

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz

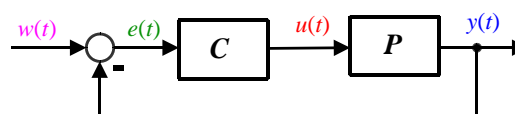


Kapitola 14

Regulační smyčka a základní typy PID regulátorů

Ve snaze řídit systémy rozeznáváme dva hlavní způsoby řízení:

- přímovazební,
- zpětnovazební.

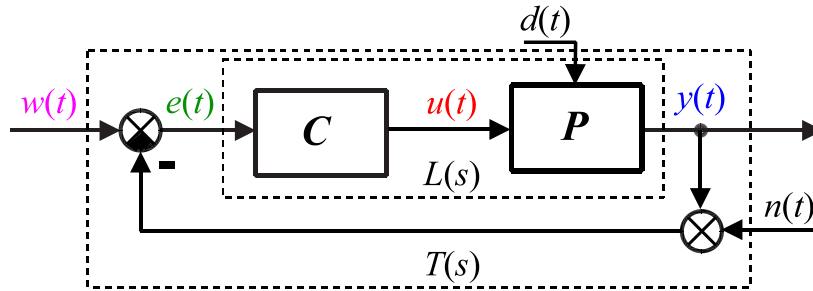


Přímovazební řízení (řízení v otevřené smyčce), zvané také jako *ovládání*, má jednodušší zapojení, ovšem jeho nevýhodou je nemožnost reagovat na poruchy či změny soustavy a my se jím zde dále zabývat nebudeme. Naproti tomu zpětnovazební řízení (řízení v uzavřené smyčce), obecně označované jako *regulace*, porovnává výstup soustavy $y(t)$ s požadovaným výstupem $w(t)$, a podle této informace generuje akční zásah $u(t)$ do řízeného systému. Regulace nám tak dává mimo jiné možnost stabilizovat nestabilní soustavy (DORF, R. C. a BISHOP, R. H., 2007; FRANKLIN, G. F. et al., 2005; JOHN, J., 1998; HAVLENA, V. a ŠTECHA, J., 2000).

V této kapitole se budeme věnovat regulaci, regulační smyčce a základním typům regulátorů. Ukážeme si dvě základní zapojení regulačních smyček a zavedeme jednotné názvosloví, které bude použito i v ostatních částech publikace (zejména proto, že toto názvosloví není ustálené a často studenty mate). Vysvětlíme si některé míry kvality řízení a ukážeme názorně na příkladech vlastnosti základních PID regulátorů (ÅSTRÖM, K. J. a HÄGGLUND, T., 1995). Zvláštní pozornost bude věnována filtraci derivační složky u tohoto regulátoru. Konkrétní způsoby návrhu regulátorů si ukážeme v následujících kapitolách. Na konci této kapitoly najdete sadu neřešených příkladů, které mají sloužit k procvičení této látky. Klíč k těmto příkladům naleznete v závěru této publikace.

14.1 Regulační smyčka

Pod pojmem regulační smyčka zpravidla rozumíme zpětnovazební obvod (DORF, R. C. a BISHOP, R. H., 2007; FRANKLIN, G. F. et al., 2005; JOHN, J., 1998; HAVLENA, V. a ŠTECHA, J., 2000), který vidíme na obr. 14.1.



Obrázek 14.1: Regulační smyčka s regulátorem s jedním stupněm volnosti

Tento nejroššířenější typ regulační smyčky obsahuje dvě základní komponenty: regulovanou *soustavu* P (z anglického plant) a *regulátor* C (z anglického controller). Dále se ve smyčce vyskytují signály, které budeme nazývat následovně:

- $w(t)$... žádaná hodnota výstupu,
- $e(t)$... regulační odchylka,
- $u(t)$... akční zásah (výstup regulátoru, vstup soustavy),
- $y(t)$... regulovaná veličina (výstup soustavy),
- $d(t)$... porucha (vstupu soustavy),
- $n(t)$... šum měření.

Z regulačního obvodu, nebo též z regulační smyčky, kterou vidíme na obr. 14.1, je zřejmé, že regulační odchylka $e(t)$ je rovna rozdílu žádané hodnoty výstupu $w(t)$ a výstupu soustavy $y(t)$

$$e(t) = w(t) - y(t). \quad (14.1)$$

Na základě této veličiny generuje regulátor akční zásah $u(t)$, kterým působí na regulovanou soustavu.

Poznámka: Občas se můžeme setkat s označením $w(t)$ jako vstup, myšleno vstup regulační smyčky. Rádi bychom se tomuto označení vyhnuli. Označení vstup může lákat k záměně signálu $w(t)$ za signál $u(t)$, nehledě nato, že signál $w(t)$ není jediný vstup regulační smyčky. Dohromady s poruchou $d(t)$ a šumem měření $n(t)$ nazýváme tyto signály vnějšími vstupy regulačního obvodu. \square

V regulační technice zavádíme další pojmy v souvislosti s regulační smyčkou uvedenou na obr. 14.1. Je to *přenos otevřené smyčky* $L(s)$ v Laplaceově transformaci, který označuje přenos regulační smyčky po rozpojení zpětné vazby

$$L(s) = P(s)C(s). \quad (14.2)$$

Pokud necháme zpětnou vazbu na obr. 14.1 zapojenou, označujeme přenos z $w(t)$ na $e(t)$ jako $S(s)$ a nazýváme ho *citlivostní funkcí* (z anglického sensitivity function)

$$S(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{1}{1 + P(s)C(s)} = \frac{1}{1 + L(s)} \quad (14.3)$$

a přenos z $w(t)$ na $y(t)$ jako $T(s)$ a nazýváme ho *doplňkovou citlivostí*

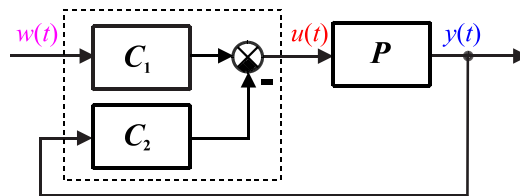
$$T(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)} = \frac{L(s)}{1 + L(s)}. \quad (14.4)$$

Ze vztahů (14.3) a (14.4) vidíme, že platí

$$S(s) + T(s) = 1,$$

což přináší omezení při návrhu regulační smyčky (DORF, R. C. a BISHOP, R. H., 2007; HAVLENA, V. a ŠTECHA, J., 2000). Při analýze regulačních obvodů sledujeme citlivost (14.3) i doplňkovou citlivost (14.4), neboť platí, že je-li regulační smyčka stabilní budou stabilní i obě citlivosti.

V klasické regulační smyčce uvedené na obr. 14.1 generuje regulátor akční veličinu $u(t)$ na základě regulační odchylky $e(t)$. Tato varianta neumožňuje seřídit parametry regulátoru zvlášť pro optimální potlačení poruchy $d(t)$ a zvlášť pro optimalizaci tvaru odezvy uzavřené smyčky na skokovou změnu požadované hodnoty $w(t)$. Je tedy nutné volit jistý kompromis mezi těmito rozdílnými požadavky. Proto se někdy namísto regulační smyčky z obr. 14.1 používá i jiných struktur, například zapojení regulátoru se dvěma stupni (HAVLENA, V. a ŠTECHA, J., 2000) volnosti podle následujícího obrázku.



Obrázek 14.2: Regulační smyčka s regulátorem se dvěma stupni volnosti

V této regulační smyčce reaguje regulátor jinak na změnu $w(t)$ a jinak na $y(t)$. Regulátor tedy získává informaci o obou veličinách zvlášť. Většinou požadujeme, aby regulátor rychle a výrazně reagoval na změnu regulované veličiny (hodně velká derivační složka

u hladkých průběhů $y(t)$ neudělá nepřiměřeně velký regulační zásah). Naopak u skokové změny žádané hodnoty $w(t)$ je potřeba výrazně derivační složku omezit.

Regulátory se dvěma stupni volnosti jsou tedy složeny ze dvou oddělených regulátorů, na jejichž vstupy jsou přivedeny odděleně $w(t)$ a $y(t)$ a odečítá se až jejich výstup (jejich „akční zásahy“). Ve skutečnosti musí být tento regulátor realizován jako jeden prvek (oba bloky musejí mít stejný jmenovatel), abychom neztratili stabilitu regulační smyčky (HAVLENA, V. a ŠTECHA, J., 2000).

Kvalita regulace

Pro hodnocení kvality řízení se používají některé míry, které jsme si definovali již dříve:

- *Rezonanční převýšení*

Většina řídicích systémů se v praxi navrhuje s rezonančním převýšením $1 \div 3$ dB, protože různé nelinearity, které nejsou lineárním modelem nějakého reálného systému popsány, zpravidla překmitu utlumí. Pokud by se vyžadovalo rezonanční převýšení nulové, tedy bez překmitu, byla by odezva zpětnovazebního obvodu s reálným systémem zbytečně pomalá.

- *Šířka přenášeného pásma*

Širší propustné pásmo znamená rychlejší odezvu systému, to je kratší dobu náběhu přechodové charakteristiky (dobu, za kterou přejde výstup z 10% na 90% ustálené hodnoty). Na druhou stranu větší šířka přenášeného pásma znamená, že systém může reagovat i na vysokofrekvenční šum vstupující do různých částí regulační smyčky. S šířkou přenášeného pásma souvisí i *amplitudová* a *fázová bezpečnost*.

- *Regulační odchylka v ustáleném stavu*

Navrhujeme regulační obvody, aby regulační odchylka měla v ustáleném stavu nulovou nebo nějakou malou hodnotu (obvykle 1%, 2% nebo 5% z žádané hodnoty $w(t)$).

Nyní se zaměříme na část regulační smyčky, kterou jsme nazvali regulátor. Regulátory lze členit z různých hledisek. Například z hlediska přívodu energie se dělí regulátory na přímé a nepřímé. Přímé odebírají veškerou energii potřebnou ke své činnosti z regulované soustavy – příkladem je roztěžníkový regulátor otáček parního stroje známý též jako Wattův regulátor, o kterém se více dozvíte například v (MAYR, O., 1970; *Wikipedie – Otevřená encyklopedie* [online], 2009). Nepřímé vyžadují ke své funkci přívod vnější energie (například elektrické). Podle charakteru media, které je nositelem regulačního signálu se dělí regulátory na mechanické, pneumatické, hydraulické, elektrické a podobně.

Podle toho, v jakém tvaru je signál regulátorem přenášen se dělí na spojité a číslicové. Číslicovým regulátorem bývá nejčastěji počítač, který umožňuje téměř libovolnou složitost regulátoru a který může pod slovem regulátor skrývat různě složité algoritmy, které například mohou zaručit v jistém smyslu *optimální řízení* (ÅSTRÖM, K. J. a WITTENMARK, B., 1997; ÅSTRÖM, K. J. a WITTENMARK, B., 1995; ZHOU, K. et al., 1996; MACIEJOWSKI, J. M., 2002; HAVLENA, V. a ŠTECHA, J., 2000). Zvláštní kategorii tvoří v praxi nejpoužívanější regulátor PID (ÅSTRÖM, K. J. a HÄGGLUND, T., 1995), na který se v této části knihy zaměříme.

14.1.1 Regulátor PID

PID regulátor obsahuje 3 složky: proporcionální, integrační a derivační. Do akčního zásahu se tak přenáší zesílená regulační odchylka e , její integrál a také její derivace. Ta v regulátoru působí proti prudké změně regulační odchylky e . Naopak integrační složka slouží k přesnému regulování v ustáleném stavu. Rovnici PID regulátoru v časové oblasti je možné zapsat ve tvaru

$$u(t) = k_P e(t) + k_I \int_0^t e(\tau) d\tau + k_D \frac{de(t)}{dt} \quad (14.5)$$

a z ní vychází přenos regulátoru v Laplacově transformaci

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s. \quad (14.6)$$

V jiných publikacích, například v (HUGH, J., 2004; LI, Y. et al., 2006), se můžeme setkat s jinými zápisy přenosu PID regulátoru, jako například

$$C(s) = k_P \left(\frac{1}{T_I s} + 1 \right) (T_D s + 1) \quad (14.7)$$

nebo

$$C(s) = k_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (14.8)$$

V následujících kapitolách budeme teorii okolo PID regulátorů zakládat na přenosu (14.6), respektive rovnici (14.5), ale principy budou vykládány obecně, takže si je budete moci odvodit i pro vztahy (14.7) a (14.8).

Položíme-li některé z konstant regulátoru rovné nule, vzniknou nám regulátory jednodušší. Ty se používají v případech, kdy nemůžeme či nechceme použít celý regulátor PID. Nejpoužívanější z nich jsou v tab. 14.1.

Tabulka 14.1: Jednoduché typy PID regulátorů

Regulátor	Zastoupení složky			Časová rovnice	Přenos
	P	I	D		
P	ANO	NE	NE	$u(t) = k_p e(t)$	$C(s) = k_p$
I	NE	ANO	NE	$u(t) = k_i \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau$	$C(s) = \frac{k_i}{s}$
PI	ANO	ANO	NE	$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau$	$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$
PD	ANO	NE	ANO	$u(t) = k_p e(t) + k_D \frac{de(t)}{dt}$	$C(s) = k_p + k_D s$

14.1.1.1 Filtrace derivační složky

Výhodou derivační složky regulátorů PD a PID je její schopnost rychle reagovat na změny žádané hodnoty a na poruchy. To zároveň způsobuje potíže, protože zesiluje i vysokofrekvenční šumy a může tak být zdrojem nestability. Z tohoto důvodu a také proto, že je v praxi ideální D složka nerealizovatelná, se derivační složka filtruje od vysokých frekvencí. To se zpravidla provádí filtrací celého regulátoru přidáním filtračního pólu k přenosu regulátoru

$$C(s) = \frac{k_p + \frac{k_i}{s} + k_D s}{\frac{s}{\omega_f} + 1}, \quad (14.9)$$

kde ω_f [rad s⁻¹] je filtrační frekvence.

Můžeme se setkat i s případem filtrace pouze D složky regulátoru

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_D s}{\frac{s}{\omega_f} + 1}. \quad (14.10)$$

Je nezbytné všimnout si rozdílu mezi oběma způsoby zápisu. Při použití stejných konstant jednotlivých částí regulátoru k_p, k_i, k_D a frekvence filtru ω_f se výsledný přenos regulátoru v obou případech liší. Aby nedocházelo k nedorozuměním, budeme nadále předpokládat první způsob filtrace, tedy vztah (14.9).

14.2 Příklady

Příklad 14.1: Nakreslete přechodovou charakteristiku ideálního P regulátoru s konstantou $k_p = 2$ a porovnejte ji s přechodovou charakteristikou reálného P regulátoru, který má navíc časovou konstantu $\tau = 0,01$ s.

Řešení: Ideální P regulátor je tedy podle (14.6)

$$C(s) = 2.$$

Pro porovnání potřebujeme zjistit přenos regulátoru s časovou konstantou $\tau = 0,01$ s. Pro časovou konstantu platí $\tau = \omega_f^{-1}$. Tedy podle (14.9) je P regulátor se zpožděním

$$C(s) = \frac{2}{0,01s + 1}.$$

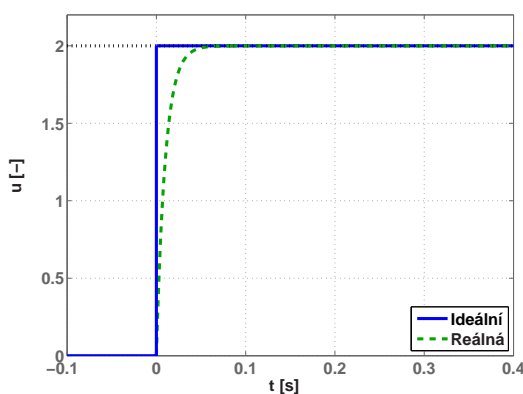
Porovnání obou přechodových charakteristik je na obr. 14.3(a). Do obr. 14.3(a) sami vyznačte konstanty k_p a τ . Porovnejte také Bodeho frekvenční charakteristiky obou regulátorů. ✓

Příklad 14.2: Proveďte stejné porovnání jako v předchozím příkladě pro I regulátor s konstantami $k_i = 0,5$ a $\tau = 0,01$ s.

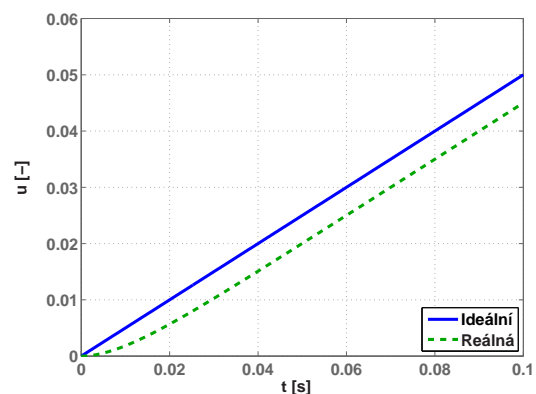
Řešení: Řešení tohoto příkladu je podobné jako řešení minulého příkladu. Ideální a reálný I regulátor je

$$C(s) = \frac{0,5}{s}, \quad C(s) = \frac{0,5}{s} \frac{1}{0,01s + 1} = \frac{0,5}{s(0,01s + 1)}.$$

Porovnání přechodových charakteristik je na obr. 14.3(b).



(a) ideální a reálný (se zpožděním) P regulátor



(b) ideální a reálný (se zpožděním) I regulátor

Obrázek 14.3: Přechodové charakteristiky ideálních a reálných regulátorů

Na obr. 14.3(b) sami vyznačte konstanty k_i a τ . Porovnejte také Bodeho frekvenční charakteristiky obou regulátorů. ✓