ROBOTIRÁNYÍTÁS

8. előadás
Empirikus szabályzótervezés, a P és PI szabályzás

Dr. habil. Kovács Levente
egyetemi docens

Dr. Haidegger Tamás
egyetemi adjunktus

EKIK
Egyetemi Kutató és Innovációs Központ

K-MOOC

ÓBUDAI EGYETEM
Bejczy Antal iRobottechnikai Központ

Physiological Controls Group
Élettani Szabályozások Csoport
Óbudai Egyetem

Tartalom

1. Szabályozások

1.1. Empirikus szabályozás

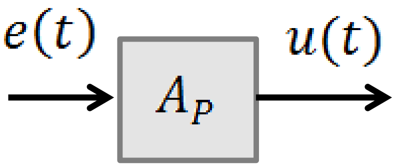
1.2. P szabályozó tulajdonságai

1.3. PI szabályozó tulajdonságai

Empirikus szabályozás

- Manapság az iparban használt szabályozóknak több, mint a fele PID szabályozó
- Korábban
  - ✓ ezen szabályozók többsége analóg volt
  - ✓ azonban ma már ezen szabályozók digitálisak
- Amikor a rendszer matematikai modellje elérhető
  - ✓ a szabályozó *paraméterei expliciten meghatározhatóak*
- Amikor a rendszer matematikai modellje nem érhető el
  - ✓ a *paramétereket kísérleti úton* kell meghatározni
    - ➡ **Empirikus szabályozó tervezés**: a kívánt kimenet elérése érdekében kell hangolni a szabályozó paramétereit
  - ✓ matematikai modell készítése
    - ➡ **Modell identifikáció**

P szabályozó tulajdonságai

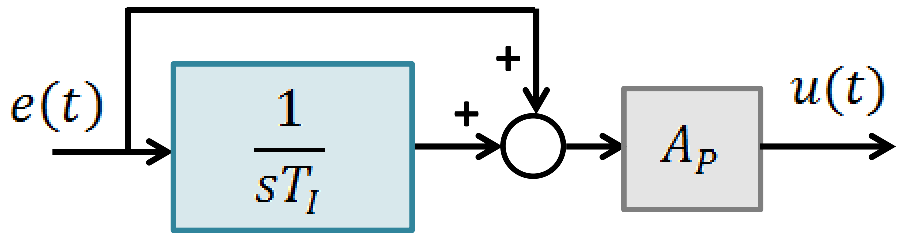


- átviteli függvénye: $W_P(s) = A_P$
- paramétere (erősítés): $A_P > 0$
- a szabályzó nem változtatja meg a felnyitott kör átviteli függvényének
  - ✓ típusszámát
  - ✓ fázismenetét
- a szabályzó megváltoztatja
  - ✓ a körerősítést → A_P -szeresére módosítja
  - ✓ a körerősítése növelésével
    - → a vágási frekvencia nő
    - → a fázistartalék csökken
    - → a stabilitás határa felé haladunk

PI szabályozó tulajdonságai

- átviteli függvénye:

$$W_{PI}(s) = A_P\left(1+\frac{1}{sT_I}\right) = \frac{A_P}{T_I}\cdot\frac{1+sT_I}{s}$$



- paraméterek:
  - ✓ erősítés: $A_P > 0$
  - ✓ integrálási idő (integrátor időállandója): $T_I > 0$

- a szabályzó megváltoztatja
  - ✓ a körerősítést → $\frac{A_P}{T_I}$-szeresére módosítja
  - ✓ a szabályozási kör típusszámát 1-el növeli
  - ✓ a felnyitott körben új zérus jelenik meg: $-\frac{1}{T_I}$
  - ✓ a felnyitott kör fázismenetét $\frac{1}{T_I}$ frekvenciánál kisebb értékeknél -90°-al csökkenti, annál nagyobb frekvenciáknál (közelítőleg) változatlanul hagyja

2. Ziegler-Nichols módszer

2.1. Stabilitás határának elérésén alapuló szabályozás

2.2. Kísérleti identifikáción alapuló szabályozás

Ziegler-Nichols módszer

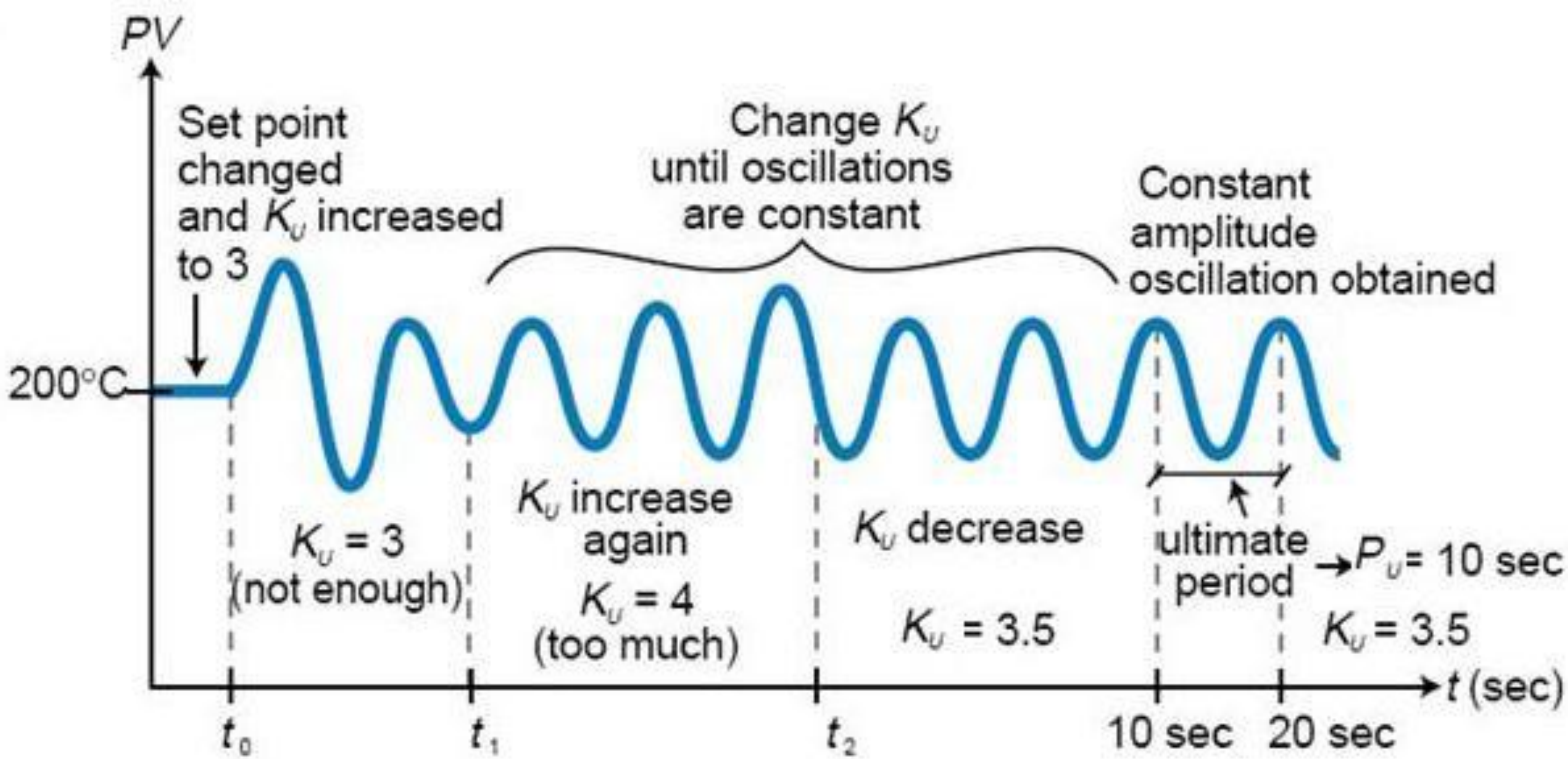
- Az 1940-es években Ziegler és Nichols két empirikus módszert dolgozott ki szabályozók paramétereinek meghatározására
- A módszerek jellemzői:
  - ✓ nem elsőfokú rendszerekre lett kifejlesztve
  - ✓ a rendszerek tartalmaznak holtidőt
  - ✓ a tervezés számos manuális számítást tartalmaz
- Az egyre fejlettebb optimalizáló szoftverek megjelenésével az ilyen manuális számításokat alkalmazó módszertanokat már nem igen használják
- Számítógépes támogatással azonban a módszerek alkalmazhatók

Stabilitás határának elérésén alapuló szabályozás

- stabilitás határán lévő rendszer erősítésének, K_u megtalálása
  - ✓ egyetlen P erősítést használva keressük meg azt az erősítés értéket, amelynek hatására a rendszer oszcillál
  - → ennek megtalálásához az I és a D tagok erősítése nullára van állítva, így csak a P tag érvényesül
- a másik paraméter, amely a csak P tagot tartalmazó szabályozásból meghatározható, a stabilitás határán lévő rendszer lengési periódusa, P_u
  - ✓ az az idő, amely ahhoz kell, hogy egy teljes oszcillációt elvégezzen a rendszer az állandósult állapotban

➡ Ezen két paraméter (K_u és P_u) segítségével a szabályozó paraméterei számíthatók (A_P, T_I, T_D)

Stabilitás határának elérésén alapuló szabályozás

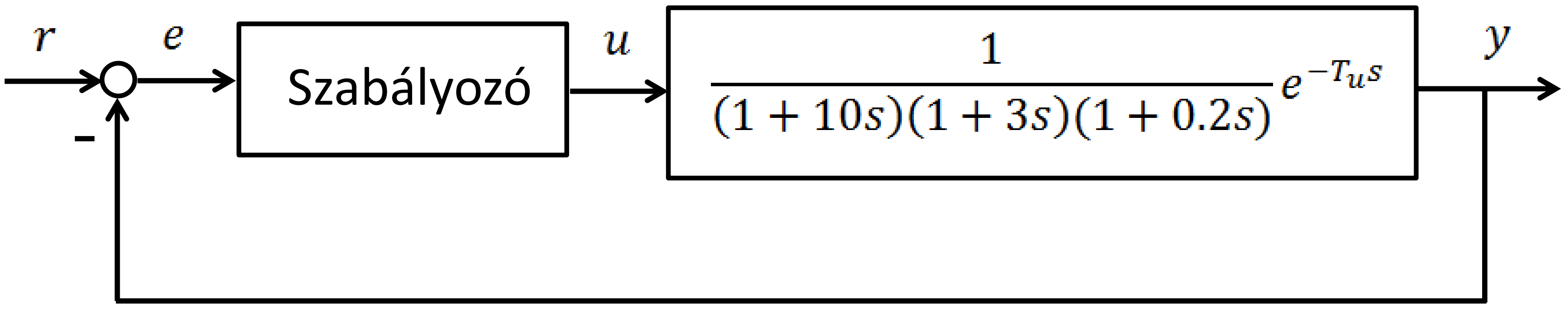


Stabilitás határának elérésén alapuló szabályozás

Táblázat a szabályozótervezéshez

Szabályozó típusa	A szabályozó paraméterei		
	A_P	T_I	T_D
P	$0.5\ K_U$	–	–
PI	$0.45\ K_U$	$0.85\ P_U$	–

Példa

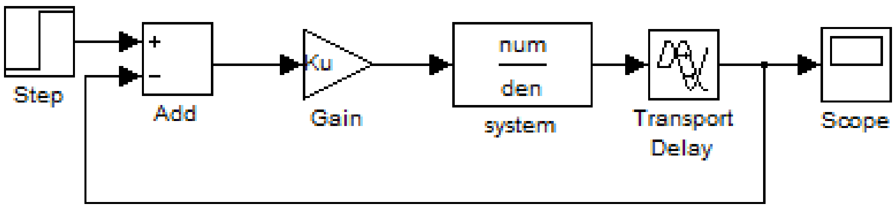


$$T_u = 1$$

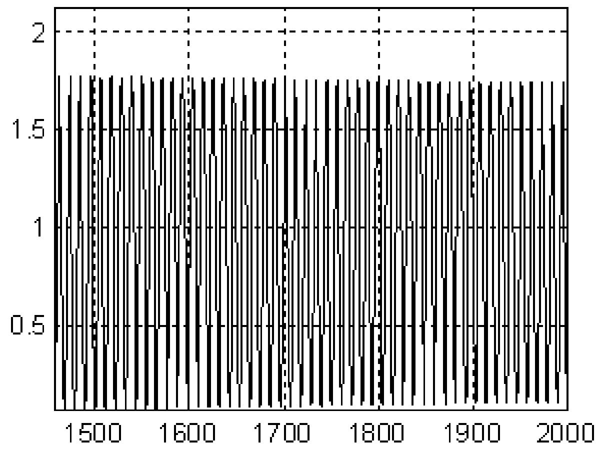
Feladat: PI szabályozó tervezése

Stabilitás határának elérésén alapuló szabályozás

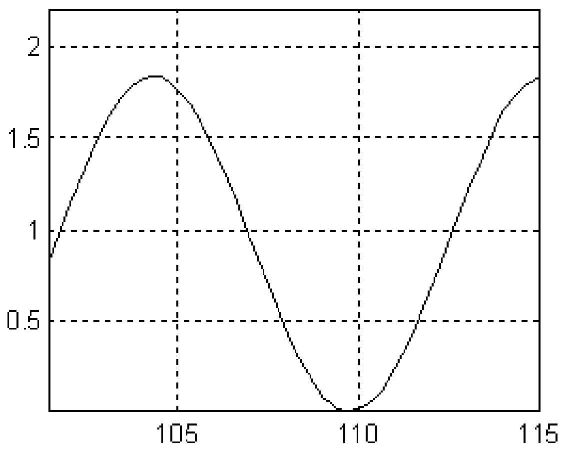
A stabilitás határán lévő rendszer (erősítés) megtalálása



1. a rendszer létrehozása Simulink alatt
2. $\mathrm{K} = 1$ értékről kezdve figyeljük a scope-ot
 a) ha a rendszer stabil → növeljük a K-t
 b) ha a rendszer instabil → csökkentsük a K-t



$$K_u = 11.86$$



$$P_u = 11$$

Stabilitás határának elérésén alapuló szabályozás

PI szabályozó tervezés

Szabályozó típusa	A szabályozó paraméterei		
	A_P	T_I	T_D
PI	$0.45\ K_U$	$0.85\ P_U$	–

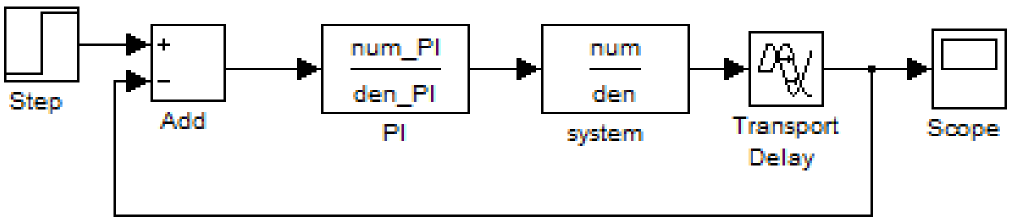
$K_u = 11.86 \qquad A_P = 0.45\, K_u = 0.45 \cdot 11.86 = 5.337$

$P_u = 11 \qquad T_I = 0.85\, P_u = 0.85 \cdot 11 = 9.35$

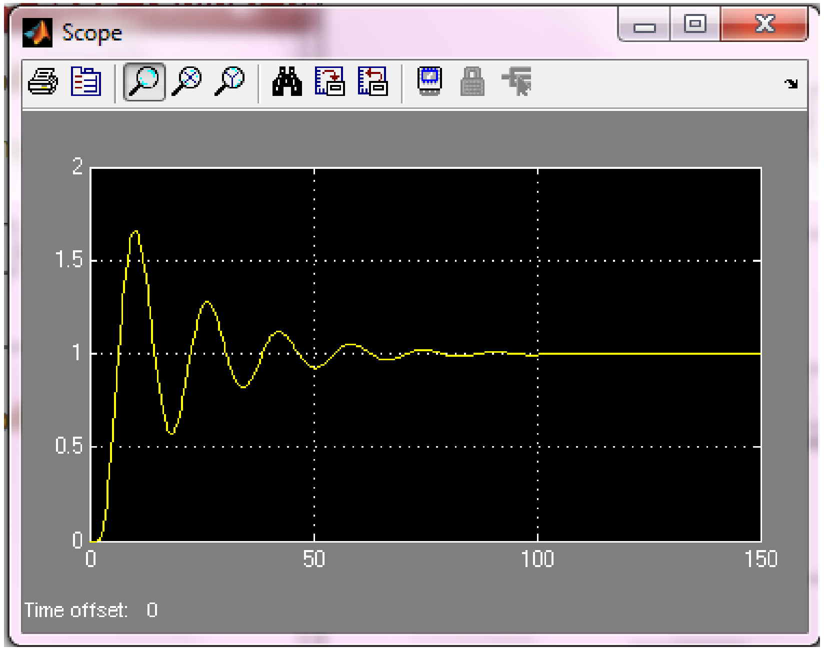
$$W_{PI}(s) = A_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I}\right) \Rightarrow W_{PI}(s) = 5.337 \cdot \left(1 + \frac{1}{9.35s}\right) = \frac{49.9s + 5.337}{9.35s}$$

Stabilitás határának elérésén alapuló szabályozás

PI szabályozó tervezés – megvalósítás Simulink alatt



PI szabályozó tervezés – szimuláció

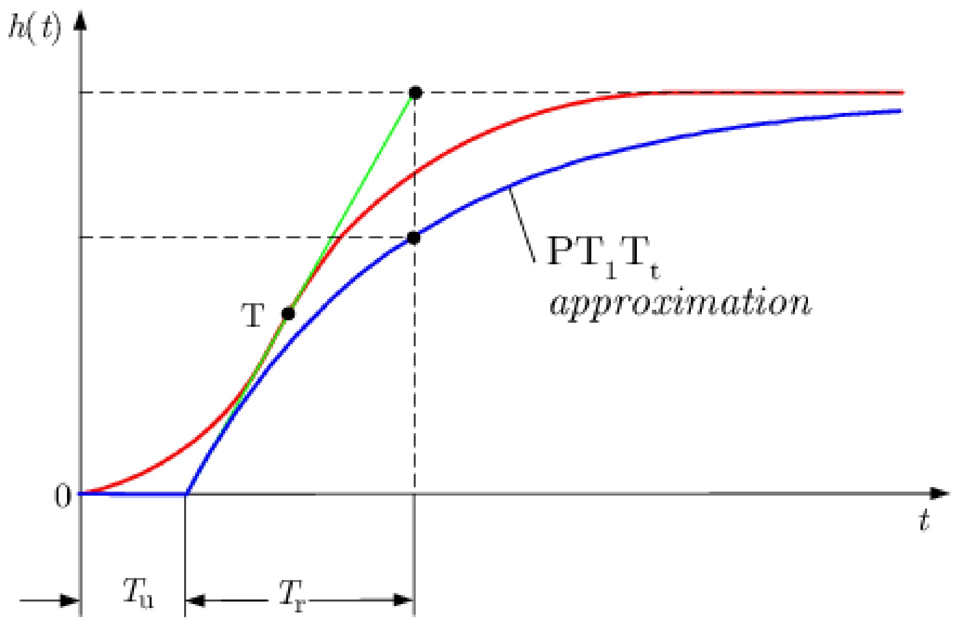


Ugrásválasz paraméterei:

- ✓ szabályozási idő: t_s = 100 sec
- ✓ túllövési idő: t_1 = 9 sec
- ✓ túllövés: σ_1 = 65%

Kísérleti identifikáción alapuló szabályozás

- számos ipari folyamat ugrásválasza mutat tiszta aperiodikus viselkedést
- ez az S-alakú görbe általában a magasabb rendű rendszerekre jellemző



A szakasz ugrásválasza az alábbi paraméterekkel írható le:

- ✓ K_P a szakasz erősítése
- ✓ T_r felfutási idő
- ✓ T_u holtidő

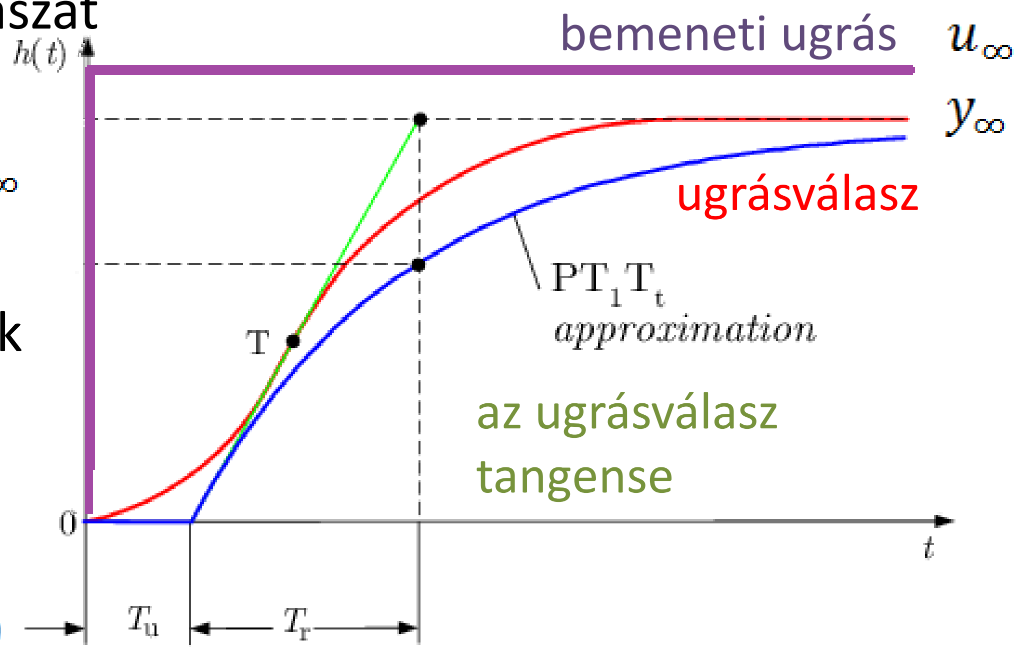
- a szakasz átviteli függvénye az alábbi modellel közelíthető:

$$W_P = \frac{K_P}{1+Ts} e^{-T_t s}$$

Kísérleti identifikáción alapuló szabályozás

1. Vizsgáljuk meg a szakasz ugrásválaszát
   - ✓ bemeneti ugrás értéke: u_∞
   - ✓ a válasz állandósult állapota: y_∞

2. A T inflekciós pontban szerkesszük meg az ugrásválasz tangensét
   - ✓ holtidő: T_u
   - ✓ felfutási idő: T_r
   - ✓ szakasz erősítése: $K_P = \dfrac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}$



3. Az ugrásválasz közelítése

$$W_P = \frac{K_P}{1+Ts} e^{-T_t s} \xrightarrow[T = T_r]{T_t = T_u} W_P = \frac{K_P}{1+T_r s} e^{-T_u s}$$

Kísérleti identifikáción alapuló szabályozás

Táblázat a szabályozótervezéshez

$$\rho = \frac{T_u}{T_r}$$ relatív holtidő

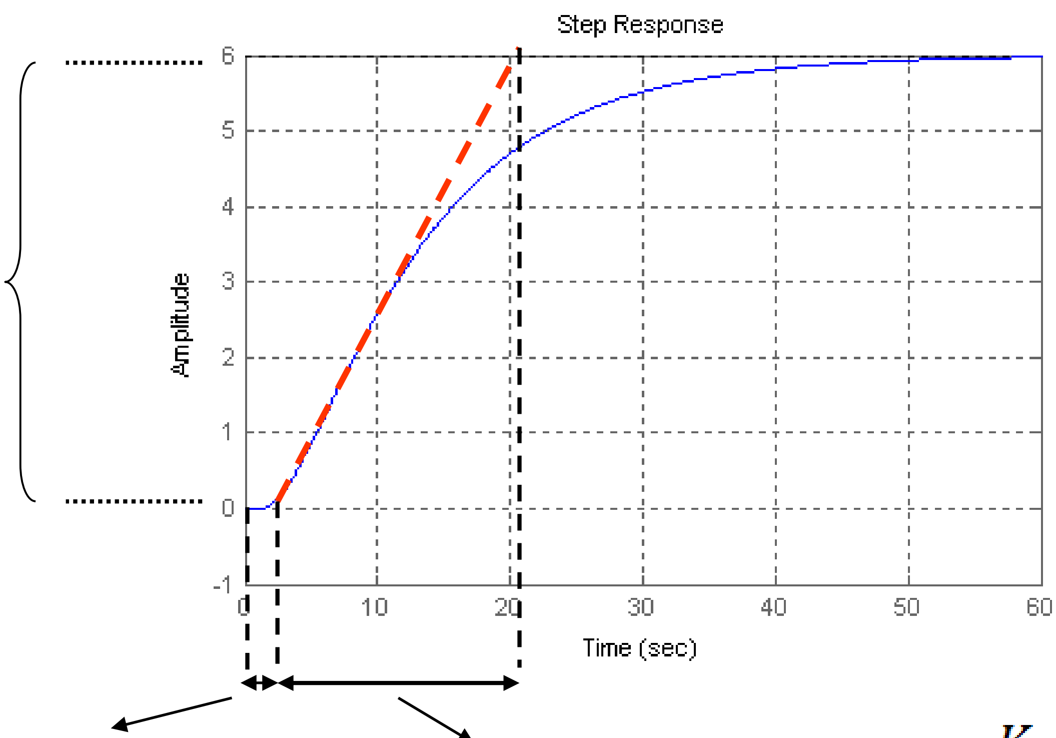
Szabályozó típusa	A szabályozó paraméterei		
	$A_P \cdot K_P \cdot \rho$	T_I	T_D
P	≤ 1	-	-
PI	≤ 0.9	$3\ T_u$	-

Vegyük észre, hogy kisebb is lehet, mint a táblázatban szereplő érték!
Ha a táblázatban szereplő értékkel tervezett szabályozó nem működik, próbáljunk meg kisebb értékkel számolni (pl. PI esetén 0.7-tel 0.9 helyett)

Példa

Ugrásválasz és paraméterek

$K_P = 6$



$T_u = 3$ $\quad T_r = 18$

$$W_P(s) = \frac{K_P}{1 + T_r s} e^{-T_u s} = \frac{6}{1 + 18s} e^{-3s}$$

Kísérleti identifikáción alapuló szabályozás

PI szabályozó tervezés

Szabályozó típusa	A szabályozó paraméterei		
	$A_P \cdot K_P \cdot \rho$	T_I	T_D
PI	≤ 0.9	$3\ T_u$	-

$$K_P = 6$$

$$T_u = 3$$

$$T_r = 18$$

$$\rho = \frac{T_u}{T_r} = \frac{3}{18} = \frac{1}{6}$$

$$T_I = 3T_u = 3 \cdot 3 = 9$$

$$A_P \cdot K_P \cdot \rho \leq 0.9$$

$$A_P \leq \frac{0.9}{6 \cdot \frac{1}{6}} = 0.9$$

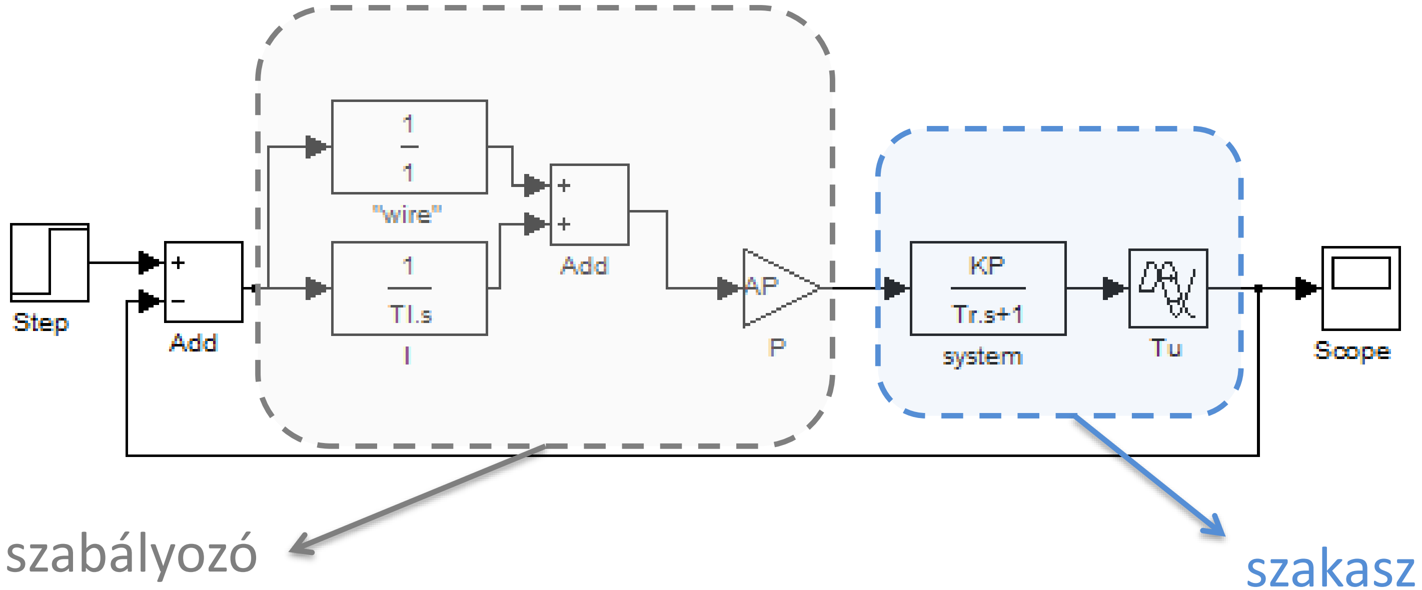
$$W_{PI}(s) = A_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I}\right)$$

$$W_{PI}(s) = 0.9 \cdot \left(1 + \frac{1}{9s}\right)$$

$$W_{PI}(s) = \frac{9s + 1}{10s}$$

Kísérleti identifikáción alapuló szabályozás

PI szabályozó tervezés – megvalósítás Simulink alatt

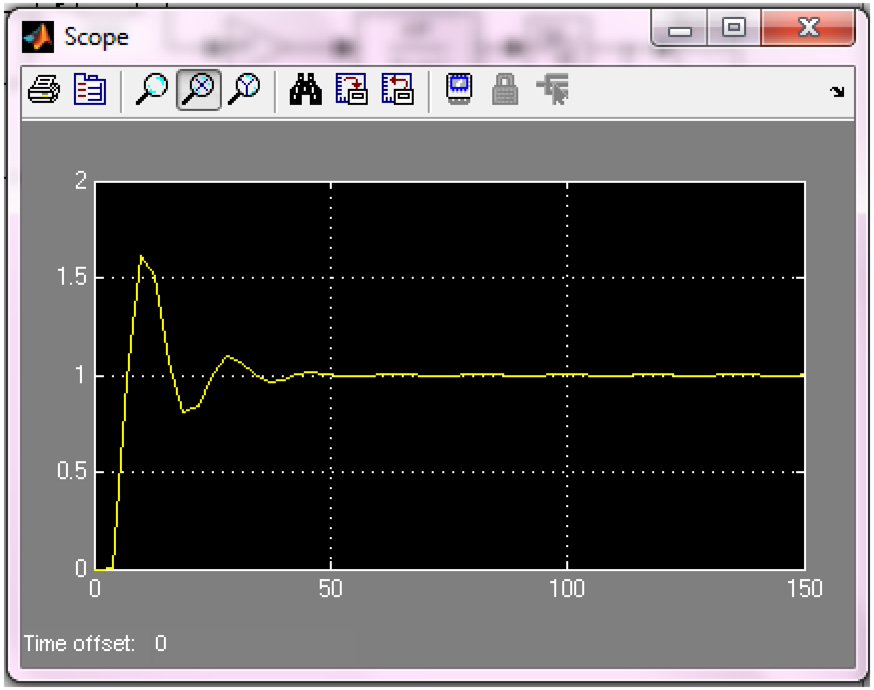


$$W_{PI}(s) = A_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I}\right)$$

$$W_{PI}(s) = 0.9 \cdot \left(1 + \frac{1}{9s}\right)$$

$$W_P(s) = \frac{K_P}{1 + T_r s} e^{-T_u s} = \frac{6}{1 + 18s} e^{-3s}$$

PI szabályozó tervezés – szimuláció



Ugrásválasz paraméterei:

- ✓ szabályozási idő: t_s = 50 sec
- ✓ túllövési idő: t_1 = 10 sec
- ✓ túllövés: σ_1 = 60%

3. Kessler módszer

3.1. Modulusz kritérium

3.2. Szimmetrikus kritérium

Kessler módszer

- A rendszer nem tartalmaz holtidőt $W_d(s) = e^{-sT_d}$
  - ✓ ha igen, közelíteni kell
  - ✓ **Padé közelítés**
    - ○ a függvény közelítése egy adott fokszámú törttel
    - ○ gyakran a Taylor sorbafejtésnél jobb közelítést ad
    - ○ ha aTaylor sor nem konvergens, ez akkor is működhet
    - ○ MATLAB `[num den]=pade(Td,5);`
      `% 5th order approximation`

$$e^{-sT_d} = \begin{cases} \dfrac{2 - sT_d}{2 + sT_d} \\[2ex] \dfrac{12 - 6sT_d + s^2T_d^2}{12 + 6sT_d + s^2T_d^2} \\[2ex] etc. \end{cases}$$

- A folyamat átviteli függvénye relatív egyszerű.
- A rendszer paraméterei ne változzanak túlzottan.
- Az elérhető minőségi követelmények relatív adottak.

Kessler módszer

Kis időállandók tétele

- egy átviteli függvény kis időállandós tagjai helyettesíthetőek egyetlen taggal

- T_Σ: kis időállandók összege (vagy a legkisebb időállandó)

$$T_\Sigma = \sum_n T_n$$

- a módszer közelített holtidőt tartalmazó rendszerek esetén is alkalmazható

$$T_\Sigma = \sum_n T_n + T_d$$

➡ Gyakran a rendszer leírására alacsony rendű modell használható.

Kessler módszer

A különböző Kessler módszerek használata

Szimmetrikus kritérium

- a folyamat tartalmaz egy (szabad) integrátort
- $$\frac{K_P}{s(1+sT_\Sigma)}$$
- $$\frac{K_P}{s(1+sT_\Sigma)(1+sT_1)}$$

Modulusz kritérium

- a folyamat nem tartalmaz (szabad) integrátort
- $$\frac{K_P}{1+sT_\Sigma}$$
- $$\frac{K_P}{(1+s\cdot T_1)(1+s\cdot T_\Sigma)}$$
- $$\frac{K_P}{(1+s\cdot T_1)(1+s\cdot T_2)(1+s\cdot T_\Sigma)}$$

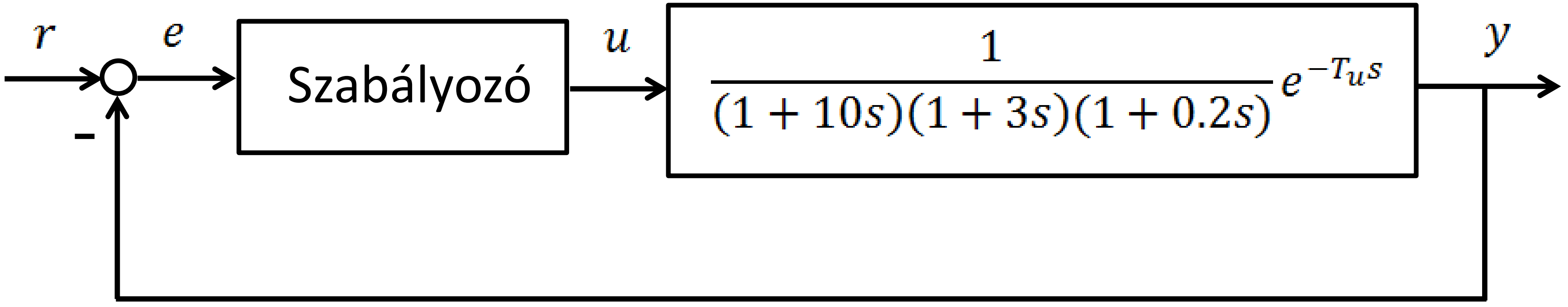
Modulusz kritérium

Táblázat a szabályozótervezéshez

Folyamat $W_P(s)$	Szabályozó típusa	Paraméterek relációi	Megjegy-zés
$\frac{K_P}{1+sT_\Sigma}$	$\frac{K_R}{s}$ *or* $\left(\frac{1}{sT_i}\right)$ **I**	$K_R = \frac{1}{2K_P T_\Sigma}$	$t_s = 8{,}4\ T_\Sigma$ $t_1 = 4{,}7\ T_\Sigma$ $\sigma_1 = 4{,}3\ \%$
$\frac{K_P}{(1+s\cdot T_1)(1+s\cdot T_\Sigma)}$ $T_1 \rangle T_2$	$\frac{K_R}{s}(1+s\cdot T_i)$ **PI**	$K_R = \frac{1}{2K_P T_\Sigma}$ $T_i = T_1$	

Modulusz kritérium

Példa



$$T_u = 0$$

Feladat: PI szabályozó tervezése

Modulusz kritérium

PI szabályozó tervezés

Folyamat $W_P(s)$	Szabályozó típusa	Paraméterek relációi	Megjegy-zés
$\frac{K_P}{(1+s\cdot T_1)(1+s\cdot T_\Sigma)}$ $T_1 \rangle T_2$	$\frac{K_R}{s}(1+s\cdot T_i)$ **PI**	$K_R = \frac{1}{2K_P T_\Sigma}$ $T_i = T_1$	$t_s = 8{,}4\ T_\Sigma$ $t_1 = 4{,}7\ T_\Sigma$ $\sigma_1 = 4{,}3\ \%$

$$\frac{1}{(1+10s)(1+3s)(1+0.2s)}e^{-T_u s}$$

$$T_i = T_1 = 10$$

$$T_\Sigma = T_2 + T_3 = 3 + 0.2 = 3.2$$

$$K_P = 1$$

$$K_R = \frac{1}{2K_P T_\Sigma} = \frac{1}{2\cdot 1\cdot 3.2} = 0.156$$

$$W_{PI}(s) = \frac{K_R}{s}(1+sT_i) = \frac{0.156}{s}(1+10s)$$

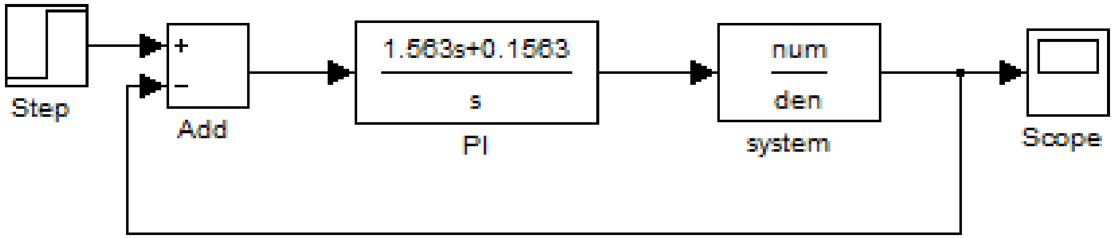
$$W_{PI}(s) = \frac{1.56s + 0.156}{s}$$

Modulusz kritérium

PI szabályozó tervezés – megvalósítás Simulink alatt

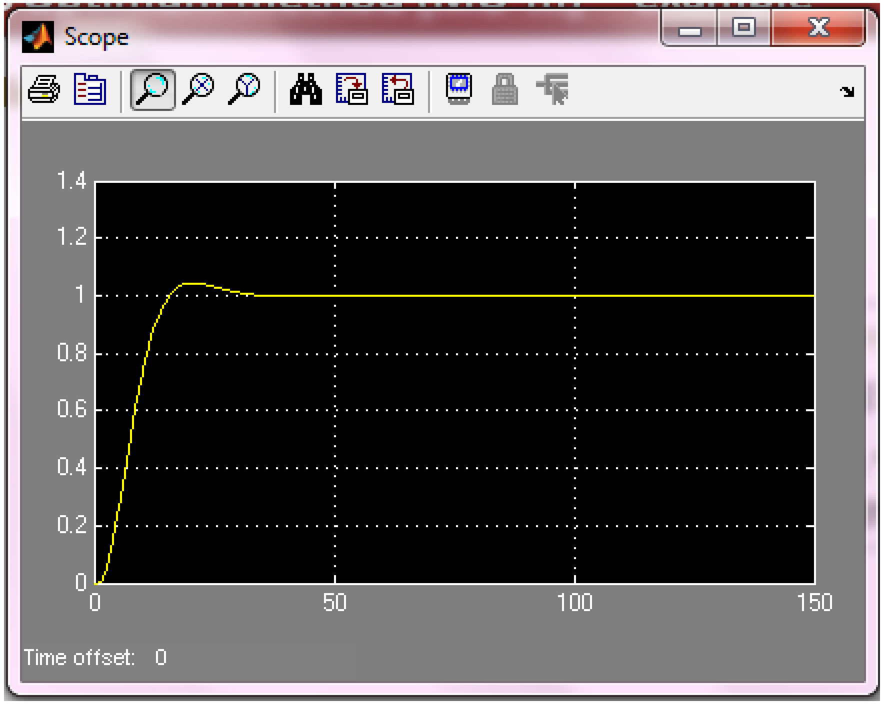
```
s = tf('s');
W_PI = (KR/s) * (1 + s*Ti)

Transfer function:
1.563 s + 0.1563
----------------
       s
```



Modulusz kritérium

PI szabályozó tervezés – szimuláció



Ugrásválasz paraméterei:

- ✓ szabályozási idő: t_s = 27 sec
- ✓ túllövési idő: t_1 = 25 sec
- ✓ túllövés: σ_1 = 4.3%

Videó

[Empirikus szabályozások]

Szimmetrikus kritérium

Táblázat a szabályozótervezéshez

Folyamat $T_1 > T_\Sigma$	Szabályozó típusa		Paraméterek relációi	Észrevé-tel
$\dfrac{K_P}{s\left(1+sT_\Sigma\right)}$	$\dfrac{K_R}{s}\left(1+sT_r\right)$ $K_R = \dfrac{K_r}{T_r}$	**PI**	$K_R = \dfrac{1}{8T_\Sigma^2 K_P}$ $T_r = 4T_\Sigma$	$t_s = 16{,}5\ T_\Sigma$ $t_1 = 3{,}1\ T_\Sigma$ $\sigma_1 = 43{,}4\ \%$

A szabályozó tervezése a korábbi példákéhoz hasonlóan történik.

Köszönöm a figyelmet!

Dr. habil. Kovács Levente
egyetemi docens

kovacs.levente@nik.uni-obuda.hu

Dr. Haidegger Tamás
egyetemi adjunktus

haidegger@irob.uni-obuda.hu

EKIK Egyetemi Kutató és Innovációs Központ

K-MOOC

Óbudai Egyetem Bejczy Antal iRobottechnikai Központ

Physiological Controls Group

Élettani Szabályozások Csoport
Óbudai Egyetem