

Metody zlepšení PI regulace

Petr Klán

V článku jsou popsány nejdůležitější způsoby, jak zlepšit kvalitu PI regulace, používané pro jednorozměrnou regulaci lineárních nebo linearizovatelných systémů. Jednoduché metody, snadno aplikovatelné v praxi, často přinášejí velmi uspokojivé výsledky, aniž by bylo nutné použít složitější a dražší regulátory, pracující na jiném teoretickém základě než PI nebo PID regulátory, nebo dokonce systémy umělé inteligence. Metody jsou ilustrovány na názorných příkladech a článek je vhodným návodem, jak se v praxi vypořádat s úkolem zlepšit kvalitu regulace.

1. Úvod

Nové impulsy pro použití regulátorů v praxi přinesly v uplynulých deseti letech zejména knihy [1], [2], [3] a [4]. Jejich přínosem je celkem jednoduchá a srozumitelná teorie, kterou lze poměrně rychle přenést do praxe a zde ji aplikovat. Prioritou obsluhy regulátoru bývá co nejdříve uvést regulační obvod do provozu a přijatelně vybrat a seřadit regulátor. Zmíněné publikace pomáhají v tomto procesu hlavně tím, že obsahují celkem „instantní“, tj. rychle použitelnou teorii pro řešení praktických problémů, které se v regulačních obvodech vyskytují.

Zaměříme pozornost na výběr vhodného regulátoru. V reflexi aplikací v průmyslové praxi se tento problém vyřeší okamžikem, kdy je nalezen regulátor zabezpečující přijatelné chování regulačního obvodu. Proces výběru regulátoru vypadá podle zkušeností autora asi takto:

1. Obsluha použije a seřadí P regulátor. Jestliže je velikost trvalé regulační odchylky (*offset*) v toleranci nebo má-li regulovaný proces sám o sobě integrační charakter, může být P regulátor nejvhodnějším regulátorem.
2. Nevyhovuje-li P regulátor, obsluha použije a seřadí PI regulátor. PI regulátor sice eliminuje trvalou regulační odchylku, ale vnáší do regulačního procesu určitou nestabilitu. Důsledkem bývá zvětšené přeregulování či mírné oscilace. Jestliže však je třeba odstranit trvalou regulační odchylku, představuje PI regulátor dobrou volbu.

Zde běžná automatizace končí. P nebo PI regulátor je totiž tak robustním a univerzálním regulátorem, že vyhovuje ve většině aplikací [1].

V tomto okamžiku se otevírá dosti rozsáhlý prostor ke zlepšení kvality regulace a dalších parametrů regulačního obvodu. Zvláště existují následující směry:

1.1 Zlepšovat v rámci stávající struktury regulačního obvodu s PI regulátorem

Existuje několik vcelku snadných postupů slibujících zlepšení kvality regulace:

- a) **Zavedení D složky do regulátoru.** Zavedení derivační složky má (na rozdíl od integrační) stabilizační účinky a vede k méně kmitavým odezvám a velké kvalitě regulace.
- b) **Zvýšení stupně volnosti regulace.** To spočívá v zavedení vážené žádané hodnoty. PI regulátor potom může být nastaven mnohem odvážněji (agresivněji).
- c) **Použití kaskádní regulace (*cascade control*).** Místo jednoho regulátoru se používají dva regulátory. Tak se lépe odstraňuje vliv poruchy a zvyšuje rychlost odezev.
- d) **Použití poměrového způsobu regulace (*ratio control*).** Je tomu tak v případě, kdy je cílem regulace udržet poměr dvou veličin na určité specifické hodnotě.
- e) **Zavedení dopředné vazby (*feedforward control*).** Dopředný regulátor může včas reagovat na přítomnost vnějších poruch, dovedeme-li je měřit.
- f) **Kompencezace dopravního zpoždění (*Smith predictor*).** Smithův prediktor je jednou z neznámějších metod, jak zlepšit kvalitu regulace procesů s významným dopravním zpožděním.
- g) **Selekce akční veličiny (*selective control*).** Obvykle bývá počet regulovaných veličin stejný jako počet akčních veličin. V případě, že je více regulovaných veličin na jednu akční veličinu, je třeba provést určitou selekci.
- h) **Omezení vlivu nelinearity v regulačním obvodu.** Z pohledu regulace je nejnějnější, je-li regulační obvod lineární. Takové obvody se dobře regulují. Z pohledu praxe jde o idealizaci až fikci. Výsledky lineárního modelu však bývají „rozumné“ a v dané aplikaci stačí. Vyskytuje-li se v regulačním obvodu nelinearity (někdy je ji tam nutné vložit úmyslně), mohou nastat problémy se stabilitou, zahlcením (saturací) apod.
- i) **Překonání interakcí regulačních obvodů.** Na jednom procesu může být současně více regulačních smyček. Ty se mohou vzájemně ovlivňovat. Jak se s tím vypořádat? V rámci vícerozměrové regulace.

1.2 Volit regulátor na složitější teoretické bázi

Přestože případů, kdy PID regulátor nevyhovuje, je poměrně málo (kmitavé procesy, velká dopravní zpoždění, perfektní model regulovaného procesu, přítomnost silných nelineárních prvků), existuje široké spektrum metod založených na vzájemně odlišných paradigmatech. Mohou to být stavové regulátory, fuzzy regulátory, regulátory na bázi neuronových sítí, nelineární regulátory apod. Jde-li o zlepšení PI regulace, zvažují se spíše

možnosti a) až i) uvedené v předchozím odstavci, neboť poměr mezi kvalitou regulace a cenou za použití metod s odlišným paradigmatem nebývá zdaleka tak příznivý jako u zlepšování v rámci PI regulace. Navíc zde může dojít ke zlepšení kvality regulace na úkor robustnosti regulačního obvodu. Regulační obvod potom není tak odolný vůči změnám. Přesto však existují úlohy, i když ne tak časté, kde je použití jiných než PI regulátorů plně oprávněné a je třeba s ním počítat.

1.3 Pojmout automatizaci procesu jako problém pro inteligentní řízení

Do návrhu regulace se zahrnují metody umělé inteligence jako rozpoznávání, klasifikace, inference [5]. Jde o reakci na stále rostoucí složitost průmyslových procesů a potřebu vyšší účinnosti, větší pružnosti, lepší kvality a nižší ceny. Automatizace se přitom řeší jako komplexní problém v rámci většího celku než pouze jednoho procesu.

V tomto článku se budeme zabývat metodami uvedenými v bodu 1.1. U každé metody uvedeme její princip, možný přínos a podmínky použití. Vzhledem k tomu, že PI, popř. PID regulátory existují jako samostatné bloky sekvenčních automatů, je poměrně jednoduchá cesta, jak metody na zlepšení uvedené v bodu 1.1 realizovat. Přínos potom bývá podstatně větší, než jsou náklady na toto zlepšení. Zkušenosti autora článku jsou takové, že při návrhu automatické regulace je vhodné počínat si postupně podle bodů 1.1, 1.2 a 1.3.

2. Zavedení derivační složky regulátoru

Hlavním smyslem zavedení derivační složky (D) do PI regulátoru je zlepšení stability uzavřeného regulačního obvodu. Velikost derivační složky určuje derivační časová konstanta T_D . V kombinaci s P složkou regulátoru vnáší do regulace prediktivní prvek, kdy regulátor reaguje na budoucí vývoj regulační odchylky (každý řidič ví, jak např. jízdu automobilem stabilizuje prediktivní způsob řízení – zde to funguje podobně).

Vezmeme-li dohromady P a D složku PID regulátoru, dostaneme pro akční veličinu u

$$u(t) = K \left[e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

kde

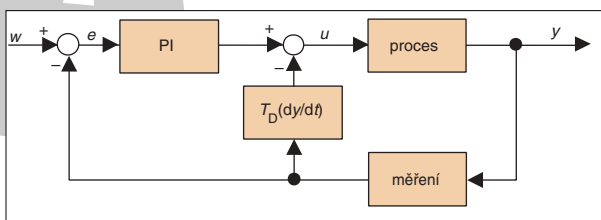
e je regulační odchylka,

K zesílení regulátoru,

T_D derivační časová konstanta.

Uvážíme-li první členy Taylorova rozvoje pro budoucí regulační odchylku

$$e(t + T_D)$$



Obr. 1. Realizace derivační složky PID regulátoru

dostaneme

$$e(t + T_D) \approx e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt}$$

Jinými slovy, akční veličina PD regulátoru je úměrná lineárně pojaté předpovědi regulační odchylky o čas T_D dopředu

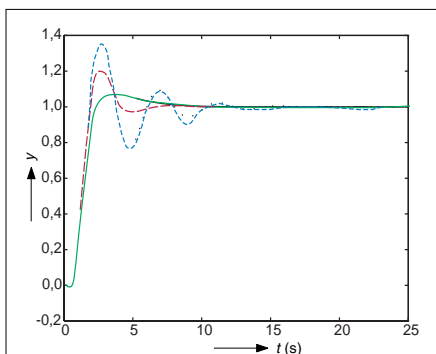
$$u(t) = K e(t + T_D)$$

což má uvedené příznivé účinky.

Použití derivace však s sebou přináší (přes její příznivé účinky) i určité problémy. Především je nutné ochránit akční orgány před „kopancem“ při skokové změně žádané hodnoty. Toho dosáhneme aplikací derivační složky regulátoru přímo od regulované veličiny podle schématu na obr. 1.

Regulovaný proces uvažujeme včetně akčních členů. Podobně tomu bude i dále. Měření regulované veličiny budeme pro zjednodušení vynechávat. Bude-li signál regulované veličiny ovlivněn šumem, objeví se při použití derivace podobný problém jako při skokové změně žádané hodnoty. Derivační člen se proto nepoužívá v takových aplikacích, ve kterých může velké kmitání výstupu regulátoru způsobit intenzivnější opotřebování akčních členů. Derivační časovou konstantu T_D volíme nejvýše jako čtvrtinu integrační časové konstanty. Literatura [1] uvádí, že právě poměr $T_i/T_D = 4$ znamená nejlepší volbu. Při přítomnosti šumu lze před derivací předradit filtr, který problému se šumem zpravidla odstraní, ale vnese do signálu určité zpoždění, a tím sníží příznivý účinek složky D. Časovou konstantu filtru volíme v rozmezí $T_D/20$ až $T_D/8$.

Uvedme jednoduchý ilustrační příklad demonstrující příznivý stabilizující účinek použití derivační složky PID regulátoru podle obr. 1: automatické řízení teleskopu s přenosem



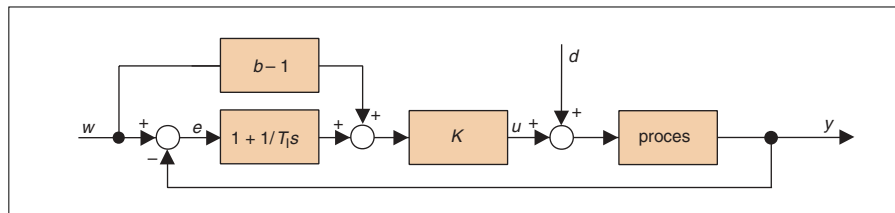
Obr. 2. Ukázka stabilizujícího účinku derivační složky PID regulátoru: modře pro $T_D = 0$, červeně pro $T_i/T_D = 8$ a zeleně pro $T_i/T_D = 4$

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

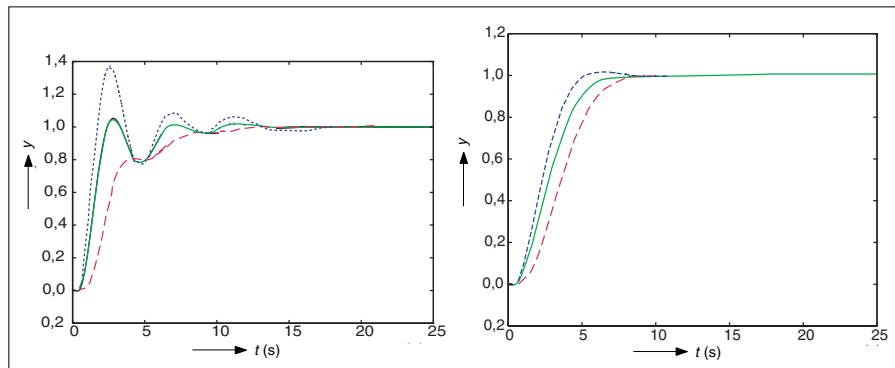
a uvažujme jednotkový skok žádané hodnoty. Zieglerovo-Nicholsovo nastavení PI regulátoru je $K = 2,31$ $T_i = 2,30$ s. Obr. 2 uvádí tři regulační odezvy: černou ($T_D = 0$ s), červenou ($T_i/T_D = 8$) a zelenou ($T_i/T_D = 4$), která ilustruje v podstatě hladký přechod bez přeregulování a oscilací, jež se vyskytovaly u regulace bez složky D (černě).

3. Zvýšení stupně volnosti PI regulace

Po PI regulátoru se obecně žádá, aby zajistil dobré odezvy regulovaného procesu při



Obr. 3. Zvýšení stupně volnosti PI regulace



Obr. 4. Ukázka tlumícího účinku regulace 2-DOF s PI regulátorem

Vlevo: Zieglerovo-Nicholsovo nastavení, modrá $b = 1$, červená $b = 0$ a zelená $b = 0,6$
Vpravo: vyvážené nastavení, modrá $b = 1$, červená $b = 0,6$ a zelená $b = 0$

změněch žádané hodnoty w , aby dobře potlačoval vliv poruch působících na regulovaný proces a také eliminoval šum měření. To vše má zařídit jeden regulátor, který se pokouší vyhovět všem těmto, i protichůdným požadavkům stále stejným způsobem. Takový systém regulace nazýváme regulací s jedním stupněm volnosti (1-DOF, degree of freedom). Uživatelé PI regulátorů jistě potvrdí, že nastaví-li regulátor agresivně na rychlou kompenzaci poruch, jsou regulační odezvy při změně žádané hodnoty příliš kmitavé.

Ke zlepšení tohoto stavu přispívá, přidáme-li do stávajícího regulačního obvodu s PI regulátorem další stupeň volnosti. Regulace

tak bude mít dva stupně volnosti (2-DOF). Výsledkem je větší volnost a širší možnosti ke splnění rozdílných požadavků na regulaci. Jedním ze způsobů zvýšení stupně volnosti PI regulace je vážení žádané hodnoty. PID regulátor bude mít v tomto případě podobu

$$u(t) = K \left[e_p + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau - T_D \frac{dy}{dt} \right]$$

kde regulační odchylku v proporcionální části regulátoru nahradil vážený rozdíl

$$e_p = bw - y$$

Připomeňme, že u integrační části musí být čistá regulační odchylka, tj. $e = w - y$. Možná realizace regulačního obvodu s PI regulátorem, kde jsou dva stupně volnosti, by mohla vypadat např. podle obr. 3.

Váha b leží mezi 0 a 1. Je-li $b = 1$, dostaneme původní stav s jedním stupněm volnosti. Příklad, kdy $b = 0$, se využívá jako ochrana při častých změnách žádané hodnoty.

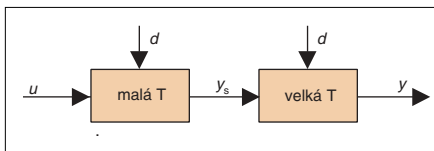
Můžeme ověřit, že přenos mezi např. poruchou působící na vstupu procesu d a regulovanou veličinou y bude pro případy regulace 1-DOF a 2-DOF stejný. Mění se pouze přenos mezi žádanou hodnotou w a y . Vážení zmenšuje vliv skoku žádané hodnoty u proporcionální části regulátoru. To znamená, že pokud PI regulátor nastavíme agresivněji na eliminaci poruch, lze tuto agresivnost pro skoky žádané hodnoty korigovat tím, že nastavíme $b < 1$.

Uvedeme opět ilustrační příklad. Nastavíme reálný teleskop z předchozího příkladu. Vezmeme opět Zieglerovo-Nicholsovo nastavení. Na obr. 4 vlevo můžeme porovnat jed-

notlivé odezvy regulačního obvodu s PI regulátorem podle obr. 3 na jednotkový skok žádané hodnoty: modrou ($b = 1$), červenou ($b = 0$) a zelenou ($b = 0,6$). Na tomto příkladu můžeme zároveň pozorovat jednu důležitou skutečnost. Je-li PI regulátor nastaven se špatným poměrem proporcionálního a integračního výkonu, nebudou odezvy regulačního obvodu monotónní, ať měníme b jakýmkoliv způsobem. Regulační odezvy sice utlumíme, ale neovlivníme jejich „schodovitost“. Uvedeme proto regulaci 2-DOF ještě s jiným, tzv. vyváženým nastavením PI regulátoru [7], [8] $K = 0,59$, $T_1 = 1,41$ s. Obr. 4 vpravo obsahuje obdobné regulační odezvy jako obr. 4 vlevo: modrou ($b = 1$), červenou ($b = 0,6$) a zelenou ($b = 0$). Můžeme tak porovnat účinek regulace 2-DOF při špatném i dobrém nastavení regulátoru z hlediska monotónního průběhu regulačních odezev.

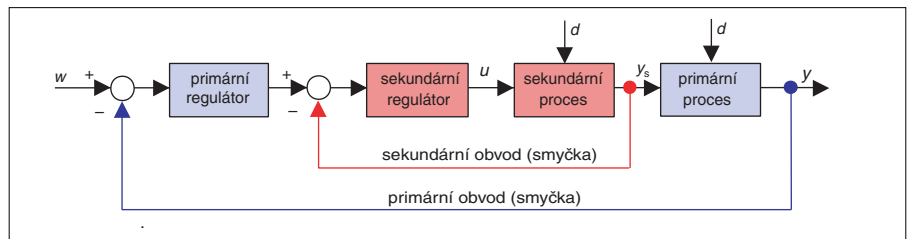
4. Kaskádní regulace

Kaskádní regulace je užitečná a přínosná, můžeme-li regulovaný proces rozdělit na dvě samostatné části – první část s rychlejší dynamikou a druhou část s pomalejší dynamikou či dopravním zpožděním. Příkladem může být blokové schéma podle obr. 5. Základním předpokladem pro kaskádní regulaci je, že můžeme měřit výstupy obou částí regulovaného procesu y_s a y . První část regulovaného procesu má menší časovou konstantu T , druhá část má v porovnání s první částí časovou konstantu větší. Poruchy d mohou působit na obě části.



Obr. 5. Regulovaný proces vhodný pro kaskádní regulaci

Pro takový proces je možné použít klasický jednosmyčkový regulační obvod s PI regulátorem pro y jako regulovanou veličinu a u jako akční veličinu. Kaskádní uspořádání však způsobí podstatně rychlejší a kvalitnější potlačení vlivu poruch působících na jednu nebo obě části procesu podle obr. 5. Jednoduše řečeno, v kaskádní regulaci využijeme obě měřené veličiny jednoho procesu, což představuje větší informaci než při klasické regulaci. Použití větší informace se projeví ve zlepšení kvality regulace. Častokrát to je více než desetinásobně menší přeregulování při kompenzaci poruchy a více než třikrát kratší doba ustálení [4] oproti klasické jednosmyčkové regulaci. Kaskádní regulační obvod současně tvoří dvě smyčky: vnější, také primární nebo hlavní (*outer loop*) smyčka a vnitřní, také sekundární nebo pomocná (*inner loop*) smyčka. Blokové schéma pro kaskádní regulaci je na obr. 6.



Obr. 6. Uspořádání smyček pro kaskádní regulaci

Základní výhody dvousmyčkové kaskádní regulace oproti klasické jednosmyčkové regulaci jsou tři.

První výhodou je, že poruchu, která působí na sekundární proces, potlačí sekundární regulátor před tím, než začne ovlivňovat primární proces. Účinek na primární regulovanou veličinu tak bude minimální. Proč? Předpokládáme, že můžeme sekundární proces vyjádřit přenosem

$$G_2(s) = \frac{K_{p2}}{T_2s + 1}$$

a pro sekundární regulátor použijeme P regulátor se zesílením K_2 . Působí-li porucha na vstupu sekundárního procesu, její vliv na primární proces je v ustáleném stavu

$$\frac{K_{p2}d}{1 + K_2K_{p2}}$$

což je oproti vlivu $K_{p2}d$ v jednoduché smyčce $1/(1 + K_2K_{p2})$ krát menší.

Druhou výhodou je, že se urychlí reakce sekundárního procesu. Vezmeme-li dříve uvedený přenos sekundárního procesu, přenos mezi výstupem primárního regulátoru jako žádanou hodnotou pro sekundární regulační obvod a y_s bude

$$\frac{K_2 \frac{K_{p2}}{T_2s + 1}}{1 + K_2 \frac{K_{p2}}{T_2s + 1}} = \frac{\hat{K}}{\hat{T}s + 1}$$

kde

$$\hat{K} = \frac{K_2K_{p2}}{1 + K_2K_{p2}}$$

a

$$\hat{T} = \frac{T_2}{1 + K_2K_{p2}} < T_2$$

Časová konstanta přenosu sekundární smyčky tak bude menší než u klasické jednoduché regulační smyčky. Tím se zvýší i rychlost odezvy v primární smyčce.

Třetí výhodou je, že sekundární regulátor tlumí vliv změny zesílení sekundárního procesu a tak zlepšuje celkovou robustnost regulace. Takový závěr je možné odvodit z uvedeného výrazu pro \hat{K} . Bude-li součin K_2K_{p2} velký, může být účinek změny zesílení sekundárního procesu ΔK_{p2} nepatrný, neboť

$$\Delta \hat{K} = K_2 \left(\frac{K_{p2} + \Delta K_{p2}}{1 + K_2(K_{p2} + \Delta K_{p2})} - \frac{K_{p2}}{1 + K_2K_{p2}} \right) \approx \frac{K_2 \Delta K_{p2}}{(1 + K_2K_{p2})^2}$$

Z výše uvedených tří bodů je patrné zlepšení kaskádního způsobu regulace oproti klasickému jednosmyčkovému uspořádání. V případě dvousmyčkové kaskádní regulace je zejména vhodné, když v sekundárním obvodu působí hlavní poruchy celého regulačního obvodu, neboť je možné poměrně rychle a efektivně potlačit jejich vliv. Sekundární obvod také může obsahovat členy s proměnlivým zesílením. Je rovněž vhodné, je-li sekundární smyčka rychlejší než primární. Poměr doby ustálení regulačních odezev v primární smyčce proti době ustálení v sekundární smyčce má být přinejmenším 5 [1].

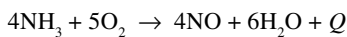
Klíčovou otázkou je, jaký typ regulátoru volit v sekundárním obvodu a jaký v primárním obvodu. Integrační část PID regulátoru obvykle obsahuje pouze primární regulátor. Proporcionální zesílení sekundárního regulátoru totiž bývá větší vzhledem k možnosti potlačit vliv poruch působících na sekundární proces. Ty se potom k primárnímu procesu „nedostanou“. Navíc trvalá regulační odchylka v sekundárním obvodu není příliš důležitá, neboť regulace výstupu sekundárního obvodu není cílem kaskádní regulace. Sekundárním regulátorem je proto obvykle pouze P regulátor s větším zesílením. Primárním regulátorem je obvykle PI nebo PID regulátor. Integrační část primárního regulátoru bude potlačovat vliv poruch působících nejen v sekundárním obvodu, ale také v primárním obvodu. Derivační část v souladu s jejím příznivým působením odezvu systému urychlí a stabilizuje.

Jako první vždy seřizujeme regulátor v sekundární smyčce. Vliv sekundární smyčky se v primární smyčce projevuje jako časová konstanta. Její velikost závisí na velikosti zesílení P regulátoru v sekundární smyčce (viz druhou z uvedených výhod). Přepínání obou regulátorů na automatický režim má přesné pořadí. Jeho dodržením se vyhneme zbytečným nárazům. Doporučuje se dodržovat následující postup (ze stavu, kdy jsou oba regulátory v manuálním režimu) [1]:

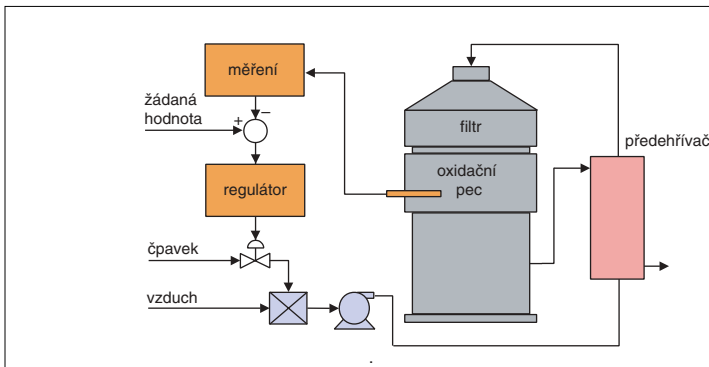
1. Nastavit žádanou hodnotu sekundárního regulátoru na hodnotu y_s (regulovaná veličina sekundárního procesu, obr. 6).

2. Přepnout sekundární regulátor do automatického režimu s interní žádanou hodnotou z bodu 1.
3. Nastavit primární regulátor tak, že jeho žádaná hodnota bude rovna y a jeho akční veličina bude rovna žádané hodnotě sekundárního regulátoru.
4. Zaměnit interní žádanou hodnotu sekundárního regulátoru za externí žádanou hodnotu.
5. Přepnout primární regulátor do automatického režimu.

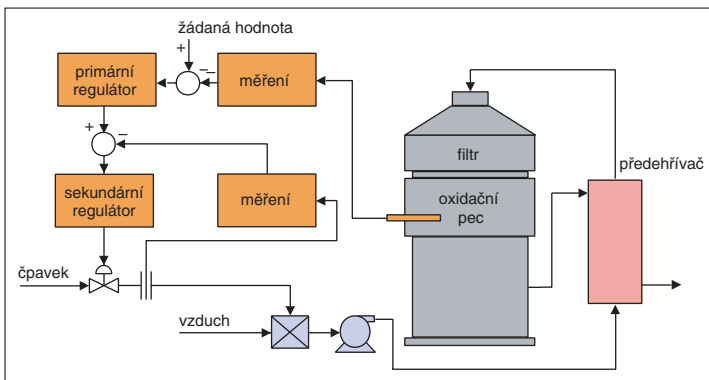
Uvedeme příklad, který ilustruje použití kaskádní regulace a objasňuje rozdíl mezi jednosmyčkovou a dvousmyčkovou regulací. Jde o chemickou oxidační pec [5] s chemickou reakcí hoření čpavku



kde Q reprezentuje teplo uvolněné během reakce. Předpokládá se požadavek regulovat teplotu v peci na žádanou hodnotu $\Theta = (840 \pm 5)^\circ\text{C}$. Uspořádání klasické jednosmyčkové regulace oxidační pece je na obr. 7. Regulovanou veličinou je teplota v oxidační peci a akční veličinou průtok čpavku. Vzhledem k poruchám toku čpavku a velké časové konstantě procesu je velmi obtížné udržet (uregulovat) teplotu v peci na požadovanou hodnotu. Zznamenejme zvláště, že v tomto případě lze regulovaný proces rozdělit na dvě samostatné části. První část tvoří rychlejší proces proudění čpavku, druhou část pomalejší tepelný proces pece, ve které hoří přivedený čpavek.



Obr. 7. Klasická jednosmyčková regulace teploty v oxidační peci



Obr. 8. Kaskádní způsob regulace teploty v oxidační peci

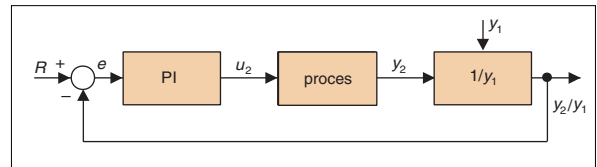
Hlavní poruchy v tomto systému působí na průtok čpavku. Protože má tepelný proces velkou časovou konstantu, projeví se poruchy na přívodu čpavku až za delší dobu. To má za následek i pomalou reakci regulátoru, která způsobuje špatnou kvalitu regulace. Kdyby bylo možné přivod čpavku určitým způsobem regulovat, účinek poruch na průtok čpavku by se omezil a tím by se zlepšila kvalita regulace. Do stávajícího regulačního obvodu tedy přidáme pomocný regulátor, který redukuje vliv poruch průtoku čpavku dříve, než začnou ovlivňovat teplotu v peci. Kaskádní uspořádání regulace je na obr. 8.

5. Poměrová regulace

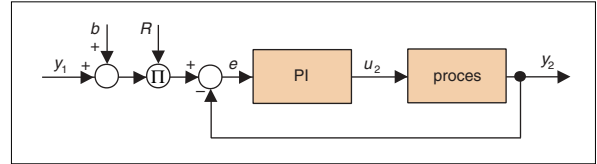
Existují regulační obvody (zejména s chemickými procesy, kdy se mísí různé látky, např. při hoření), kde cílem regulace není udržet jednu veličinu na žádané hodnotě, nýbrž udržet poměr dvou veličin na jisté specifické hodnotě. To je základní úloha pro poměrovou regulaci.

V zásadě existují dvě odlišná schémata pro realizaci poměrové regulace. První schéma ukazuje obr. 9.

Veličiny y_1 a y_2 jsou v tomto případě právě ty regulované veličiny různých procesů, které měříme a jejichž poměr potřebujeme udržet na speci-



Obr. 9. Klasická realizace poměrového způsobu regulace



Obr. 10. Zlepšená realizace poměrového způsobu regulace

ficiálně proměnlivé a navíc má nelineární charakter. Má-li y_1 malou hodnotu, zesílení může být i velké. Další problém nastane, bude-li y_1 obsahovat šum.

Druhé schéma pro poměrovou regulaci, které nemá uvedené nedostatky spojené s nelineárním zesílením v otevřené smyčce, je na obr. 10.

Zde se pracuje se standardní regulační smyčkou a místo děličky se používá násobička Π . Pro regulační odchylku platí $e = Ry_1 - y_2$ a v ustáleném stavu opět $y_2 = Ry_1$. V tomto případě je zesílení v otevřené smyčce standardní, a PI regulátor tudíž můžeme nastavit standardním způsobem. K veličině je dokonce možné v uspořádání podle obr. 10 přidat určitý trvalý posun b , v tomto případě po ustálení bude $y_2 = R(y_1 + b)$. Jistým problémem v tomto uspořádání může být skutečnost, že regulovaná veličina bude vždy zpóźděná v porovnání se žádanou hodnotou Ry_1 . Velikost tohoto zpóźdění je určena dynamikou regulačního obvodu s PI regulátorem (obr. 10). To může vést k problémům v přechodových stavech (např. při hoření).

PI regulátory, které navíc obsahují děličku (násobičku) pro poměrovou regulaci, se nazývají poměrové PI regulátory (RPI – Ratio PI Controllers [1]). RPI regulátory se v praxi často kombinují s klasickými regulátory PI, jako uvádí příklad typického hořáku na obr. 11, který vyžaduje konstantní poměr mezi palivem a vzduchem. RPI regulátor je realizován podle schématu z obr. 10.

Přísun paliva se reguluje PI regulátorem, přívod vzduchu RPI regulátorem. V tomto případě je veličinou y_1 průtok paliva a veličinou y_2 průtok vzduchu. Posun b zde můžeme použít pro to, aby byl zajištěn určitý minimální přívod vzduchu, i když neproudí žádné palivo.

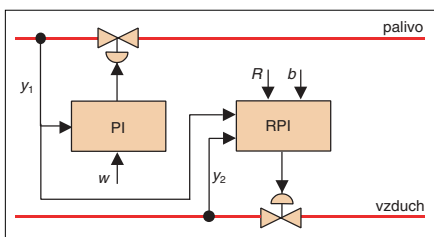
Zpóźdění se zde projeví takto: zvýší-li se žádaná hodnota w , zpóźdění způsobí poddimenzování přívodu vzduchu y_2 , a opačně, když se w sníží, přívod vzduchu y_2 je předimenzovaný. To může při hoření působit obtíže. Abychom jim předešli, doplňuje se schéma poměrové regulace odpovídající obr. 10 ještě jednoduchou dvoustavovou logikou, popř. se PI regulátor nastaví co možná nejagresivnějším způsobem.

6. Zavedení dopředné vazby

PI regulátor, a regulace pomocí zpětné vazby všeobecně, reaguje na regulační odchylku, od které odvozuje akční zásahy, bez ohledu na to, která porucha je příčinou této odchylky. Poruchy působící na regulovaný proces, které jsou zdrojem regulační odchylky, tak není nutné měřit. Je tato situace ideální? Intuice říká, že kdybychom poruchu mohli měřit, bylo by rozumné měření při regulaci využít, neboť by regulátor mohl poruchu kompenzovat ještě před tím, než začne působit na regulovaný proces. Z tohoto pohledu shrňme nedostatky PI regulace a zpětnovazebního uspořádání regulačního obvodu při reakci na poruchy:

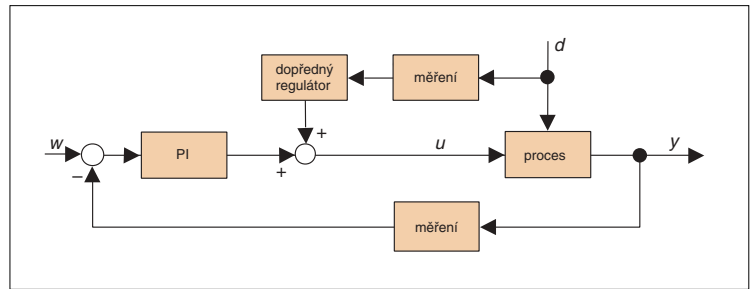
1. PI regulátor reaguje, až když se objeví regulační odchylka. Není možné dělat žádné prediktivní zásahy pro redukci účinků poruchy, i když ji můžeme měřit.
2. Jestliže se porucha objevuje relativně často vzhledem k časové konstantě regulace, nemůže se regulovaná veličina nikdy ustálit. Například, jestliže uzavřený regulační obvod bude reagovat jako systém prvního řádu $K_p/(Ts + 1)$ s časovou konstantou T a porucha se objevuje v kratších intervalech než $3T$ (je známo, že se systém prvního řádu s časovou konstantou T ustálí přibližně za $3T$), bude regulovaná veličina ustavičně „atakována“ poruchami a nikdy se neustálí.
3. PI regulátor může při potlačování poruchy vnést do regulačního obvodu určitou nestabilitu. Problém je v tom, že integrační část PI regulátoru potřebujeme k odstranění trvalé regulační odchylky. Regulátor ji ovšem odstraňuje metodou pokusů a omylů. A právě systémy, které problémy řeší tímto stylem, jsou charakteristické kmitavými odezvami.

Uvedeným problémům lze potenciálně předcházet, bude-li možnost měřit poruchy působící na regulovaný proces. Ke stávajícímu zpětnovazebnímu (feedback) regulačnímu obvodu s PI regulátorem přidáme tzv. dopředný (feed-forward) regulační obvod s dopředným regulátorem. PI regulátor bude moci na poruchu reagovat bezprostředně po jejím objevení. Tak je možné vliv poruchy na regulovaný proces podstatně omezit nebo úplně odstranit. Je zřejmé, že účinnost takového systému bude záviset na přesnosti a rychlosti, s níž dokážeme poruchu měřit a zavést ji do procesu regulace.



Obr. 11. Obvyklá konfigurace poměrového způsobu regulace

Obr. 12. Regulační systém se zpětnovazebním a dopředným regulátorem



Ilustrujme přínos takové dopředné vazby v praxi na příkladu řidiče automobilu. Předpokládejme, že řidič jede po silnici, která má profil ve tvaru U. Projede-li nejnižším bodem profilu, automobil začne stoupat a rychlost klesat. Přirozenou reakcí na odchylku je sešlápnout pedál a rychlost zvýšit na požadovanou hodnotu. Je-li stoupání prudší, řidič zjistí, že automobil rychlost nezvyšuje. Sešlápně tedy pedál více, rychlost se přesto nezvyšuje atd. Řidič v tomto případě reagoval až po objevení regulační odchylky, kdy rychlost automobilu začala klesat. Je však možný i jiný přístup. Vidí-li řidič výškový profil silnice, může reagovat na blížící se kopec (poruchu) zvýšením rychlosti dříve, než projede nejnižším bodem. Automobil potom zvládne následné stoupání nesrovnatelně lépe v porovnání s předchozí strategií.

Po diskusi o výhodách a nedostacích zpětnovazebního uspořádání a výhodách zavedení dopředné vazby můžeme nyní oba způsoby kombinovat a navrhnout regulační systém se zlepšeným výkonem. Dopředný regulátor kompenzuje poruchy před tím, než začnou působit na regulovaný proces. Regulační odchylku způsobenou neměřitelnými poruchami, změnou parametrů regulovaného procesu nebo změnou žádané hodnoty odstraní akční zásahy odvozené od zpětnovazební PI regulace. Touto kombinací lze obdržet regulační systém s výbornými vlastnostmi.

Dopředný regulační obvod s dopředným regulátorem přidáme do zpětnovazebního regulačního obvodu podle obr. 12. Zpětnovazební PI regulátor a dopředný regulátor jsou v odlišných smyčkách. Výstupy dopředného a zpětnovazebního regulátoru sečteme a tak formujeme výslednou akční veličinu. Aby bylo zřejmé, že v tomto uspořádání regulačního systému musíme měřit kromě regulované veličiny také poruchu, používáme bloky měření. Poznamenejme však, že schéma uvedené na obr. 12 není jedinou možnou kombinací dopředné a zpětnovazební regulace. Jinou možností vzájemné kombinace je, že výstup zpětnovazebního regulátoru slouží jako žádaná hodnota pro dopředný regulátor [4].

Označme zesílení jednotlivých bloků na obr. 12 podle tab. 1.

V případě, že porucha působí na vstupu procesu, je $K_d = K_p$. V případě, že porucha

Tab. 1. Zesílení jednotlivých bloků na obr. 12

Přenos	Symbol
proces	K_p
PI	K
dopředný regulátor	K_f
porucha	K_d
měření	H_d, H_y

působí na výstupu procesu, je $K_d = 1$. Pro zesílení poruchy do výstupu procesu dostaneme v ustáleném stavu

$$\frac{K_d + K_p K_f H_d}{1 + K K_p H_y}$$

K trvalé kompenzaci poruchy d přirozeně vyžadujeme, aby

$$K_d + K_p K_f H_d = 0$$

neboli

$$K_f = -\frac{K_d}{K_p H_d}$$

Protože měření často funguje jako „sledovač“, kdy $H_d = 1$, dostaneme pro zesílení dopředného regulátoru

$$K_f = -\frac{K_d}{K_p}$$

Působí-li porucha na vstupu procesu, potom $K_f = -1$, působí-li na výstupu procesu, $K_f = -1/K_p$. I taková relativně jednoduchá závislost dokáže činnost regulačního obvodu podstatně zlepšit.

Zahrneme-li do chování regulačního systému kromě ustáleného stavu i dynamiku jednotlivých bloků z obr. 12, musíme začít pracovat nejen se statickými zesíleními jednotlivých bloků, ale i s přenosy jednotlivých bloků. Výsledný vztah pro dopředný regulátor však zůstane stejný, pouze zesílení nahradíme přenosy, tj.

$$G_f = -\frac{G_d}{G_p}$$

kde uvažujeme $H_d = 1$, neboť měření poruchy má zpravidla mnohem rychlejší dynamiku vzhledem ke změnám poruchy. Podstatné je – a lze to jednoduše odvodit –, že dopředná vazba nijak neovlivní stabilitu zpětnovazebního regulačního obvodu. Určitým problémem při realizaci dopředného regulátoru může ale být, že

v jeho modelu je poměr, kde se ve jmenovateli vyskytuje přenos regulovaného procesu. Uvážíme-li např. poruchu na výstupu tohoto procesu, dostaneme přenos dopředného regulátoru jako obrácený poměr přenosu regulovaného procesu. Tím se jmenovatel přenosu procesu dostává do čitatele přenosu dopředného regulátoru a ten se stává fyzikálně nerealizovatelným, neboť čítec přenosu má vyšší řád než jmenovatel. V tomto stavu nezoufáme a použijeme nějakou jednoduchou aproximaci přenosu dopředného regulátoru procesem prvního řádu typu

$$K_f \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}$$

Zde jsou tři neznámé parametry K_f , T_1 a T_2 . Jejich nastavení také vyžaduje jisté úsilí, které se však významně sníží, když začneme s dobrým počátečním odhadem. Předně přepneme zpětnovazební regulační obvod do manuálního režimu a postupně provedeme skokovou změnu akční veličiny a poruchy a zaznameneáme odezvy. Odezvy aproximujeme modely [6]

$$G_p = \frac{K_p}{T_p s + 1}$$

pro proces a

$$G_d = \frac{K_d}{T_d s + 1}$$

pro poruchu. zesílení K_f můžeme odhadnout z poměrů v ustáleném stavu jako

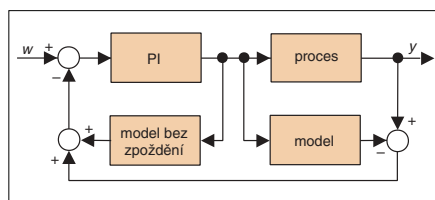
$$K_f = -\frac{K_d}{K_p}$$

Nyní nastavíme odhadnutou hodnotu zesílení dopředného regulátoru a časové konstanty dopředného regulátoru nastavíme na nulu. Uděláme malý skok poruchy. Jestliže se v ustálené regulované veličině objeví nějaký trvalý posun, nastavujeme zesílení dopředného regulátoru tak dlouho, až tento offset zmizí. Nastavíme časové konstanty dopředného regulátoru $G_f = -G_d/G_p$, tj. po dosazení $T_1 = T_p$ a $T_2 = T_d$. Další možnosti a postupy ladění dopředného regulátoru uvádí např. [4].

7. Kompenzace dopravního zpoždění

U průmyslových procesů se často vyskytuje dopravní zpoždění. Zkušenost autora článku je taková, že PI regulátor dokáže celkem přijatelně regulovat procesy s přechodovou charakteristikou typu S, jejichž relativní dopravní zpoždění [1], [6] je menší než přibližně 0,8. Co s větším dopravním zpožděním nebo s dopravním zpožděním procesů vůbec? Přítomnost dopravního zpoždění snižuje stabilitu regulačního obvodu. Existuje známé uspořádání zpětnovazebního regulačního obvodu, tzv. Smithův prediktor (obr. 13), ve kterém se dopravní zpoždění kompenzuje.

Blok nazvaný *model bez zpoždění* je modelem regulovaného procesu bez dopravního zpoždění, popsaný např. podle [6]



Obr. 13. Regulační systém Smithova prediktoru

$$\frac{K_p}{Ts + 1}$$

blok nazvaný *model* je modelem procesu zahrnujícím dopravní zpoždění, např.

$$\frac{K_p}{Ts + 1} e^{-sT_d}$$

podle [6].

Označíme-li postupně přenosy procesu G_p , regulátoru PI G_c modelu s dopravním zpožděním G_m a modelu bez dopravního zpoždění G_m^* , bude mít přenosová funkce mezi w a y podobu

$$\frac{G_c G_p}{1 + G_c (G_m^* + G_p - G_m)}$$

Jestliže bude model perfektní, tj. $G_p = G_m$, dopravní zpoždění ze jmenovatele přenosu zmizí a regulátor tohoto systému může být nastaven tak, jako kdyby regulovaný proces žádné dopravní zpoždění neměl. Výkon regulátoru se tak může podstatně zlepšit, neboť můžeme zvýšit jeho zesílení. V praxi lze použít tříparametrový model uvedený v [6], včetně jeho výpočtu. Je však nutná velká opatrnost se zvyšováním zesílení regulátoru, neboť i malá odchylka modelu od skutečného procesu $G_p - G_m$, která bývá v reálném světě nevyhnutelná, může znamenat špatný výkon a zhoršení stability, protože tuto odchylku zesiluje regulátor. Naproti tomu může při opatrném postupu Smithův prediktor zlepšit regulaci v situaci, kdy klasické schéma regulace nevyhovuje.

8. Selektce akční veličiny

Počet regulovaných veličin je při regulaci obvykle roven počtu akčních veličin. Jestliže se setkáme s regulačním obvodem, kde máme více regulovaných veličin na jednu akční veličinu, je nutné použít tzv. selektor, který umožní, že jednu akční veličinu budou společně sdílet dvě nebo více regulovaných veličin. Selektor je tedy zařízení s více vstupy a jedním výstupem. V zásadě se používají dva typy selektorů: selektor na maximum a selektor na minimum. Výstupem selektoru na maximum je největší ze vstupních signálů. Několik typických aplikačních oblastí pro takové systémy uvádí [2].

Příkladem použití selektoru v regulačním obvodu může být regulační obvod s jednou akční veličinou a několika regulovanými ve-

ličinami, které měříme v procesu. Jedna regulovaná veličina je přitom hlavní a požadujeme, aby se všechny regulované veličiny pohybovaly uvnitř předepsaného rozsahu. V tomto případě je možné použít několik samostatných PI regulátorů a selektor vždy vybere regulátor, který je v dané chvíli nejvhodnější pro akční zásah (má nejmenší nebo největší akční zásah). Tak zajistíme, aby regulované veličiny zůstaly v předepsaných rozsazích. Hlavní regulovanou veličinou může být např. teplota, ale přitom je nutné také zajistit, aby tlak nepřekročil příslušný rozsah.

Jinou aplikací může být chemický reaktor, kdy měříme teplotu na různých místech a požadujeme, aby každá naměřená hodnota byla menší než daná maximální teplota. Chemický reaktor má přitom pouze jednu akční veličinu. V takovém případě přivedeme měření teploty do selektoru, který všechny teploty porovná, vybere nejvyšší teplotu a tu pošle jako regulovanou veličinu do regulátoru.

9. Omezení vlivu nelinearit

S jistou nadsázkou můžeme říci, že teprve nelineární prvky v regulačním obvodu dělají regulaci zajímavou. S nelineárním prvkem v regulačním obvodu (děličkou) jsme se již setkali při realizaci poměrového regulátoru podle obr. 9. Naším snažením v zásadě je mít regulační obvod co nejvíce lineární. Čím více je totiž regulační obvod lineární, tím je regulace snadnější. Přestože je linearita jistou idealizací vzhledem ke skutečným vlastnostem regulovaných procesů a akčních členů, často tento idealizovaný pohled v regulaci plně postačuje.

Nelinearity se v regulačním obvodu vyskytují v různých podobách. Do určité míry degradují výkon regulačních obvodů. Snížený výkon regulačních obvodů se obsluhám sice nelíbí, ale akceptují ho. Známe-li např. charakteristiky nelinearit, je dobré zkusit minimalizovat jejich efekt.

Předně, nelinearity mohou být součástí samotného regulovaného procesu. Proces má např. nelineární statickou charakteristiku. Zlepšení linearity procesu způsobí samotná zpětná vazba. Je to jeden z jejich příznivých účinků, který se přirozeně uplatní, např. vyskytuje-li se nelinearita u sekundárního procesu při kaskádní regulaci. Ve zpětné vazbě tam nastavujeme P regulátor na vyšší zesílení, což má velmi příznivý vliv na zlepšení linearity procesu. Jinou rozšířenou možností je udělat jednoduchou analýzu pro různé pracovní podmínky a předpokládat linearitu procesu v blízkosti těchto podmínek.

Další nelinearity se mohou vyskytovat při měření regulovaných veličin. Ty můžeme kompenzovat tak, aby výsledek byl lineární nebo skoro lineární. Příkladem může např. být druhá odmocnina při měření průtoku pomocí clony. Vzhledem k tomu, že jsou počítačové

regulátory flexibilní. lze na měření aplikovat inverzní operaci, v tomto případě druhou mocninu.

Nejhorší jsou nespojitě nelinearity akčních orgánů, zejména ventilů. Při jejich kompenzaci nejsou nic platné zkušenosti získané při seřizování PI regulátorů a z chování lineárních regulačních obvodů. Uvedeme některé z nich.

Omezení rychlosti změny akčního zásahu se obvykle objevuje na ventilech, popř. na elektrických motorech, které ventily polohují. Toto omezení vede k problémům se stabilitou regulačního obvodu.

Předpokládejme, že 2% změnu udělá polohovač ventilu za 0,3 s a 50% změnu za 5 s. Vezmeme-li regulovaný proces třípřímým modelem [6], bude to znamenat, že každá změna polohy ventilu prodlužuje dopravní zpoždění L tohoto modelu, avšak malá změna méně a velká více. Velikost prodloužení je proměnlivá a závisí na velikosti změny. Podíváme-li se na vztahy pro zesílení PI regulátoru, je toto zesílení nepřímo úměrné dopravnímu zpoždění, tj. úměrné $1/L$. Jestliže nastavíme zesílení PI regulátoru K a regulátor provede velkou změnu akčního zásahu, prodlouží se díky omezení rychlosti změny doba L . Tato situace však odpovídá menšímu zesílení regulátoru. Jelikož je zesílení větší, stává se regulační obvod méně stabilním až do té doby, než se zesílení opět sníží nebo regulátor přepneme do manuálního režimu. Přepneme-li regulátor opět do automatického režimu, bude se situace opakovat. Závěrem tedy je, že omezení rychlosti změny akčních zásahů snižuje stabilitu regulačního obvodu. Obvod může být stabilní při malých změnách a nestabilní při velkých změnách. Abychom předešli snižování stability, snižujeme zesílení PI regulátoru, a to tak, abychom zajistili stabilitu i pro nejhorší případ, tj. největší změnu. Tím však zpravidla přicházíme o potřebný výkon PI regulátoru.

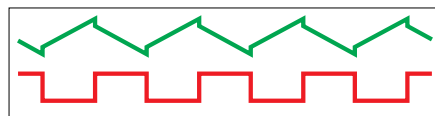
Existence pásma necitlivosti významně přispívá k problémům s nastavením PI regulátoru. Necitlivost způsobuje např. opotřebování akčních orgánů (vůle) nebo tření ventilů v jejich pouzdrech. Problémem potom jsou realizace malých změn akčních zásahů. Pojem malé změny je u ventilů relativní, u některých je malou změnou změna o méně než 10 %, u jiných méně než 1 %. Je-li změna akční veličiny malá, ventil se díky pásmu necitlivosti nepohne. To znamená, že regulovaná veličina nemusí přesně dosáhnout své žádané hodnoty. Vzhledem k tomu, že součástí PI regulátoru je i integrátor, bude se odchylka integrovat tak dlouho, dokud to nepovede k akčnímu zásahu potřebnému k „odlepení“ ventilu. Ventil se ale pohne příliš mnoho a tím zpravidla překlopí

znaménko regulační odchylky. Tento proces se stále opakuje (viz obr. 14). Tak vznikají trvalé oscilace regulované veličiny kolem žádané hodnoty.

Když vidí obsluha PI regulátoru oscilace, zpravidla reaguje tak (a reaguje správně), že sníží zesílení regulátoru nebo zvýší integrační časovou konstantu. Ovšem oscilace zůstanou, pouze mají delší periodu, sníží se výkon regulátoru a regulace je méně kvalitní. Tato situace je pro obsluhu skličující.

Problém s pásmem necitlivosti nevyřešíme seřizováním PI regulátoru. Svoji pozornost zaměřme spíše na ventil. Některé problémy s pásmem necitlivosti mohou omezit např. vhodné polohovací elektromotory ventilů nebo tzv. inteligentní ventily. Vybíráme-li polohovací elektromotor ventilu, měl by mít zesílení vyšší než přibližně 60.

Pracují-li ventily trvale v blízkosti některé krajní polohy (saturace), není to dobré. Směr jedné změny ventilu je v podstatě blokován, což převrací předpoklady, podle kterých byl regulátor nastaven, a vede to ke snížení výkonu regulátoru, někdy i významnému. Proto, máme-li problémy s výkonem regulátoru, jednou z možných příčin je zjistit, zda ventil nepracuje blízko krajní polohy, zvláště té uzavírací.



Obr. 14. Trvalé oscilace vlivem pásma necitlivosti
zeleně: výstup regulátoru, červeně: pohyb ventilu

Vzhledem k již uvedeným omezením zejména polohy ventilu a rychlosti změny je nutné uvedené hranice také „sdělit“ PI regulátoru, a to s ohledem na beznárazové přechody akčních zásahů, jejich zobrazování nebo správnou funkci integrační části (*windup*). Je-li např. PI regulátor přírůstkový, potřebuje pro následující akční zásah znát předchozí skutečný zásah. Proto do výstupu PI regulátoru zařazujeme blok realizující uvedené omezení. Způsobů, jak to udělat, je více a jsou celkem jednoduché. Jedno schéma současně omezující polohu akční veličiny i rychlost její změny uvádí kniha [1] (str. 289).

10. Překonání interakcí

Předpokládejme jedno potrubí se dvěma ventily. První ventil řídí regulátor regulující tlak v potrubí a druhý ventil řídí regulátor regulující množství média proudícího potrubím. Každý pohyb ventilu regulace tlaku ovlivní průtok média. Pohyb ventilu

regulace průtoku ovlivní tlak. O těchto dvou regulačních obvodech říkáme, že mají vzájemnou interakci. Nastavení např. PI regulátoru jednoho obvodu má vliv na přechodovou odezvu otevřené smyčky druhého obvodu, a tedy také na nastavení jeho regulátoru.

Existuje několik metod překonávání vzájemných interakcí:

- rozhodnout, zda některá regulační smyčka není nadbytečná,
- změnit uspořádání, která regulovaná veličina ovlivňuje který ventil,
- rozhodnout, která regulovaná veličina je nejdůležitější, její regulátor řádně nastavit a k interakcím přistupovat jako k poruchám,
- je-li regulátorem sekvenční automat nebo jiný počítačový systém, vytvořit program, který redukuje vzájemné vazby.

Největší problémy se vzájemnými interakcemi bývají, jsou-li doby ustálení přechodových odezví v otevřených smyčkách přibližně stejné.

Řešení problémů s interakcemi spadá do oblasti vícerozměrového řízení. Vícerozměrová PI regulace však přesahuje rámec tohoto článku. Proto autor považuje za rozumné v této chvíli skončit a téma vícerozměrové PI regulace ponechat na později na samostatný článek.

Literatura:

- [1] ASTRÖM, K. J. – HÄGGLUND, T.: PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, U.S.A. 1995.
- [2] SHINSKEY, F. G.: Process Control Systems: Application, Design, and Tuning. Mc Graw-Hill 1995.
- [3] MARLIN, T. E.: Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. Mc Graw-Hill 1995.
- [4] SEBORG, D. – EDGAR, T. – MELLICHAMP, D.: Process Dynamics and Control. John Wiley-Sons 1989.
- [5] RAO, M. – QIN, H.: Process Control Engineering. Gordon and Breach Science Publishers 1993.
- [6] KLÁN, P.: Moderní metody nastavení PID regulátorů, Část I: Procesy s přechodovou charakteristikou typu S. Automa, 2000, č. 9, s. 54 – 57. Část II: Integrační procesy. Automa, 2001, č. 1, s. 52-54.
- [7] KLÁN, P. – GOREZ, R.: Balanced Tuning of PI Controllers. European Journal of Control, Vol. 6, 2000, No. 6, pp. 541-550.
- [8] KLÁN, P. – GOREZ, R.: Vyvážené nastavení PI regulátorů. Automa, 2000, č. 4, s. 49-53.

doc. Petr Klán,
Ústav informatiky AV ČR
a Univerzita Pardubice (pklan@cs.cas.cz)