

Pravidlá nastavovania PID regulátorov

Bezpečnosť, ochrana zariadení a životného prostredia, kapacita a účinnosť procesov, kvalita výrobkov a údržba riadiacich systémov – toto všetko závisí od vyladenia a nastavenia PID slučiek.

Takmer každý dodávateľ automatizačných systémov, konzultant, profesor teórie riadenia či koncový používateľ má svoju obľúbenú množinu pravidiel ladenia PID regulátorov. Mnohí z týchto odborníkov sú presvedčení, že práve tá ich množina pravidiel je tá najlepšia. Odborné príručky o nastavovaní PID slučiek obsahujú takmer 500 strán pravidiel. Dobrou správou však je, že tieto metódy a pravidlá konvergujú k spoločnému cieľu. Využívanie ďalších ako len klasických PID funkcionalít, ako je lead-lag regulácia žiadanej hodnoty, dynamické znovunastavenie a obmedzenie rýchlosti zmeny výstupu či inteligentné obmedzenie integračného zásahu, umožňuje využiť nastavovanie potlačenia poruchy, čím sa dajú splniť ďalšie požiadavky kladené na systém, ako napr. maximalizácia reakcie na žiadanú hodnotu, koordinácia slučiek, predĺženie životnosti tesnení pri regulačných ventiloch a minimalizácia prerušení prevádzky a činnosti regulačných slučiek.

Potenciálny výkon

Cieľom regulačnej slučky je potlačiť nežiaduce zmeny, ignorovať vonkajšie zmeny a zabezpečiť žiadané zmeny, ako je dosiahnutie novej žiadanej hodnoty. Riadenie pomocou PID poskytuje najlepší možný spôsob potlačenia nemerateľného rušenia – ak je PID dobre vyladený. Pridaním jednoduchého bloku oneskorenia (deadtime) do vonkajšej vetvy možno zlepšiť PID reguláciu viac ako pri iných regulátoroch s inteligenciou zapracovanou do dynamiky procesu, akou je aj prediktívne riadenie (MPC). V reálnych priemyselných prevádzkach sú neznáme vonkajšie zmeny realitou a najlepším nástrojom je PID, ale musí byť dobre nastavený. Čas potrebný na otestovanie mnohých zložitých regulačných slučiek sa v posledných rokoch výrazne skrátil. Boli vytvorené jednoduché matematické vzťahy na stanovenie nastavenia regulátora.

Požiadavky riadenia

Prvoradou požiadavkou na PID je, aby dokázali zabrániť aktivácii bezpečnostných alebo núdzových systémov, predchádzať ohrozeniu životného prostredia (RCRA pH), vzdúvaniu čerpadiel a odstávkou z dôvodu odchýlenia sa prebiehajúcich procesov od požadovaného stavu. Špičková odchýlka (t. j. maximálna odchýlka od žiadanej hodnoty) je najčastejšie používanou metrikou. Najčastejšou príčinou nežiaducej zmeny procesu je nemerateľná skoková porucha, ktorá môže spôsobiť odchýlku v otvorenom obvode (E_o). Stáva sa to vtedy, ak PID pracuje v manuálnom režime alebo vôbec neexistuje. Časť chyby otvoreného obvodu nachádzajúca sa v spätnoväzbovom riadení viac závisí od zosilnenia regulátora ako od integračného času, pretože proporcionálna zložka zabezpečuje prvotnú reakciu dôležitú pre minimalizáciu špičkovej odchýlky. Vzťah (1) ukazuje, že ak je súčin zosilnenia regulátora (K_c) a otvoreného obvodu (K_o) oveľa väčší ako 1, bude špičková odchýlka (E_x) podstatne menšia ako odchýlka otvoreného obvodu. Zosilnenie otvoreného obvodu (K_o) je výsledkom súčinu zosilnenia akčného člena, procesu a merania a je vyjadrený percentom zmeny procesnej veličiny vydelenej percentom zmeny výstupu z regulátora pre zmenu žiadanej hodnoty. Pri väčšine regulačných slučiek určených na riadenie teploty alebo tlaku je rýchlosť zmeny procesnej veličiny podstatne pomalšia ako deadtime. Preto možno zosilnenie regulátora nastaviť dostatočne veľké tam, kde sa menovateľ stáva jednoducho inverziou súčinu zosilnení. Inak povedané, pri slučke s dominanciou deadtime sa menovateľ blíži k jednej a špičková odchýlka je v podstate odchýlkou otvoreného obvodu.

$$E_x = \frac{1}{(1 + K_c * K_o)} * E_o \quad (1)$$

Špičková odchýlka je dôležitá pre kvalitu výroby pri konečnom spracovaní taveniny, sušiny alebo kašovitých zmesí v zariadeniach, ako

sú extrudéry, linky na výrobu plechov či spriadacie linky. Špičkové odchýlky sa prejavujú ako vyradené výrobky pre chybnú farebnosť, konzistenciu, optickú priehľadnosť, tenkosť, veľkosť, zlý tvar či v prípade potravín zlú chuť. Nanešťastie hlavnou zložkou všetkých týchto systémov je dopravné oneskorenie.

Najčastejšie citovanou metrikou na minimalizáciu špičkovej odchýlky je integrálne kritérium kvality regulácie (IAE), čo je v podstate priestor medzi hodnotou procesnej veličiny a žiadanou hodnotou. Pri neoscilujúcej ozve je IAE a integračná odchýlka rovnaká. Keďže proporcionálny a integračný zásah sú dôležité pre minimalizáciu tejto chyby, vzťah (2) ukazuje, že IE rastie spolu s nárastom integračnej časovej konštanty (T_i) a zosilnenie regulátora klesá.

$$E_i = \left[\frac{(T_i + \Delta t_x + \tau_f)}{K_o * K_c} \right] * E_o \quad (2)$$

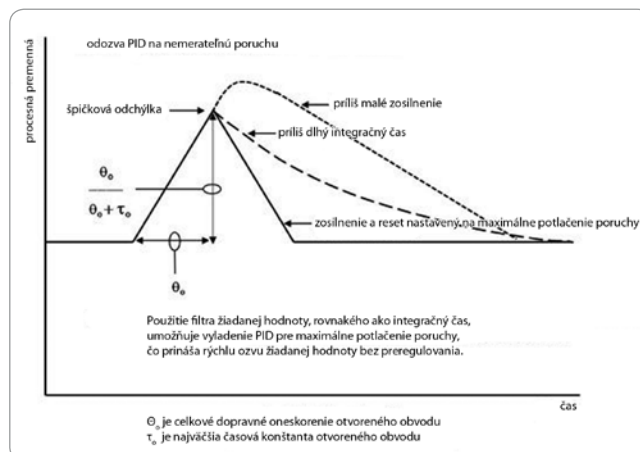
Vzťah (2) takisto ukazuje, ako IE rastie spolu s nárastom času potrebného na vykonanie zásahu regulátora (Δt_x) a na filtráciu signálu (τ_f). Rovnaké dopravné oneskorenie takisto znižuje minimum prípustného integračného času a maximum prípustného zosilnenia regulátora, čo ďalej znižuje maximálny možný výkon. Nové nastavenie konštánt regulátora je v mnohých prípadoch pomalšie, ako je možné a ostáva nezmenené, takže jediné pozorovateľné zhoršenie pochádza z čitateľa zo vzťahu (2).

IE svedčí o množstve výrobkov mimo požadovanej špecifikácie, čo môže viesť k nižším výnosom a vyšším pomerným nákladom na vstupné suroviny alebo recykláciu takýchto produktov. Ak nemožno produkty, ktoré nespádajú do požadovaných kritérií, znovu použiť alebo ak nemožno zvýšiť veľkosť dodávaného množstva, potom dochádza k strate objemu výroby. Ak navyše nemožno produkty nespĺňajúce požadované vlastnosti znovu použiť, vznikajú náklady na spracovanie odpadov.

Regulátor vyladený na maximálny výkon bude mať ozvu uzavretého obvodu na nemerateľnú poruchu podobnú dvom opačne k sebe otočeným pravouhlým trojuholníkom (obr. 1). Podstava každého trojuholníka je celkové dopravné oneskorenie slučky a výška trojuholníka je špičková odchýlka. Ak je integračný čas (čas znovunastavenia) príliš pomalý, návrat do žiadanej hodnoty je pomalší. Ak je zosilnenie regulátora príliš malé, zväčšuje sa špičková odchýlka a pravouhlý trojuholník je pre návrt do žiadanej polohy väčší.

Dynamika procesu

Väčšina typov dynamík procesov sa odlišuje výsledným priebehom ozvy otvoreného obvodu vzhľadom na zmenu výstupu regulátora



Obr. 1 Vplyv integračného času na maximálne možné potlačenie poruchy

pri predpoklade, že tam nie sú žiadne poruchy. Ak ozva smeruje k novému ustálenému stavu, proces má samoregujúcu vlastnosť s časovou konštantou otvoreného obvodu (τ_o), ktorá je najväčšou časovou konštantou tohto obvodu. Prietok a spojité riadenie teploty a koncentrácie sú samoregujúce sa procesy. Ak ozva naberá tvar rampy, proces je integračný. Riadenie výšky hladiny, tlaku v kolóne a nádobách, dávkové riadenie teploty a koncentrácie sú integračné procesy. Ak ozva narastá a dosiahne bod, z ktorého niet návratu do východiskového stavu, proces má kladnú spätnú väzbu. Niektoré procesy so spojitou alebo dávkovo riadenou teplotou, ako sú napr. vysoko exotermické reaktory (napr. pre polymerizáciu), sa môžu stať nestabilnými (runaway) procesmi. Predlžovanie intervalov testovania otvoreného obvodu nie je z bezpečnostných dôvodov prípustné a zmeny žiadanej hodnoty sú obmedzené.

Unifikovaný prístup

Tri hlavné typy oziev majú začiatočnú periódu bez ozvy, čo je označené ako celkové dopravné oneskorenie obvodu (θ_o), za ktorou nasleduje nábeh (rampa) pred spomalením (inflexný bod) ozvy samoregujúceho sa obvodu a zrýchlením ozvy netlmeného procesu. Veľkosť nábehu vyjadrená v percentách vydelená percentuálnou zmenou výstupu z regulátora je integračné zosilnenie procesu (K_i) vyjadrené v jednotkách %/sec/%, ktoré sa rovná 1/sec.

Za posledných 10 rokov sa ukázalo, že pomalé samoregujúce sa procesy s dlhým časom spomaľovania možno účinne identifikovať a vyladiť ako „blízko integračné“ alebo „pseudo integračné“ procesy, čo viedlo k „skrátenej metóde ladenia“, pri ktorej treba zistiť len dopravné oneskorenie (deadtime) a rýchlosť začiatočného nábehu (rampy). Testovací čas nastavenia regulátora možno pri týchto „blízko integračných“ procesoch skrátiť o 90 %, pričom netreba čakať na ustálený stav. Táto metóda bola aktuálne rozšírená aj na netlmené a samoregulačné procesy s dominanciou dopravného oneskorenia, a to vďaka použitiu bloku dopravného oneskorenia pri výpočte rýchlosti začiatočného nábehu počas intervalu oneskorenia. Navyše sa našli aj ďalšie pravidlá poskytujúce rovnaké rovnice na zosilnenie regulátora, ak bolo výkonomým cieľom maximálne potlačenie nemeateľnej poruchy. Napríklad použitie časovej konštanty uzavretého regulačného obvodu (λ), rovnej celkovému dopravnému oneskoreniu obvodu pri metóde Lambda nastavovania konštant regulátora prináša rovnaké výsledky ako metóda Zieglera-Nicholsa (ZN), ak je zosilnenie vypočítané podľa ZN a zmenšené na polovicu (pre nezvladenosť a robustnosť). Zo vzťahu (3) vidno, že zosilnenie regulátora je polovica obrátenej hodnoty súčinu integračného zosilnenia a dopravného oneskorenia.

$$K_c = \frac{0.5}{K_i * \theta_o} \quad (3)$$

Z praxe vidno, že príliš veľké zosilnenie regulátora spôsobí relatívne rýchle oscilácie a môže spôsobiť aj nestabilitu (rastúce oscilácie). Pre integračné procesy zase platí, že príliš malé zosilnenie regulátora môže spôsobiť extrémne pomalé oscilácie, ktoré, ak sa bude zosilnenie znižovať, budú stále prítomné. Pri netlmených procesoch platí, že zosilnenie regulátora nastavené na menej ako obrátenú hodnotu zosilnenia otvoreného obvodu spôsobí nárast teploty so zrýchlením do bodu, z ktorého niet návratu do ustáleného stavu. Je tam proste medzera v prípustnom zosilnení regulátora. Tiež je preukázané, že príliš krátky integračný čas spôsobí prekmit a môže viesť k nulovaciemu cyklu. A príliš pomalý integračný čas bude viesť k trvalým prekmitom žiadanej hodnoty, ktoré budú tým väčšie a trvalejšie, čím bude integračný čas pri integračných procesoch narastať. Preto existuje medzera v prípustných časoch integrácie.

Vzťah (4a) uvádza správny rozsah času integrácie pri integračných procesoch. Ak nahradíme vzťah (3) vzťahom (4), získame vzťah (4b), ktorý je základným vyjadrením času integrácie na maximálne potlačenie poruchy. Vzťah (4a) je mimoriadne dôležitý, pretože väčšina integračných procesov má nastavené zosilnenie regulátora 5- až 10-krát menšie, ako je prípustné. Súčiniteľ vo vzťahu (4b) možno pri samoregulačných procesoch zmenšiť, keďže dopravné oneskorenie bude väčšie ako časová konštantu otvoreného obvodu (τ_o) definovaná vzťahom (5).

$$T_i = \frac{2}{(K_c * K_i)} \quad (4a)$$

$$T_i = 4 * \theta_o \quad (4b)$$

$$\tau_o = \frac{K_o}{K_i} \quad (5)$$

Nastavenie parametrov PID regulátora používané na maximálne potlačenie záťaže (poruchy) môže byť použité aj na získanie efektívnej a hladkej ozvy na zmenu žiadanej hodnoty, ak je skok žiadanej hodnoty tvarovaný pomocou derivačno-integračného (lead-lag) filtra, v ktorom sa časová konštantu menovateľa rovná integračnej konštanty a časová konštantu čitateľa 1/4 časovej konštanty menovateľa.

Ozva na žiadanú hodnotu je dôležitá pre nábeh, prechodovú fázu a optimalizáciu spojitého a dávkového procesu. Minimalizáciou času potrebného na dosiahnutie novej žiadanej hodnoty (doba nábehu) možno v mnohých prípadoch maximalizovať účinnosť a výkon procesov. Doba nábehu (T_r) pre nesaturovaný výstup je bez kladnej spätnej väzby žiadanej hodnoty a bez špeciálnych logických obvodov vyjadrená ako obrátená hodnota súčinu zosilnenia integračného procesu a regulátora plus celkové časové oneskorenie obvodu. Vzťah (6) je nezávislý od zmeny žiadanej hodnoty.

$$T_r = \frac{1}{(K_i * K_c)} + \theta_o \quad (6)$$

Komplikácie, ale jednoduché riešenie

Rýchle zmeny na výstupe z regulátora môžu spôsobiť kmitanie od pomalého sekundárneho obvodu alebo od pomalého akčného člena. Tento problém je zákerný v tom, že kmitania môžu vzniknúť pri veľkých poruchách alebo veľkých zmenách žiadanej hodnoty. Aby bolo možné uskutočniť dynamické nastavovanie obmedzení a včasné externé resetovanie spätnej väzby sekundárneho obvodu alebo akčného člena, bude procesná premenná obmedzovať výstup primárneho PID regulátora tak, aby sa nemenil rýchlejšie, ako môže sekundárny obvod alebo akčný člen odpovedať na tieto zmeny, čím sa zamedzí vzniku kmitania.

„Agresívne“ nastavenie konštant regulátora môže tiež viesť prevádzku do poruchy, či narušiť iné slučky a obvody. Do výstupného analógového bloku možno pridať obmedzenia rýchlosti, aktivovať možnosť dynamického nastavovania obmedzení a používať blok prevádzkovej premennej ako externého resetu.

Rozdielne ozvy uzavretých obvodov môžu obmedziť schopnosť koordinácie, ktorá je dôležitá pre zjednodušenie identifikácie modelov pri pokročilých prevádzkových riadiacich systémoch, ktoré tieto obvody ovládajú. Nelinearity vyskytujúce sa v procese môžu spôsobiť, že prechodová charakteristika bude v jednom smere rýchlejšia. Priame obmedzenie rýchlosti výstupu regulátora a dynamické nastavovanie obmedzenia možno použiť na určenie časových konštant uzavretého obvodu bez potreby znovunastavenia.

Obmedzenie rozlišovacieho kroku akčného člena (stick-slip) a časového oneskorenia (backlash) môže spôsobiť limitné cykly vtedy, ak sa v obvode (slučke) nachádzajú jeden, dva alebo viaceré integrátory. Integrátor sa môže prostredníctvom integračného režimu nachádzať priamo v procese alebo v sekundárnom alebo primárnom PID regulátore. Zvyšovanie integračného času bude spomaľovať periódu cyklu, ale neodstráni kmitanie. Avšak úplné odstránenie integračného zásahu, keď sa nedejú žiadne významné zmeny prevádzkovej premennej a keď sa proces nachádza v blízkosti žiadanej hodnoty, môže zastaviť limitný cyklus. Obmedzenie rýchlosti výstupu možno použiť aj na zamedzenie kmitania na výstupe z regulátora od merateľného šumu presahujúceho pásmo necitlivosti alebo obmedzenie rozlíšenia regulačného ventilu pre zamedzenie chvenia, čo následne spomaľuje opotrebovanie ventilu.

Záver

Regulátory možno opísaným unifikovaným prístupom vyladiť, aby sa maximálne potlačila porucha, a to pri väčšine typov procesov.

Možnosti PID v súčasných DCS riadiacich systémoch, ako sú integračno-derivačné riadenie žiadanej hodnoty (lead-lag), priame obmedzenie rýchlosti výstupu, dynamické nastavovanie obmedzení či inteligentné potlačenie integračného zásahu, môžu pomôcť pri eliminovaní kmitania bez potreby znovunariadenia regulátora. Menej kmitania znižuje nestálosť (variabilitu) procesov, umožňuje lepšie rozpoznanie trendov, ponúka ľahšiu identifikáciu dynamiky a prináša dlhšiu životnosť tesnení ventilu.

O autorovi

Greg McMillan je bývalý pracovník spoločnosti Solutia-Monsanto a držiteľ ocenenia ISA Live Achievement Award za rok 2010. V súčasnosti je hlavným konzultantom v rámci CDI Process & Industrial contracting spoločnosti Emerson Process Management v DeltaV R&D. Na čiastočný úväzok je takisto zamestnaný aj v MYNAH Simulation Technologies v Saint Louis.

McMillan, G.: PID tuning rules, článok bol prvýkrát publikovaný v časopise InTech, január/február 2012, v sekcii Automation Basics.

Translated and reprinted with permission of ISA. Copyright© 2012 InTech magazine. All rights reserved.

-tog-