



# **POZOROVATEL PORUCHY**

**Doplňkový učební text**

**Miluše Vítečková**

## Obsah

Obsah.....	2
Seznam základního značení .....	2
1 Úvod.....	4
2 Pozorovatel poruchy .....	4
3 Příklady .....	6
Příklad 1 .....	6
Příklad 2 .....	8
Příklad 3 .....	12
4 Závěr .....	15
5 Literatura.....	15

## Seznam základního značení

$a_i$	konstanta
$G_D$	přenos neinvertibilní části regulované soustavy (nejčastěji dopravního zpoždění)
$G_{Dm}$	přenos modelu neinvertibilní části regulované soustavy (nejčastěji dopravního zpoždění)
$e$	regulační odchylka
$E$	obraz regulační odchylky
$G_{FR}$	přenos filtru pozorovatele poruchy
$G_P$	přenos invertibilní části regulované soustavy
$G_{Pm}$	přenos modelu invertibilní části regulované soustavy
$G_R$	přenos regulátoru
$G_S$	přenos regulované soustavy ( $G_P G_D$ )
$G_{Sm}$	přenos modelu regulované soustavy
$G_{uy}$	přenos akční veličiny na regulovanou veličinu
$G_{ve}$	odchylový přenos poruchy
$G_{we}$	odchylový přenos řízení
$G_{wu}$	přenos žádané veličiny na akční veličinu
$G_{wy}$	přenos řízení

$k_i$	koeficient přenosu
$K_P$	zesílení regulátoru
$M$	řád filtru pozorovatele poruchy
$n$	řád invertibilní části regulované soustavy
$N$	konstanta filtru derivační složky regulátoru
$s$	komplexní proměnná u Laplaceovy transformace
$t$	čas
$T_d$	dopravní zpoždění
$T_D$	derivační časová konstanta
$T_f$	časová konstanta filtru pozorovatele
$T_I$	integrační časová konstanta
$u$	akční veličina
$U$	obraz akční veličiny
$v$	poruchová veličina (porucha)
$V$	obraz poruchové veličiny (poruchy)
$\hat{v}$	pozorovaná poruchová veličina (její odhad)
$\hat{V}$	obraz pozorované poruchové veličiny (jejího odhadu)
$w$	žádaná veličina
$W$	obraz žádané veličiny
$y$	regulovaná veličina
$Y$	obraz regulované veličiny
$\tau$	bezrozměrový čas

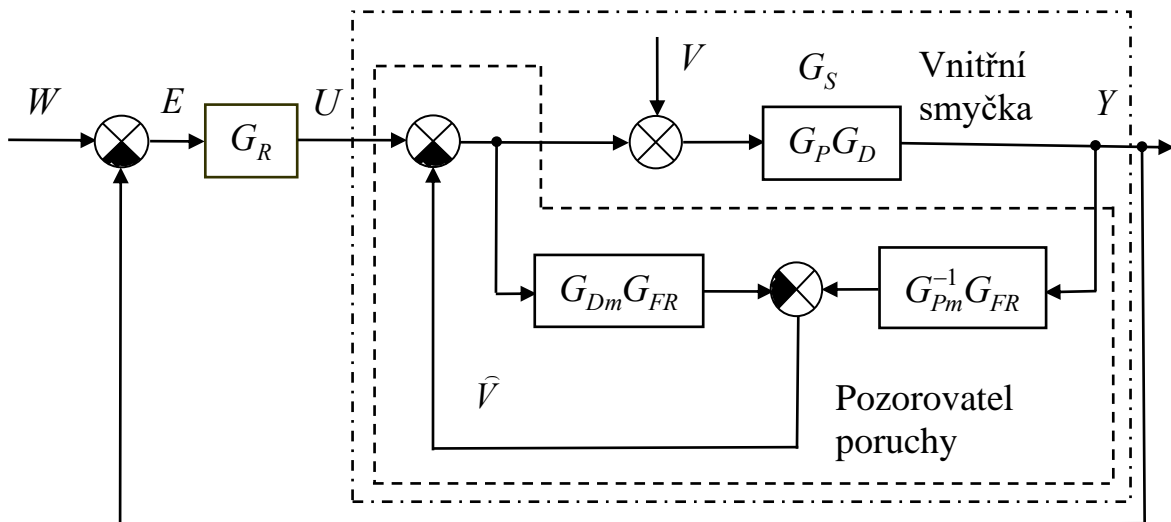
## 1 Úvod

Při zajištění požadované kvality regulace často vzniká problém, jak snížit, případně i odstranit nepříznivý vliv poruchové veličiny.

Jednou z cest je použití pozorovatele poruchy (DOB – disturbance observer) [1], který umožňuje podstatné snížení vlivu poruchové veličiny na kvalitu regulace, a především dovede odstranit trvalou regulační odchylku způsobenou její skokovou změnou v těch případech, kdy to použitý regulátor nezajistí.

## 2 Pozorovatel poruchy

Regulační obvod s pozorovatelem poruchy je na obr. 1.



Obr. 1 Základní schéma regulačního obvodu s pozorovatelem poruchy

Na obr. 1 značí:  $G_R$  – přenos regulátoru,  $G_S$  – přenos soustavy,  $G_P$  – přenos invertibilní části soustavy ( $G_{Pm}$  – přenos jejího modelu),  $G_D$  – přenos neinvertibilní části soustavy ( $G_{Dm}$  – přenos jejího modelu),  $G_{FR}$  – přenos filtru pozorovatele poruchy zajišťujícího fyzikální realizovatelnost inverze  $G_{Pm}^{-1}$ ,  $W$  – obraz žádané veličiny  $w$ ,  $E$  – obraz regulační odchylky  $e$ ,  $U$  – obraz akční veličiny  $u$ ,  $V$  – obraz poruchové veličiny (poruchy)  $v$ ,  $\hat{V}$  – obraz pozorované poruchové veličiny (jejího odhadu)  $\hat{v}$ ,  $Y$  – obraz regulované veličiny  $y$ .

Je zřejmé, že jde o rozvětvený regulační obvod, kde vnitřní smyčku tvoří pozorovatel poruchy a soustava.

Neinvertibilní část soustavy  $G_D$  nejčastěji reprezentuje dopravní zpoždění a musí vyhovovat podmínce

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_D(s) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{Dm}(s) = 1. \quad (1)$$

Stejnou podmínku musí splňovat i filtr, tj.

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{FR}(s) = 1. \quad (2)$$

Filtr je často navrhován ve tvaru

$$G_{FR}(s) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{M-n} a_i (T_f s)^i}{(T_f s + 1)^M} = \frac{1 + \sum_{i=1}^{M-n} a_i (T_f s)^i}{1 + \sum_{i=1}^M a_i (T_f s)^i}, \quad M \geq n. \quad (3)$$

kde  $n$  je řád invertibilní části soustavy,  $T_f$  – časová konstanta filtru pozorovatele, která se volí. Její hodnota silně ovlivňuje kvalitu odstranění odchylky.

Použití pozorovatele poruchy podle obr. 1 výrazně snižuje vliv poruchové veličiny  $v$  na výstup  $y$  bez použití vnější zpětné vazby. Vyplývá to z přenosu vnitřní smyčky (obr. 1)

$$G_{wy}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_P(s)G_D(s)}{1 + [G_P(s)G_{Pm}^{-1}(s)G_D(s) - G_{Dm}(s)]G_{FR}(s)}, \quad (4)$$

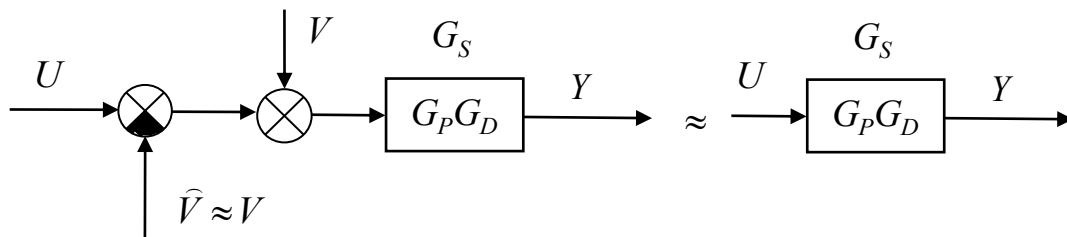
protože pro

$$G_{Pm}(s) = G_P(s), \quad G_{Dm}(s) = G_D(s) \quad (5)$$

se pro vnitřní smyčku dostane

$$G_{wy}(s) = G_P(s)G_D(s). \quad (6)$$

Je zřejmé, že pozorovatel poruchy v zapojení podle obr. 1 „eliminuje“ působení poruchové veličiny  $v$ , tj. pomocí jejího odhadu  $\hat{v}$  ji kompenzuje, viz obr. 2.



Obr. 2 Ilustrace „eliminace“ poruchové veličiny

Pro odchylkové přenosy platí

$$G_{we}(s) = \frac{E_w(s)}{W(s)} = \frac{1 + [G_P(s)G_{Pm}^{-1}(s)G_D(s) - G_{Dm}(s)]G_{FR}(s)}{1 + [G_P(s)G_{Pm}^{-1}(s)G_D(s) - G_{Dm}(s)]G_{FR}(s) + G_R(s)G_P(s)G_D(s)}, \quad (7)$$

$$G_{ve}(s) = \frac{E_v(s)}{V(s)} = - \frac{[1 - G_{Dm}(s)G_{FR}(s)]G_P(s)G_D(s)}{1 + [G_P(s)G_{Pm}^{-1}(s)G_D(s) - G_{Dm}(s)]G_{FR}(s) + G_R(s)G_P(s)G_D(s)}. \quad (8)$$

Při splnění podmínek (1) a (2) pro trvalou regulační odchylku pro skokovou změnu poruchové veličiny  $v_0$  platí [4]

$$e_v(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [sE_v(s)] = \lim_{s \rightarrow 0} [G_{ve}(s)v_0] = 0. \quad (9)$$

Trvalá regulační odchylka  $e_w(\infty)$  způsobená skokovou změnou žádané veličiny  $w_0$  závisí na vlastnostech soustavy a regulátoru [2, 4].

***Při použití pozorovatele poruchy se nejdříve seřídí regulátor z hlediska žádané veličiny  $w$  a pak se navrhne pozorovatel z hlediska odstranění vlivu poruchové veličiny  $v$ .***

### 3 Příklady

#### Příklad 1

Pro regulovanou soustavu s přenosem

$$G_S(s) = G_P(s) = \frac{k_1}{(T_1s + 1)^2} \quad (10)$$

je třeba seřídít regulátor PI metodou optimálního modulu ( $k_1 = 2$ ,  $T_1 = 3$  s). Dále je třeba navrhnout pozorovatel poruchy a porovnat regulační procesy s pozorovatelem a bez něho.

#### Řešení:

Pro soustavu (10) [ $G_D(s) = 1$ ] a metodu optimálního modulu s kompenzací [2, 4] pro stavitelné parametry regulátoru PI s přenosem

$$G_R(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (11)$$

platí

$$K_P^* = \frac{1}{2k_1} = 0,25,$$

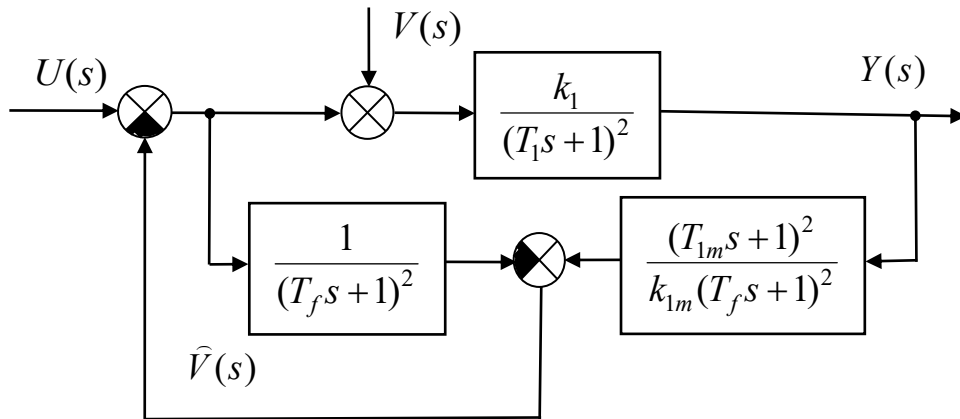
$$T_I^* = T_1 = 3 \text{ s},$$

kde  $K_P$  je zesílení regulátoru,  $T_I$  – integrační časová konstanta.

Protože řád soustavy (10)  $n = 2$  a volí se  $M \geq n$ , proto pro  $M = 2$  přenos filtru pozorovatele bude

$$G_{FR}(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^2}. \quad (12)$$

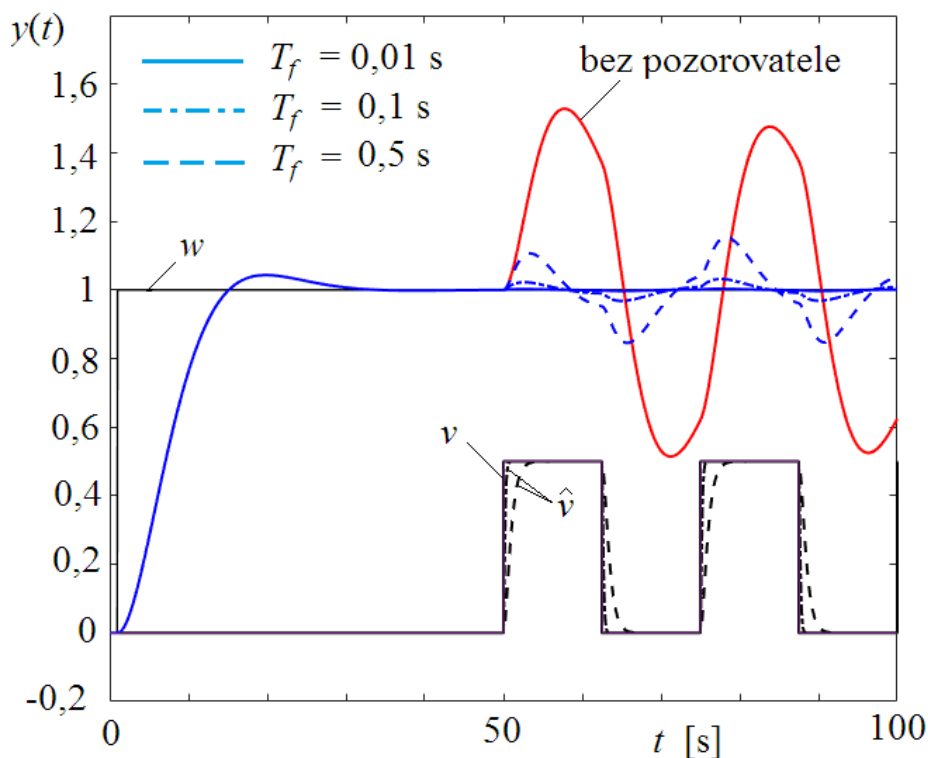
Vnitřní smyčka regulačního obvodu s pozorovatelem poruchy je na obr. 3.



Obr. 3 Schéma vnitřní smyčky – příklad 1

Aby bylo možné porovnat regulační procesy s pozorovatelem poruchy a bez něho, jako poruchová veličina byla použita posloupnost pravoúhlých impulsů začínající v čase  $t = 50$  s pro časovou konstantu filtru  $T_f = 0,01$  s;  $0,1$  s;  $0,5$  s a  $\infty$  (bez pozorovatele). Získané odezvy na skokovou změnu žádané veličiny  $w_0$  a poruchovou veličinu  $v$  ve tvaru posloupnosti pravoúhlých impulsů jsou na obr. 4. Z obrázku je zřejmé, že pro danou poruchovou veličinu regulační obvod bez pozorovatele poruchy je nepoužitelný. Kvalita odhadu pozorované poruchové veličiny  $\hat{v}$ , a tím i kvalita regulačního procesu, velmi silně závisí na správné volbě časové konstanty filtru  $T_f$ .

Odezvy na obr. 4 byly získány pro  $T_{1m} = T_1$ ,  $k_{1m} = k_1$ .



Obr. 4 Odezvy regulačního obvodu s regulátorem PI seřízeným metodou optimálního modulu s pozorovatelem poruchy – příklad 1

## Příklad 2

Pro regulovanou soustavu s přenosem

$$G_S(s) = G_P(s)G_D(s) = \underbrace{\frac{k_1}{s(T_1s + 1)}}_{G_P} \underbrace{e^{-T_d s}}_{G_D} \quad (13)$$

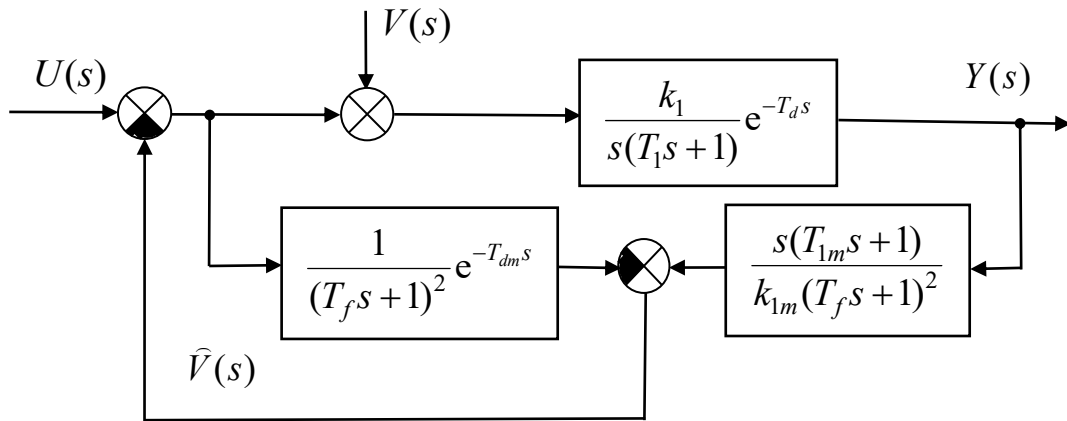
je třeba seřídit regulátor PD metodou požadovaného modelu (MPM) pro relativní překmit  $\kappa = 0 \%$  ( $k_1 = 1$ ,  $T_1 = 0$  s, 1 s, 2 s, 3 s a 4 s,  $T_d = 2$  s). Protože regulátor PD nemá integrační složku, která by zajistila nulovou trvalou regulační odchylku na skokovou změnu poruchové veličiny vstupující do regulačního obvodu před integrační soustavou, je třeba použít pozorovatel poruchy.

## Řešení:

Řád invertibilní části soustavy  $G_P$  je  $n = 2$ , proto pro  $M = n$  na základě vztahu (3) filtr zajišťující fyzikální realizovatelnost  $G_{pm}^{-1}$  bude (viz obr. 5)

$$G_{FR}(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^2}. \quad (14)$$





Obr. 5 Schéma vnitřní smyčky – příklad 2

Aby výsledky byly obecnější, simulační průběhy jsou zobrazeny pro bezrozměrový čas

$$\tau = \frac{t}{T_d}. \quad (15)$$

Přenos regulátoru PD se předpokládá s filtrací derivační složky ve tvaru

$$G_R(s) = K_P \left( 1 + \frac{T_D s}{\frac{T_D}{N} s + 1} \right), \quad (16)$$

kde  $T_D$  je derivační časová konstanta,  $N = 5$  až  $20$ . U běžných regulátorů je nejčastěji přednastaveno  $N = 10$ .

Zesílení regulátoru PD u MPM pro relativní překmit  $\kappa = 0$  je [2-4]

$$K_P^* = \frac{1}{e k_1 T_d} \doteq 0,184$$

a derivační časová konstanta

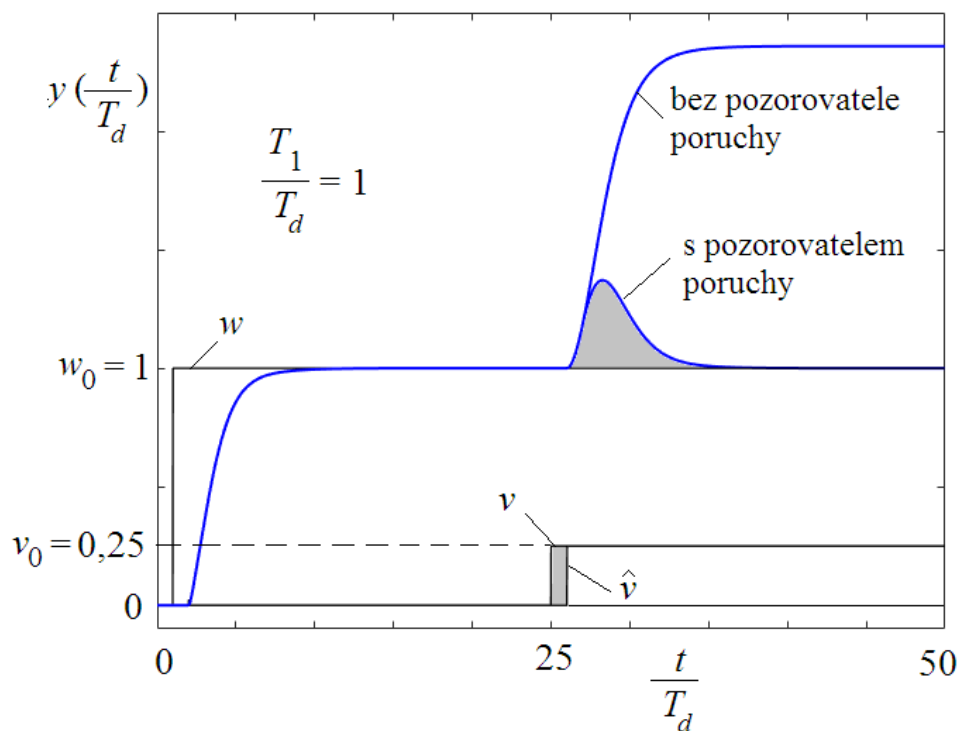
$$T_D^* = T_1.$$

Odezvy na skokové změny žádané veličiny  $w_0 = 1$  a poruchové veličiny  $v_0 = 0,25$  pro  $T_1/T_d = 1$ ,  $N = 10$  a

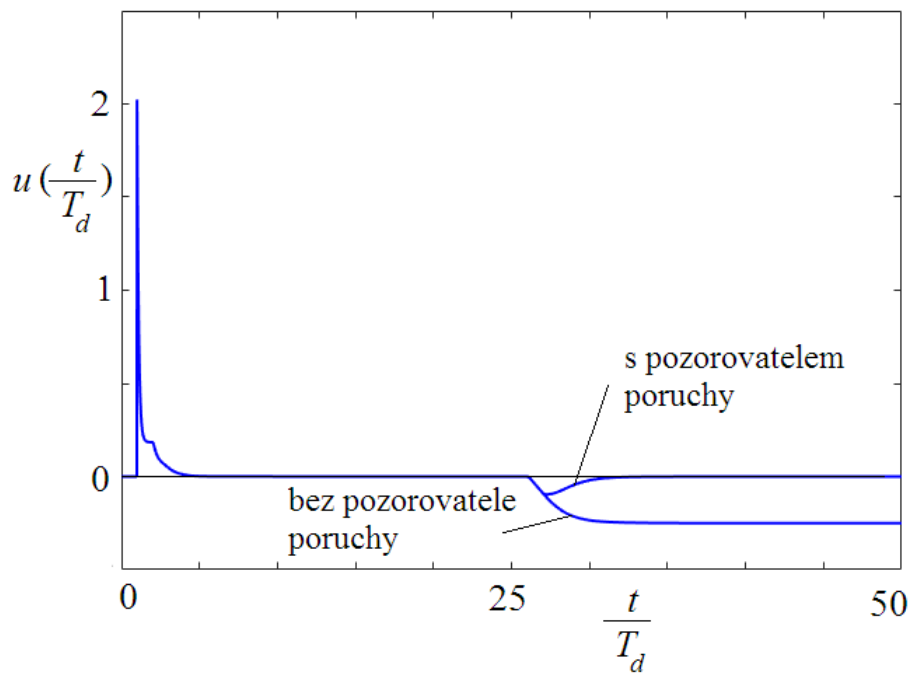
$$G_{Pm}(s) = G_P(s), \quad G_{Dm}(s) = G_D(s)$$

jsou na obr. 6.

a)



b)



Obr. 6 Odezvy regulačního obvodu s regulátorem PD seřízeným MPM pro  $\kappa = 0$  s pozorovatelem poruchy a bez něho: a) průběhy regulované veličiny, b) průběhy akční veličiny – příklad 2

V případě regulátoru PD při skokové změně žádané veličiny  $w_0$  v čase  $t_0$  vznikne počáteční impuls akční veličiny (derivative kick) [2]

$$u(t_0) = \lim_{s \rightarrow \infty} \left[ s G_{wu}(s) \frac{w_0}{s} \right] = K_P(1+N)w_0, \quad (17)$$

kde

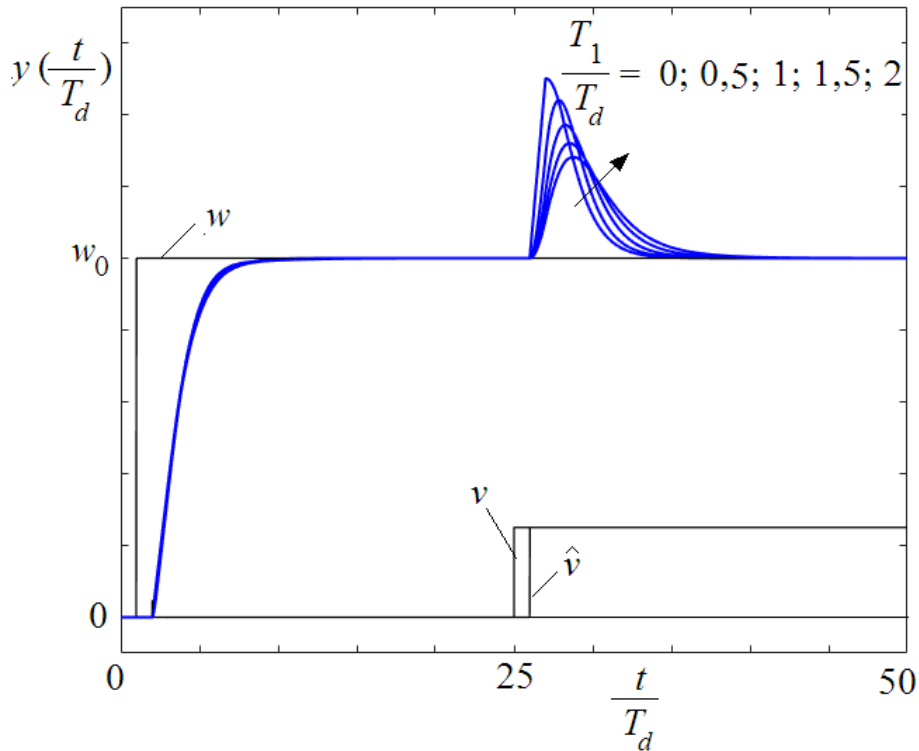
$$\begin{aligned} G_{wu}(s) &= \frac{U(s)}{W(s)} = \frac{G_R(s)}{1 + G_R(s)G_P(s)G_D(s)} = \\ &= \frac{sK_P(T_1s + 1)[(1+N)T_Ds + N]}{s(T_Ds + N)(T_1s + 1) + K_Pk_1[(1+N)T_Ds + N]e^{-T_d s}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Ze vztahu (17) vyplývá nutnost použití filtrace u derivační složky, protože bez filtrace ( $N \rightarrow \infty$ ) průběh obsahuje Diracův impuls  $\delta(t)$ .

Při použití pozorovatele poruchy vznikne přechodná odchylka, která je reakcí na rozdíl mezi skutečnou  $v$  a pozorovanou  $\hat{v}$  poruchovou veličinou, viz vyznačené plochy na obr. 6a.

Z obr. 6b se lze snadno přesvědčit, že počáteční řízení je skutečně dáno vztahem (17).

Na obr. 7 jsou odezvy regulačního obvodu s PD regulátorem seřízeným MPM pro  $\kappa = 0$ ,  $T_1/T_d = 0; 0,5; 1; 1,5$  a 2.



Obr. 7 Odezvy regulačního obvodu s regulátorem PD seřízeným MPM pro  $\kappa = 0$  s pozorovatelem poruchy – příklad 2

Případ  $T_1/T_d = 0$  odpovídá soustavě integrační s dopravním zpožděním [viz vztah (13)] a regulátoru P, pro který zesílení  $K_P^*$  je dáno stejným vztahem jako pro regulátor PD.

Z obr. 6 a 7 je zřejmé, že pozorovatel poruchy bezpečně odstraní trvalou regulační odchylku. Ve všech případech byla použita filtrační časová konstanta

$$T_f = 0,01T_d \text{ a } N = 10. \quad (19)$$

Protože průběhy jsou zobrazeny pro bezrozměrový čas  $\tau = t/T_d$ , získané simulační výsledky jsou obecné a platí pro libovolnou soustavu typu (13) s poměrem  $T_1/T_d = 0; 0,5; 1; 1,5$  a  $2$ .

Konkrétní výsledky pro danou soustavu z příkladu 2 se získají pro  $T_d = 2$  s.

### Příklad 3

Pro regulovanou soustavu s přenosem

$$G_S(s) = \frac{2}{s(5s+1)(4s+1)} \quad (20)$$

je třeba navrhnout pozorovatel poruchy a seřídít MPM regulátor PD pro relativní překmit  $\kappa = 0$  a  $0,1$ . Podobně jako v předchozím případě, regulátor PD neobsahuje integrační složku, a proto při skokové změně poruchové veličiny na vstupu soustavy vznikne trvalá regulační odchylka, kterou je třeba odstranit právě pomocí pozorovatele poruchy.

### Řešení:

Přenos soustavy (20) nemá tvar vhodný pro použití MPM [2-4], proto se použije nejjednodušší úprava spočívající v tom, že druhá setrvačná časová konstanta se považuje za dopravní zpoždění, tj.

$$\frac{2}{s(5s+1)(4s+1)} \approx \frac{2}{s(5s+1)} e^{-4s} \Rightarrow k_1 = 2 \text{ s}^{-1}, T_1 = 5 \text{ s}, T_d = 4 \text{ s}. \quad (21)$$

V souladu s MPM jsou stavitelné parametry PD regulátoru [2-4]

$$\kappa = 0: \quad K_P = \frac{1}{e k_1 T_d} \doteq 0,046,$$

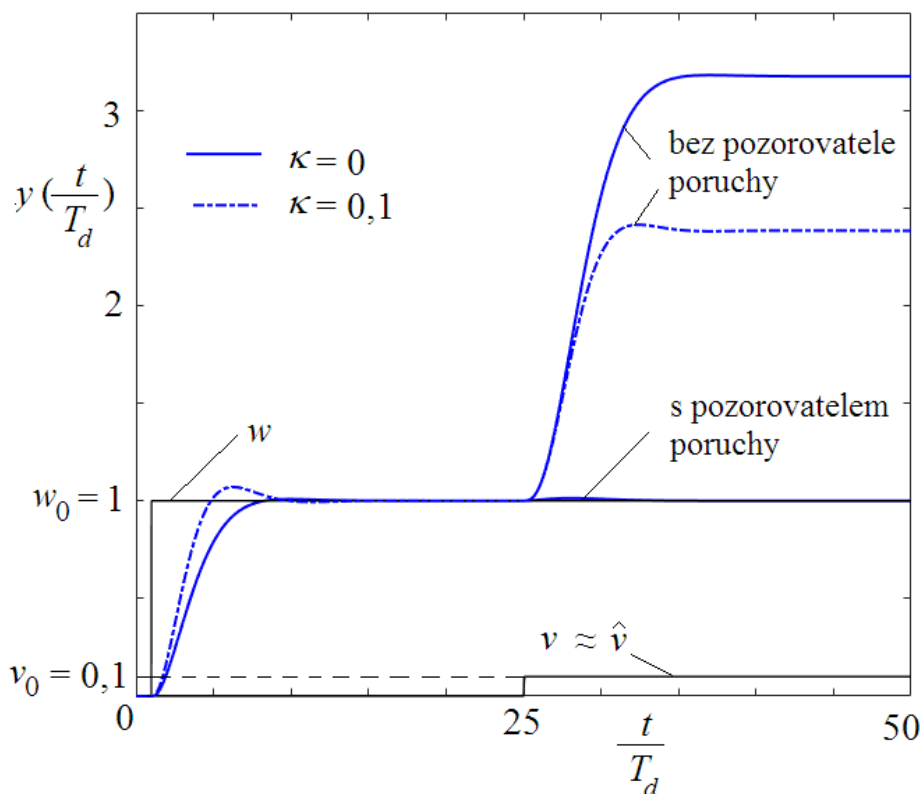
$$\kappa = 0,1: \quad K_P = \frac{1}{1,720 k_1 T_d} \doteq 0,073,$$

$$T_D = T_1 = 5 \text{ s}.$$

Protože celá soustava (20) je invertibilní  $n = 3$ , proto na základě vztahu (3) se pro  $M = n$  dostane

$$G_{FR}(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^3}, \quad T_f = 0,01T_d \quad (T_d = 4 \text{ s}). \quad (22)$$

Odezvy regulačního obvodu s regulátorem PD seřízeným MPM ( $N = 10$ ) pro  $\kappa = 0$  a  $0,1$  s pozorovatelem poruchy a bez něho jsou na obr. 8.



Obr. 8 Odezvy regulačního obvodu s regulátorem PD seřízeným MPM s pozorovatelem poruchy a bez něho pro přesně identifikovanou soustavu (20) – příklad 3

Předpokládá se, že

$$G_{Pm}(s) = G_P(s).$$

I když úprava přenosu soustavy (21) je velmi hrubá, průběhy odezev na skokovou změnu žádané veličiny  $w_0 = 1$  jsou velmi dobré, tj.  $\kappa \approx 0$  a  $0,1$ .

Vzhledem k tomu, že celá soustava je invertibilní a pozorovatel poruchy zajišťuje  $\hat{v} \approx v$  (viz obr. 8 a také 2), vliv skoku poruchové veličiny  $v_0 = 0,1$  se na regulovanou veličinu téměř neprojeví. Přechodná odchylka je okolo 1 %.

Úprava přenosu (21) byla nutná z důvodu použití MPM. Pro návrh pozorovatele byl použit původní přenos soustavy (20).

Nyní se předpokládá, že upravený přenos soustavy (21) byl získán identifikací, a proto bude použit i pro návrh pozorovatele poruchy, tj.

$$G_P(s) = \frac{2}{s(5s+1)} \quad (23a)$$

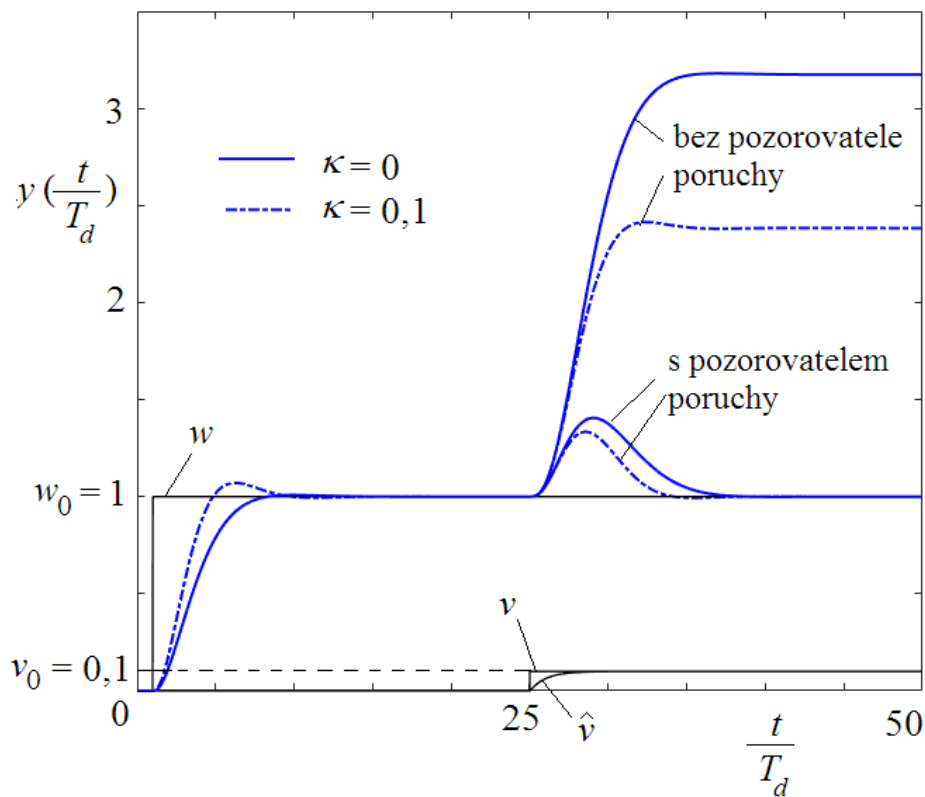
a

$$G_D(s) = e^{-4s}. \quad (23b)$$

Pro pozorovatel poruchy byl použit přenos (23a), tj.

$$G_{Pm}(s) = \frac{2}{s(5s+1)}$$

a protože dopravní zpoždění (23b) se analogově náročně realizuje, byla použita jeho nejjednodušší aproximace



Obr. 9 Odezvy regulačního obvodu s regulátorem PD seřízeným MPM s pozorovatelem poruchy a bez něho pro přibližně identifikovanou soustavu (23) – příklad 3

$$e^{-4s} \approx \frac{1}{4s+1} \Rightarrow G_{Dm}(s) = \frac{1}{4s+1}.$$

Pro invertibilní část soustavy (23a) platí  $n = 2$ , a proto byl pro  $M = n$  použit filtr [viz (3)]

$$G_{FR}(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^2}, \quad T_f = 0,01T_d \quad (T_d = 4 \text{ s}).$$

Odezvy regulačního obvodu s regulátorem PD seřízeným stejně jako na obr. 8 MPM ( $N = 10$ ) pro  $\kappa = 0$  a  $0,1$  s pozorovatelem poruchy navrženým za předpokladu, že přenos soustavy má tvar (23) je na obr. 9.

I v tomto případě průběhy byly zobrazeny pro bezrozměrový čas  $\tau = t/T_d$ , a proto výsledky simulace platí pro libovolnou soustavu typu (20) s poměrem  $T_1/T_d = 5/4$ .

Konkrétní výsledky pro danou soustavu z příkladu 3 se získají pro  $T_d = 4$  s.

#### 4 Závěr

Vhodně navržený pozorovatel poruchy může velmi výrazně zvýšit kvalitu regulace z hlediska poruchové veličiny působící na vstupu soustavy především v těch případech, kdy soustava je integrační a není žádoucí, aby regulátor obsahoval integrační složku.

#### 5 Literatura

- [1] Li, S., Yang, J., Chen, W., Chen, X. *Disturbance Observer – Based Control Methods and Applications*. CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2014, ISBN 978-1-4665-1579-6
- [2] Vítečková, M., Víteček, A. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. Monografie, VŠB-TU Ostrava, 2011, 230 str., ISBN 978-80-248-2503-8
- [3] Vítečková, M. *Metoda požadovaného modelu*. Monografie, VŠB-TU Ostrava, 2017, 98 str. ISBN 978-80-248-4052-9
- [4] Vítečková, M., Víteček, A. *Základy automatické regulace*. VŠB-TU Ostrava, 2018, 244 str., ISBN 978-80-248-1924-2