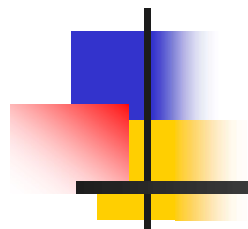


# Figyelem!

A következő előadás a koronavírus miatt elrendelt távoktatáshoz készült segédanyagként a Irányításelmélet és technika I. kurzust a 2019/20-as tanév tavaszi félévében felvett hallgatók számára.

A felvétel sokszorosításához és terjesztéséhez az előadó nem járul hozzá.



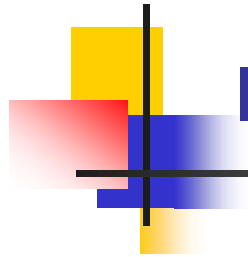
# Folytonos idejű rendszerek szabályozása

---

Gerzson Miklós

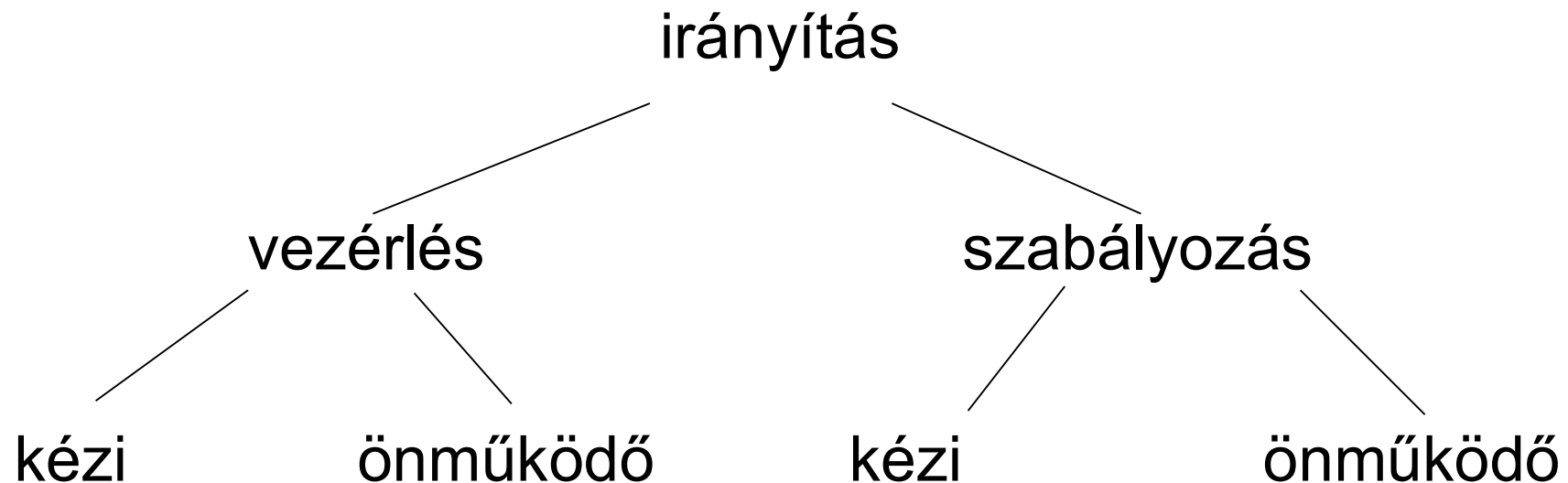
Pannon Egyetem, Villamosmérnöki és Információs  
Rendszerek Tanszék

2019/2020 II. félév



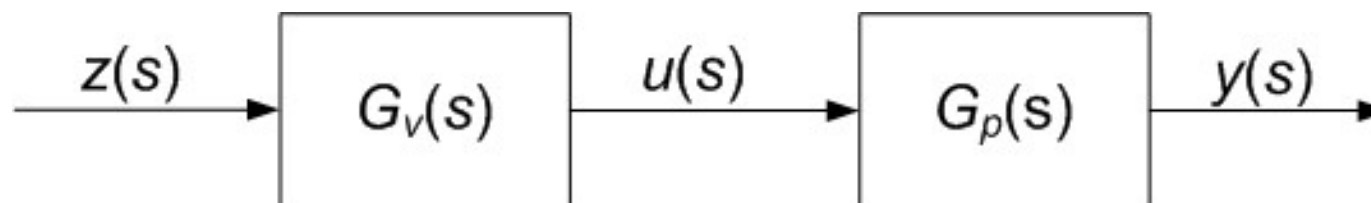
# Irányítástechnika felosztása

**irányítás:** olyan művelet, amely valamely műszaki folyamatba annak elindítása, fenntartása, tervszerű lefolyásának biztosítása, megváltoztatása, leállítása érdekében beavatkozik



## Nyílt hatásláncú rendszerek

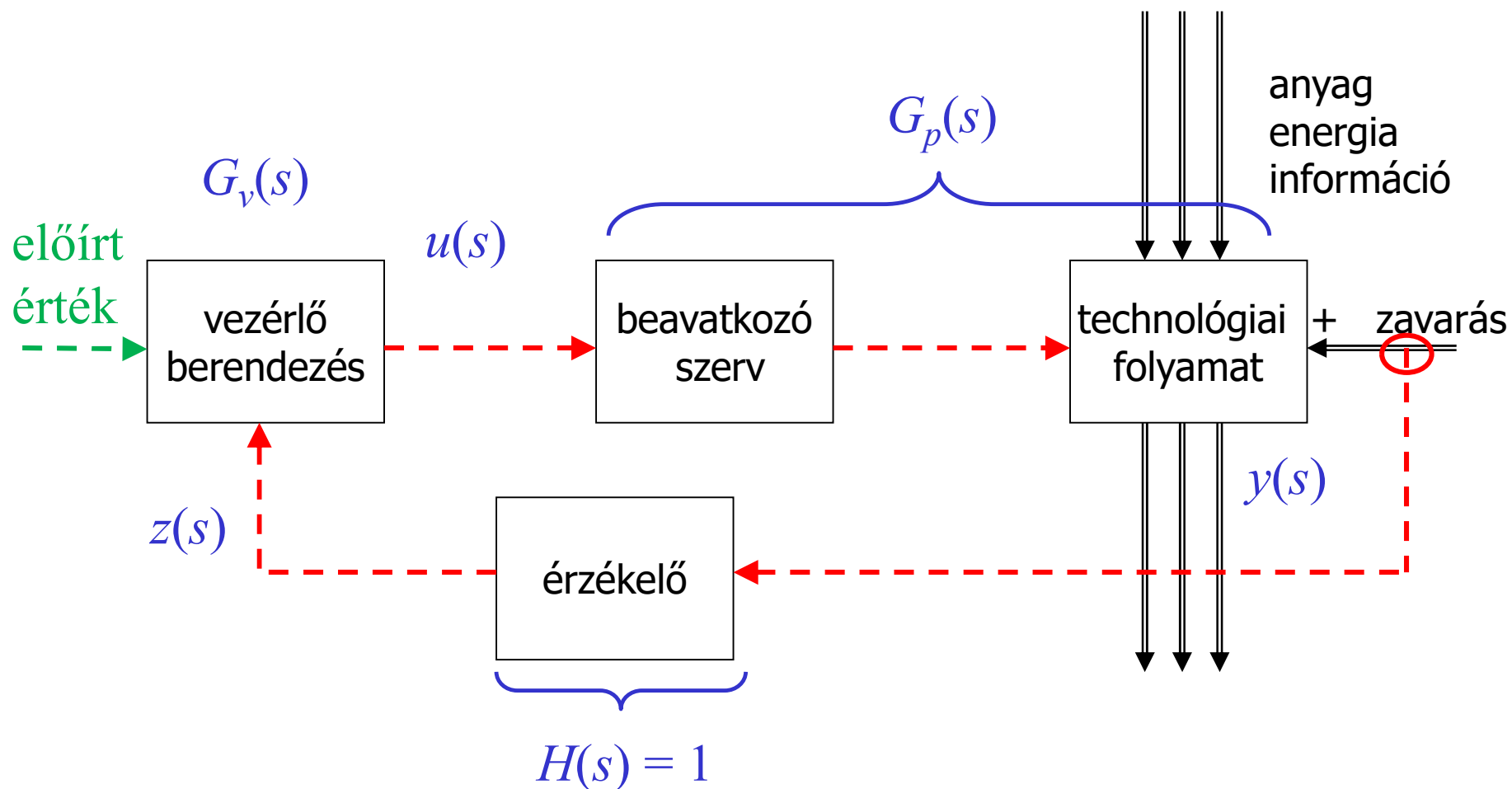
- Az irányító rendszer nem ellenőrzi a beavatkozás eredményét – vezérlő rendszerek

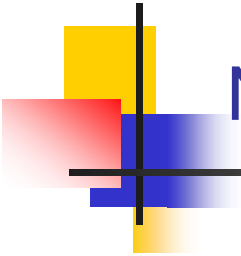


- ahol
  - $z(s)$  – zavarás / vezérlő bemenő jele
  - $u(s)$  – irányított bemenet / vezérlő kimenő jele
  - $G_v(s)$  – vezérlő rendszer átviteli függvénye
  - $G_p(s)$  – irányított folyamat átviteli függvénye
  - $y(s)$  – folyamat kimenő jele

# Nyílt hatásláncú rendszerek

- vezérlés hatáslánca





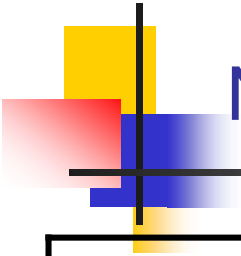
## Nyílt hatásláncú rendszerek

---

- Vezérlő rendszer leírása

$$u(s) = G_v(s) \cdot z(s)$$

- azaz az irányított bemenetet a zavarás értéke és az irányító rendszer tulajdonságai határozzák meg
- be nem tervezett zavarásokra, illetve a saját paramétereinek változásaira az irányító rendszer nem tud reagálni, azaz a rendszer csak a tervezési körülmények mellett működik megfelelően

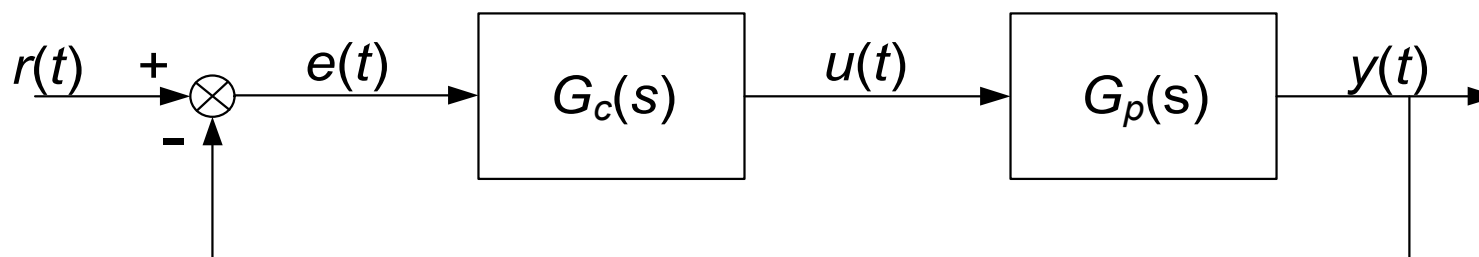


## Nyílt hatásláncú rendszerek

|                          | vezérlés                                                       |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------|
| zavaró jellemző          | néhány, előreismert zavarás<br>kompenzálása                    |
| irányított jellemző      | ha nincs ismeretlen zavarás, akkor<br>mindig az előírt értéken |
| irányítási szervek       | pontosan ismerni kell minden elemet                            |
| működési<br>sajátosságok | mindig stabil                                                  |

## Visszacsatolt rendszerek

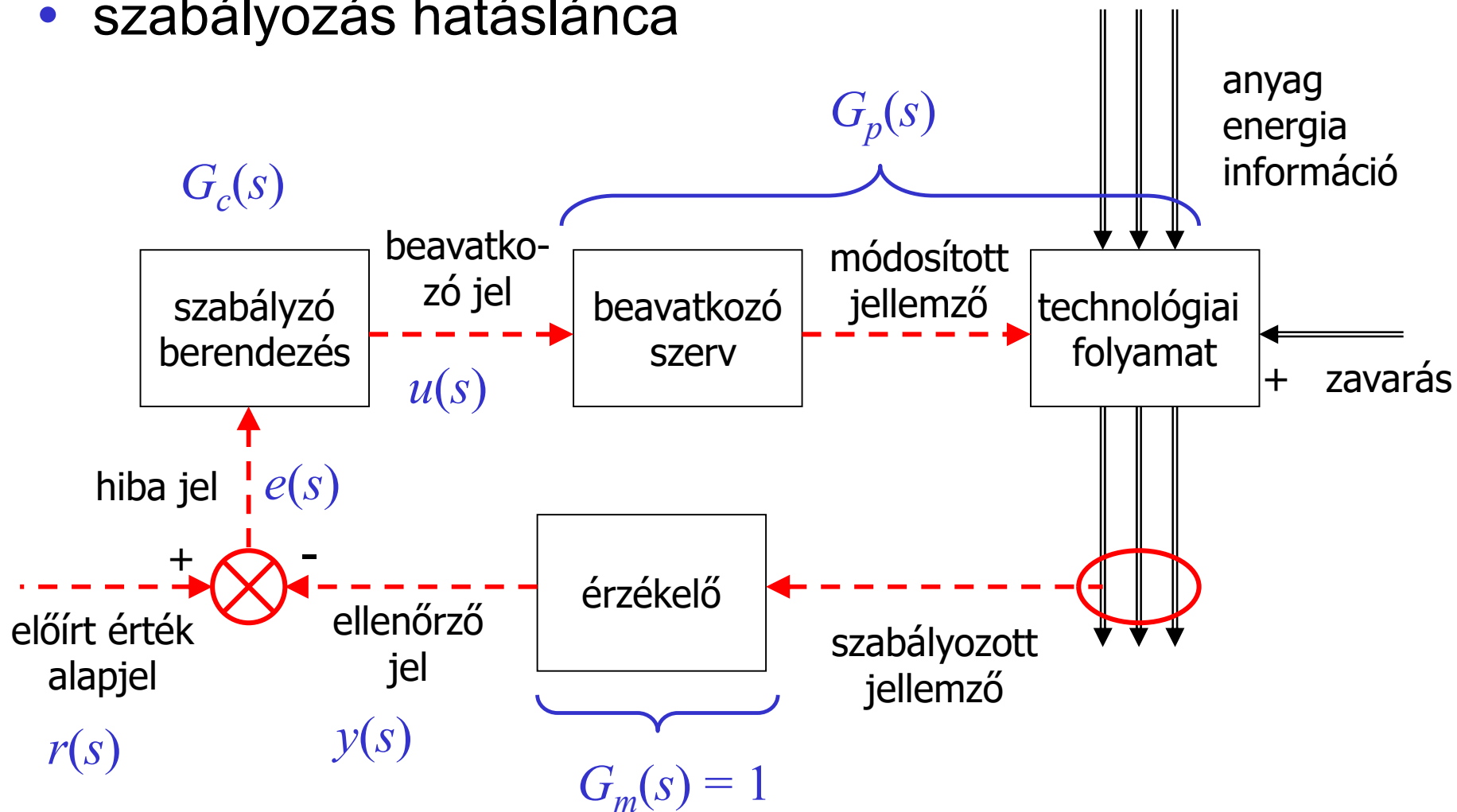
- az irányító rendszer folyamatosan ellenőrzi a szabályozott kimenetet – szabályzó rendszerek:

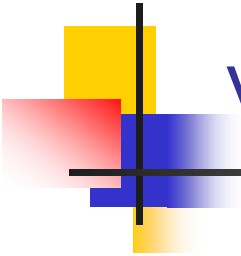


- ahol
- $r(t)$  – bemenő változó / előírt érték / alapjel
  - $e(t)$  – hiba jel / szabályzási eltérés
  - $G_c(s)$  – szabályzó átviteli függvénye
  - $u(t)$  – beavatkozó jel
  - $G_p(s)$  – szabályozott szakasz átviteli függvénye
  - $y(t)$  – kimenő változó / szabályozott kimenet

# Visszacsatolt rendszerek

- szabályozás hatáslánca





## Visszacsatolt rendszerek

---

- A visszacsatolt rendszer eredő átviteli függvénye

$$G_e(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad \text{ahol} \quad G(s) = G_c(s)G_p(s)$$

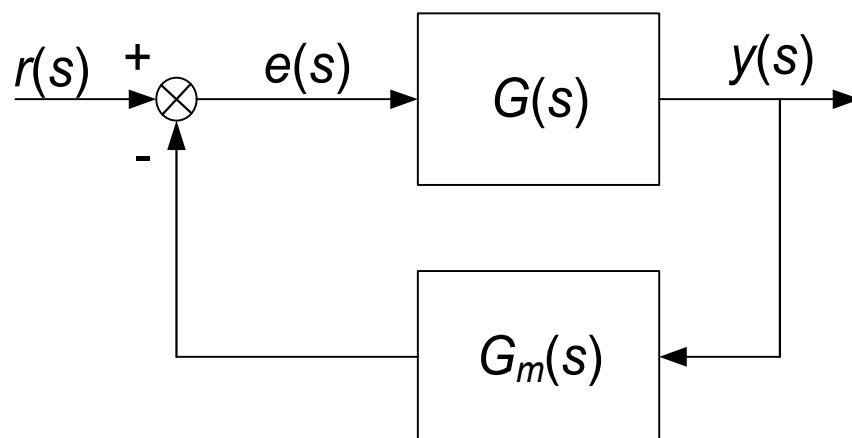
- a kimenet meghatározása:

$$y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} r(s) = G_e(s)r(s)$$

- azaz a kimenet itt is a bemenet értékétől és az irányított rendszer tulajdonságaitól függ, de a  $G_p(s)$ -beli zavarások hatása a nyitott rendszerhez képest kisebb, illetve  $G_c(s)$  alkalmas megválasztásával eltüntethető

## Visszacsatolt rendszerek

- visszacsatolt ágba megjelenhet az érzékelőt leíró tag:

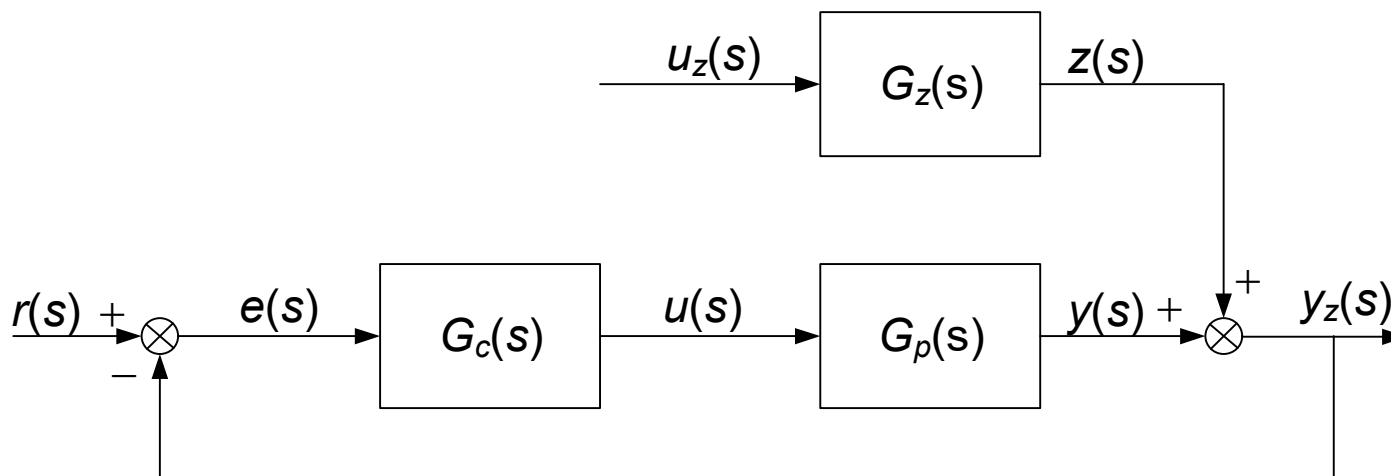


- ekkor az eredő átviteli függvény:

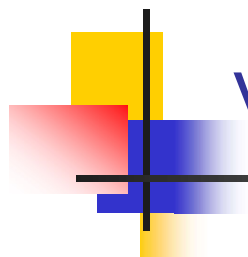
$$G_e(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)G_m(s)} \quad \text{ahol } G(s) = G_c(s)G_p(s)$$

## Visszacsatolt rendszerek

- Visszacsatolt kör kimenet a zavarást is figyelembe véve



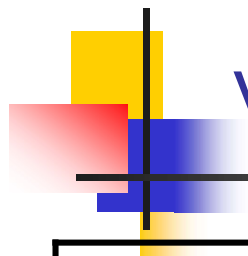
$$y_z(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} r(s) + \frac{G_z(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} u_z(s)$$



## Visszacsatolt rendszerek

---

- a visszacsatolás hatására
  - a rendszer elvileg kompenzálja a zavarásokból, paraméterváltozásokból fellépő eltérést, de
  - arányos típusú rendszerek eredő erősítése csökken, 1-nél kisebb lesz → állandósult állapotbeli hiba
  - az egyes tagok késleltető hatása miatt, az információ késleltetve jut a szabályozóhoz vissza, így a beavatkozás nem a megfelelő irányba történhet, ami instabilitáshoz vezethet

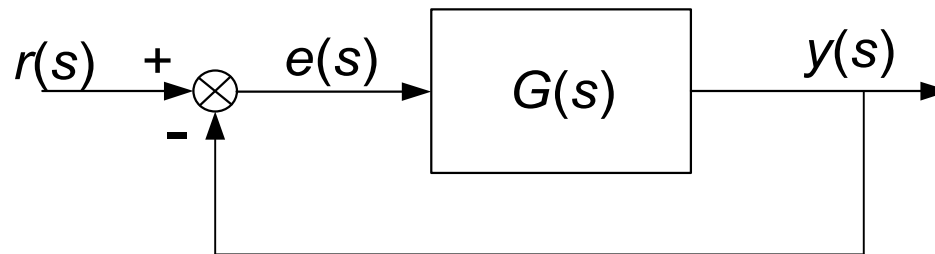


## Visszacsatolt rendszerek

|                       | szabályozás                           |
|-----------------------|---------------------------------------|
| zavaró jellemző       | minden zavarás kompenzálása           |
| irányított jellemző   | van eltérés, ez működteti a rendszert |
| irányítási szervek    | nem kell a pontos ismeret             |
| működési sajátosságok | lehet instabil (labilis) is           |

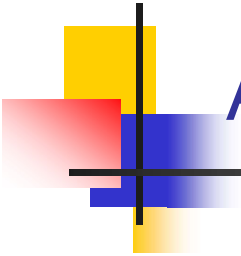
## Állandósult állapotbeli hiba

- a visszacsatolás alapvető célja a tényleges kimenet és az előírt kimenet közötti eltérés minimalizálása
- legyen a szabályzó kör a következő:



ahol  $G(s)$  legyen arányos viselkedésű tagcsoport

- a szabályzási eltérés:  $e(s) = r(s) - y(s)$



## Állandósult állapotbeli hiba

---

- az állandósult állapotbeli hiba:

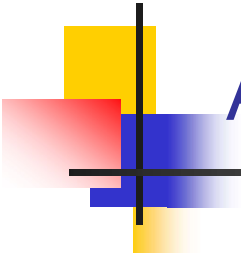
$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s e(s)$$

- a szabályzó kör felépítése alapján

$$e(s) = r(s) - y(s) = r(s) - G(s)e(s) \Rightarrow e(s) = \frac{r(s)}{1 + G(s)}$$

- azaz 
$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{s r(s)}{1 + G(s)} \right)$$

- tehát a hibát mind a bemenő jel, mind a rendszer típusa befolyásolja



## Állandósult állapotbeli hiba

---

- legyen a bemenet  $k$  amplitúdójú ugrásfüggvény:

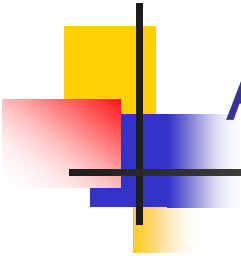
$$r(t) = k1(t) \quad r(s) = \frac{k}{s}$$

- ekkor a hiba

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{k}{1 + G(s)} \right) = \frac{k}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)} = \frac{k}{1 + K_p}$$

- ahol  $K_p$  az arányos hiba koefficiens vagy arányos hibaállandó:

$$K_p = \frac{k - e_{ss}}{e_{ss}}$$



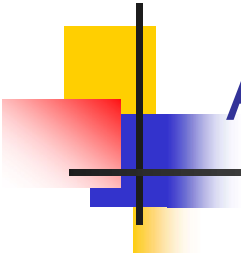
## Állandósult állapotbeli hiba

---

- ahhoz, hogy a hiba nulla legyen:

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \infty$$

- ehhez az kell, hogy a  $G(s)$  nevezőjében legyen egy  $s$  tag szorzóként, azaz kell egy integrátor tag
- ha nincs, akkor adott megengedett eltéréshez meghatározható a  $K_p$  érték
- ez, mint erősítés jelentkezik a visszacsatolt körben
- hiba: offszet



## Állandósult állapotbeli hiba

---

- legyen a bemenet sebességugrás függvény:

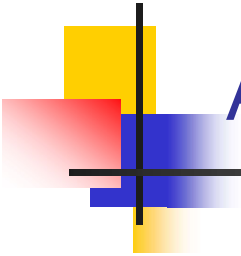
$$r(t) = k' \cdot t \quad r(s) = \frac{k'}{s^2}$$

- ekkor a hiba

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{k'}{s + sG(s)} \right) = \frac{k'}{\lim_{s \rightarrow 0} s G(s)} = \frac{k'}{K_v}$$

- ahol  $K_v$  a sebességi hiba koefficiens vagy sebességi hiba:

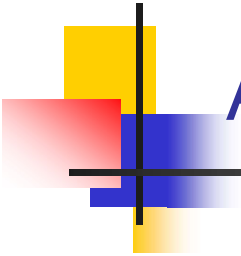
$$K_v = \frac{k'}{e_{ss}}$$



## Állandósult állapotbeli hiba

---

- ténylegesen ez nem a sebességhez kapcsolódó hiba, hanem beállítási hiba, ami a sebesség-ugrás bemenetből következik
- $K_v$  mértékegysége:  $(\text{másodperc})^{-1}$
- ahhoz, hogy az  $e_{ss}$  hiba nulla legyen  $K_v$ -nak végtelennek kell lennie, ehhez egy  $s^2$  tag kell  $G(s)$  nevezőjébe
- egyébként adott megengedett hibához meghatározható a  $K_v$  értéke



## Állandósult állapotbeli hiba

---

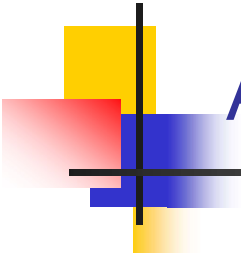
- ha a bemenet gyorsulás függvény:

$$r(t) = k''t^2/2 \quad r(s) = \frac{k''}{s^3}$$

- ekkor a hiba

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{k''}{s^2 + s^2 G(s)} \right) = \frac{k''}{\lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)} = \frac{k''}{K_a}$$

- ahol  $K_a$  a gyorsulási hiba koefficiens vagy gyorsulási hiba
- mértékegysége: (másodperc)<sup>-2</sup>



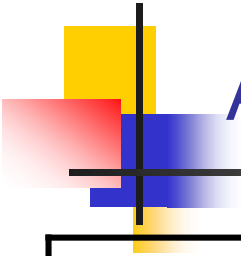
## Állandósult állapotbeli hiba

---

- a három eset alapján megállapítható, hogy az állandósult állapotbeli hiba léte attól függ, hogy milyen  $\alpha$  hatványú  $s$  tag szerepel a felnyitott kör átviteli függvényének nevezőjében:

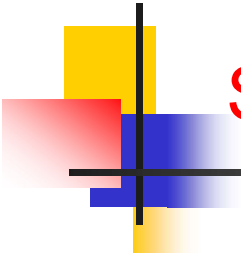
$$G(s) = \frac{K(s - z_1) \cdot \dots \cdot (s - z_m)}{s^\alpha (s - p_1) \cdot \dots \cdot (s - p_n)}$$

- a rendszereket  $\alpha$  értéke alapján szokás 0-, 1-, 2-típusúnak nevezni, ami megfelel egyben az origóba eső pólusok számának is



## Állandósult állapotbeli hiba

|                 | állandósult állapotbeli hiba, ha a bemenet |                |           |
|-----------------|--------------------------------------------|----------------|-----------|
| Rendszer típusa | ugrás                                      | sebesség-ugrás | gyorsulás |
| 0 típus         | véges                                      | végtelen       | végtelen  |
| 1 típus         | 0                                          | véges          | végtelen  |
| 2 típus         | 0                                          | 0              | véges     |



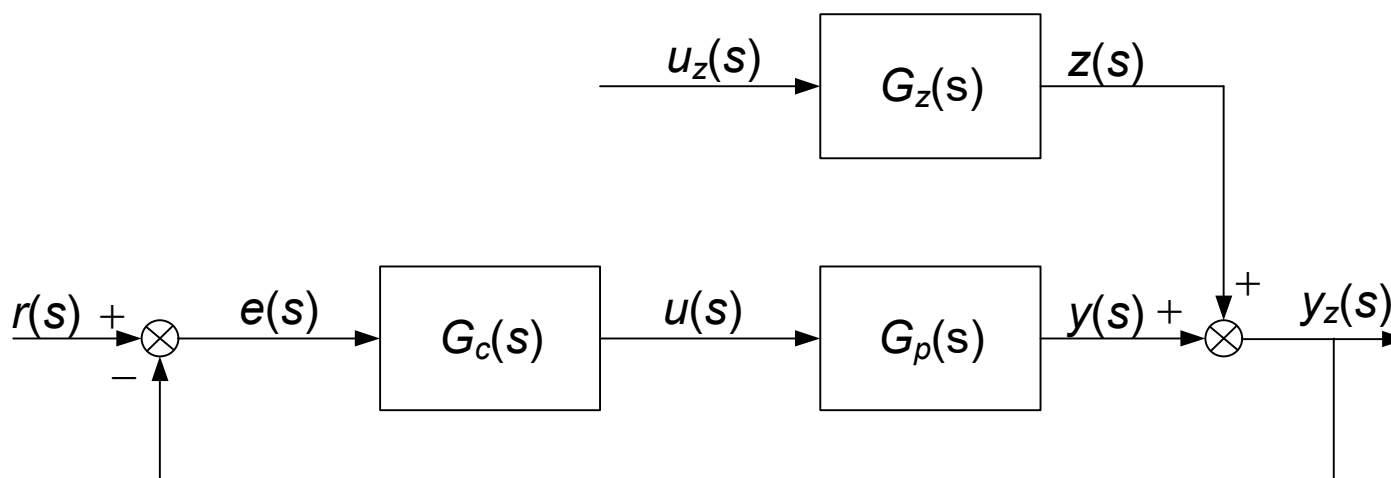
# Szabályozók

---

- Szabályozókkal szembeni elvárások:
  - stabilitás
  - megfelelő állandósult állapotbeli alapjel-követés
  - zavarkompenzáció
  - megfelelő tranziens viselkedés
  - érzéketlenség a paraméterváltozásra
  - valós rendszer korlátozásainak figyelembe vétele

# Szabályozók

- Soros szabályozási kör

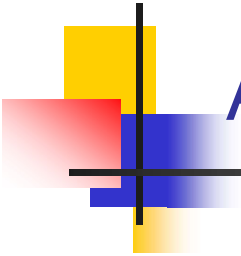


$$y_z(s) = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)} r(s) + \frac{G_z(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)} u_z(s)$$

- Stablis folyamatok irányítására pontos elméleti módszerek állnak rendelkezésre
- Az elméleti módszerek előtt kialakult az arányos (P), integráló (I) és deriváló (D) hatásokat alkalmazó szabályozási módszer → PID-szabályozó.
- Ez megoldás jól bevált, széles körben alkalmazható, így a mai napig ez a módszer kerül megvalósításra a szabályozás problémák döntő többségénél.
- A villamos megvalósítás mellett (passzív RLC-körtől a műveleti erősítőig) léteznek pneumatikus és mechanikus megoldások is.

- A PID szabályozás elve, hogy a szabályozó a szabályozási hibát
  - az aktuális értékére arányosan,
  - a múltbeli értékére annak integráljával arányosan,
  - a jövőbeni értékét pedig a hiba differenciálhányadosával, azaz megváltozásávalveszi figyelembe.

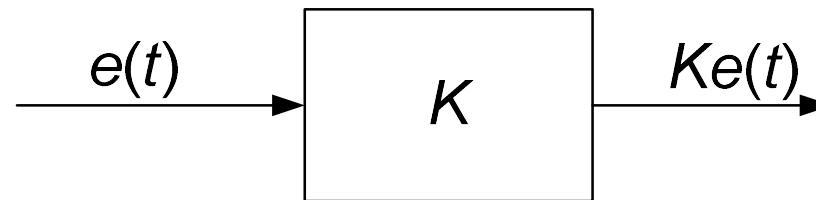
- A PID szabályozócsalád sikerének oka:
  - a minőségi előírások általában kielégítő mértékben teljesíthetők
  - felépítésük egyszerű
  - paramétereik változtatásának hatása jól követhető
  - tényleges megvalósításuk könnyű



## Arányos tag

---

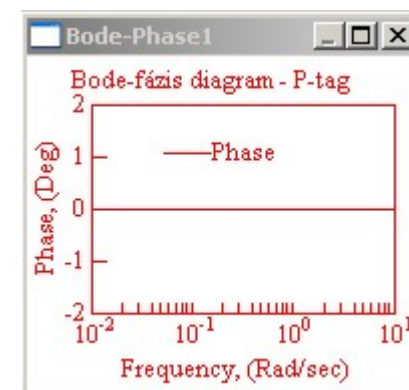
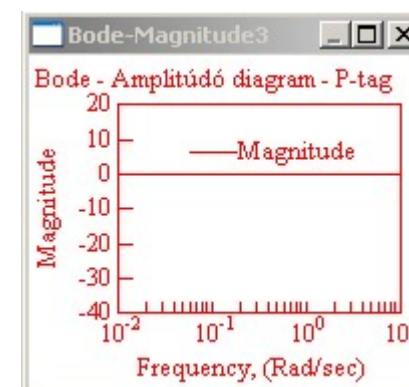
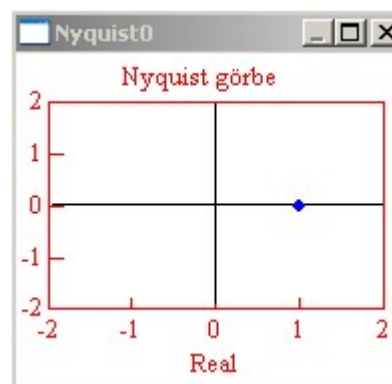
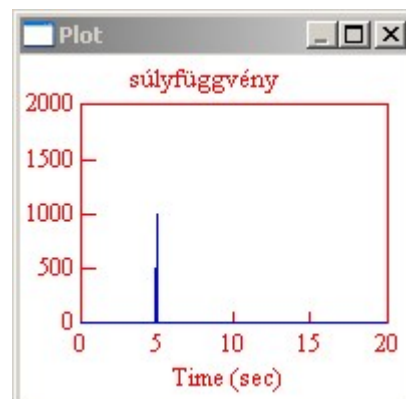
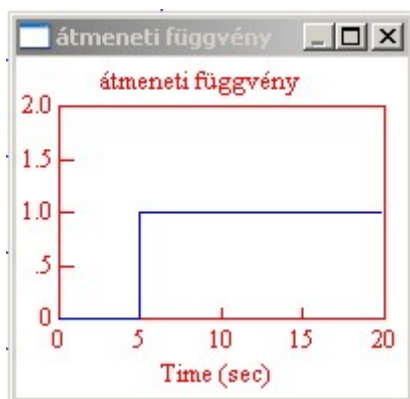
- bemenet a hibajel, kimenete pedig ennek az erősítéssel szorzott értéke:

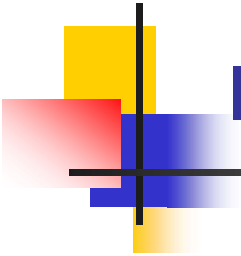


- hatására
  - gyorsabb lesz a rendszer működése
  - visszacsatolásban csökken az állandósult állapotbeli hiba
  - növekszik a lengésre való hajlam

# Arányos tag

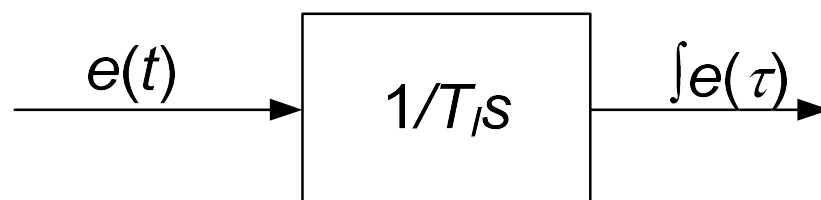
- I/O modell:  $u(t) = Ke(t)$
- átviteli függvény:  $G(s) = K$
- frekvencia függvény:  $G(j\omega) = K$





## Integráló tag

- bemenet a hibajel, kimenete pedig ennek az integrálja



- hatására a visszacsatolt körben
  - eltűnik a maradó hiba,
  - de még jobban növekszik a lengésre való hajlam:
    - a felnyitott körnek pólusa lesz az origóban
    - a visszacsatolt körben növekszik a nevező fokszáma

## Integráló tag

- I/O modell:

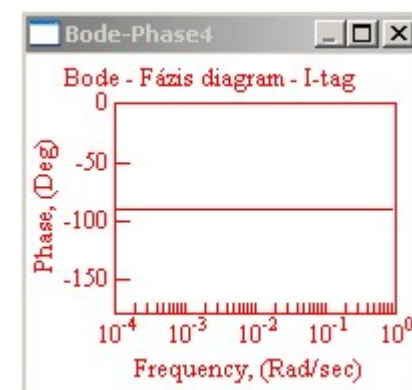
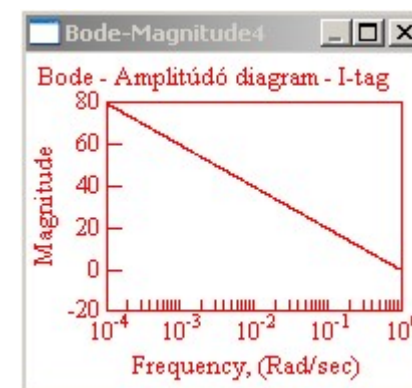
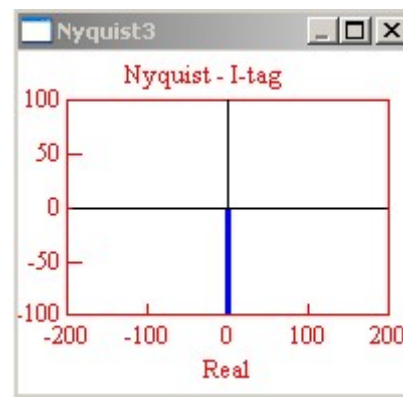
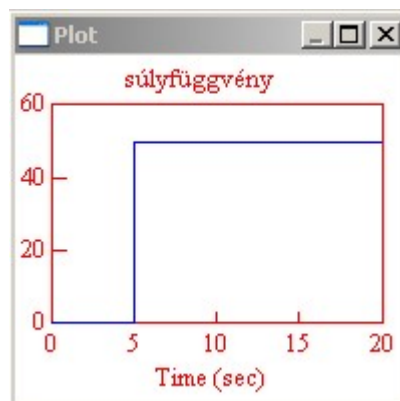
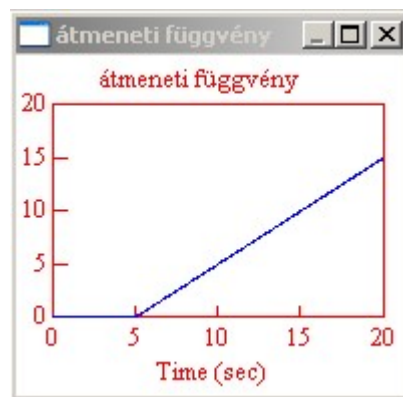
$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

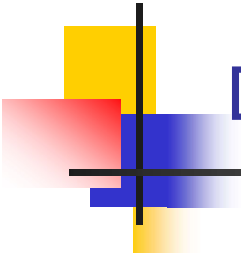
- átviteli függvény:

$$G(s) = \frac{1}{T_I s}$$

- frekvencia függvény:

$$G(j\omega) = \frac{1}{T_I j\omega}$$

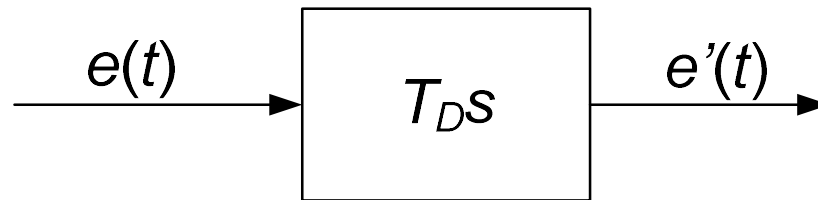




## Deriváló tag

---

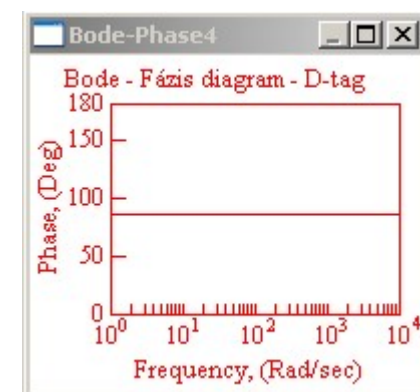
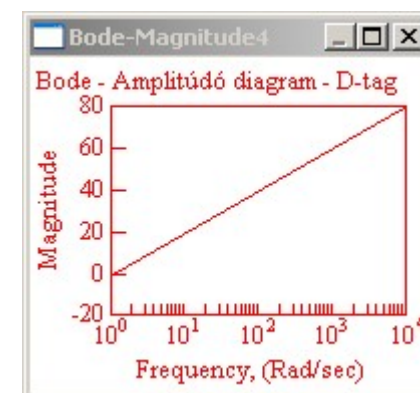
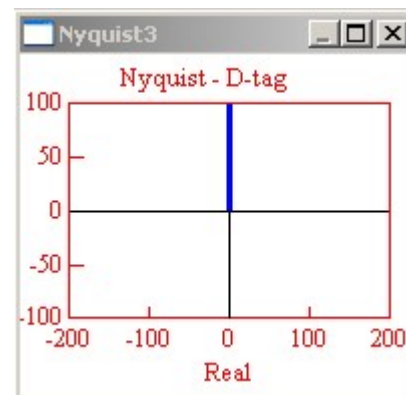
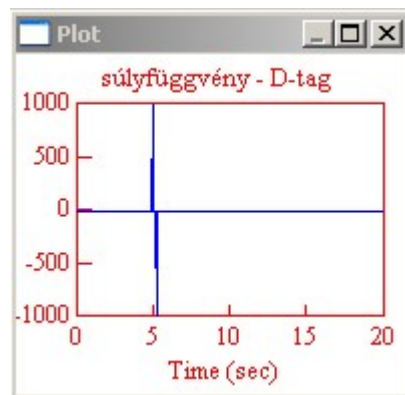
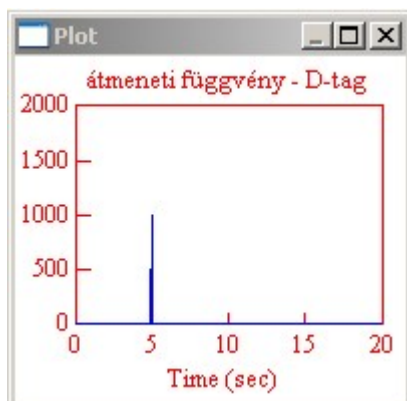
- lengési hajlam csökkentése: deriváló tag beépítése
  - bemenete a hibajel, kimenet a hibajel deriváltja



- D-tag hatása
  - ha a hibajel konstans, akkor 0 a kimenete
  - ha a hibajel nem konstans, akkor megelőző hatást fejt ki: megakadályozza a nagy túl- és alálendüléseket

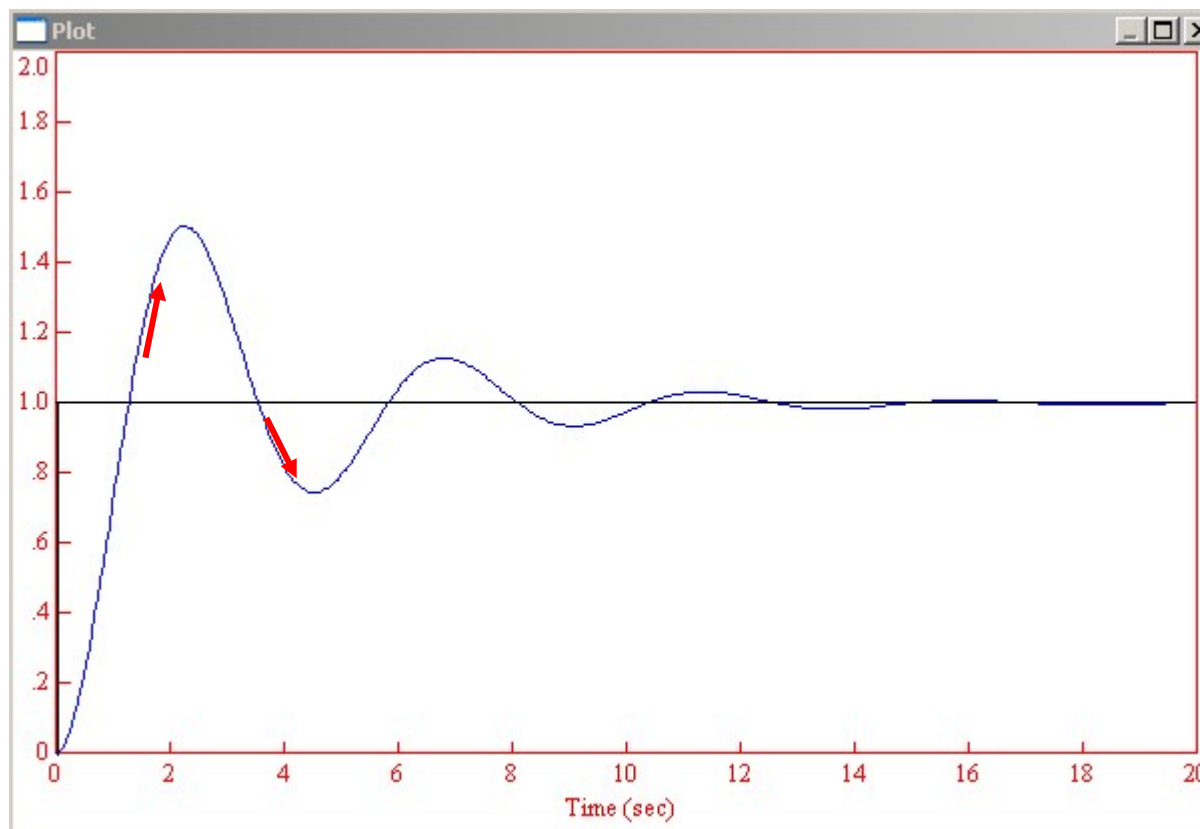
## Deriváló tag

- I/O modell:  $u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$
- átviteli függvény:  $G(s) = T_D s$
- frekvencia függvény:  $G(j\omega) = T_D j\omega$



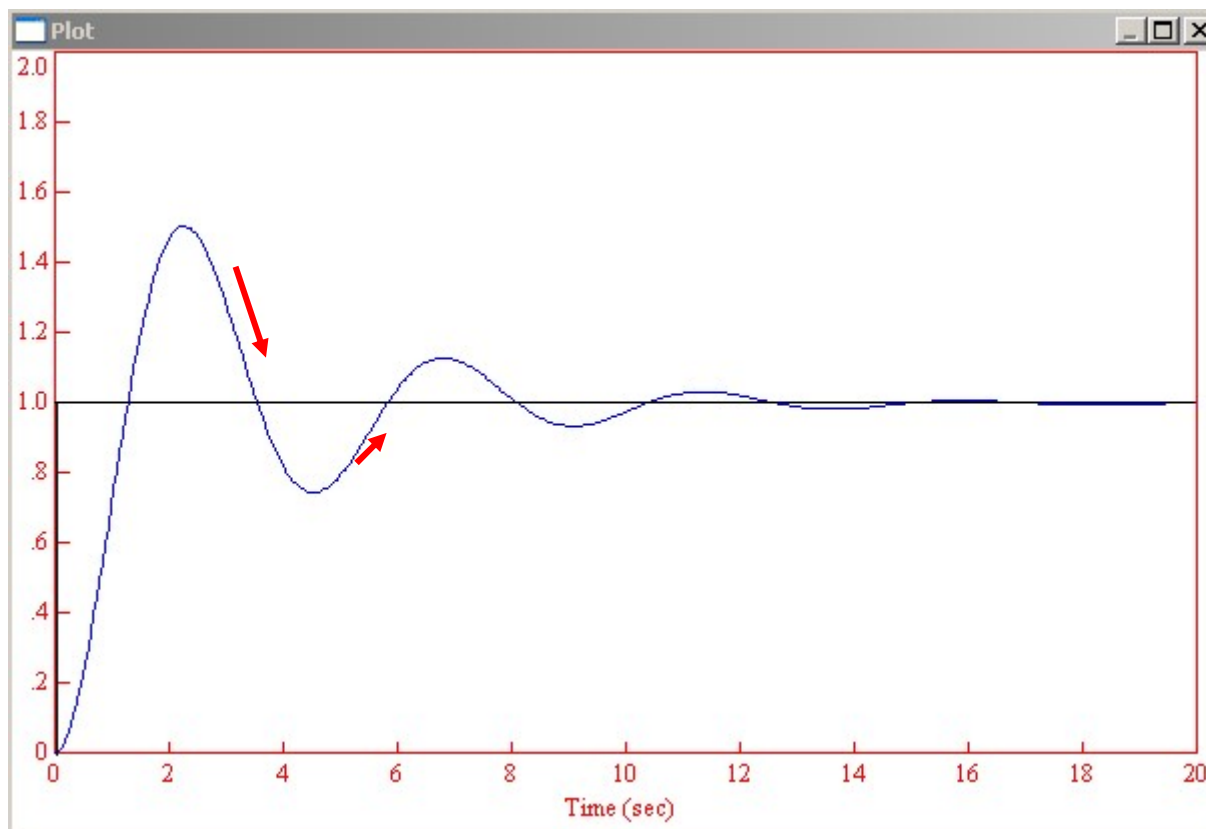
## Deriváló tag

- ha a hibajel növekszik, akkor a derivált és a jel előjele megegyezik, és a deriváló tag növeli a szabályzó jelét, sietteti a túllendülés bekövetkeztét

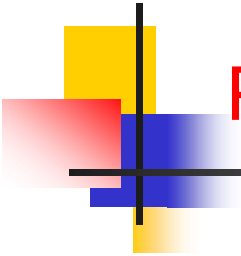


## Deriváló tag

- ha a hibajel csökken, akkor a derivált és a jel előjele különbözik – csökkenti a szabályzó kimenetét, lassítja a működést, kisebb lesz a túllendülés



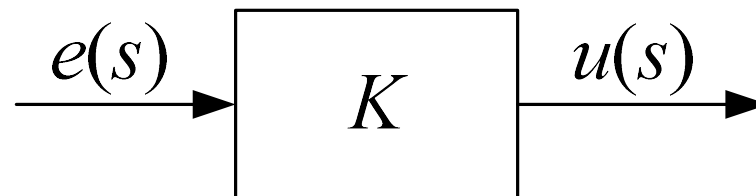
- Összefoglalva:
  - arányos tag segítségével gyorsíthatjuk a rendszer működését, de az állandósult állapotbeli hiba nem tüntethető el
  - integráló tag segítségével maradéktalanul eltüntethető az állandósult állapotbeli hiba, de a lengésre való hajlam erősödik
  - általában elegendő, ha az ugrás jel esetén nincs állandósult állapotbeli hiba
  - cél: egy gyors, de lengésre nem hajlamos rendszer kialakítása – megfelelő szabályzó



## P-szabályozó

---

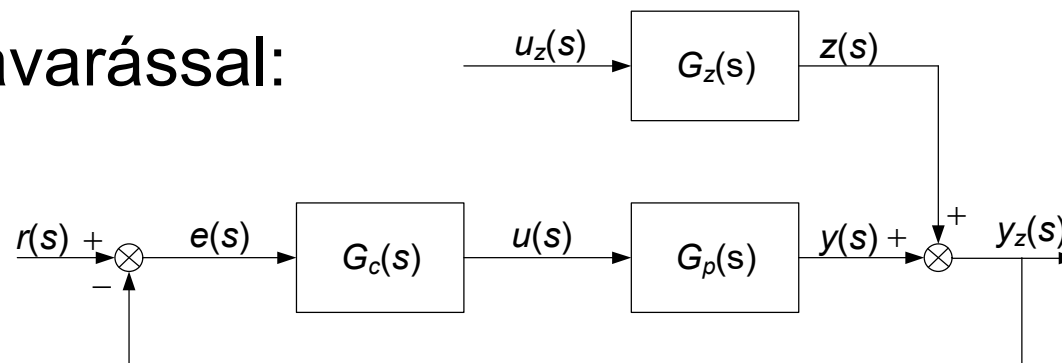
- megfelel az arányos tagnak



- jellemzői:
  - alapjelváltásnál maradó szabályozási hiba lesz
  - zavarkompenzáció nem tökéletes
  - általában stabilis
  - nagyobb foksámú tagoknál lengés léphet fel, illetve instabilitás is lehetséges

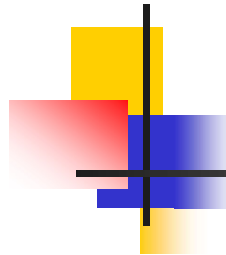
## P-szabályozó

- szabályozási kör zavarással:



$$y_z(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} r(s) + \frac{G_z(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} u_z(s)$$

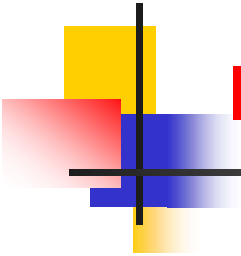
- alapjel követés:  $y^r(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} r(s)$
- zavarkompenzáció:  $y^z(s) = \frac{G_z(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} u_z(s)$



# P-szabályozó

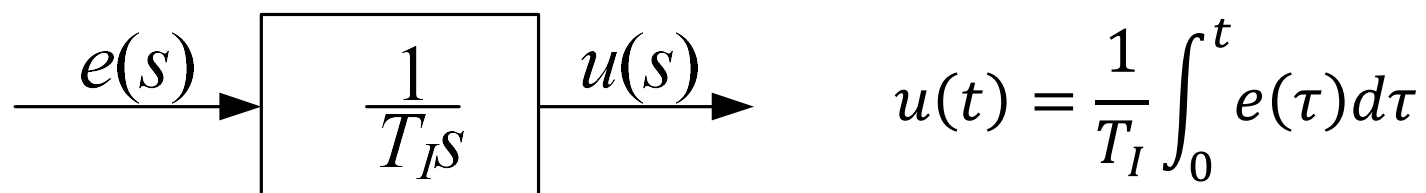
---

- P-szabályozóval
  - nulladrendű szakasz szabályozása elvileg lehetséges (holtidőmentes eset);
  - integráló szakasz szabályozása lehetséges;
  - elsőrendű szakasz szabályozása lehetséges, de maradó szabályozási hiba!
  - másodrendű szakasz szabályozása lehetséges, de maradó szabályozási hiba és túllendülés lehet!
  - magasabb rendű szakasz szabályozásakor lengések és instabilitás lehetséges

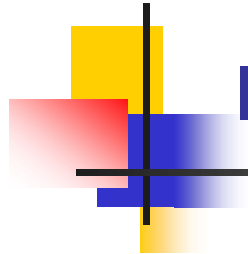


## I-szabályozó

- megfelel az ideális integráló tagnak



- jellemzői:
  - alapjel váltásnál nincs maradó szabályozási hiba
  - zavarkompenzáció tökéletes
  - arányos és elsőrendű szakaszok esetén stabilis, de az elsőrendűnél lehet túllendülés
  - nagyobb foksámú tagoknál lengés és instabilitás lehet



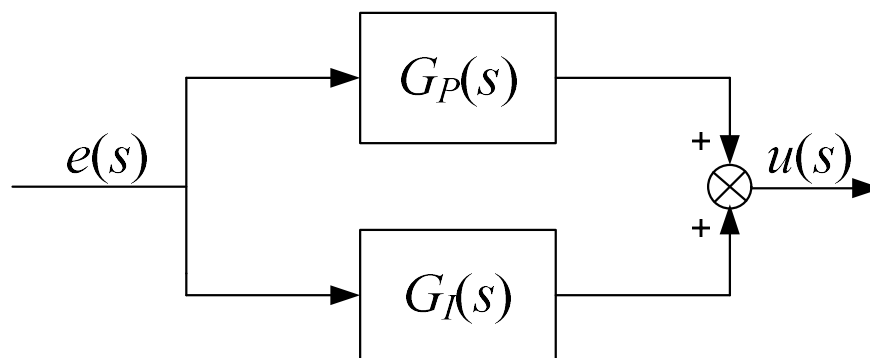
## I-szabályozó

---

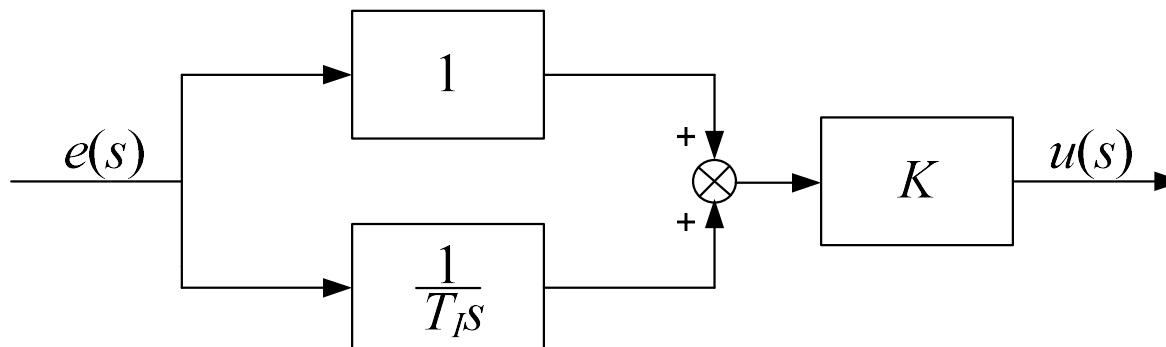
- I-szabályozó
  - ajánlott arányos viselkedésű tagokhoz, de magasabb tagoknál lehet labilis helyzet;
  - nem ajánlott integráló jellegű tagokhoz (tisztá integráló, egytárolós integráló,...).
- Az integrálási időállandó csökkentése növeli a lengésre, illetve instabilitásra való hajlamot, növelése megnöveli a lecsengési időt.

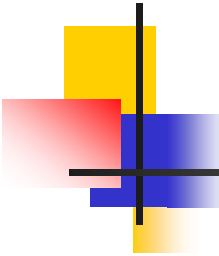
# PI-szabályozó

- Arányos és integráló tagok párhuzamosan kapcsolva



- gyakorlati megvalósítás:





## PI-szabályozó

- I/O modell:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$$

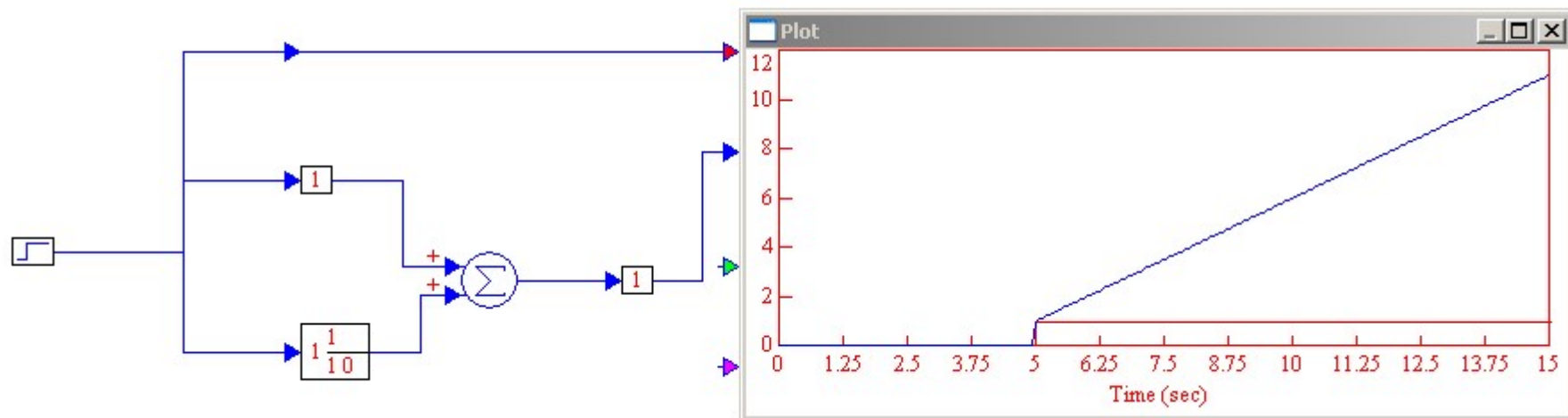
- átviteli függvény:

$$G_{PI}(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) = K \frac{T_I s + 1}{T_I s}$$

- frekvencia függvény:  $G_{PI}(j\omega) = K \left( 1 + \frac{1}{T_I j\omega} \right) = K \frac{T_I j\omega + 1}{T_I j\omega}$

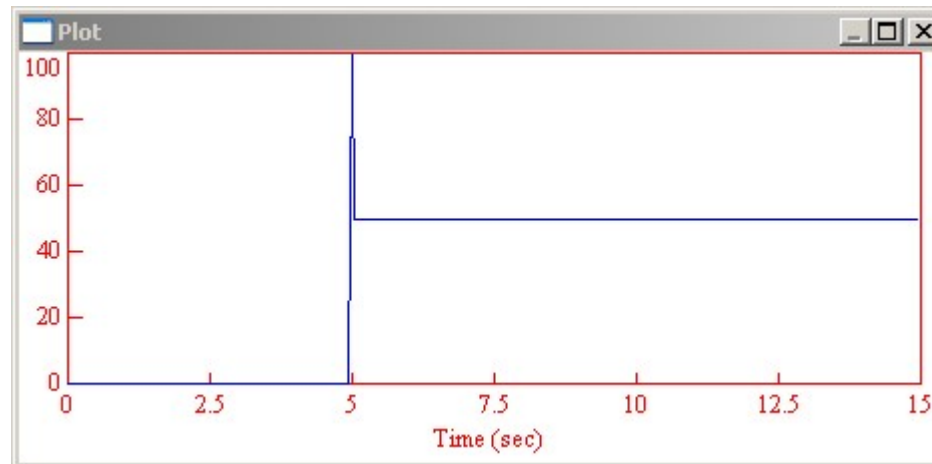
# PI-szabályozó

- átmeneti függvény

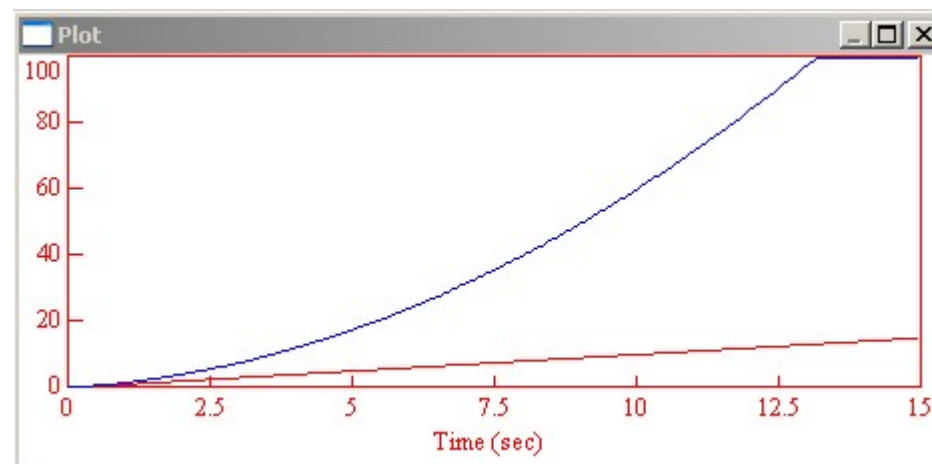


# PI-szabályozó

- súlyfüggvény:

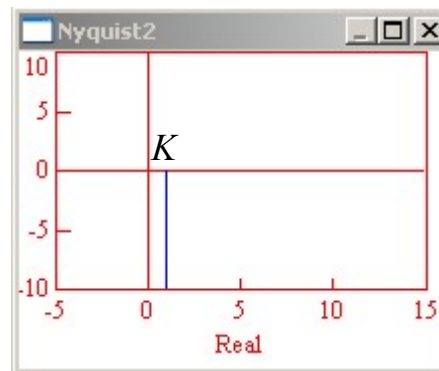


- sebesség-válaszfüggvény:



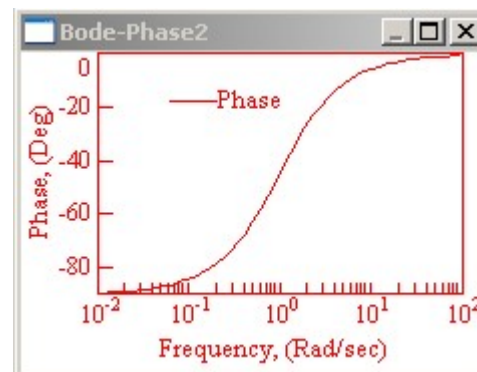
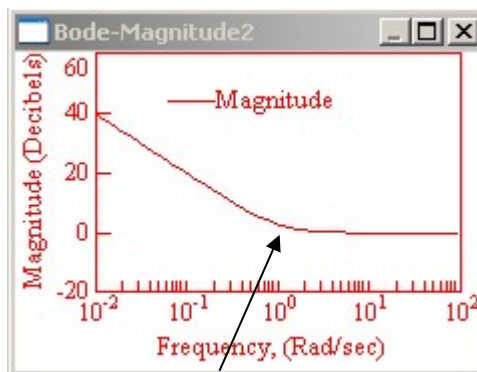
# PI-szabályozó

- Nyquist-diagram



$$G_{PI}(j\omega) = K + \frac{K}{T_I j\omega}$$

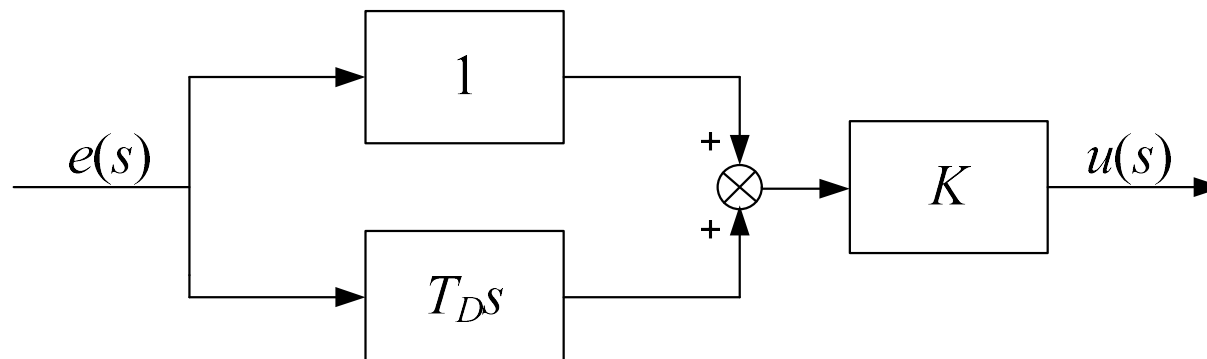
- Bode diagram



$$G_{PI}(j\omega) = K \frac{T_I j\omega + 1}{T_I j\omega}$$

## PD-szabályozó

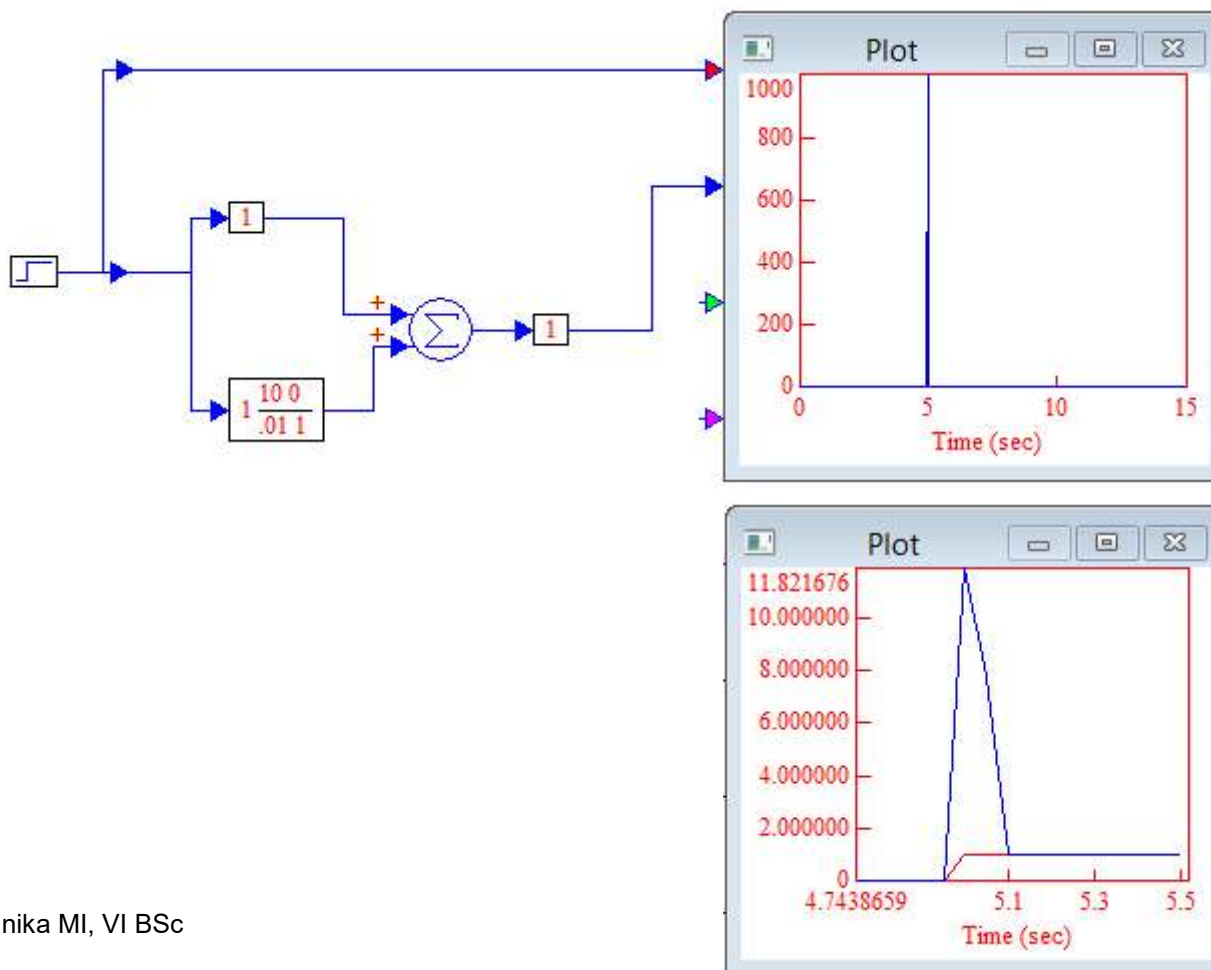
- Arányos és deriváló tagok párhuzamosan kapcsolva



- I/O modell: 
$$u(t) = K \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$
- átviteli függvény: 
$$G_{PD}(s) = K(1 + T_D s)$$
- frekvencia függvény: 
$$G_{PD}(j\omega) = K(1 + T_D j\omega)$$

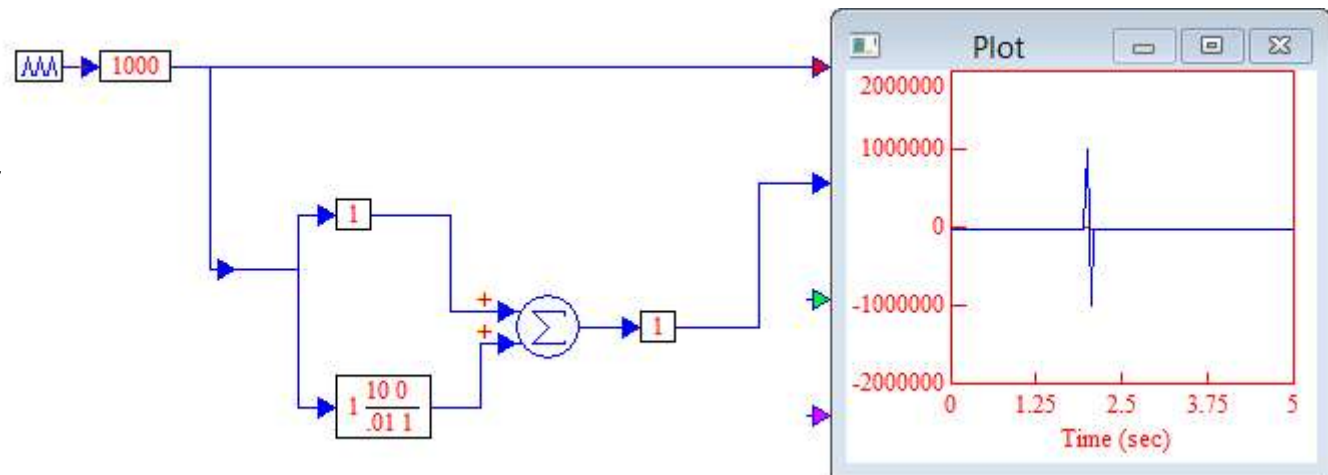
# PD-szabályozó

- átmeneti függvény

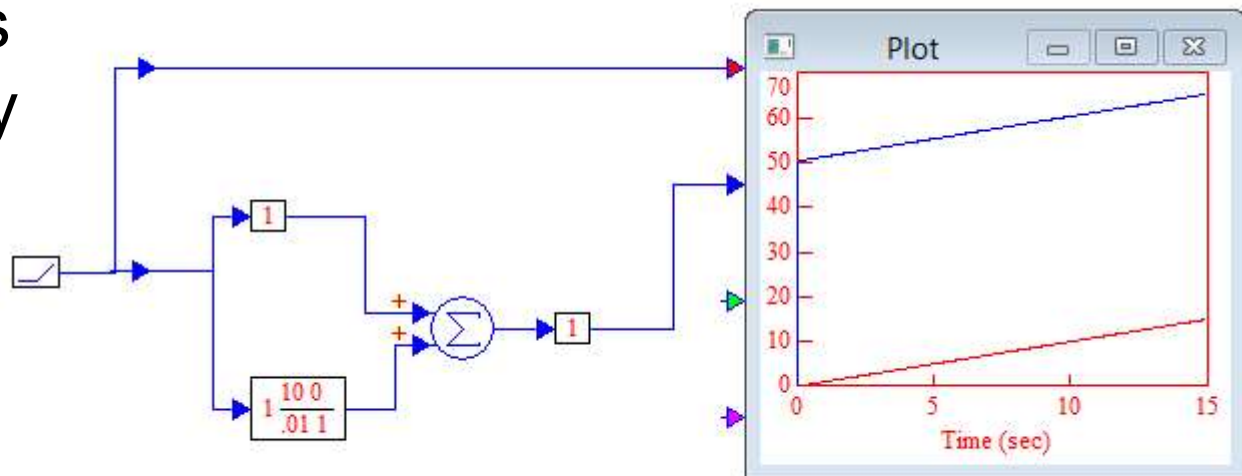


# PD-szabályozó

- súlyfüggvény



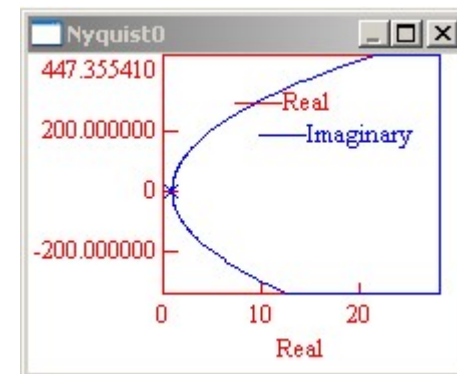
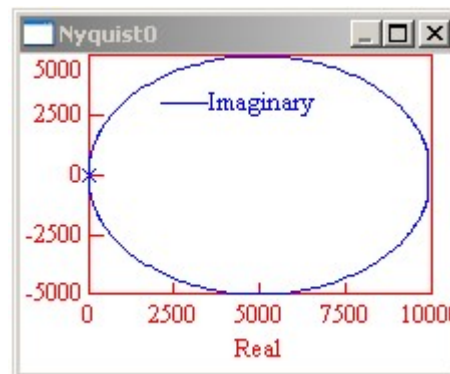
- sebességugrás  
válaszfüggvény



# PD-szabályozó

- Nyquist-diagram

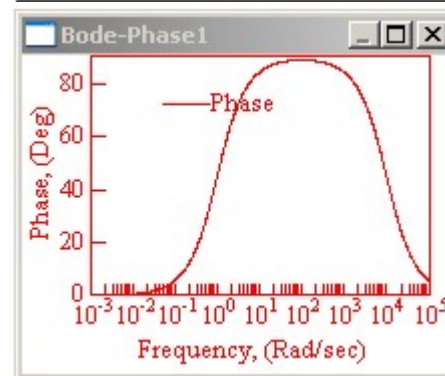
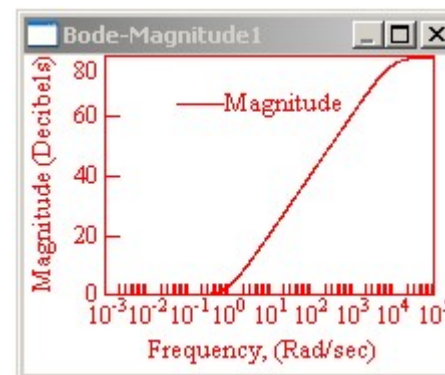
*reális diagramok!*



- Bode-diagram

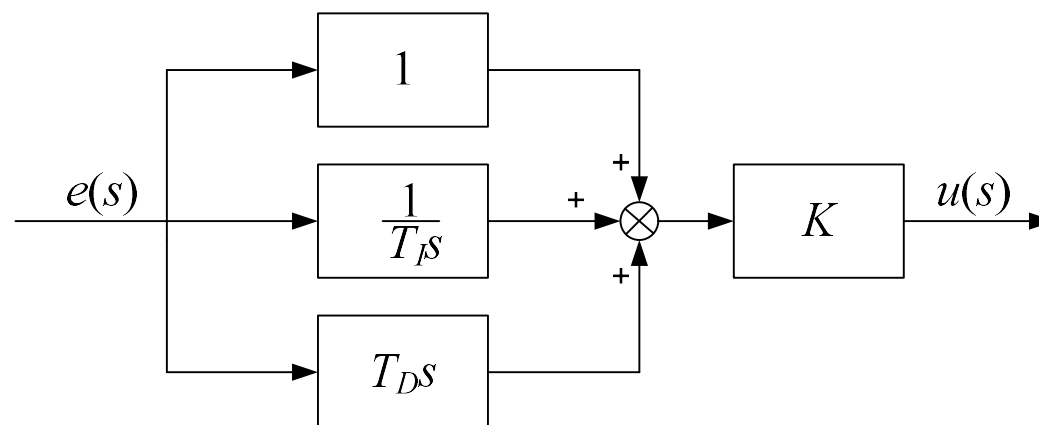
$$20 \lg|1 + T_D j\omega| = 20 \lg \sqrt{1 + T_D^2 \omega^2}$$

$$\phi(\omega) = \text{arctg} T_D \omega$$



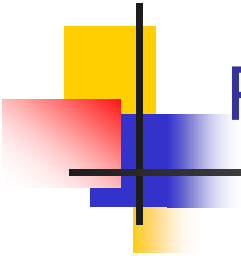
## PID-szabályozó – ideális

- Arányos, integráló és deriváló tagok párhuzamos kapcsolása



- I/O modell:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right)$$



## PID-szabályozó – ideális

---

- átviteli függvény

$$G(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

- frekvenciafüggvény

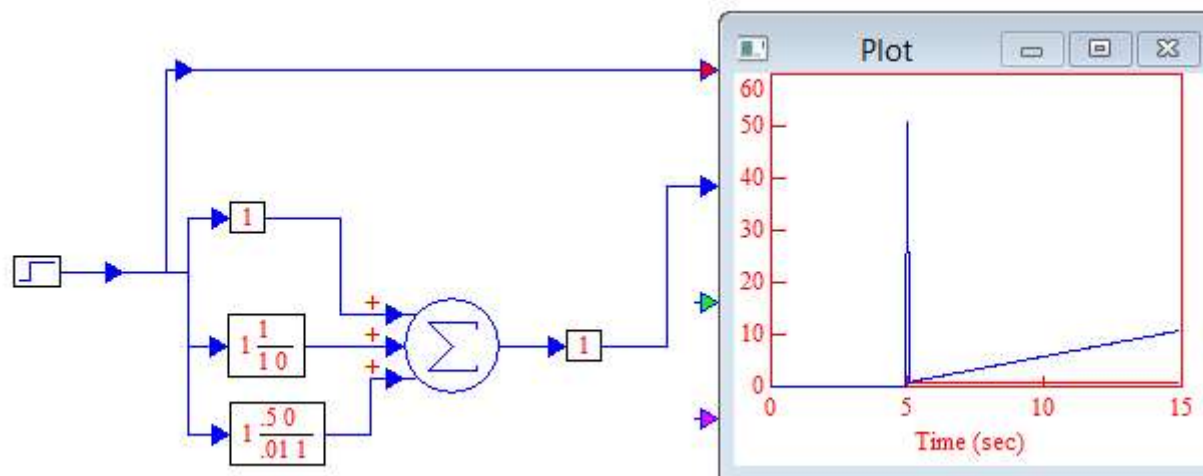
$$G(j\omega) = K \left( 1 + \frac{1}{T_I j\omega} + T_D j\omega \right) = K \left( \frac{T_I j\omega + 1 + T_I T_D (j\omega)^2}{T_I j\omega} \right) =$$

$$= K \frac{1}{T_I j\omega} (T^2 (j\omega)^2 + 2\xi T j\omega + 1)$$

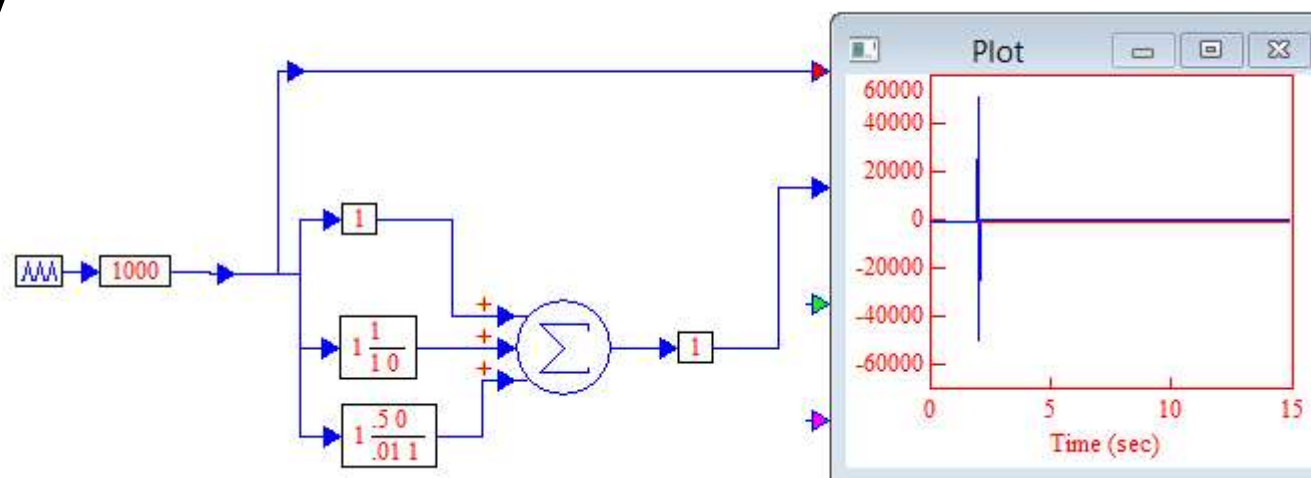
- ahol  $T = \sqrt{T_I T_D} \quad \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_I}{T_D}}$

# PID-szabályozó – ideális

- átmeneti függvény

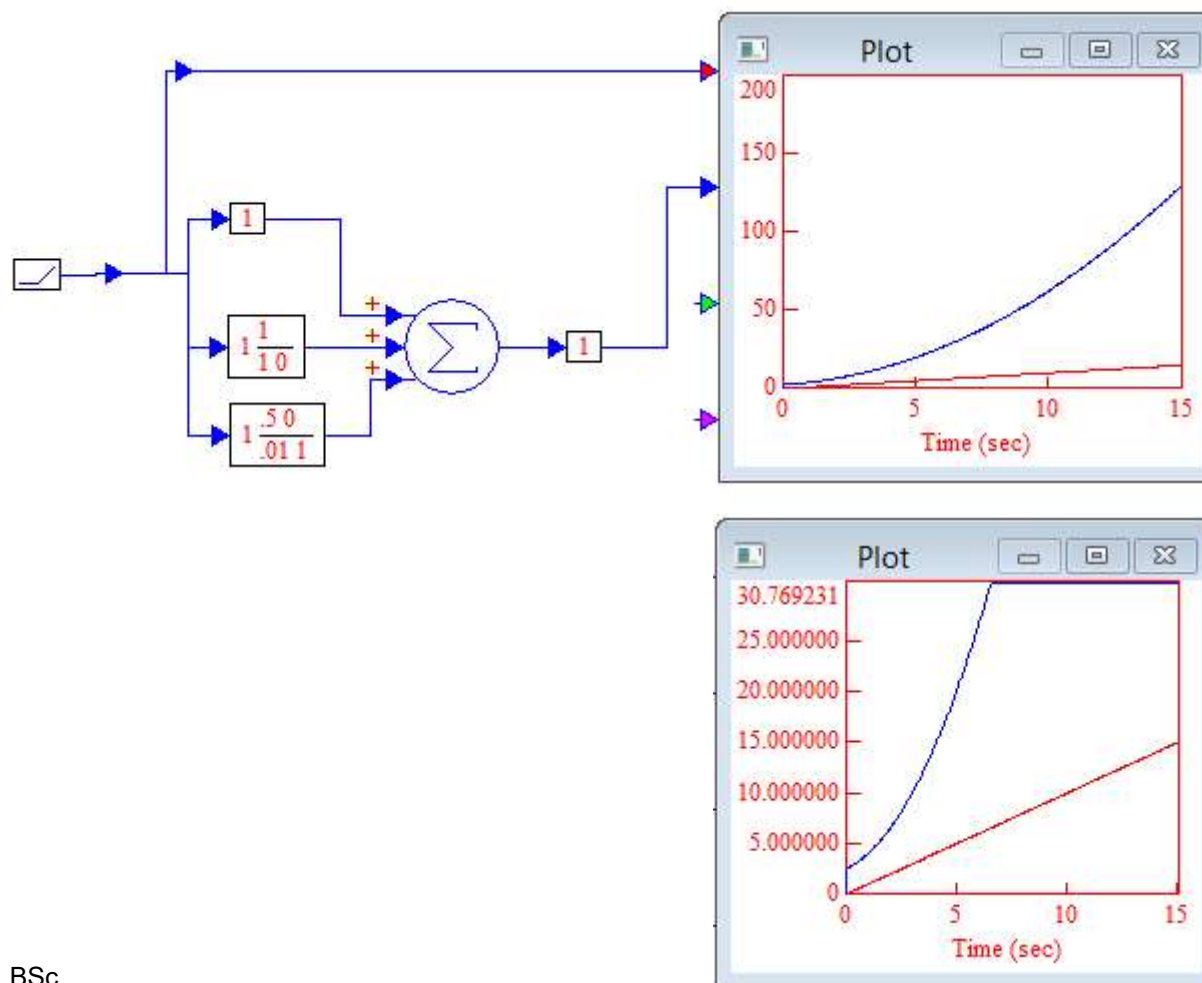


- súlyfüggvény



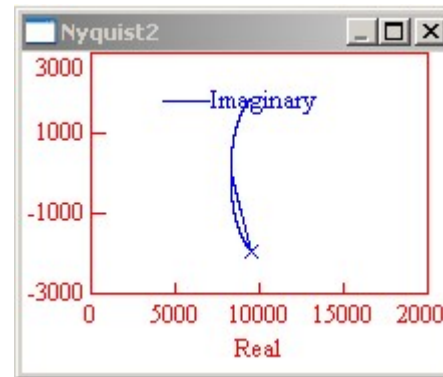
# PID-szabályozó – ideális

- sebességugrás válaszfüggvény

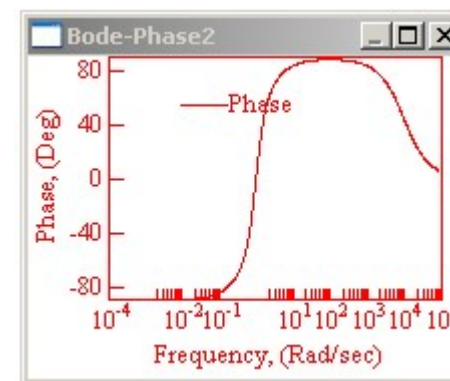
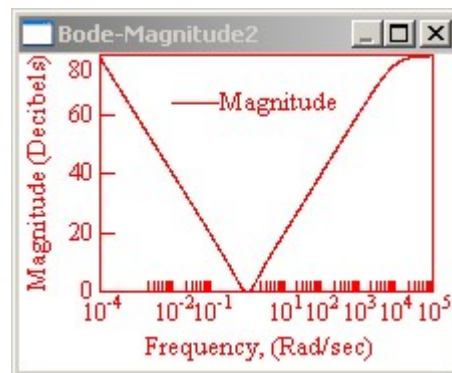


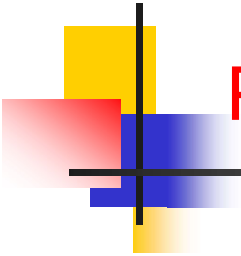
# PID-szabályozó – ideális

- Nyquist-diagram



- Bode-diagram





## Példa

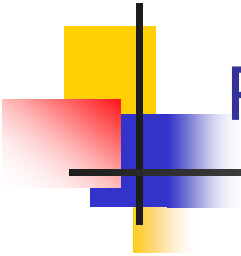
---

- Legyen a szabályozandó objektum átviteli függvénye a következő:

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 2.6s^2 + 2.6s + 1}$$

- megállapítható, hogy az objektum erősítése 1
- további paramétereinek megállapításához bontsuk fel

$$G_o(s) = \frac{1}{s^3 + 2.6s^2 + 2.6s + 1} = \frac{1}{(s + 1)(s^2 + 1.6s + 1)}$$



## Példa

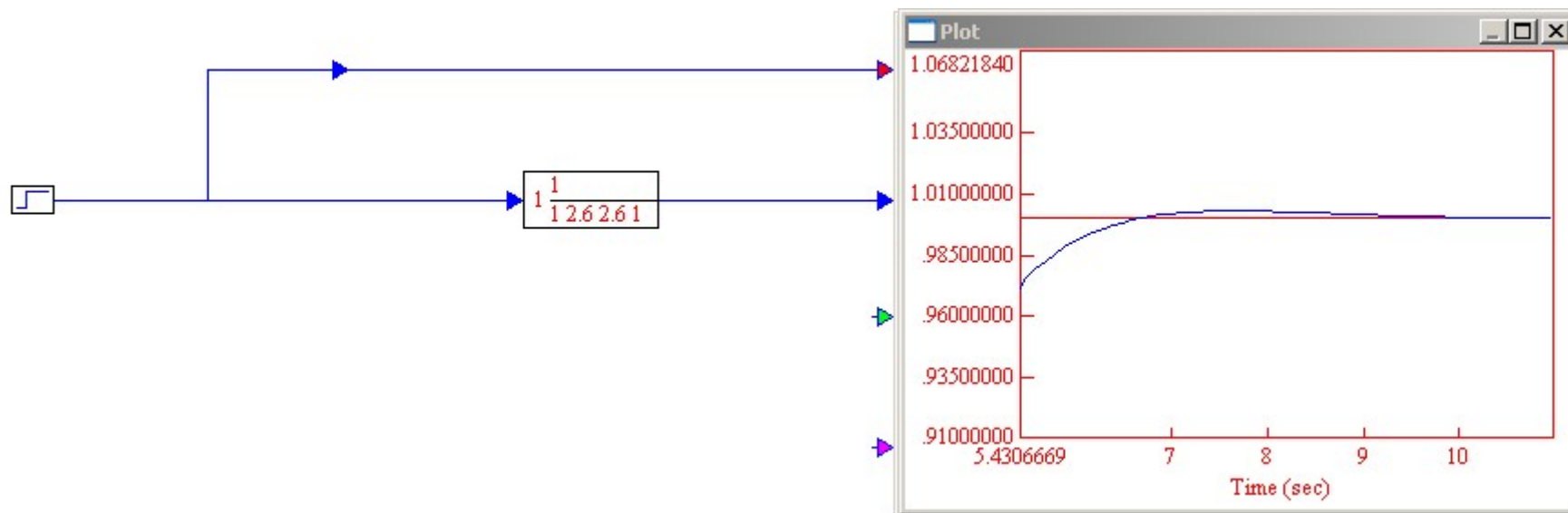
---

- azaz a szabályozandó objektum felfogható
  - egy elsőrendű ( $\tau = 1$ ) és
  - egy másodrendű ( $\omega_n = 1, \xi = 0,8$ ) tag sorba kapcsolt eredőjeként

- pólusai:
$$G_o(s) = \frac{1}{(s + 1)(s^2 + 1.6s + 1)}$$
  - $p_1 = -1$
  - $p_{2,3} = -0,8 \pm j0,6$

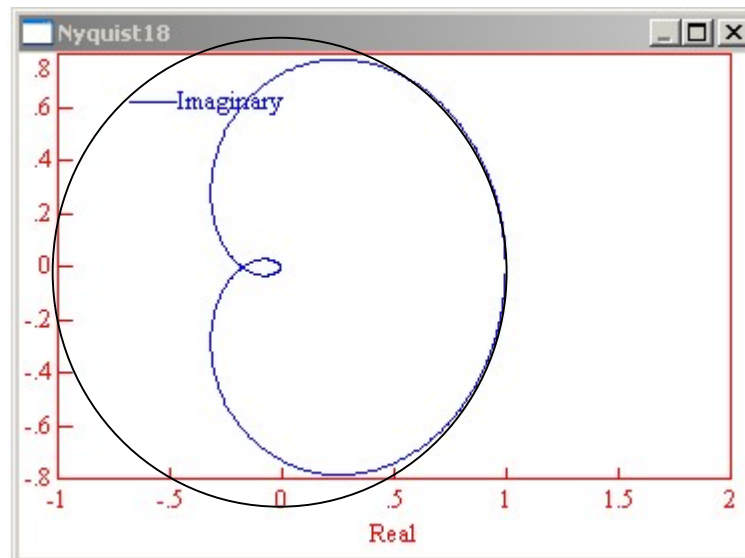
## Példa

- átmeneti függvénye



## Példa

- Az objektum frekvenciafüggvényei:
  - Nyquist-diagram



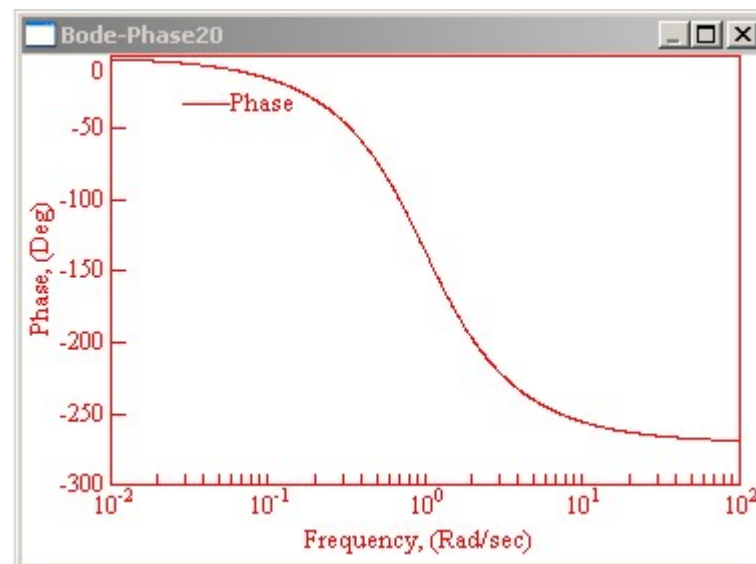
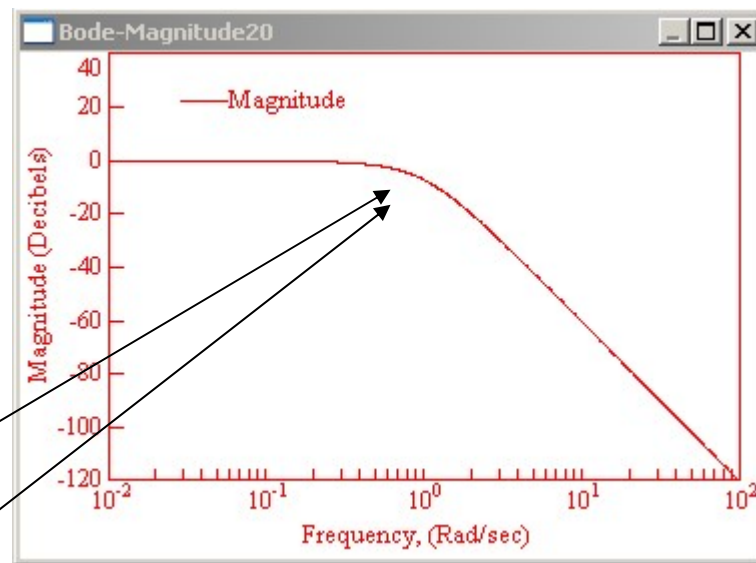
# Példa

- Bode-diagram

$$\tau = 1, T = 1$$

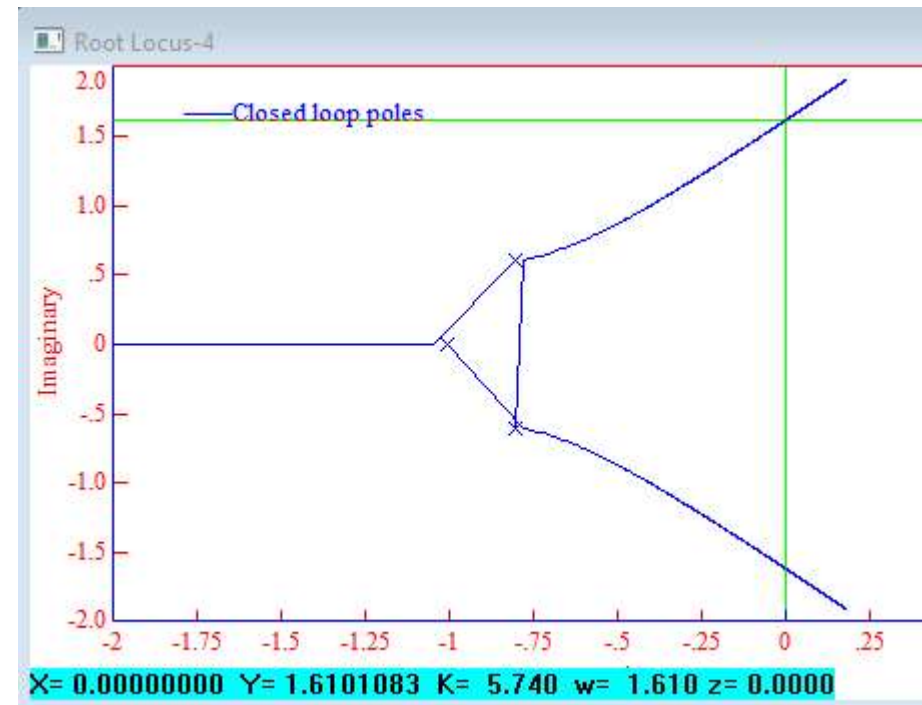
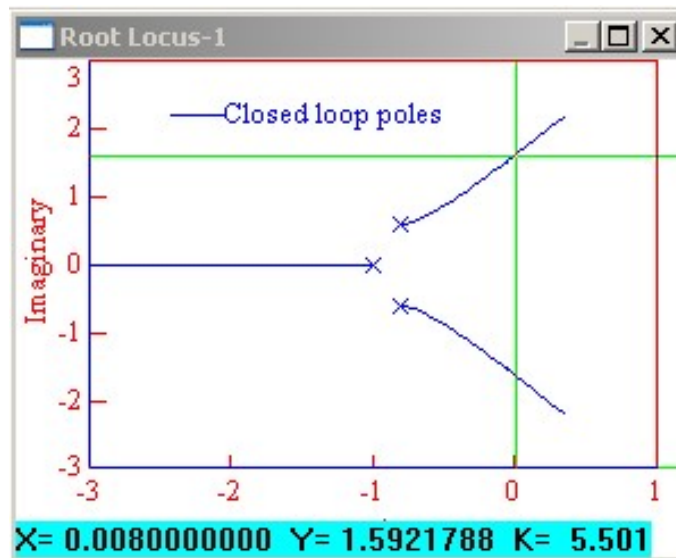
$1/\tau$

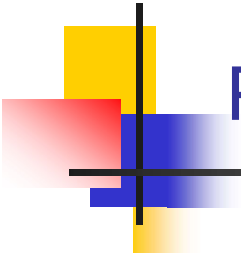
$1/T$



# Példa

- gyökhelygörbe





## Példa

---

- csatoljuk vissza negatívan az objektumot
- ekkor az átviteli függvénye

$$G_e(s) = \frac{G_O(s)}{1 + G_O(s)} = \frac{1}{s^3 + 2,6s^2 + 2,6s + 2}$$

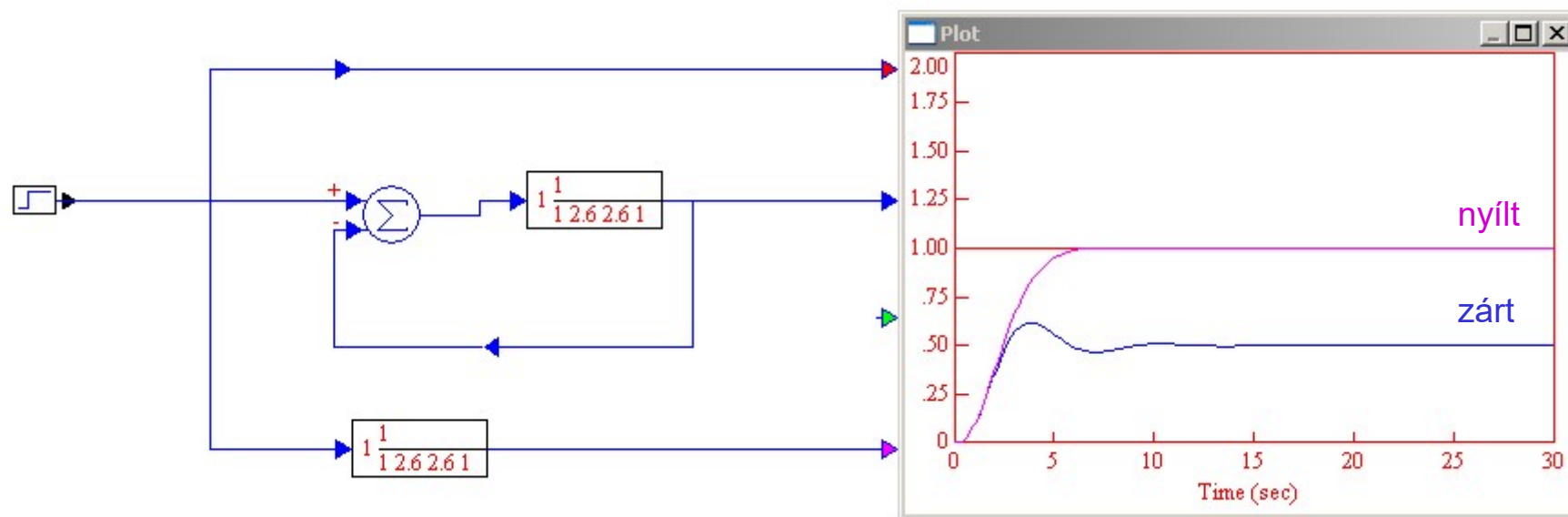
- felbontva

$$G_e(s) = \frac{1}{s^3 + 2,6s^2 + 2,6s + 2} \approx \frac{1}{(s + 1.79)(s^2 + 0,84s + 1,1764)}$$

azaz  $K = 0,5$ ,  $\tau = 0,56$ ,  $\omega_n = 1,09$ ,  $\xi = 0,46$

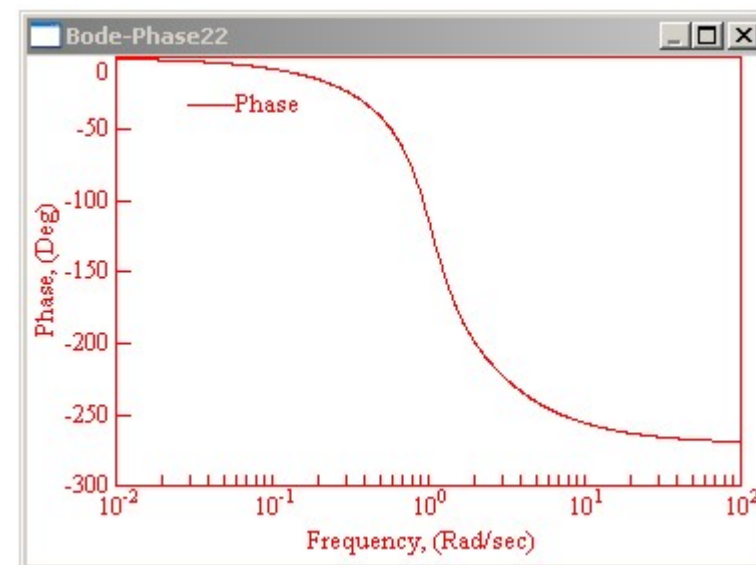
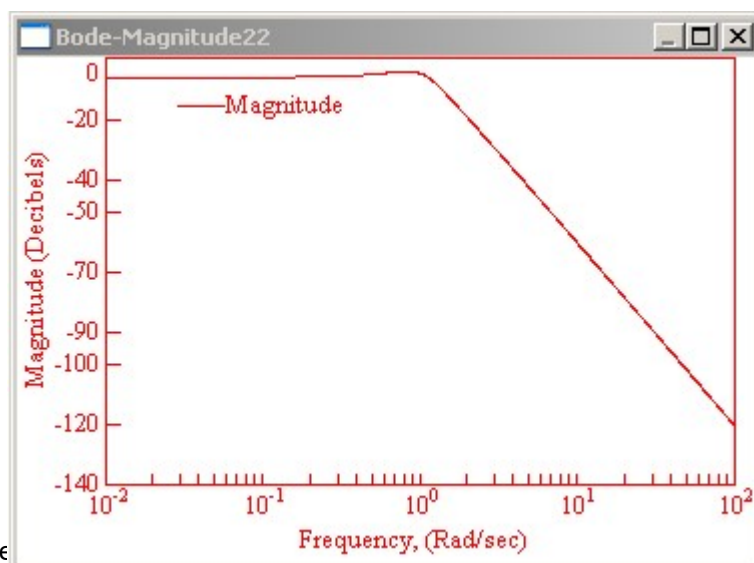
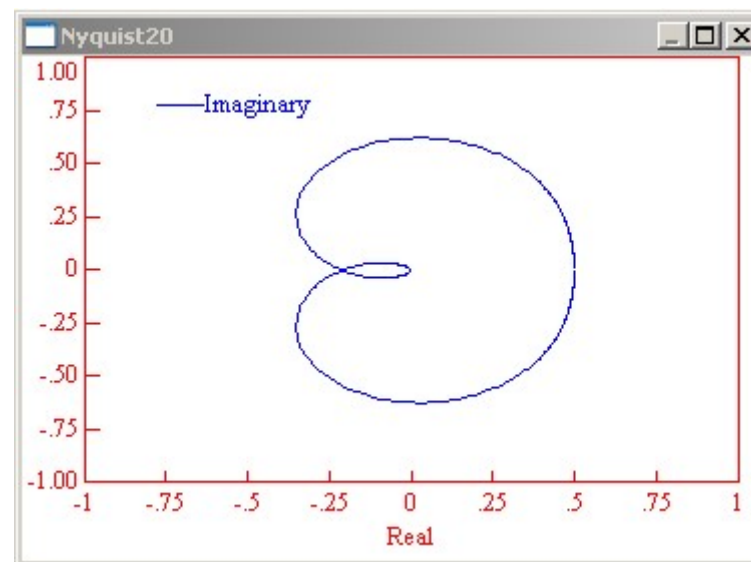
## Példa

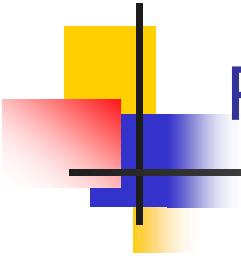
- átmeneti függvény



## Példa

- (frekvenciafüggvény!!!)
  - Nyquist-diagram
  - Bode-diagram





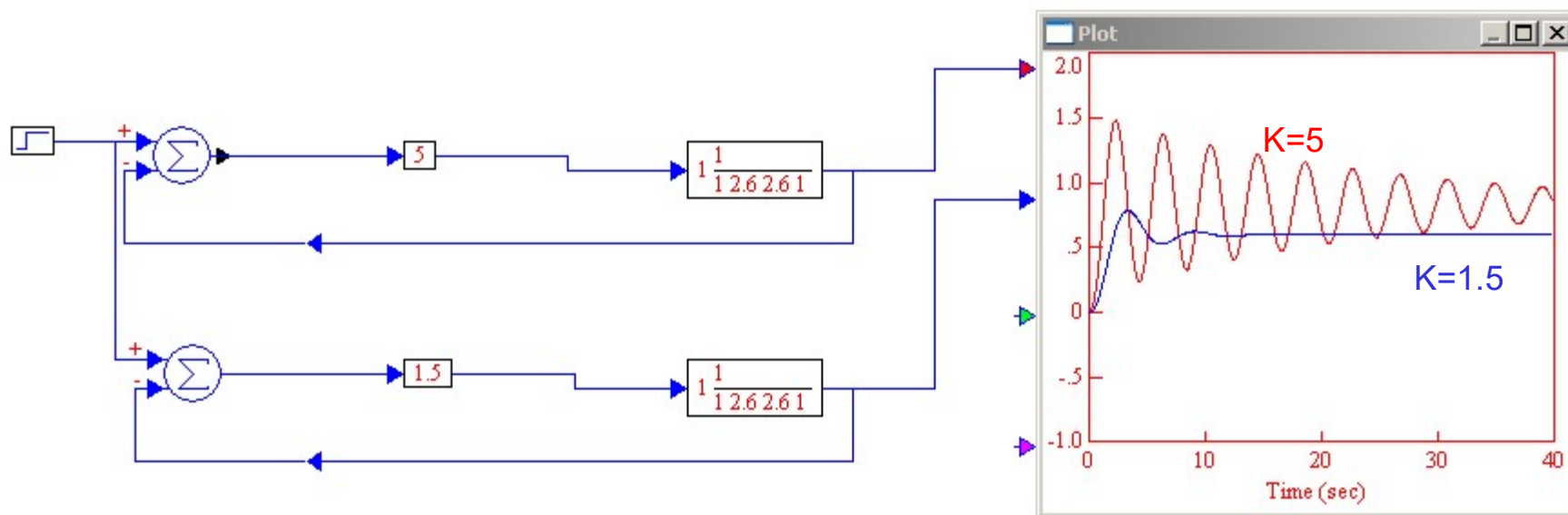
## Példa – szabályozás P-szabályozóval

---

- Szabályzás P-szabályzóval
  - maradó szabályzási hiba mindig van
  - maximális erősítés 5,75 a szakasz gyökhelygörbéje alapján, elvi  $e_{ss} \approx 15\%$
  - növekvő erősítés
    - gyorsabb felfutás
    - növekvő lengés

## Példa – szabályozás P-szabályozóval

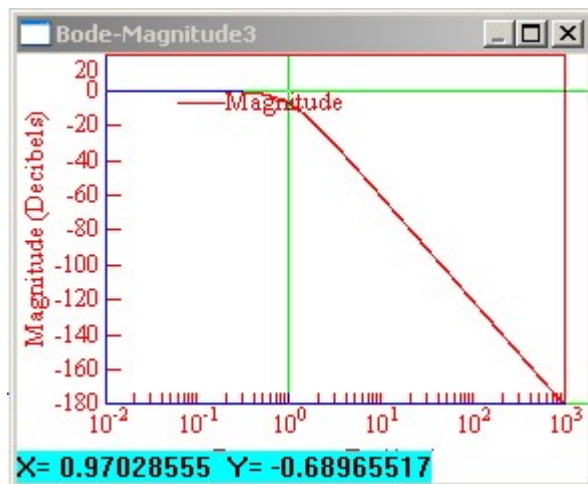
- átmeneti függvény



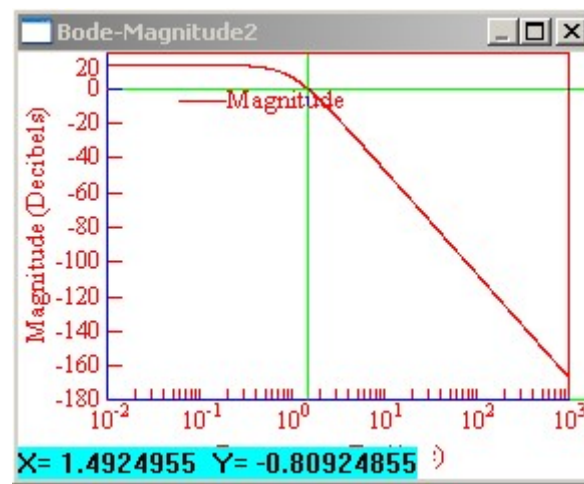
# Példa – szabályozás P-szabályozóval

- Bode diagram

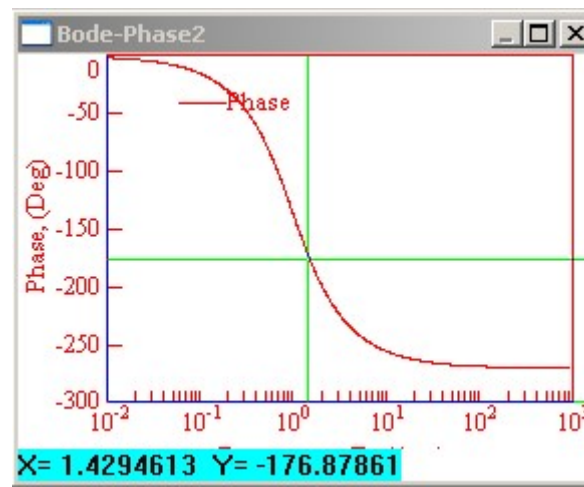
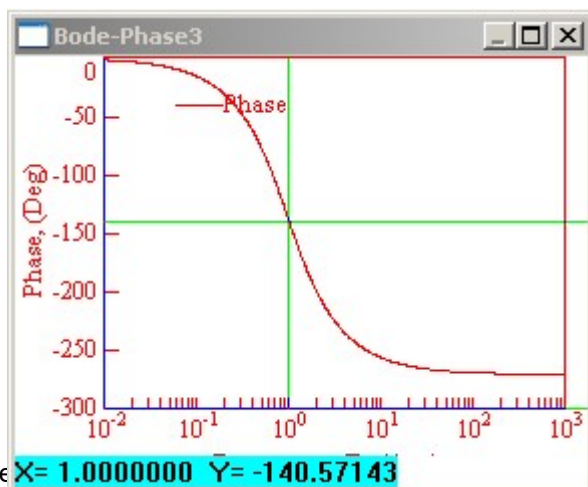
$K=1$

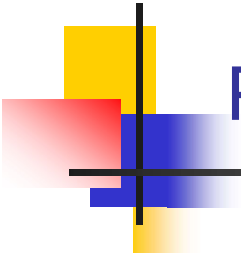


$K=5$



Irányítási





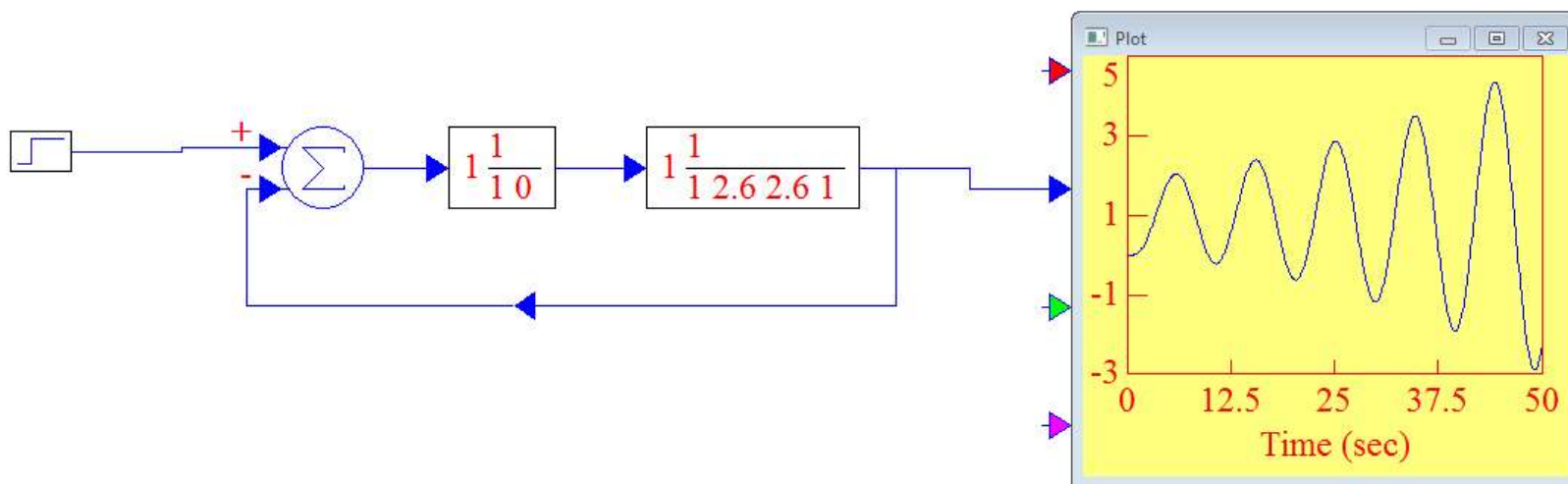
## Példa – szabályozás I-szabályozóval

---

- Szabályzás I-szabályozóval
  - I-tag megszünteti a maradó szabályozási hibát,
    - de kis integrálási időállandó esetén erősen növelheti a lengési hajlamot, könnyen instabillá teheti már egy másodrendű esetén a visszacsatolt kört
    - nagy integrálási időállandó viszont csökkenti a lengést, de (jelentősen) növelheti a beállási időt

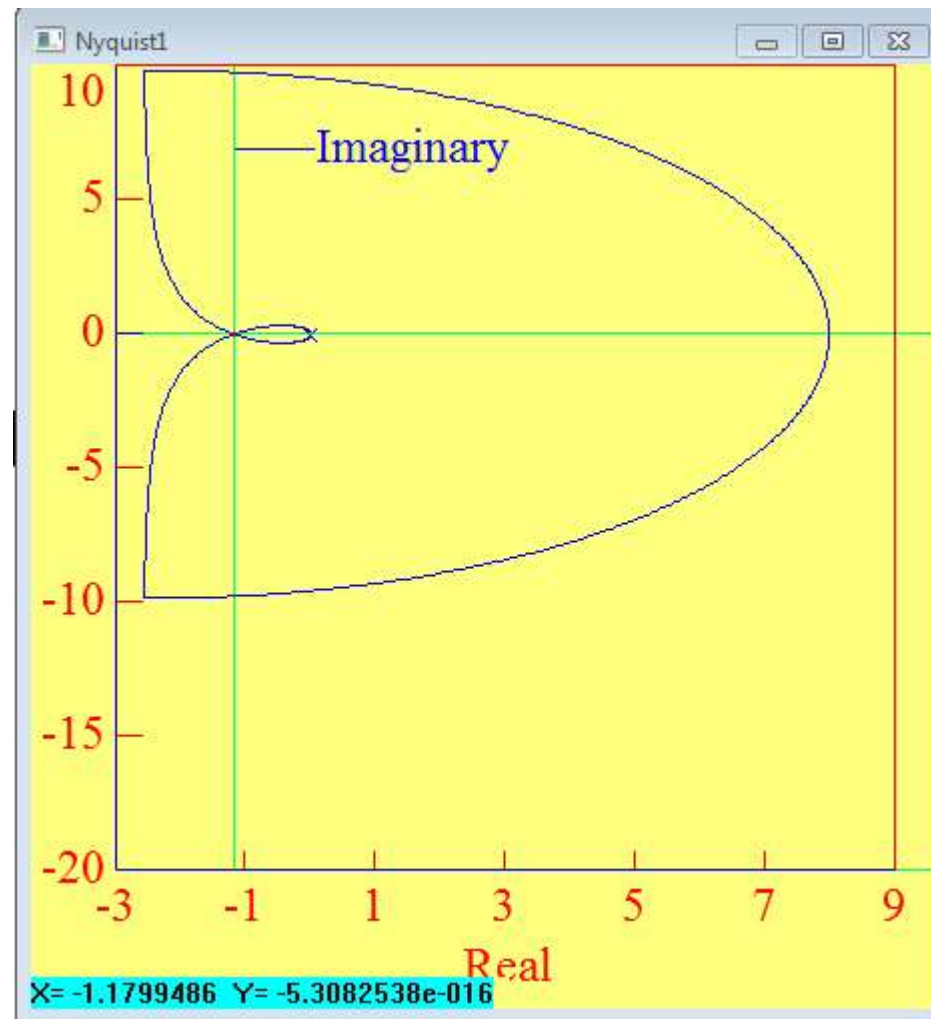
## Példa – szabályozás I-szabályozóval

- átmeneti függvény I-szabályozóval



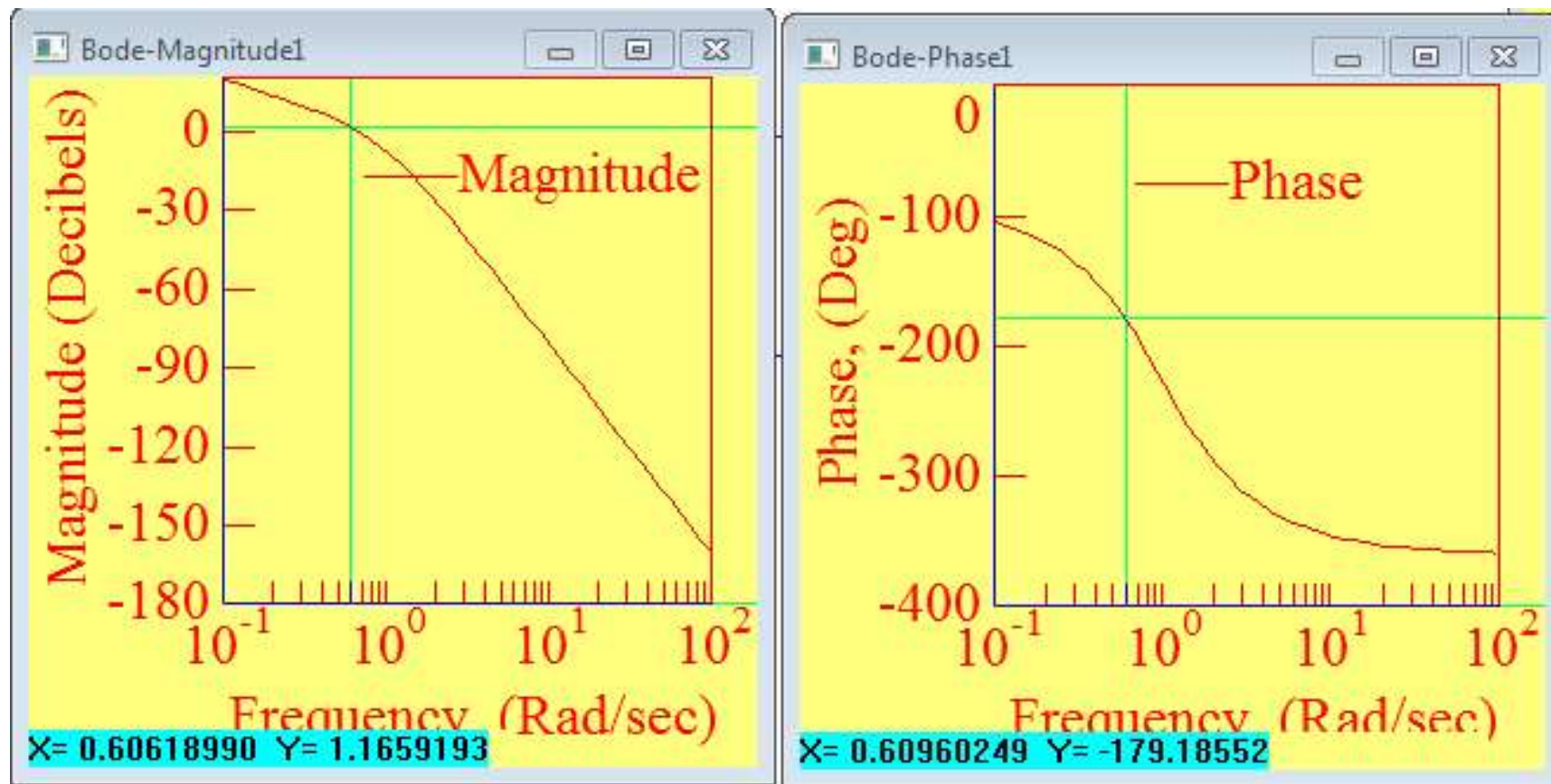
## Példa – szabályozás I-szabályozóval

- Nyquist diagram



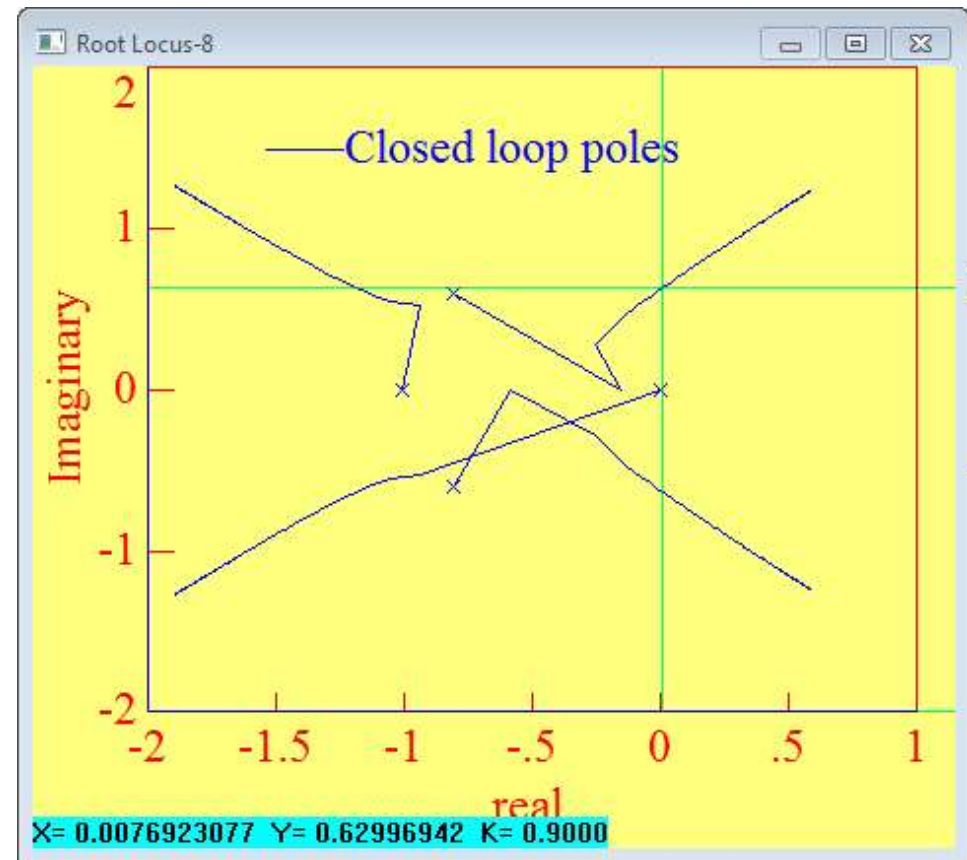
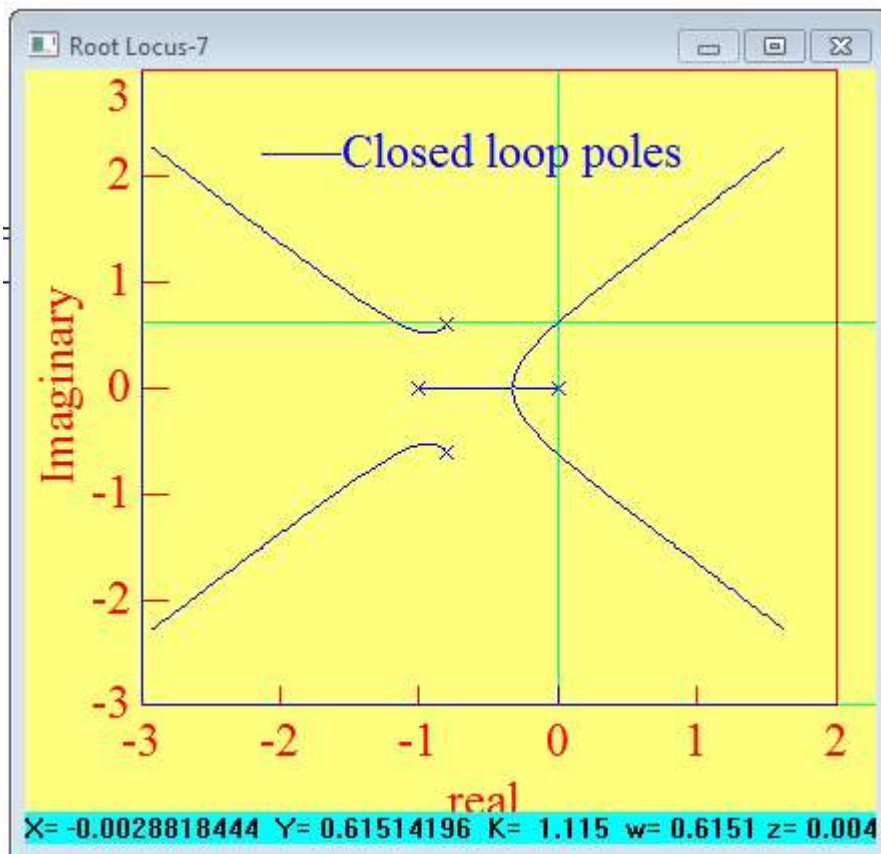
## Példa – szabályozás I-szabályozóval

- Bode diagram

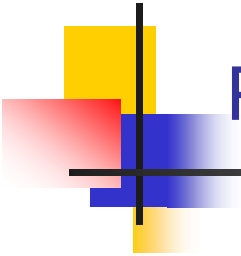


## Példa – szabályozás I-szabályozóval

- Gyökhelygörbe



$$K_{\max} = 0,85 \quad T_{I \min} = 1,17$$



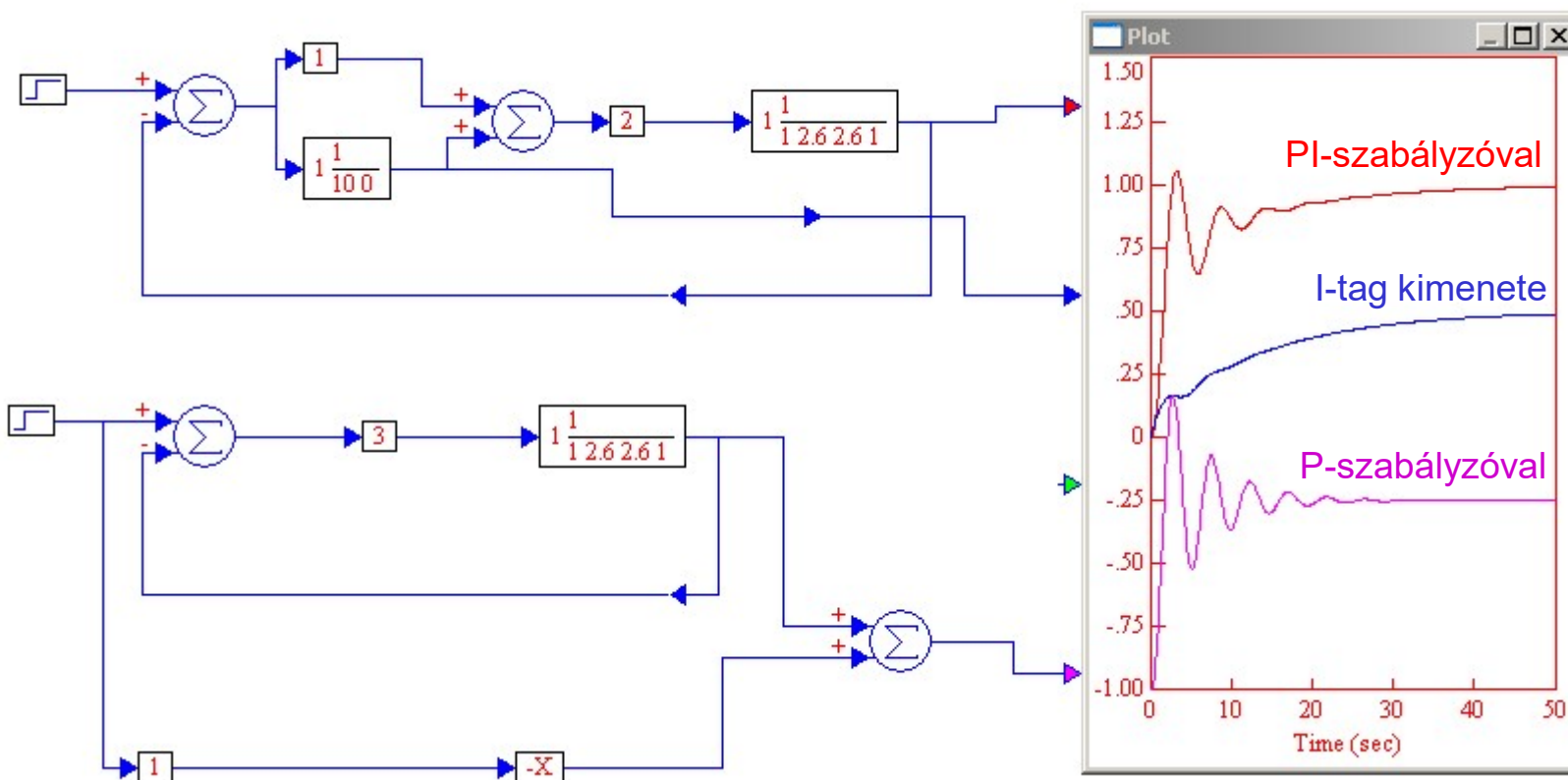
## Példa – szabályozás PI-szabályozóval

---

- Szabályozás PI-szabályozóval
  - P-tag csökkenti a maradó szabályzási hibát, gyorsítja a működést, de növeli a lengési hajlamot
  - I-tag megszünteti a maradó szabályozási hibát,
    - de kis integrálási időállandó esetén erősen növelheti a lengési hajlamot
    - nagy integrálási időállandó viszont csökkenti a lengést, de (jelentősen) növelheti a beállási időt

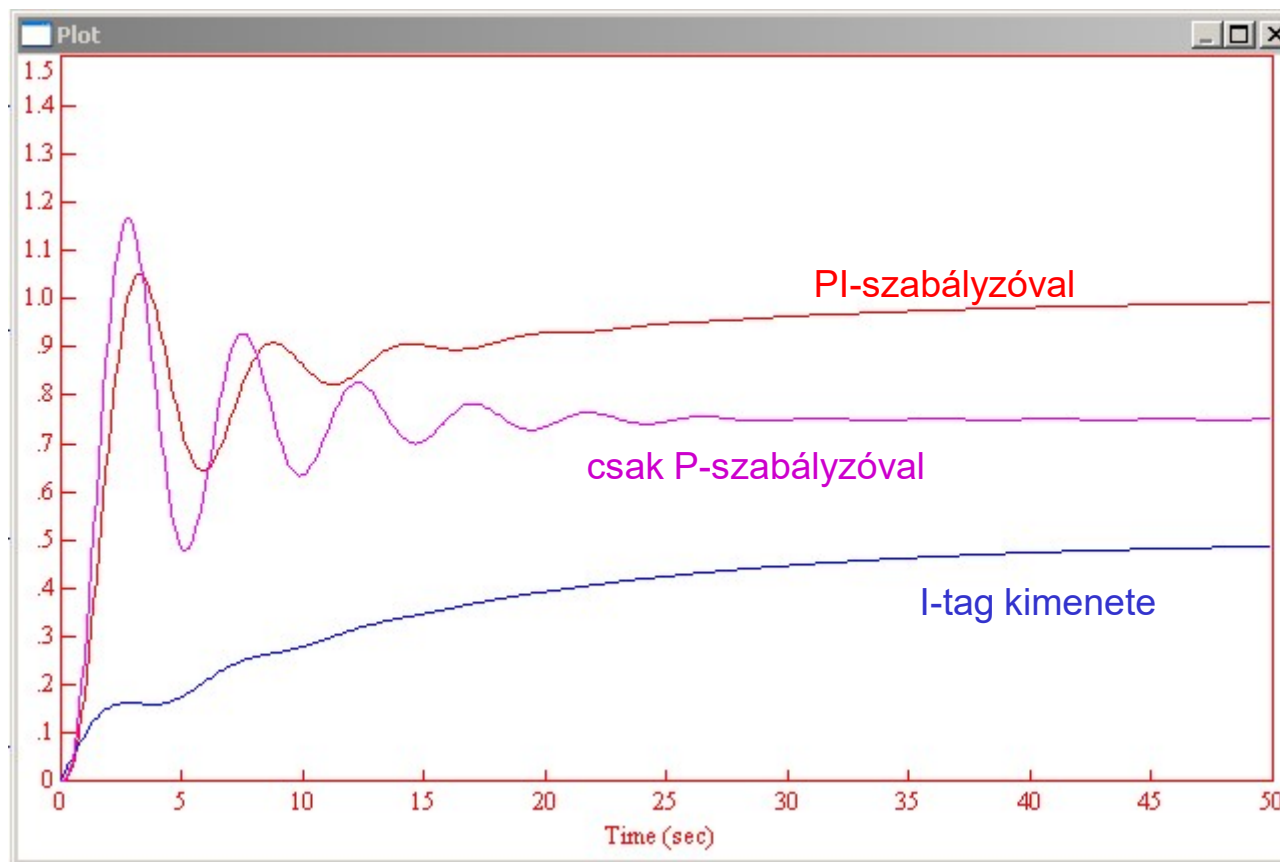
## Példa – szabályozás PI-szabályozóval

- átmeneti függvény PI-szabályozóval



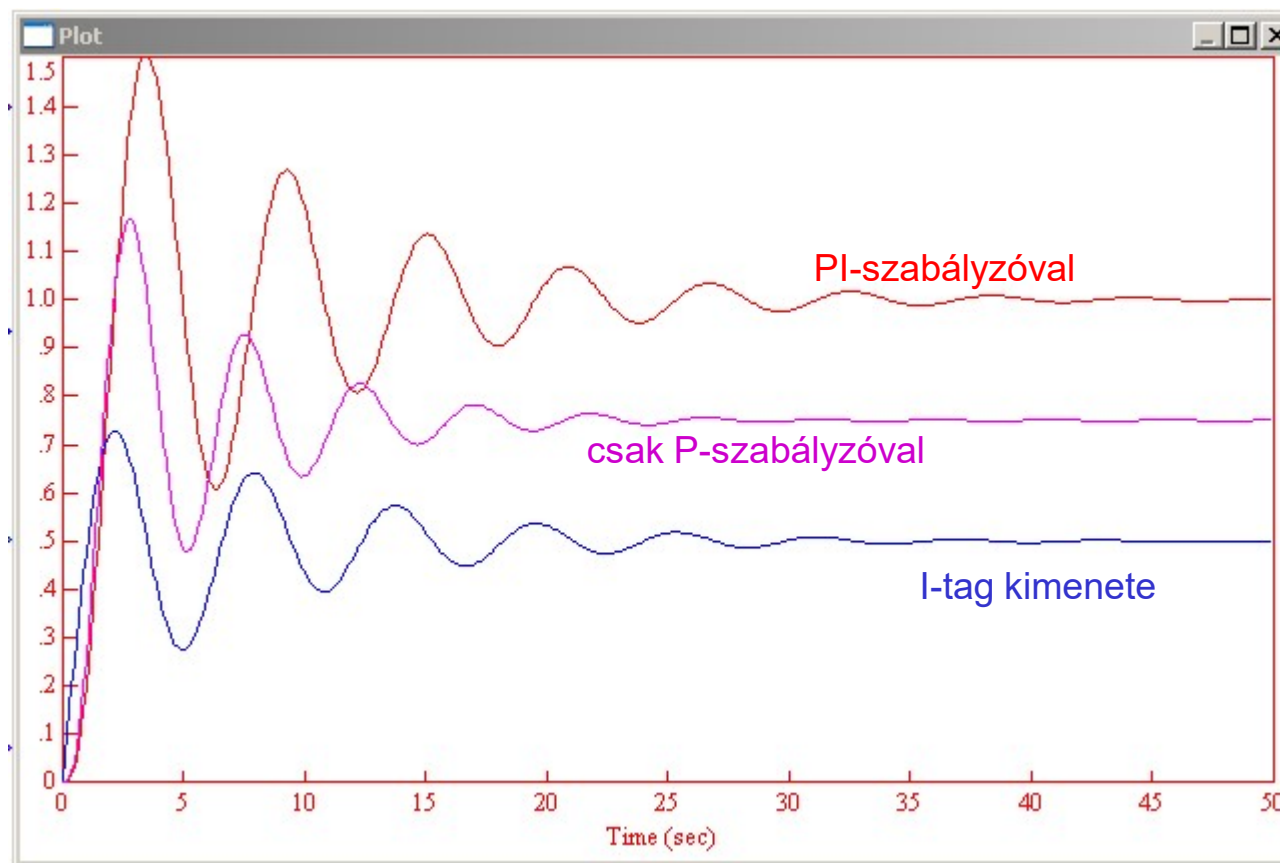
## Példa – szabályozás PI-szabályozóval

- átmeneti függvény PI-szabályzóval ( $T_I=10$ ,  $K=2$ )



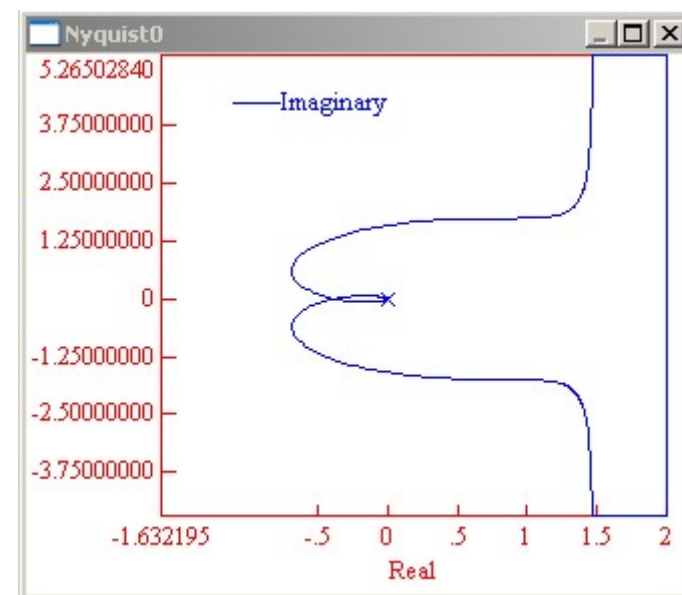
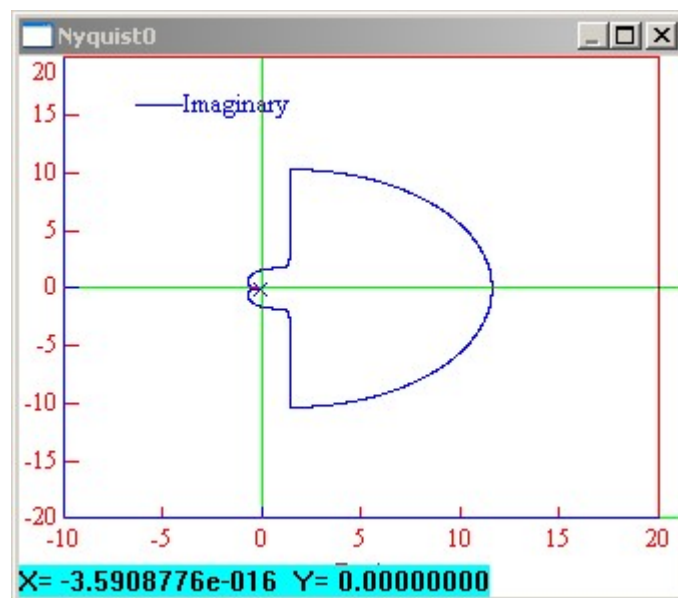
## Példa – szabályozás PI-szabályozóval

- átmeneti függvény PI-szabályozóval ( $T_I=2$ ,  $K=2$ )



## Példa – szabályozás PI-szabályozóval

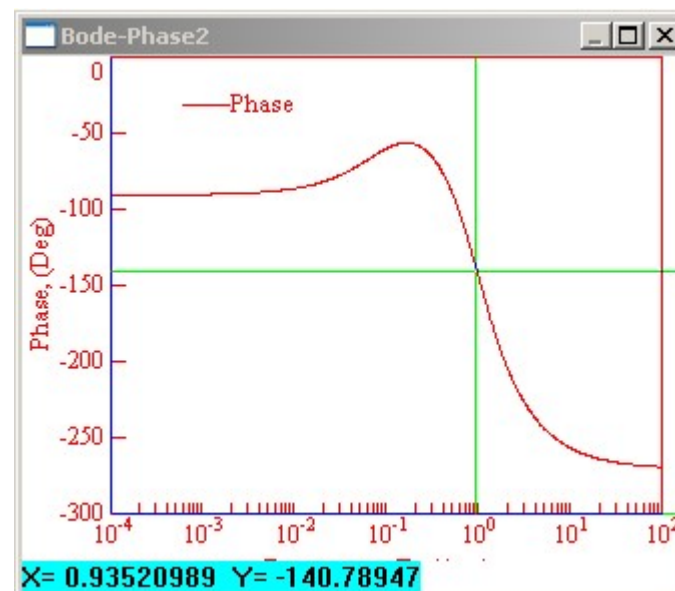
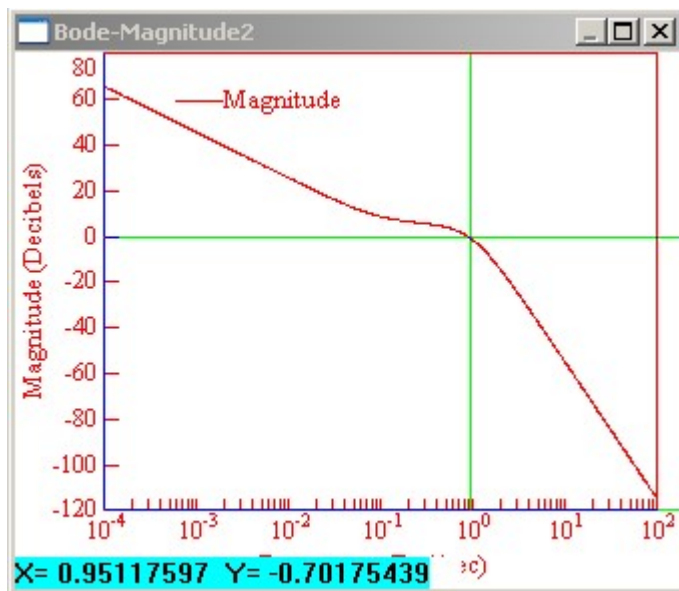
- Nyquist-diagram



$$G_e(j\omega) = \frac{20j\omega + 2}{10(j\omega)^4 + 26(j\omega)^3 + 26(j\omega)^2 + 10j\omega}$$

## Példa – szabályozás PI-szabályozóval

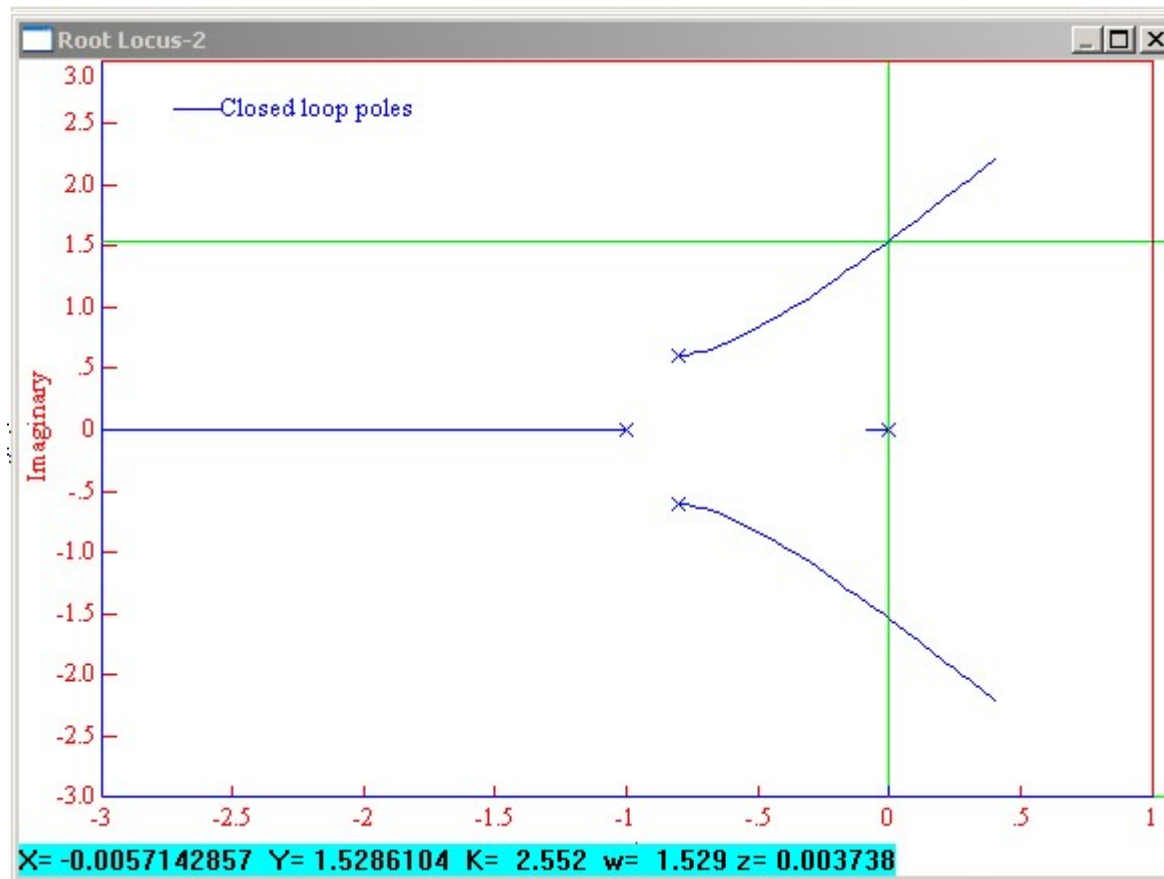
- Bode-diagram

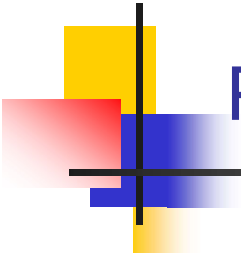


$$G_e(j\omega) = \frac{1}{10j\omega} (20j\omega + 2) \frac{1}{(j\omega)^3 + 2.6(j\omega)^2 + 2.6j\omega + 1}$$

## Példa – szabályozás PI-szabályozóval

- gyökhelygörbe





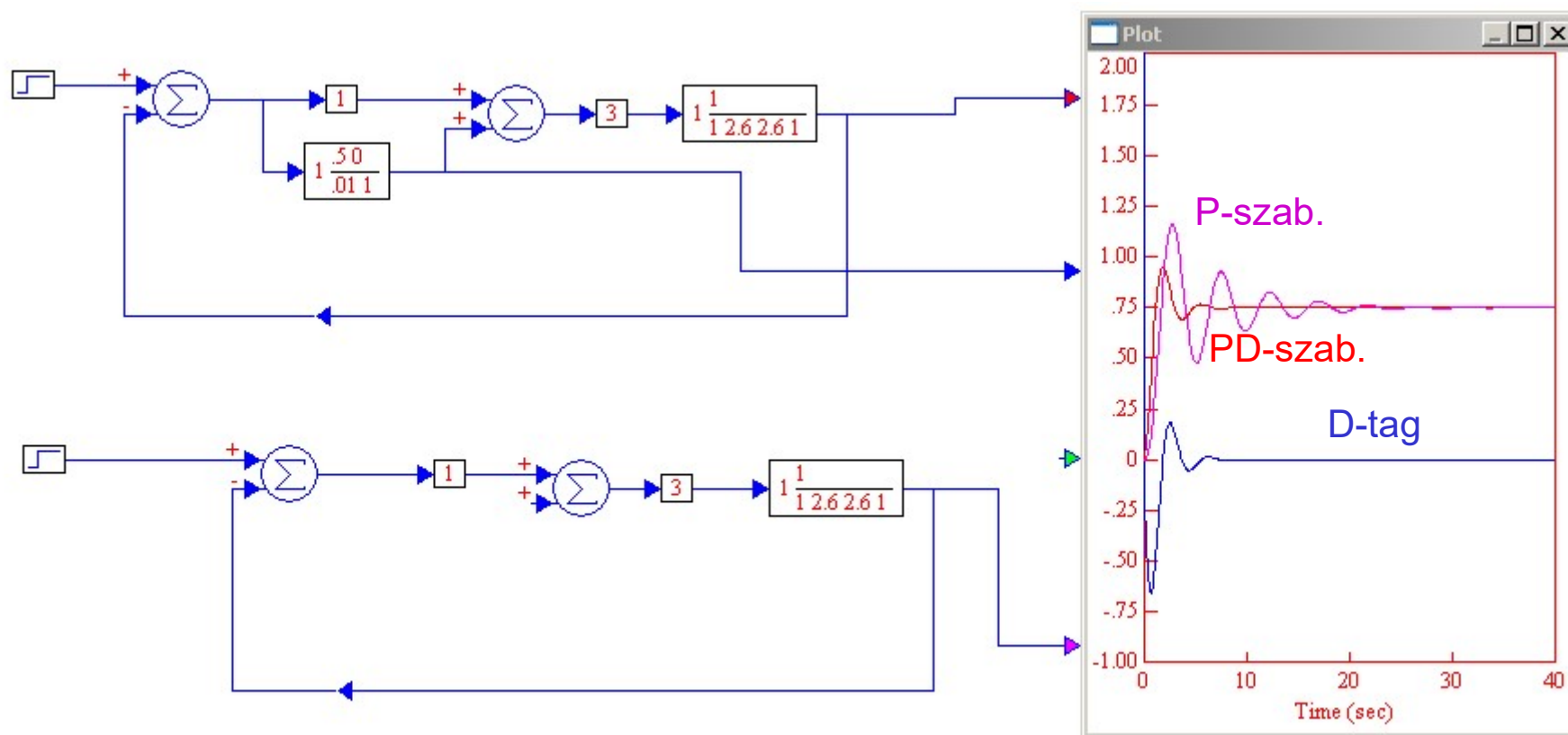
## Példa – szabályozás PD-szabályozóval

---

- Szabályzás PD-szabályozóval
  - P-tag csökkenti a maradó szabályozási hibát, gyorsítja a működést, de ugyanakkor növeli a lengési hajlamot
  - D-tag csökkenti a lengési hajlamot és gyorsítja a rendszer működését

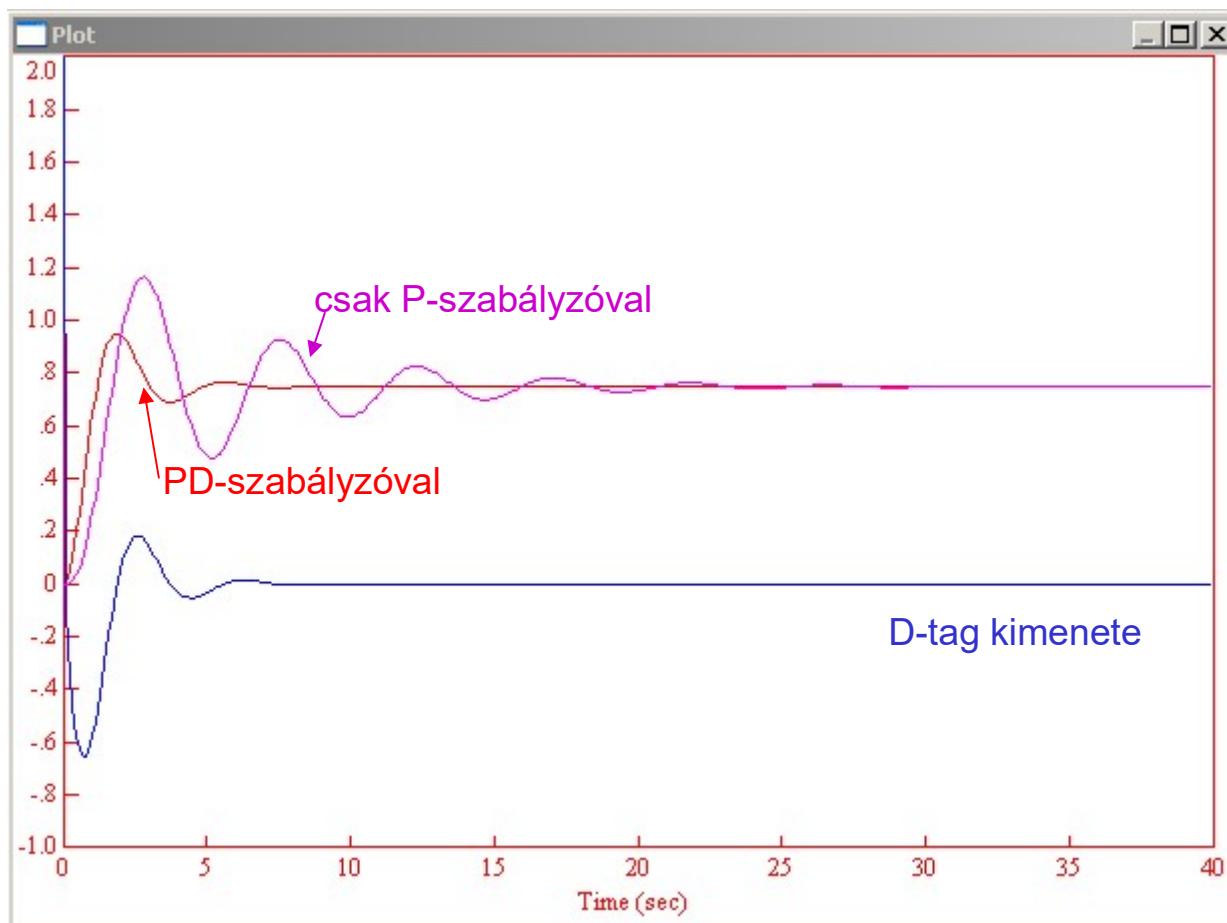
## Példa – szabályozás PD-szabályzóval

- átmeneti függvény PD-szabályozóval



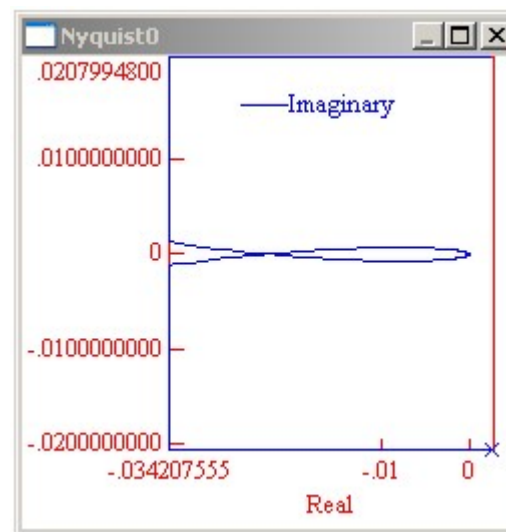
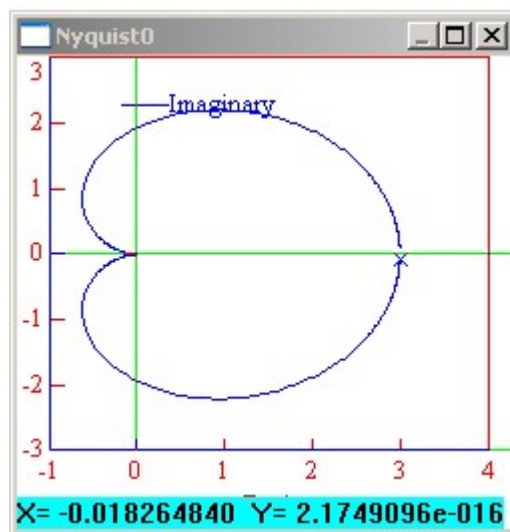
## Példa – szabályozás PD-szabályozóval

- átmeneti függvény PD-szabályozóval



## Példa – szabályozás PD-szabályozóval

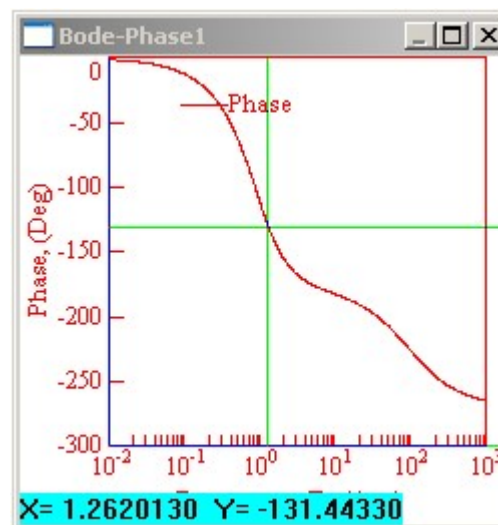
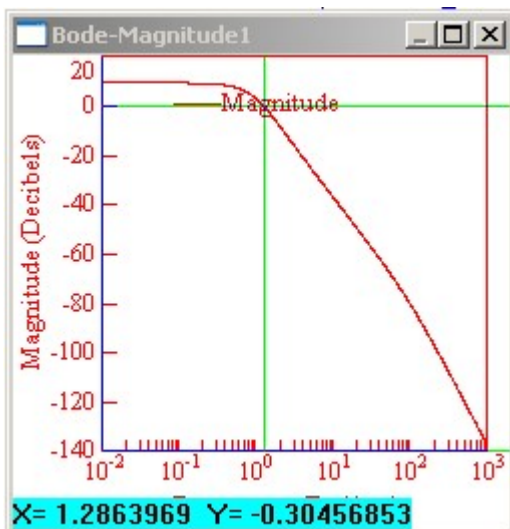
- frekvenciafüggvények
  - Nyquist-diagram



$$G_e(j\omega) = \frac{5,01j\omega + 1}{0,01(j\omega)^4 + 1,026(j\omega)^3 + 2,626(j\omega)^2 + 2,61j\omega + 1}$$

## Példa – szabályozás PD-szabályozóval

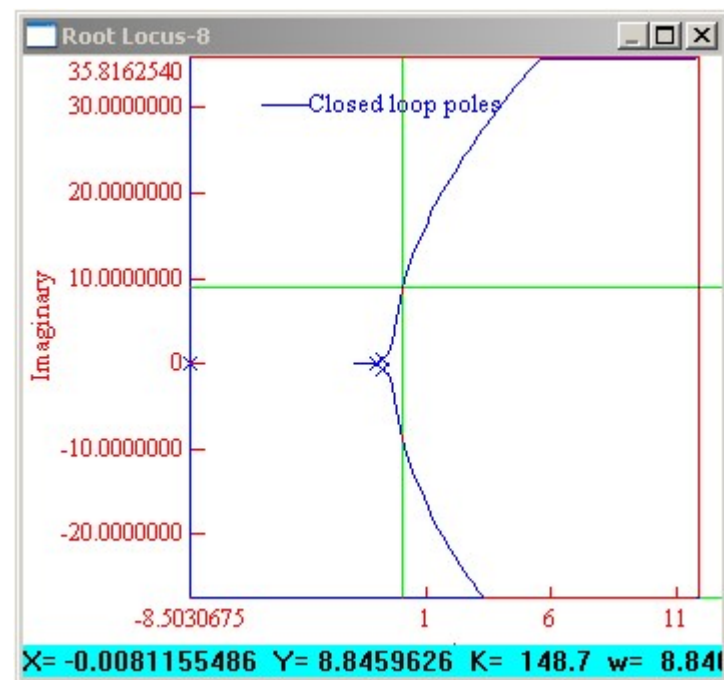
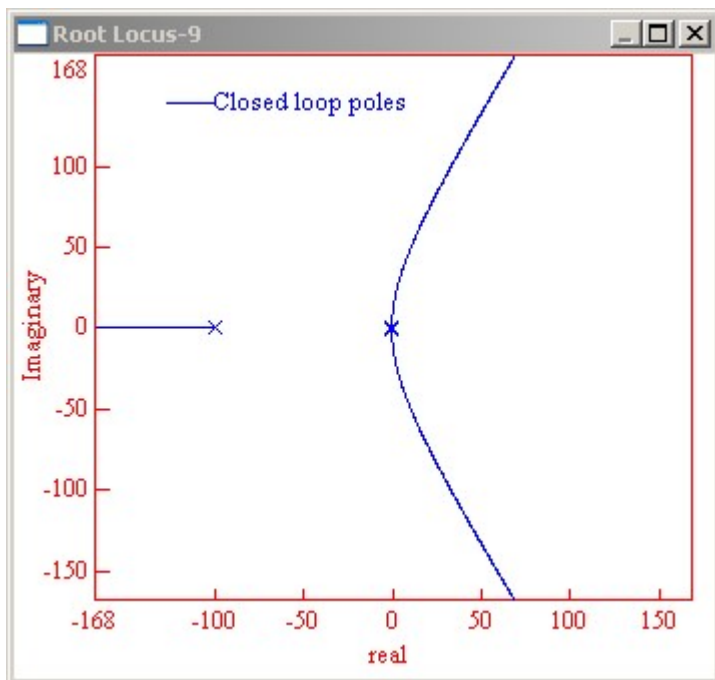
- Bode-diagram

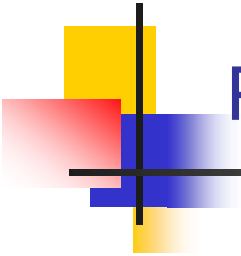


$$G_e(j\omega) = \frac{1}{0,01j\omega + 1} (5,01j\omega + 1) \frac{1}{(j\omega)^3 + 2,6(j\omega)^2 + 2,6j\omega + 1}$$

## Példa – szabályozás PD-szabályozóval

- gyökhelygörbe





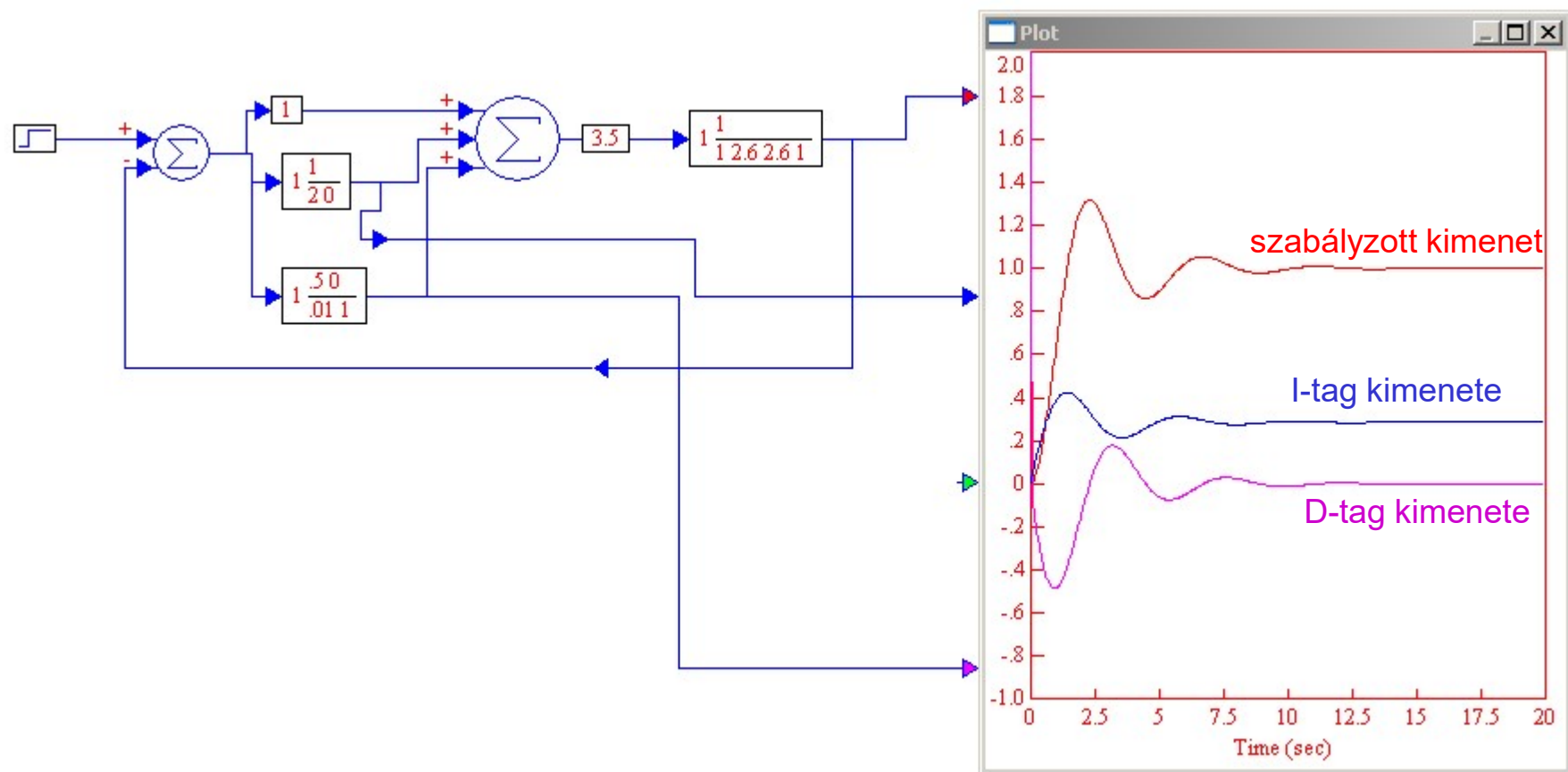
## Példa – szabályozás PID-szabályozóval

---

- Szabályzás PID-szabályozóval
  - P-tag csökkenti a maradó szabályozási hibát, gyorsítja a működést, de növeli a lengési hajlamot
  - I-tag megszünteti a maradó szabályozási hibát, nagy integrálási időállandó esetén csökkenti a lengést, de (jelentősen) növelheti a beállási időt
  - D-tag csökkenti a lengési hajlamot és gyorsítja a rendszer működését

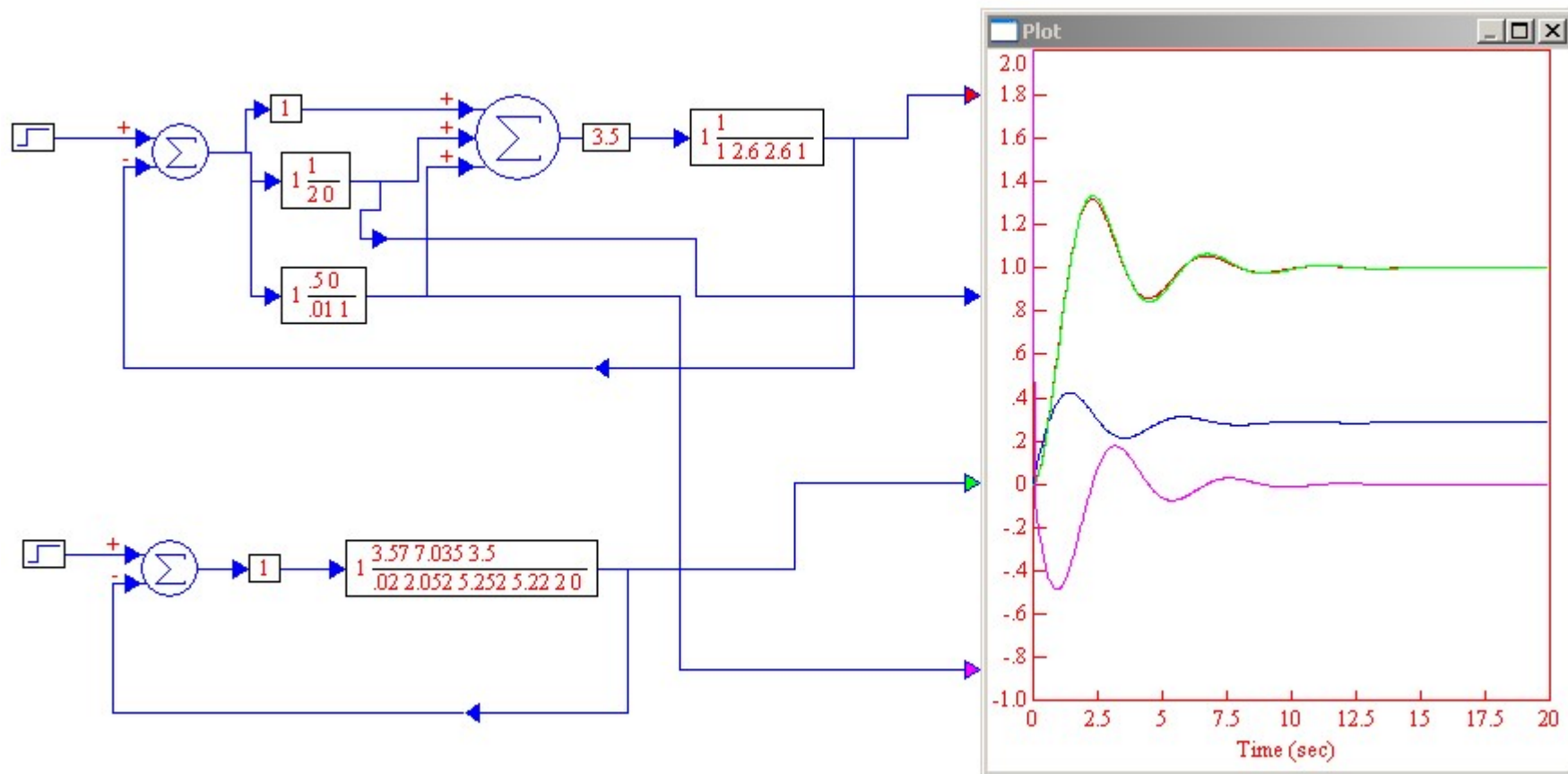
## Példa – szabályozás PID-szabályozóval

- átmeneti függvény



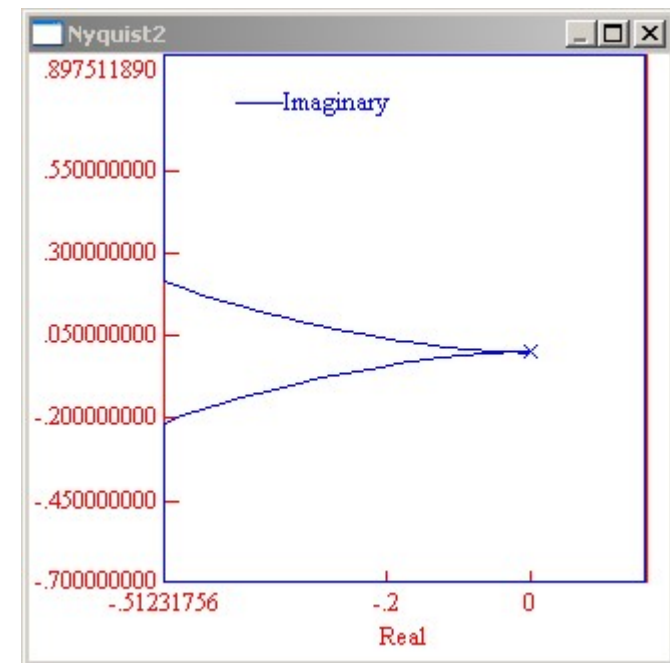
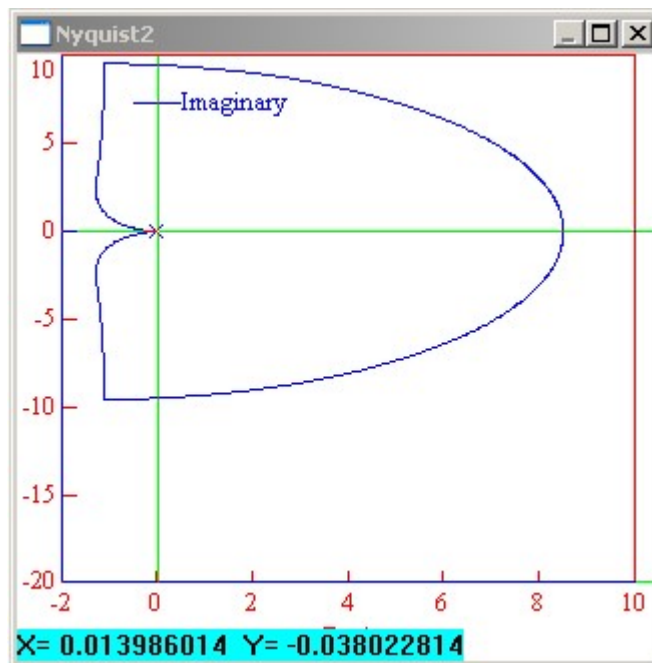
## Példa – szabályzás PID-szabályozóval

- eredő átviteli függvény frekvencia és gyökhelygörbe vizsgálatokhoz



## Példa – szabályzás PID-szabályozóval

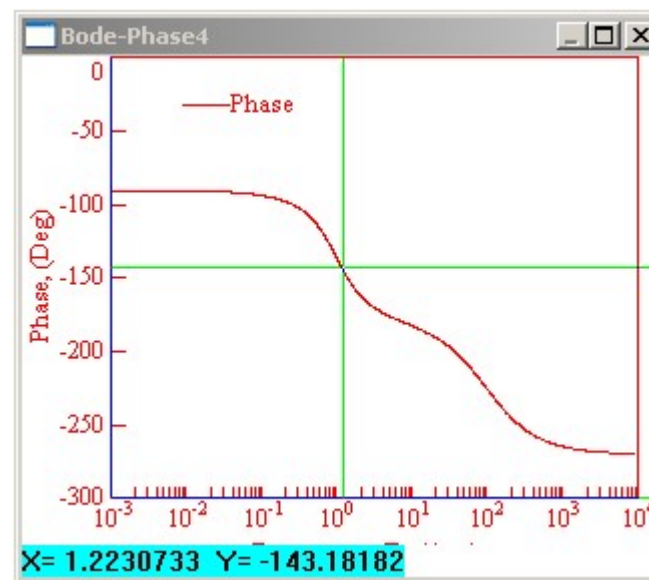
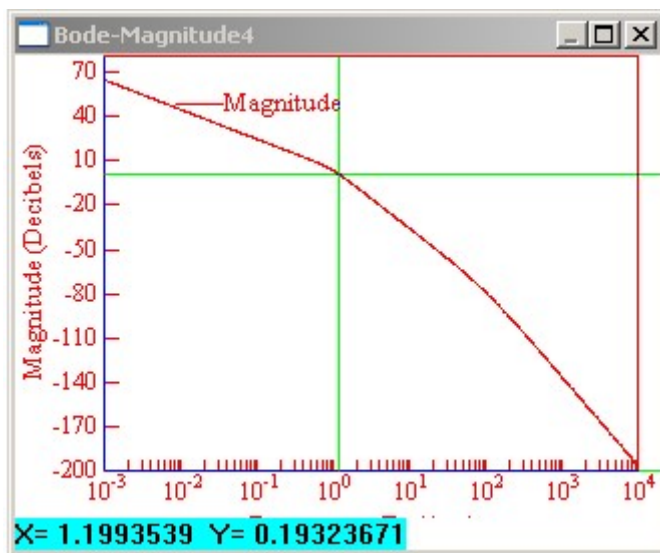
- Nyquist-diagram



$$G_e(j\omega) = \frac{3,57(j\omega)^2 + 7,035j\omega + 3,5}{0,02(j\omega)^5 + 2,052(j\omega)^4 + 5,252(j\omega)^3 + 5,22(j\omega)^2 + 2j\omega}$$

## Példa – szabályzás PID-szabályozóval

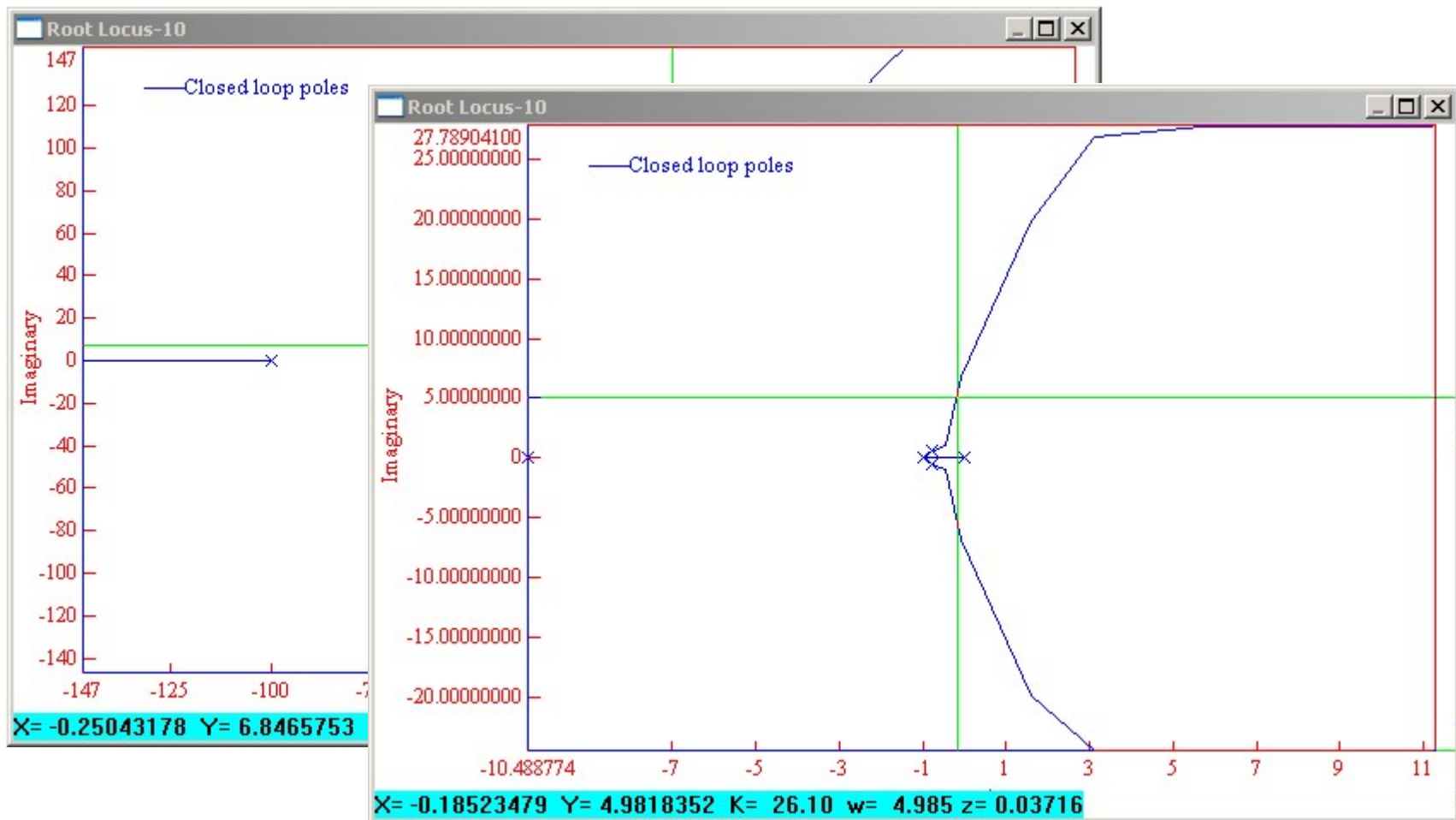
- Bode-diagram



$$G_e(j\omega) = 3,5 \frac{1}{j\omega} \frac{1}{0,02j\omega + 2} (1,02(j\omega)^2 + 2,01j\omega + 1) \frac{1}{(j\omega)^3 + 2,6(j\omega)^2 + 2,6j\omega + 1}$$

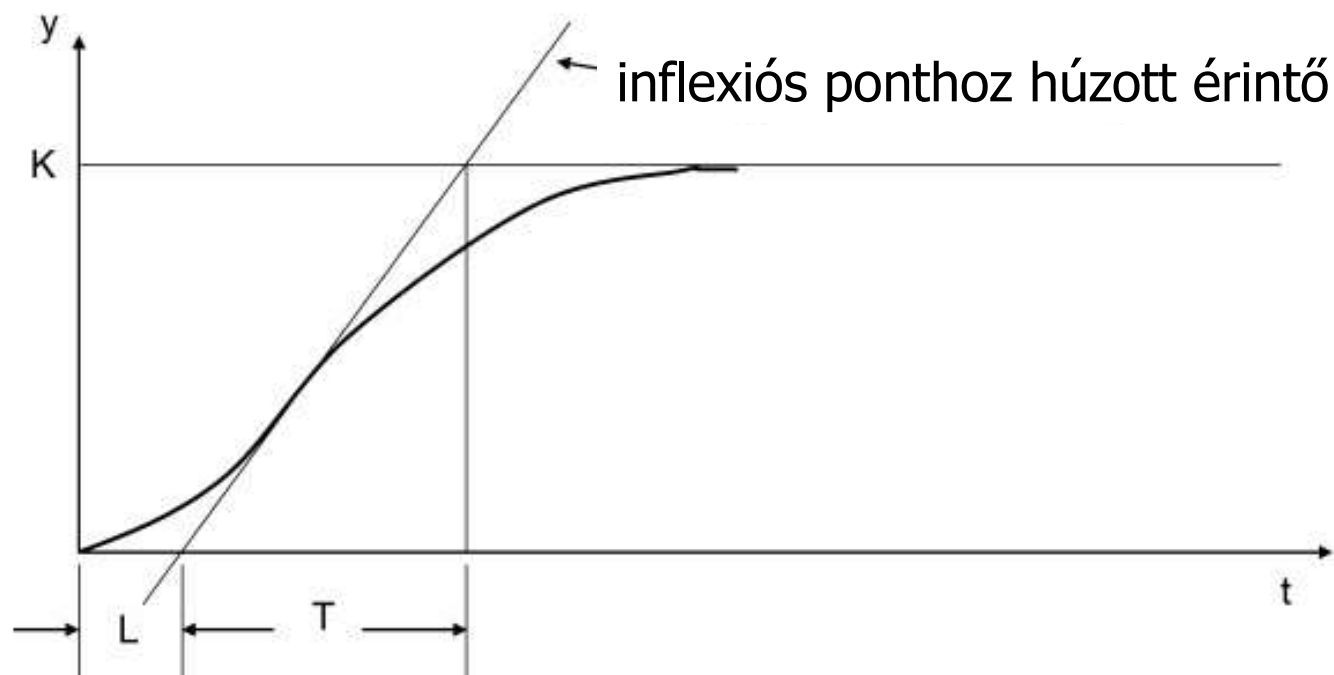
## Példa – szabályzás PID-szabályozóval

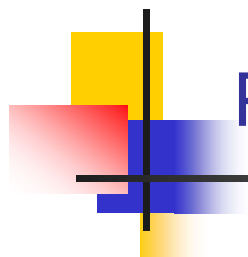
- gyökhelygörbe



## PID-szabályozó beállítása

- Ziegler-Nichols 1. módszere (a tag átmeneti függvénye alapján)





## PID-szabályozó beállítása

szabályozó paraméterének értéke

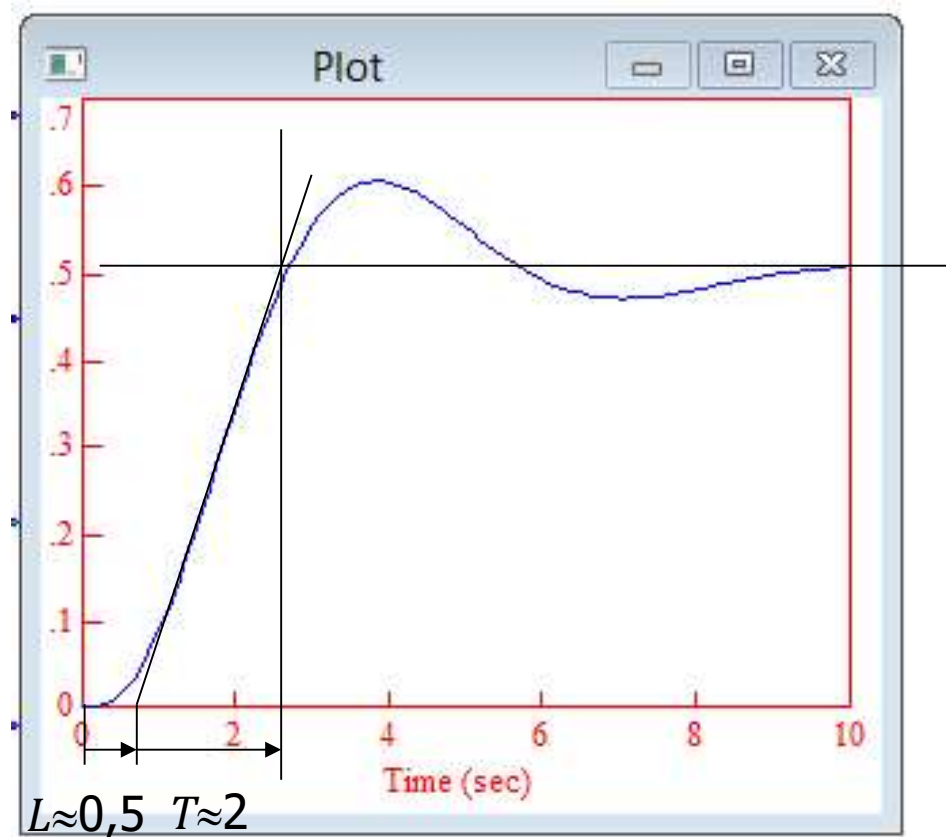
szabályozó típusa

|       | $K_P$      | $T_I (= 1/K_I)$ | $T_D (= K_D)$ |
|-------|------------|-----------------|---------------|
| $P$   | $T/L$      | 0               | 0             |
| $PI$  | $0,9(T/L)$ | $0,27(T/L^2)$   | 0             |
| $PID$ | $1,2(T/L)$ | $0,6(T/L^2)$    | $0,6(T/L)$    |

a beállítás kb. 25%-os túllendüléssel és megfelelő lecsengési idővel történő beállást eredményez

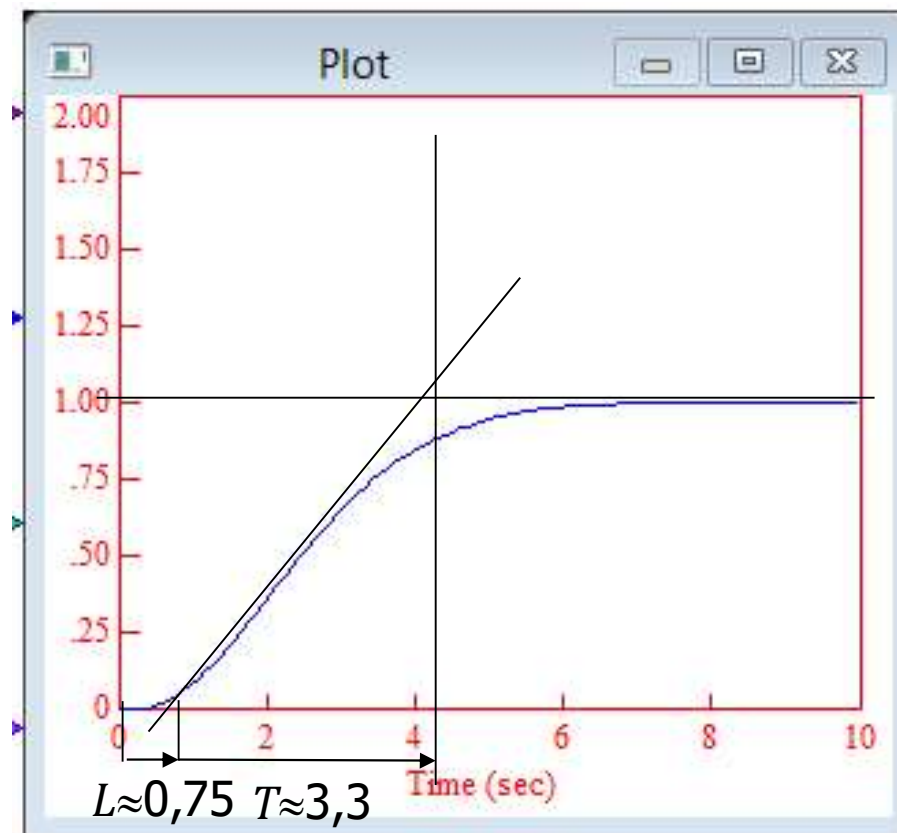
## Példa – Ziegler-Nichols 1. módszere

- példa beállítása Ziegler-Nichols 1. módszere alapján



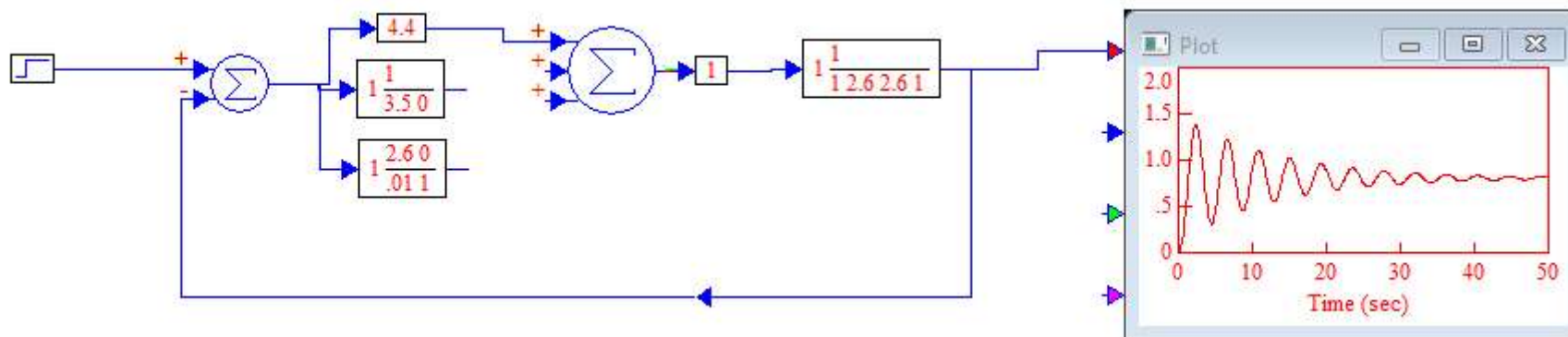
## Példa – Ziegler-Nichols 1. módszere

- példa beállítása Ziegler-Nichols 1. módszere alapján



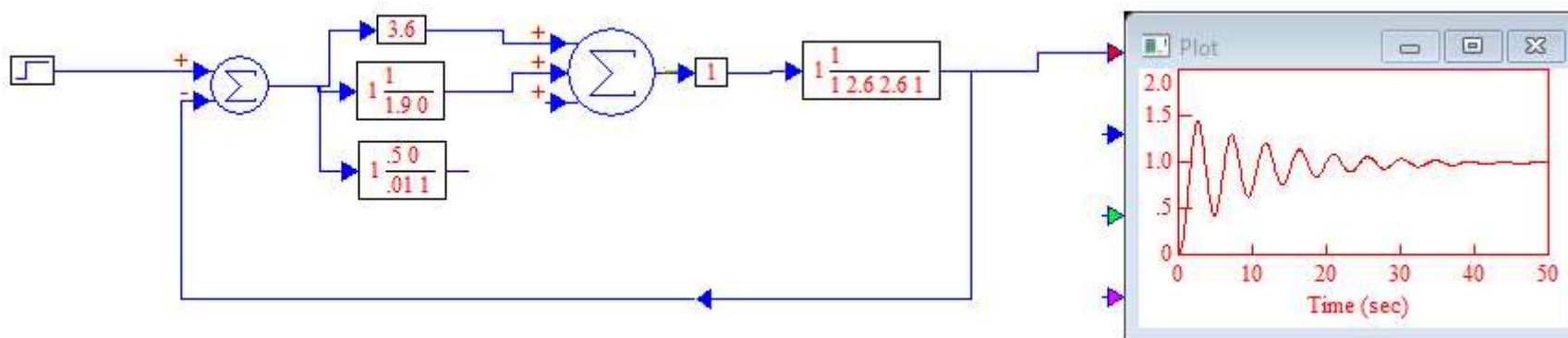
## Példa – Ziegler-Nichols 1. módszere

- példa P-szabályozóval – paraméterek Ziegler-Nichols 1. módszere alapján:
- $K_p = 4,4$



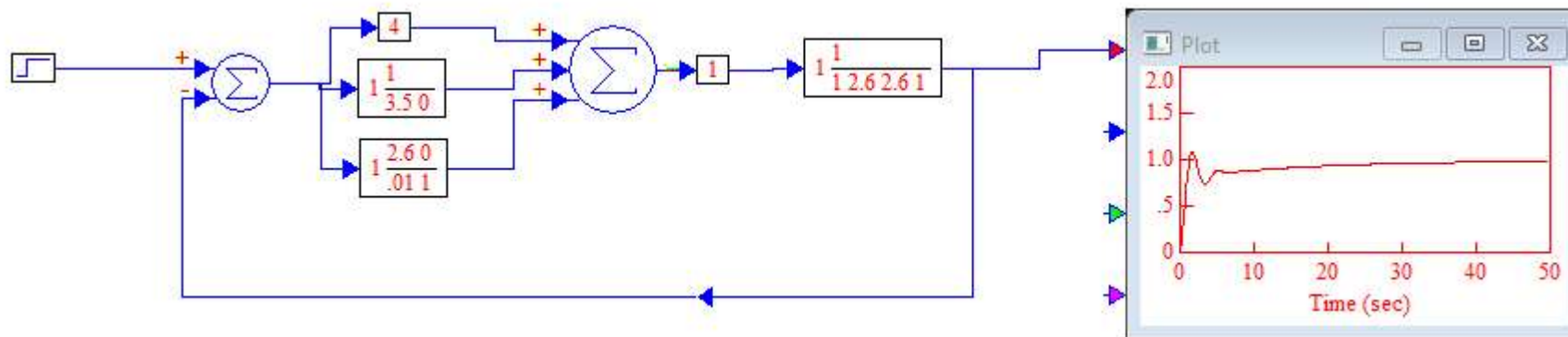
## Példa – Ziegler-Nichols 1. módszere

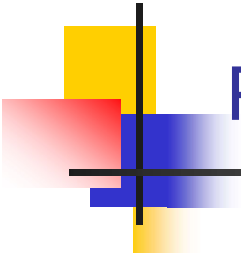
- példa PI-szabályozóval – paraméterek Ziegler-Nichols 1. módszere alapján:
- $K_p = 3,6$     $T_I = 1,9$



## Példa – Ziegler-Nichols 1. módszere

- példa PID-szabályozóval – paraméterek Ziegler-Nichols 1. módszere alapján:
- $K_p = 4$   $T_I = 3,5$   $T_D = 2,6$



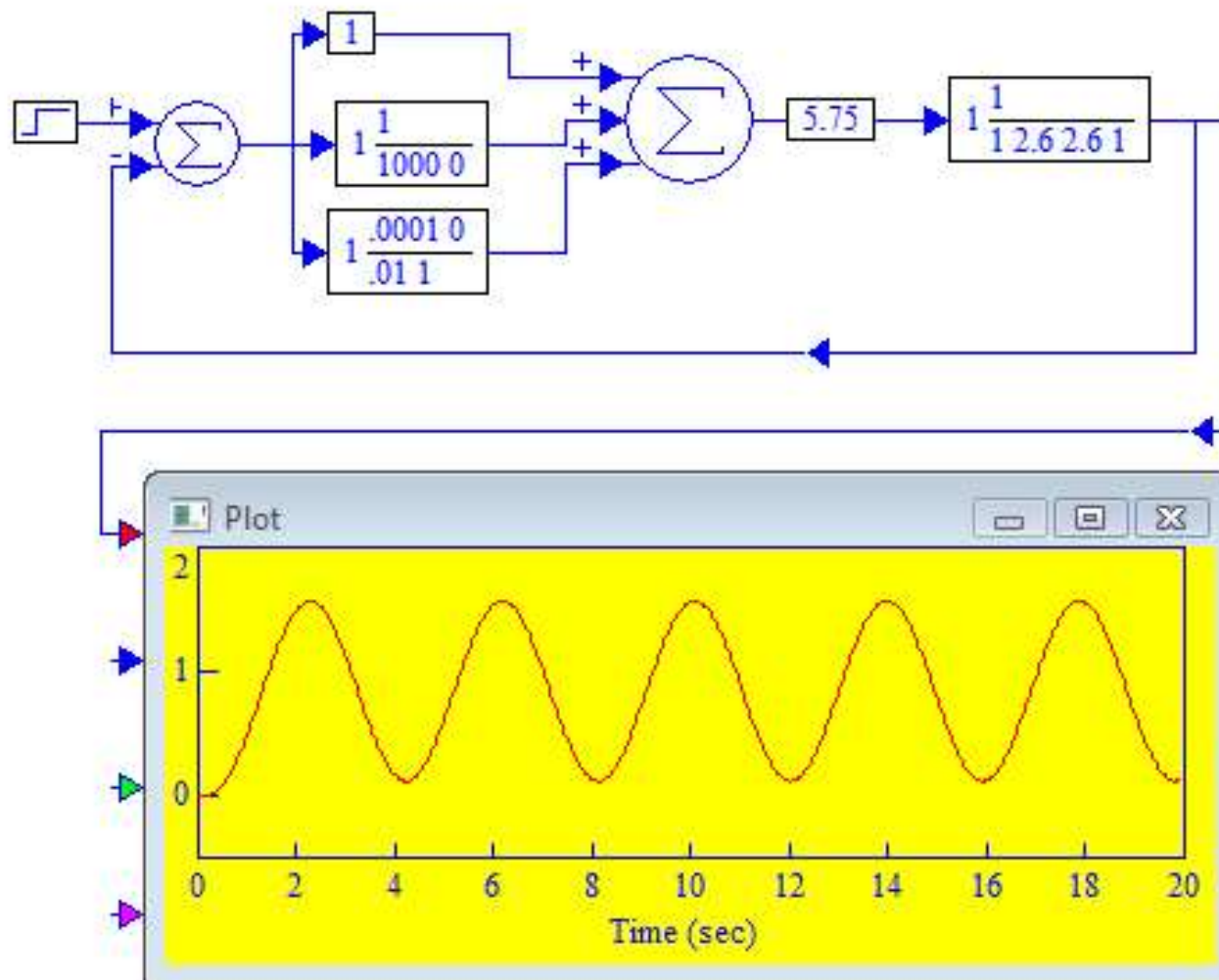


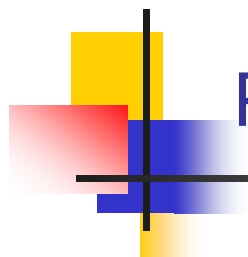
## PID-szabályozó beállítása

---

- Ziegler-Nichols 2. módszere (a zárt kör alapján)
  - A beállítás menete
    - az I-tag és a D-tag működését kapcsoljuk ki (legyen  $T_I \rightarrow \infty$  ,  $T_D=0$ )
    - az erősítés fokozatos növelésével, vagy a tag gyökhelygörbe vizsgálata alapján kapott kritikus erősítés beállításával vigyük a visszacsatolt kört a stabilitás határára, az így erősítés érték lesz a  $K_{kr}$  paraméter
    - határozzuk meg az állandósult lengések periódus idejét, ez lesz a  $T_{kr}$  paraméter

# PID-szabályozó beállítása





## PID-szabályozó beállítása

szabályozó paraméterének értéke

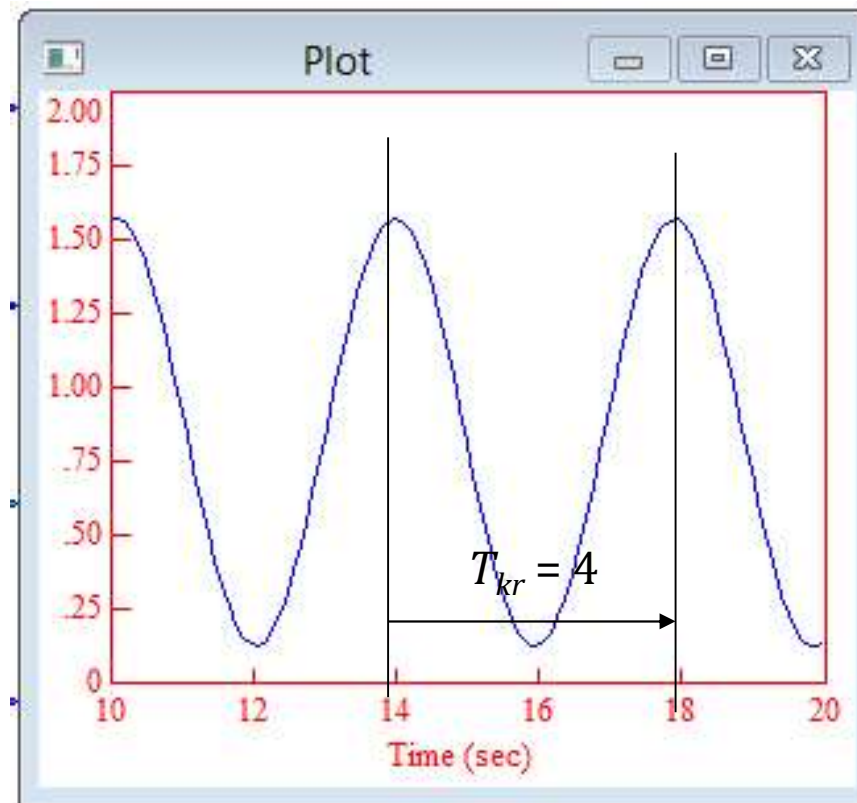
szabályozó típusa

|     | $K$                 | $T_I$                 | $T_D$                  |
|-----|---------------------|-----------------------|------------------------|
| P   | $K \leq 0,5K_{kr}$  | $\infty$              | 0                      |
| PI  | $K \leq 0,45K_{kr}$ | $T_I \geq 0,8 T_{kr}$ | 0                      |
| PID | $K \leq 0,6K_{kr}$  | $T_I \geq 0,5 T_{kr}$ | $T_D \leq 0,125T_{kr}$ |

## Példa – Ziegler-Nichols 2. módszere

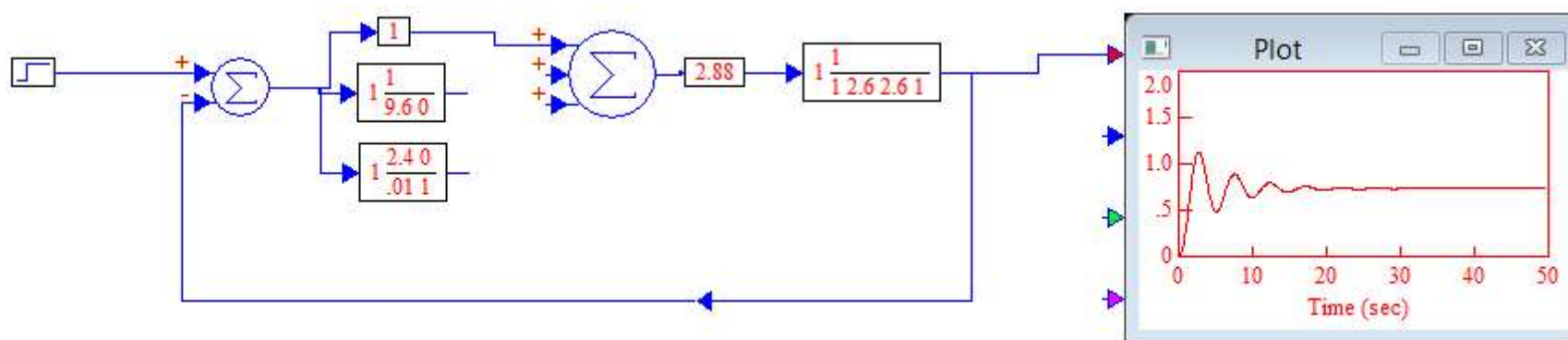
- példa beállítása Ziegler-Nichols 2. módszere alapján

$$K_{kr} = 5,75$$



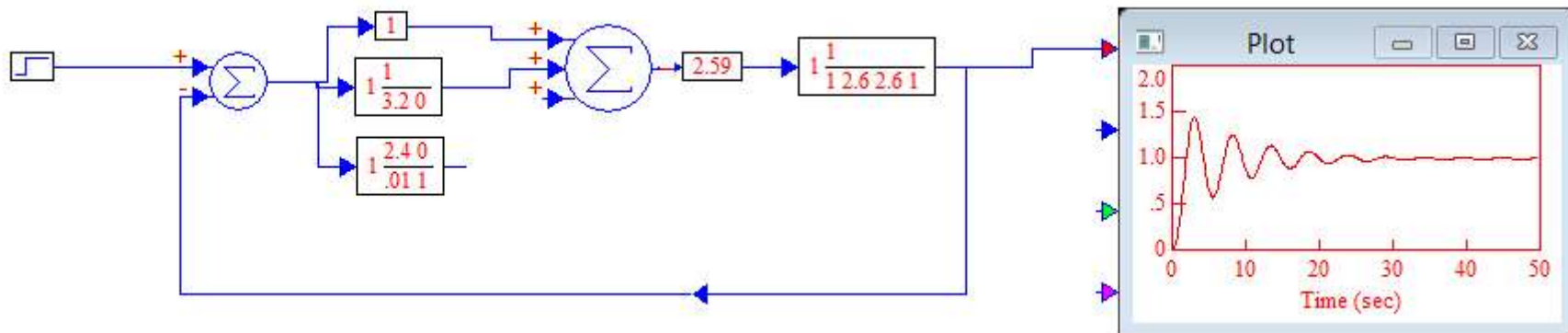
## Példa – Ziegler-Nichols 2. módszere

- példa P-szabályozóval – paraméterek Ziegler-Nichols 2. módszere alapján:
- $K_p = 2,88$



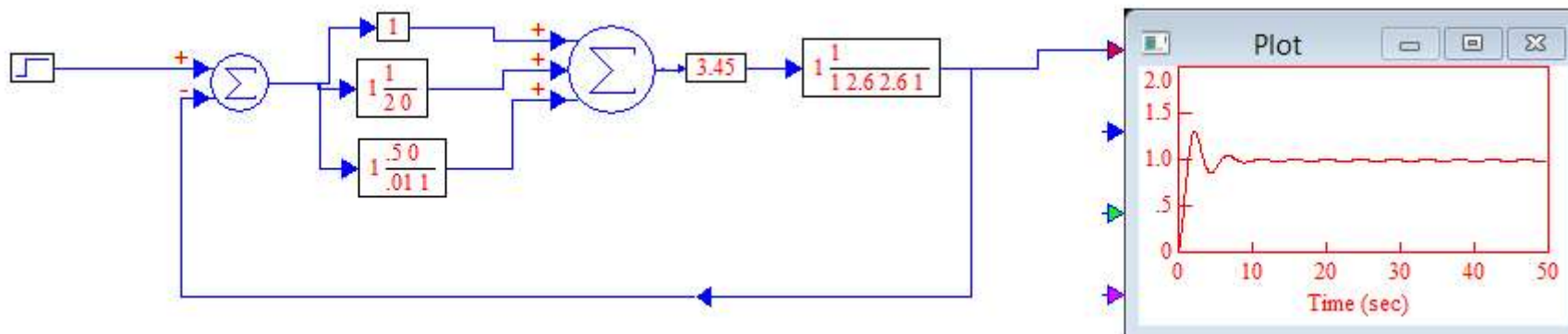
## Példa – Ziegler-Nichols 2. módszere

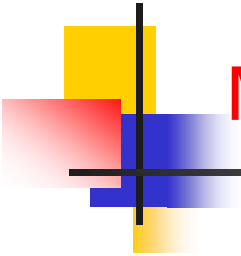
- példa PI-szabályozóval – paraméterek Ziegler-Nichols 2. módszere alapján:
- $K_p = 2,59$   $T_I = 3,2$



## Példa – Ziegler-Nichols 2. módszere

- példa PID-szabályozóval – paraméterek Ziegler-Nichols 2. módszere alapján:
- $K_p = 3,45$   $T_I = 2$   $T_D = 0,5$

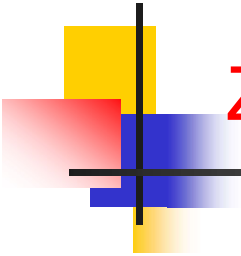




## Minőségjavító szabályozások

---

- cél: különböző természetű zavarások minél jobb kompenzálása
- fajtái:
  - zavarkompenzáció
  - arányszabályozás
  - kaszkádszabályozás
  - kaszkád-arányszabályozás

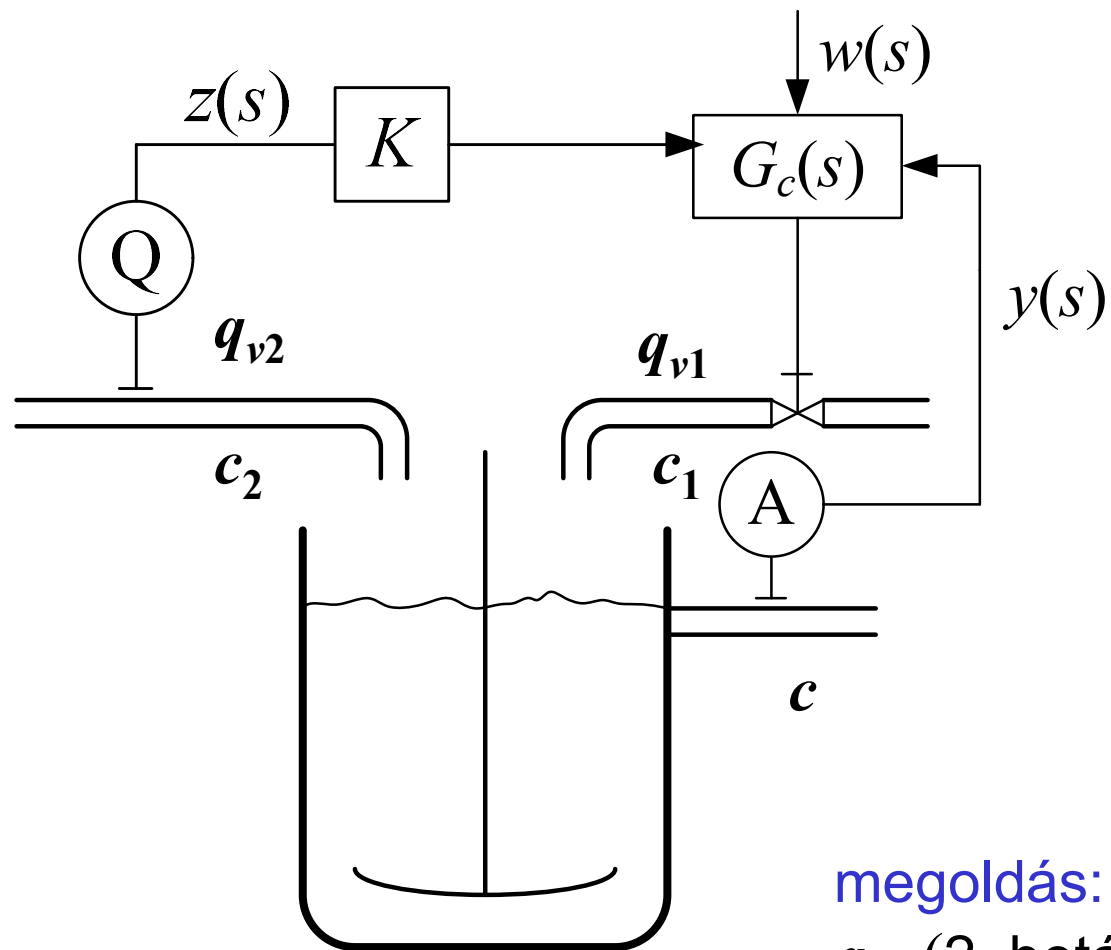


## Zavarkompenzáció

---

- cél: a zavaró jellemzőnek a szabályozott jellemzőre gyakorolt hatásának csökkentése
- megoldás:
  - szabályzó rendszer kiegészítése vezérlő körrel
  - a legnagyobb mértékű zavarást jelentő jellemzőt bevonjuk a szabályozásba
  - ehhez mérjük ezt a jellemzőt is, és a jelet szuperponáljuk például a végrehajtó jelre

# Zavarkompenzáció



szabályozás célja:  
 $c$  (kilépő koncentráció)  
előírt értéken tartása

zavaró jellemzők:

- $c_2$  és
- $q_{v2}$  (ez a jelentősebb)

módosított jellemző:

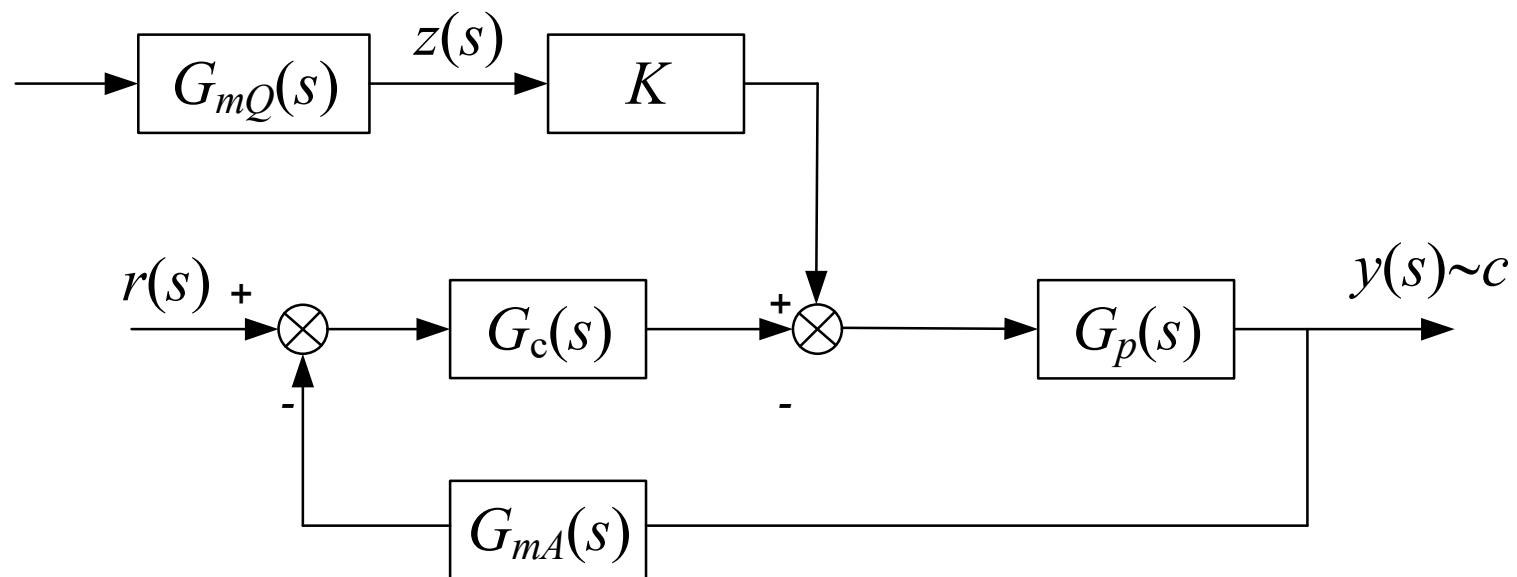
$q_{v1}$  (1. betáplálás)

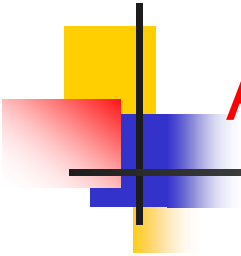
megoldás:

$q_{v2}$  (2. betáplálás) bevonása  
a szabályzásba

# Zavarkompenzáció

- hatásvázlat



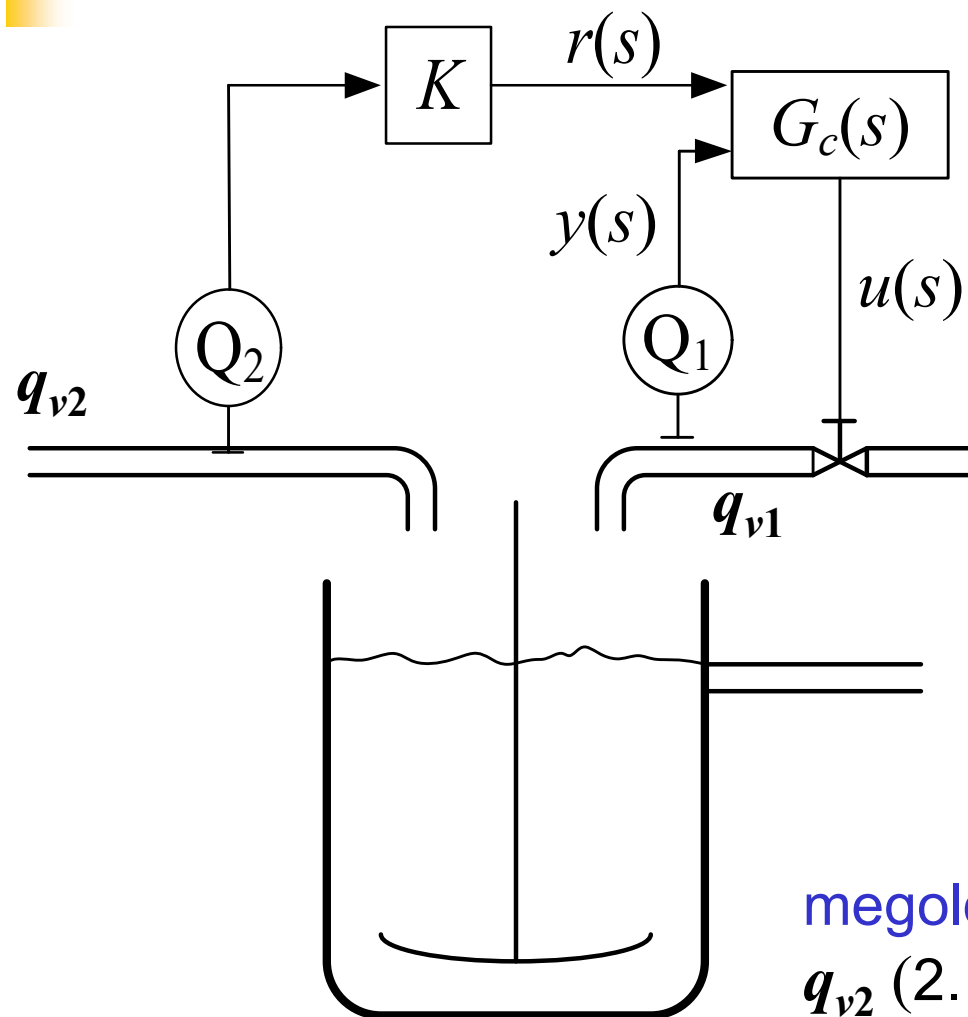


## Arányszabályozás

---

- cél: két mennyiség arányának állandó értéken tartása
- megoldás:
  - mindkét mennyiséget mérjük
  - az arányt a szorzó tényezővel állítjuk be
  - ez a jel lesz a szabályzó alapjele
  - a pontos beállításhoz I-tag is kell

# Arányszabályozás



szabályozás célja:

a két folyadék tömeg-  
áram arányának állandó  
értéken tartása

zavaró jellemzők:

- $q_{v1}$  és
- $q_{v2}$

módosított jellemző:

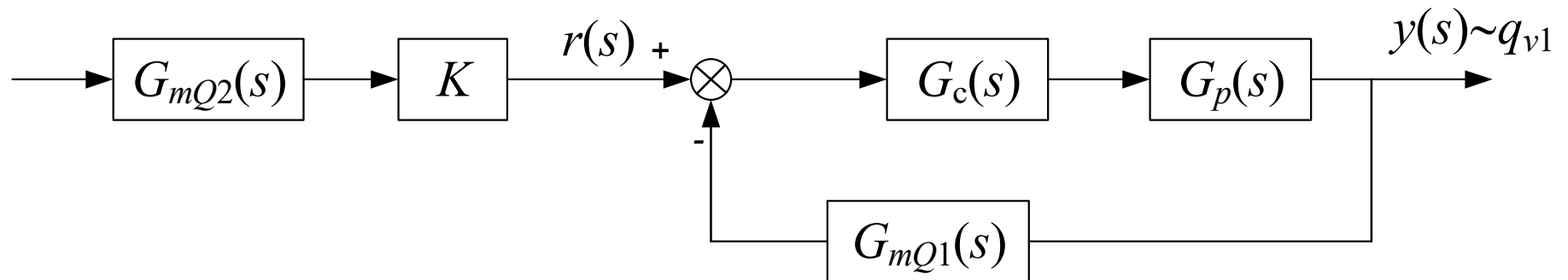
$q_{v1}$  (1. betáplálás)

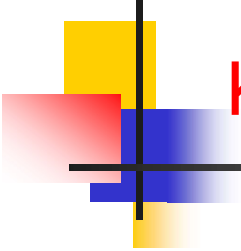
megoldás:

$q_{v2}$  (2. betáplálás) konstanssal  
szorzott értéke lesz az alapjel

# Arányszabályozás

- hatásvázlat



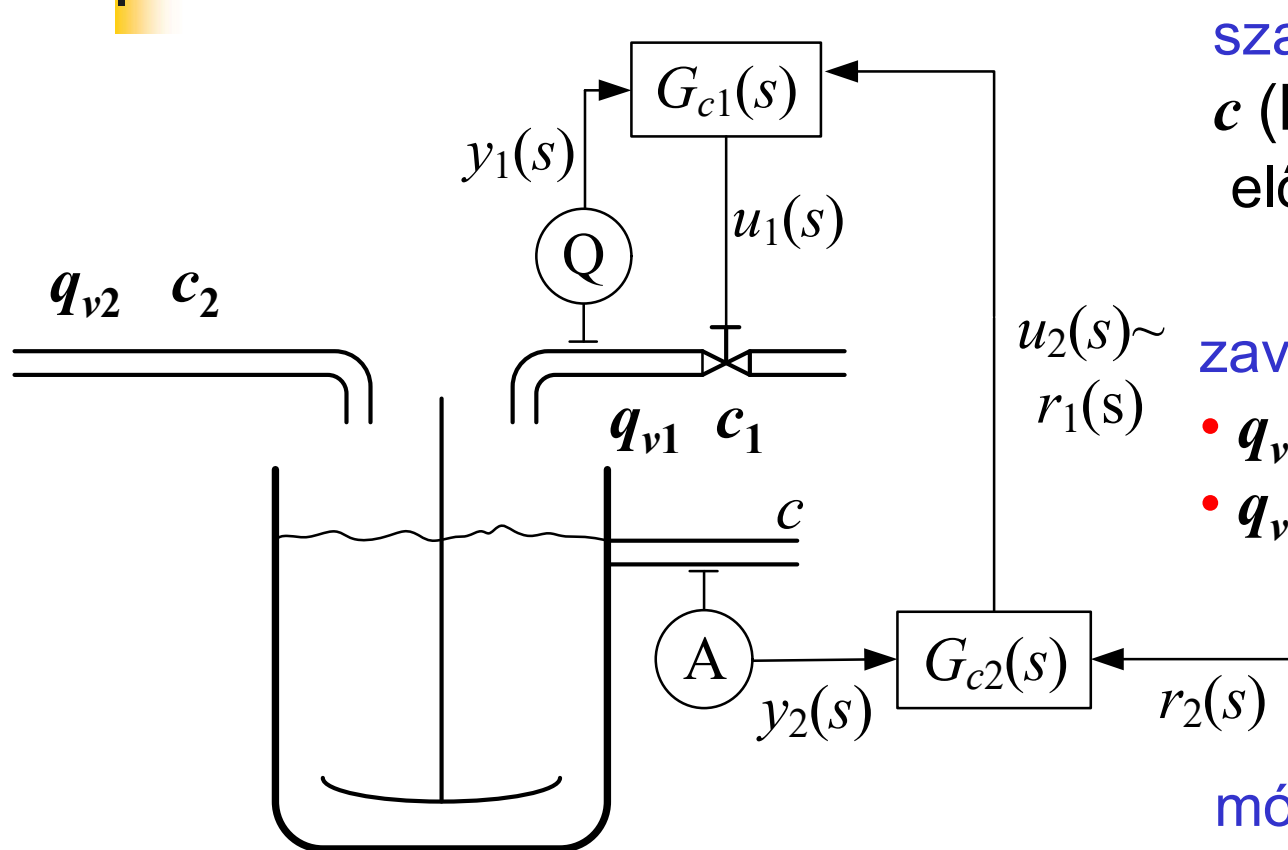


## Kaskádszabályozás

---

- cél: a szabályozott jellemző előírt értéken történő tartása különböző időbeli lefutású zavarások mellett
- megoldás:
  - két, egymásra épülő szabályzó kör kialakítása
  - alsó szintű kör: a gyors lefolyású zavarás gyors kompenzálása, nem kell tökéletes beállítás
  - felső szintű kör: a lassabb zavarások pontos kompenzálása (I-tag is kell)

# Kaskádszabályozás



szabályozás célja:  
 $c$  (kilépő koncentráció)  
 előírt értéken tartása

zavaró jellemzők:

- $q_{v1}$  (ez a leggyorsabb)
- $q_{v2}$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  (lassabbak)

módosított jellemző:

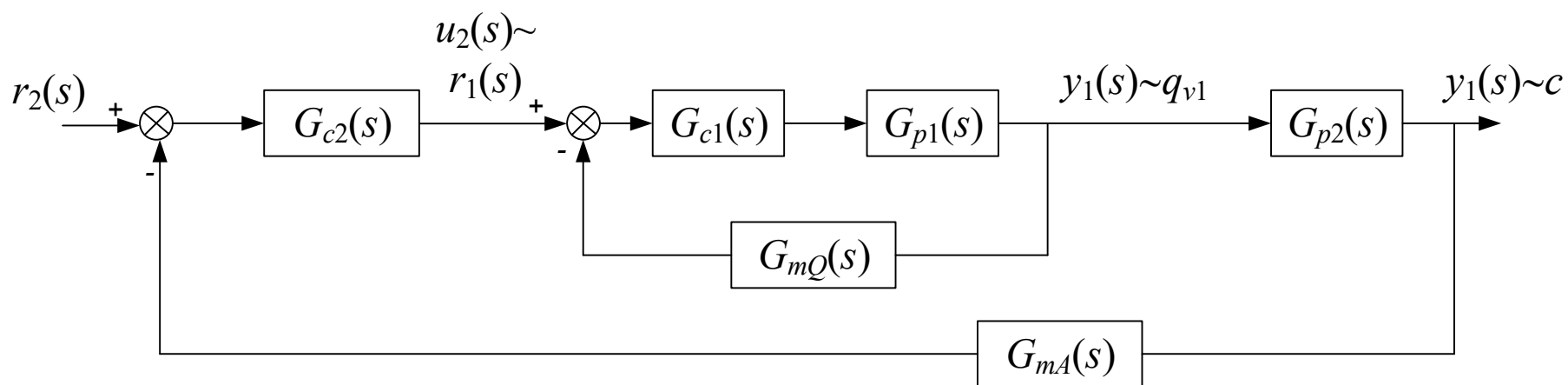
$q_{v1}$  (1. betáplálás)

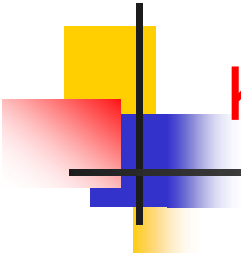
megoldás:

$q_{v1}$  (1. betáplálás) közelítő kompenzációja alsó szinten,  
 ennek az alapjelét a  $c$  koncentrációt szabályozó kör adja meg

# Kaskádszabályozás

- hatásvázlat

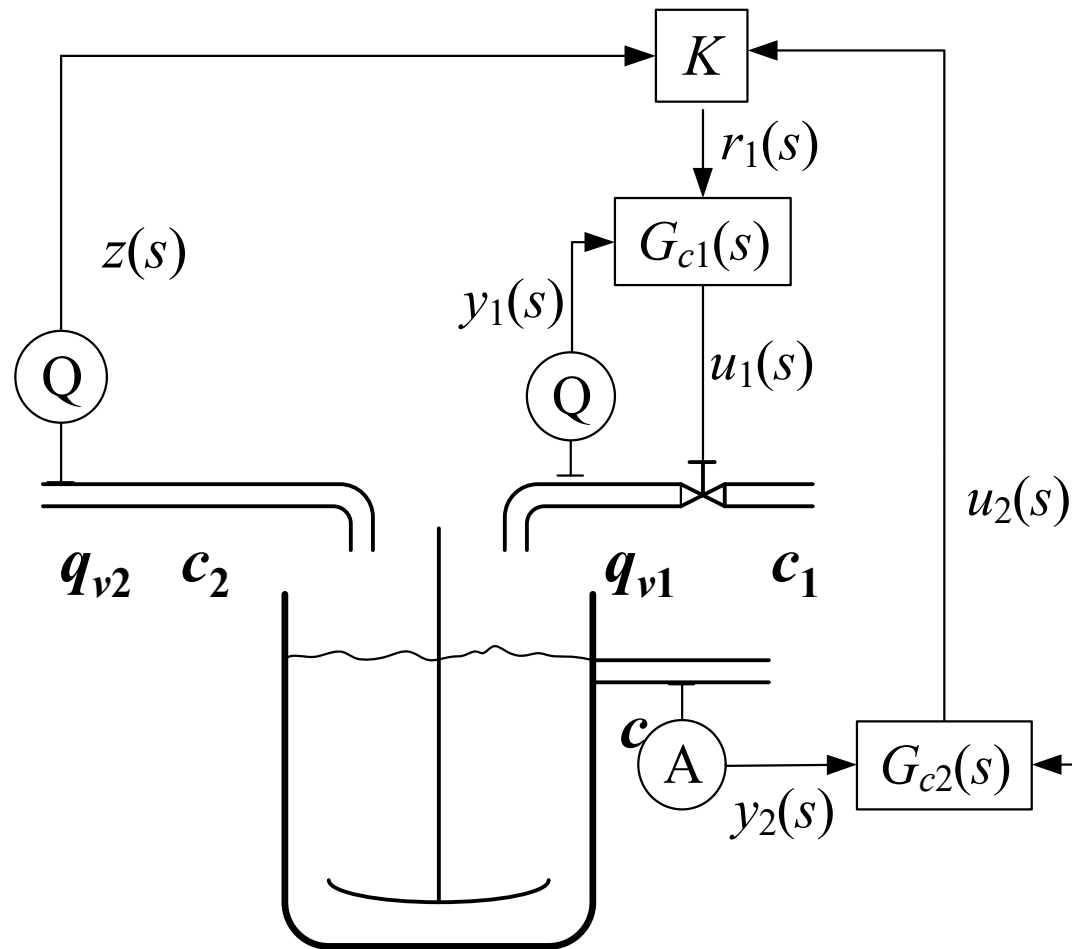




## Kaskád-arányszabályozás

---

- cél: két mennyiség arányának állandó értéken tartása mellett a lassabb lefolyású zavarások kompenzálása
- megoldás:
  - arányszabályozás kialakítása a legfontosabb és leggyorsabb zavarás hatásának kiküszöbölésére
  - kaskádkör kialakítása a lassabb zavarások kompenzálására



szabályozás célja:

**$c$  (kilépő koncentráció)  
előírt értéken tartása**

## zavaró jellemzők:

- $q_{v2}$  (gyors)
- $c_2$  (lassú)

módosított jellemző:

**$q_{v1}$  (1. betáplálás)**

megoldás:

- $q_{v2}$  (2. betáplálás)  
aránya lesz az alapjel
- $G_{c2}$  ezt módosítja  
az előírt  $c$ -hez

# Kaszád-arányszabályozás

- hatásvázlat

