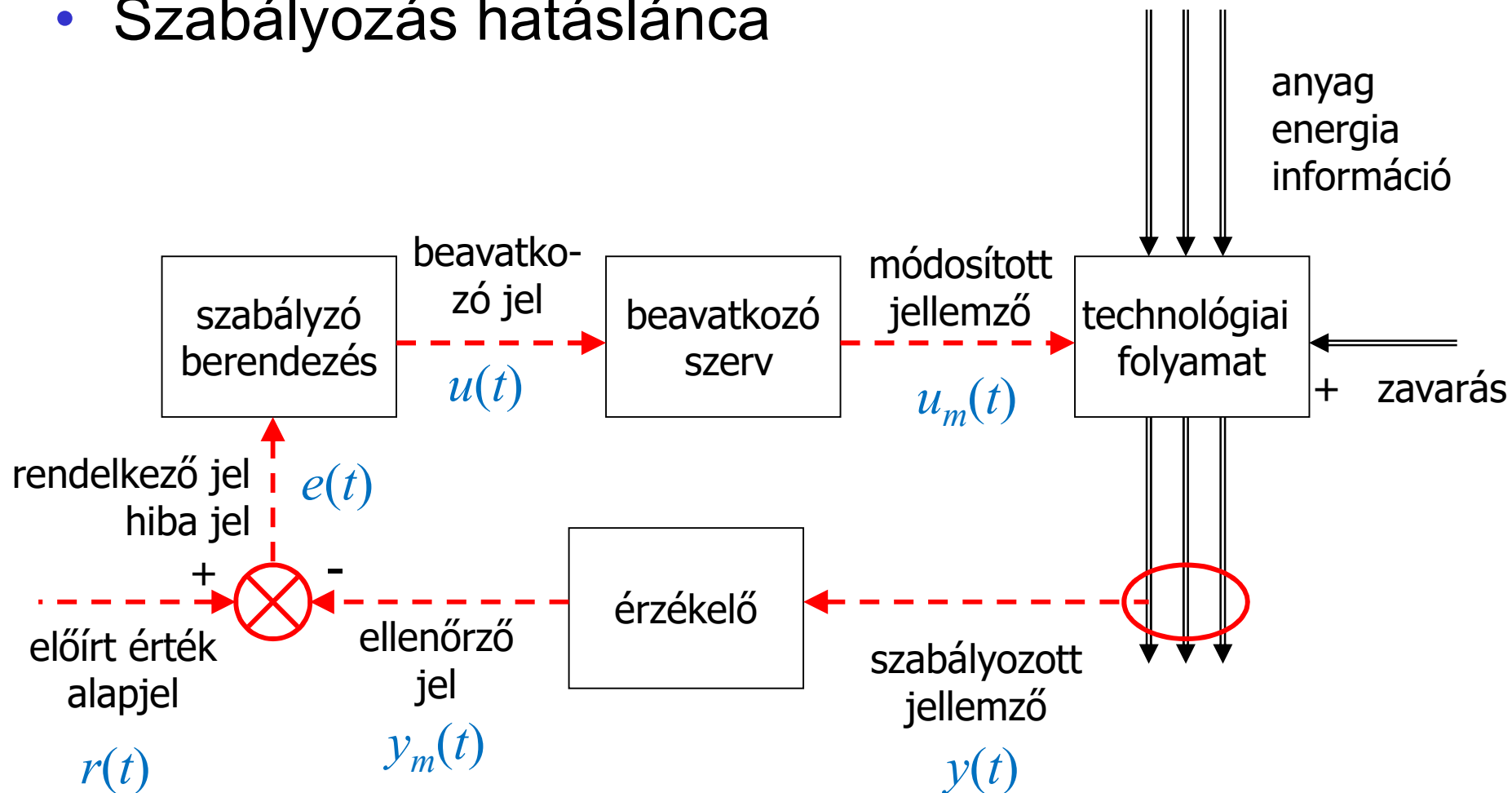


Szabályozás II.

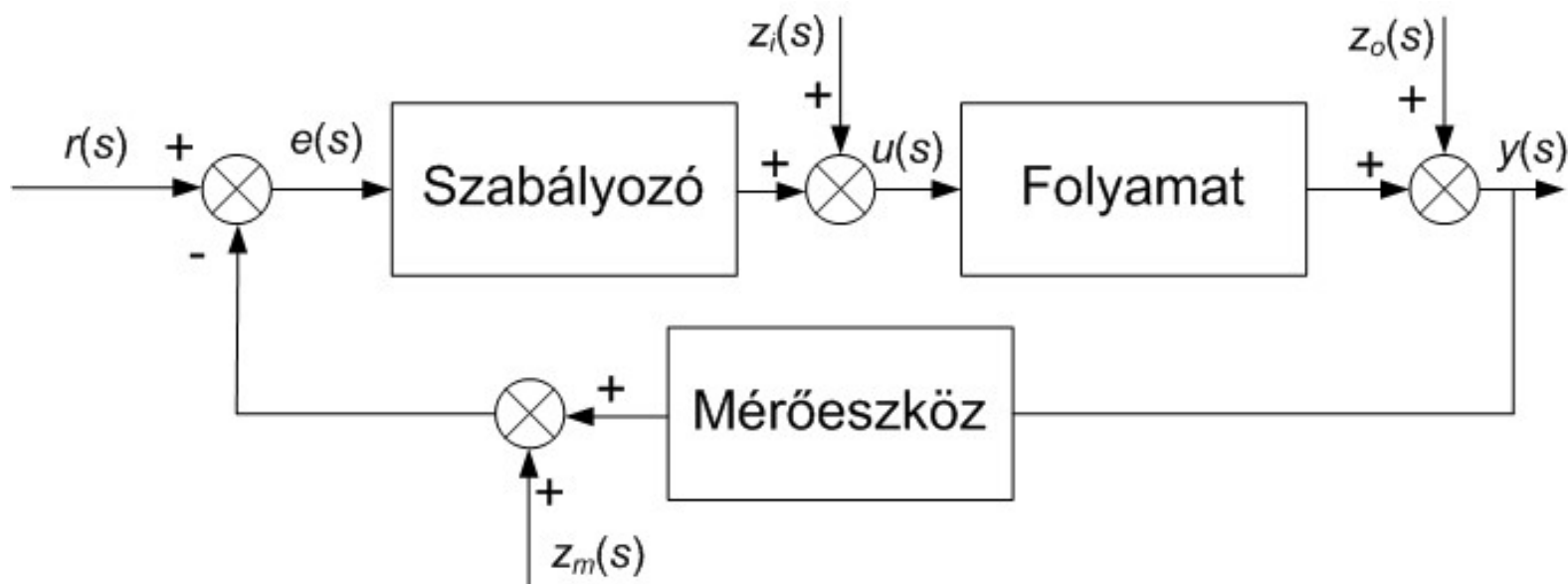
Szabályozás

- Szabályozás hatáslánca



Szabályozás

- Hiba bementek szabályozási köröknél

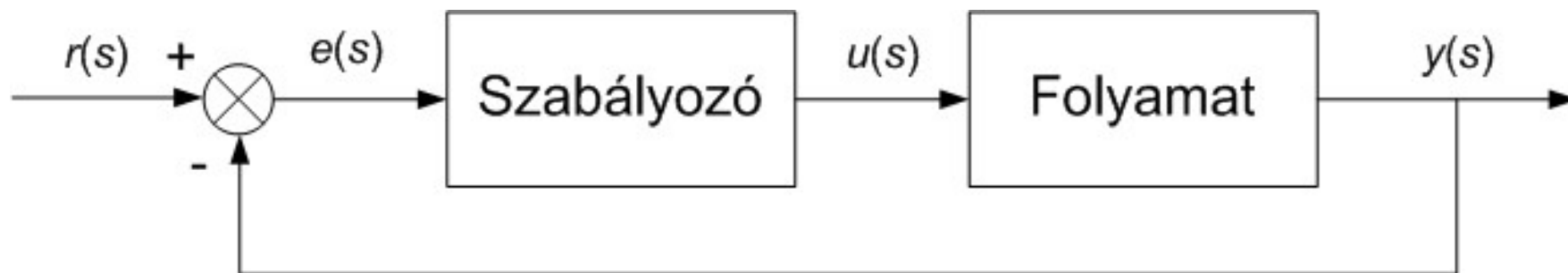


Szabályozás

- A szabályozás követelményeinek megadása:
 - időtartományban (pl.: tranziens jellegének és az állandósult állapotnak specifikálása adott bemenet esetén)
 - frekvenciatartományban (pl.: fázis- és erősítési tartalék, vágási körfrekvencia megadása)
- tervezési megközelítések:
 - tapasztalati beállítás – intuitív módszer
 - analitikus tervezési módszerek

Szabályozás

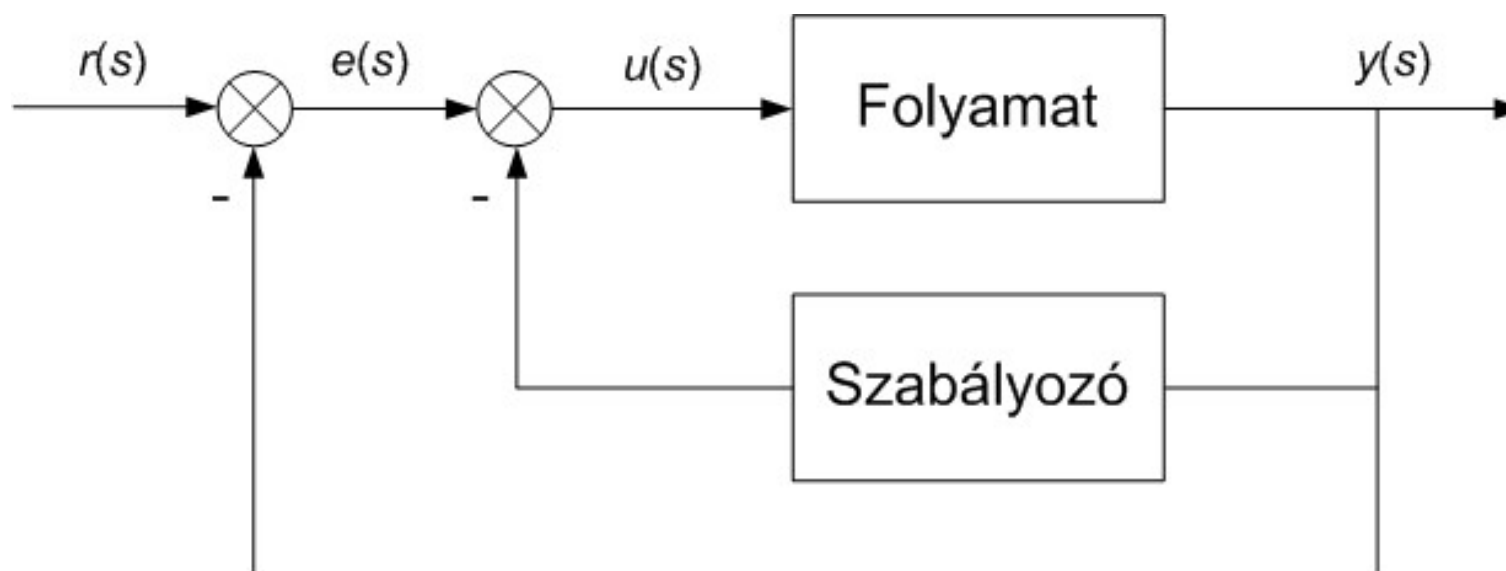
- Szabályozási struktúrák
 - Soros vagy kaszkád elrendezés



- legáltalánosabb elrendezés

Szabályozás

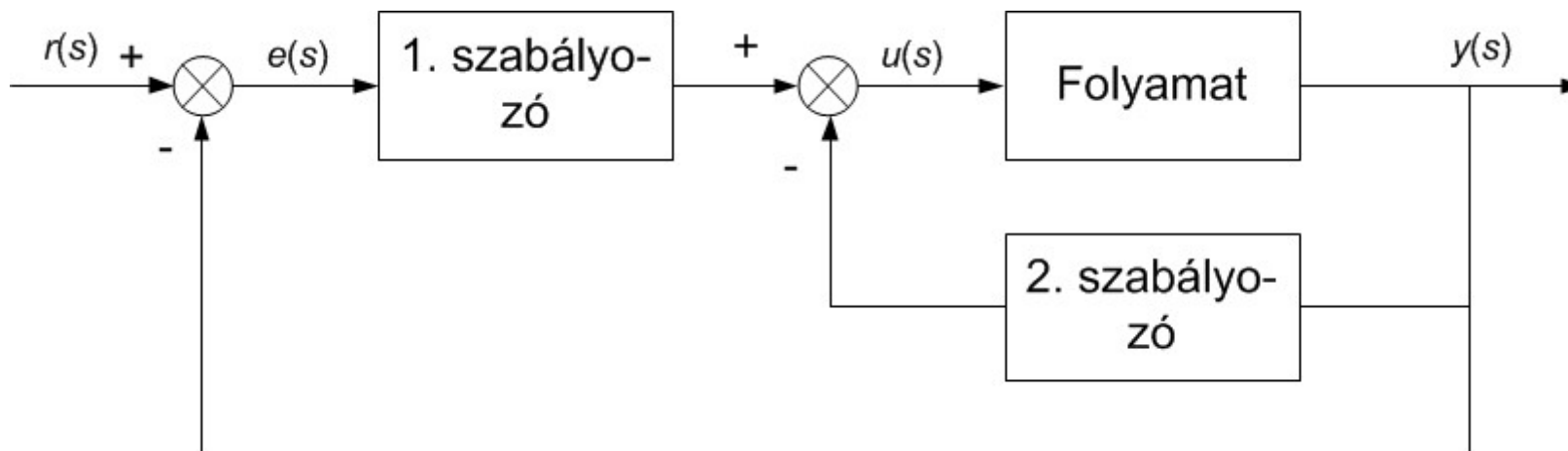
- Visszacsatolósos kompenzáció



- a kiegészítő visszacsatolás következtében vannak előnyös tulajdonságai, alkalmazzák a soros kompenzációval együtt is

Szabályozás

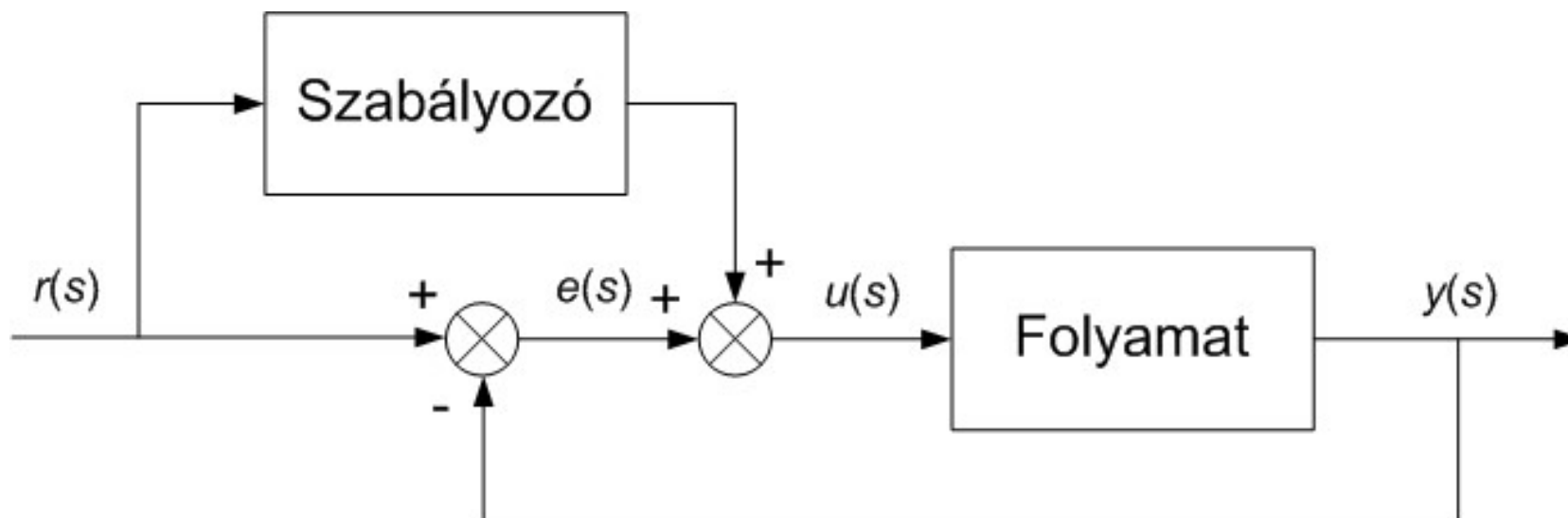
- Visszacsatolósos kompenzáció



- a kiegészítő visszacsatolás következtében vannak előnyös tulajdonságai, alkalmazzák a soros kompenzációval együtt is

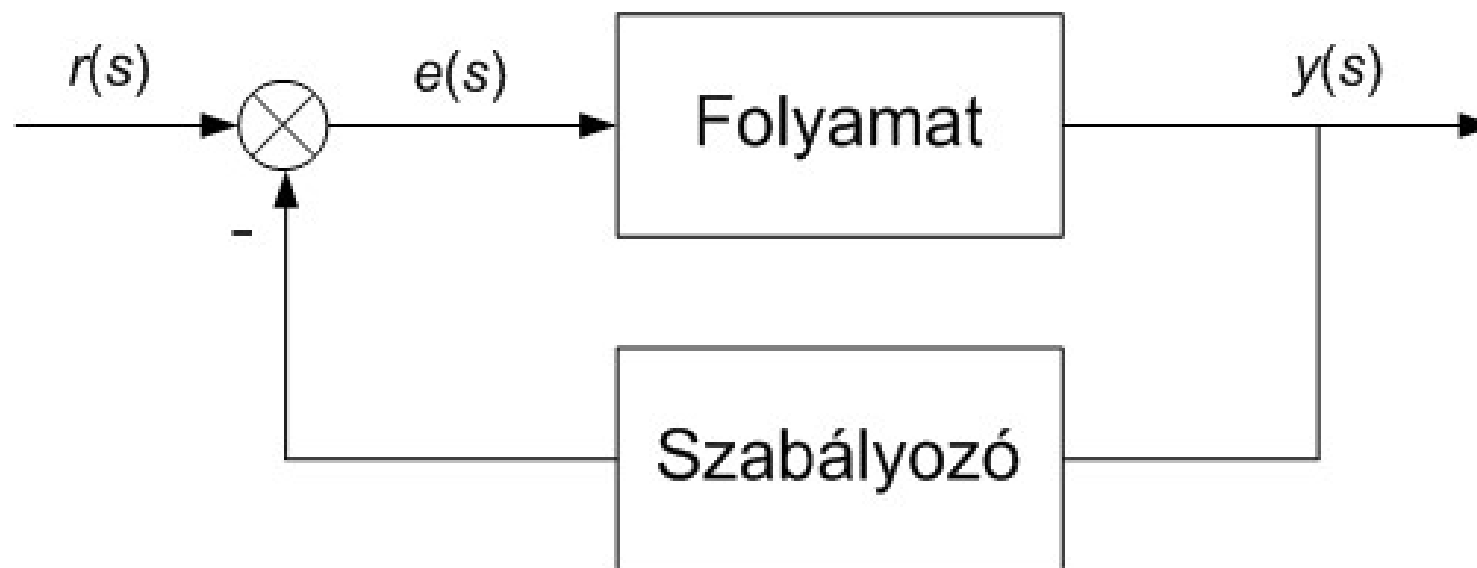
Szabályozás

- Előrecsatolásos kompenzáció



Szabályozás

- Állapot-visszacsatolás



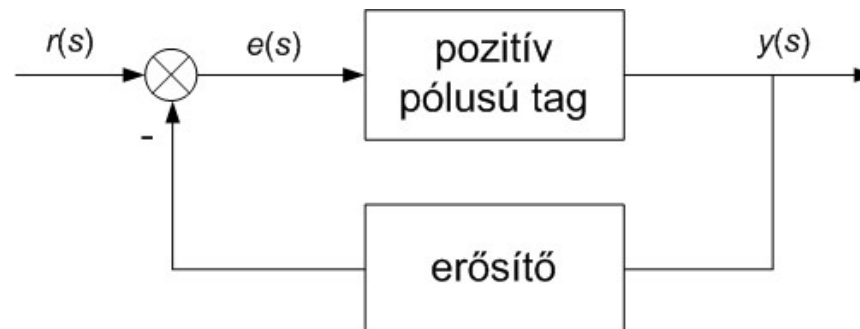
- az irányított rendszer belső összefüggéseinek ismerete kell

Szabályozás

- Szabályzási körrel szembeni fontosabb elvárások
 - Stabilitás
 - minimális elvárás
 - beavatkozást a folyamat dinamikája késlelteti
 - rossz esetben a beavatkozás ellentétes fázisban történik, ami labilitáshoz vezet

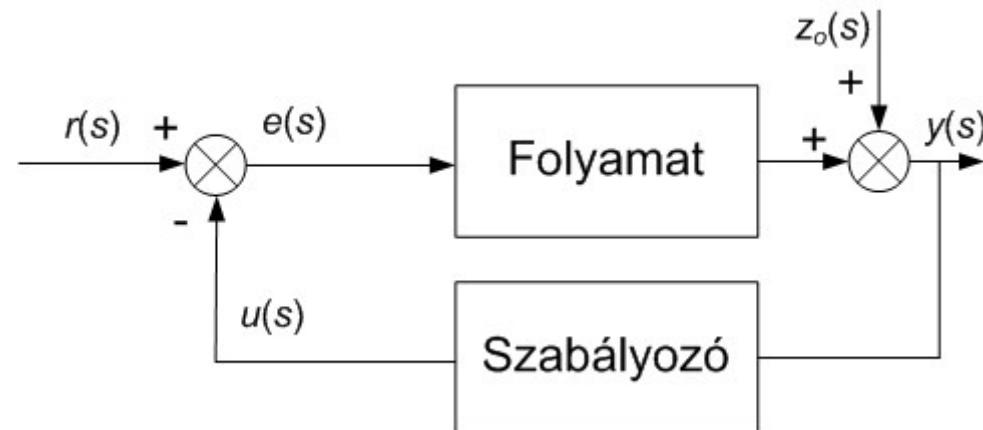
Szabályozás

- Alap-jelkövetés
 - minimális elvárás – adott pontossággal
 - integráló tag esetén nincs maradó hiba
- Labilis folyamat stabilizálása
 - megfelelő nagyságú arányos tag segítségével egyszerűbb esetben



Szabályozás

- Tranziens viselkedés javítása
 - hurok átviteli tényező $\rightarrow 1$
 - időállandó csökken
- Zavarás hatásának csökkentése
 - bizonyos típusú zavarások esetén



Szabályozás

- Érzéketlenség paraméterváltozásra
- Nagy erősítés esetén a visszacsatolás a visszacsatoló tag közelítő inverzét képezi
- Linearizáló hatás

Vezérlés - szabályozás

	vezérlés	szabályozás
zavaró jellemző	néhány, előre ismert zavarás kompenzálása	minden zavarás kompenzálása
irányított jellemző	ha nincs ismeretlen zavarás, akkor mindig az előírt értéken	van eltérés, ez működteti a rendszert
irányítási szervek	pontosan ismerni kell minden elemet	nem kell a pontos ismeret
működési sajátosságok	mindig stabil	lehet instabil (labilis) is

Arányos szabályozás

- Arányos szabályozás
 - a hibajelet egy szorzótényezőt (K_P) tartalmazó arányos tag segítségével csatoljuk vissza a folyamatra
 - hatására a visszacsatolt kör beállása és dinamikája megváltozik
 - kis K_P érték esetén: kis energia-bevitel, lassú működtetés, maradó szabályozási hiba lehet
 - nagy K_P érték esetén: gyors felfutás, minimális maradó szabályozási hiba, de növekvő lengőhajlam, instabilitás veszélye

Arányos szabályozás

- a növekvő erősítés hatására a pólusok a komplex síkon távolodnak a valós tengelytől, harmad- és magasabb rendű rendszereknél a domináns pólus pár közeledik a képzetes tengely felé, ennek következtében nő a lengések frekvenciája és amplitúdója, és az erősítés további növelésének hatására a rendszer a stabilitás határára kerül

Arányos-integráló szabályozás

- Arányos-integráló szabályozás
 - a hibajelet egy arányos (K_P) és egy integráló (K_I/s vagy $1/T_I s$) taggal csatoljuk vissza a folyamatra
 - hatására a visszacsatolt kör átmeneti függvénye maradó szabályozási hiba nélkül beáll az erősítés által meghatározott értékre, de a szabályozási kör lengésre való hajlama növekszik
 - kis K_I (nagy T_I) érték esetén: lengésmentes vagy minimális lengéssel történő beállítás, de lassú (a lecsengési idő nagy)

Arányos-integráló szabályozás

- nagy K_I (kis T_I) érték esetén: gyors beállítás, de növekvő a lengésre való hajlam, instabilitás veszélye
- a csökkenő integrálási erősítés hatására a pólusok a komplex síkon távolodnak a valós tengelytől, közelednek a képzetes tengelyhez adott K_P erősítés érték mellett.

Arányos – integráló – deriváló szabályozás

- Arányos-integráló-deriváló szabályozás
 - a hibajelet egy arányos (K_P), egy integráló (K_I/s) és egy deriváló ($K_D s$) segítségével csatoljuk vissza a folyamatra
 - hatására a visszacsatolt kör átmeneti függvénye maradó szabályozási hiba nélkül beáll az erősítés által meghatározott értékre, és a szabályozási kör lengésre való hajlama is csökken

Arányos – integráló – deriváló szabályozás

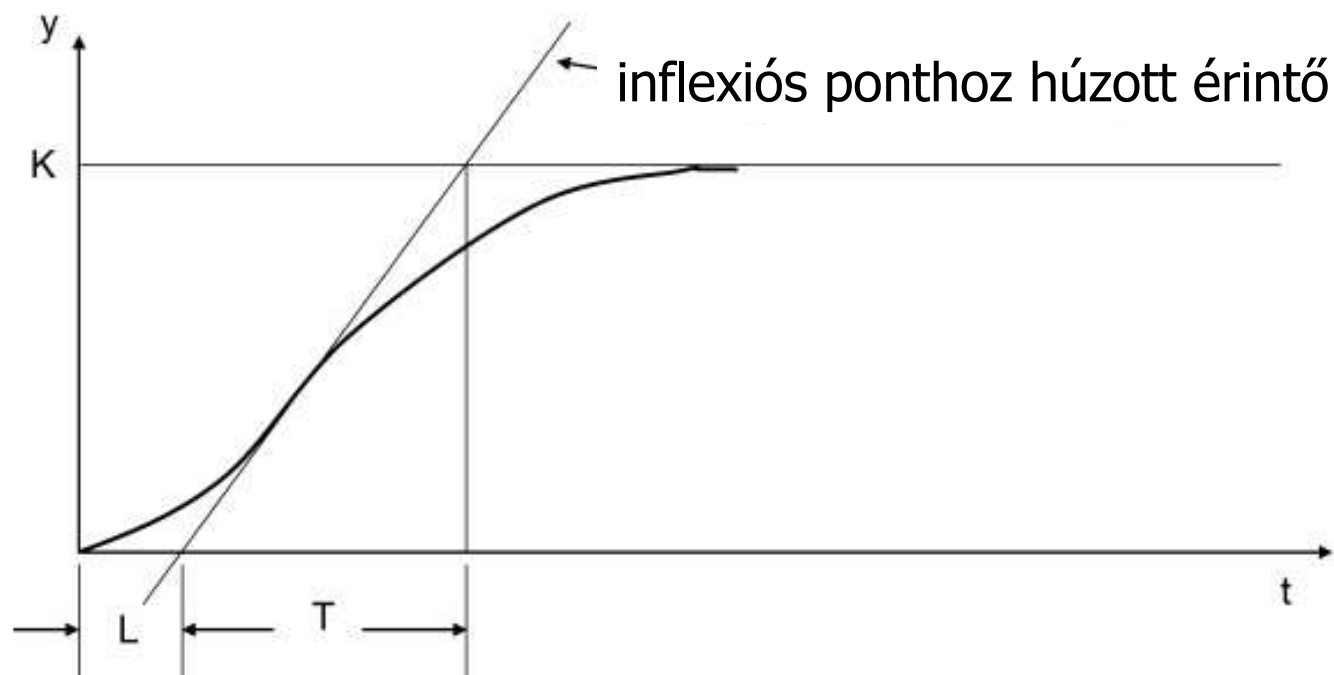
- a deriváló tag megelőző hatást fejt ki:
 - túl- és alálendüléskor, amikor jel távolodik az állandósult állapotbeli értékétől ($e(t)$ nő), akkor a hibajel és deriváltjának előjele megegyezik, így a deriváló tag fokozza a lassuló jelet
 - ha a jel az állandósult állapotbeli értéke felé tart ($e(t) \rightarrow 0$), akkor a hibajel és deriváltjának előjele eltérő, a deriváló tag csökkenti a beavatkozó jelet és lassítja a rendszer egyensúlyi állapot felé tartó kimenetét
- összességében csökkenek a túl- és alálendülések

Arányos – integráló – deriváló szabályozás

- komplex síkon a pólusok mellett zérus (vagy zérusok) is megjelenik, így ha a domináns pólus pár ebbe tart, akkor stabil lesz a rendszer

PID-szabályozó beállítása

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



PID-szabályozó beállítása

szabályozó paraméterének értéke

szabályozó típusa		K_P	$K_I (= 1/T_I)$	$K_D (= T_D)$
	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

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 ez az erősítés érték lesz a K_{kr} paraméter
 - határozzuk meg az állandósult lengések periódus idejét, ez lesz a T_{kr} paraméter

PID-szabályozó beállítása

szabályozó paraméterének értéke

szabályozó típusa

	K	T_I	T_D
P	$K \leq 0.5K_{kr}$	∞	0
PI	$K \leq 0.45K_{kr}$	$T_I \geq 0.8 T_{kr}$	0
PID	$K \leq 0.6K_{kr}$	$T_I \geq 0.5 T_{kr}$	$T_D \leq 0.125T_{kr}$

Szabályozó beállítása frekvenciatartományban

- Legyen a maradó szabályozási hiba és a fázistartalék tervezési paraméter
- összefüggő mennyiségek
 - maradó szabályozási hiba – körerősítés
 - erősítési tartalék – fázistartalék
- általános elvárás:
 - legyen a körerősítés egy adott K -nál nagyobb
 - legyen a fázistartalék legalább φ_t vagy nagyobb
- soros kompenzáció P, I, D-tagokkal

Szabályozó beállítása frekvenciatartományban

- kompenzálás menete:
 1. a szabályozó zérushelyét úgy választjuk meg, hogy a vágási körfrekvencia a -20dB meredekségű szakasz közepére essen
 - ez a szakasz legyen hosszú → nagy a fázistöbblet
 - célszerű a nagy időállandókat a szabályozó zérushelyeivel kiejtetni
 2. A szabályozó origóban lévő pólusával és a P tag erősítésével biztosítjuk a magasabb típusszámot és a megkívánt körerősítést

Szabályozó beállítása frekvenciatartományban

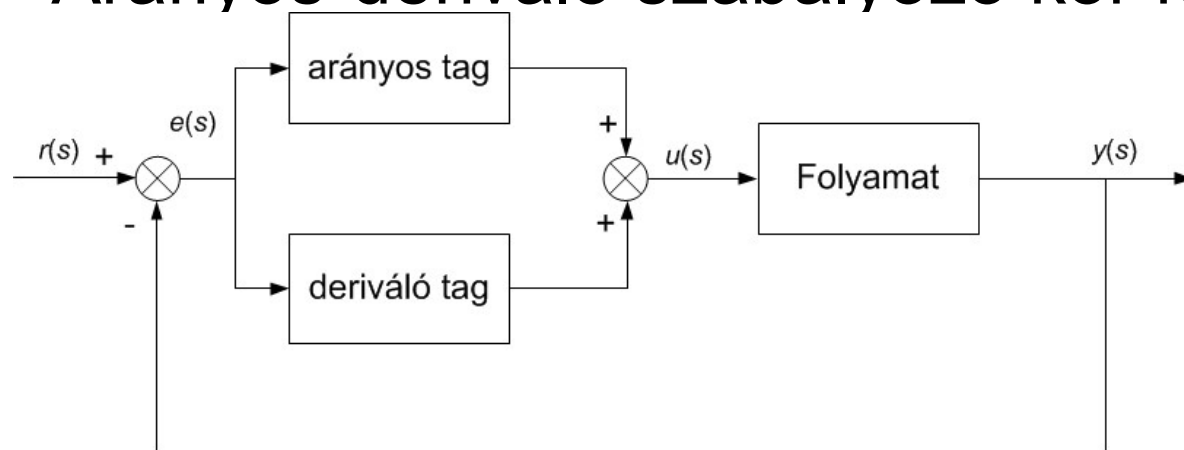
3. Ellenőrizzük, hogy a vágási körfrekvencián teljesül-e az előírt fázistöbblet
 - ha igen, akkor megnézzük van-e lehetőség a körerősítés növelésére a gyorsabb működéshez
 - ha nem, akkor módosítjuk a szabályozót, pl. P-tag mellett figyelembe vesszük az I és/vagy D tagot is

Sebesség visszacsatolósos szabályozás

- Műszaki-technológiai okokból mindenképpen kerülendőek a nagy túl- és alálendülések
- ugyanakkor ezek csökkentése nem mehet a szabályozás egyéb paramétereinek, így a beállítás pontosságának a kárára
- egy lehetséges megoldás a kimenő jel deriváltjának közvetlen negatív visszacsatolása a folyamat bemenetére
- az arányos-deriváló szabályozással szemben, itt nem jelenik meg zérus a számlálóban

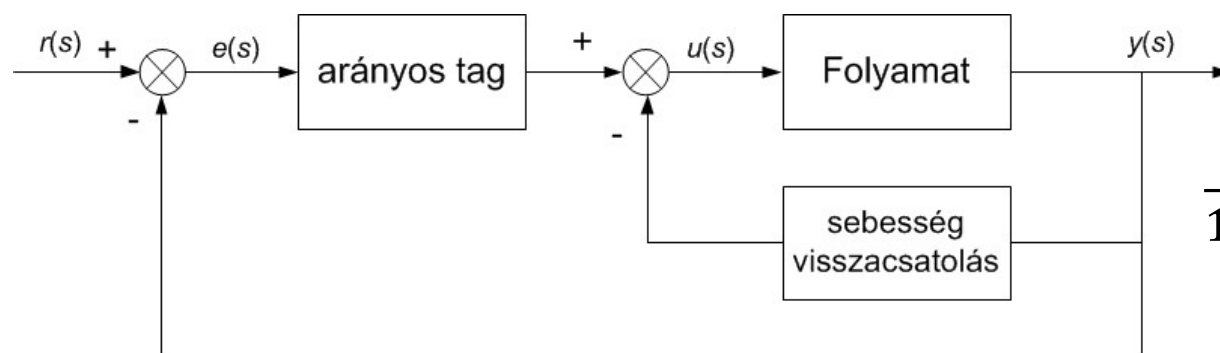
Sebesség visszacsatolós szabályozás

- Arányos-deriváló szabályozó kör felépítése



$$\frac{(G_P(s) + G_D(s))G_o(s)}{1 + (G_P(s) + G_D(s))G_o(s)}$$

- Sebesség visszacsatolós kör felépítése



$$\frac{G_P(s)G_o(s)}{1 + (G_P(s) + G_V(s))G_o(s)}$$

Sebesség visszacsatolásos szabályozás

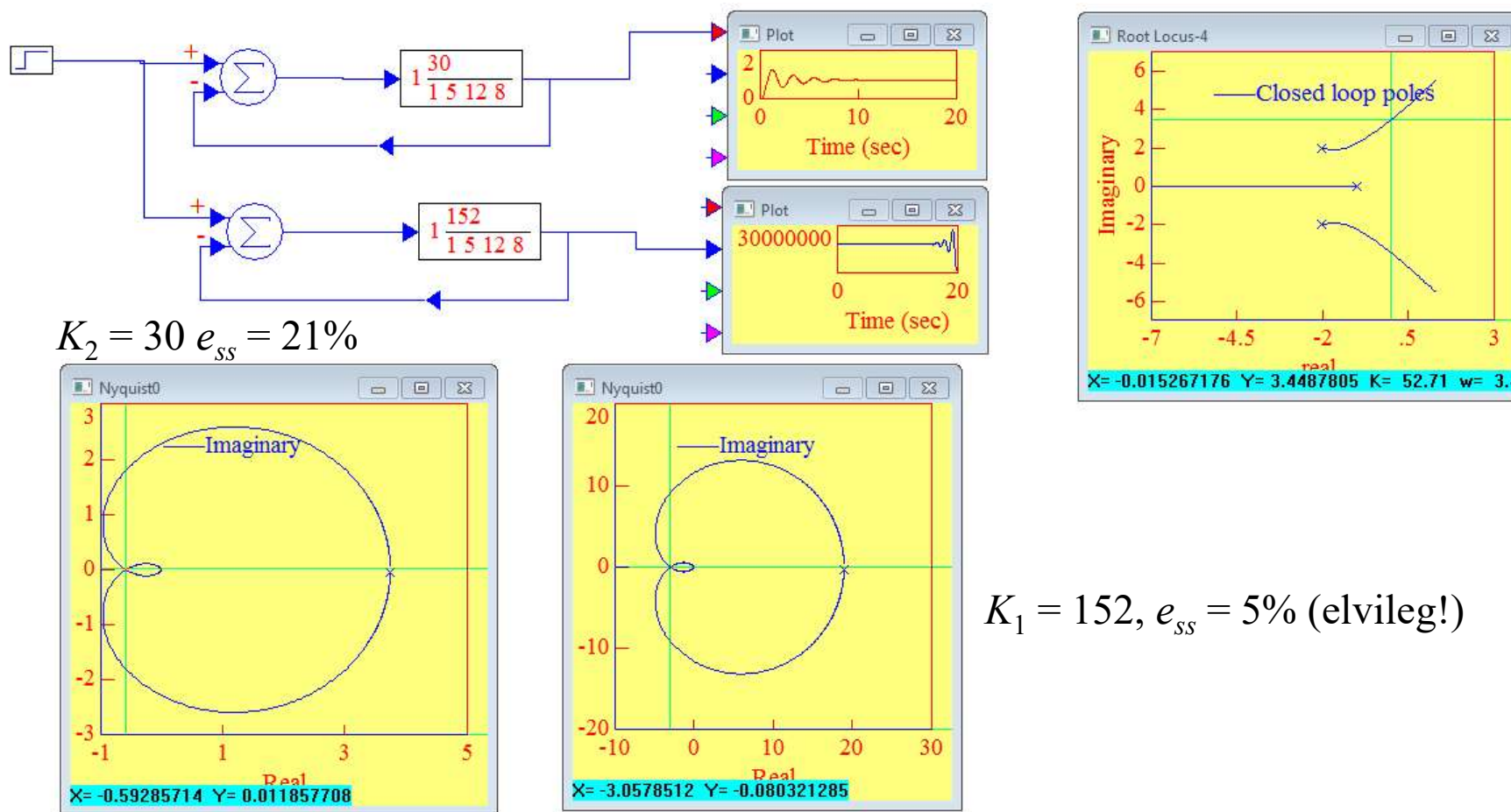
- alkalmazásának előnyei:
 - bizonyos esetekben könnyű előállítani/mérni jel deriváltját (sebességét),
 - nem lép fel a hibajel deriválásakor a zajok felerősödése és ugrás bemenet esetén a telítődés.

Fáziskompenzációs szabályozás

- Visszacsatolt rendszereknél egyidejűleg kell teljesülnie, hogy
 - állandósult állapotban az eltérés egy megadott értéken belül maradjon, érjük el ezt a megfelelő K_1 erősítés beállításával;
 - a relatív stabilitás megfelelő legyen (adott erősítési vagy fázistartalék legyen, vagy amplitúdó-maximum előírása), ehhez tartozzon K_2 erősítési érték
- Ha $K_1 > K_2$, akkor a két kritérium ellentmond egymásnak

Fáziskompenzációs szabályozás

- Példa



Fáziskompenzációs szabályozás

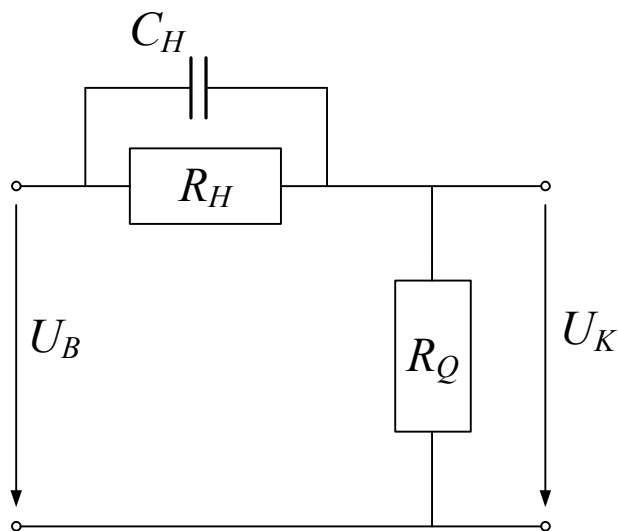
- tervezési cél a két viselkedés előnyeit tartalmazó szabályozás létrehozása:
 - K_1 erősítéssel indítva, majd fázissiettetést kialakítva a nagyobb frekvenciákon az előírt erősítési vagy fázistartalék teljesítéshez;
 - K_2 erősítéssel indítva, és fáziskésleltetést alkalmazva a kisebb frekvenciákon az előírt maradó szabályozási hiba teljesítéshez;
 - K_1 és K_2 közötti erősítéssel indítva, majd a nagyobb frekvenciákon fázissiettetést, a kisebb frekvenciákon fáziskésleltetést alkalmazva.

Fáziskompenzációs szabályozás

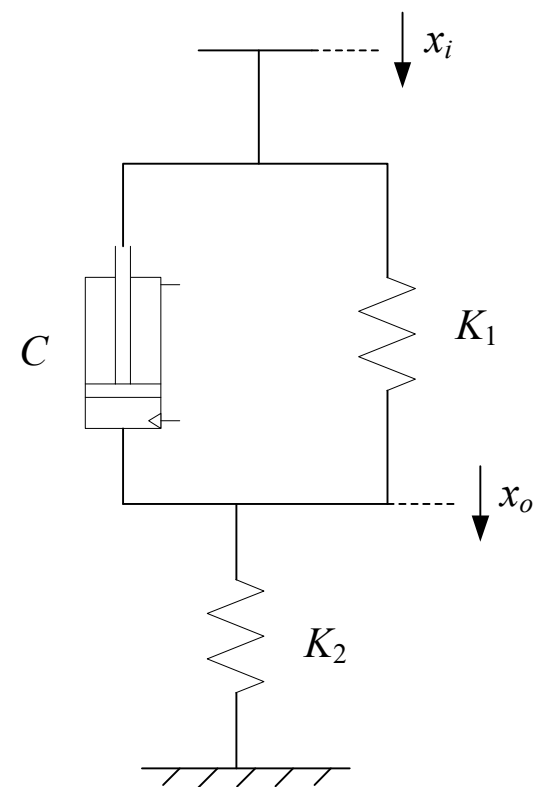
- A tervezési feladat elvégzése:
 - Bode diagram
 - próba-hiba módszer
 - időtartománybeli viselkedés?
 - fázistartalék: 45°
 - erősítési tartalék: 6-8 dB
 - tervezői tapasztalat fontos a módszerek és a szabályozó kiválasztásánál

Reális PD-tag – Fázissiettető tag

- PD-tag gyakorlati megvalósítása elektronikai és mechanikai elemekkel



- a tag csak elektronikus erősítő elé iktatható be, mert árammal nem terhelhető



Reális PD-tag – Fázissiettető tag

- átviteli függvény

$$G_{FS}(s) = \frac{U_K(s)}{U_B(s)} = A_{FS} \frac{1 + T_{SS}s}{1 + T_{KS}s} = \frac{1}{\rho} \frac{1 + \rho T s}{1 + T s}$$

- ahol

siettető tag

$$T_{SS} = R_H C_H = \rho T$$

siettetési időállandója

$$T_{KS} = \frac{R_H R_Q}{R_H + R_Q} \cdot C_H = T$$

késleltetési időállandója

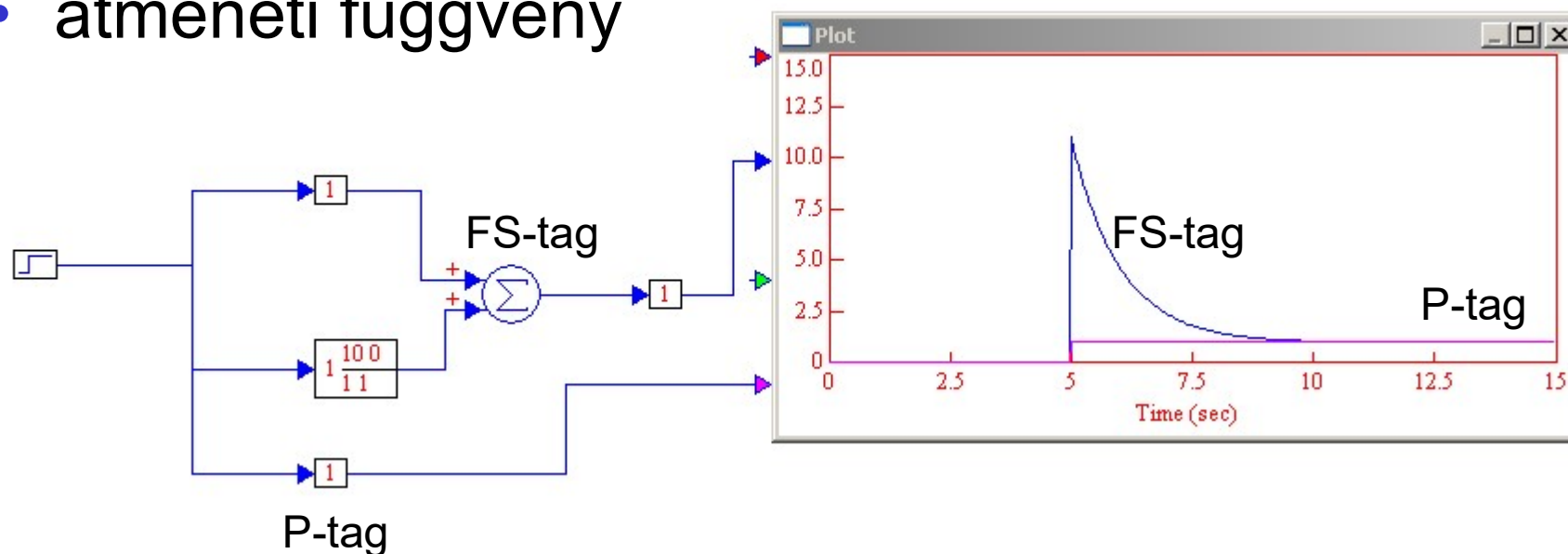
$$T_{SS} > T_{KS}$$

$$A_{FS} = \frac{R_Q}{R_Q + R_H} = \frac{1}{\rho} < 1$$

átviteli tényező, erősítés

Reális PD-tag – Fázissiettető tag

- átmeneti függvény

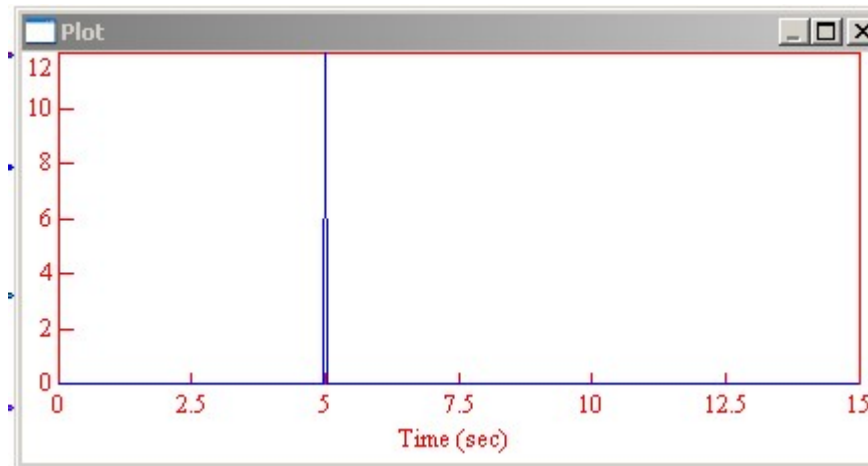


$$G_{FS}(s) = A_{FS} \left(\frac{1 + T_{SS}s}{1 + T_{KS}s} \right) = A_{FS} \left(1 + \frac{T_D s}{1 + T_{KS}s} \right)$$

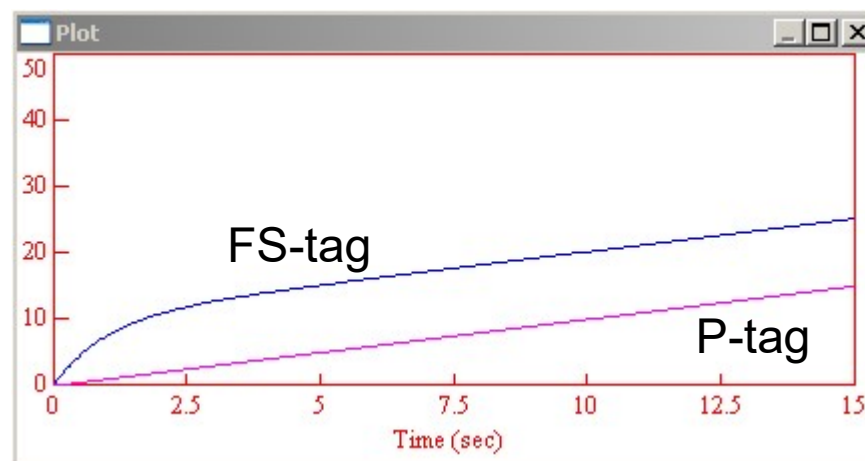
$$T_{SS} = T_D + T_{KS}$$

Reális PD-tag – Fázissiettető tag

- súlyfüggvény



- sebességugrás válasz

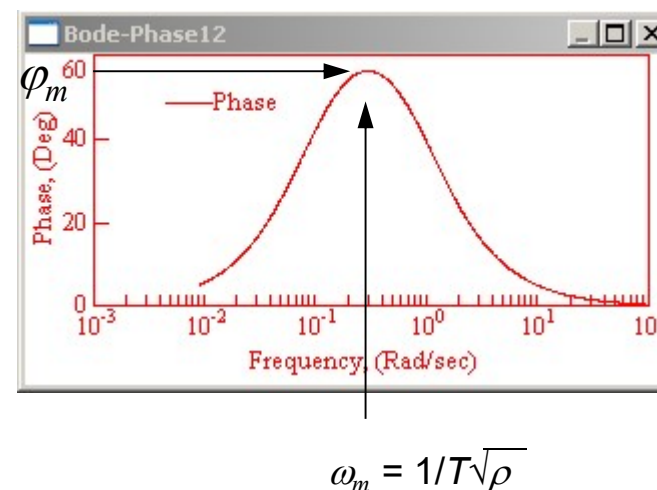
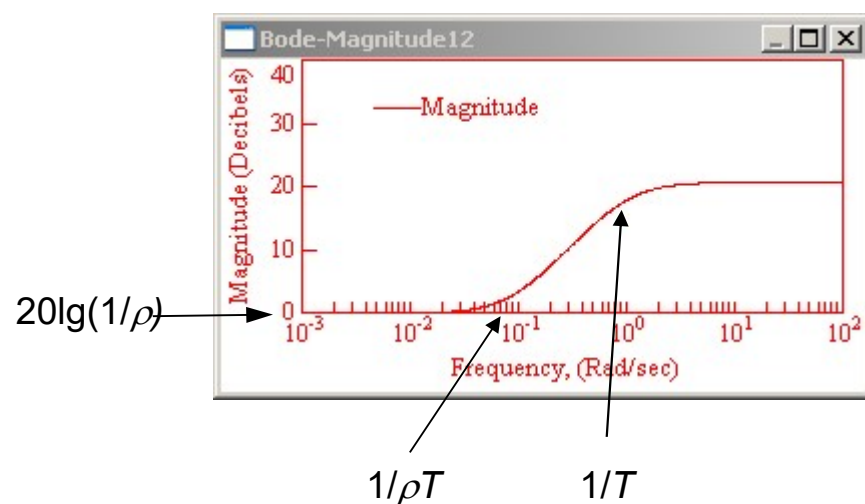
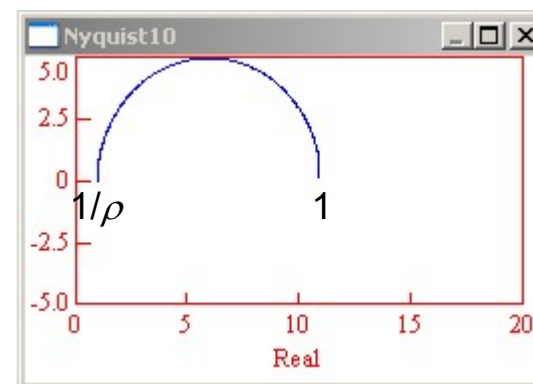


Reális PD-tag – Fázissiettető tag

- Nyquist-diagram

$$G_{FS}(j\omega) = A_{FS} \frac{1 + T_{SS}j\omega}{1 + T_{KS}j\omega} = \frac{1}{\rho} \frac{1 + \rho Tj\omega}{1 + Tj\omega}$$

- Bode-diagram



Kompenzálás fázissiettető taggal

- fázissiettetés maximumának (φ_m) és a hozzá tartozó frekvencia (ω_m) meghatározása:

$$\lg \omega_m = 0,5 \left(\lg \frac{1}{\rho T} + \lg \frac{1}{T} \right) \quad \omega_m = \frac{1}{T \sqrt{\rho}}$$

$$\varphi_m = \operatorname{arctg} \omega_m \rho T - \operatorname{arctg} \omega_m T$$

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{\omega_m \rho T - \omega_m T}{1 + (\omega_m \rho T)(\omega_m T)}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{\rho - 1}{2\sqrt{\rho}} \quad \sin \varphi_m = \frac{\rho - 1}{\rho + 1}$$

Kompenzálás fázissiettető taggal

- Tervezés menete:
 - Vegyük fel a kompenzálandó tag Bode diagramját olyan erősítés mellett, mely megfelel a követelményeknek.
 - Határozzuk meg a jelenlegi fázistartalékokot és becsüljük meg a minimálisan szükséges fázissiettetés mértékét a megfelelő kimeneti tranzienshez. Tartalékként adjunk hozzá még 5° -t, és határozzuk meg a szükséges fázissiettetés φ_{FS} mértékét.

Kompenzálás fázissiettető taggal

- Ahhoz, hogy a vágási körfrekvenciánál érvényesüljön a kapott fázissiettetés, határozzuk meg a $(1+j\omega\rho T)/(1+j\omega T)$ kifejezés amplitúdóviszonyát nagy frekvencián, és keressük meg, hogy a kompenzáció nélküli rendszer milyen frekvencián csillapítja ezt felére. Ez lesz ω_m . Így $T=1/(\omega_m\sqrt{\rho})$, és a szabályozott rendszer töréspontjai $\omega_m/\sqrt{\rho}$ és $\omega_m\sqrt{\rho}$ frekvenciákon lesznek.
- Növeljük meg az erősítést ρ értékének megfelelően, és vegyük fel a rendszer Bode-diagramját.

Kompenzálás fázissiettető taggal

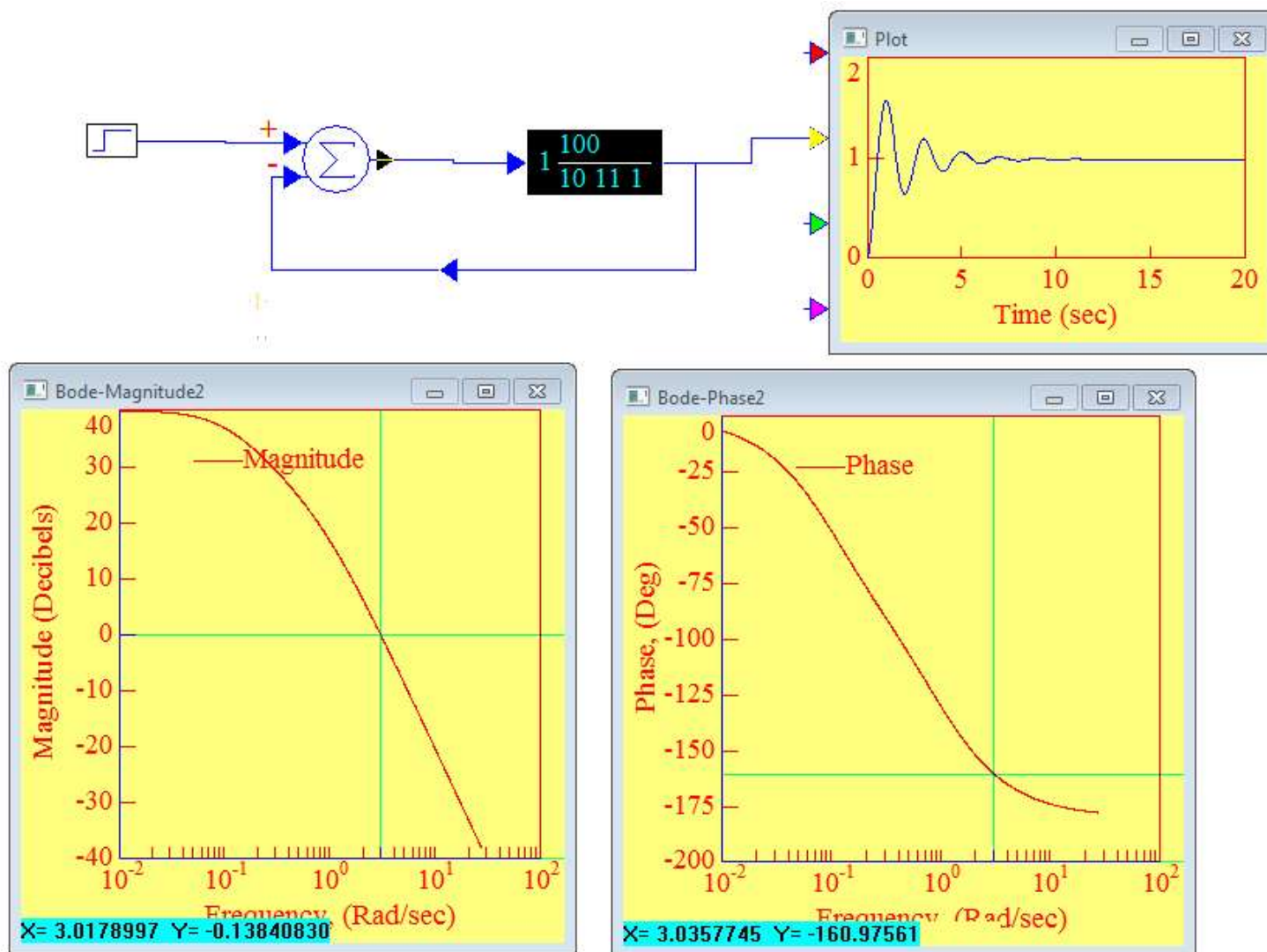
- Ellenőrizzük az előírt minőségi kritériumok teljesítését. Ha nem kaptunk megfelelő eredményt, akkor növeljük φ_t értékét, és ismételjük meg a folyamatot.

Kompenzálás fázissiettető taggal

- A fázissiettető tag
 - csökkenti a felfutási időt,
 - csökkenti a túllendülés mértékét,
 - de növeli a sávszélességet: érzékenyebb lesz a rendszer a nagy frekvenciás zajokra
- Alkalmazási korlátok:
 - olyan átviteli függvényekkel rendelkező tagoknál, ahol a fáziskésés gyorsan nő a vágási körfrekvenciánál,
 - túl nagy erősítés,
 - gazdasági és egyéb akadályok.

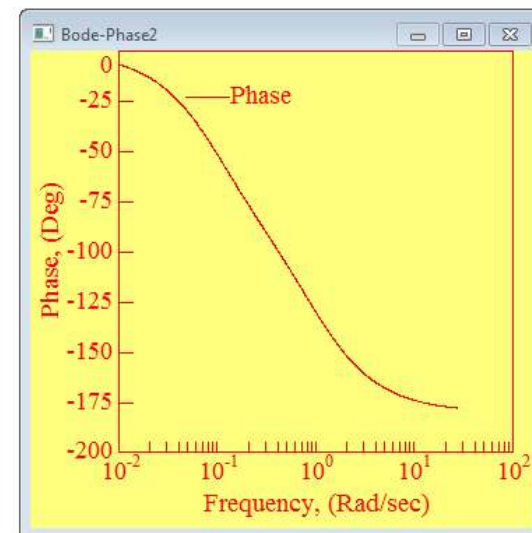
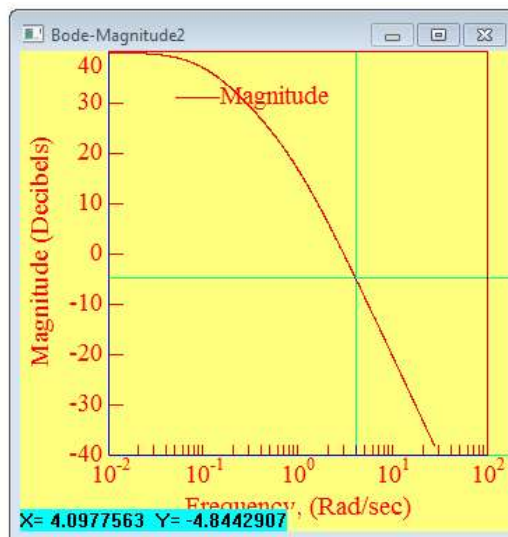
Kompenzálás fázissiettető taggal

- Példa



Kompenzálás fázissiettető taggal

- ω_m meghatározása

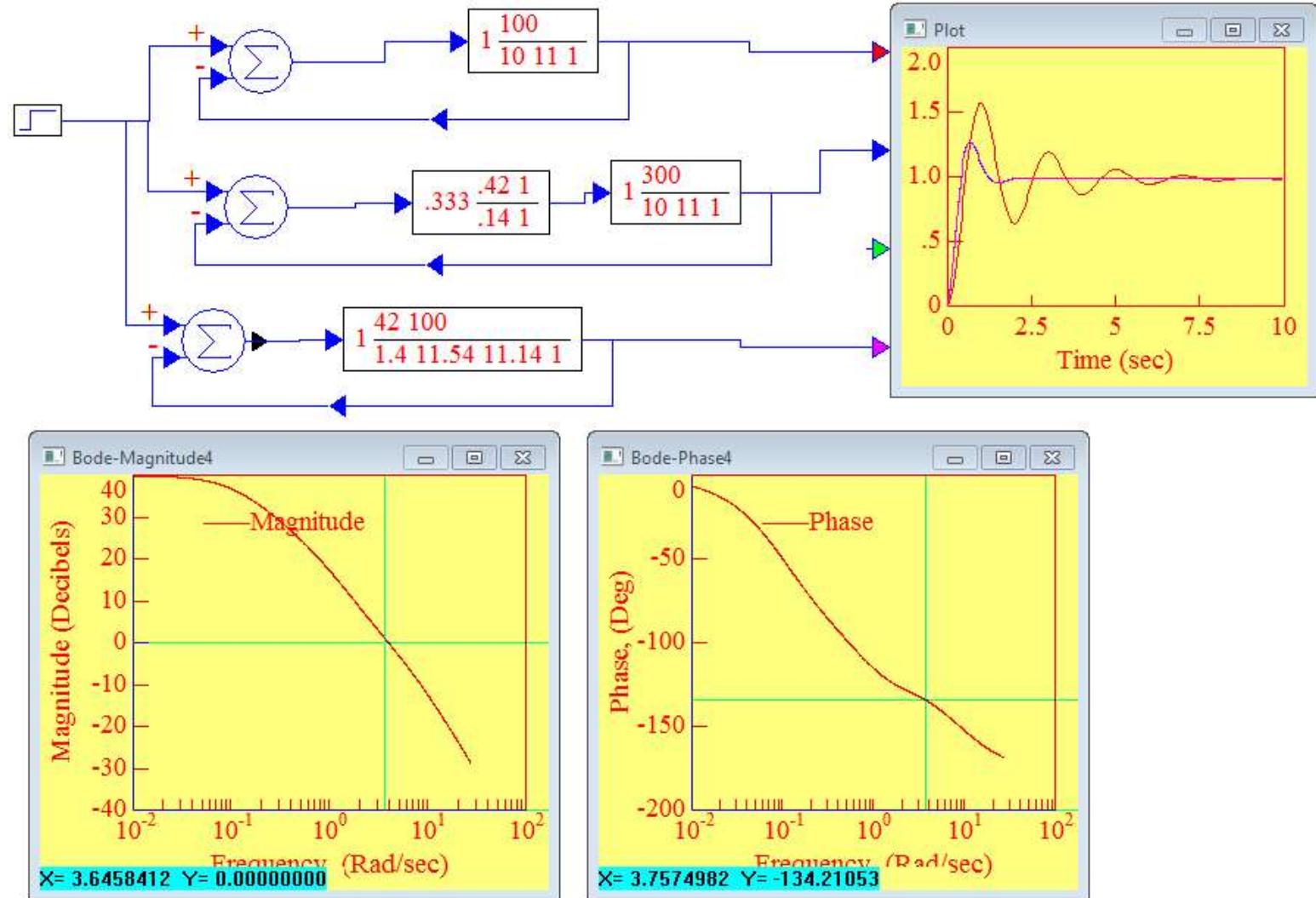


$$A[dB] = 20\lg 100 - 20\lg\sqrt{1 + 100\omega^2} - 20\lg\sqrt{1 + \omega^2}$$

$$\varphi = -\arctg 10\omega - \arctg \omega$$

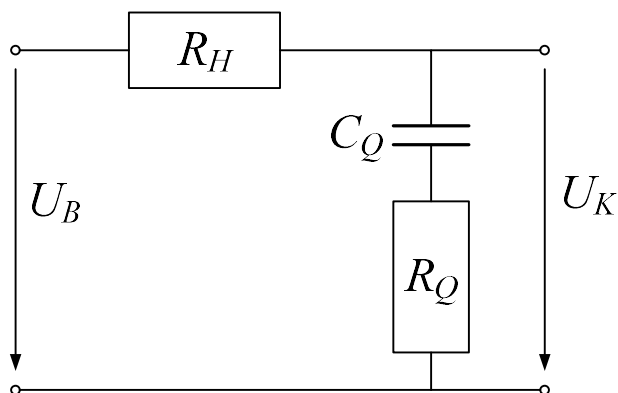
Kompenzálás fázissiettető taggal

- ered-
mény

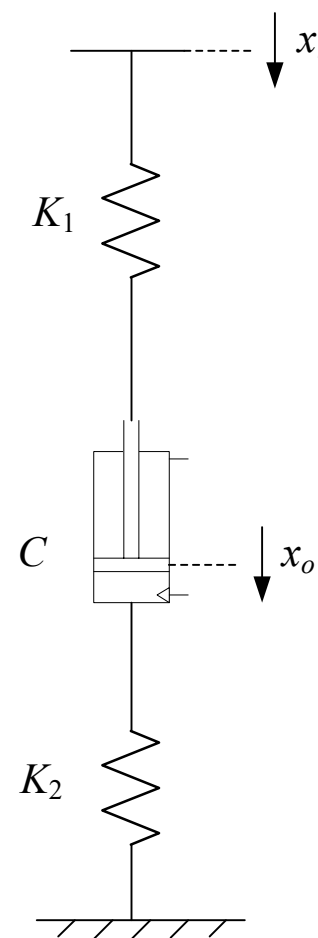


Reális PI-tag – Fáziskésleltető tag

- PI-tag gyakorlati megvalósítása elektronikai és mechanikai elemekkel



- feltesszük, hogy a tag üresjáratban dolgozik, azaz a kimenete terheletlen



Reális PI-tag – Fáziskésleltető tag

- átviteli függvény

$$G_{FK}(s) = \frac{U_K(s)}{U_B(s)} = \frac{1 + T_{SK}s}{1 + T_{KK}s} = \frac{1 + \rho Ts}{1 + Ts}$$

- ahol

késleltető tag

$$T_{SK} = R_Q C_Q = \rho T$$

siertetési időállandója

$$T_{KK} = (R_H + R_Q) \cdot C_Q = T$$

késleltetési időállandója

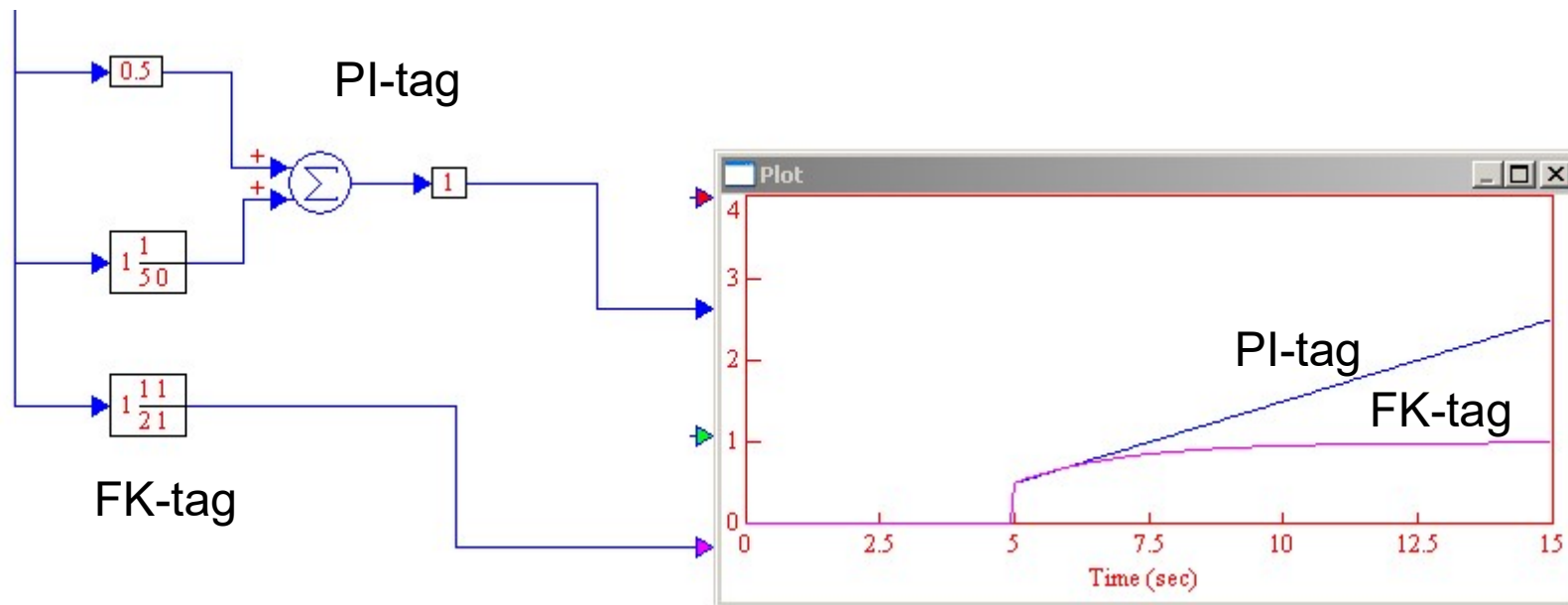
$$T_{KK} > T_{SK} \quad \rho = \frac{R_Q}{R_Q + R_H} < 1 \quad \text{ellenállásviszony}$$

Reális PI-tag – Fáziskésleltető tag

- alacsony frekvencián a fáziskésleltető tag erősítése gyakorlatilag egységnyi
- nagy frekvenciákon viszont ρ -nak megfelelő csillapítást fejt ki
- ez a tag is egy pólust és egy zérust ad rendszerhez, de a pólus lesz a domináns, és így az eredő gyökhelygörbe domináns pólusai jobbra tolódnak
- ugyanakkor kisebb erősítéssel elérhető a megfelelő szabályozás, ami viszont kedvezően hat a stabilitásra
- a fáziskésleltető tag nem a fázis megfelelő frekvenciára történő eltolását, hanem a nagy frekvenciás csillapító hatását alkalmazza

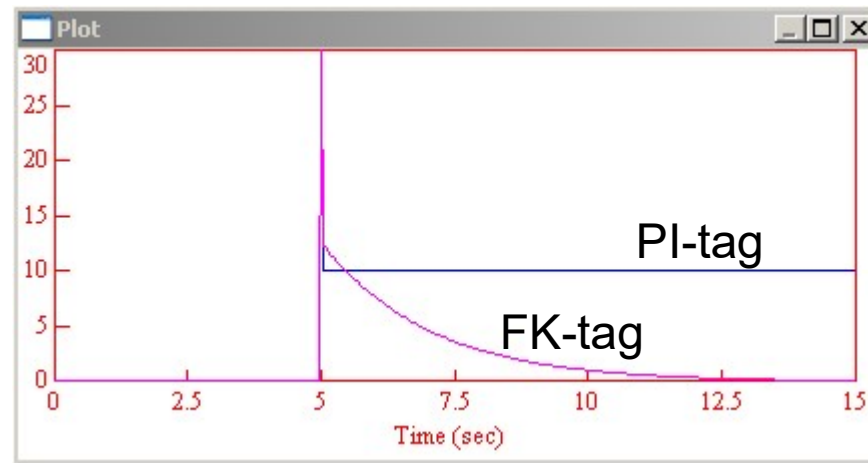
Reális PI-tag – Fáziskésleltető tag

- átmeneti függvény

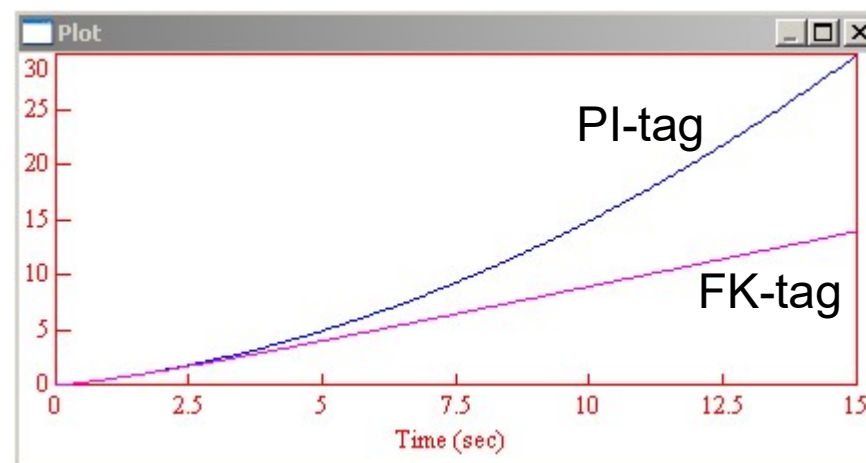


Reális PI-tag – Fáziskésleltető tag

- súlyfüggvény



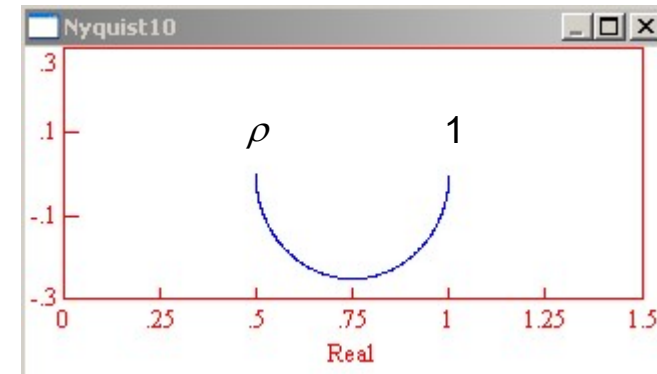
- sebességugrás válasz



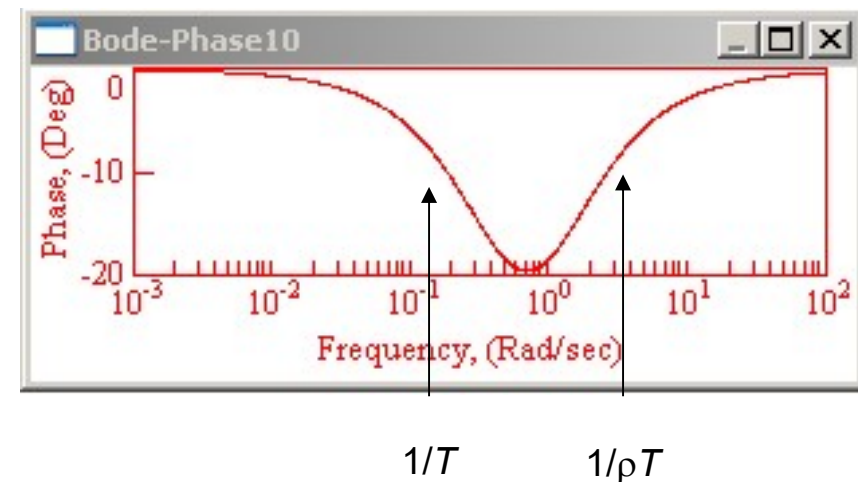
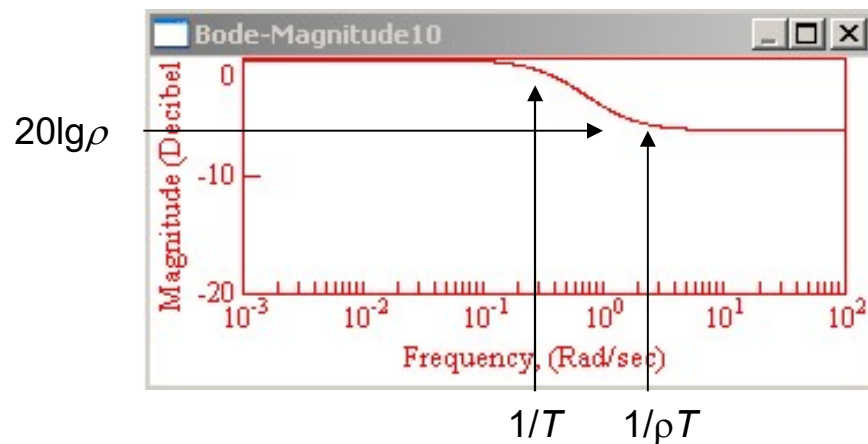
Reális PI-tag – Fáziskésleltető tag

- Nyquist-diagram

$$G_{FK}(j\omega) = \frac{1 + T_{SK}j\omega}{1 + T_{KK}j\omega} = \frac{1 + \rho Tj\omega}{1 + Tj\omega}$$



- Bode-diagram



Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- Tervezés menete:
 - Vegyük fel a kompenzálandó tag Bode diagramját olyan erősítés mellett, mely megfelel a követelményeknek.
 - Keressük meg azt a ω_c frekvenciát, ahol az előírt fázistartalék $+5^\circ$ teljesül. A szabályozott rendszer amplitúdó görbéjének ennél az értéknél kell a vágási körfrekvenciájának lennie. Határozzuk meg az ω_c frekvenciához tartozó G_c amplitúdóviszony értéket a kompenzálandó tag görbéjéről.

Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- Határozzuk meg ρ értékét a következő összefüggés alapján:

$$G_c = -20 \lg \rho$$

Válasszuk meg T időállandót úgy, hogy a fázissiettető hatás jóval ω_c alatt érvényesüljön:

$$\frac{1}{\rho T} = 0.1 \omega_c$$

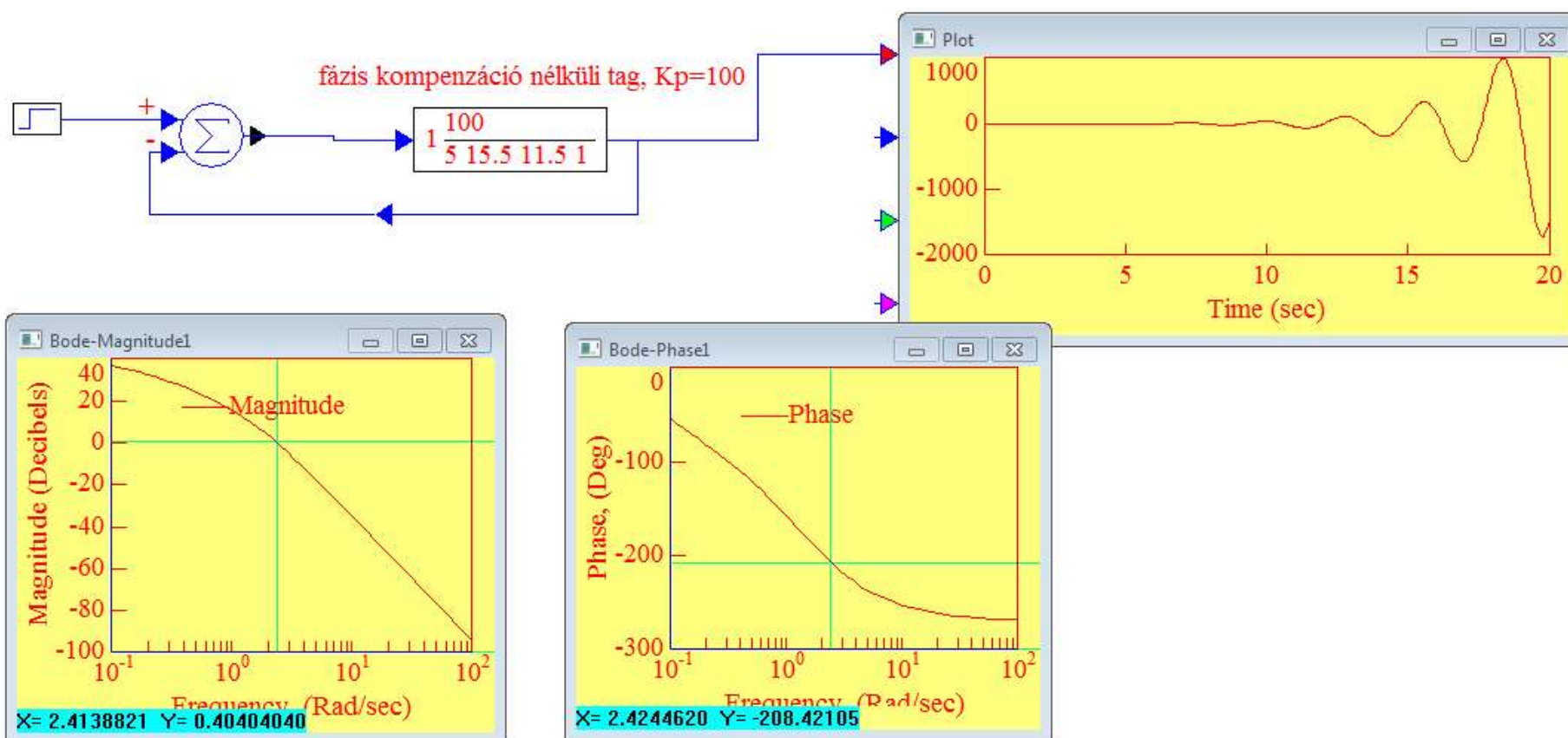
A kompenzált rendszer által a vágási körfrekvencián okozott fáziskésés kb. 5° , ezt adtuk hozzá az előző lépésben tartalékként.

Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- Határozzuk a fáziskésleltető tag átviteli függvényét, majd vegyük fel a tagcsoport Bode diagramját, és ellenőrizzük a követelmények teljesülését.

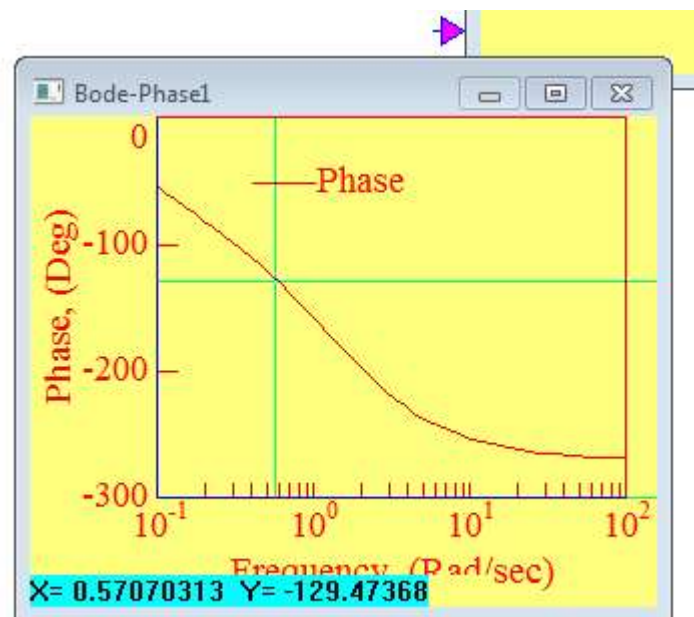
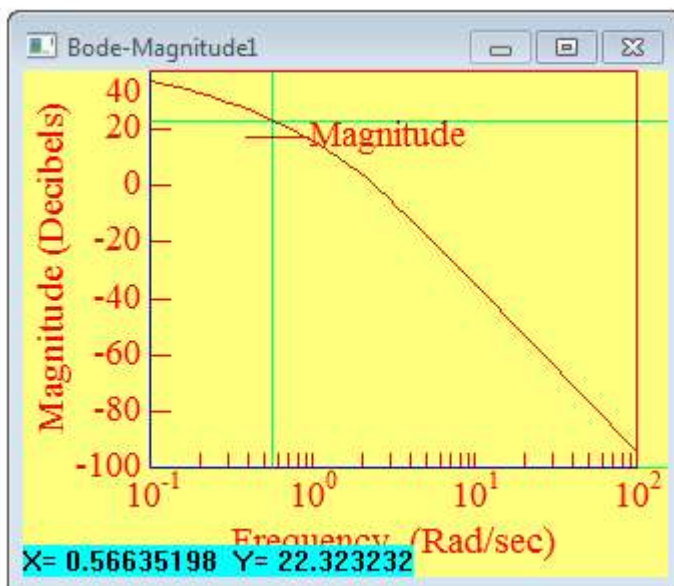
Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- Példa



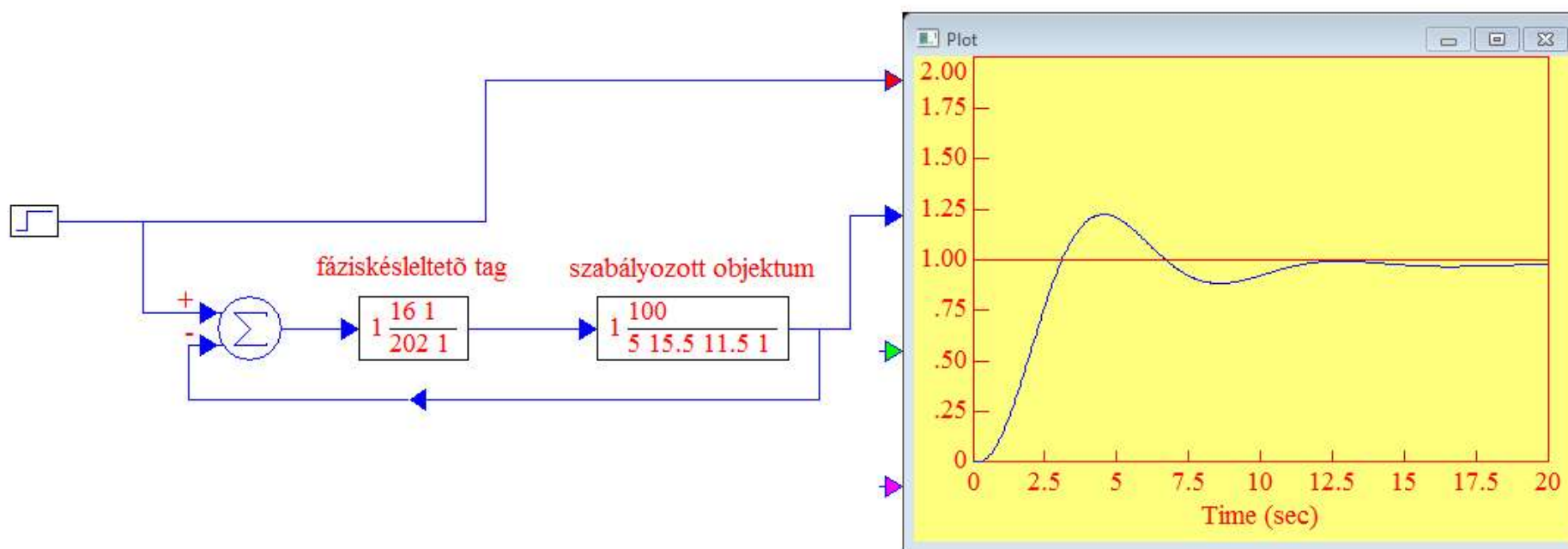
Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- ω_m meghatározása



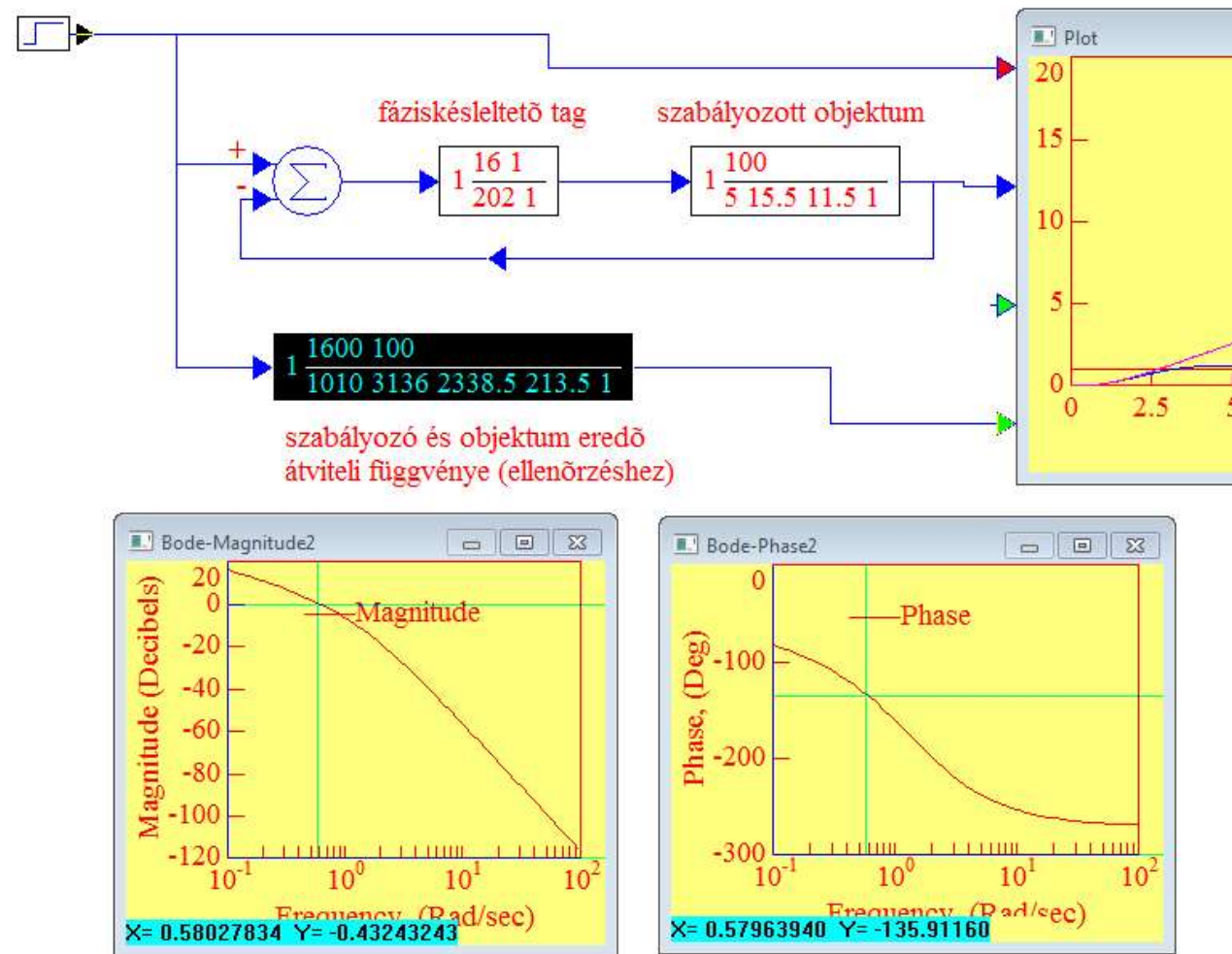
Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- eredmény



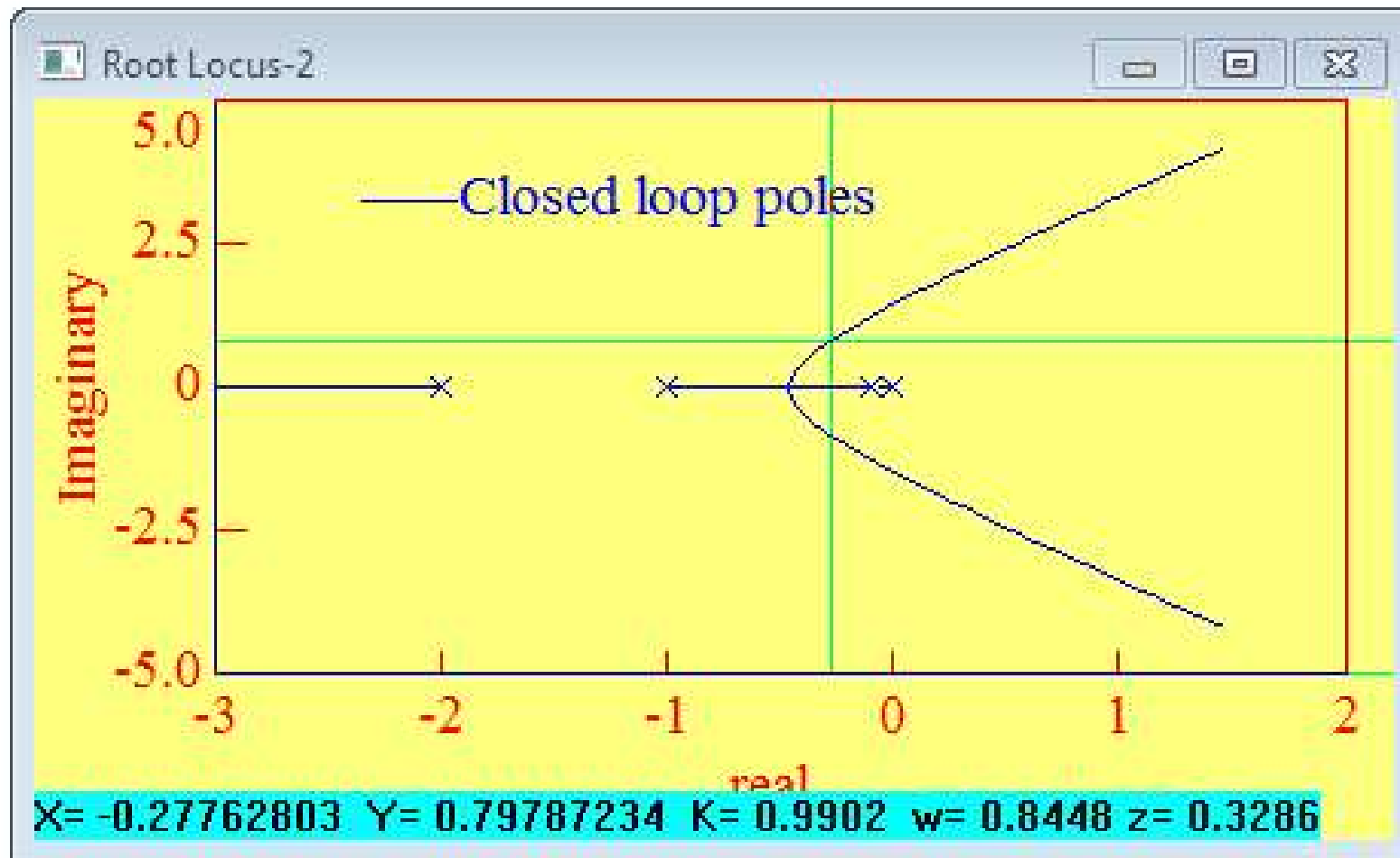
Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- ellenőrzés



Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- gyökhelygörbe

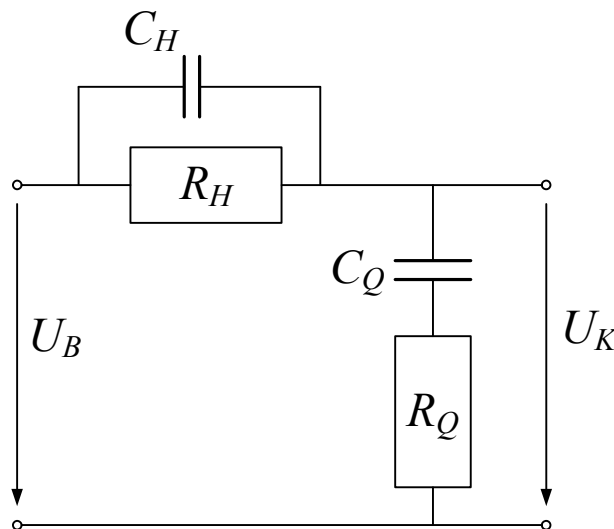


Kompenzálás fáziskésleltető taggal

- A fáziskésleltető tag
 - javítja a relatív stabilitást
 - csökkenti a túllendülés mértékét,
 - de növeli a felfutási időt,
 - és csökkenti a sávszélességet: kevésbé lesz érzékeny a rendszer a nagy frekvenciás zajokra

Reális PID-tag – Fáziskésleltető-siettető tag

- Fáziskésleltető-siettető (FKS) kapcsolás megvalósítása elektronikai elemekkel:



Reális PID-tag – Fáziskésleltető-siettető tag

- átviteli függvény

$$G_{FKS}(s) = \frac{U_K(s)}{U_B(s)} = \frac{(1 + T_Q s)(1 + T_H s)}{T_Q T_H s^2 + (T_Q + T_{HQ} + T_H)s + 1}$$

- ahol $T_H = R_H C_H$ $T_Q = R_Q C_Q$ $T_{HQ} = R_H C_Q$

- bevezetve a következő időállandókat:

$$\begin{aligned} T_{SA} T_{SF} &= T_Q T_H & T_{KA} T_{KF} &= T_Q T_H \\ T_{SA} + T_{SF} &= T_Q + T_H & T_{KA} + T_{KF} &= T_Q + T_{HQ} + T_H \end{aligned}$$

Reális PID-tag – Fáziskésleltető-siettető tag

- így az FKS-tag átviteli függvénye

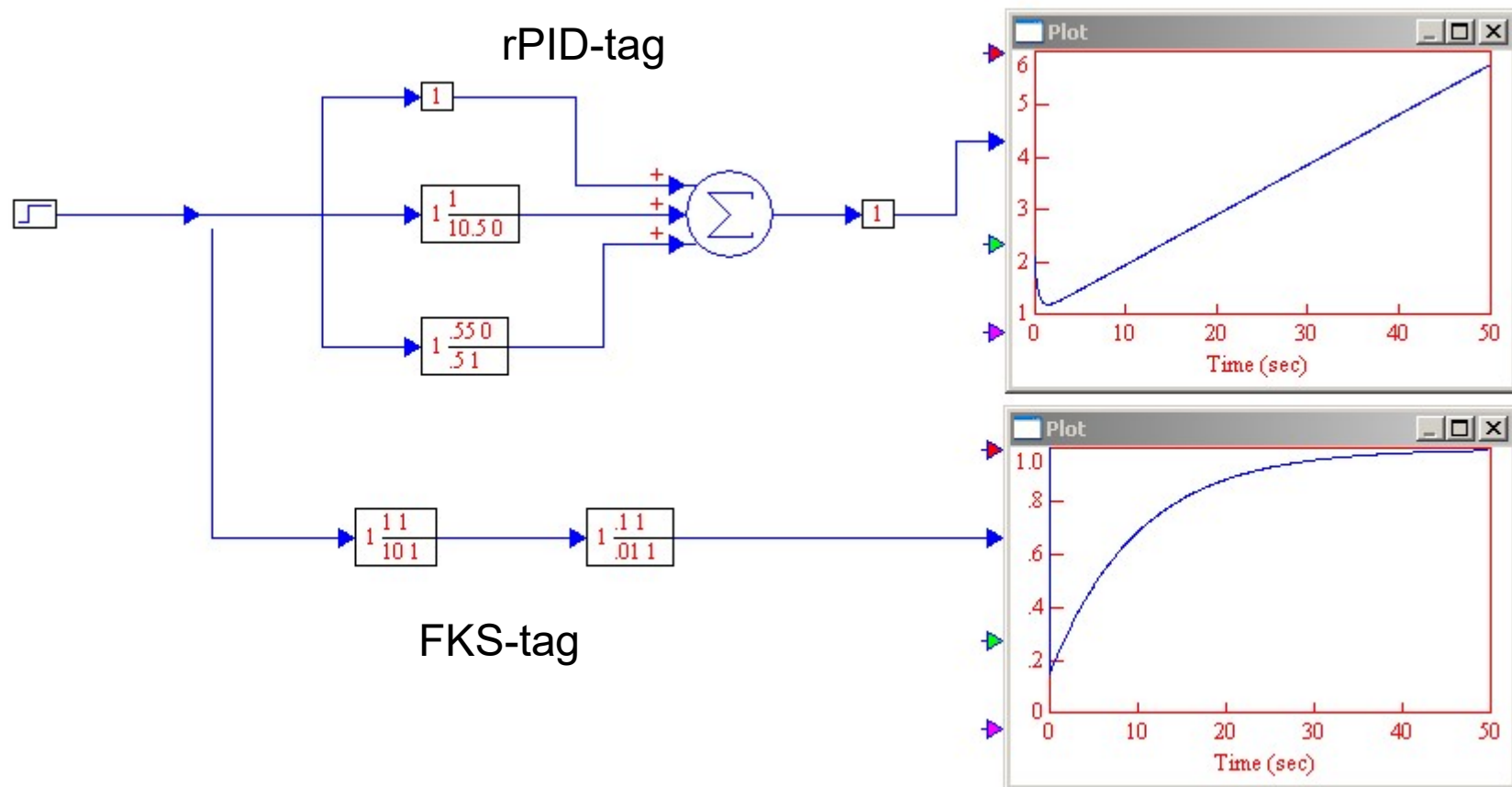
$$G_{FKS}(s) = \frac{(T_{SA}s + 1)(T_{SF}s + 1)}{(T_{KA}s + 1)(T_{KF}s + 1)} = \frac{(\rho_1 T_1 s + 1)(\rho_2 T_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

ahol

- T_{SA} és T_{KA} az alsó törési körfrekvenciához tartozó siettetési és késleltetési időállandó
- T_{SF} és T_{KF} a felső törési körfrekvenciához tartozó siettetési és késleltetési időállandó
- $T_{KF} < T_{SF} < T_{SA} < T_{KA}$
- $T_{SA} T_{SF} = T_{KA} T_{KF}$

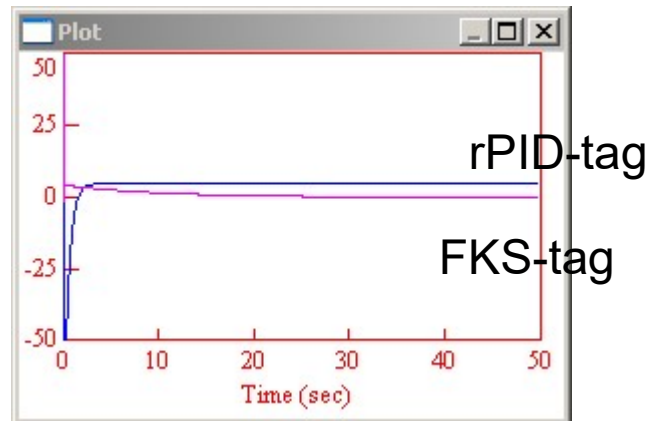
Reális PID-tag – Fáziskésleltető-siettető tag

- átmeneti függvény

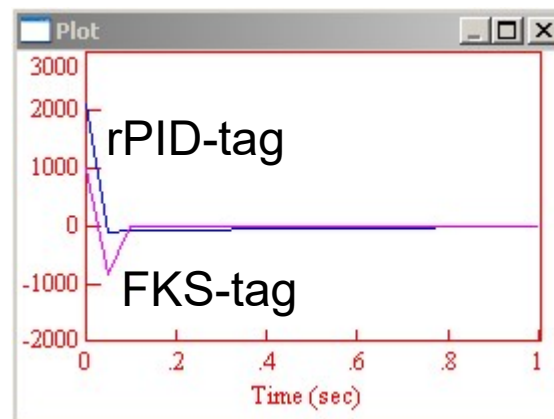


Reális PID-tag – Fáziskésleltető-siettető tag

- súlyfüggvény
 - végállapotok

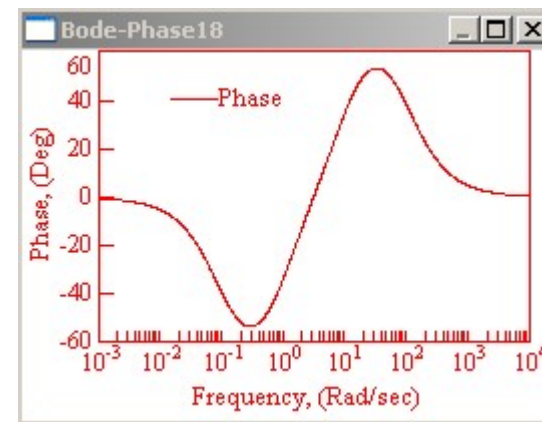
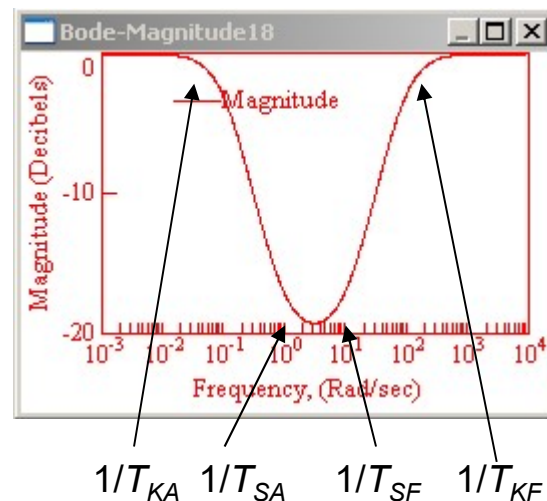
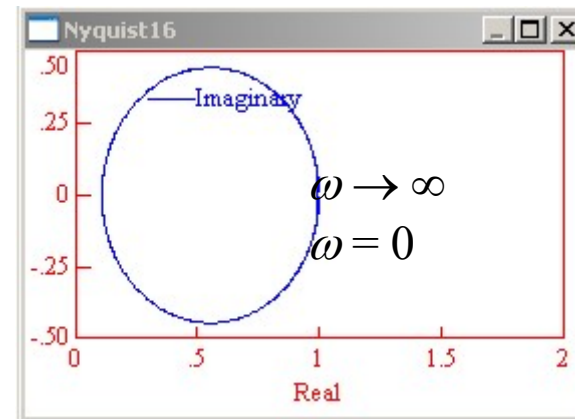


- indulási időtartomány



Reális PID-tag – Fáziskésleltető-siettető tag

- frekvenciatartomány
 - Nyquist-diagram
 - Bode-diagram

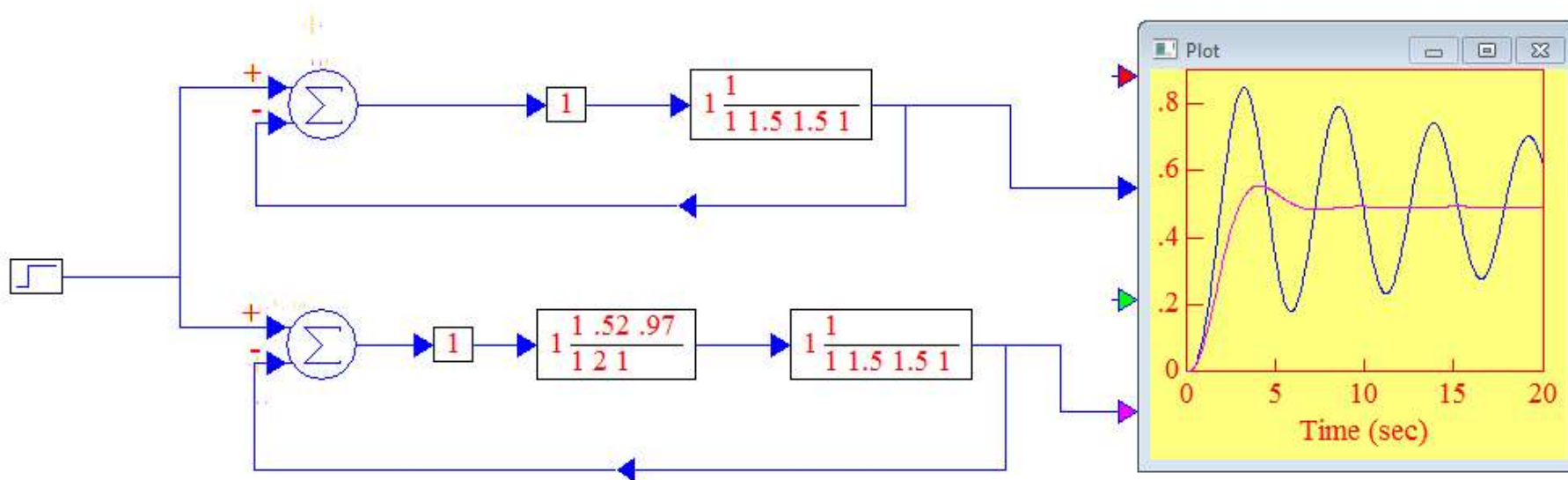


Póluskompenzációs szabályozás

- ha a domináns komplex gyökpár közel van a képzetes tengelyhez az jelentős lengéseket okoz a tranziensben, és a fáziskompenzációs módszerekkel elérhető javulás is korlátozott mértékű
- ilyenkor a póluskompenzáció segíthet
- cél, hogy a kompenzáló tag zérusai kiegyenlítsék a kedvezőtlen pólusokat, és kedvezőbb helyzetű pólusokat adjanak a rendszerhez

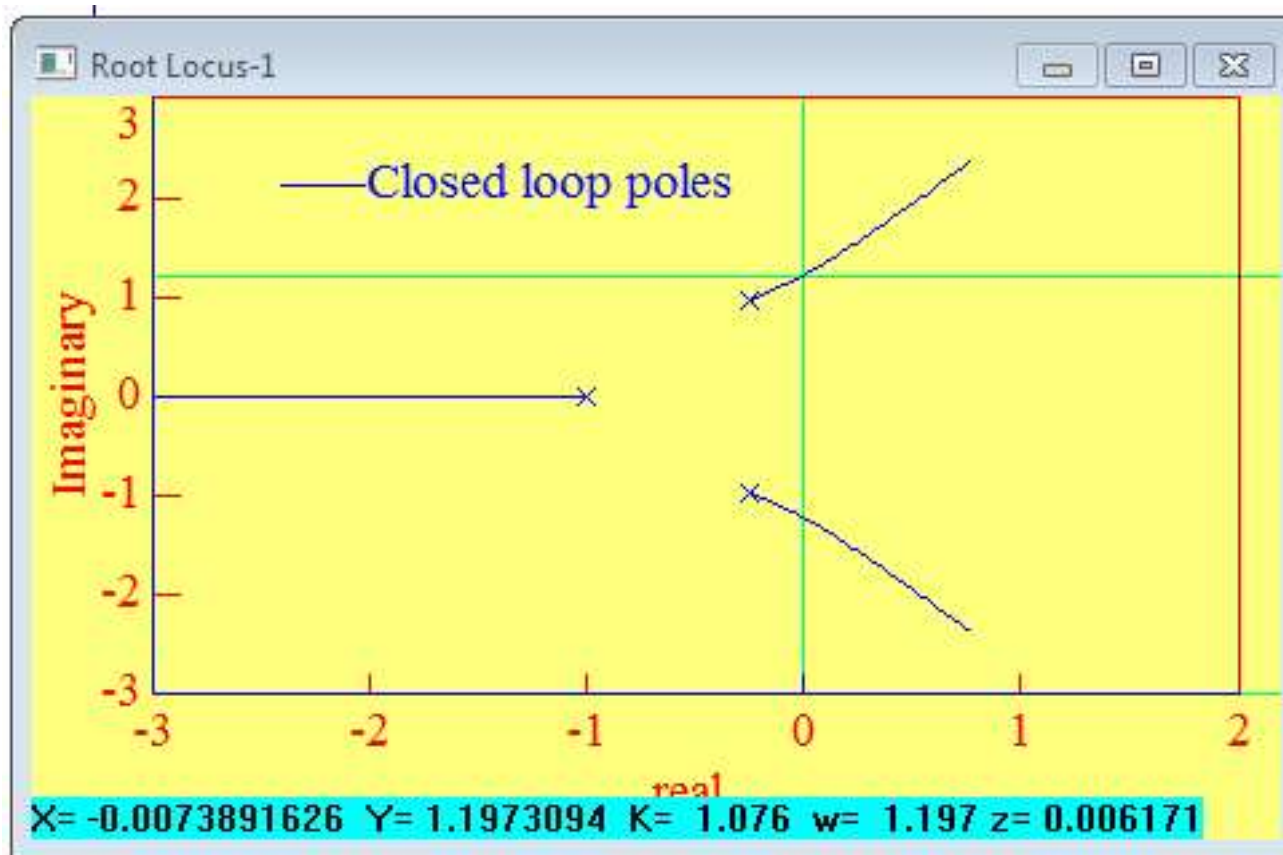
Póluskompenzációs szabályozás

- Példa



Póluskompenzációs szabályozás

- eredeti pólusok



Póluskompenzációs szabályozás

- kompenzáció utáni pólusok

