

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra automatizační techniky a řízení

**Ověření méně známé metody seřizování
regulátorů číslicovou simulací a na
laboratorním modelu teplovzdušného
agregátu**

Vypracoval:

Milan Vala

Ostrava:

25.4.2007

Obsah:

1.	SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK	2
2.	ÚVOD	3
3.	METODY SYNTÉZY	3
3.1	POPIS METODY SIMC	3
3.2	OVĚŘENÍ METODY SIMC V SIMULAČNÍM PROGRAMU	5
3.3	OVĚŘENÍ METODY SIMC NA REÁLNÉM MODELU	9
4.	ZÁVĚR	10
5.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	11

1 Seznam použitých značek a zkratek

G_o	- přenos otevřeného regulačního obvodu
G_R	- přenos regulátoru
G_S	- přenos regulované soustavy
G_{wy}^*	- požadovaný přenos řízení regulačního obvodu
I	- integrační regulátor
IMC	- internal model control
k_i	- koeficient přenosu (zesílení) regulované soustavy
k_p	- zesílení analogového regulátoru
P	- proporcionální regulátor
PI	- proporcionálně integrační regulátor
PID	- proporcionálně integračně derivační regulátor
PID _i	- proporcionálně integračně derivační regulátor s interakcí
q	- stupeň astatismu
SIMC	- Skogestad (resp. simple) internal model control
t	- (spojitý) čas
T_D	- derivační časová konstanta
T_d	- dopravní zpoždění
T_I	- integrační časová konstanta
T_i	- setrvačná časová konstanta
TVM	- teplovzdušný model
u	- akční veličina
w	- žádaná veličina
W	- obraz žádané veličiny
y	- regulovaná, výstupní veličina
Y	- obraz regulované veličiny

2 Úvod

Tato práce ověřuje méně známou metodu seřizování regulátorů, kterou je SIMC z hlediska kvality regulace a tato metoda je aplikována pro řízení reálného modelu teplovzdušného obvodu.

Nejdříve je ověřovaná metoda podrobně popsána. Je zde uveden i příklad stanovení vztahů pro výpočet stavitelných parametrů regulátoru určeného pro typovou soustavu. Dále je zde sestaven přehled všech typových regulovaných soustav a pro ně danou metodou přiřazené regulátory se vztahy výpočtů stavitelných parametrů. Pro každou z těchto typových regulovaných soustav je v simulačním programu vytvořeno schéma regulačního obvodu s příslušným regulátorem. Regulační pochody jsou vykresleny a samostatně zhodnoceny.

V poslední části práce je metoda použita při řízení reálné úlohy. Pro dvě regulované soustavy, u nichž byly sestaveny přenosy, jsou zde navrženy regulátory a jejich stavitelné parametry podle ověřované metody. Pro obě soustavy s příslušnými regulátory jsou vykresleny průběhy regulačních pochodů a v závěru zhodnoceny.

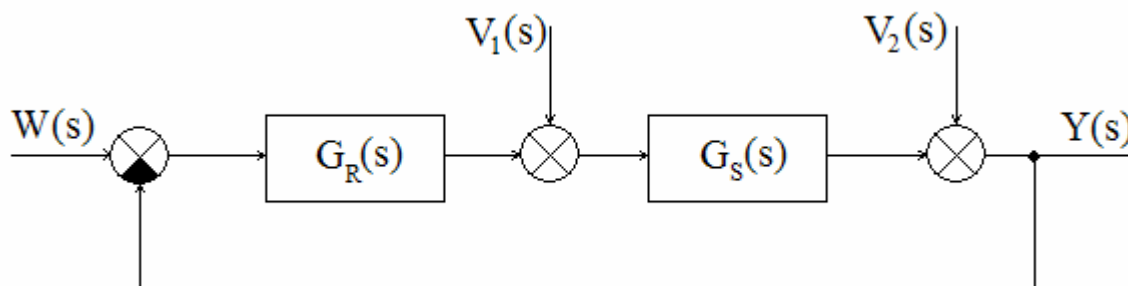
3 Metody syntézy

Syntézou regulačního obvodu rozumíme stanovení struktury a parametrů regulačního obvodu, aby byly splněny požadavky, které klademe na regulační pochod. Při návrhu regulačního obvodu vycházíme z provozních podmínek, které jsou pro funkci regulačního obvodu požadovány jako např. požadavky na pracovní prostředí, požadavky na režim provozu, požadavky na rozměry a hmotnost zařízení atd. [Balátě, 2003].

3.1 Popis metody SIMC

Tyto metody patří mezi výpočetně méně náročné metody. Seřízení regulátorů těmito metodami lze uplatnit pro regulaci soustav s dopravním zpožděním. Pro daný tvar přenosu regulované soustavy a danou nerovnost konstant přenosu T_1 a T_d totiž určuje jeden, nanejvýš dva typy regulátorů, kterými může být soustava regulována. Parametry tohoto regulátoru jsou dány jednoduchými výpočty z konstant regulované soustavy.

Při regulaci se bude vycházet z jednoduchého regulačního obvodu s poruchou na vstupu i výstupu z regulované soustavy. Schéma tohoto regulačního obvodu je zobrazeno na Obr. 1 [Vítečková, Víteček, 2006, Ostrava].



Obr. 1 Schéma regulačního obvodu

Metoda vychází z regulace s interním modelem. Pro návrh regulátoru lze použít vztah pro přímou syntézu [Skodestad, 2003]

$$G_R(s) = \frac{1}{G_S(s)} \frac{G_{wy}^*(s)}{1 - G_{wy}^*(s)}, \quad (1)$$

Předpokládá se, že požadovaný přenos řízení regulačního obvodu má tvar

$$G_{wy}^*(s) = \frac{1}{T_w s + 1} e^{-T_d s}, \quad (2)$$

Časová konstanta T_w je pro metodu IMC jediný volitelný parametr při výpočtu stavitelných parametrů regulátoru. Touto volbu lze získat různě rychlé odezvy systému na skokovou změnu žádané veličiny $w(t)$. Někdy se časová konstanta T_w označuje písmenem λ a pak se jedná o λ – seřízení. Naproti tomu metoda SIMC vyjadřuje časovou konstantu jako $T_w = T_d$. Aby bylo docíleno rychlejší odezvy systému na změnu poruchové veličiny $v_1(t)$ působící na vstupu do regulované soustavy, doporučuje metoda SIMC volit integrační časovou konstantu T_I podle vztahu

$$T_I = \min[T_1, 4(T_w + T_d)] \quad (3)$$

Stanovení parametrů regulátoru podle metody SIMC bude ukázáno pro regulovanou soustavu s přenosem:

$$G_S(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s}, \quad T_1 \geq T_2 \quad (4)$$

Po dosažení vztahů (2) a (4) do vztahu (1) se dostane

$$G_R(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{k_1} \frac{1}{T_w s + 1 - e^{-T_d s}} \quad (5)$$

Použitím aproximace $e^{-T_d s} \approx 1 - T_d s$ se ze vztahu (5) obdrží přenos regulátoru ve tvaru

$$G_R(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{k_1 (T_w + T_d) s} \quad (6)$$

Nyní je možno vybrat si mezi přenosem PID regulátoru nebo PID regulátoru s interakcí, což naznačuje vztah (6). Dále budou odvozeny vztahy pro výpočet stavitelných parametrů regulátoru pro PID regulátor s interakcí, který má přenos

$$G_R(s) = k_p (1 + T_D s) \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) = \frac{k_p (1 + T_D s)(1 + T_I s)}{T_I s} \quad (7)$$

Dosažením kompenzace časových konstant $T_I = T_1, T_D = T_2$ do vztahu (7) a porovnáním obdrženého přenosu regulátoru s přenosem regulátoru ze vztahu (6) dostaneme vztah pro zesílení regulátoru

$$k_p^* = \frac{T_1}{k_1 (T_w + T_d)} \quad (8)$$

Pro stanovení regulátoru pro integrační regulovanou soustavu jsou použity předpoklady

$$T_w \gg T_d \quad \omega \gg \frac{1}{T_1}, \quad (9)$$

což znamená že se pracovní kmitočty se pohybují nad hodnotou $\frac{1}{T_1}$. Potom lze přenosy

proporcionálních regulovaných soustav nahradit přenosy integračních regulovaných soustav (viz vztahy (10) a (11)), což znamená, že odpovídající si regulované soustavy budou regulovány stejným typem regulátoru.

$$\frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s} = \frac{\frac{k_1}{T_1}}{s + \frac{1}{T_1}} e^{-T_d s} \approx \frac{\frac{k_1}{T_1}}{s} e^{-T_d s} \quad (10)$$

$$\frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s} = \frac{\frac{k_1}{T_1}}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s} \approx \frac{\frac{k_1}{T_1}}{s(T_2 s + 1)} e^{-T_d s} \quad (11)$$

Přehled regulovaných soustav vhodných pro použití dané metody a stavitelné parametry regulátorů pro daný typ regulované soustavy je uveden v Tab. 1

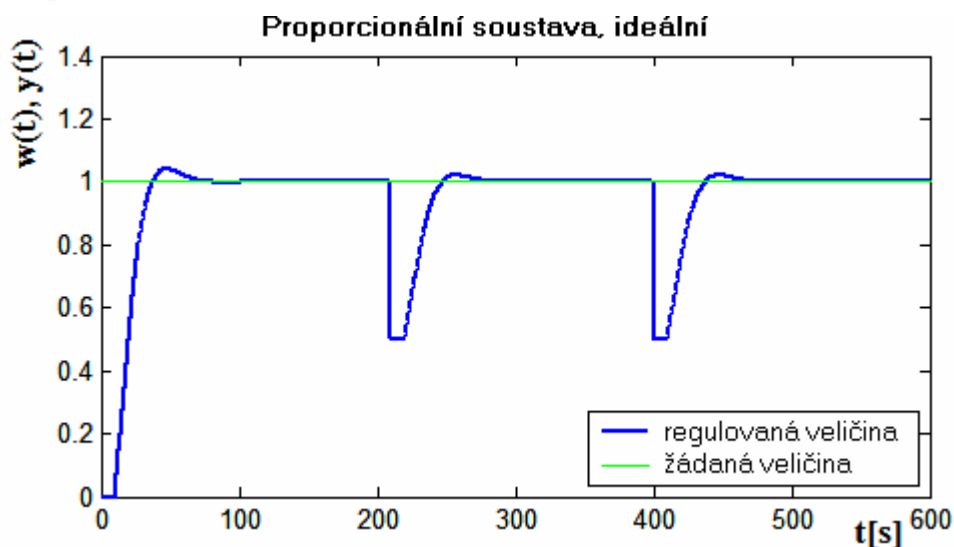
Tab. 1 Hodnoty stavitelných parametrů regulátorů pro metodu SIMC

	Regulovaná soustava	Regulátor			Poznámka	
		Typ	k_p^*	T_I^*		T_D^*
1	$k_1 e^{-T_d s}$	I	-	$2k_1 T_d$	-	
2	$\frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{T_1}{2k_1 T_d}$	T_1	-	$T_1 \leq 8T_d$
3			$\frac{T_1}{2k_1 T_d}$	$8T_d$	-	$T_1 > 8T_d$
4	$\frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s}$	PID _i	$\frac{T_1}{2k_1 T_d}$	T_1	T_2	$T_1 \leq 8T_d$
5			$\frac{T_1}{2k_1 T_d}$	$8T_d$	T_2	$T_1 > 8T_d$
6		PID	$\frac{T_1 + T_2}{2k_1 T_d}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$	$T_1 \leq 8T_d$
7			$\frac{T_1(T_2 + 8T_d)}{16k_1 T_d^2}$	$T_2 + 8T_d$	$\frac{8T_2 T_d}{T_2 + 8T_d}$	$T_1 > 8T_d$
8	$\frac{k_1}{s} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{1}{2k_1 T_d}$	$8T_d$	-	
9	$\frac{k_1}{s(T_2 s + 1)} e^{-T_d s}$	PID _i	$\frac{1}{2k_1 T_d}$	$8T_d$	T_2	-
10		PID	$\frac{T_2 + 8T_d}{16k_1 T_d^2}$	$T_2 + 8T_d$	$\frac{8T_2 T_d}{T_2 + 8T_d}$	-

3.2 Ověření metody SIMC v simulačním programu

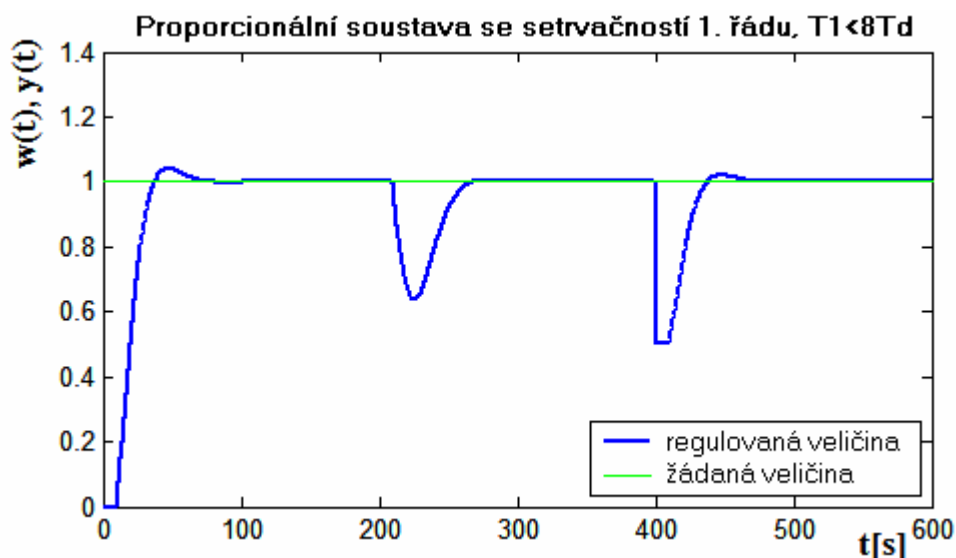
Pro simulaci regulačního pochodu bylo použito prostředí programu MatLab Simulink. Nejdříve byly sestaveny regulační obvody podle Obr. 1. Pro každou typovou soustavu z Tab. 1 byly navrženy příslušné typy regulátorů a podle odpovídajících vztahů určeny stavitelné parametry. Aby byla ukázána schopnost takto seřízených regulátorů odstraňovat vliv poruch na vstupu a výstupu z regulované soustavy, byly zavedeny skokové změny těchto poruch na hodnotu 0,5. Nejdříve byla zavedena porucha na vstupu do regulované soustavy a po určité

době byla také zavedena porucha na výstupu z regulované soustavy. Nakonec byly průběhy regulačních pochodů vykresleny a editovány viz níže.



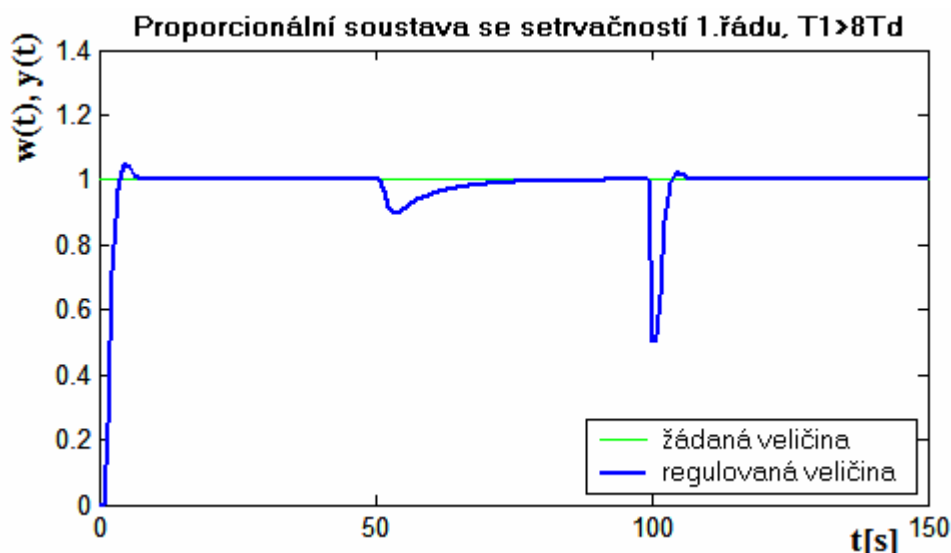
Obr. 2. Průběhy veličiny proporcionální soustavy ideální, tab. 1 ř. 1

Při seřízení I regulátoru metodou SIMC pro regulovanou soustavu proporcionální ideální byl obdržen pro jednotkový skok žádané veličiny relativní překmit přibližně $\kappa = 4,1\%$ při době regulace $t_r \doteq 70s$. Tento překmit potvrzuje, že při seřízení regulátoru metodou SIMC dostaneme přibližně stejný průběh regulované veličiny jako při seřízení regulátoru metodou požadovaného modelu pro překmit $\kappa = 5\%$. Podle předpokladu došlo i k odstranění vlivu poruch působících před i za regulovanou soustavou. Trvalá regulační odchylka je nulová.



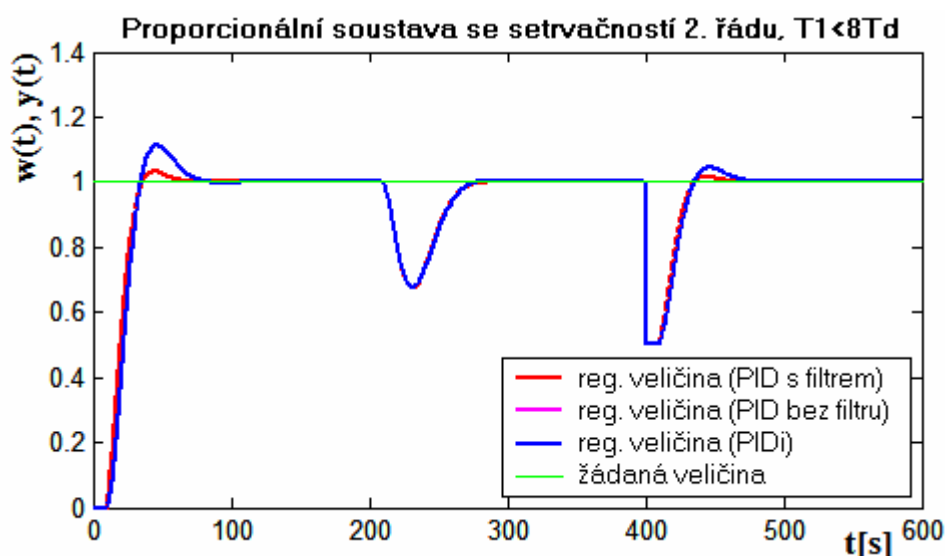
Obr. 3 Průběhy veličiny proporcionální soustavy se setrvačností 1. řádu, tab. 1 ř. 2

Při seřízení PI regulátoru metodou SIMC pro regulovanou soustavu proporcionální se setrvačností 1. řádu a poměru konstant $T_1 < 8T_d$ byl opět obdržen pro jednotkový skok žádané veličiny relativní překmit přibližně $\kappa = 4,1\%$ při době regulace $t_r \doteq 70s$. Vlivy poruch byly opět odstraněny, přičemž vliv poruchy vstupující před regulovanou soustavou byl odstraněn bez překmitu. Trvalá regulační odchylka je nulová, poněvadž byl použit regulátor s integrační složkou.



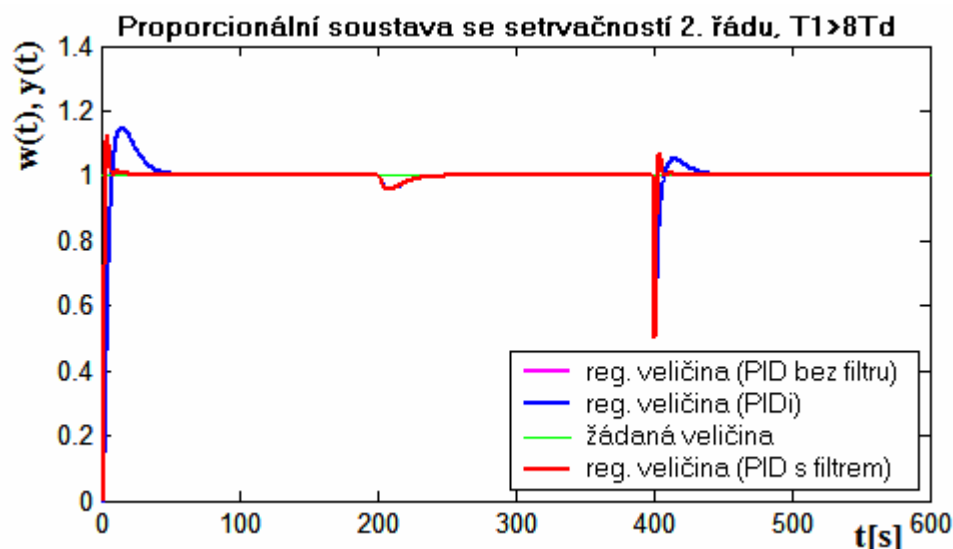
Obr. 4 Průběhy veličiny proporcionální soustavy se setrvačností 1. řádu, tab. 1 ř. 3

Při seřízení PI regulátoru metodou SIMC pro regulovanou soustavu proporcionální se setrvačností 1. řádu a poměru konstant $T_1 > 8T_d$ byl obdržen pro jednotkový skok žádané veličiny relativní překmit přibližně $\kappa = 4,6\%$ při době regulace $t_r \doteq 8s$. Poměr konstant regulované soustavy způsobil mnohem rychlejší odezvy systému na skokové změny poruchových veličin a vstupní veličiny. Vlivy poruch byly opět odstraněny, přičemž vliv poruchy vstupující před regulovanou soustavou byl odstraněn bez překmitu. Trvalá regulační odchylka je nulová, poněvadž byl použit regulátor s integrační složkou.



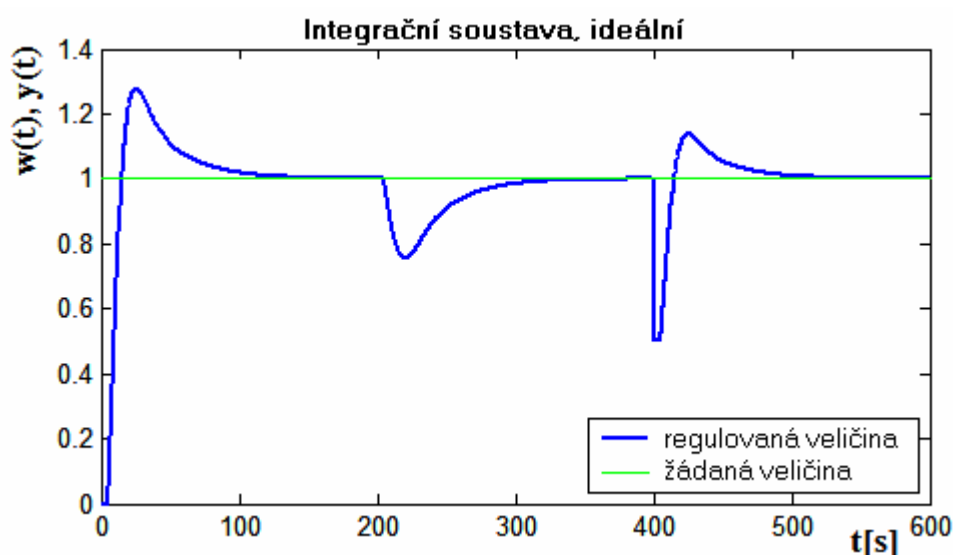
Obr. 5 Průběhy veličiny proporcionální soustavy se setrvačností 2. řádu, tab. 1 ř. 4, 6

Při seřízení PID regulátoru bez filtrace derivační složky a PID regulátoru s interakcí metodou SIMC pro regulovanou soustavu proporcionální se setrvačností 1. řádu a poměru konstant $T_1 < 8T_d$ byl obdržen pro jednotkový skok žádané veličiny relativní překmit přibližně $\kappa = 11,3\%$ při době regulace $t_r \doteq 70s$. Při použití filtru derivační složky PID regulátoru bylo dosaženo snížení relativního překmitu na hodnotu $\kappa = 3,4\%$ při době regulace $t_r \doteq 55s$. Ve všech případech byly vlivy poruch opět odstraněny, přičemž vliv poruchy vstupující před regulovanou soustavou byl odstraněn bez překmitu. Trvalá regulační odchylka je nulová, poněvadž byly použity regulátory s integrační složkou.



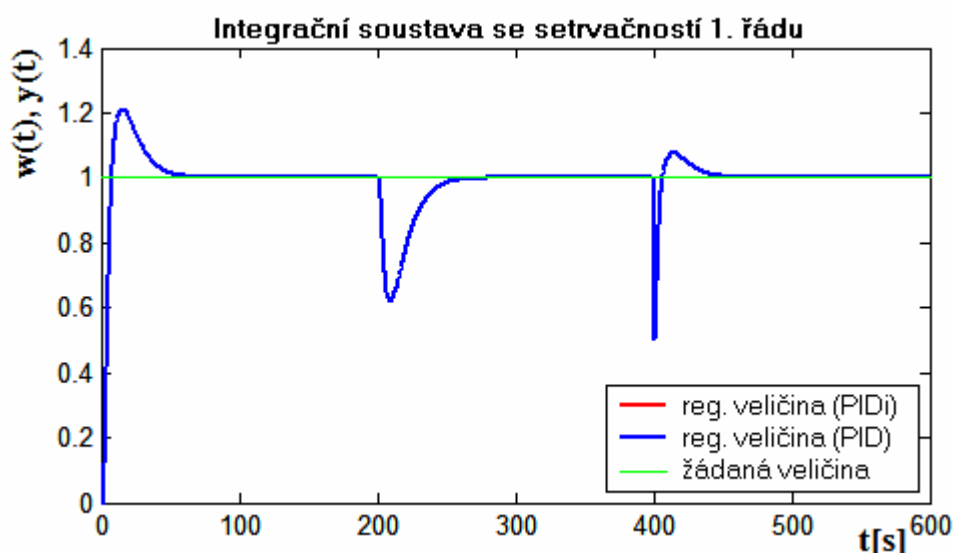
Obr. 6 Průběhy veličiny proporcionální soustavy se setrvačností 2. řádu, tab. 1 ř. 5, 7

Při seřízení PID regulátoru bez filtrace derivační složky a PID regulátoru s interakcí metodou SIMC pro regulovanou soustavu proporcionální se setrvačností 1. řádu a poměru konstant $T_I > 8T_d$ byl obdržen pro jednotkový skok žádané veličiny relativní překmit přibližně $\kappa = 14,9\%$ při době regulace $t_r \doteq 40s$. Při použití filtru derivační složky PID regulátoru bylo dosaženo snížení relativního překmitu na hodnotu $\kappa = 12,8\%$ při době regulace $t_r \doteq 8s$. Poměr konstant regulované soustavy způsobil mnohem rychlejší odezvy systému na skokové změny poruchových veličin a vstupní veličiny. Vlivy poruch byly opět odstraněny, přičemž vliv poruchy vstupující před regulovanou soustavou byl odstraněn bez překmitu. Trvalá regulační odchylka je nulová, poněvadž byly použity regulátor s integrační složkou.



Obr. 7 Průběhy veličiny integrační soustavy ideální, tab. 1 ř. 8

Při seřízení PI regulátoru metodou SIMC pro regulovanou soustavu integrační ideální byl obdržen pro jednotkový skok žádané veličiny relativní překmit přibližně $\kappa = 27,8\%$ při době regulace $t_r \doteq 100s$. Tak velký překmit způsobuje stabilní (záporná) nula, která se vyskytuje v přenosu řízení. Jedná se o výraz $1 + T_1s$ v čitateli G_{wy} . Vlivy poruch byly opět odstraněny, přičemž vliv poruchy vstupující před regulovanou soustavou byl odstraněn bez překmitu. Trvalá regulační odchylka je nulová, poněvadž byl použit regulátor s integrační složkou.



Obr. 8 Průběhy veličiny integrační soustavy se setrvačností 1. řádu, $q=1$, tab. 1 ř. 9, 10

Při seřízení PID regulátoru a PID regulátoru s interakcí metodou SIMC pro regulovanou soustavu integrační se setrvačností 1. řádu a stupněm astaticismu 1 byl obdržen pro jednotkový skok žádané veličiny relativní překmit přibližně $\kappa = 21,2\%$ při době regulace $t_r \doteq 50s$. Filtrace derivační složky PID regulátoru v tomto případě nemá smysl. Vlivy poruch byly opět odstraněny, přičemž vliv poruchy vstupující před regulovanou soustavou byl odstraněn bez překmitu. Trvalá regulační odchylka je nulová, poněvadž byl použit regulátor s integrační složkou.

3.3 Ověření metody SIMC na reálném modelu

Pro reálné ověření regulačního pochodu byl použit model teplovzdušného agregátu. Návod k obsluze je popsán v [Smutný, 2001] a [Škuta, Smutný, 2005]. Metodou SIMC byly seřizeny regulátory pro dvě regulační soustavy definované jako termistory umístěné v různé vzdálenosti od baňky žárovky. Nejdříve byly ovšem obě regulované soustavy identifikovány pomocí dvou bodů odezvy přechodové charakteristiky. Přenosy obou regulovaných soustav mají tvar:

$$G_{s1} = \frac{2,11}{17,43s + 1} e^{-5,028s} \quad (12)$$

resp.

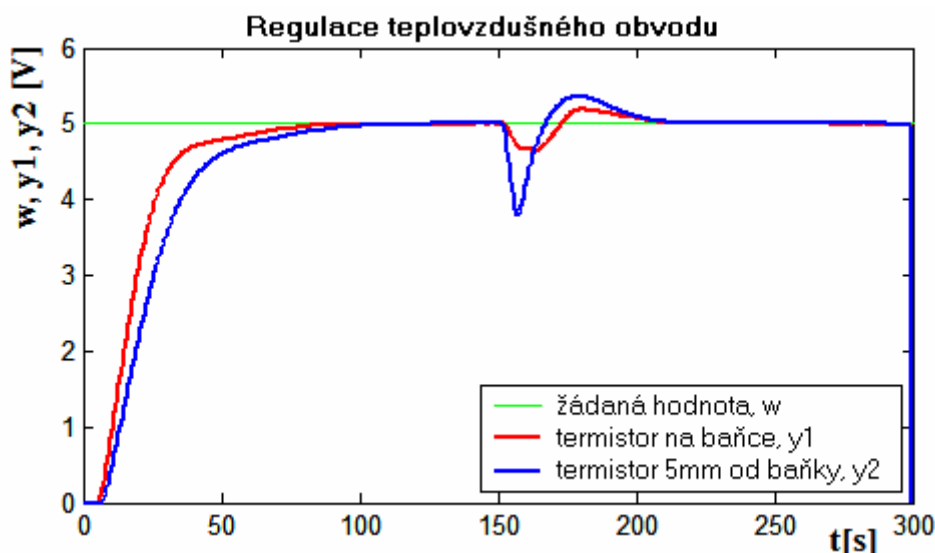
$$G_{s2} = \frac{1,9925}{21,7875s + 1} e^{-5,785s} \quad (13)$$

kde G_{s1} je přenos regulované soustavy termistoru na baňce žárovky, G_{s2} je přenos regulované soustavy termistoru 5mm od baňky žárovky.

Metodou navržené parametry pro regulované přenosy termistorů G_{s1} , G_{s2} :

$$\text{pro } G_{s1}: \quad k_p^* = \frac{T_1}{2k_1 T_d} = \frac{17,43}{2 \cdot 2,11 \cdot 5,028} \doteq 0,821 \quad T_I^* = T_1 = 17,43 \quad (14)$$

$$\text{pro } G_{s2}: \quad k_p^* = \frac{T_1}{2k_1 T_d} = \frac{21,7875}{2 \cdot 1,9925 \cdot 5,785} \doteq 0,945 \quad T_I^* = T_1 = 21,7875 \quad (15)$$



Obr. 9 Průběhy veličin regulovaných soustav dvou termistorů

Jak je vidět na Obr. 9 regulační pochody systémů s regulátory seřízenými metodou SIMC jsou bez překmitu (jedná se tepelné děje). Vlivy poruchové veličiny realizované spuštěním poruchového ventilátoru v čase $t=150s$ byly odstraněny a trvalé regulační odchylky jsou nulové (jako při simulaci).

4 Závěr

Tato práce popisuje jeden druh syntézy regulačního obvodu. Přesvědčili jsme se o faktu, že seřídit regulátor metodou SIMC je poměrně jednoduchá a rychlá záležitost. Přičemž kvalita regulace je poměrně vysoká až na nemalé překmity, které vznikají při regulaci integračních soustav.

Metoda byla ověřena simulačně. Pro jednotlivé přenosy regulovaných soustav byly dopočítány stavitelné parametry regulátorů, které jsou již metodou vybrány pro seřízení daných soustav. Ze simulovaných průběhů lze vyčíst, že na rychlost a kvalitu regulace, při použití této metody, má největší vliv podíl setrvačné časové konstanty a dopravního zpoždění. Dále je zde vidět schopnost regulátorů seřízenými danou metodou odstranění vlivu poruch vstupujících před i za regulovanou soustavou. Metoda určuje pro každou regulovanou soustavu použití regulátoru s integrační složkou, což způsobuje nulovou trvalou regulační odchylku.

Metoda by mohla být v praxi poměrně často používána, poněvadž výpočty stavitelných parametrů jsou časově nenáročnými záležitostmi a regulační pochody vykazují velkou kvalitu.

5 Seznam použité literatury

BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, Praha, 2003. 664s. ISBN 80-7300-020-2.

FARANA, R., SMUTNÝ, L., VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M. 2004. *Zpracování závěrečných prací z oblasti automatizace a informatiky*. 1. vyd. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB – TU Ostrava, 2004. 116s.

SKOGEKAST, S. *Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. Modeling, Identification and Control [online]*. TRONDEIM : Department of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology. 2002. Available from World Wide Web: <URL: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/publications/2003/tuningPID/finalpaper.pdf>>.

SMUTNÝ, L. 2001. *Řízení teplovzdušného modelu TVM pomocí PC a mikropočítačové jednotky CTRL. Návod k laboratorní úloze*. Ostrava : katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 1999. 17 stran.

ŠKUTA, J., SMUTNÝ, L. 2005. *POPIS TVM 2005 [ONLINE]*. Ostrava : katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2005. Dostupný z www: <URL: <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/PodklVyuka/PopisTVM.htm>>

VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. 2006. *Základy automatické regulace*. 1. vyd. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB – TU Ostrava, 2006. 200s. ISBN 80-248-1068-9

VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. 2006. *Seřízení regulátorů metodou SIMC*. Zlín. UTB ve Zlíně. str. 192 – 197. ISBN 80-7318-460-5.