

Prednáška 3: MODIFIKÁCIE ČÍSLICOVÝCH PID REGULÁTOROV

Riadenie a Umelá Inteligencia

doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.,

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach

LS 2015/2016

Modifikácia číslicových PID regulátorov

Odvođené opisy diskretných PSD regulátorov predstavujú **základné tvary**, ktoré sa podľa požiadaviek **praktického nasadenia upravujú** \cong modifikujú do vhodných tvarov:

- aby sme obmedzili riadiace zásahy upravíme získaný rekurentný vzťah $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2)$ PSD regulátora na tvar:

$$\begin{aligned} u(k) - u(k-1) &= q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) = \\ &= K\left(1 + \frac{T_D}{T}\right)e(k) - K\left(1 + 2\frac{T_D}{T} - \frac{T}{T_i}\right)e(k-1) + K\frac{T_D}{T}e(k-2) = \\ &= K[e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i}e(k-1) + \frac{T_D}{T}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))] = \quad (1) \\ &= K[e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i}e(k-1) + \frac{T_D}{T}(-y(k) + 2y(k-1) - y(k-2))] = \\ &= K[-y(k) + y(k-1) + \frac{T}{T_i}e(k-1) + \frac{T_D}{T}(-y(k) + 2y(k-1) - y(k-2))], \end{aligned}$$

kde: $e(k) = w(k) - y(k)$, $w(k) = w(k-1) = w(k-2)$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) = w(k) - y(k) - (w(k-1) - y(k-1)) = y(k-1) - y(k)$$

Modifikácia číslicových PID regulátorov

Ak vo vzťahu (1) nahradíme pri integračnej zložke $e(k-1)$ regulačnou odchýlkou $e(k) \rightarrow$ dostaneme Takahashiho vzťah pre PSD regulátor \rightarrow ktorý má aplikačné použitie ako robustný PSD regulátor pri adaptívnom riadení. Takahashiho vzťah pre PSD regulátor má tvar:

$$u(k) - u(k-1) = K \left[y(k-1) - y(k) + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_D}{T} (2y(k-1) - y(k) - y(k-2)) \right] \quad (2)$$

- Takahashiho vzťah pre PSD regulátor zaručuje kvalitné budenie procesu aj pri malých zmenách regulačnej odchýlky
pozn.: Vzťah (1) je menej citlivý na zmeny $w(k)$ a dáva menej kmitavé pochody

Modifikácia číslicových PID regulátorov

- Modifikácia PSD algoritmu pri ohraničení riadiaceho zásahu
 - 1 Ak PSD regulátor dáva RIADIACE ZÁSAHY, ktoré sa z technického hľadiska nemôžu realizovať (napr. obmedzenia prietoku, tlakov, rýchlosti) \Rightarrow hodnoty " $e(k)$ " sú veľké. dochádza k situácii, že riadiaci zásah nemôže rásť, ale drží sa na hornej maximálnej hranici
 - 2 Algoritmom vypočítaný akčný zásah $u_A(k)$ je rôzny od skutočného akčného zásahu $u_S(k)$, ktorý realizuje akčný člen [$u_A(k) \neq u_S(k)$]
 - 3 z lineárneho obvodu sa stáva nelineárny obvod (nelinearita je obmedzenie akčného člena) \rightarrow vzniká neriadené správanie v riadiacom obvode \rightarrow tento jav sa v teórii automatického riadenia nazýva "wind-up efekt" \Rightarrow úprava PSD rekurentného algoritmu

Modifikácia číslicových PID regulátorov

- 4 Pri použití diskrétného PSD regulátora je integračná zložka v rekurentnom algoritme v činnosti (aj po nadobudnutí riadiaceho zásahu hodnoty nasýtenia) vzniká preregulovanie a T_{reg} narastá.

$$F_R(z) = K\left[1 + C_i \frac{1}{1 - z^{-1}} + C_D(1 - z^{-1})\right] = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

$$u_p = Ke(k) = (q_0 - q_2)e(k)$$

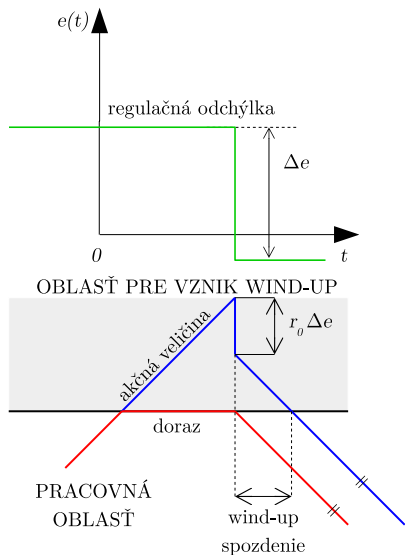
$$u_i = u_i(k-1) + KC_i e(k-1) = u_i(k-1) + (q_0 + q_1 + q_2)e(k-1)$$

$$u_d = KC_D e(k) - KC_D e(k-1) = q_2[e(k) - e(k-1)]$$

Nulovanie integračnej zložky ak

$$u(k) = u_{MAX}(k) \text{ alebo } u(k) = u_{MIN}(k) \rightarrow C_i = 0 \text{ alebo } e(k-1) = 0.$$

Modifikácia číslicových PID regulátorov



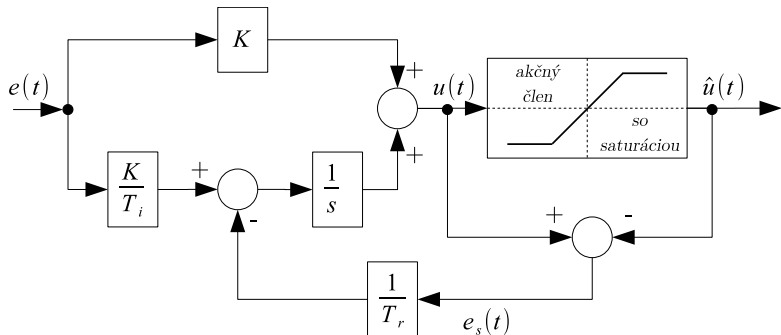
- Negatívny dopad win-up efektu na kvalitu regulácie je u číslicových regulátorov výraznejší ako u analógových regulátorov
- Prirodzené obmedzenie rastu výstupnej hodnoty z integračnej zložky je treba pri číslicovej regulácii nahradiť algoritickým obmedzením (zastavenie integrácie u člena, ktorý realizuje analógiu integračnej zložky spojitého PID regulátora)

Modifikácia číslicových PID regulátorov

- Akonáhle vypočítaná hodnota akčnej veličiny prekročí rozsah fyzicky nastavených hodnôt, zastaví sa jej ďalšie zväčšovanie v rámci integrácie tak dlho, kým $e(t)$ nezmení znamienko
- Bez algoritmickeho zastavenia \rightarrow dochádza k neobmedzenému vzd'arovaniu hodnoty výstupu z integračnej zložky za krajnú hodnotu prípustného rozsahu \rightarrow ktorý sa zastaví až zmenou znamienka $e(t)$
- wind-up spozdenie - negatívny vplyv na kvalitu regulácie
Pozn. (wind-up \rightarrow riešenie pomocou riadiacej štruktúry)
- V praxi sa stretávame s riadenými systémami, ktoré majú na svojom vstupe AKČNÝ ČLEN, ktorý prechádza do SATURÁCIE pri určitej hodnote riadenia
- Ak je pre riadenie použitý regulátor s I zložkou (PI, PID) môže byť $e(t)$ taká veľká, že integračná zložka spôsobí SATURÁCIU akčného člena a spätnoväzobné riadenie bude nefunkčné (napr. ventil v krajnej polohe)

Modifikácia číslicových PID regulátorov

- Ak dôjde (hneď potom) k obmedzeniu veľkosti $e(t)$, môže vplyvom neintegrovanej hodnoty trvať značne dlho, než integrál prejde do svojej normálnej hodnoty \Rightarrow tento efekt sa volá "wind-up effect"



PI regulátor je vybavený spätnou väzbou odvodenou od $e_s = u - u_S$. Odchýlka je vedená na integrátor cez zosilnenie $\frac{1}{T_r}$. Ak nie je akčný člen saturovaný $e = 0$ a riadime v lin. oblasti.

Graficko - analytické metódy určenia koeficientov PID a PSD regulátorov

1. Ziegler-Nicholsova metóda prechodovej charakteristiky (1. modifikácia)
 - metóda je použiteľná pre lineárne spojité a diskkrétne regulačné obvody
 - predpokladom je aperiodická regulovaná sústava (pre riadený proces s prechodovou charakteristikou bez prekmitu)
 - vychádzame z odmeranej prechodovej charakteristiky regulovaného procesu, z ktorej určíme tieto parametre:
 - ▶ K_P - zosilnenie prenosu reg. procesu
 - ▶ T_u - doba prietahu ($T_u = T_D$ - dopravné oneskorenie)
 - ▶ T_n - doba nábehu ($T_n = T_1$ - časová konštanta riadeného procesu)

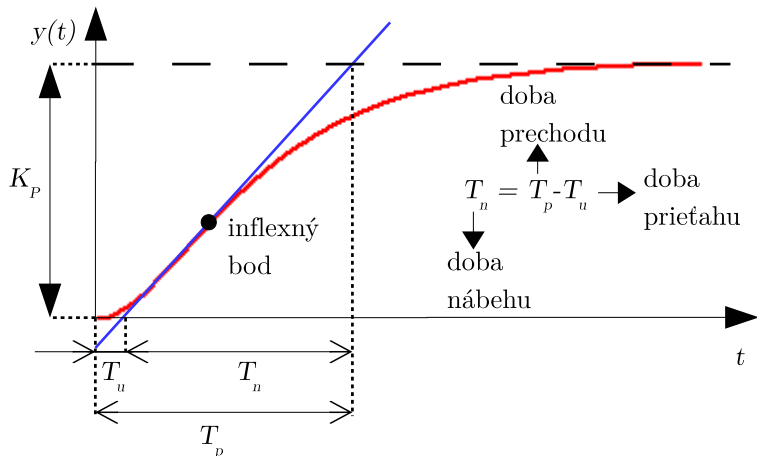
Graficko - analytické metódy určenia koeficientov PID a PSD regulátorov

Tabuľka: Nastavenia koef. PID zo znalosti parametrov prechodovej charakteristiky

$$F_p = \frac{K_p}{(1+T_1s)^n}$$

Typ regulátora	$r_0 = K$	T_i	T_D
P	$\frac{T_n}{K_p \cdot T_u}$	-	-
PI	$0.8 \frac{T_n}{K_p \cdot T_u}$	$3T_u$	-
PD	$1.2 \frac{T_n}{K_p \cdot T_u}$	-	$0.25T_u$
PID	$1.25 \frac{T_n}{K_p \cdot T_u}$	$2T_u$	$0.05T_u$

Graficko - analytické metódy určenia koeficientov PID a PSD regulátorov



Obr.: Prechodová charakteristika procesu

Tabuľka: Nastavenia parametrov číslicového regulátora z priebehu PCH RP

Typ regulátora	$C_p = K = q_0 - q_2$	$C_i = \frac{T}{T_i} = \frac{q_0 + q_1 + q_2}{K}$	$C_D = \frac{T_D}{T} = \frac{q_2}{K}$
P	$\frac{1}{K_p} \frac{T_n}{T_u + T_n}$	0	0
PS	$\frac{1}{K_p} \left[\frac{0.9 T_n}{T_u + 0.5 T} - \frac{0.13 T_n T}{(T_u + 0.5 T)^2} \right]$	$\frac{1}{K_p} \frac{0.27 T_n T}{(T_u + 0.5 T)^2}$	-
PSD	$\frac{1}{K_p} \left[\frac{1.2 T_n}{T_u + T} - \frac{0.3 T_n T}{(T_u + 0.5 T)^2} \right]$	$\frac{1}{K_p} \frac{0.6 T_n T}{(T_u + 0.5 T)^2}$	$\frac{1}{K_p} \frac{0.5 T_n}{T}$

Riadiaci zásah určíme podľa Takahashiho:

$$u(k) = u(k-1) + \underbrace{K}_{C_p} [-y(k) + y(k-1)] + \underbrace{\frac{T}{T_i}}_{C_i} (w(k) - y(k)) + \underbrace{\frac{T_D}{T}}_{C_D} (2y(k-1) - y(k-2) - y(k))$$

Dosadením za K , C_i , C_D dostaneme rekurentný výpočet riadiaceho zásahu.

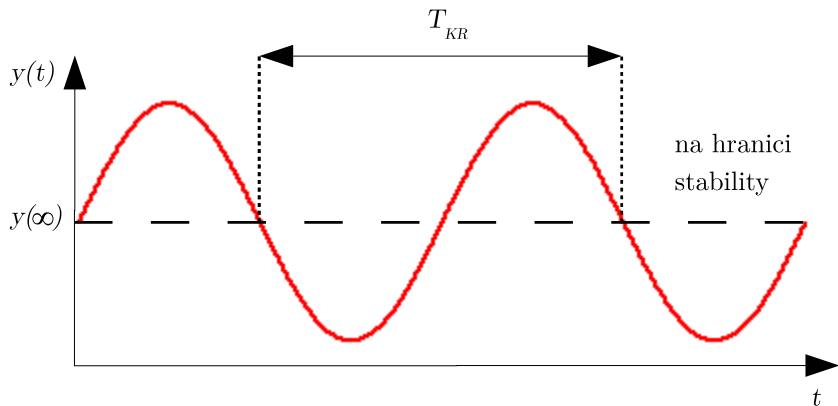
2. Ziegler-Nicholsova metódam kritických parametrov (2. modifikácia)

- Metóda je použiteľná pre lineárne spojité a diskkrétne riadiace obvody
- **Princíp:** Riadiaci obvod privedieme do kritického stavu (t.j. na kmitavú medz stability) a súčasne regulátor pracuje iba s proporcionálnou zložkou, teda $T_D = 0$, $T_i = \infty$.

a) postup pri experimentálnom riešení:

- 1 vyradíme integračnú a derivačnú zložku regulátora $T_D = 0$, $T_i = \infty$
- 2 postupne zvyšujeme zosilnenie regulátora K_R , až obvod začne kmitať s konštantnou amplitúdou (dosiahne kmitavú medz stability)
- 3 hodnotu zosilnenia regulátora K_R , pri ktorej riadiaci obvod je na hranici stability označíme ako $K_R = K_{RKR}$ periódu kmitov nazývame **perióda kritických kmitov** $T = T_{KR}$
- 4 konštanty regulátora nastavíme s využitím hodnôt K_{RKR} a T_{KR}

Graficko - analytické metódy určenia koeficientov PID a PSD regulátorov



Obr.: Nastavenie regulátora s využitím hodnôt K_{RKR} a T_{KR}

Graficko - analytické metódy určenia koeficientov PID a PSD regulátorov

Tabuľka: Nastavenie hodnôt parametrov spojitého PID regulátora z K_{KR} a T_{KR}

Typ regulátora	$r_0 = K$	T_i	T_D
P	$0.5K_{RKR}$	-	-
PI	$0.45K_{RKR}$	$0.83T_{KR}$	-
PD	$0.4K_{RKR}$	-	$0.05T_{KR}$
PID	$0.6K_{RKR}$	$0.5T_{KR}$	$0.12T_{KR}$

Ziegler - Nichols pre PID: $F_R(s) = r_0(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s)$

Nastavenie hodnôt parametrov spojitého PID regulátora z K_{KR} a T_{KR}

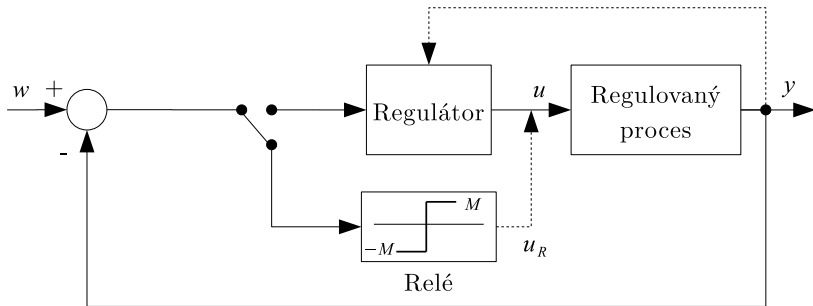
Tabuľka: Nastavenia konštánt PSD regulátora zo znalosti K_{KR} a T_{KR}

Typ regulátora	$C_P = K$	$C_i = \frac{T}{T_i}$	$C_D = \frac{T_D}{T}$
P	$0.5K_{KR}$	-	-
PS	$0.45K_{KR} - \frac{0.27T}{T_{KR}}$, ak $T \cong 4T_u$	$0.54 \frac{T}{T_{KR}}$	-
PSD	$0.6K_{KR} - \frac{0.6K_{KR}T}{2T_{KR}}$, ak $T \cong$	$1.2K_{KR} \frac{T}{T_{KR}}$	$\frac{3}{40} \frac{K_{KR}T_{KR}}{T}$

Poznámka: Klasický postup (Z-N metódy) → modifikovaný Ästromom → aplikuje sa pre praktické úlohy regulácie → rozšírime o obvod s RELÉ, kt. je aktivované na začiatku regulácie alebo počas jej priebehu

Nastavenie hodnôt parametrov spojitého PID regulátora z K_{KR} a T_{KR}

- ak nemáme matematický model procesu \Rightarrow manuálny spôsob nastavovania koeficientov regulátora:
 - 1 $T_D = 0, T_i = \infty, K \rightarrow$ kmitavý tlmený priebeh
 - 2 $T_i \rightarrow$ volíme tak, aby bol priebeh silno kmitavý
 - 3 $T_D \rightarrow \gg$ kmitavý priebeh utlmiť
- ak nevieme, či je nastavenie správne - využijeme **VODIACU GRAFICKÚ PREDLOHU PRE NASTAVOVANIE SPÄTNOVÄZOBNÉHO REGULÁTORA**



Nastavenie hodnôt parametrov spojitého PID regulátora z K_{KR} a T_{KR}

- rozkmitanie URO $\Rightarrow K_{KR}$ a $T_{KR} = \frac{2\pi}{\omega_{KR}} \rightarrow$ po výpočte koeficientov regulátora sa relé odpojí a nastaví sa koeficienty spojitého alebo diskrétného regulátora
- riadiaci zásah z relé u_R môže nadobúdať dve hodnoty $\pm M$ (obdĺžnikový priebeh) $\Rightarrow y$ kmitá s periodickým sínusovým priebehom \Rightarrow na základe F_E relé $\Rightarrow K_{KR}$ a $T_{KR} \rightarrow$ koeficienty regulátora

$$K_{KR} = \frac{4M}{\pi e_{MAX}},$$

kde e_{MAX} je maximálna hodnota regulačnej odchýlky a M je amplitúda relé

ZÁVER: Navrhnutý regulátor je robustný, ale kvalita nie je vysoká \Rightarrow 1. odhad!

EXPERIMENTÁLNA METÓDA:

- priame nastavovanie koeficientov regulátora v napojení na reálny proces
- vychádzajú z rozboru **dynamických vlastností** jednoparametrových alebo viacparametrových regulačných obvodov a zo skúseností technológov, operátorov v riadení rôznych typov procesov (chemické, tepelné, energetické procesy, robotické systémy)
- výhoda - jednoduchosť
- nevýhoda - malá presnosť

b) postup pri analytickom riešení získania K_{KRIT} a T_{KRIT} pre uzavretý regulačný obvod

Analytický výpočet K_{KRIT} a T_{KRIT} - ak nevieme zostaviť experiment pre získanie K_{KRIT} a T_{KRIT} :

- musíme vypočítať K_{KRIT} a T_{KRIT} , ktoré charakterizujú kmitavú medz stability
- môžeme využiť Nyquistovo a Michajlovo kritérium stability

Príklad: Nech je daný proces $F_P(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$. Navrhnite parametre PID regulátora Ziegler-Nicholsovou metódou výpočtom kritických parametrov K_{KRIT} a T_{KRIT} .

Riešenie:

- 1 Pre otvorený riadiaci obvod iba s P regulátorom platí:

$$F_0(j\omega) = \frac{K_R}{(j\omega + 1)^3} = \underbrace{\frac{(1 - 3\omega^2)K_R}{(\omega^2 + 1)^3}}_{\text{Re}[F_0]} - j \underbrace{\frac{\omega(3 - \omega^2)K_R}{(\omega^2 + 1)^3}}_{\text{Im}[F_0]}$$

- 2 Podmienky pre hranicu stability:

$$\operatorname{Im}\{F_0(j\omega)\} = 0 \Rightarrow \omega_K = \sqrt{3} \Rightarrow T_{KR} = \frac{2\pi}{\omega_{KR}} = 3.62$$

$$\operatorname{Re}\{F_0(j\omega)\} = -1 \Rightarrow K_{KR} = \frac{(\omega_K^2 + 1)^3}{3\omega_K^2 - 1} = 8$$

- 3 Parametre regulátorov \rightarrow podľa tabuľky Nastavenie hodnôt spojitého PID regulátora z K_{KR} a T_{KR} :

$$K = 0.6K_{KR} = 4.8; r_0 = K = 4.8$$

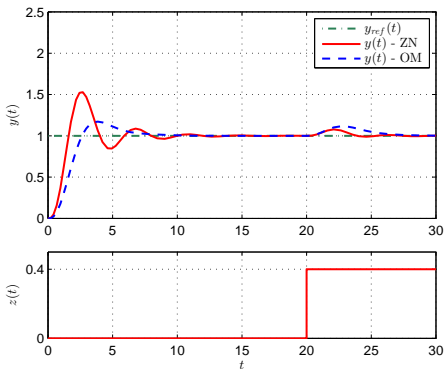
$$T_i = 0.5T_{KR} = 1.813\text{s}; r_{-1} = \frac{K}{T_i} = 2.647$$

$$T_D = 0.12T_{KR} = 0.435\text{s}; r_1 = KT_D = 2.088$$

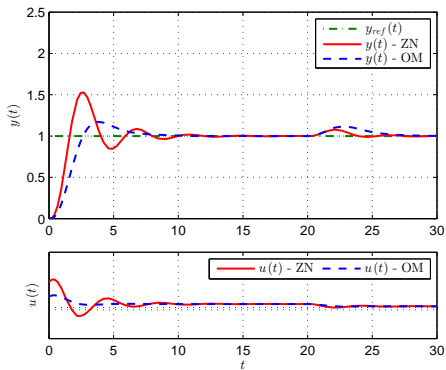
4 $F_R(s) = 4.8 \left(1 + \frac{1}{1.813s} + 0.435s\right) = 4.8 + \frac{2.647}{s} + 2.088s$

$$5 \quad F_{Y/W}(s) = \frac{2.088s^2 + 4.8s + 2.647}{s^4 + 3s^3 + 5.088s^2 + 5.8s + 2.647}$$

Vo väčšine prípadov vedie Ziegler-Nicholsova metóda k pomerne málo tlmenému procesu riadenia



Obr.: Prechodová charakteristika URO s PID regulátorom



Obr.: Prechodová charakteristika URO s PID regulátorom a časový priebeh akčného zásahu $u(t)$