

VIIIAB05 - Szabályozástechnika

PID szabályozók (folytatás) és holtidő a szabályozási körben

Dr. Kiss Bálint

Irányítástechnika és Informatika Tanszék,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2020. március 10.



Az előző előadások nyomán

a hallgató

- 1 képes megfogalmazni a szabályozástechnika vizsgáldásainak tárgyát és elmagyarázni alapfogalmait,
- 2 ismeri a szabályozási kör elemeit, osztályozásának, szempontjait, minőségi jellemzőit,
- 3 átlátja, milyen módon kapható meg egy szakasz átviteli függvénye,
- 4 képes meghatározni a szabályozási kör statikus tulajdonságait,
- 5 képes átlátni a tranzienseket befolyásoló egyes tényezőket, például egy domináns póluspár alapján,
- 6 tisztában van a szabályozási kör stabilitásának jelentőségével,
- 7 ismeri a Nyquist és a Bode stabilitáskritériumot,
- 8 ismeri vágási frekvencia és a fázistartalék definícióját és kapcsolatukat a stabilitással,



Az előző előadások nyomán

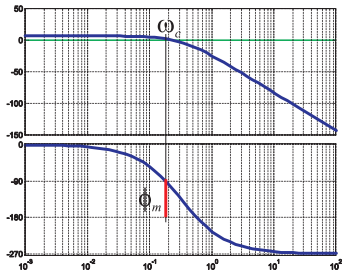
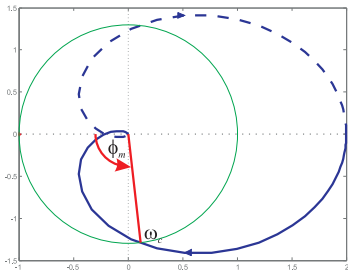
a hallgató

- 1 ismeri a hagyományos soros kompenzátorok működési mechanizmusát
- 2 tisztában van a hangolás szempontjaival
- 3 érti a beavatkozó jel korlátosságából adódó tervezési korlátozásokat
- 4 tisztában van a sávszélesség fogalmával a szabályozási körök esetében
- 5 tisztában van a PID szabályozók hatásmechanizmusával, főbb jellemzőivel,

Az előző részek tartalmából

Stabilitás és fázistartalék

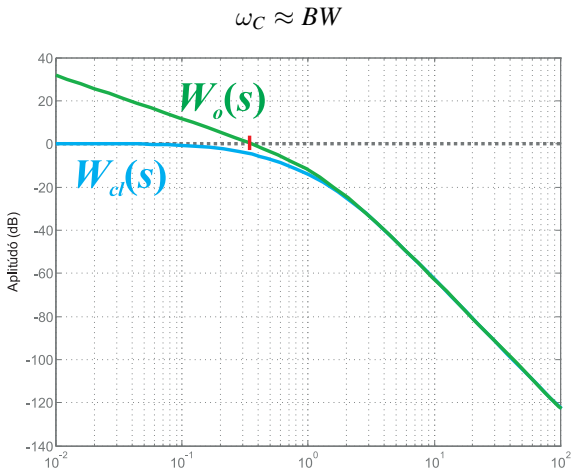
Akkor nem vesszük körbe a -1 pontot, ha a görbe korábban már bekerült az egységkörön belülre, azaz a vágási frekvenciához -180° -nál nagyobb fázistolás tartozik. Ezt mérhetjük, ez a fázistartalék.



$$\text{STABILITÁS} \Leftrightarrow \varphi_m > 0 \quad (\varphi_m = \pi + \varphi(\omega_c))$$



Az előző előadások nyomán



Az előző előadások nyomán

a PID szabályzó

$$W_{PID_k}(s) = A_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{sT_c + 1} \right) = \frac{A_p}{T_i} \frac{T_i(T_d + T_c)s^2 + (T_i + T_c)s + 1}{s(sT_c + 1)}$$

Az ötödik előadás célja

A hallgató

- 1 megismeri a PID szabályzó család (P, PI, PD, PID) tagjainak jellemzőit,
- 2 megismeri a szabályzó zérusainak elhelyezésére vonatkozó megfontolásokat,
- 3 képes szabályzó méretezésére egyenletrendszer alapján,
- 4 ismeri a holtidős elem leírását,
- 5 ismeri a holtidő és a stabilitás közötti összefüggést,
- 6 képes szabályzó méretezésére holtidőt tartalmazó szabályozási körben

Tartalom

1 PID méretezés

2 Holtidő



Tartalom

1 PID méretezés

2 Holtidő



P típusú szabályzó

Átviteli függvénye

$$W_C(s) = A_p$$

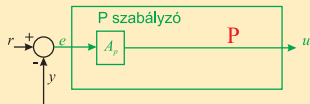
Beavatkozó jel számítása

$$u(t) = A_p e(t)$$

Paramétere

A_p erősítés

Hatásvázlat



Maximális beavatkozó jel

Ugrás alakú $(r(t) = \varepsilon(t))$ alapjelnél

$$u_{max} = u(0) = A_p$$

PI típusú szabályzó

Átviteli függvénye

$$W_C(s) = A_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) = \frac{A_p sT_i + 1}{T_i s}$$

Beavatkozó jel számítása

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

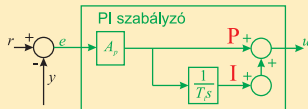
Paraméterei

A_p erősítés és T_i időállandó vagy integrálási idő.

Pólusok és zérusok

Egy zérus a $-\frac{1}{T_i}$ helyen és egy pólus az origóban (az integrátor).

Hatásvázlat



Maximális beavatkozó jel

Ugrás alakú ($r(t) = \varepsilon(t)$) alapjelnél

$$u_{max} = u(0) = A_p$$

PD_k típusú szabályzó

Átviteli függvénye

$$W_C(s) = A_p \left(1 + \frac{sT_d}{1 + sT_c} \right)$$

Megjegyzés

Ha $T_c = 0$, akkor jutunk az ideális D-hatáshoz.

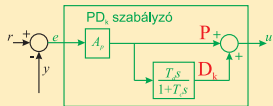
Paramétere

A_p erősítés, T_d deriválási idő és T_c időállandó.

Pólusok és zérusok

Egy zérus a $-\frac{1}{T_c+T_d}$ helyen és egy pólus a $-\frac{1}{T_c}$ helyen.

Hatásvázlat



Maximális beavatkozó jel

Ugrás alakú $(r(t) = \varepsilon(t))$ alapjelnél

$$u_{max} = u(0) = A_p \left(1 + \frac{T_d}{T_c} \right)$$

PID_k szabályzó

Átviteli függvénye

$$W_C(s) = A_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1+sT_c} \right)$$

Megjegyzés

Ideális D-hatás, ha $T_c = 0$.

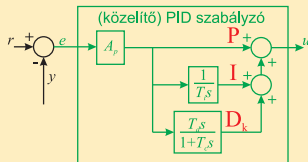
Paramétere

A_p erősítés, T_d deriválási idő, T_i integrálási idő és T_c időállandó.

Pólusok és zérusok

Két zérus (lehet komplex pár is) és két pólus a $-\frac{1}{T_c}$ és 0 helyeken.

Hatásvázlat

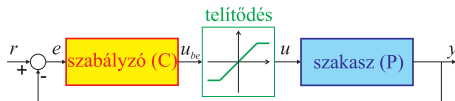


Maximális beavatkozó jel

Ugrás alakú ($r(t) = \varepsilon(t)$) alapjelnél

$$u_{max} = u(0) = A_p \left(1 + \frac{T_d}{T_c} \right)$$

Telítődés kezelése az I tagoknál - antiwindup



Probléma

A szabályzó akkor is integrálni fogja a hibát, mikor a beavatkozó jel "telítésbe ment", azaz a szabályozási kör már nem a lineáris tartományban működik.

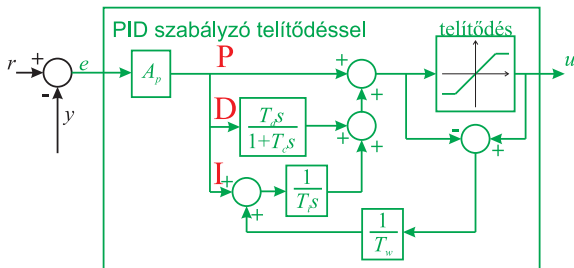
Következmény

Az integrátor túlintegrál, ami a tranziens romlásához (túllövés, nagyobb beállási idő) vezet.

Integrator antiwindup megoldás

Megoldás (integrator antiwindup)

- 1 az I tag bemenetét nullává tesszük, mikor a telítődéses karakterisztika vízszintes részére érünk,
- 2 az I tag bemenetét módosítjuk, mikor a telítődéses karakterisztika vízszintes részére érünk.



a második megoldás hatásvázlata



Megjegyzések

Jelölés

A továbbiakban a k indexet a közelítő D-hatásnál elhagyjuk.

Fokszámok

Bármelyik szabályzó esetében (közelítő D-hatással) a számláló és a nevező fokszámainak különbsége nulla.

Állapotok

Az arányos tag kivételével mindegyik szabályzó saját állapottal rendelkezik.

Szisztematikus tervezés

Szabályzó kiválasztása (P, PI, PD, PID)

- Típuszám növeléséhez I-hatás kell.
- Tranziensek gyorsításához D-hatás kell.

P, PI (D-hatás nélkül)

Itt a maximális beavatkozó jel csak A_p -től függ.

- 1 Pólus-zérus kiejtés (I-hatás esetén megadja T_i értékét)
- 2 Fázisstartalék beállítása alapján A_p meghatározásával

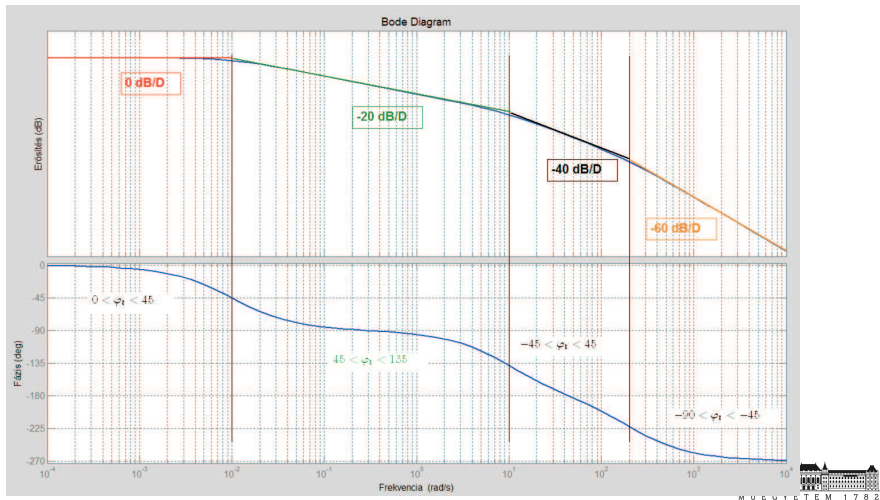
PD, PID

Itt a maximális beavatkozó jel csak A_p -től és az időállandóktól függ.

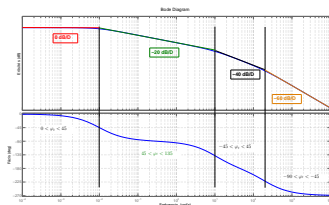
- 1 Pólus-zérus kiejtés
- 2 A_p , ω_c , és az időállandók meghatározása egyenletrendszer alapján



Megfigyelés (minimumfázisú rendszereknél)



Pólus-zérus kiejtés

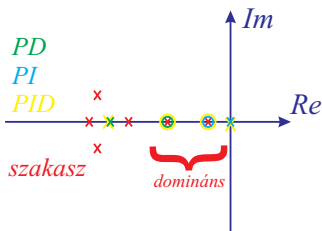


Következmény

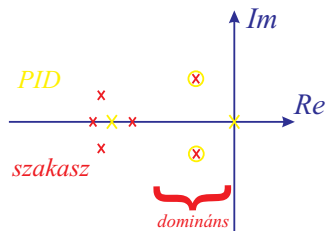
- 1 A vágási frekvencia a $-20\text{dB}/D$ szakaszra kerül, hogy a megfelelő fázistartalékot (tipikusan $\varphi \in [45^\circ, 75^\circ]$) biztosítsuk.
- 2 A sávszélesség ($BW \approx \omega_C$) tehát úgy növelhető, hogy a $-20\text{dB}/D$ meredekségű szakaszt a „nagy” frekvenciák felé hosszabbítjuk.
- 3 A meredekség a pólusoknál csökken, a hosszabbításhoz azokat kell kiejteni.



Pólus-zérus kiejtés



valós domináns pólusok



konjugált komplex domináns póluspár

Sávszélesség növelése

- A zárt kör sávszélességét növelendő a szabályzó zérusaival a szakasz pólusait kiejtjük.
- Ez egyben növeli $W_o(s)$ -20 dB/D meredekségű szakaszát és ω_C -t.
- Ugyanakkor $\omega_C \approx BW$ (sávszélesség)



PD, PID paraméterek számítása egyenletek alapján

Előírások

A φ_t fázistartalék és a maximális beavatkozó jel u_{max} adottak.

Kiejtés

Kiejtési szabályok (korábbról) - a $-20dB/D$ szakasz meghosszabbítása

- ① PD: a szakasz második leglassabb (valós) pólusa
- ② PID: a szakasz két leglassabb (valós vagy konjugált komplex) pólusai

Egyenletek

Ismeretlenek: A_p , ω_c , T_i (Matlab támogatás: `fsolve`)

$$\|W_o(j\omega_c)\| - 1 = 0$$

$$\pi + \arg(W_o(j\omega_c)) - \varphi_t = 0$$

$$u_{PD, PID}(0) - u_{max} = 0$$



Tartalom

1 PID méretezés

2 Holtidő

(Ideális) Holtidő vagy késleltetés

A kimenet a késleltetett bemenet



Átviteli függvény

$$W_h(s) = \exp(-st_h)$$

Amplitúdómenet

$$|W_h(j\omega)| = |\exp(-j\omega t_h)| = 1$$

Fázismenet

$$\arg(W_h(j\omega)) = \arg(e^{-j\omega t_h}) = -\omega t_h$$

Megjegyzés

A holtidő a felnyitott kör átviteli függvényében csökkenti a fázismenetet.



Stabilitás és holtidő

Stabilitás kritériumok érvényessége

A Nyquist- és a Bode-kritériumok érvényben maradnak.

Bevezethető a késleltetéstartalék D_m fogalma

A késleltetéstartalék (**delay margin**) megmutatja, hogy mekkora késleltetés eszi meg a fázistartalékot.

$$\pi + \varphi(\omega_c) = \omega_c \cdot D_m$$

Holtidő figyelembe vétele soros kompenzátor tervezésekor

Kiejtések

Nincs változás a holtidőmentes esethez képest.

Az amplitúdóra vonatkozó egyenlet

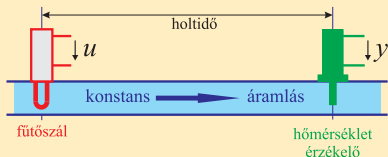
Változatlan.

A fázismenetre vonatkozó egyenlet

A holtidős tag hozzájárulása $W_o(s)$ fázisához a vágási frekvencián: $-\omega_c \cdot t_h$.

Példa: holtidő kompenzálása I-hatású szabályzóval

Fűtésszabályozás elvi felépítése



A fűtőszál feszültsége és a hőmérséklet munkaponti értékek körül értendők.

A szakasz átviteli függvénye

$$W_P(s) = \frac{2}{2s + 1} e^{-3s}$$

Tervezzünk szabályozót, hogy $\varphi_m = 60^\circ$!

