, hogy az megváltozást hordozzon, akkor a többszöri üzenetküldés többszöri “korrekciót” eredményez, miközben csak egyszerit szeretünk volna.

**Példa:** szelep-állás  $45^\circ$  (állapot üzenet)  $\leftrightarrow$  szelep-állás változás  $5^\circ$  (esemény üzenet).

# Digitális jelfeldolgozási alapok



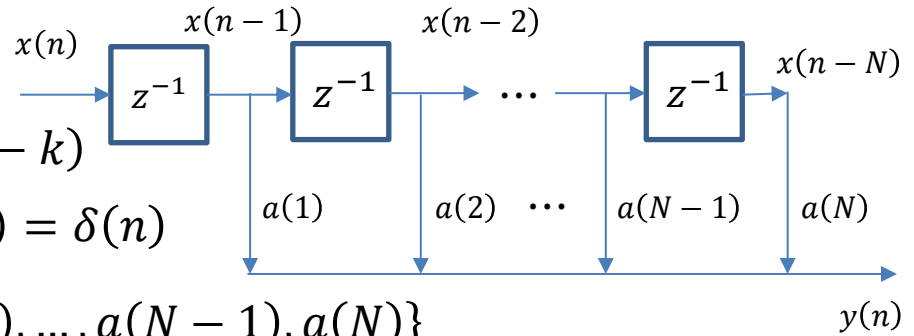
**Diszkrét jelek:**

Diszkrét konvolúció :  $y(n) = \sum_{k=1}^N a(k)x(n-k)$

Diszkrét súlyfüggvény:  $w(n) = y(n)$  ha  $x(n) = \delta(n)$

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & \text{ha } n = 0 \\ 0, & \text{ha } n \neq 0 \end{cases}$$

$$w(n): \{0, a(1), a(2), \dots, a(N-1), a(N)\}$$



Véges impulzusválaszú (**FIR**) szűrő:  $x(n)$  és  $w(n)$  konvolúciója

Végtelen impulzusválaszú (**IIR**) szűrő:  $y(n)$  függ  $y(n)$  véges számú korábbi mintájától.

**Mintavételezett jelek:** olyan diszkrét jelek, melyeket mintavételezéssel hozzuk létre.

$x(t) \rightarrow x(nT_m) = x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots$  Mikor rekonstruálható egyértelműen?

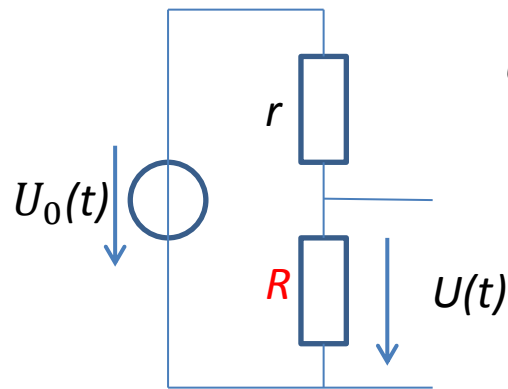
Fontos kapaszkodópont a mintavételi frekvencia:  $f_m = 1/T_m$ . Ezzel az  $x(t) = A \sin(2\pi f_m t)$  időfüggvényű szinuszból periódusonként egy mintát veszünk, ráadásul mindig ugyanott.

Nem tudunk különbséget tenni a nulla és az  $f_m$  frekvenciájú jelek között:  $0 \leftrightarrow f_m$ .

**Mintavételi tétel:** Csak akkor tudjuk rekonstruálni az  $x(t) = A \sin(2\pi f t)$  időfüggvényű szinuszt, ha  $f < f_m/2$ , azaz minden periódusra átlagosan kettőnél több minta kell essen.

# CPS rendszerek modellezési kérdései

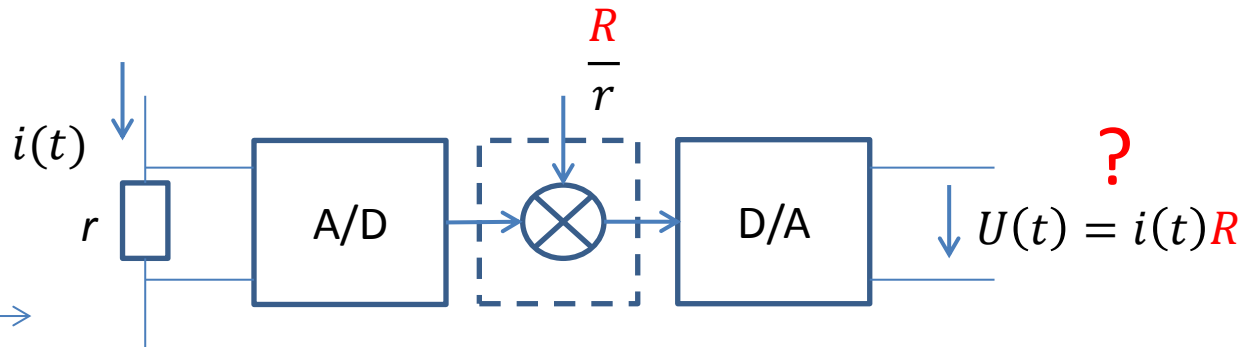
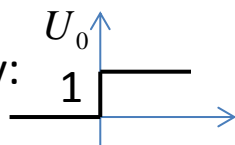
**Példa:** Készítsünk programozható feszültségosztó áramkört-berendezést!



$$U(t) = U_0(t) \frac{R}{r + R} \quad U(t) = i(t)R \quad i(t) = \frac{U_0(t)}{r + R}$$

$R$  legyen változtatható! Tegyük  $R$  helyébe az alábbi áramkört!

Következmény:



$$U(t = 0) = 0$$

$$i(t = 0) = \frac{U_0}{r}$$

$\mu\text{P}$ , DSP, "felhő", ...

$$U(t) = Ri(t - \Delta t)$$

$$U(t = \Delta t) = R \frac{U_0}{r}$$

$$i(t = \Delta t) = \left( U_0 - R \frac{U_0}{r} \right) \frac{1}{r} = \left( 1 - \frac{R}{r} \right) \frac{U_0}{r}$$

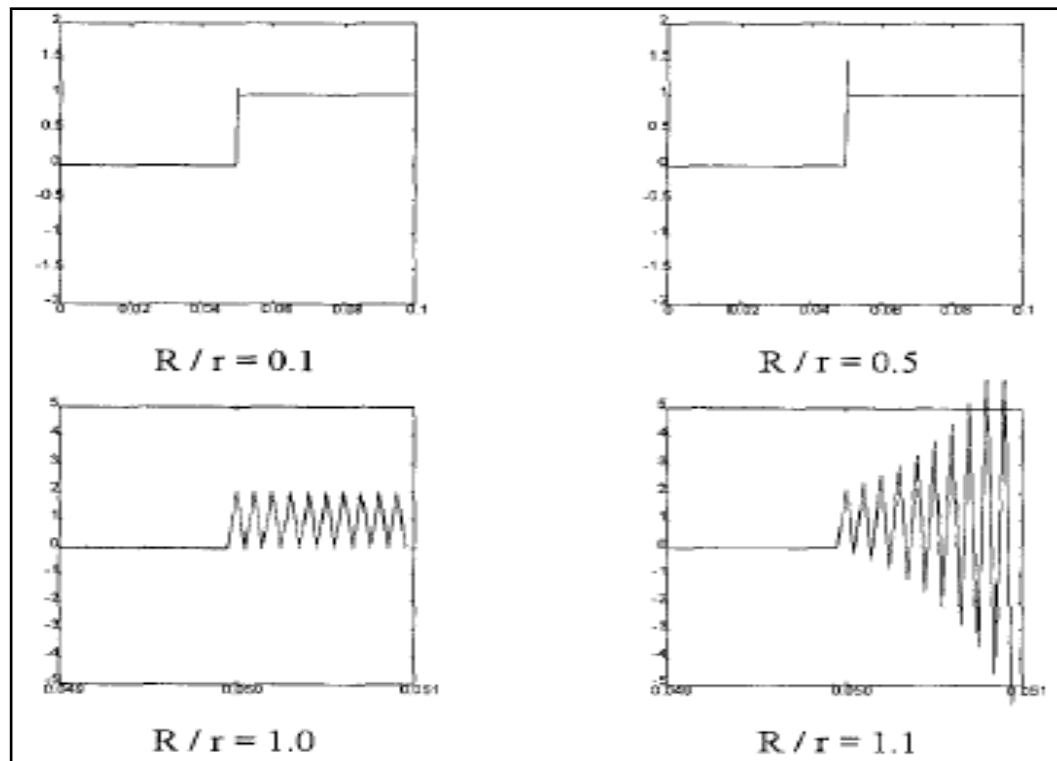
$$U(t = 2\Delta t) = R \left( 1 - \frac{R}{r} \right) \frac{U_0}{r} \quad i(t = 2\Delta t) = \left[ U_0 - R \left( 1 - \frac{R}{r} \right) \frac{U_0}{r} \right] \frac{1}{r} = \left( 1 - \frac{R}{r} + \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right) \frac{U_0}{r}$$

# CPS rendszerek modellezési kérdései

$$U(t = n\Delta t) = R \left( 1 - \frac{R}{r} + \left(\frac{R}{r}\right)^2 \mp \dots \mp \left(\frac{R}{r}\right)^{n-1} \right) \frac{U_0}{r} \rightarrow U_0 \frac{R}{r+R}$$

$$i(t = n\Delta t) = \left( 1 - \frac{R}{r} + \left(\frac{R}{r}\right)^2 \mp \dots \pm \left(\frac{R}{r}\right)^n \right) \frac{U_0}{r} \rightarrow \frac{U_0}{r+R}$$

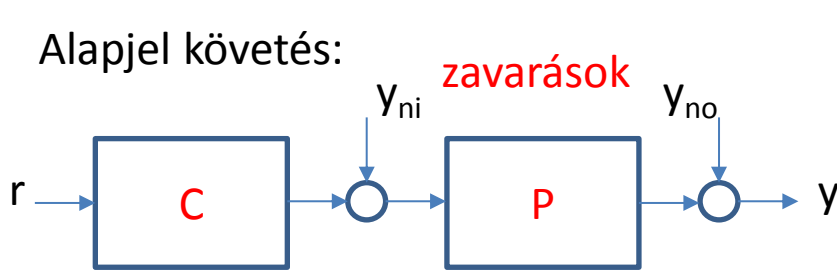
Ha  $\frac{R}{r} < 1$



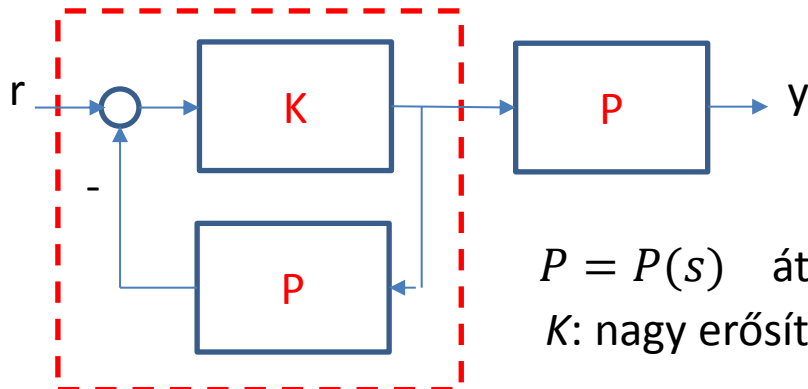
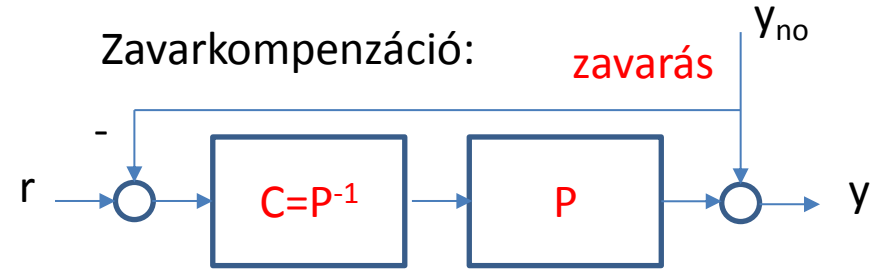


# Irányítástechnikai alapok

Alapjel követés:



Zavarkompenzáció:



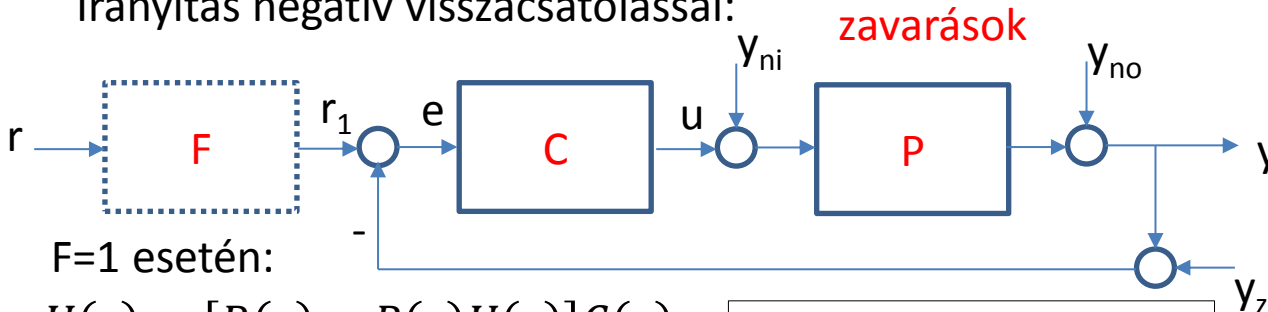
Folyamat közelítő inverze:

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

$P = P(s)$  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:

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

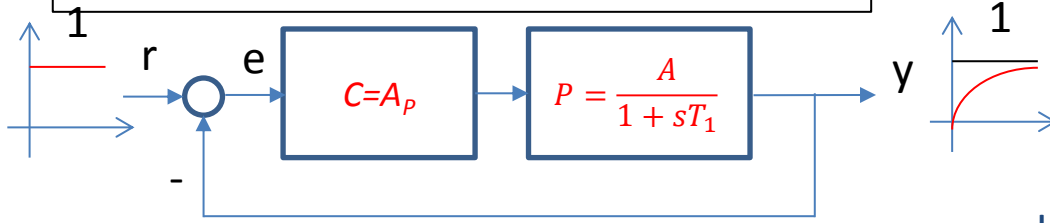
$$U(s)[1 + C(s)P(s)] = R(s)C(s)$$

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

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad 17$$

# Irányítástechnikai alapok

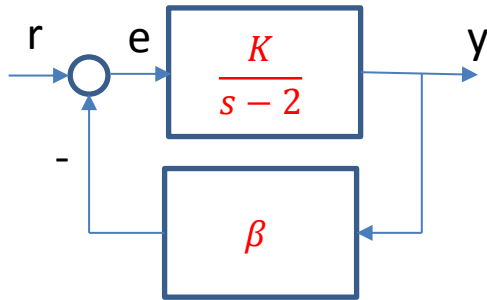
Szabályozási kör arányos szabályozóval:



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

maradó hiba  $e_{\text{áll}} = 1 / (1 + A_p A)$

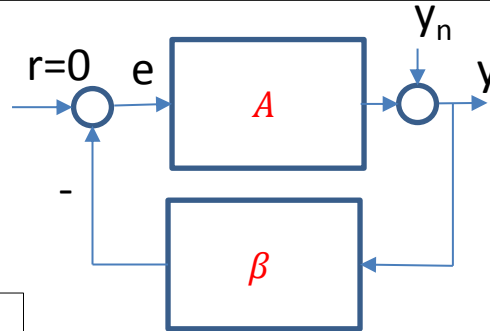
Labilis szakasz stabilizálása:



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

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

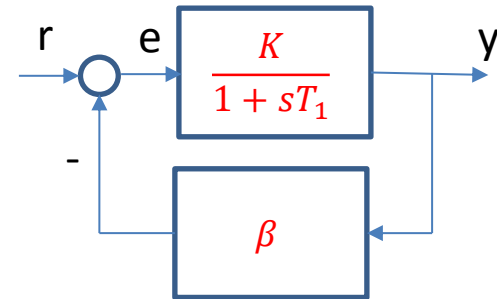
Zavarás hatásának csökkentése:



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

Csökken a zavarás hatása.

A rendszer gyorsítása:



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

Csökken az időállandó.