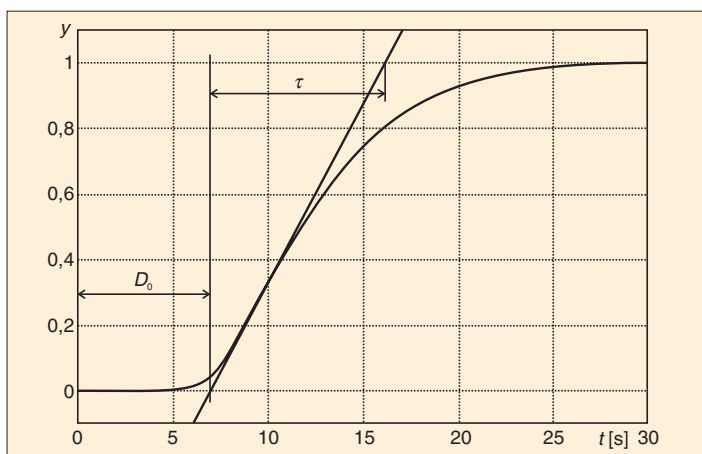


# Regulátor systémů s dopravním zpožděním

Řízení systémů s dominantním dopravním zpožděním pomocí běžného PI(D) regulátoru obvykle neposkytuje uspokojivé výsledky. Řešení spočívá v použití regulátoru se složitější strukturou, která obsahuje model řízeného systému. V rámci grantu MPO FI-IM3/056 Metody a algoritmy automatického nastavování průmyslových regulátorů a jejich implementace do řídicího systému ZAT-Plant Suite MP byl na Západočeské univerzitě vyvinut regulátor se Smithovým prediktorem, jehož algoritmus byl implementován do vývojového prostředí ZAT Pertinax. Regulátor se Smithovým prediktorem je v prostředí Pertinax vytvořen strukturou z více bloků, které v sobě obsahují model řízeného systému. Jádro regulačního obvodu tvoří blok PID regulátoru s autotunerem PIDMA. Ten je upraven tak, aby na svých výstupech poskytoval důležité hodnoty, které jsou využity pro nastavení modelu řízené soustavy.

## Princip Smithova prediktoru

Jednoduché vylepšení standardního PI(D) regulátoru navrhl již v roce 1957 Otto J. M. Smith. Úprava spočívá v přidání přenosu, který obsahuje model řízeného systému do další zpětné vazby kolem regulátoru. Uvažujeme-li tříparametrový model procesu, např. ve tvaru prvního řádu s dopravním zpožděním, potom má PI regulátor se Smithovým prediktorem pět volitelných parametrů. Jejich nastavení metodou pokus-omyl je velmi zdoluhavé. Také proto se regulátor se Smithovým prediktorem nerozšířil do praxe.



Obr. 1 Určení doby průtahu a náběhu

Důležitým vodítkem při rozhodování, zda použít regulátor se Smithovým prediktorem, je míra dobré regulovatelnosti systému. Řízené systémy lze rozdělit na dobře a špatně regulovatelné podle poměru doby průtahu  $D_0$  a doby náběhu  $\tau$ . Tyto doby můžeme odečíst, příp. odhadnout, z přechodové charakteristiky řízeného systému. Na obr. 1 je přechodová charakteristika systému se zpožděním 5 s a časovými konstantami 2, 2,5 a 3 s. Z obr. 1 je zřejmý způsob nalezení hodnot doby průtahu a náběhu pomocí přímky, která je proložena inflexním bodem přechodové charakteristiky. Za špatně regulovatelné systémy označíme ty, u kterých je doba průtahu větší než polovina doby náběhu:

$$D_0 > 0,5\tau \quad (1)$$

Zatímco pro dobře regulovatelné systémy nepřinese použití Smithova prediktoru zlepšení kvality řízení, u špatně regulovatelných systémů je kvalita řízení při použití prediktoru výrazně lepší, a to tím čím je poměr (1) větší.

Základní myšlenka Smithova prediktoru spočívá v doplnění standardního přenosu regulátoru  $C(s)$  zpětnou vazbou, která obsahuje model řízeného systému. Na obr. 2 je tato myšlenka vysvětlena názorně. Obr. 2a ukazuje regulátor, který reguluje systém  $F(s)$  s dopravním zpožděním. Na obr. 2b reguluje regulátor systém  $T(s)$ , který získáme ze systému  $F(s)$  vypuštěním jeho dopravního zpoždění. Pokud regulátor dobře reguluje systém  $T(s)$ , bude dobře regulovat i systém  $F(s)$ . Tvar odezvy na výstupu  $y$  bude mít totiž stejný dynamický průběh jako na výstupu  $z$ , pouze posunutý o dopravní zpoždění. Prakticky však není možné takové zapo-

jení provozovat, neboť v praxi nikdy nemáme přesný model řízeného systému  $F(s)$ , ale pouze zjednodušený model  $E(s)$ . Aby regulátor reguloval s nulovou odchylkou v ustáleném stavu, musí být celá struktura navržena jako zpětnovazební od skutečného výstupu  $y$  řízeného systému  $F(s)$ . Na obr. 2c máme již výslednou strukturu regulátoru se Smithovým prediktorem. V šedě zvýrazněné oblasti je vidět struktura regulátoru se Smithovým prediktorem. Použitý model  $E(s)$  bývá obvykle systém prvního nebo druhého řádu s dopravním zpožděním:

$$E(s) = Ke^{-Ds}(\tau s + 1)^{-1}$$

$$E(s) = Ke^{-Ds}(\tau s + 1)^{-2} \quad (2)$$

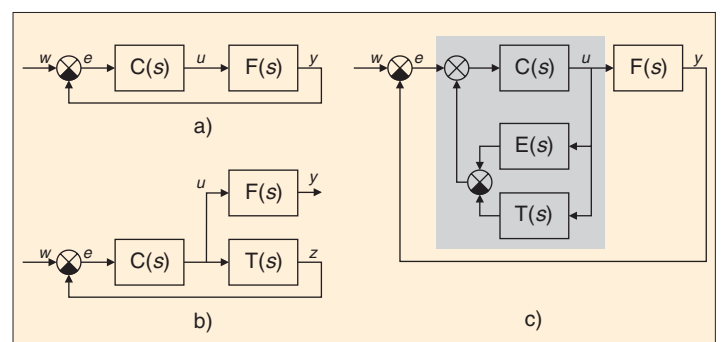
Obdobné tvary přenosů se stejnými parametry, ale bez dopravního zpoždění má přenos  $T(s)$ .

## Implementace regulátoru se Smithovým prediktorem

Pro implementaci regulátoru se Smithovým prediktorem do prostředí Pertinax, byl upraven blok regulátoru s impulzním autotunerem a vytvořen blok modelu zadávaný parametry přenosu. Dále jsou využívány další standardní bloky systému Pertinax. Na obr. 3 je vidět blokové schéma regulátoru se Smithovým prediktorem, vytvořené v návrhovém prostředí Pertinax. Zpětná vazba tvořící prediktor je tvořena dvěma bloky modelů MDL1 a 2 a dvěma odečítacími členy SUB1 a 2. Ve schématu je použit odečítací blok místo sčítacího, jak je vyznačeno na obr. 2c, protože je vazba zavedena do větve řízené veličiny a ne do větve regulační odchylky. Ve zpětné vazbě je ještě vřazen přepínač SWR1, který v případě potřeby zpětnou vazbu, která tvoří prediktor, odpojí. Odpojení prediktoru je nutné např. při ladění, kdy blok PIDMA identifikuje parametry modelu řízeného systému.

## Postup nastavení

Upravený blok regulátoru PIDMA výrazně usnadňuje nastavení regulátoru. Podle požadavku na svém vstupu poskytuje po identifikačním experimentu na výstupu buď parametry regulátoru, nebo hodnoty, kterými se parametrizují modely dle vzorců (2). Nastavení regulátoru se



Obr. 2 Princip Smithova prediktoru

Smithovým prediktorem má několik fází. Podle poměru doby průtahu a doby náběhu posoudíme, zda je vůbec vhodné Smithův prediktor použít. Dále posoudíme tvar přechodové charakteristiky řízeného systému. Pokud se jedná o systém nízkého řádu s velkým dopravním zpožděním, je vhodnější jako model použít systém prvního řádu s dopravním zpožděním. Pokud se jedná o řízené systémy, kde zpoždění vzniká

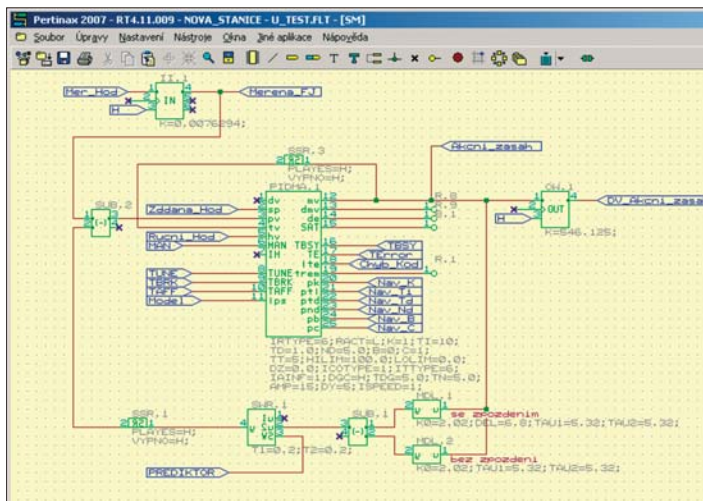
parametrem bloku. Když odezva systému dosáhne předdefinované změny, je pulz automaticky ukončen. Po ukončení identifikace je nutné přenést hodnoty parametrů, které vrací blok PIDMA, do modelů, které tvoří prediktor. Oba modely mají stejnou dynamiku přenosu, avšak pouze model MDL1 obsahuje dopravní zpoždění.

Další krok spočívá v nalažení regulátoru se zapojeným Smithovým prediktorem.

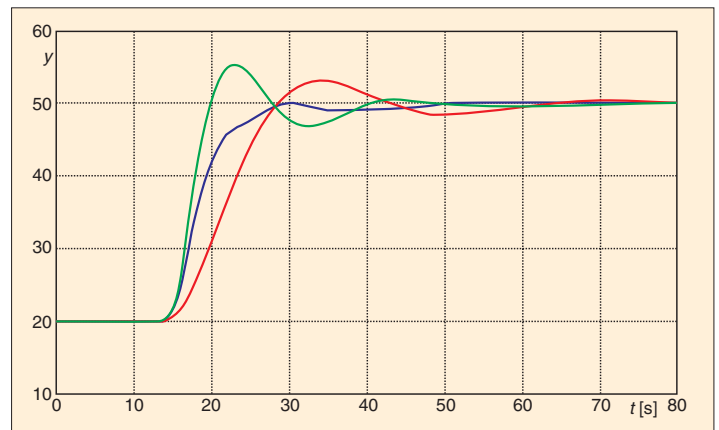
změnou žádané hodnoty, nebo přivedením poruchové veličiny na výstup regulátoru.

### Praktické zkušenosti

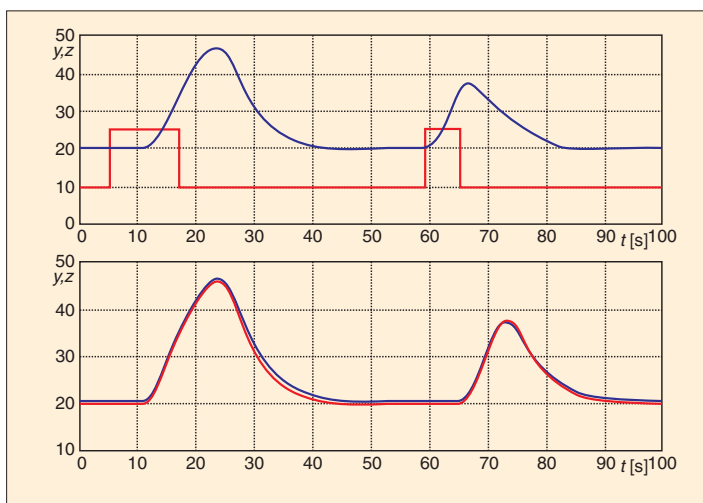
Regulátor se Smithovým prediktorem byl v systému Pertinax zatím zkoušen jen proti simulovaným systémům. Během těchto zkoušek se prověřila funkčnost použitého zapojení. Prokázalo se, že obzvlášť při použití modelu prvního řádu není vhodné pou-



Obr. 3 Schéma v prostředí Pertinax



Obr. 5 Srovnání průběhů řízené veličiny na skokovou změnu žádané hodnoty (amplituda = 30): PI regulátor (červeně), prediktor s modelem 1. řádu (modře), prediktor s modelem 2. řádu (zeleně)

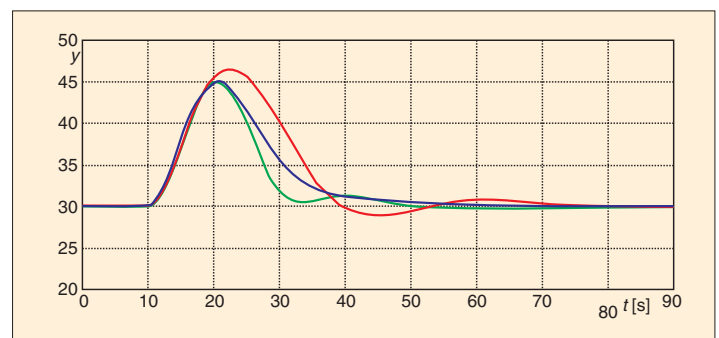


Obr. 4 Průběh akčního zásahu (nahore červeně) a měřené hodnoty (nahore modře) během dvou kroků ladění (v druhém kroku je prediktor připojen a odezva je bez zpoždění) a srovnání odezvy již nastaveného modelu (dole modře) a řízeného systému (dole červeně).

vysokým řádem systému, je vhodnější použít jako model systém druhého řádu s dopravním zpožděním. Ladění je nutné provést ve dvou krocích (obr. 4). Nejdříve je nutné nalézt model řízeného systému. Teprve poté je možné provést konečné nalažení regulátoru s prediktorem. Při prvním ladění je pomocí bloku SWR1 zpětná vazba prediktoru rozpojena. Po vyslání požadavku na ladění je na výstupu bloku PIDMA vygenerován měřicí impuls, který vyvolá odezvu na výstupu identifikovaného systému. Amplituda tohoto impulsu je definovaná

základě změřených hodnot momentů odezvy je parametrizován mno-žinový model. Blok PIDMA tak vypočte robustní parametry, které kvalitně regulují všechny systémy množinového modelu, jenž vyhovují změřeným momentům [2 a 3]. Po ukončení samoladění a nastavení parametrů regulátoru je možné regulátor přepnout do automatického provozu. Během identifikace parametrů regulátoru je vhodné sledovat shodu odezvy modelu a řízeného systému.

Při provozu v uzavřené smyčce je možné ověřit kvalitu řízení například skokovou



Obr. 6 Srovnání průběhů řízené veličiny na skokovou změnu poruchy (amplituda = 10), která působí na výstupu regulátoru: PI regulátor (červeně), prediktor s modelem 1. řádu (modře), prediktor s modelem 2. řádu (zeleně)

Ladění je prováděno stejným algoritmem, který automaticky generuje impuls a sleduje odezvu měřené hodnoty. Na

základě změřených hodnot momentů odezvy je parametrizován mno-žinový model. Blok PIDMA tak vypočte robustní parametry, které kvalitně regulují všechny systémy množinového modelu, jenž vyhovují změřeným momentům [2 a 3]. Po ukončení samoladění a nastavení parametrů regulátoru je možné regulátor přepnout do automatického provozu. Během identifikace parametrů regulátoru je vhodné sledovat shodu odezvy modelu a řízeného systému.

$$F(s) = 2e^{-5s}(2s + 1)^{-1}(2,5s + 1)^{-1}(3s + 1)^{-1}(3)$$

živat derivační složku regulátoru. Neshody řízeného systému a modelu vedou ke vzniku špiček v signálu regulační odchylky, které by pak (zesíleny derivačním článkem) zbytečně namáhaly akční člen. Pro posouzení přínosu Smithova prediktoru byly porovnávány odezvy řízené veličiny na skokovou změnu žádané hodnoty a poruchy v uzavřeném systému s odezvou regulačního obvodu, který obsahoval pouze PI regulátor bez prediktoru. Jeden z příkladů tohoto srovnání je na obr. 5 a 6. Experimenty byly prováděny na systému třetího řádu s dopravním zpožděním.

Parametrizace modelu a regulátoru byla provedena hodnotami, které v průběhu samoladění vracel blok PIDMA. Srovnání výsledků je vidět v tabulce.

**Parametry PI regulátoru a modelu prediktoru**

	bez prediktoru	prediktor s modelem 1. řádu	prediktor s modelem 2. řádu
P	0,27	1,64	1,02
T <sub>i</sub>	6,96	7,63	6,29
K		2,04	2,04
D		8,04	5,96
τ		5,08	3,57

Použití Smithova prediktoru umožní větší zesílení regulátoru. To se projeví ve zkrácení doby odregulování poruchy. Hlavní změna je ale ve tvaru přechodové charakteristiky uzavřeného systému. Ta výrazně rychleji reaguje na změny žádané hodnoty, což je důležité hlavně při sledování nebo když se žádaná hodnota často mění.

**Závěr**

S podporou grantu MPO ČR byly během tří let společně se Západočeskou univerzitou v Plzni implementovány nové regulátory a regulační struktury do vývojového prostředí ZAT Pertinax. Některé nové algoritmy jsou zatím ve fázi zkoušení, jiné však již našly široké uplatnění v průmyslové praxi. Regulátor se Smithovým prediktorem, přestože má užší rozsah použití, také najde uplatnění, a to nejen díky usnadnění procesu nalezení modelu a naladění regulátoru, ale i díky návodu a dokumentaci, která povede projektanty řídicích systémů při jeho návrhu a zprovoznění.

*Ing. Milan Kučera, ZAT, a. s.  
prof. Ing. Miloš Schlegel, CSc., ZČU v Plzni*



**Kontakt: ZAT a. s.**  
**K Podlesí 541, 261 80 Příbram VI**  
**tel.: 318 652 111, fax: 318 627 471**  
**e-mail: zat@zat.cz**  
**www.zat.cz**

**LITERATURA**

- [1] SCHLEGEL, M., VEČEREK, O., *Řízení systémů s dominantním dopravním zpožděním (výzkumná zpráva)*. Plzeň : ZČU v Plzni, 2001.
- [2] SCHLEGEL, M., VEČEREK, O., *Robust design of Smith predictive controller for moment model set*. In Preprints of the 16<sup>th</sup> IFAC World Congress, Prague 2005.
- [3] KUČERA, M., *Regulátory s autotunery v ŘS ZAT. Automatizace*, 50 (2007), č.12, s. 803–804.



**OM 408UNI**

**8-mi kanálová měřicí ústředna**  
**4 místné programovatelné zobrazení**  
**Digitální filtr, Tára, Linearizace**  
**Velikost DIN 96 x 48 mm**  
**Napájení 80...250 V AC/DC**

**Rozsahy**  
**DC:** 0...60 / 150 / 300 / 1200 mV  
**PM:** 0...5 / 20 mA, 4...20 mA / ±2 / 5 / 10 / 40 V  
**OHM:** 0...100 Ω / 0...1 / 10 / 100 kΩ  
**RTD:** Pt 100 / Pt 500 / Pt 1 000  
**Ni:** Ni 1 000 / Ni 10 000  
**T/C:** J / K / T / E / B / S / R / N / L  
**DU:** lineární potenciometr

**Rozšíření**  
 Komparátory (8x relé) › Datový výstup ›  
 Analogový výstup › Záznam naměřených hodnot ›  
 Napájení 10...30 V AC/DC



**více o našich výrobcích na:**  
[www.orbit.merret.cz](http://www.orbit.merret.cz)



ORBIT MERRET, spol. s r. o.  
 Vodňanská 675/30, 198 00 Praha 9  
 tel.: +420 281 040 200  
 e-mail: orbit@merret.cz

**Dokonalost & kompetence**

**19" systémy skříňů od**

**fischer elektronik s.r.o.**  
**součástkový distributor**

- rozmanitý systém komponentů pro skříňky, skříňe a zásuvné kazety s funkčním designem
- zákaznická barevná zadání, zpracování a zvláštní vyhotovení



**19" stavební systém "Plusline"**  
 elegantní skříňe a stolní skříňky se schopností přestavby, různé druhy dveří, soklů a horních nástaveb.



**19" systém skříňů "RackCase"**  
 moderní forma s barevným designem, PC-skříňe využitelné též jako nosné konstrukce pro stavební skupiny



**19" zásuvné moduly**  
 1 až 6 U, odtímatelné kryty, montážní desky, stavební provedení s integrovanými chladiči

**ČESKÁ REPUBLIKA**  
 39901 Milevsko, nám. E. Beneše 10  
 Tel.: 00 420 - 382 / 52 10 70  
 Fax: 00 420 - 382 / 52 10 25  
 mobil: 00 420 - 602 / 486 335  
[distribuce@fischerelektronik.cz](mailto:distribuce@fischerelektronik.cz)

**SLOVENSKÁ REPUBLIKA**  
 Trenčín, 91311 Trenčianské Stankovce 367  
 Tel.: 00 421- 326/ 49 72 17  
 Fax: 00 421- 326/ 49 72 18  
 mobil: 00 421- 905/ 914 617  
[fischerelektronik@nexta.sk](mailto:fischerelektronik@nexta.sk)

<http://www.fischerelektronik.cz>