

# Storočná teória riadenia je stále jadrom priemyselných PID regulátorov (1)

Proporcionálno-integračno-derivačné (PID) regulátory sú bezkonkurenčne najpoužívanejšie regulátory v priemysle. Uvádza sa dokonca, že až 95 % všetkých regulačných algoritmov je typu PID a že veľká väčšina z nich navyše využíva proporcionálnu a integračnú zložku. Napriek nepochybnej jednoduchosti PID regulátorov sú s nimi v priemysle veľké problémy. Väčšina regulačných slučiek nie je vhodne navrhnutá alebo vyladená. Mnohé z nich dokonca trvalo pracujú v manuálnom režime. Ekonomické dôsledky tohto stavu sú obrovské. V tejto súvislosti sa zdá byť zarážajúce, ako málo priestoru sa PID regulátorom obvykle venuje v súčasných štandardných učebniciach automatického riadenia. Ak je o nich aj zmienka, PID regulátor je uvažovaný ako špeciálny prípad čohosi oveľa všeobecnejšieho a kvalitnejšieho. Nezasvätený čitateľ vtedy rýchlo nadobudne dojem, že PID regulátory sú pod jeho úroveň a svoju pozornosť sústredí na niečo neporovnateľne dokonalejšie, avšak často tiež dokonale izolované od priemyselnej praxe. Mnoho vynikajúcich odborníkov v automatickom riadení sa skutočne domnieva, že moderné teórie riadenia ponúkajú lepšie riešenia než klasické, už skoro 100 rokov staré PID regulátory a že iba konzervatívny priemysel tieto nové riešenia nedokáže využiť. Reálna situácia v riadení procesov tomu však nenasvedčuje. Výrobcovia regulátorov vyvíjajú síce stále nové a domyselnejšie produkty vybavené rôznymi pokročilými funkciami, ako sú napríklad automatické nastavenie parametrov alebo diagnostika funkcií regulátora, no jadrom týchto produktov sú stále v podstate rovnaké PID algoritmy. Zdá sa, že v mnohomiliónovej populácii PID regulátorov dochádza k evolúcii, ktorú dominantne riadi prax a nie teória. V dôsledku toho existuje veľký počet rôznych variantov regulátorov a len zriedka sú dostatočne presne opísané v príslušných používateľských príručkách. Často nie je vôbec jasné, aký je presný význam zadávaných parametrov a ako bude regulátor reagovať v neštandardných režimoch. Cieľom tohto článku je ponúknuť istú teóriu, ktorá umožní porozumieť rôznorodým variantom PID algoritmov používaným v súčasných kompaktných regulátoroch, programovateľných automatoch a distribuovaných systémoch riadenia a ktorá je užitočná najmä pri projektovaní viacslučkových regulačných systémov a ich uvádzaní do prevádzky.

## Modely procesov

Technologické procesy, ktoré chceme riadiť, sú väčšinou veľmi zložité, nelineárne a premenné v čase. Nádej, že získame ich presný matematický model vo všetkých pracovných režimoch, je nereálna. Matematicko-fyzikálna analýza procesu nie je väčšinou možná pre veľkú zložitosť procesu a experimentálna identifikácia (metódou čiernej skrinky) je príliš nákladná a v priemyselných podmienkach väčšinou neuskutočniteľná. Našťastie na to, aby sme mohli navrhnúť vyhovujúce riadenie procesu, netreba poznať univerzálny model procesov. Dlhoročné skúsenosti potvrdzujú, že napr. pre návrh rozumného PID regulátora nám obvykle stačí poznať dve alebo tri charakteristické čísla procesu (doba prietahu a nábehu, statické zosilnenie). Podobné závery možno urobiť tiež na základe populárnej Zieglerovej-Nicholsovej metódy, ktorá pre návrh PID regulátora využíva iba dve tzv. kritické hodnoty (kritické zosilnenie a kritickú frekvenciu). Nedávno sa za dosť všeobecných predpokladov dokázalo, že pre vyhovujúci návrh PID regulátora stačí poznať len jediný bod frekvenčnej charakteristiky riadeného systému s fázovým oneskorením 135°. Zo všet-

kých týchto skutočností vyplýva, že pre návrh PID regulátora sa môžeme obmedziť na modely, ktoré obsahujú iba dva alebo tri parametre. Tieto modely však musia byť relatívne presné vo frekvenčnej oblasti okolo fázového oneskorenia 135°.

## Klasifikácia procesov

Na návrh regulátora sa procesy podľa tvaru prechodovej charakteristiky členia na statické, astatické, neminimálne fázové, kmitavé a ďalej podľa pomeru medzi dobou prietahu a dobou nábehu na dobre a zle regulovateľné. Všetky potrebné informácie pre takúto klasifikáciu možno získať z nameranej prechodovej charakteristiky (obr. 1), prípadne z frekvenčnej charakteristiky procesu.

Najrozšírenejšia prechodová charakteristika vyskytujúca sa pri riadených procesoch je typická monotónna krivka S statického systému zobrazená na obr. 1a. Jej začiatok možno hrubo opísať prenosom s dvoma parametrami

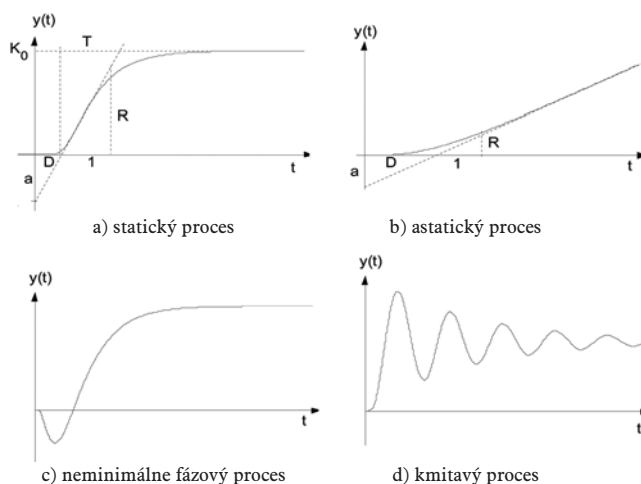
$$F_{a2}(s) = \frac{R}{s} e^{-De} = \frac{a}{Ds} e^{-Ds} \quad (1)$$

kde význam parametrov  $a$ ,  $D$ ,  $R$  je zjavný z obr. 1a ( $R$  zodpovedá maximálnej strmosti prechodovej charakteristiky). Lahko sa dá ukázať, že platí  $T_{180} = 4D$  a  $K_{180} = 2a/\pi$ . Tieto vzťahy môžu byť veľmi užitočné pri orientačných odhadoch parametrov regulátora. Na uspokojivý opis celej prechodovej charakteristiky možno použiť trojparametrový prenos

$$F_{a3}(s) = \frac{K_0 e^{-Ds}}{Ts + 1} \quad (2)$$

kde význam parametrov  $K_0$ ,  $D$ ,  $T$  je opäť zjavný z obr. 1a. Poznamenajme, že prenos (1) používa populárna Zieglerova-Nicholsova metóda na návrh P, PI a PID regulátora a prenos (2) je najčastejšie používaný model na návrh PID regulátora. Na obr. 1b je uvedená prechodová charakteristika astatického systému (t. j. procesu s integráciou). Tomuto prípadu zodpovedajú procesy s riadením hladiny a tlaku v uzavretej nádobe, koncentrácie a teploty v dobre izolovaných peciach. Spoločným menovateľom všetkých týchto procesov je akumulácia hmoty alebo energie. Na ich opis obvykle vyhovuje prenos (1) alebo trojparametrový prenos

$$F_{b3}(s) = \frac{R}{s} \frac{e^{-Ds}}{Ts + 1} = \frac{a}{Ds} \frac{e^{-Ds}}{Ts + 1} \quad (3)$$



Obr.1 Klasifikácia procesov

Prechodová charakteristika zobrazená na obr. 1c zodpovedá neminimálne fázovému systému, kde výstup systému najprv beží na nesprávnu stranu. S takýmto správaním sa môžeme stretnúť napr. v systémoch riadenia hladiny v parnom kotle. Vhodným modelom je tu prenos s nestabilnou nulou napr.

$$F_{d3} = \frac{K_0(1-\alpha s)}{(Ts+1)^n} \quad n = 2,3,\dots \quad (4)$$

kde však parametre  $K_0$ ,  $\alpha$ ,  $T$ ,  $n$  nemožno jednoducho odčítať z prechodovej charakteristiky, ale dajú sa získať napr. metódou najmenších štvorcov. Prechodová charakteristika zobrazená na obr. 1d zodpovedá kmitavému systému, ktorý sa v riadení technologických procesov vyskytuje veľmi zriedka (v mechatronike je to však naopak jav veľmi častý). Kmitanie môže byť spôsobené nevhodne nastaveným regulátorom (skrytým) na nižšej hierarchickej úrovni.

### Charakteristické čísla statického procesu

Na posúdenie, či je daný statický proces dobre alebo zle regulovateľný a tiež pre voľbu typu regulátora a približné určenie jeho parametrov je užitočné zaviesť nasledujúce bezrozmerné charakteristické čísla procesu.

Normalizované oneskorenie je definované vzťahom

$$\tau = \frac{D}{D+T} \quad (5)$$

kde  $D$  je doba prieňahu (tiež fixné alebo zdanlivé dopravné oneskorenie) a  $T$  je doba nábehu (obr. 1a). Všimnime si, že  $\tau$  vždy leží v intervale  $\langle 0,1 \rangle$ . Malé hodnoty  $\tau$  zodpovedajú dobre a veľké naopak zle regulovateľným procesom (medza je zhruba  $\tau = 0,4$ ). Normalizované zosilnenie  $K$  je definované vzťahom

$$K = \frac{K_{180}}{K_0} \quad (6)$$

kde  $K_0$  je statické zosilnenie a  $K_{180}$  je zosilnenie na frekvencii  $\omega_{180}$ , pri ktorej dochádza k fázovému oneskoreniu  $180^\circ$ . Normalizované zosilnenie leží opätovne v intervale  $\langle 0,1 \rangle$  a rovnako sa dá interpretovať aj jeho veľkosť. Malé hodnoty zodpovedajú dobre a veľké zle regulovateľným procesom. Pre relatívne presný výpočet parametrov regulátora statického systému stačí obvykle znalosť troch charakteristických čísel  $D$ ,  $T$  a  $K$  alebo alternatívne  $K_0$ ,  $K_\varphi$  a  $\omega_\varphi$ , kde  $\varphi$  spĺňa podmienku  $90 \leq \varphi \leq 180$ .

### Regulátory

Za začiatok éry PID regulátorov (ako ich poznáme dnes) sa dá považovať obdobie 1915 – 1940, keď vznikali preslávené regulačné firmy Bristol, Fisher, Foxboro, Honeywell, Leeds&Nortrup a Taylor Instrument. Proporcionálne integračné regulátory sa však v priemysle používali oveľa skôr. Proporcionálna spätná väzba tvorí základ dobre známeho odstredivého regulátora vynájdeného okolo roku 1750, ktorý sa použil na riadenie otáčok veterného mlyna. Podobný regulátor riadil tiež otáčky Wattovho parného stroja (1788). Na odstredivý regulátor sa vtedy pozeralo ako na jediné zariadenie bez rozlíšenia snímača regulovanej veličiny, ústredného a akčného člena. Následné porozumenie významu jednotlivých častí tohto zariadenia bolo kľúčovým bodom pre jeho ďalšie zlepšovanie. Konkrétne oddelenie snímača od akčného člena umožnilo vývoj hydraulického mechanizmu realizujúceho proporcionálno-integračný regulátor.

Regulátor s derivačnou zložkou bol prvý raz zostrojený v spoločnosti Taylor Instrument v roku 1935 (ako pneumatický regulátor). Hoci v tom čase už existovali teoretické práce analyzujúce podmienky stability lineárnej spätoväzbovej slučky, zdá sa, že teória nemala pri vzniku PID regulátora podstatný vplyv na regulačných inžinierov pracujúcich v priemysle. To do istej miery platí

dodnes. Vďaka búrlivému rozvoju techniky, ktorý umožnil prejsť od pneumatickej implementácie na analógovú a potom na súčasnú mikroprocesorovú technológiu, zostávajú základné funkčné vlastnosti priemyselného regulátora v podstate bez zmien. Zákom riadenia zostáva štandardný PID algoritmus. Dramatické zvýšenie výpočtového výkonu mikropočítačov však umožňuje takmer bez obmedzenia zlepšovať zákon riadenia a dopĺňať ho pokročilými funkciami, ako je filtrácia vstupných signálov, dopredná väzba, prepínanie súborov parametrov regulátora, kvalitné ošetrovanie medzných stavov, beznárazové prepínanie režimov a parametrov, automatické nastavovanie parametrov a dômyselná diagnostika.

### Varianty a realizácia PID regulátorov

Ideálny PID regulátor sa vyskytuje predovšetkým v učebniciach a len veľmi zriedka ho možno využiť v praxi. To, čo je skutočne ťažké na PID regulátoroch, je práve to, čo dopĺňa lineárny zákon riadenia do použiteľnej podoby. Realizácia PID algoritmu v rôznych kompaktných regulátoroch, programovateľných automatoch a distribuovaných systémoch riadenia sa navzájom veľmi odlišuje. Horšie však je, že obvykle nie je dostatočne presne opísaná ani v príslušnej používateľskej príručke. To, samozrejme, sťažuje efektívne využívanie algoritmu predovšetkým vo viacsúčkových regulačných štruktúrach. Nasledujúce riadky sa budú zaoberať rôznymi variantmi realizácie PID regulátorov a rôznymi doplnkami a trikmi, ktoré používajú výrobcovia regulátorov na zistenie funkčnosti svojich produktov.

*Všetky informácie v týchto kapitolách článku pochádzajú z publikácie Průmyslové PID regulátory: Tutorial od Doc. Ing. Miloša Schlegla, CSc., ktoré sme mohli uverejniť s jeho vysloveným súhlasom.*

### Literatúra

[1] SCHLEGEL, M.: Průmyslové PID regulátory: Tutorial, <[http://www.rexcontrols.cz/downloads/clanky/PID\\_Tutor\\_CZ.pdf](http://www.rexcontrols.cz/downloads/clanky/PID_Tutor_CZ.pdf)>

*Pokračovanie v budúcom čísle.*