

# Automatika

Klasszikus szabályozás elmélet

VII.

Kompenzálás az eredő szakasz  
körfrekvencia függvénye alapján



Óbudai Egyetem

Dr. Neszveda József

$$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

# A Bode diagram elemzése

A Bode diagram népszerű, mert papír – ceruza módszerrel is elfogadható pontossággal és munkaráfordítással megvalósítható a kompenzáló tag méretezése.

Méréssel felvett értékekkel vagy mért értékekből identifikált átviteli függvény esetén is alkalmazható.

- Meg kell állapítani, hogy az eredő szakasz arányos vagy integráló jellegű.

Ez a fázismenetből lehetséges.

- Meg kell állapítani, hogy mennyire egymáshoz közeleiek az eredő szakasz időállandói.

Ez az amplitúdó menetből lehetséges.

# Önbeálló eredő szakasz PI kompenzálás

**Európai struktúra**

# Önbeálló eredő szakasz

**A fázismenetből lehet meghatározni az önbeálló jelleget .**

**Kellően alacsony körfrekvencián közel nulla a fázistolás**

**Önbeálló jelleg esetén a PI a leggyakrabban alkalmazott kompenzáló struktúra, sok és/vagy egymáshoz közeli időállandó esetén PIDT1.**

**A zárt szabályozási kör túllendülésre való hajlama az eredő szakasz időállandóink számától valamint egymástól való távolságától, és ezzel összefüggésben a  $G_0(s)$  felnyitott hurok átviteli függvény fázistartalékától függ.**

# A PI kompenzáló tag átviteli függvénye

$$G_C(s) = G_{PI}(s) = K_C \left\{ 1 + \frac{1}{sT_I} \right\} = K_C \frac{sT_I + 1}{sT_I}$$

Két változó van.

Első lépésben a vizsgálatához legyen  $K_C = 1$ , és  $T_I = 1$  rad/sec.

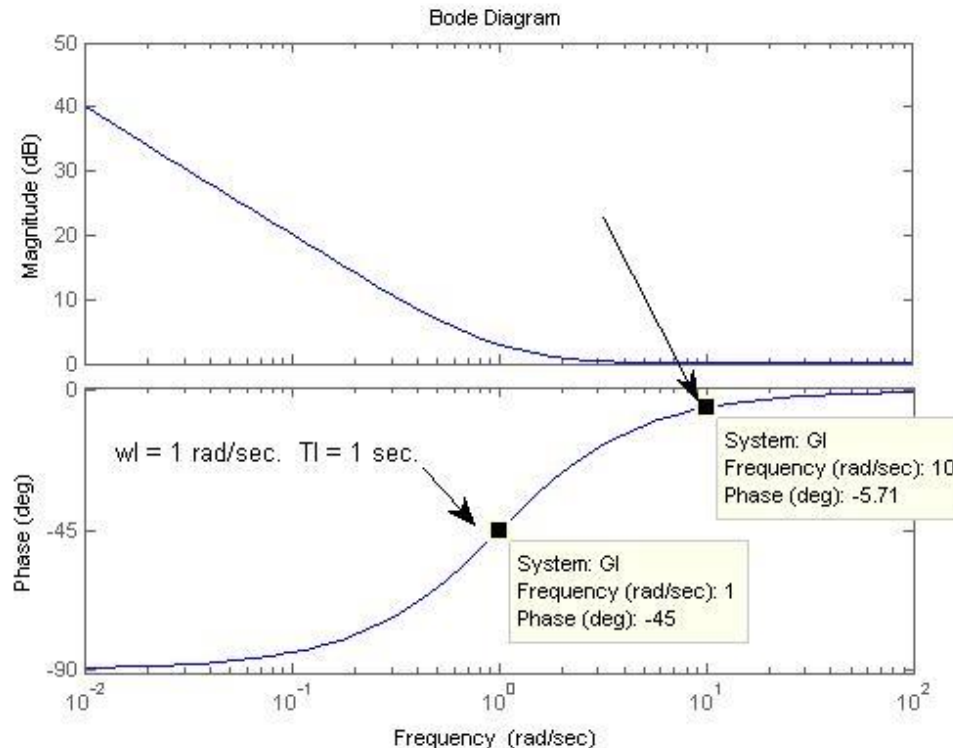
$$G_{PI}(s) = \frac{s+1}{s}$$

A PIDT kompenzálás menete a PDT kompenzáláshoz hasonló!

PIDT kompenzáló tag esetén be kell tartani a  $T_I > 4T_D$  és a  $T_D > 5T$  feltételt.  $T_I$  túl nagy értéke lassítja a szabályozási kört.

# PI arányos, integráló tag

Az amplitúdó átvitel az  $\omega_I$  körfrekvencián közel 1.4, és a magasabb körfrekvenciákon tart az egységnyihez. A  $K_C$  erősítés méretezésével állítjuk be a felnyitott hurok amplitúdó átvitelét!



$$\begin{aligned}\omega &= 2\omega_I, \varphi_{PI} = -26.5^\circ, \\ \omega &= 5\omega_I, \varphi_{PI} = -11.3^\circ, \\ \omega &= 10\omega_I, \varphi_{PI} = -5.7^\circ.\end{aligned}$$

A  $2\omega_I$  és  $5\omega_I$  közötti értéket szokás választani!

# PI kompenzálás elve az eredő szakasz körfrekvencia függvényéhez illesztés esetén

**Válasszunk egy megfelelőnek tartott fázistartaléket!**

Ököl szabály. Több egymáshoz közeli időállandó esetén  $90^\circ > \text{pm}^\circ > 75^\circ$ ;

Domináns időállandóval rendelkező szakasz esetén  $75^\circ > \text{pm}^\circ > 60^\circ$ .

pm: phase margin, fázistartalék

**Az eredő szakasz fázismenetén meg kell keresni a választott fázistartalékhoz tartozó leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvenciát.**

Ez a  $\text{ps}^\circ = \text{pm}^\circ - \varphi_{\text{PI}}^\circ - 180^\circ$  fázistoláshoz tartozó körfrekvencia.

ps: phase shift, fázistolás

**A  $K_C$  értéket úgy kell megválasztani, hogy a leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvenciánál legyen egységnyi az amplitúdó átvitel.**

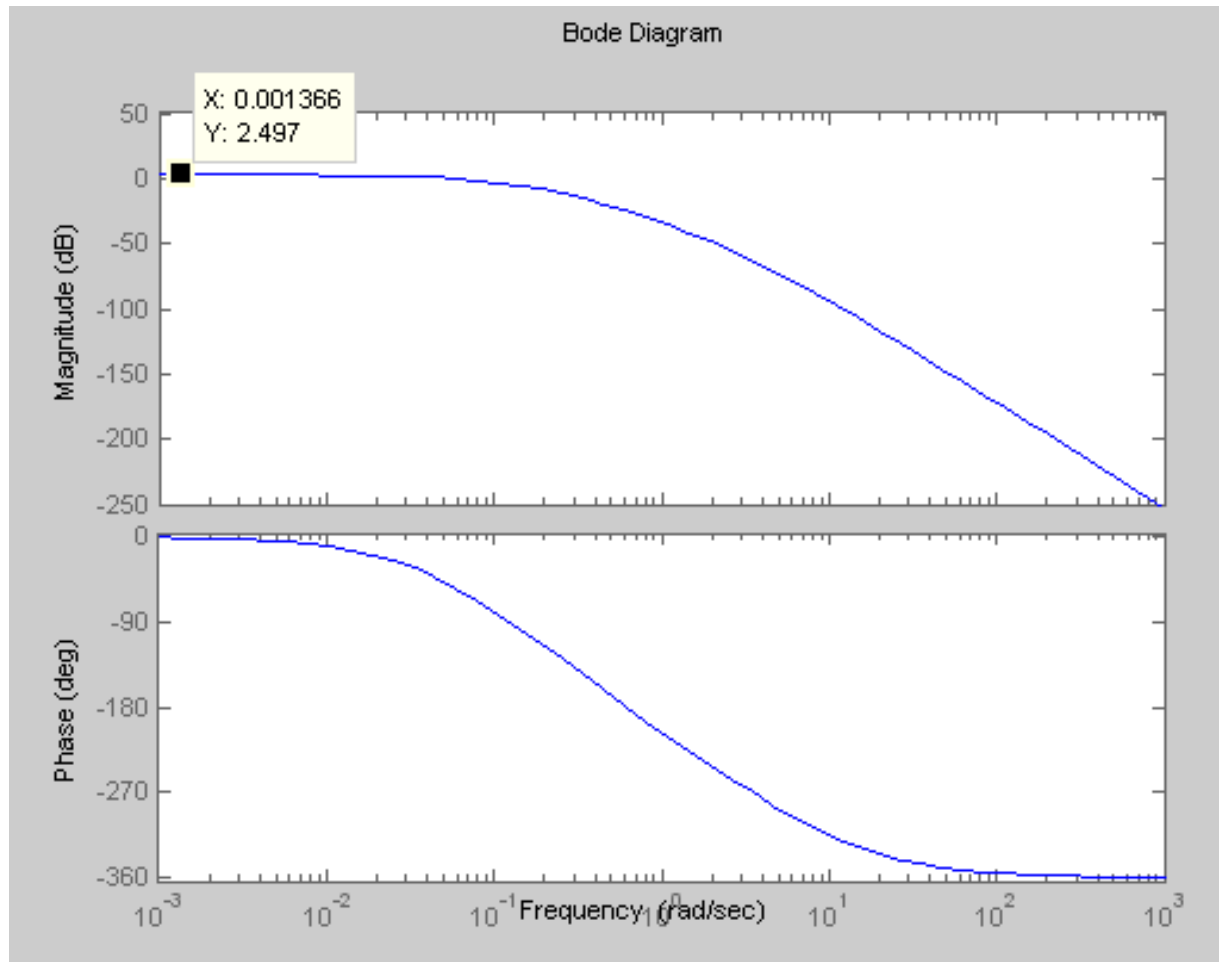
A leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvencián a  $K_C = 1$  értékkel definiált  $g_0$  hurokátviteli függvény amplitúdó átvitelének reciprok értéke lesz a tényleges  $K_C$ .

# PI kompenzálás menete

- Ábrázolni kell a Bode diagramját.  
Választani kell  $\varphi_{PI}^\circ$  értéket és így  $\omega=k\omega_I$  arányt!  
Az eredő szakasz fázismenetén meg kell keresni a  
 $ps^\circ = pm^\circ - \varphi_{PI}^\circ - 180^\circ$  fázistoláshoz tartozó körfrekvenciát.
- Ennek a körfrekvenciának a k-ad része az  $\omega_I$ , és az  $\omega_I$  reciprok értéke a  $T_I$ .
- Ábrázolni kell a Bode diagramját.
- Ezen a  $g_0$  átviteli függvényen kell megkeresni a pm fázis-tartalékhoz tartozó körfrekvenciánál az amplitúdó erősítést  
Ennek az erősítésnek a reciprok értéke legyen a  $K_C$  erősítés



# A mért $G_E(j\omega)$ Bode diagramja



# A mért értékekből identifikált LTI modell

A mért átviteli függvényből látszik az önbeálló jelleg, és hogy négy időállandója van.

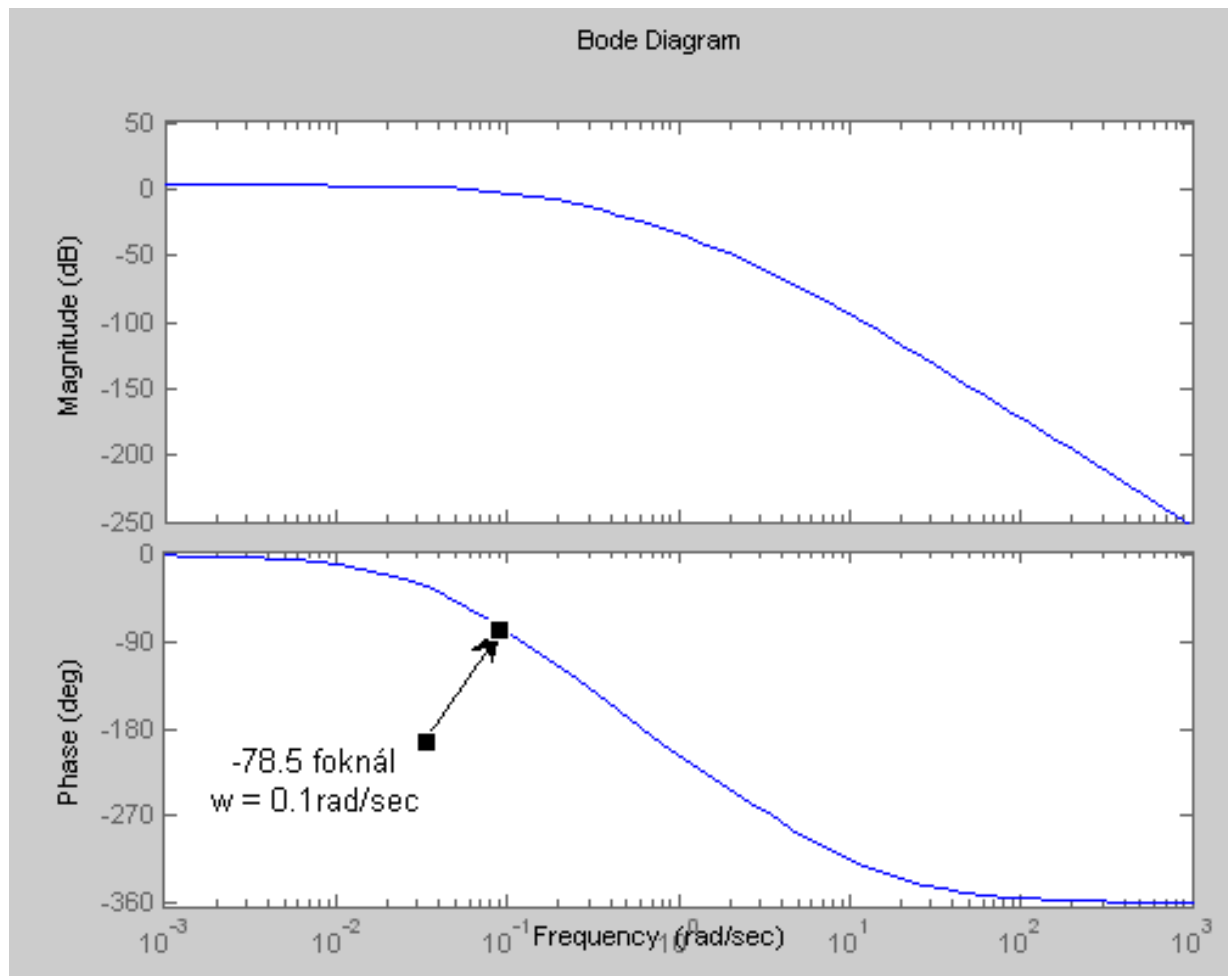
Legyen a  $p_m = 75^\circ$ , miután az amplitúdó átvitel határ eset. Viszonylag nehéz megkülönböztetni a törésponti körfrekvenciákat, de nem lehetetlen!

Legyen a keresendő  $\omega = 2\omega_1$  és így a  $\phi_{p_1}^\circ = -26.5^\circ$ !

A keresendő fázistolás értéke:

$$p_s^\circ \approx 75^\circ + 26.5^\circ - 180^\circ \approx -78.5^\circ$$

# A mért $G_E(j\omega)$ Bode diagramja



Az  $\omega_I = 0.5 \cdot \omega = 0.05$  rad/sec, és így  $T_I = 20$  sec.

# A $g_0$ meghatározása

A  $g_{PI}$  a PI kompenzáló tag átviteli függvénye  $K_C = 1$  esetén:

$$g_{PI}(s) = \frac{20s + 1}{20s}$$

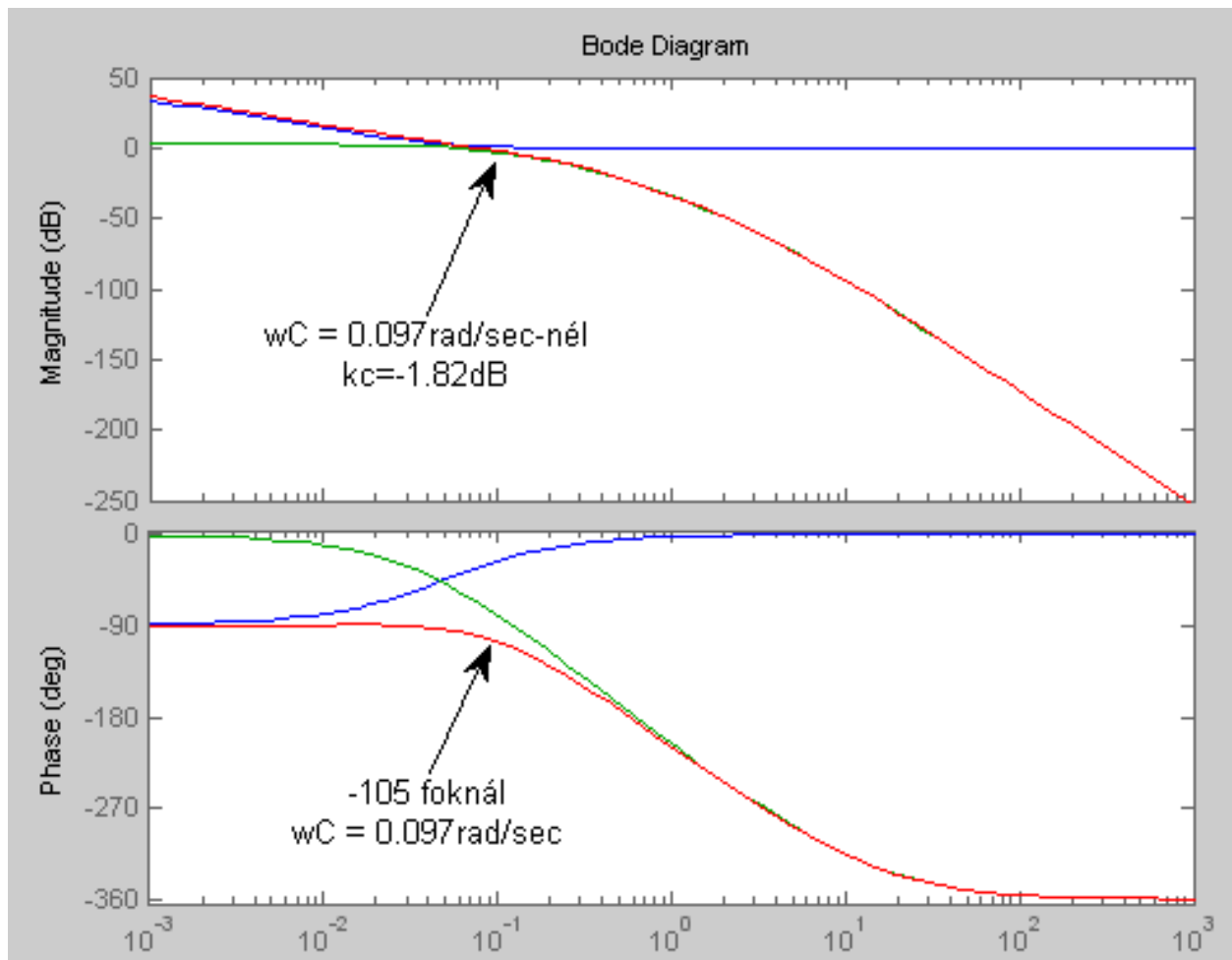
Összeszerkesztve a mért értéket a  $g_{PI}$  kompenzáló tag fenti értékének megfelelő diagrammal kapjuk a  $g_0$  hurokátviteli függvény Bode diagramját. (Az ábrán piros színnel)

Az összeszerkesztett ábrán először a  $\text{pm}=75^\circ$ -hoz tartozó körfrekvenciát kell megkeresni.

Az amplitúdó meneten az ehhez a körfrekvenciához tartozó  $k_C$  erősítést kell meghatározni.

Normál számértékeken ennek a reciprok értéke lesz a PI kompenzáló tag  $K_C$  erősítés értéke.

# A mért $G_E(j\omega)$ Bode diagramja



A leendő  $\omega_C = 0.097$  rad/sec. Az amplitúdó meneten  $k_C = -1.82$  dB.

# A $K_C$ meghatározása és ellenőrzés

Decibelben az előjelváltás a reciprok értéket adja!

Az átszámítás képlete:

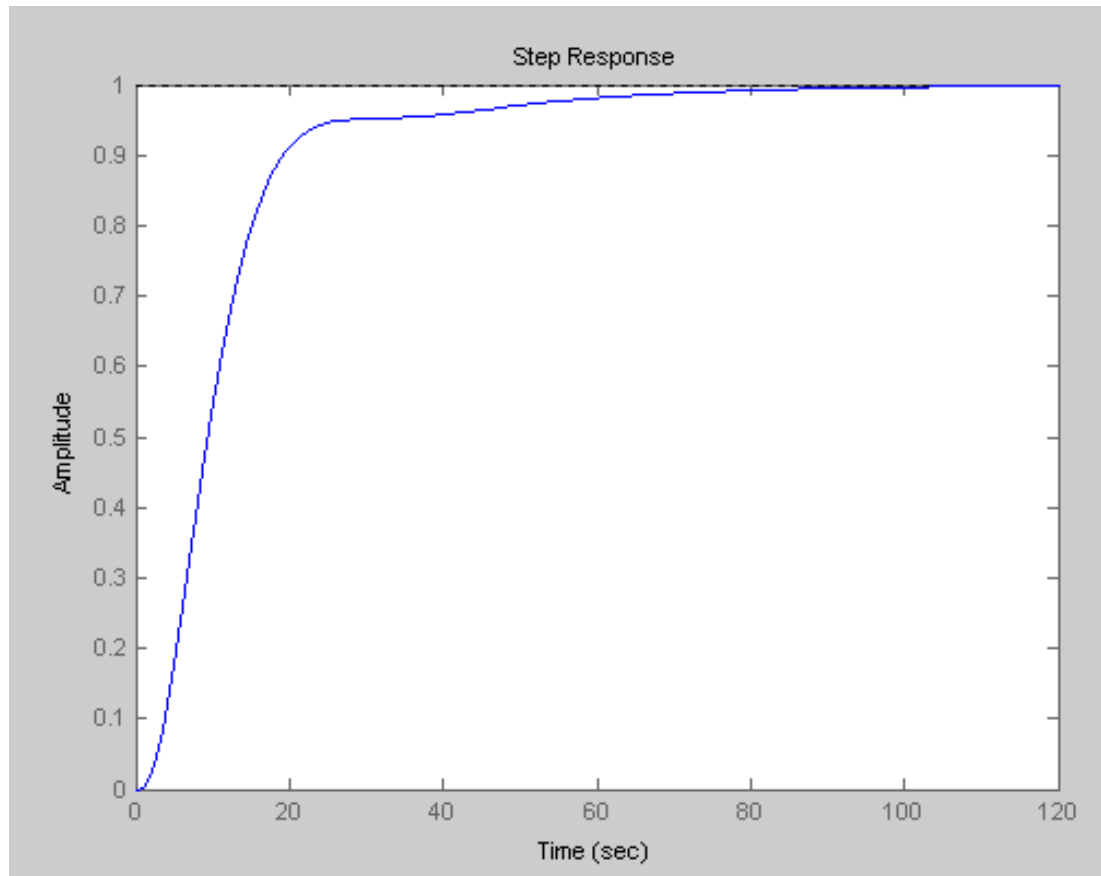
$$K_C = 10^{\frac{-k_C}{20}} = 10^{\frac{1.82}{20}} = 1.23$$

A PI kompenzáló tag átviteli függvénye:

$$G_{PI}(s) = 1.23 \cdot \frac{20s + 1}{20s}$$

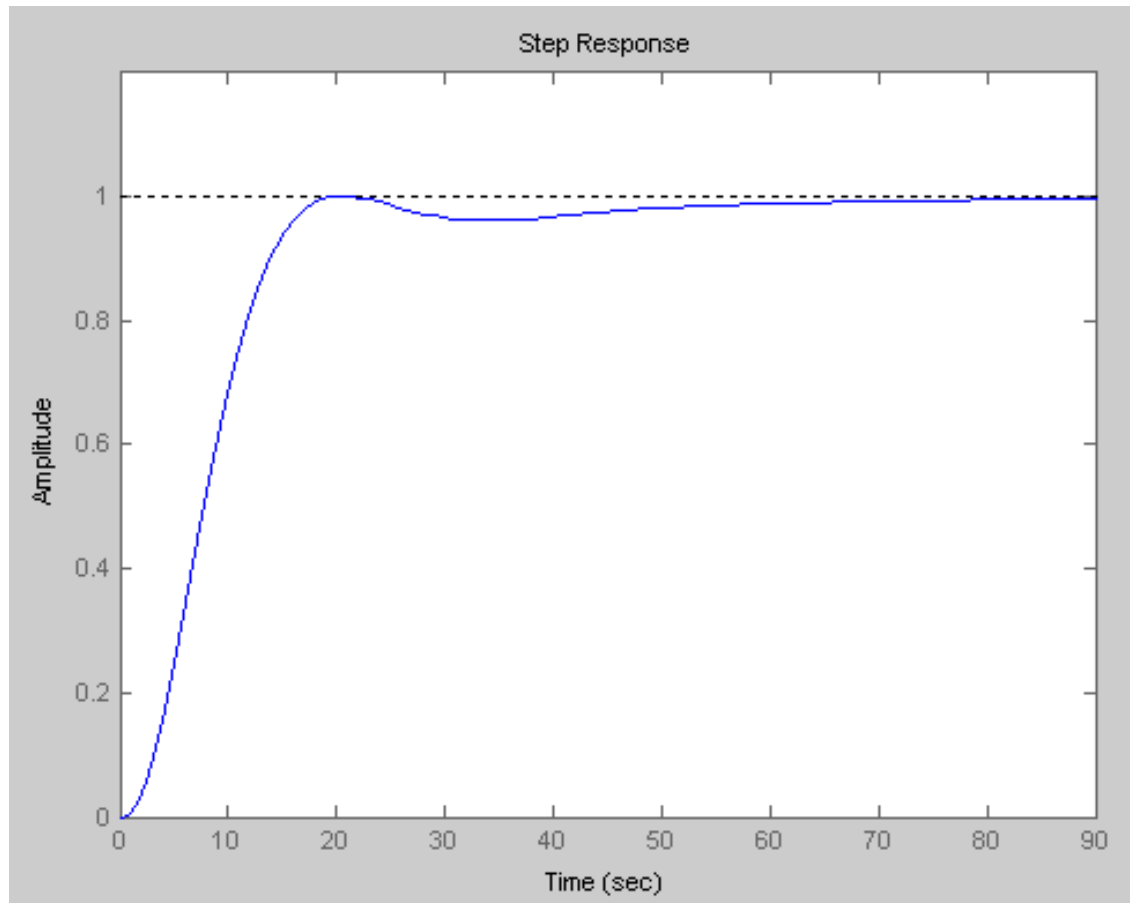
Ezzel a PI kompenzáló taggal megtervezve, majd a zárt szabályozási kört ellenőrizve kapjuk a következő ábrát.

# A szabályozási kör átmeneti függvénye



Óvatos volt a  $p_m$  megválasztása. A  $K_C$  értéke növelhető vagy  $T_I$  érték csökkenthető! Lehet, hogy a PIDT most jobb lenne!

# A szabályozási kör átmeneti függvénye

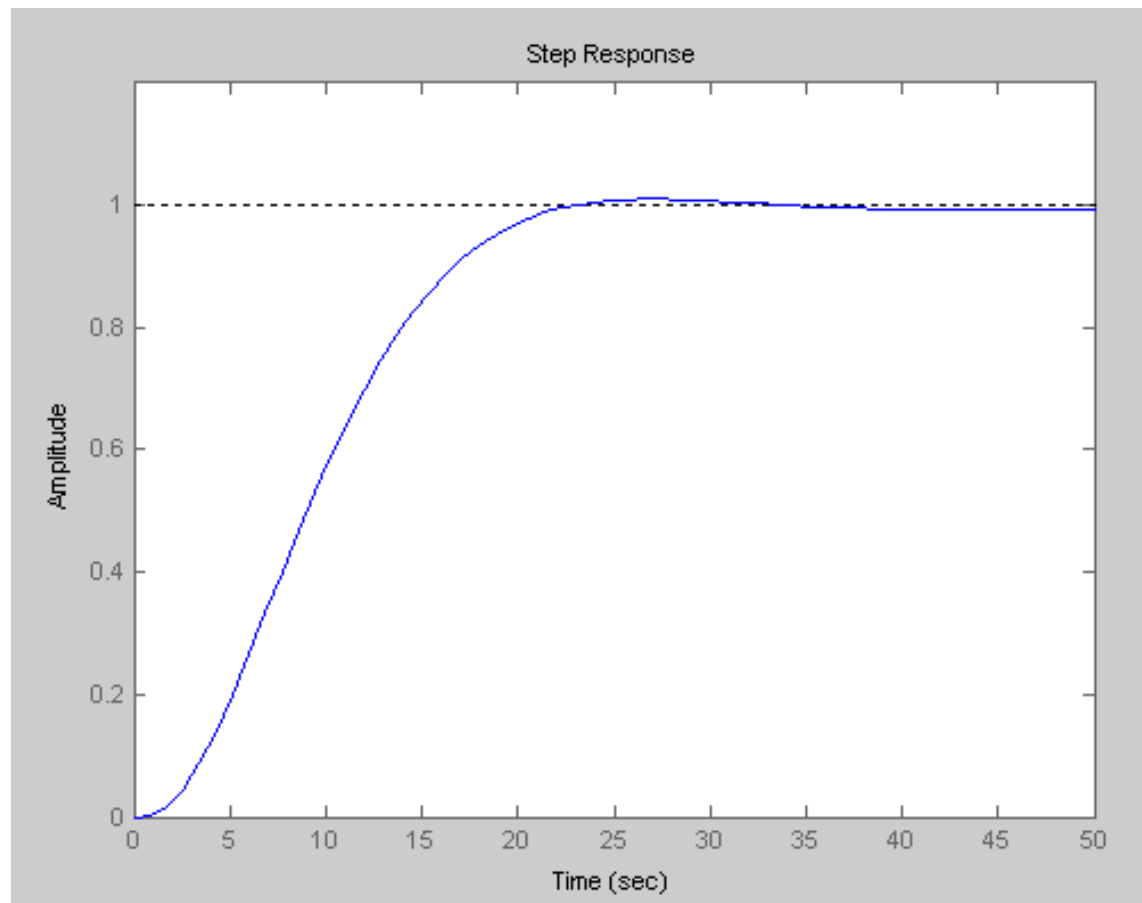


A  $K_C=1.6$  értéknél láthatóan gyorsabb, de  $T_I$  még nagy.

A  $K_C$ -t visszaállítva és  $T_I$ -t csökkentve:



# A szabályozási kör átmeneti függvénye



A  $K_C=1.23$  és a  $T_I=15\text{sec}$ . Gyorsabb a tolerancia sávon belüli túllendüléssel.

# Integráló eredő szakasz PDT1 kompenzálás

**Európai struktúra**

# Integráló eredő szakasz

**A fázismenetből lehet meghatározni az integráló jelleget .**

Kellően alacsony körfrekvencián közel  $-90^\circ$  a fázistolás.

**Integráló jelleg esetén a leggyakrabban alkalmazott kompenzáló struktúra PDT1, esetleg P.**

$$G_C(s) = G_{PDT}(s) = K_C \left\{ 1 + \frac{sT_D}{sT + 1} \right\} = K_C \frac{s(T_D + T) + 1}{sT + 1}$$

$$G_{PDT}(s) = K_C \frac{sT(A_D + 1) + 1}{sT + 1}$$

# A PDT kompenzáló tag átviteli függvénye

$$G_{\text{PDT}}(s) = K_C \frac{sT(A_D + 1) + 1}{sT + 1}$$

Három változó van. Ebből  $A_D$  független az eredő szakasztól.  
Első lépésben legyen  $K_C = 1$ ,  $A_D = 9$ , és  $T = 0.1\text{sec}$ .

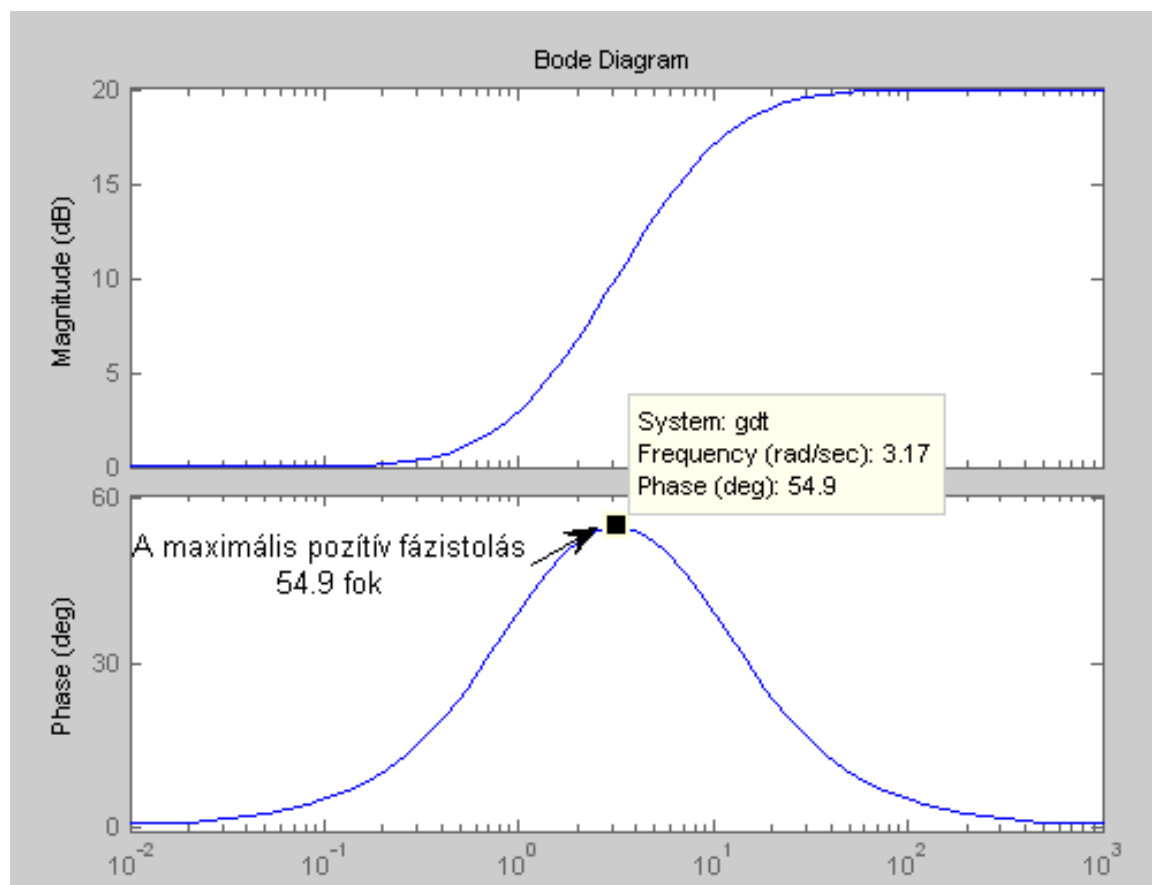
$$G_{\text{PDT}}(s) = \frac{s + 1}{0.1s + 1}$$

PDT1 kompenzáló tag esetén be kell tartani az

$$20 > A_D > 5 \text{ feltételt!}$$

# PDT1 arányos, differenciáló tag

A  $\varphi_{\max}$  fázistolás az  $A_D$  differenciálási erősítéstől függ.



Jelen példában:

$A_D = 9$ , és így

$\varphi_{\max} = 54.9^\circ$ .

$A_D=5$

$\varphi_{\max}=45.6^\circ$

$A_D=8$

$\varphi_{\max}=53.1^\circ$

$A_D=9$

$\varphi_{\max}=54.9^\circ$

$A_D=15$

$\varphi_{\max}=61.9^\circ$

# PDT1 kompenzálás elve az eredő szakasz körfrekvencia függvényéhez illesztés esetén

**Válasszunk egy megfelelőnek tartott fázistartalékot!**

A szabály azonos, mint a PI kompenzálásnál volt.

**Az eredő szakasz fázismenetén meg kell keresni a választott fázistartalékhoz tartozó leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvenciát.**

Ez a  $p_s^\circ = p_m^\circ - \varphi_{PDT}^\circ - 180^\circ$  fázistoláshoz tartozó körfrekvencia.

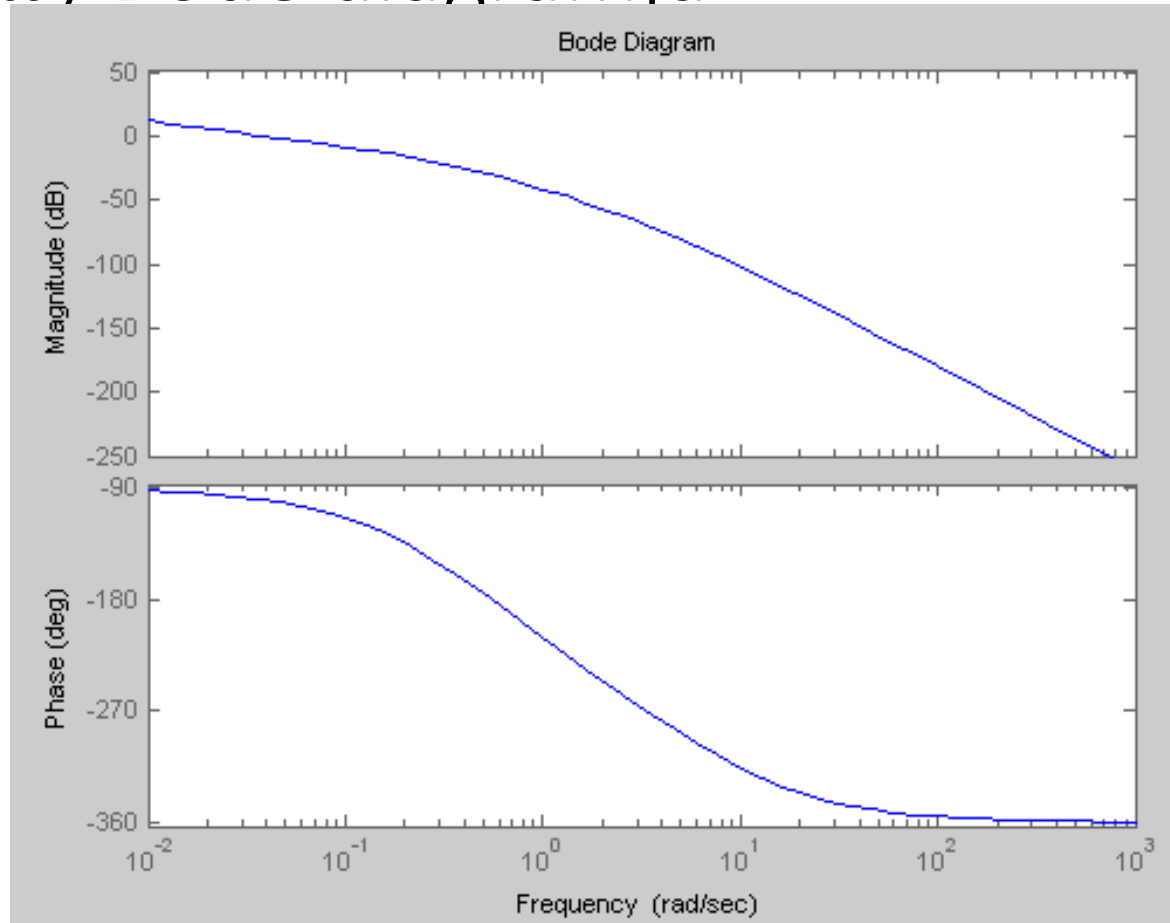
**A  $K_C$  értéket úgy kell megválasztani, hogy a leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvenciánál legyen egységnyi a  $K_0$  hurokerősítés.**

A leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvencián a  $K_C = 1$  értékkel definiált  $g_0$  hurokátviteli függvény amplitúdó átvitelének reciprok értéke lesz a tényleges  $K_C$ .

# PDT1 kompenzálás menete

- A Bode diagramja alapján választjuk a PDT kompenzálást és választani kell az  $A_D$  értéket is.  
Az eredő szakasz fázismenetén meg kell keresni a  $\varphi_{ps} = \varphi_{pm} - \varphi_{\max} - 180$  fázistoláshoz tartozó körfrekvenciát.
- Ha  $A_D = 8$  akkor ennek a körfrekvenciának a háromszorosa az  $\omega_T$ . A reciprok érték a  $T$  és  $T_D = A_D * T$ .
- Ábrázolni kell a Bode diagramját.
- Ezen a  $g_0$  átviteli függvényen kell megkeresni a  $\varphi_{pm}$  fázistartalékhoz tartozó körfrekvenciánál az amplitúdó erősítést. Ennek az erősítésnek a reciprok értéke legyen a  $K_C$  erősítés.

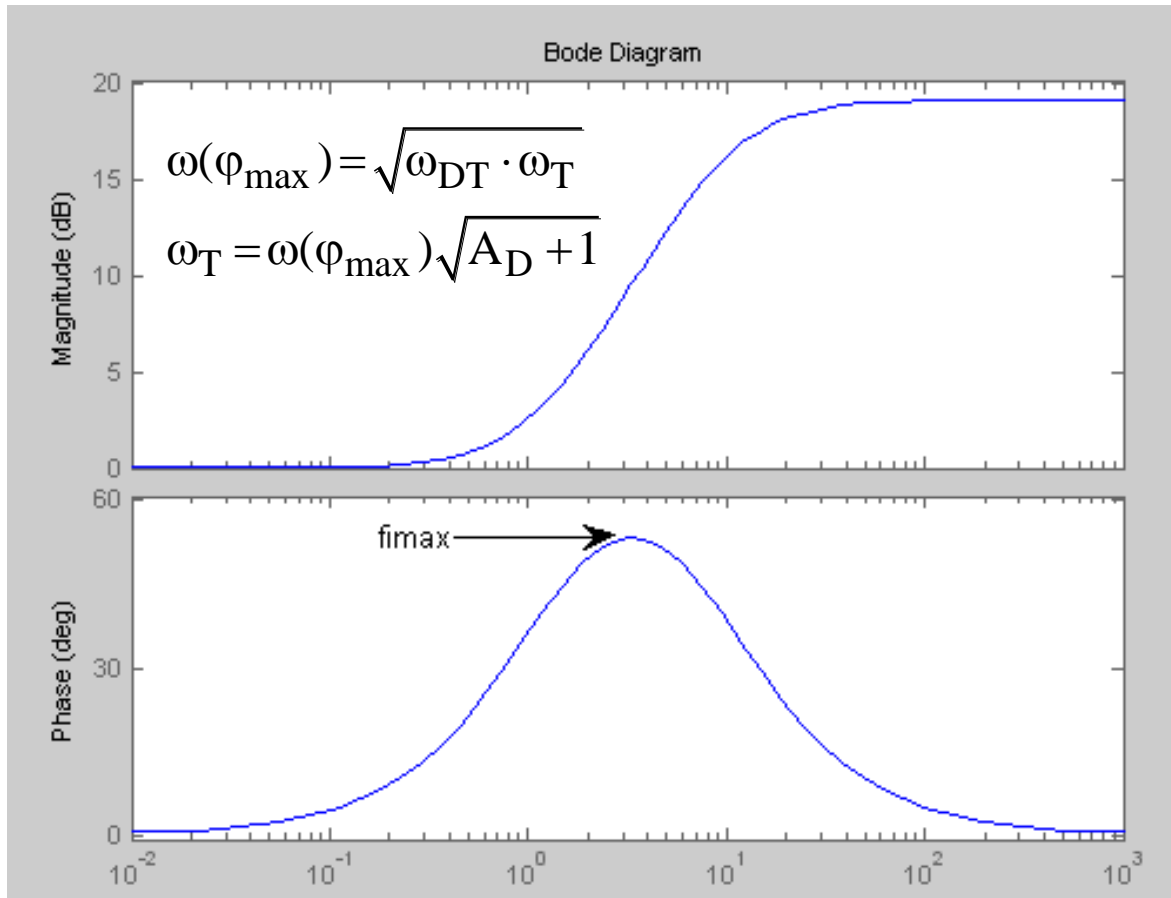
# A $G_E(j\omega)$ Bode diagramja



Legyen PDT kompenzáló tag  $A_D = 8$  értékkel.



# A PDT tag Bode diagramja



$$A_D = 5$$

$$\varphi_{\max} = 45.6^\circ$$

$$A_D = 8$$

$$\varphi_{\max} = 53.1^\circ$$

$$A_D = 9$$

$$\varphi_{\max} = 54.9^\circ$$

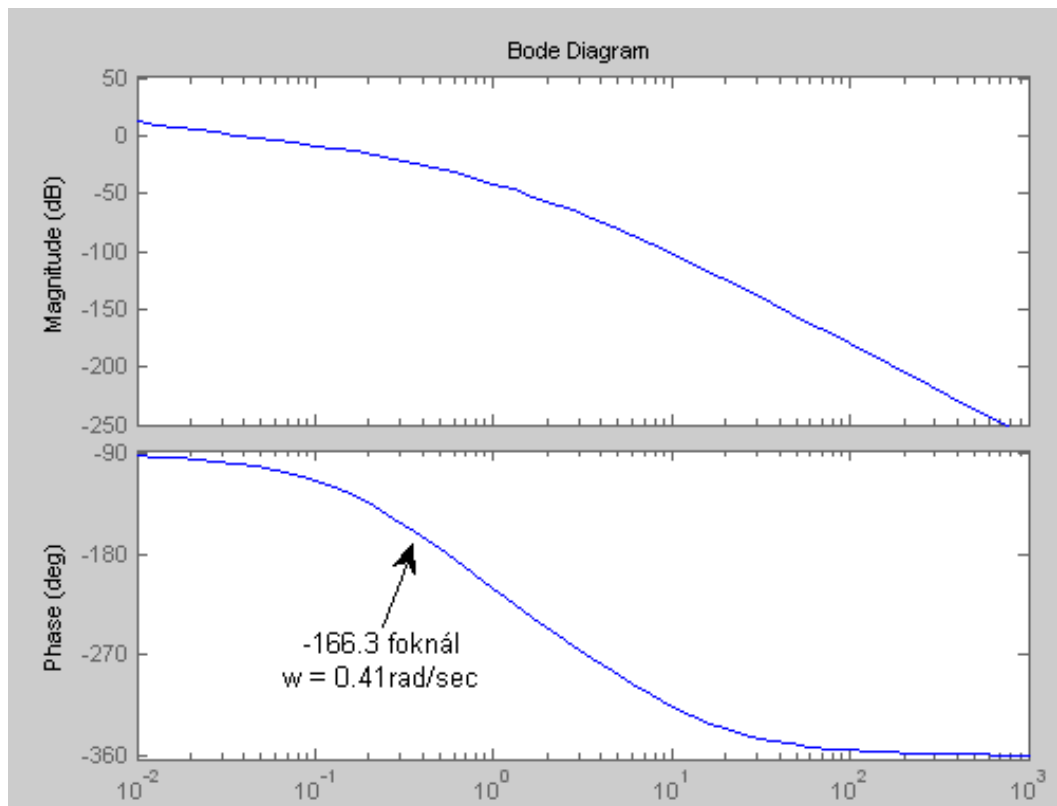
$$A_D = 15$$

$$\varphi_{\max} = 61.9^\circ$$

# A $T$ és a $T_D$ meghatározása

Legyen az  $AD=8$  és a fázistartalék  $65^\circ$ !

$$ps^\circ \approx pm - \varphi_{\max} - 180 \approx ps^\circ \approx 65 - 51.3 - 180 = -166.3^\circ$$



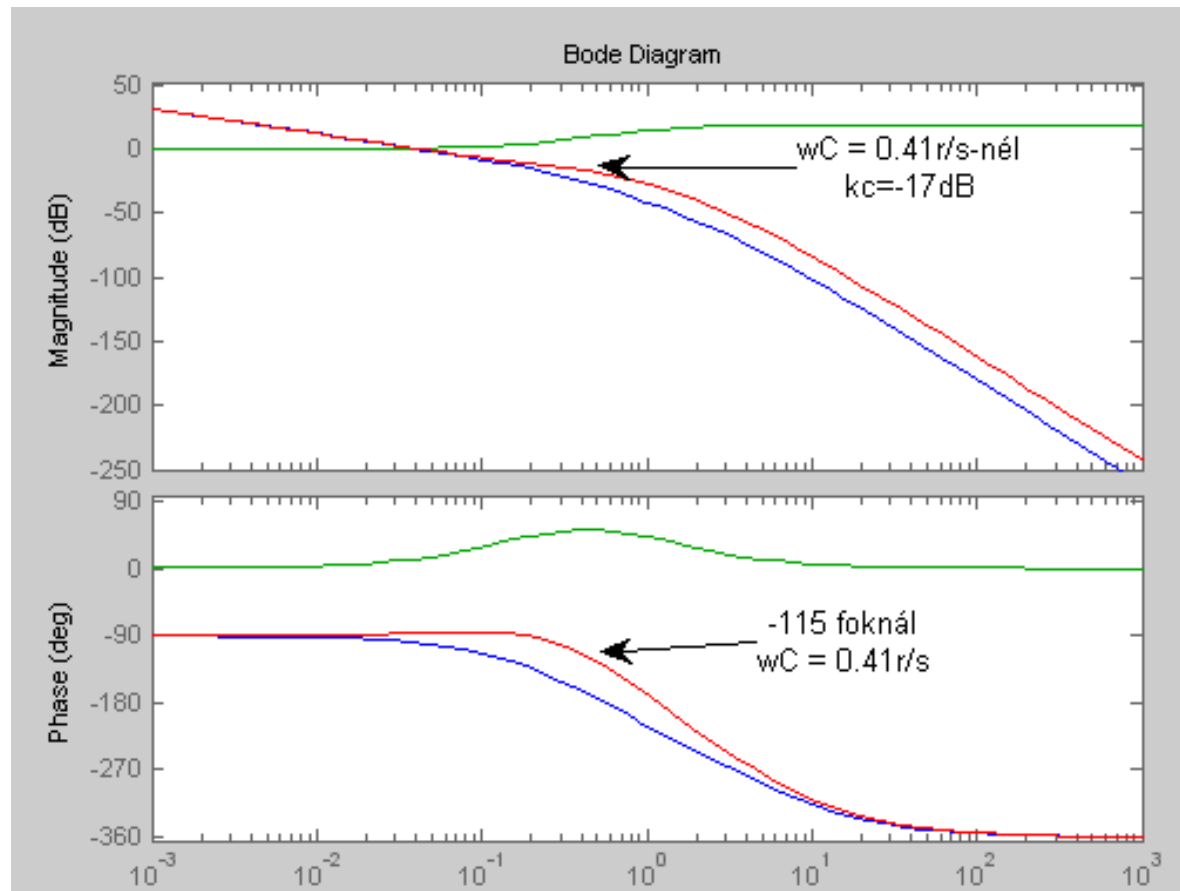
# A PDT kompenzáló tag paraméterei

Az  $\omega(\varphi) = 0.41 \text{ r/s}$ , és  $A_D = 8$ , így  $\omega_T = 3\omega(\varphi) = 1.23 \text{ r/s}$ .  
Ebből  $T = 1/1.23 = 0.813 \text{ sec}$ . és  $T_D = 8 * T = 6.5 \text{ sec}$ .

$$G_{\text{PDT}}(s) = \frac{6.5s + 1}{0.81s + 1}$$

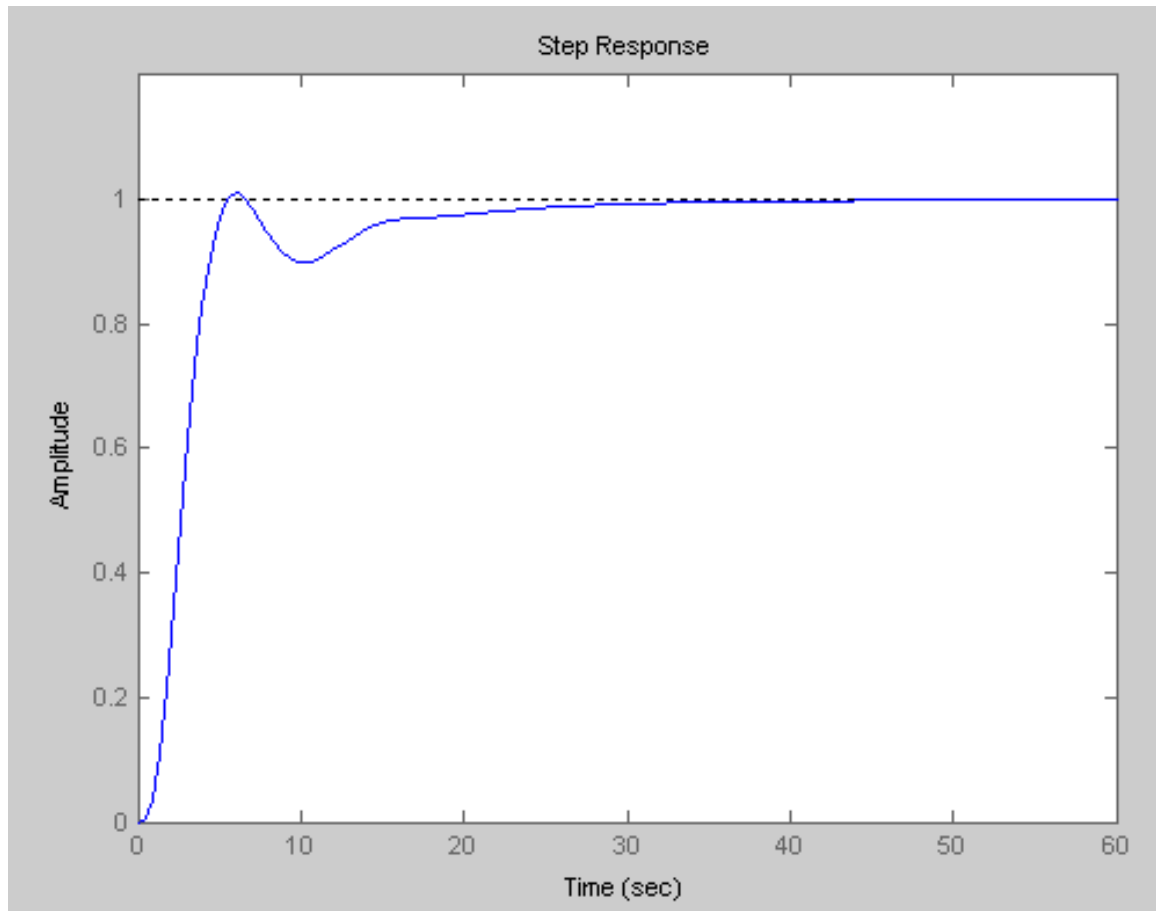
Ezt kell összeszerkeszteni az eredő szakasszal.

# A $K_C$ meghatározása



$K_C = +17$ dB, ami  $KC = 7.1$ .

# A minőségi jellemzők.



Nem egyszerű  
hangolni!  
A felnyitott  
hurok Bode  
diagramján  
látszik, hogy  
 $T_D$  értékét  
célszerű  
csökkenteni!

# PIDT1 kompenzálás elve önbeálló eredő szakasz esetén

**Válasszunk fázistartalékot,  $A_D$  értéket, és  $T_I/T_D$  arányt!**

Ez a kettő meghatároz egy  $\varphi_{PIDT}^\circ$  maximális pozitív fázistolást.

**Az eredő szakasz fázismenetén meg kell keresni a választott fázistartalékhoz tartozó leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvenciát.**

Ez a  $p_s^\circ = p_m^\circ - \varphi_{PIDT}^\circ - 180^\circ$  fázistoláshoz tartozó körfrekvencia.

A PDT kompenzálásnál megismert módon meghatározhatjuk az  $\omega_T$ -t, abból a  $T$ -t, abból  $T_D = A_D * T$ -t, végül  $T_I$  értékét.

**A  $K_C$  értéket úgy kell megválasztani, hogy a leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvenciánál legyen egységnyi a hurokerősítés.**

A leendő  $\omega_C$  vágási körfrekvencián a  $K_C = 1$  értékkel definiált  $g_0$  hurokátviteli függvény amplitúdó átvitelének reciprok értéke lesz a tényleges  $K_C$ .