

Vyvážené nastavení PI regulátorů

doc. Petr Klán, Ústav informatiky AV ČR Praha a Univerzita Pardubice,
Prof. Raymond Gorez, Centre for Systems Engineering and Applied Mechanics, University de Louvain

PI nebo PID regulátory se v průmyslu často používají. Větším či menším problémem bývá jejich nastavení. Regulační technici a inženýři se mnohdy uchylují ke klasické metodě nastavení PI, popř. PID regulátorů – Ziegler-Nicholovu nastavení. Přitom je to nastavení, jehož výsledkem bývají relativně špatně tlumené regulační odezvy. Článek předkládá poměrně efektivní a jednoduchou metodu vedoucí k tzv. vyváženému nastavení PI regulátoru. Vyvážené nastavení je založeno na rovnováze mezi proporcionálními a integračními zásahy PI regulátoru, měřenými pomocí kritéria ITAE (Integral-Time-Absolute-Error). Vede ke kvalitním regulačním odezvám a šetří regulační orgány.

1. Úvod

PI regulátory jsou bez nadsázky nejčastěji používaným regulačním algoritmem; viz např. [1], [3] nebo [5]. Neexistuje však všeobecně přijímaná metoda pro nastavení PI regulátoru, viz např. [2]. PI regulátory se tradičně nastavují použitím pravidel Zieglera a Nicholse (1942). Pravidla se široce používají do této doby, často v originální podobě. Jejich použití vyžaduje jen malou informaci o regulovaném procesu. Nežádá však vede ke špatně tlumeným regulačním odezvám, typicky $\zeta = 0,2$ [1]. Silně se totiž upřednostňují agresivní proporcionální zásahy před zásahy integračními. Každé zlepšení nastavení PI regulátorů může, vzhledem k jejich širokému použití, přinést výrazný prospěch.

Existuje několik požadavků na účinné nastavení PI regulátorů, viz např. [2] nebo [3]. Nastavení musí být především použitelné pro širokou třídu průmyslových procesů s možností zavést další specifikace běžných průmyslových problémů. Navíc musí být robustní vzhledem k možné škále aplikací a adekvátně srozumitelné široké komunitě regulačních techniků a inženýrů. V této souvislosti Astrom a Hägglund [1] uvádějí matematické modely procesů, které jsou v regulační praxi nejběžnější. Jsou to tyto modely typických průmyslových procesů:

$$G_1(s) = \frac{e^{-s}}{(1+sT)^2}$$

$$T = 0,1; 0,2; 0,4; 1; 2; 4; 10$$

$$G_2(s) = \frac{1}{(s+1)^n}$$

$$n = 3; 4; 8$$

$$G_3(s) = \frac{1}{(1+s)(1+\alpha s)(1+\alpha^2 s)(1+\alpha^3 s)}$$

$$\alpha = 0,2; 0,5; 0,7$$

$$G_4(s) = \frac{1-\alpha s}{(s+1)^3}$$

$$\alpha = 0,1; 0,2; 0,5; 1,2$$

(T)

Jednotkové zesílení není daleko od skutečnosti, neboť veličiny v regulačním obvodu často mívají stejný operační rozsah. Navíc, jiné než jednotkové zesílení může být snadno kompenzováno vhodným nastavením proporcionální konstanty regulátoru. Procesy uvedené v (T) lze používat jako testovací. Bude-li nějaký způsob nastavení PI regulátoru dobře fungovat v celé této testovací dávce, je velká pravděpodobnost, že bude fungovat pro rozsáhlou třídu průmyslových aplikací.

Cílem metody nastavení PI regulátoru, která je popsána v tomto článku, jsou především kvalitní regulační odezvy založené na rovnováze mezi proporcionálními a integračními zásahy PI regulátoru za předpokladu jejich kritického tlumení, tj. s malým nebo žádným přeregulováním. Proto se dále hovoří o tzv. vyváženém nastavení. Jako míra integrační aktivity PI regulátoru se používá známé kritérium ITAE (např. [4]), pro míru proporcionální aktivity je navrženo nové kritérium. Vzhledem k výsledkům experimentální práce s uvedenou testovací dávkou procesů je možné jednoznačně potvrdit, že vyvážené nastavení PI regulátoru vede k efektivnějšímu řízení než při použití Ziegler-Nicholovu nastavení. PI regulace procesů dávkou (T) byla při použití vyváženého nastavení ve všech případech ohledně kvality regulační odezvy lepší. Je vhodné také uvést, že některé myšlenky vedoucí v konečné fázi k vyváženému nastavení regulátorů jsou zpracovány v publikacích [9], [6] a [7].

vení regulátorů jsou zpracovány v publikacích [9], [6] a [7].

2. Motivační aspekty

Dorf a Bishop v [4] uvádějí návrh řídicího systému teleskopické antény. Cílem je regulace polohy antény v souladu se zadaným směrem. Předpokladem je rychlá regulační odezva na skok žadané hodnoty při přeregulování menším než 5 %. Přenosová funkce teleskopu přitom je

$$G(s) = \frac{e^{-s\pi/8}}{(s+1)^2}$$

Dorf a Bishop navrhli PI regulátor ve tvaru

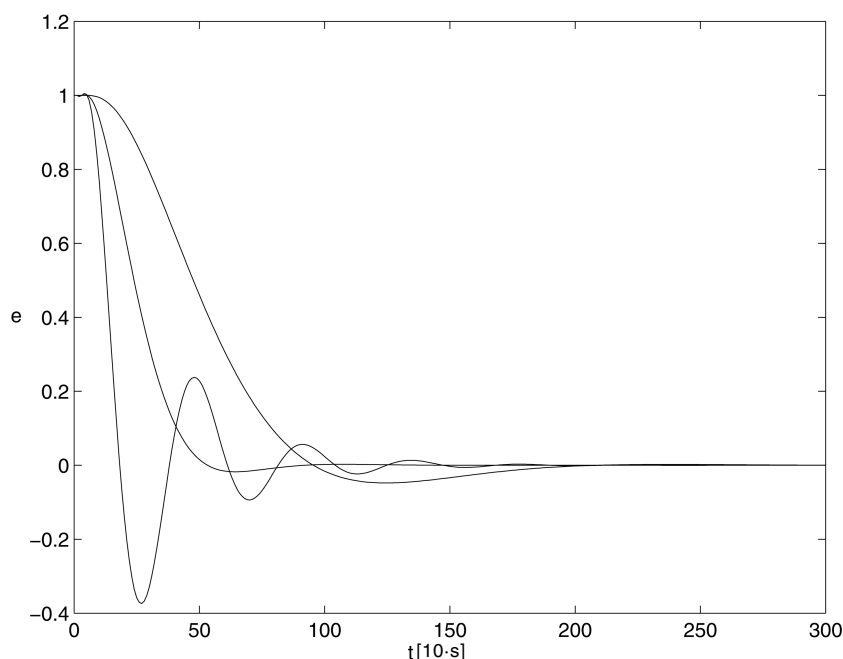
$$\frac{0,022s + 0,22}{s}$$

při použití frekvenčních metod. Regulátor splnil uvedené požadavky.

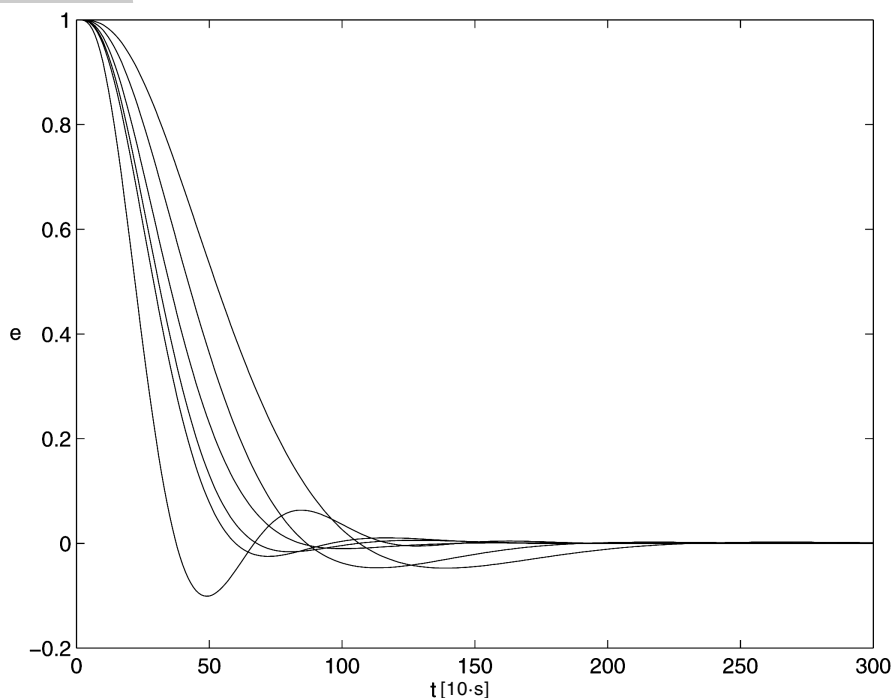
Toto nastavení – na obr. 1 – odpovídá nejvíce tlumené odezvě. V tomto grafu jsou zobrazeny průběhy regulační odchylky e na jednotkový skok žadané hodnoty. Použitím Ziegler-Nicholova nastavení lze dospět k nastavení PI regulátoru v podobě

$$\frac{2,3s + 1}{s}$$

což odpovídá nejvíce kmitavé odezvě na obr. 1. Po prozkoumání obou uvedených nastavení je možné rozlišit dvě zcela odlišné



Obr. 1. Regulační odezvy procesu s přenosem $G(s) = \frac{e^{-s\pi/8}}{(s+1)^2}$ při různých nastaveních PI regulátoru



Obr. 2. Různé regulační odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty při PI regulaci procesu $G(s) = 1/(s + 1)^3$

regulační strategie PI regulace. Zatímco Dorf-Bishopovo nastavení preferuje integrační zásahy (proporcionální konstanta je mnohem menší než integrační konstanta), tento poměr je zcela opačný v Ziegler-Nicholově nastavení. Zde je proporcionální konstanta více než dvakrát větší než konstanta integrační. To se odráží v rychlejší regulační odezvě, avšak taková odezva nespĺňuje výše uvedené požadavky pro velké přeregulování.

Přenesme pozornost na prostřední regulační odezvu na obr. 1, pro níž bylo experimentálně nalezeno takové nastavení PI regulátoru, jehož integrační a proporcionální zásahy jsou v průměru stejné.

Regulační odezva je rychlejší než u Dorf-Bishopova nastavení a mnohem lepší ve srovnání s Ziegler-Nicholovým nastavením. Regulator byl v tomto případě nastaven jako

$$\frac{0,59s + 0,40}{s}$$

Existence tak kvalitní kriticky tlumené odezvy byla motivačním faktorem ve snaze nalézt obecnější pravidla pro nastavení PI regulátorů, která pracují s vyváženým poměrem mezi proporcionálními a integračními zásahy. Po zvážení všech aspektů regulace se totiž zdá, že neexistuje žádný rozumný důvod preferovat jeden typ zásahu proti druhému.

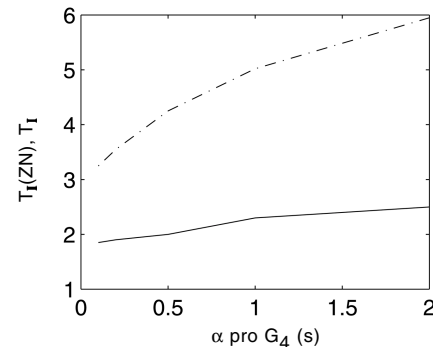
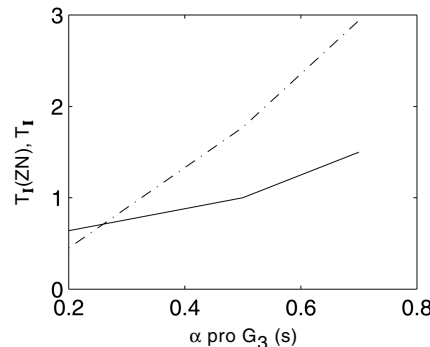
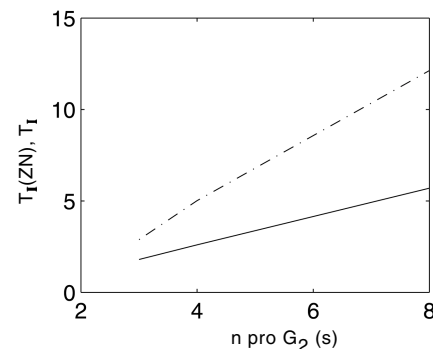
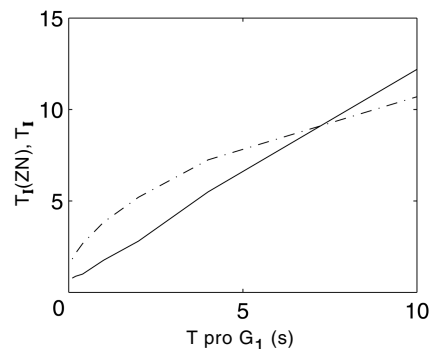
3. Navržené pojetí vyváženosti

Předpokládáme PI regulátor v absolutním tvaru (*absolute form*)

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (1)$$

kde u je akční veličina, K a T_I proporcionální konstanta a integrační časová konstanta. Diferencováním lze obdržet přírůstkový tvar PI regulátoru (*velocity form*)

$$\dot{u}(t) = K(e' + \frac{1}{T_I} e(t)) \quad (2)$$



Obr. 3. T_I pro vyvážené nastavení (plná čára) a Zieglerovo a Nicholovo nastavení (čerchovaná čára) PI regulátoru pro testovací dávku (T)

Přírůstek akční veličiny je tak součtem proporcionální a integrační části. Specifikujeme detailně obě části.

Kvalita regulace se posuzuje podle tzv. integrálních kritérií. Existuje jich několik (např. [4]). Dobře zavedeným integrálním kritériem s ostrým minimem je zejména kritérium ITAE. Kritérium je definováno jako

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt \quad (3)$$

Cílem je vybrat parametry regulátoru tak, aby byla hodnota kritéria ITAE co nejmenší. Čas T se přitom vhodně volí tak, aby se hodnota kritéria ITAE ustálila.

Pomocí stejné konvence jako u kritéria ITAE je možné definovat výkon proporcionální a integrační části PI regulátoru (2). Definujeme dvě nové veličiny: *proporcionální výkon* PI regulátoru

$$J_P = K \int_0^T t|e'(t)| dt \quad (4)$$

odpovídající proporcionální části (2) a *integrační výkon* PI regulátoru

$$J_I = \frac{K}{T_I} \int_0^T t|e(t)| dt \quad (5)$$

odpovídající integrační části (2). Alternativou k těmto definicím může být

$$J_P = T_I \int_0^T t|e'(t)| dt \quad (6)$$

$$J_I = ITAE \quad (7)$$

když vynecháme proporcionální zesílení K , které je pouze v roli měřítka.

Proporcionální výkon J_p charakterizuje velikost „proporcionální aktivity“, PI regulátoru, která je potřebná k eliminaci regulační odchylky, a podobně integrační výkon J_i charakterizuje „integrační aktivitu“, PI regulátoru, potřebnou k eliminaci regulační odchylky. Poznamenejme, že při obvyklém návrhu PI regulátoru se běžně minimalizuje pouze J_i bez jakéhokoliv vztahu k J_p (např. [1]).

Podívejme se na to, jak konkrétní regulační proces z hlediska J_p (4) a J_i (5) vypadá. Předpokládejme PI regulaci procesu s přenosem $G(s) = 1/(s + 1)^3$ při skoku žádané hodnoty. Z přípustných nastavení PI regulátoru z hlediska kriticky tlumené regulační odezvy je možné vybrat nastavení shrnutá v tab. 1. Odpovídající regulační odezvy jsou na obr. 2 postupně zprava doleva. Zvyšující se J_p signalizuje vzrůstající vliv proporcionálních zásahů, stejně jako snižující se hodnoty J_i signalizují klesající vliv integračních zásahů. Navíc se hodnota kritéria ITAE snižuje, avšak od jistého bodu je regulační odezva sice rychlá, ale příliš kmitavá.

Jako další příklad mohou sloužit regulační odezvy na obr. 1. Jsou to tři odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty při PI regulaci procesu s přenosem $G(s) = \exp(-s\pi/8)/(s + 1)^2$, které odpovídají třem různým nastavením. Souhrnné výsledky jsou v tab. 2.

Tab. 1. Některá přípustná nastavení PI regulátoru pro proces $G(s) = 1/(s + 1)^3$

T_1	K	J_p	J_i	ITAE
0,5	0,10	0,69	4,39	21,9
1,0	0,25	1,38	3,57	14,3
1,6	0,45	1,74	2,35	8,35
1,8	0,58	2,08	2,10	6,52
1,9	0,66	2,36	2,06	5,94
2,5	1,19	5,43	2,59	5,43

Znovu lze pozorovat různý vliv proporcionálních a integračních zásahů.

Obecně je však možné pozorovat dva trendy:

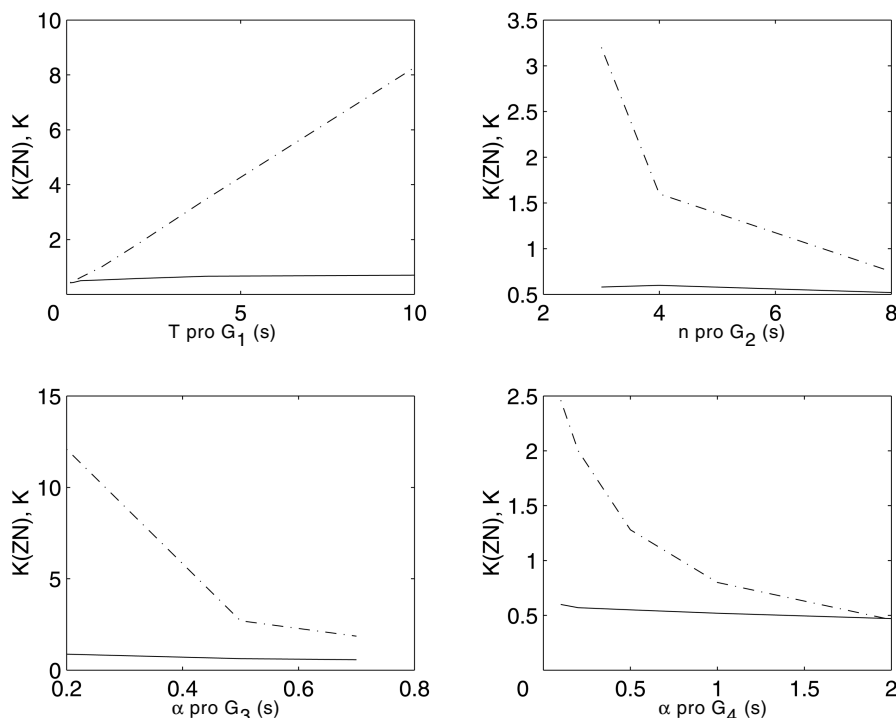
1. velké hodnoty J_p proti J_i signalizují kmitavé regulační odezvy,
2. malé hodnoty J_p proti J_i signalizují přetlumené regulační odezvy.

Uskutečněné experimenty naznačují, že vyvážený stav, kdy hodnoty J_i jsou blízko hodnotám J_p , by mohl signalizovat kvalitní regulační odezvy, kterým navíc odpovídá hodnota kritéria ITAE blízka svému minimu. Nastavení, pro které $J_i = J_p$, nazveme vyváženým nastavením PI regulátoru.

Co se týče vzájemného vztahu J_i a J_p , poznamenejme, že regulační specialisté často

Tab. 2. Různá nastavení PI regulátoru pro proces $G(s) = \exp(-s\pi/8)/(s + 1)^2$

Parametr	K	T_1	J_p	J_i	ITAE
Dorf-Bishop	0,022	0,10	0,14	3,94	17,90
Navrženo autory	0,590	1,41	1,57	1,58	3,92
Ziegler-Nichols	2,310	2,30	20,80	6,02	6,02



Obr. 4. K pro vyvážené nastavení (plná čára) a Zieglerovo a Nicholsovo nastavení (čerchovaná čára) PI regulátoru pro testovací dávku (1)

preferují nastavení PI regulátorů, která mají velký integrační a malý proporcionální výkon, vyjádřeno hodnotami $J_i \gg J_p$. Naproti tomu, experimenty s testovací dávkou procesů (T) ukazují, že pro Ziegler-Nicholsovo nastavení PI regulátoru a odezvy na skok žádané hodnoty v průměru platí

$$J_p = 3J_i \quad (8)$$

To znamená, že Ziegler-Nicholsovo nastavení preferuje proporcionální zásahy před integračními. Zdá se, že právě tato podmínka vede k nedostatku jinak dokonalé Ziegler-Nicholsovy metody, totiž k příliš kmitavým regulačním odezvám.

4. Formulace vyváženého nastavení

Jestliže změníme Ziegler-Nicholsovo nastavení PI regulátoru tak, abychom v (8) potlačili J_p a zvětšili J_i , obdržíme odezvy, které jsou méně kmitavé. Poznamenejme, že nadřazenost J_p proti J_i může nepříznivě působit zejména v aplikacích s přítomností šumu. PI regulátor s velkým J_p proti J_i se stává agresivním. To kromě jiného znamená, že příliš zesiluje šum vlivem velké proporcionální složky. To může negativně působit zejména na akční členy. Zlepšit tuto situaci může potlačení velikosti proporcionální složky PI re-

gulátoru. To však má také svoji hranici. Přílišné zvýraznění integračních zásahů obecně vede k přetlumeným odezvám.

Prozkoumejme z tohoto pohledu údaje shromážděné v tab. 1. Je to několik nastavení PI regulátoru, kde odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty vykazují velmi malé přeregulování. Ve čtvrtém řádku lze objevit nastavení PI regulátoru, pro které jsou hodnoty J_p a J_i blízko sebe. Další řádky vykazují menší hodnotu kritéria ITAE, avšak odezvy jsou kmitavější. Na základě experimentu s testovací dávkou procesů (T) se zdá, že právě vyváženost mezi J_p a J_i znamená hranici mezi nekmitavými a kmitavými regulačními odezvami ve spojení s PI regulátorem.

Rovnováha

$$J_i = J_p \quad (9)$$

je tak klíčovou podmínkou pro nastavení PI regulátoru, které budeme v dalších odstavcích hledat. Druhou podmínkou je, aby vyvážené nastavení PI regulátoru vedlo k regulační odezvě na úrovni kritického tlumení, tj. bez přeregulování nebo s malým přeregulováním. Nastavením PI regulátoru se přitom rozumí určení proporcionálního zesílení K a integrační časové konstanty T_1 . Experimenty potvrzují, že hodnota kritéria ITAE je pro vyvážené nastavení pro kriticky tlumenou regulační odezvu ($\zeta \approx 0,7$) blízka minimální hodnotě kritéria ITAE. Pokusíme se tedy nalézt takové parametry PI regulátoru, které splňují podmínku vyváženosti

$$J_i(K, T_1) = J_p(K, T_1) \quad (10)$$

při kriticky tlumené regulační odezvě na jednotkový skok žádané hodnoty. Jinými slovy, podmínku

$$\int_0^T t|e(t)| dt = T_I \int_0^T t|e'(t)| dt \quad (11)$$

To může vést k hypotéze vypočítat integrační časovou konstantu T_I přímo z tohoto vztahu jako podíl dvou integrálů. Experimentální výsledky však nepotvrzují tuto hypotézu. To je patrně dáno tím, že se integrační časová konstanta zároveň vyskytuje i jako implicitní proměnná také v integrandech rovnováhy (11).

Tab. 3. Výsledky porovnávací studie mezi vyváženým nastavením PI regulátoru a Ziegler-Nicholovým nastavením při kompenzaci vstupní poruchy

T	ITAE při Z-N nastavení	ITAE při vyváženém nastavení
0,1	28,4	5,0
0,2	29,7	5,1
0,4	30,0	6,3
1,0	29,5	13,2
2,0	23,3	25,7
4,0	40,0	62,9
10,0	175,6	267,2

Vyvážené nastavení PI regulátoru bylo nalezeno pro testovací dávku (T) ručně a výsledky jsou shrnuty na obr. 3 a obr. 4 souhrnně pro testovací procesy $G_1(s)$; $G_2(s)$; $G_3(s)$; $G_4(s)$. Pro nalezení řešení (10) bylo třeba udělat několik iterací. Na obrázcích jsou zaznamenány integrační časové konstanty T_I a proporcionální zesílení K pro vyvážené nastavení (plná čára) a pro srovnání také hodnoty odpovídajícího nastavení podle Ziegler-Nicholových pravidel. Analyzujeme nalezené výsledky.

Především, z obr. 4 je evidentní, že proporcionální konstanty K regulátoru odpovídající vyváženému nastavení podle (9) jsou podstatně menší než při Ziegler-Nicholově nastavení.

Navíc jsou v podstatě nezávislé na typu procesu a pohybují se blízko hodnoty 0,5. Integrační časové konstanty, které odpovídají vyváženému nastavení PI regulátoru, jsou také většinou podstatně menší než u Ziegler-Nicholova nastavení. Jestliže např. pro proces $G(s) = \exp(-s\pi/8)/(s+1)^2$ zvolíme vyvážené nastavení PI regulátoru, $K = 0,59$ a $T_I = 1,41$ s, obdržíme na skok žádané hodnoty prostřední regulační odezvu na obr. 1.

5. Vlastnosti vyváženého nastavení

Charakterizujeme-li regulační odezvy odpovídající vyváženému nastavení PI regulátoru a jednotkovému skoku žádané hodnoty pro testovací dávku procesů (T), potom:

1. Regulační odezvy jsou tlumenější než při Ziegler-Nicholově nastavení. Doba potřebná pro jejich ustálení je však kratší.

2. Odezvy mají redukovanou hodnotu kritéria ITAE.
3. Odezvám odpovídá redukováná energie akčních členů.

Odezvám typicky odpovídá jedno malé přeregulování. Řadu odezev ukazuje obr. 5 pro prostřední procesy testovací dávky (T): $G_1(s)$: $T = 1$, $G_2(s)$: $n = 4$, $G_3(s)$: $\alpha = 0,5$ a $G_4(s)$: $\alpha = 1$. Obrázek zobrazuje oba případy: odezvy odpovídající vyváženému nastavení jsou zakresleny plnou čarou a odezvy odpovídající Ziegler-Nicholovu nastavení jsou zakresleny čerchovaně. Jak je možné vidět, jsou regulační odezvy u vyváženého nastavení PI regulátoru efektivnější.

Jinou regulační úlohou je redukce vlivu vstupní poruchy pro proces $G_1(s)$. Tab. 3 sdružuje hodnoty kritéria ITAE pro oba případy PI regulace: vyvážené nastavení PI regulátoru a Ziegler-Nicholovo nastavení.

Zatímco první řádky tabulky vykazují podstatně menší hodnotu kritéria ITAE, směrem dolů se poměr obrací. Charakter odezev je u vyváženého nastavení jiný. Kompenzace poruchy je pomalejší s jedním překmitem, zatímco u Ziegler-Nicholova nastavení je průběh spíše kmitavější s delší dobou pro ustálení. Nelze tak jednoznačně říci, že průběhy s menší hodnotou kritéria ITAE jsou lepší.

Použijeme-li standardní pravidlo pro nastavení derivační časové konstanty (jedna čtvrtina integrační časové konstanty), projevu se derivační část PI regulátoru pro testovací dávku (T) s vyváženým nastavením PI regulátoru pouze „kosmeticky“. Pro procesy

vyššího řádu je však její zavedení přínosem v podobě vylepšení tvaru regulační odchylky v blízkosti pásma necitlivosti.

6. Pravidlo pro vyvážené nastavení

Jelikož procesy testovací dávky (T) reprezentují dynamiku typických průmyslových procesů, může být užitečné shrnout výsledky dosažené pro vyvážené nastavení PI regulátorů do jednoduchého pravidla pro nastavení. Takové jednoduché pravidlo může být formulováno tímto způsobem:

$$K = 0,5 \quad T_I = 0,4T_{CR} \quad (12)$$

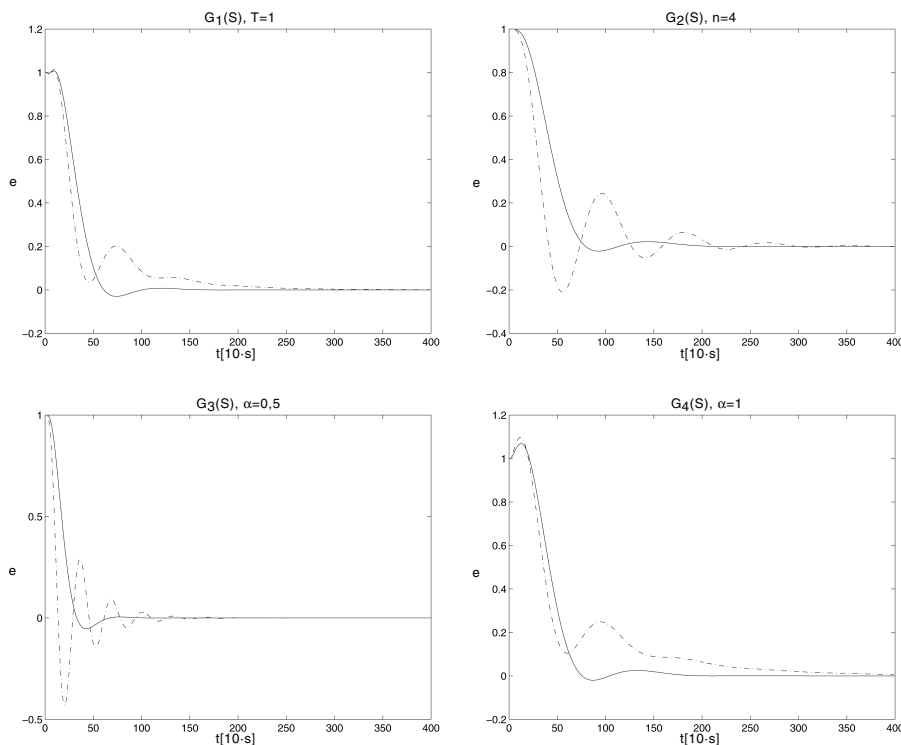
kde T_{CR} je kritická perioda potřebná pro Ziegler-Nicholovo nastavení. Na rozdíl od Ziegler-Nicholova pravidla je nalezené pravidlo (12) invariantní vůči kritickému zesílení. Prozkoumejme toto jednoduché pravidlo na několika procesech. Výsledky shrnuje obr. 6. Tento obrázek znázorňuje regulační odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty pro tyto procesy:

$$G_1(s) = \frac{e^{-s}}{(1+sT)^2}$$

kde $K = 0,5$, $T_I = 1,9$ s pro vyvážené nastavení PI regulátoru (plná čára) a $K = 1$, $T_I = = 3,84$ s pro Ziegler-Nicholovo nastavení (čerchovaná čára).

$$G_2(s) = \frac{1}{(s+1)^4}$$

kde $K = 0,5$, $T_I = 2,5$ s pro vyvážené nastavení PI regulátoru a $K = 1,6$, $T_I = 5,2$ s pro Ziegler-Nicholovo nastavení.



Obr. 5. Regulační odezvy pro testovací procesy $G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_3(s)$ a $G_4(s)$

$$G_3(s) = \frac{1}{(1+s)(1+0.5s)(1+0.25s)(1+0.125s)}$$

kde $K = 0,5$, $T_I = 0,84$ s pro vyvážené nastavení PI regulátoru a $K = 2,7$, $T_I = 1,77$ s pro Ziegler-Nicholovo nastavení.

$$G_4(s) = \frac{1-s}{(s+1)^3}$$

kde $K = 0,5$, $T_I = 2,51$ s pro vyvážené nastavení PI regulátoru a $K = 0,8$, $T_I = 5,02$ s pro Ziegler-Nicholovo nastavení.

Poznamenejme, že ostatní experimentální výsledky jsou s testovací dávkou procesů (T) podobné.

7. Doporučení pro praxi

Nejdůležitějším výsledkem pro praxi je nový způsob, jak nastavit PI regulátor. Obdržené pravidlo je

$$K = 0,5$$

pro společné zesílení PI regulátoru (2) a

$$T_I = 0,4T_{CR}$$

kde T_{CR} je kritická perioda používaná při nastavení PI regulátoru podle Ziegler-Nicholse. Toto nastavení vzniklo jako statistický průměr přesných řešení podmínky vyváženosti (10) pro testovací dávkou procesů (T). Nastavení garantuje přibližnou shodu mezi proporcionálními a integračními výkony PI regulátoru při dosažení kvalitních odezví. Rovnováha může být z hlediska praxe užitečná z několika důvodů:

1. regulační odezvy nejsou kmitavé,
2. regulační odezvy mají příznivý tvar,
3. energie akčních zásahů se redukuje.

Protože v praxi je nastavení často určováno jen přibližně, např. v toleranci 10 až 20 %, navržené nastavení lze adaptovat do příznivější podoby z hlediska zapamatování:

$$K = \frac{1}{2} \quad T_I = \frac{1}{2}T_{CR} \quad (13)$$

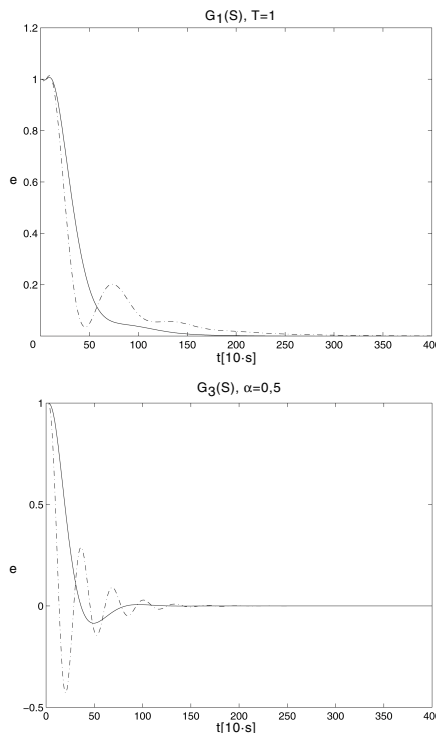
nebo obdobného pravidla s využitím doby průtahu L (např. [4]) uvádí relaci mezi kritickou periodou a dobou průtahu)

$$K = \frac{1}{2} \quad T_I = 2L \quad (14)$$

Pravidla pro vyvážené nastavení PI regulátoru jsou platná pro procesy s jednotkovým zesílením.

Následující doporučení se týká situace, kdy zesílení procesu není jednotkové, $K_p \neq 1$. Z teorie je znám vztah pro regulační odchylku (pomocí Laplaceovy transformace)

$$E(s) = \frac{1}{1 + C(s)G(s)}R(s)$$



Obr. 6. PI regulace procesů $G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_3(s)$ a $G_4(s)$ podle pravidla (12)

kde $C(s)$; $G(s)$ jsou přenosové funkce regulátoru a procesu a $R(s)$ je Laplaceův obraz žádané hodnoty.

V případě jiného než jednotkového zesílení

$$E(s) = \frac{1}{1 + C(s)K_P G(s)}R(s)$$

Ke kompenzaci zesílení procesu lze zvolit zesílení regulátoru v podobě převrácené hodnoty. Pak

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_P}C(s)K_P G(s)}R(s)$$

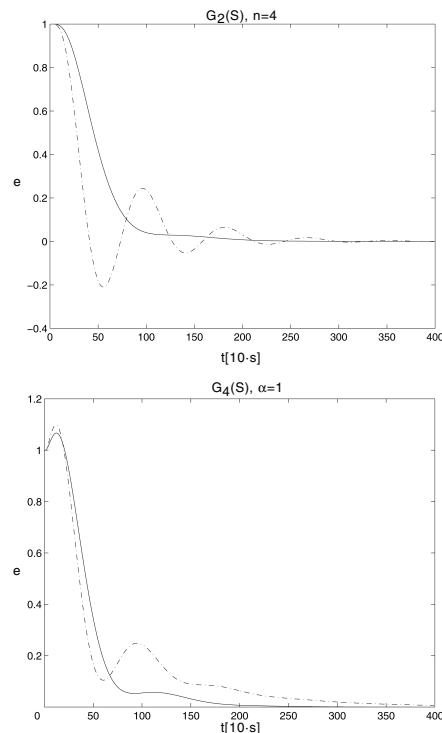
a je možné použít stejných pravidel pro vyvážené nastavení jako v předchozím odstavci. Dostaneme

$$K = \frac{1}{2K_P} \quad T_I = \frac{1}{2}T_{CR} \quad (15)$$

V praxi totiž může být měření zesílení snazší než měření kritického zesílení potřebného pro Ziegler-Nicholovo nastavení. Navíc v digitálních aplikacích často bývá $K_p \approx 1$. Vyvážené nastavení není tak agresivní jako Ziegler-Nicholovo. Procedura pro přesné nalezení vyváženého nastavení v konkrétní aplikaci (iterační řešení podmínky vyváženosti (10)) je uvedena v [8].

Zájemcům autoři proceduru rádi poskytnou, případně popř. poradí s nastavením PI nebo PID regulátoru.

V praxi se postup k dosažení vyváženého nastavení jeví poměrně jednoduše: nastavit proporcionální konstantu PI regulátoru rovnou jedné polovině a potom snižovat či zvyšovat integrační časovou konstantu až do do-



sazení kriticky tlumených odezví a nakonec chování regulačního obvodu postupně vylepšit mírným posilováním derivační časové konstanty, v mezní míře až na jednu čtvrtinu integrační časové konstanty. Vstupuje-li do PI regulátoru šum, derivační časovou konstantu zpravidla nenastavujeme.

Literatura:

- [1] ASTRÖM, K. – HÄGGLUND, T.: PID Controllers. Theory, Design, and Tuning. Instrument Society of America, 1995.
- [2] ASTRÖM, K. – PANAGOPOULOS, H. – HÄGGLUND, T.: Design of PI Controllers Based on Non-Convex Optimization. Automatica, Vol. 34, 1995, No. 5, s. 585–601.
- [3] CLAIR, B.: Controller Tuning and Control Loop Performance. A Primer. Straight-line Control Company, Inc., 1993.
- [4] DORF, R. – BISHOP, R.: Modern Control Systems. Addison-Wesley Longman, Inc., 1998.
- [5] GOREZ, R.: PID Control. Basics, Tuning, Operational Aspects. BIRA Studienmiddag PID – regelaars: moderne afstellingsmethodes. Antwerpen, Mar. 31, 1999.
- [6] KLÁN, P. – MARŠÍK, J.: Control Expert Advisor. In: ICSPAT '94, DSP Associates, Vol. 2, s. 1103–1108.
- [7] KLÁN, P. a kol.: Controller ZEPADIG 10 Self-Tuning and Autotuning Algorithms. [CD-ROM]. In: European Control Conference ECC 1997, Brussels.
- [8] KLÁN, P. – GOREZ, R.: A New Approach to Iterative Tuning of PI Controllers. Rukopis, přijato do časopisu European Journal of Control. 1999.
- [9] MARŠÍK, J. – STREJC, V.: Application of Identification-free Algorithms for Adaptive Control. Automatica, Vol. 25, 1989, No. 2, s. 273–277.