

Návrh regulačných obvodov pomocou vybraných metód a ich porovnanie

Birkus Peter · Elektrotechnika, Študentské práce

15.02.2012



Cieľom tejto práce je oboznámenie sa s vybranými spojitými a diskretnými metódami návrhu regulačných obvodov. Pomocou týchto metód vykonáme syntézu regulačného obvodu, s použitím regulátorov štruktúry PID. Po syntéze a odsimulovaní v prostredí MATLAB

Simulink si spravíme vyhodnotenie kvality regulácie pomocou prechodových charakteristík uzavretých regulačných obvodov navrhnutých jednotlivými metódami. Ako vzorový proces pre reguláciu som si vybral proces regulácie ohrevu elektrickej pece.

1. Úvod

Práca sa opiera o základné poznatky z Teórie automatického riadenia, ktorá skúma princípy fungovania a konštruovania riadiacich systémov. Ľudstvo sa odjakživa snažilo o zjednodušenie a uľahčenie fyzickej i duševnej práce. Keďže človek je tvor učentlivý a tvorivý, postupom času sa mu podarilo nahradiť seba strojmi a zariadeniami, ktoré vykonávajú prácu namiesto neho. Hlavným cieľom bolo eliminovanie ťažkej, monotónnej, namáhavej práce a to čím rýchlejšie a presnejšie. Dôsledkom týchto požiadaviek sa časom vytvoril odbor Automatizácia.

Automatizácia je etapa rozvoja techniky, v ktorom sa vykonávajú výrobné, riadiace a iné procesy bez priameho zásahu človeka. Pomocou strojov a zariadení sa uskutočňuje samočinné riadenie i vykonávanie týchto procesov. Automaticky riadené a automaticky pracujúce stroje a zariadenia výraznou mierou pomáhajú človeku pri práci. Súčasne sa mnohonásobne zvyšuje produktivita i kvalita práce. Práve vďaka týmto skutočnostiam sa záujem o automatizáciu v spoločnosti rozrastá.

Spolu s automatizáciou sa vyvíja aj vedná disciplína Kybernetika, ktorá sa zaoberá riadením technických, ekonomických, biologických a iných systémov. Úlohou tohto riadenia je aby všetky procesy prebiehali udaným spôsobom. Cieľom tejto práce je predstavenie teórie návrhu regulátorov štruktúry PID pomocou rôznych spojitých a diskretných metód a ich následným výpočtom na vzorovom procese. Jednotlivé metódy budeme postupne porovnávať z hľadiska kvality regulácie. Pomocou aplikácie MATLAB si overíme naše výpočty a premietneme si ich v grafickej podobe.

2. Syntéza regulačných obvodov

Pred tým ako začneme navrhovať regulačné obvody si musíme určiť požiadavky, podmienky a obmedzenia pre náš návrh. Regulačný obvod musí vyhovovať požiadavkám na stabilitu, presnosť v ustálenom stave a kvalitu v prechodovom stave pri riadení i potláčaní vplyvu porúch. Ďalej musíme dbať na to aby jednotlivé časti obvodu vyhovovali požiadavkám na spoľahlivosť, údržbu, cenu, typizáciu, pracovné prostredie, štruktúru regulátorov atď. Pri návrhu musíme poznať vlastnosti riadeného systému, predpokladaný priebeh riadiacej i poruchovej veličiny, obmedzenie akčných veličín, požiadavky na kvalitu a stabilitu riadenia. Tieto vlastnosti si musíme vyjadriť matematickými modelmi.

Na určenie čo najlepších parametrov regulačného obvodu vzhľadom na dané požiadavky sa návrh robí rôznymi metódami v spojitých i diskretných priebehoch. Ďalej budeme pracovať iba s regulátormi so štruktúrou PID. Návrh regulačných obvodov budeme robiť pomocou vybraných spojitých a diskretných, ktoré patria do skupiny graficko-analytických metód. Spojité metódy:

- Zieglera-Nichols
- Graficko-analytické z nameranej prechodovej charakteristiky
- Inverzia dynamiky

Diskrétné metódy

- Inverzia dynamiky
- Deadbeat s ohraňčením akčného zásahu a bez ohraňčenia akčného zásahu

2.1 Metóda Ziegler a Nicholosa

Metóda je experimentálna metóda pre nastavenie optimálnych hodnôt koeficientov PID regulátora, ktorý je opísaný prenosovou funkciou v iteračnom tvare

$$G_R(s) = P(1 + 1/T_I s + T_D s) \quad (1)$$

Základ tejto empirickej metódy návrhu je založený na nájdení kritického zosilnenia P_k uzavretého regulačného obvodu a periódy T_k príslušných netlmených kmitov riadenej veličiny. Kritickú frekvenciu a kritické zosilnenie môžeme nájsť na frekvenčnej charakteristike alebo pomocou skúšania na reálnej sústave napríklad zapojením proporcionálneho regulátora a následne zvyšujeme P , až pokiaľ nedosiahneme hranicu stability. Potom môžeme označiť kritické zosilnenie regulátora ako P_k a kritickú periódu kmitov na dosiahnutej hranici stability ako T_k . Parametre regulátora vypočítame pomocou tabuľky Tab.1.

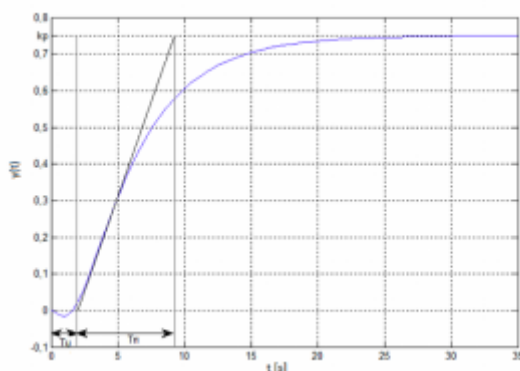
Tab. 1. Parametre regulátora – Ziegler-Nichols

Tvar regulátora	Zosilnenie regulátora P	Integračná časová konštanta T_I	Derivačná časová konštanta T_D
Typ P	$0,5 P_k$	-	-
Typ PI	$0,45 P_k$	$0,85 T_k$	-
Typ PID	$0,6 P_k$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$
Typ PD	skusmo	-	$0,12 T_k$

Z prevádzkových dôvodov nie je vždy možné vybudíť systém až na hranicu stability. Vtedy ak máme k dispozícii prenosovú funkciu $G_{Y/W}(s)$ s P - regulátorom, môžeme určiť kritické P_K a T_K výpočtom. Alebo použijeme modifikovanú metódu Zieglera a Nicholosa, ktorej základná myšlienka spočíva vo vyvolaní trvalých kmitov v regulačnom obvode zapojením nelineárneho člena s reléovou charakteristikou do regulačného obvodu. Pre takýto nelineárny regulačný obvod s využitím metódy ekvivalentných prenosových funkcií sa dajú výpočtom určiť kritické P_K a T_K . V praxi sa môžeme stretnúť aj s prípadom, kedy uzavretý regulačný obvod je stabilný pre všetky kladné hodnoty P . Potom neexistuje kladné P_K , preto uvedená metóda v takomto prípade je nepoužiteľná.

2.2 Graficko - analytické metódy [7]

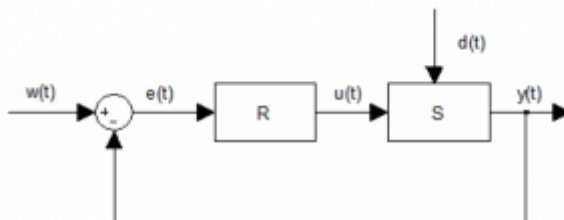
Graficko - analytickými metódami vieme určiť parametre regulačného člena, pomocou odsimulovanej prechodovej charakteristiky danej regulovanej sústavy. Prechodová charakteristika nám udáva reakciu otvoreného obvodu s regulovanou sústavou na jednotkový skok. Na prechodovej charakteristike si určíme inflexný bod, ku ktorému spravíme prislúchajúcu dotyčnicu. Priesečníky dotyčnice pri nule a pri ustálenej hodnote nám udávajú hodnoty T_u a T_n . Zosilnenie K_p je hodnota ustálenej veličiny. Pomocou týchto odsimulovaných údajov si určíme jednotlivé zložky regulátorov PID a to buď metódou Zieglera - Nicholosa (Tab.4), Cohen - Coona (Tab.5) alebo metódou integrálneho súčinu času a absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky ITAE (Tab. 6). (Tabuľky vid' v prílohe)



Obr. 1. Určenie konštánt T_u a T_n z prechodovej charakteristiky procesu.

2.3 Metóda inverzie dynamiky [9]

Pomocou metódy inverzie dynamiky sa ľahko a rýchlo navrhujú štandardné typy analógových a číslicových regulátorov pre základné typy regulovaných sústav s dopravným oneskorením. Typ regulátora je doporučený z hľadiska vlastností regulovanej sústavy a požiadavky na nulovú trvalú regulačnú odchýlku spôsobenú skokovou zmenou polohy žiadanej veličiny, resp. poruchy pôsobiacej na výstupe regulovanej sústavy.



Obr.2. Regulačný obvod s vyžitím regulačnej odchýlky

Regulátory

Predpokladá sa použitie štandardných analógových a číslicových regulátorov s príslušnými L a Z prenosmi podľa Tab.2.

Tab. 2. Metóda Ziegler - Nicholosa

Typ	Analógový regulátor	Číslicový regulátor
P	k_p	k_p
I	$\frac{1}{T_I s}$	$\frac{T}{T_I} \frac{z}{z-1}$
PD	$k_p(1 + T_D s)$	$k_p(1 + \frac{T_D}{T} \frac{z-1}{z})$
PI	$k_p(1 + \frac{1}{T_I s})$	$k_p(1 + \frac{1}{T_I s} \frac{z}{z-1})$
PID	$k_p(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)$	$k_p(1 + \frac{1}{T_I s} \frac{z}{z-1} + \frac{T_D}{T} \frac{z-1}{z})$

Regulované sústavy

Pre použitie metódy inverzie dynamiky, musí byť prenos regulovanej sústavy $G_S(s)$ v jednom zo základných tvaroch uvedených v Tab. 7 (viď príloha). Aperiodické regulované sústavy budú v tvaroch

$$\begin{aligned}
 G_S(s) &= \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_{d1}s} \\
 G_S(s) &= \frac{k_1}{(T_2 s + 1)^2} e^{-T_{d2}s} \\
 G_S(s) &= \frac{k_1}{(T_n s + 1)^n} e^{-T_{dn}s}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Pre získanie prenosu v niektorom zo zostávajúcich tvarov je nutné použiť vhodné identifikačné či aproximačné metódy. (viď príloha Tab.8)

Nastavenie regulátorov:

Na základe metódy inverzie dynamiky a následného simulačného upresnenia sme získali tabuľky Tab. 7 a Tab. 8, ktoré umožňujú jednoduché a rýchle určenie hodnôt nastaviteľných parametrov doporučených regulátorov. Pre regulované sústavy bez dopravného oneskorenia ($T_d = 0$) sa predpokladá požadovaný priebeh prechodovej charakteristiky $h_w(t)$ uzavretého regulačného obvodu podľa obr.3. Časová konštanta T_w musí byť zvolená s ohľadom na obmedzenie akčnej veličiny a maximálnou nastaviteľnou hodnotou zosilnenia regulátora $k_{p_{\max}}$ a u regulačného obvodu s číslicovým regulátorom musí platiť:

Formula does not parse

(4)

sa určia pre doporučený typ regulátora z tab.7 zodpovedajúce hodnoty jeho nastaviteľných parametrov. Ak dopravné oneskorenie T_d je veľmi malé, hodnotu určeného koeficientu a je treba vhodne znížiť s ohľadom na obmedzenie akčnej veličiny a maximálnu nastaviteľnú hodnotu zosilnenia regulátora k_{pmax} . Presnosť riadenia je okolo 5% u číslicových regulátoroch a u analógových je podstatne lepšia. Požadovaný priebeh je možno doladiť vhodnou úpravou zosilnenia regulátora k_p . Pri volbe periódy vzorkovania T u číslicových regulátoroch je treba splniť podmienky

$$\begin{aligned} T &\leq 0.3T_d \\ T &\leq \left(\frac{1}{15} \div \frac{1}{6}\right) t_{0.95} \end{aligned} \quad (5)$$

kde $t_{0.95}$ je doba, za ktorú prechodová charakteristika regulovanej sústavy $h_s(t)$ dosiahne 95% svojej ustálenej hodnoty, T_d je dopravné oneskorenie regulovanej sústavy.

2.4 Dead - beat regulátor [1]

Pre spojitý systém určený prenosovou funkciou $G_p(s)$ je v sérii zapojený tvarovač nultého rádu tak potom pre $G_p(z)$ platí:

$$G_P(z) = (1 - z^{-1})Z \left\{ L^{-1} \left[\frac{G_p(s)}{s} \right]_{t=kT} \right\} \quad (6)$$

kde z predstavuje argument, Z je operátor diskkrétnej transformácie a L^{-1} je operátor Laplaceovej transformácie. Pre systém popísaný prenosom $G_p(s)$ bude diskrétna transformácia vyzeráť.

$$G_P(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} = \frac{Y(z)}{U(z)} \quad (7)$$

referenčná premenná je jednotkový skok

$$w(k) = 1, \text{ pre } k = 0, 1, \dots$$

ak M bude udávať minimálny počet krokov na ukončenie regulácie, tak podmienky ukončenia sú

$$\begin{aligned} y(k) &= w(k) = 1, \text{ pre } k \geq M \\ u(k) &= u(M) = 1, \text{ pre } k \geq M \end{aligned} \quad (8)$$

príslušné Z-obrazy veličín

$$W(z) = \frac{1}{1-z^{-1}}$$

Formula does not parse

Formula does not parse

(9)

prenosová funkcia riadenia

$$G_{Y/W}(z) = \frac{Y(z)}{W(z)} = p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_M z^{-M} = P(z) \quad (10)$$

$$p_1 = y(1)$$

$$p_2 = y(2) - y(1)$$

$$\vdots$$

$$p_M = 1 - y(M-1)$$

prenosová funkcia, určujúca vplyv riadiacej veličiny na akčnú veličinu

$$G_{U/W}(z) = \frac{U(z)}{W(z)} = q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2} + \dots + q_M z^{-M} = Q(z) \quad (11)$$

$$q_0 = u(0)$$

$$q_1 = u(1) - u(0)$$

$$\vdots$$

$$q_M = u(M) - u(M-1)$$

kde

$$p_1 + p_2 + \dots + p_M = 1$$

$$q_0 + q_1 + \dots + q_M = u(M) = \frac{1}{G_p(1)} = \frac{1}{k_p} \quad (12)$$

prenosová funkcia uzatvoreného regulačného obvodu

$$G_{Y/W} = \frac{G_R(z)G_P(z)}{1 - G_R(z)G_P(z)} \quad (13)$$

z toho

$$G_R = \frac{1}{G_P(z)} = \frac{G_{Y/W}(z)}{1 - G_{Y/W}(z)} \quad (14)$$

$$G_P = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{P(z)}{Q(z)} \quad (15)$$

$$G_{Y/W}(z) = P(z) \quad (16)$$

po dosadení (15) a (16) do (14) dostaneme

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{P(z)} \frac{P(z)}{1 - P(z)} = \frac{Q(z)}{1 - P(z)} =$$

$$= \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_M z^{-M}}{1 - p_1 z^{-1} - \dots - p_M z^{-M}} \quad (17)$$

určíme si konštanty regulátora bez obmedzenia akčného zásahu, $M=m$

bez dopravného oneskorenia:

$$q_1 = a_1 q_0 \quad p_1 = b_1 q_0$$

$$\dots$$

$$q_m = a_m q_0 \quad p_m = b_m q_0 \quad (18)$$

s dopravným oneskorením:

$$q_1 = a_1 q_0 \quad p_1 = 0$$

$$\begin{aligned}
 q_2 &= a_2 q_0 & p_{1+d} &= b_1 q_0 \\
 &\dots \\
 q_m &= a_m q_0 & p_{m+d} &= b_m q_0
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

q_0 je daná vzťahom

$$q_0 = u(0) = \frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_m} \tag{20}$$

v rekurentnej forme, $M=m$

$$\begin{aligned}
 u(k) &= q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + \dots + q_m e(k-m) + \\
 &+ p_1 u(k-1) + \dots + p_m u(k-m)
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

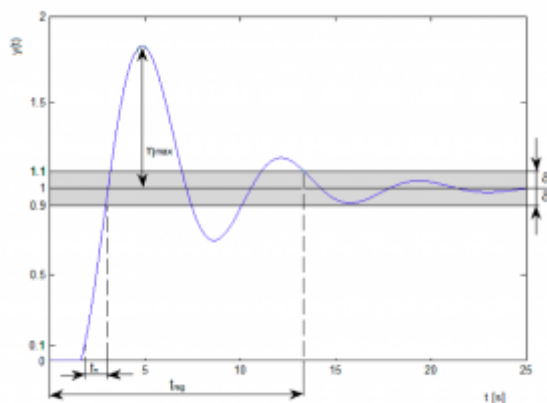
Regulácia je ukončená za M krokov, ktoré udávajú aj rád regulovanej sústavy. Akčný zásah $u(0)$ rastie pri znižovaní periódy vzorkovania T , tým že sa znižuje čas regulácie. Pri návrhu deadbeat regulátorov treba brať túto skutočnosť do úvahy s ohľadom na fyzikálne možnosti riadenej sústavy. Pri niektorých návrhoch sa berie do úvahy obmedzenie akčnej veličiny. Keď $u(0)$ nesmie prekročiť danú hodnotu, vtedy robíme návrh deadbeat regulátora s obmedzením akčnej veličiny, kde

$$\begin{aligned}
 G_R(z) &= \frac{Q(z)}{P(z)} \frac{P(z)}{1-P(z)} = \frac{Q(z)}{1-P(z)} = \\
 &= \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_M z^{-M}}{1 - p_1 z^{-1} + \dots + p_M z^{-M}}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

určíme si konštanty regulátora s obmedzením akčného zásahu kde $q_0 = u(0)$. Výpočet ostatných konštant regulátora sa robí pomocou ďalších odvodených výpočtových rovníc.

2.5 Kvalita riadenia v prechodových stavoch

Úlohou regulačného obvodu je čo najlepšie sledovanie zmien riadiacej veličiny $w(t)$ riadenou veličinou $y(t)$. Pri vyhodnocovaní kvality regulačného obvodu v prechodových stavoch vychádzame väčšinou z odozvy regulačného obvodu na jednotkový skok, tj. z prechodovej charakteristiky. Z dôvodu zotrvačnosti regulačného obvodu nám vzniká oneskorenie medzi riadiacou a riadenou veličinou. Na vyhodnotenie kvality regulácie v prechodových stavoch si ukážeme niektoré základné kritériá prechodových charakteristík, ktoré sú ilustrované na obr.4.



Obr. 4. Prechodová charakteristika URO

Čas regulácie

Čas regulácie t_{reg} sa definuje ako interval s hranicami od okamihu jednotkového skoku riadiacej veličiny $w(t)$ až po okamih keď riadená veličina posledný krát pretne pásmo necitlivosti $\pm\delta$ na prechodovej charakteristike.

Čas nábehu

Čas nábehu t_n je čas ktorý uplynie počas nábehu prechodovej charakteristiky od 10 do 90 percent jej ustálenej hodnoty. So skracovaním tohto času sa nám zvyšuje frekvenčná priepustnosť regulačného obvodu.

Maximálne preregulovanie

Definujeme ho ako rozdiel maximálnej hodnoty prechodovej charakteristiky a jej ustáleného hodnoty. Väčšinou sa pripúšťa maximálne preregulovanie v rozmedzí od 5 - 50 % . Sú však prípady keď nie je prípustné žiadne preregulovanie, vtedy je systém silne aperiodický. Sú to systémy so zápornými reálnymi pólmi a bez prenosových núl.

$$\eta_{max} = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 [\%] \quad (23)$$

Čas oneskorenia

Čas oneskorenia t_d je čas potrebný na dosiahnutie 50% ustálenej hodnoty prechodovej charakteristiky regulačného obvodu.

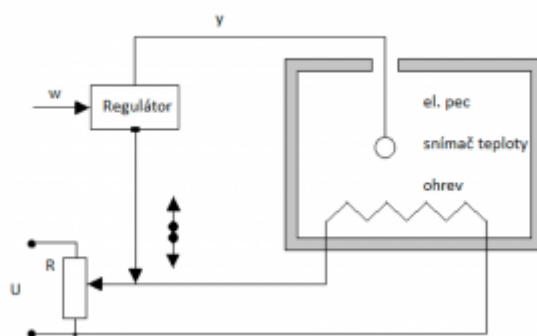
Ďalšie kritériá

- integrálne kritérium kvality riadenia
- kritérium lineárnej regulačnej plochy
- kritérium absolútnej regulačnej plochy
- kritérium časom váhovanej regulačnej plochy
- kritérium kvadratickej regulačnej plochy
- kritérium časom váhovanej kvadratickej regulačnej odchýlky

3. Regulovaný proces - el. pec

Teplota elektrickej pece sa reguluje pomocou zmeny príkonu. Sníma sa skutočná teplota, podľa ktorej je pomocou riadiaceho algoritmu vykonaná zmena príkonu. Principiálna schéma regulácie ohrevu elektrickej pece je na obr.5. Tento proces nám opisuje vopred známa prenosová funkcia (24). Pomocou tejto prenosovej funkcie pre model regulácie ohrevu elektrickej pece navrhujeme spojité a diskrétne regulátory rôznymi metódami, ktoré budeme postupne porovnávať a vyhodnocovať z hľadiska kvality regulácie.

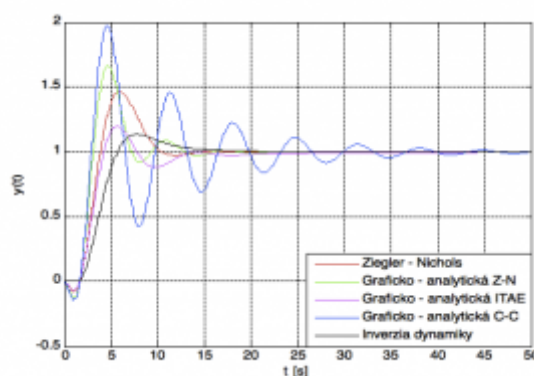
$$G_p(s) = \frac{k}{as^2 + bs + c} e^{-T_d s} \quad (24)$$



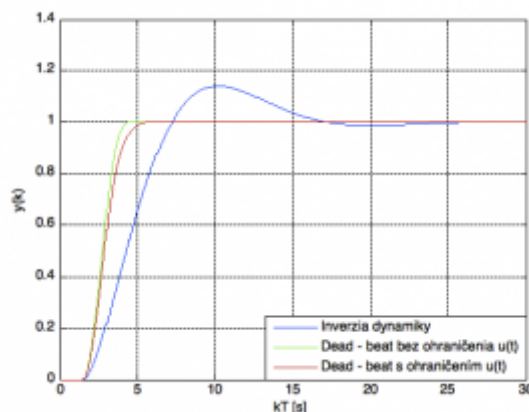
Obr.5 Bloková schéma regulácie elektrickej pece

5. Porovnanie jednotlivých navrhnutých regulačných obvodov

Pomocou vybraných spojitých a diskrétnych metód sme si navrhli regulátory so štruktúrou PID, ktoré sme následne aj porovnali a vyhodnotili pomocou programu MATLAB Simulink. Vyhodnocovať metódy návrhu PID regulátorov sme robili na prechodových charakteristikách uzatvorených regulačných obvodov podľa kritéria času regulácie t_{reg} , času nábehu t_n a maximálneho preregulovania η_{max} . Pre určenie času regulácie sme si zvolili pásmo necitlivosti $\pm\delta = 5\%$.



Obr. 6 Prechodové charakteristiky URO pre spojité regulátory



Obr. 7 Prechodové charakteristiky URO pre diskkrétne regulátory

Tab. 3. Porovnanie jednotlivých metód

Metóda	t_{reg} [s]	t_n [s]	η_{max} [%]
Spojité			
Ziegler - Nichols	9.664	1.645	46.29
Graficko - analytická Z-N	12.056	1.094	66.01
Graficko - analytická ITAE	11.94	1.928	20.14
Graficko - analytická C-C	32.035	0.961	97.11
Inverzia dynamiky	11.836	2.81	11.38
Diskrétna			
Inverzia dynamiky	14.461	3.992	14
Dead - beat bez ohraničenia $u(t)$	3.842	1.606	0.2
Dead - beat s ohraničením $u(t)$	4.435	1.99	0.2

6 Záver

Pomocou tabuľky tab.3 sme si vyhodnotili jednotlivé metódy syntézy regulačného obvodu pre ohrev elektrickej pece z hľadiska kvality a stability v prechodových stavoch. Merania a simulácie sme uskutočňovali na našom vzorovom procese (24) zapojeným do uzavretého regulačného obvodu. Z nameraných hodnôt nám vyplýva, že pre náš konkrétny proces je zo spojitých regulátorov najvhodnejší regulátor navrhnutý pomocou metódy Inverzie dynamiky a z diskrétnych regulátorov je najlepší regulátor navrhnutý metódou Dead - Beat bez ohraničenia akčného zásahu. Tieto dva regulátory potrebovali najmenší čas na dosiahnutie žiadanej regulačnej presnosti a pritom regulovali s najmenšou prereguláciou.

Literatúra

1. Harsányi L., Murgaš J., Rosinová D., Kozáková A. : Teória automatického riadenia, 1.vydanie, Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1998, 216s, ISBN 80-227-1098-9
2. Tůma J., Wangnerová R., Farana R., Landryová L. : Základy automatizace, 1.vydanie, Ediční středisko VŠB - TUO, 2007, 283s, ISBN 978-80-248-1523-7
3. Kozák Š. : Lineárne číslicové systémy 1, 1.vydanie, Editačné stredisko STU v Bratislave, 1991, 241s, ISBN 80-227-0435-

4. Kozák Š. : Lineárne číslicové systémy, Příklady na cvičenia, 1.vydanie, Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1995, 207s, ISBN 80-227-0767-8
5. Huba M., Hubinský P., Žáková K. : Teória automatického riadenia 1, 2.vydanie, Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2008, 418s, ISBN 978-80-227-3000-6
6. Zítek P., Hofreiter M., Hlava J. : Automatické řízení, Vydavatelství ČVUT Praha, 2001, 148s, ISBN 80-01-02044-4
7. Kozák, Š.: Graficko-analytické metody určovania koeficientov spojitých a diskretných regulátorov, ATP journal, č.7,ročník IV, 1997
8. STU v Bratislave, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Teória automatického riadenia 1, dostupné na internete:
<http://www.kar.elf.stuba.sk/tar/tar1/test/iks/literatura.php>
9. Vítečková ,M.: Syntéza číslicových a analogových regulačních obvodů metodou inverze dynamiky, Habilitační práce, FS VŠB-TU Ostrava,1996

Prílohy

Tabuľky a vzorce ku článku

Spoluautorom článku je Ing. Mária Dúbravská, Ústav riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita, 812 19 Bratislava, Slovenská republika

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Kybernetika a robotika a získala Cenu SSKI, ISBN 978-80-227-3508-7
