

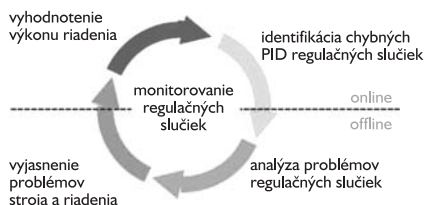
Nastavovanie regulačných slučiek

Monitorovanie slučiek PID regulátorov samo o sebe nerieši v globále problematiku neefektívneho riadenia, pomáha však zvýšiť jeho účinnosť.

Starostlivosť o regulátory, regulačné slučky a optimalizáciu ich výkonu je predmetom integrovanej údržby, ktorá vyžaduje spoluprácu prevádzkových operátorov, technikov riadenia a nadriadených pracovníkov (obr. 1).

Aby sa zabezpečil optimálny výkon regulačných slučiek, treba v rámci tejto integrovanej stratégie vykonať niekoľko dôležitých činností:

- Zber, trendy a získavanie informácií o histórii PID slučiek s adekvátnou frekvenciou s cieľom analyzovať výkon regulačných slučiek.
- Vytvorenie funkcií na zobrazenie a reportovanie, vďaka ktorým bude jednoduché určiť chyby v regulačných slučkách.
- Zahnúť do procesu aj analýzy a ukazovatele výkonu z pohľadu technikov riadenia procesov alebo technikov prevádzkových prístrojov s cieľom určiť problémy v regulačných slučkách.
- Opraviť nepresne fungujúce PID slučky alebo ich nastaviť tak, aby boli dodržané mechanické obmedzenia procesu/zariadenia. Využiť pri tom identifikáciu modelu procesu, ladenie PID slučiek a simulačné nástroje.
- Získavať historické informácie a vykonávať analýzu PID na základe termínov v plánovanej údržbe a/alebo podľa aktuálnych potrieb.



Obr.1 Integrovaný proces monitorovania PID slučiek – úlohy monitorovania možno rozdeliť na online a offline

Online monitorovanie výkonu riadenia

Cieľom online režimu monitorovania a zapojenia používateľa do tohto procesu je výpočet a zobrazenie výkonových metrik regulačných slučiek v reálnom čase, pričom sa určujú zmeny vo výkone regulátora alebo skupiny regulátorov a označujú a uprednostňujú tie regulačné slučky, ktoré vyžadujú pozornosť alebo sú potenciálnym zdrojom problému.

Offline riešenie problémov riadenia

Aj keď je monitorovanie výkonu slučiek potrebné, stále to nestačí na dosiahnutie optimálneho výkonu riadenia. Na pomoc pri ana-

lyze problémov výkonu riadenia, ich účinného vyriešenia alebo vykonanie vyladenia pri dodržaní obmedzení procesov/zariadení sú potrebné ďalšie nástroje.

Systém na monitorovanie výkonu ponúka pre technikov údržby a riadenia procesov aj offline režim, kde možno realizovať:

- odstraňovanie porúch výkonu chybných regulácií a riadenia,
- konfigurácia ohraničení akčných zásahov regulátora ako súčasť zisťovania zmeny výkonu regulátora,
- oprava zle vyladených PID slučiek.

Prvá uvedená funkcia odstraňovania porúch sa využíva potom, ako bol výkon regulátora identifikovaný ako podozrivý. V takomto prípade sú rôzne výsledky merania výkonu podkladom pri lokalizácii problému riadenia. Následne bude možno ešte potrebné preskúmať ďalšie historické množiny údajov a vykonať skokový test regulačnej slučky, aby sa presne určila príčina chyby riadenia.

Druhá funkcia týkajúca sa konfigurácie je nevyhnutná na definovanie výkonových ukazovateľov pre akceptovateľné správanie riadenia. Táto funkcia vyžaduje znalosť fyzického procesu, návrhu slučiek a cieľov riadenia vrátane ekonomických a v niektorých prípadoch vyžaduje aj historické údaje z prevádzky. Aby sa dosiahli použiteľné výsledky, bude nevyhnutné vykonať výpočet výkonových ukazovateľov v určitých intervaloch histórie.

Keď je už nejaká slučka vybratá ako kandidát na zlepšenie, ďalším krokom je vyriešenie identifikovaného problému výkonu riadenia. Ak je to možné, tak cez preladenie slučky alebo opravu/údržbu mechanického problému. Medzi dôležité funkcie offline analýzy na opravu chybnej regulačnej slučky patria identifikácia modelu procesu, určenie optimálnych parametrov regulátora a simulácia používateľom definovaného nastavenia (ešte pre implementáciu).

V nasledujúcej časti sú opísané rôzne prístupy týkajúce sa problematiky nastavovania parametrov regulátorov či už v otvorenej alebo uzavretej slučke.

Pravidlá ladenia v otvorenej regulačnej slučke založené na približnom modeli procesu

Prechodová charakteristika procesu

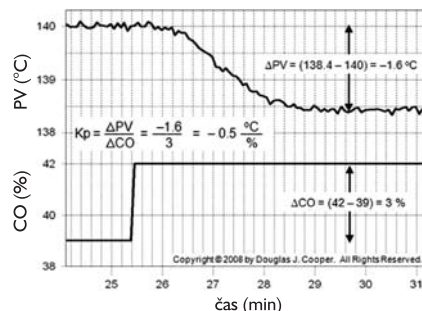
Prechodová charakteristika predstavuje približný model procesu prvého rádu plus oneskorenie. Prechodovú charakteristiku možno

získať skokovým testom v otvorenej slučke a určiť tak parametre modelu procesu. Postup môže vyzeráť takto:

- Nastavte regulátor do manuálneho režimu.
- Počakajte, kým sa regulovaná veličina (y) ustáli a nebude vykazovať zmeny.
- Vykonajte skokovú zmenu na výstupe PID regulátora – skok musí byť dostatočne veľký, aby bolo možné pozorovať zásadné zmeny regulovanej veličiny. Malo by sa dodržať pravidlo, že pomer medzi signálom a šumom/poruchou by mohol byť väčší ako 5.
- Namerajte údaje a zakreslite priebeh regulovanej veličiny.
- Zopakujte to isté s tým, že skok urobte do opačnej strany.
- Zosilnenie procesu K_p

$$K_p = \frac{\text{zmena meranej veličiny}}{\text{zmena veličiny na výstupe regulátora}}$$

Proces: výmenník tepla Regulátor: manuálny režim



Obr.2 Výpočet zosilnenia procesu

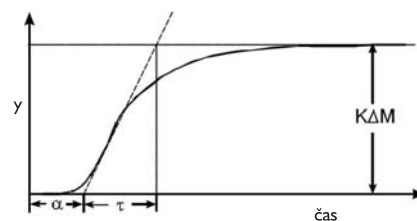
Pravidlá ladenia parametrov regulátora v otvorenej slučke

Pri určovaní parametrov regulátora budeme vychádzať z nameranej prechodovej charakteristiky, ktorá je zobrazená na obr. 3.

Vyladenie regulátorov môžeme potom realizovať pomocou rôznych metód, pričom v praxi sa možno stretnúť s prístupmi uvedenými v tab. 1, 2 a 3.

Pri uvedených metódach ladenia v otvorenej slučke a použití uvedených prístupov treba zohľadniť tieto okolnosti:

- Väčšina pravidiel ladenia má odporúčané rozsahy použiteľnosti, ktoré sa odvíjajú od pomeru α/τ . Skôr, ako tieto pravidlá použi-



Obr.3

Ziegler-Nichols			
Typ regulátora	K	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)$	–	–
PI	$\frac{0,9}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)$	$3,33\alpha$	–
PID	$\frac{1,2}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)$	$2,0\alpha$	$0,5\alpha$

Odporúčaný rozsah použiteľnosti: $1,0 < (\alpha/\tau) < 0,1$

Tab.1

Cohen-Coon			
Typ regulátora	K	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{\tau} \right) \right]$	–	–
PI	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right) \left[0,9 + \frac{1}{12} \left(\frac{\alpha}{\tau} \right) \right]$	$\alpha \left[\frac{30+3 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)}{9+20 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)} \right]$	–
PD	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right) \left[\frac{5}{4} + \frac{1}{6} \left(\frac{\alpha}{\tau} \right) \right]$	–	$\alpha \left[\frac{6-2 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)}{22+3 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)} \right]$
PID	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right) \left[\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left(\frac{\alpha}{\tau} \right) \right]$	$\alpha \left[\frac{32+6 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)}{13+8 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)} \right]$	$\alpha \left[\frac{4}{11+2 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)} \right]$

Odporúčaný rozsah použiteľnosti: $1,0 < (\alpha/\tau) < 0,1$

Tab.2

Minimálna forma ITAE				
Typ regulátora	Typ odozvy	K	τ_I	τ_D
P	poruchová veličina	$\frac{0,49}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)^{1,084}$	–	–
PI	sledovanie žiadanej veličiny	$\frac{0,586}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)^{0,916}$	$\frac{\tau}{\left[1,03 - 0,165 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right) \right]}$	–
PI	poruchová veličina	$\frac{0,859}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)^{0,977}$	$\frac{\tau}{0,674 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)^{0,680}}$	–
PID	sledovanie žiadanej veličiny	$\frac{0,965}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)^{0,855}$	$\frac{\tau}{\left[0,796 - 0,147 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right) \right]}$	$0,308\tau \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)^{0,929}$
PID	poruchová veličina	$\frac{1,357}{K} \left(\frac{\tau}{\alpha} \right)^{0,947}$	$\frac{\tau}{0,842 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)^{0,738}}$	$0,381\tau \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)^{0,995}$

Odporúčaný rozsah použiteľnosti: $1,0 < (\alpha/\tau) < 0,1$

Tab.3

jete, uistite sa, že sú pre daný proces aplikovateľné.

- Uvedené pravidlá nie sú vhodné pre integračné (sčítavacie) procesy (ako napr. riadenie výšky hladiny).
- Presvedčte sa, že PID rovnica, ktorú používa DCS systém, je zhodná so štandardnou formou. Ak nie je, transformujte nastavovacie konštanty do formy príslušnej pre tú, ktorá sa používa vo vašom DCS.

$$\text{výstup} = k_c \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} \right] + C$$

- Niektoré DCS systémy používajú v PID rovnici ováňované hodnoty. Ak je to tak, nastavované konštanty postavené na pro-

cesných inžinierskych jednotkách môžu byť nesprávne.

- Skoková zmena by mala byť vykonaná v okolí predpokladaného pracovného bodu.
- Skokovú zmenu je vhodné vykonať v oboch smeroch. Dynamika je veľmi často smerovo závislá.
- Ak je systém nelineárny, skoková zmena by sa mala vykonať v okolí najcitlivejšej (najvyššia hodnota zosilnenia K) časti očakávaného pracovného rozsahu. Ak sa to nevykoná, môže sa regulátor dostať do kmitania alebo dokonca nestability pri regulácii v tejto oblasti.
- Rôzne pravidlá nastavovania/ladenia vychádzajú z rôznych výkonových kritérií. Treba

vybrať také pravidlá ladenia, ktoré budú najbližšie k očakávanej reakcii systému

- Pamätajte, že tieto pravidlá ladenia platia pre približné modely, a teda by mohli byť štartovacím bodom pri procese nastavovania.
- Vyvarujte sa derivačného zásahu:
 - Derivačná zložka je veľmi citlivá na šum z procesov.
 - Ak sa v procese vykonajú zmeny žiadanej hodnoty, regulátor by mohol aplikovať derivačný zásah nie na chybu z procesu, ale na meranú veličinu. Ak sa derivačný zásah aplikuje na chybu, výstup z regulátora bude v špičke práve vtedy, keď sa budú vykonávať zmeny žiadanej hodnoty.
 - Derivačný zásah sa najlepšie hodí pre procesy s výrazným dopravným oneskorením.

Pravidlá nastavovania v uzavretej slučke

Nastavovanie podľa Zieglera-Nicholsa v uzavretej slučke sa opiera o hranice stability. Pri identifikácii parametrov procesu:

1. Vypnite integračnú a derivačnú zložku v regulátore. To sa dá zvyčajne dosiahnuť tak, že v nastavovaných parametroch pre integračnú a derivačnú zložku sa zadá nula.
2. Nastavte proporcionálne zosilnenie (K_c) na malú hodnotu.
3. Uvedte regulátor do autorežimu.
4. Urobte malú skokovú zmenu na žiadanej hodnote regulátora.
5. Pozorujte reakciu procesu.
6. Ak regulátor nebeží spojitou (v hraniciach stability), zvýšte zosilnenie regulátora (K_c) a vráťte sa na krok 4.
7. Keď už regulátor spojitou kmitá, zosilnenie regulátora je výsledné zosilnenie K_{cu} .
8. Zmerajte periódu cyklu a to bude výsledná perióda P_u .

Ohraničenie stability podľa Zieglera-Nicholsa			
Typ regulátora	K_c	τ_I	τ_D
P	$0,5K_{cu}$	–	–
PI	$0,45K_{cu}$	$\frac{P_u}{1,2}$	–
PID	$0,6K_{cu}$	$\frac{P_u}{2,0}$	$\frac{P_u}{8,0}$

K_{cu} – výsledné zosilnenie (minimálne zosilnenie s riadením len pomocou proporcionálnej zložky, ktoré zapríčiňuje spojitý cyklus systému)

P_u – výsledná perióda kmitania

Tab.4

Pri tomto spôsobe nastavovania v uzavretej slučke a použití uvedených prístupov treba zohľadniť tieto okolnosti:

- Mnohé procesy nemožno nastavovať pomocou využitia pravidiel ladenia na hranici stability. Na získanie parametrov procesu ho treba priviesť blízko k stavu nestability. To je často nedosiahnuteľné a niekedy aj veľmi nebezpečné.

- Treba vedieť, že pri riadení len s proporcionálnou zložkou sa objaví trvalá regulačná odchýlka (ofset) od rovnovážneho stavu.
- Použite najmenšie zosilnenie regulátora, ktoré zabezpečí hraničnú stabilitu ako výšledné zosilnenie.
- Presvedčte sa, že PID rovnica, ktorú používa DCS systém, je zhodná so štandardnou formou. Ak nie je, transformujte nastavovacie konštanty do formy príslušnej pre tú, ktorá sa používa vo vašom DCS.

$$\text{výstup} = k_c \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} \right] + C$$

- Niektoré DCS systémy používajú v PID rovnici ováňované hodnoty. Ak je to tak, nastavované konštanty postavené na procesných technických jednotkách môžu byť nesprávne.
- Skoková zmena by mala byť vykonaná v okolí predpokladaného pracovného bodu.
- Skokovú zmenu je vhodné vykonať v oboch smeroch. Dynamika je veľmi často smerovo závislá.
- Ak je systém nelineárny, skoková zmena by sa mala vykonať v okolí najcitlivejšej (najvyššia hodnota zosilnenia K) časti očakávaného pracovného rozsahu. Ak sa to nevykoná, môže sa regulátor dostať do kmitania alebo dokonca nestability pri regulácii v tejto oblasti.
- Jednotlivé cykly nemusia byť stále symetrické, a to pre rozdielnu dynamiku skokovej zmeny procesu nahor a nadol.
- Tieto pravidlá ladenia platia pre približné modely, a teda by mohli byť štartovacím bodom pri procese nastavovania.
- Vyvarujte sa derivačného zásahu:
 - Derivačná zložka je veľmi citlivá na šum z procesov.
 - Ak sa v procese vykonávajú zmeny žiadanej hodnoty, regulátor by mohol aplikovať derivačný zásah nie na chybu z procesu, ale na meranú veličinu. Ak sa derivačný zásah aplikuje na chybu, výstup z regulátora bude v špičke práve vtedy, keď sa budú vykonávať zmeny žiadanej hodnoty.
 - Derivačný zásah sa najlepšie hodí pre procesy s výrazným dopravným oneskorením.

Daleova technika nastavovania PI regulátora v uzavretej slučke

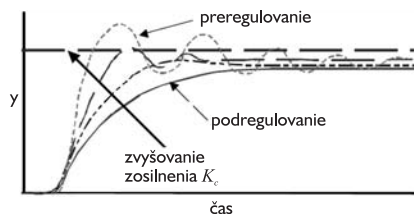
Koncepcia nastavovania podľa Dalea využíva výhody štandardnej formy PID rovnice:

$$\text{výstup} = k_c \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} \right] + C$$

Všimnite si, že integračný a derivačný zásah v regulátore závisia od hodnoty k_c , avšak proporcionálna zložka nezávisí od nastavenia integračnej (τ_I) ani derivačnej (τ_D) zložky. Ak najprv získame hodnotu zosilnenia k_c , ktoré, ako vieme, je stabilné, ale agresívne, môžeme potom jednoducho určiť hodnotu τ_I . Derivačnú zložku možno pridať vtedy, ak je dynamika

procesu pomalá a procesné veličiny nie sú veľmi zašumené.

1. Poznajete a pochopíte vaše procesy. Musíte mať dostatočné znalosti o vlastnostiach procesov (samoregulácia, integrácia). Navyše musíte vedieť, koľko sa v procese vyskytuje oneskorenia, inverzných reakcií a pod.
2. Zvážte, aký typ reakcie regulátora potrebujete. Preregulovanie (pretlmenie), podregulovanie (podtlmenie), s kritickým tlmením a pod., a to podľa cieľov riadenia.
3. Ak proces nemá výrazné oneskorenie, nepoužívajte derivačnú zložku.
4. Nastavte hodnotu ladených konštánt v integračnej a derivačnej zložke na nulu. To zablokuje integračný a derivačný zásah regulátora.
5. Nastavte regulátor do režimu auto.
6. Vykonajte malú skokovú zmenu žiadanej hodnoty regulátora.
7. Sledujte reakciu:
 - Ak riadená veličina kmitá (podtlmenie), znížte zosilnenie regulátora a opakujte krok 5.
 - Ak riadená veličina nekmitá, zvýšte zosilnenie regulátora a opakujte krok 5.
 - Cieľom je nájsť zosilnenie regulátora, pri ktorom je proces presne tlmený (K_{cd}). To je vtedy, keď reakcia procesu prechádza z prerégulovania do podtlmenia.
8. Keď sa K_{cd} nájde, nastavte konečné zosilnenie regulátora na základe požadovanej reakcie.
 - $K \approx 1,2 K_{cd}$, ak je požadované prerégulovanie.
 - $K \approx 0,8 K_{cd}$, ak je požadované podtlmenie.



Obr.4

Keď je zosilnenie regulátora nastavené, zadajte veľkú hodnotu integračnej zložky (τ_I). Predstavuje to malý integračný zásah. Znížte τ_I , až kým nedosiahnete požadovanú elimináciu trvalej regulačnej odchýlky od rovnovážneho stavu. V mnohých prípadoch je zmyslom integračného zásahu odstrániť trvalú regulačnú odchýlku. Ako budete znižovať τ_I , spozorujete v istom bode, že regulátor začína viac kmitať. Ak bol regulátor na začiatku pretlmený a začína byť podtlmený, je to práve pre zásah integračnej zložky. V tomto momente ste dosiahli hranicu a integračný zásah by ste mali znížiť.

Záver

Ak je požadovaná aj derivačná zložka, treba ju pridať. Ak signály reprezentujúce riadenú veličinu nie sú zašumené a derivácia sa aplikuje na meranú (riadenú) veličinu a nie na chybu,

derivačný zásah môže regulátor stabilizovať. Vo všeobecnosti platí, že ak sa pridá derivačný zásah, možno zvýšiť zosilnenie regulátora a integračnú zložku τ_I možno znížiť.

UPOZORNENIE: derivačný zásah v reálnych priemyselných procesoch funguje veľmi zle.

Literatúra

[1] BURCH, R.: Monitoring and Optimizing PID Loop Performance. Aspen Technology, Inc., uverejnené na konferencii ISA Expo 2004.

[2] PID Tuning Guide, Advanced Process Control & Optimization Inc.

-tog-