

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

UNIVERZITNÍ STUDIJNÍ PROGRAM – MECHATRONIKA

KATEDRA AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY A ŘÍZENÍ

ROBUSTNÍ REGULACE

ROBUST CONTROL

Autor práce:

Bc. Martin Suchánek

Konzultantka práce:

prof. Ing. Miluše Vítečková, CSc.

OSTRAVA 2017

ANOTACE

Tato práce se zabývá problematikou robustní regulace a robustní oblasti stability. V práci je teoreticky popsán výpočet stavitelných parametrů PID regulátoru pro regulované soustavy, jak bez dopravního zpoždění, tak i s dopravním zpožděním. Dále jsou tyto metody ukázány na konkrétních příkladech.

OBSAH

1. Úvod	1
2. Výpočet stavitelných parametrů PID regulátoru pro soustavy bez dopravního zpoždění	1
3. Výpočet stavitelných parametrů PID regulátoru pro soustavy s dopravním zpožděním .	5
4. Závěr.....	9

SEZNAM ZNAČENÍ

A	- polynom jmenovatele přenosu soustavy
B	- polynom čitatele přenosu soustavy
$E(s)$	- obraz regulační odchytky $e(t)$
$G(s)$	- (obrazový) L-přenos
G_o	- kmitočtový přenos otevřeného obvodu
G_R	- kmitočtový přenos regulátoru
G_S	- kmitočtový přenos regulované soustavy
G_{wy}	- přenos řízení
k_1	- koeficient přenosu soustavy
K_I	- váha integrační složky regulátoru
K_P	- váha proporcionální složky regulátoru, zesílení analogového regulátoru
K_D	- váha derivační složky regulátoru
m_A	- amplitudová bezpečnost
N	- charakteristický mnohočlen (kvazimnohočlen)
$N_w(s)$	- charakteristický mnohočlen přenosu řízení
$P_A(\omega)$	- reálná část kmitočtového přenosu ve jmenovateli přenosu soustavy
$P_B(\omega)$	- reálná část kmitočtového přenosu v čitateli přenosu soustavy
$s = \alpha + j\omega$	- komplexní proměnná, nezávisle proměnná u obrazu v L-transformaci [s^{-1}]
t	- (spojitý) čas [s]
$U(s)$	- obraz akční veličiny $u(t)$
$W(s)$	- obraz žádané veličiny $w(t)$
$Y(s)$	- obraz regulované veličiny $y(t)$
γ	- fázová bezpečnost
$\omega Q_A(\omega)$	- imaginární část kmitočtového přenosu soustavy ve jmenovateli
$\omega Q_B(\omega)$	- imaginární část kmitočtového přenosu soustavy v čitateli
$j = \sqrt{-1}$	- imaginární jednotka
$\omega = 2\pi f$	- úhlový kmitočet [s^{-1}]
κ	- relativní překmit [%]
Im	- imaginární, imaginární část
MPM	- metoda požadovaného modelu
PI	- proporcionálně integrační regulátor

1. Úvod

Pojem regulace ve smyslu zpětnovazebního řízení jde pospolu s lidskou činností už od dávné doby, a to i před rozvojem průmyslu a existence složitých technologických systémů. Analytické metody syntézy regulátorů v historii vždy vycházely z přesného matematického modelu a nebyly schopné zohledňovat neurčitosti a chyby, které vznikaly při samotném procesu [Veselý, Harsányi, 2008; Kučera 2001; Víteček, Vítečková, 2011].

Při regulaci mohou vznikat nepřesné matematické modely regulovaných soustav, které jsou způsobeny změnou vlastností regulovaných soustav, identifikací, atd. Všechny nepřesnosti mohou být zahrnuty do parametrických nebo neparametrických neurčitostí.

Neurčitosti mohou občas způsobit podstatné snížení kvality regulace, ale i nestabilitu celého regulačního obvodu, proto je velmi důležité, aby byla zajištěna správná činnost regulačního obvodu i při daných neurčitostech, tj. zajistit robustnost regulace.

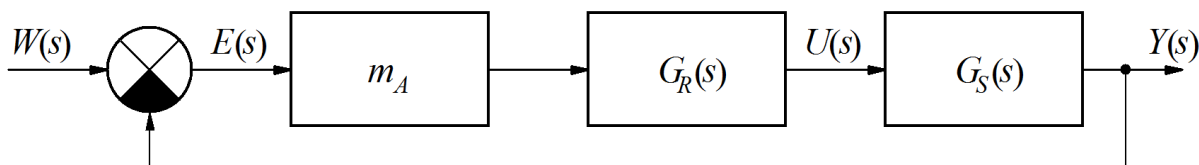
Mezi nejdůležitější ukazatele robustnosti patří amplitudová m_A a fázová γ bezpečnost. Pro běžné regulační obvody se doporučuje [Víteček, Vítečková, 2011]

$$m_A = 2 - 5, \quad \gamma = 30^\circ - 60^\circ \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{3} \right).$$

V práci bude zkoumána robustnost metody požadovaného modelu (MPM) pro soustavy s parametrickou neurčitostí. Jedním způsobem výpočtu stavitelných parametrů pro robustní regulátor PI pro soustavy bez dopravního zpoždění je uveden v literatuře [Závacká, 2011; Matuš, 2011].

2. Výpočet stavitelných parametrů PID regulátoru pro soustavy bez dopravního zpoždění

Předpokládá se jednorozměrový lineární regulační obvod s regulovanou soustavou s přenosem $G_S(s)$ a regulátorem s přenosem $G_R(s)$.



Obr. 1 Regulační obvod

Přenos regulátoru PID uvažujme ve tvaru

$$G_R(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_P s + K_I + K_D s^2}{s}, \quad (1)$$

kde je K_P je váha proporcionální složky, K_I je váha integrační složky regulátoru a K_D je váha derivační složky regulátoru.

Cílem je vypočítat parametry regulátoru PID, který zajistí požadovanou amplitudovou bezpečnost m_A (viz obr. 1) regulačního obvodu s řízeným systémem, jehož přenos předpokládáme ve tvaru

$$G_s(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (2)$$

Pro výpočet stavitelných parametrů potřebujeme kmitočtový přenos systému, který upravíme na tvar

$$G_s(j\omega) = \frac{P_B(\omega) + j\omega Q_B(\omega)}{P_A(\omega) + j\omega Q_A(\omega)} = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} \quad (3)$$

kde $P_B(\omega)$ je reálná část mnohočlenu v čitateli přenosu systému, $\omega Q_B(\omega)$ je imaginární část mnohočlenu v čitateli přenosu systému, $P_A(\omega)$ je reálná část mnohočlenu ve jmenovateli přenosu systému, $\omega Q_A(\omega)$ je imaginární část mnohočlenu ve jmenovateli přenosu systému.

Přenos řízení regulačního obvodu pro danou soustavu, PID regulátor a tester zajišťující požadovanou amplitudovou bezpečnost m_A je

$$G_{wy}(s) = \frac{(K_P s + K_I + K_D s^2) B(s) m_A}{s A(s) + (K_P s + K_I + K_D s^2) B(s) m_A} \quad (4)$$

Charakteristický mnohočlen uzavřeného regulačního obvodu je

$$N_w(s) = s A(s) + (K_P s + K_I + K_D s^2) B(s) m_A \quad (5)$$

a dosazením za $s = j\omega$ dostaneme Michajlovovu funkci

$$N_w(j\omega) = j\omega A(j\omega) + (K_P j\omega + K_I - K_D \omega^2) B(j\omega) m_A \quad (6)$$

kteřou upravíme dosazením za $A(j\omega)$ a $B(j\omega)$ ze vztahu (3) na tvar

$$N_w(j\omega) = j\omega [P_A(\omega) + j\omega Q_A(\omega)] + m_A K_P j\omega [P_B(\omega) + j\omega Q_B(\omega)] + m_A (K_I - K_D \omega^2) [P_B(\omega) + j\omega Q_B(\omega)]$$

Michajlovovu funkci rozdělíme na reálnou a imaginární část:

$$N_w(j\omega) = -\omega^2 Q_A(\omega) - \omega^2 m_A K_P Q_B(\omega) + m_A (K_I - K_D \omega^2) P_B(\omega) + j\omega [P_A(\omega) + m_A K_P P_B(\omega) + m_A (K_I - K_D \omega^2) Q_B(\omega)]$$

Kritické parametry regulátoru získáme, když reálnou i imaginární část Michajlovovy funkce položíme rovno nule a $m_A = 1$:

$$\begin{aligned} -\omega^2 [Q_A(\omega) + m_A K_P Q_B(\omega)] + m_A (K_I - K_D \omega^2) P_B(\omega) &= 0 \\ \omega [P_A(\omega) + m_A K_P P_B(\omega) + m_A (K_I - K_D \omega^2) Q_B(\omega)] &= 0 \end{aligned}$$

Úpravou této soustavy rovnic dostaneme vztahy pro výpočet kritických parametrů regulátoru PID v závislosti na kmitočtu. V případě, že $m_A \in \langle 2; 5 \rangle$, vypočteme oblast pro stavitelné parametry robustního regulátoru, pro jednoduchost K_D je konstantní.

$$K_P(\omega) = \frac{\omega^2 Q_B(\omega) Q_A(\omega) + P_B(\omega) P_A(\omega)}{[-\omega^2 Q_B^2(\omega) - P_B^2] m_A} \quad (7)$$

$$K_I(\omega) = \frac{\omega^2 [Q_B(\omega) P_A(\omega) - P_B(\omega) Q_A(\omega)]}{[-\omega^2 Q_B^2(\omega) - P_B^2] m_A} + K_D \omega^2 \quad (8)$$

Oblast stavitelných parametrů vykreslujeme pro $\omega \in \langle 0, \omega_{\max} \rangle$, kde hodnotu ω_{\max} dostaneme řešením rovnice

$$\text{Im}[G_S(j\omega)] = 0 \quad ,$$

tj. imaginární část kmitočtového přenosu soustavy, kterou položíme rovno nule. Tato podmínka vychází z Nyquistova kritéria stability. Pokud $K_D = 0$, pak se jedná o PI regulátor. Nejvhodnější parametry robustního PI regulátoru leží uprostřed stabilní oblasti [Závacká, 2011]. Tuto metodu můžeme použít i na výpočet stavitelných parametrů P regulátoru, pak volíme $K_I = 0$. Postup si ukážeme na příkladu 1.

V případě parametrické neurčitosti, vytvoříme pro čítele i jmenovatel regulované soustavy Charitonovy polynomy a oblast stability počítáme pro všechny případy. Výsledná stabilní oblast je průnikem všech stabilních oblastí.

Příklad 1:

Vykreslete oblasti pro stavitelné parametry robustního PI regulátoru, který zajišťuje $m_A = 1, 2, 3, 4$ v rovině parametrů (K_P, K_I) pro regulovanou soustavu s přenosem

$$G_S(s) = \frac{2}{(10s+1)(s+1)^2}.$$

Řešení:

$$G_S(s) = \frac{2}{(10s+1)(s+1)^2} = \frac{2}{(10s+1)(s^2+2s+1)} = \frac{2}{10s^3+21s^2+12s+1} = \frac{B(s)}{A(s)}$$

$$G_S(s) \rightarrow G_S(j\omega) \rightarrow \omega \in \langle 0; \omega_{\max} \rangle$$

$$G_S(j\omega) = \frac{2}{1-21\omega^2 + j\omega(12-10\omega^2)} = \frac{2(1-21\omega^2) - 2j\omega(12-10\omega^2)}{(1-21\omega^2)^2 + \omega^2(12-10\omega^2)^2} = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)}$$

Maximální hodnotu kmitočtu, pro který budou stavitelné parametry regulátoru PI počítány, se určí z rovnice, kdy imaginární složka kmitočtového přenosu regulované soustavy je rovna 0.

$$G_S(j\omega) = \text{Re}[G_S(j\omega)] + j\text{Im}[G_S(j\omega)]$$

$$\text{Im}[G_S(j\omega)] = -2\omega(12-10\omega^2) = 0$$

$$\omega^2 = \frac{12}{10} = \frac{6}{5} \Rightarrow \omega = 1,095 \Rightarrow \omega \in \langle 0; 1,095 \rangle$$

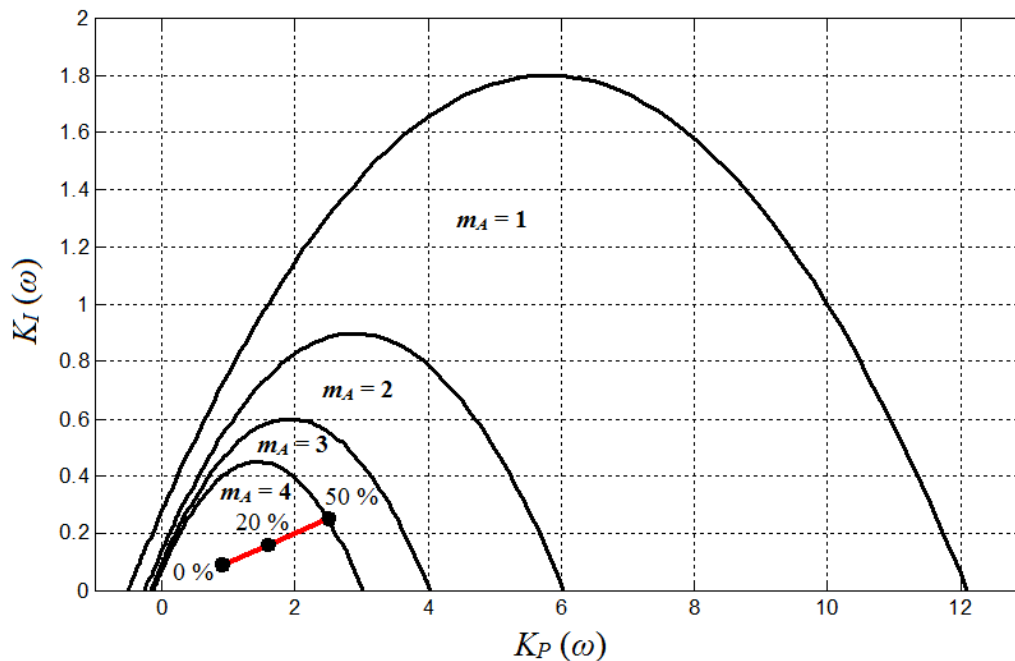
Z kmitočtového přenosu určíme polynomy $P_A(\omega)$, $P_B(\omega)$, $Q_A(\omega)$ a $Q_B(\omega)$:

$$P_B(\omega) = 2, \quad Q_B(\omega) = 0, \quad P_A(\omega) = 1 - 21\omega^2, \quad Q_A(\omega) = 12 - 10\omega^2$$

Výpočet parametrů $K_P(\omega)$ a $K_I(\omega)$ provedeme na základě vztahů (7) a (8):

$$K_P(\omega) = \frac{\omega^2 Q_A Q_B + P_A P_B}{[-\omega^2 Q_B^2 - P_B^2] m_A} = \frac{2(1 - 21\omega^2)}{-2^2 m_A} = -\frac{1}{2m_A} + \frac{21}{2m_A} \omega^2$$

$$K_I(\omega) = \frac{\omega^2 [Q_B P_A - P_B Q_A]}{[-\omega^2 Q_B^2 - P_B^2] m_A} = \frac{-2\omega^2(12 - 10\omega^2)}{-2^2 m_A} = \frac{6}{m_A} \omega^2 - \frac{5}{m_A} \omega^4$$



Obr. 2 Oblasti stavitelných parametrů regulátoru PI – příklad 1

Na obr. 2 můžeme vidět oblasti stavitelných parametrů regulátoru PI pro zadaný přenos regulované soustavy, které zajišťují požadovanou amplitudovou bezpečnost m_A .

Zkontrolujeme, zda parametry regulátoru PI, který seřídíme metodou požadovaného modelu (MPM), leží uvnitř oblastí z obr. 2.

Zadaný přenos pro proporcionální soustavu se setrvačností 3. řádu aproximujeme na proporcionální přenos se setrvačností 1. řádu s dopravním zpožděním

$$G_S(s) = \frac{2}{(10s+1)(s+1)^2} \approx \frac{2}{(10s+1)} e^{-2s}$$

Výpočet stavitelných parametrů podle MPM:

$$G_S(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s} = \frac{2}{(10s+1)} e^{-2s},$$

parametry regulované soustavy $k_1 = 2, T_1 = 10s, T_d = 2s$.

Vypočítané stavitelné parametry regulátoru typu PI pro různé relativní překmity jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Stavitelné parametry PI regulátoru seřízeným MPM pro $\kappa = 0; 0,2; 0,5$

κ	0	0,2	0,5
K_I	0,0920	0,1740	0,2520
K_P	0,9200	1,7400	2,5202
T_I	10	10	10

Na obr. 2 můžeme vidět, že stavitelné parametry regulátoru PI vypočtené MPM leží uvnitř stabilní oblasti pro stavitelné parametry robustního PI regulátoru a bude zajištěna amplitudová bezpečnost $m_A \geq 4$. V případě požadovaného relativního překmitu 0 – 50 % leží uprostřed této oblasti. Z toho vyplývá, že můžeme konstatovat, že pokud je u MPM požadován překmit 0 – 50 %, tak regulátor bude robustní i v případě, že byla použita hrubá aproximace přenosu regulované soustavy.

3. Výpočet stavitelných parametrů PID regulátoru pro soustavy s dopravním zpožděním

Podobným způsobem jak pro soustavu bez dopravního zpoždění (viz kap. 1) bude odvozen postup pro výpočet doporučených oblastí stavitelných parametrů robustního PID regulátoru

$$G_R(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s ,$$

pro regulovanou soustavu proporcionální se setrvačností n řádu s dopravním zpožděním

$$G_S(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-T_d s} .$$

Přenos řízení tohoto regulačního obvodu po dosažení za přenos regulátoru a soustavy je

$$G_{wy}(s) = \frac{m_A G_S(s) G_R(s)}{1 + m_A G_S(s) G_R(s)} ,$$

$$G_{wy}(s) = \frac{m_A B(s) (K_D s^2 + K_P s + K_I) e^{-T_d s}}{s A(s) + m_A B(s) (K_D s^2 + K_P s + K_I) e^{-T_d s}} .$$

Z charakteristického kvazimnohočlenu uzavřeného regulačního obvodu dostaneme Michajlovovu funkci dosažením za $s = j\omega$

$$N_w(j\omega) = j\omega A(j\omega) e^{j\omega T_d} + (K_P j\omega + K_I - K_D \omega^2) B(j\omega) m_A$$

který rozdělíme na imaginární a reálnou část s využitím Eulerova vztahu

$$e^{\pm jx} = \cos x \pm j \sin x ,$$

se dostane Michajlovova funkce

$$N(j\omega) = j\omega[P_A + j\omega Q_A][\cos(\omega T_d) + j\sin(\omega T_d)] + \\ + m_A[P_B + j\omega Q_B](-K_D\omega^2 + jK_P\omega + K_I),$$

řešením soustavy rovnic

$$\operatorname{Re}[N_w(j\omega)] = 0 ,$$

$$\operatorname{Im}[N_w(j\omega)] = 0 ,$$

dostaneme vztahy pro stavitelné parametry K_P a K_I v závislosti na kmitočtu. Pokud $m_A = 1$ jsou to kritické hodnoty určující oblast stability pro daný regulační obvod. Pokud volíme $m_A > 1$, pak se jedná o optimální parametry regulátoru, které zajišťují požadovanou amplitudovou bezpečnost m_A .

$$K_P = \frac{\omega(P_B Q_A - Q_B P_A) \sin(\omega T_d + \gamma) - (P_B P_A + \omega^2 Q_B Q_A) \cos(\omega T_d + \gamma)}{m_A [P_B^2 + \omega^2 Q_B^2]}, \quad (9)$$

$$K_I = \frac{\omega(P_B P_A + \omega^2 Q_B Q_A) \sin(\omega T_d + \gamma) + \omega^2 (P_B Q_A - Q_B P_A) \cos(\omega T_d + \gamma)}{m_A [P_B^2 + \omega^2 Q_B^2]} + \omega^2 K_D$$

(10)

Kmitočtet pro výpočet oblasti stavitelných parametrů robustního PI regulátoru je složitý, uvedeme si pouze postup výpočtu kmitočtu pro soustavu danou přenosem

$$G_S(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s} .$$

Hodnotu ω_{\max} vypočteme z podmínky, kdy fáze regulované soustavy dosáhne hodnoty $-\pi$. Fáze dané regulované soustavy je dána vztahem

$$\varphi_S(\omega) = \operatorname{arctg}(-T_1\omega) - T_d\omega ,$$

musíme tedy řešit rovnici

$$\operatorname{arctg}(-T_1\omega_{\max}) - T_d\omega_{\max} = -\pi .$$

Pro výpočet dané rovnice použijeme aproximaci [Vítečková, Víteček, 2011]

$$\operatorname{arctg}(x) \approx \begin{cases} \frac{\pi}{4} x & \text{pro } |x| \leq 1 , \\ \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} x & \text{pro } |x| > 1 . \end{cases}$$

$$\text{Pro } T_1 \omega_{\max} \leq 1; \left(\omega_{\max} \leq \frac{1}{T_1} \right)$$

$$\pi = \frac{\pi}{4} T_1 \omega_{\max} + T_d \omega_{\max} \Rightarrow \omega_{\max} = \frac{\pi}{\frac{\pi}{4} T_1 + T_d} = \frac{4\pi}{T_1 \pi + 4T_d} \wedge \omega_{\max} \leq \frac{1}{T_1}$$

$$\text{Pro } T_1 \omega_{\max} > 1; \left(\omega_{\max} > \frac{1}{T_1} \right)$$

$$\pi = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4T_1 \omega_{\max}} \right) + T_d \omega_{\max} \Rightarrow \omega_{\max} = \frac{T_1 \pi + \sqrt{T_1^2 \pi^2 + 4T_1 T_d \pi}}{4T_1 T_d} = \frac{\pi + \sqrt{\pi^2 + \frac{4T_d \pi}{T_1}}}{4T_d} \wedge \omega_{\max} > \frac{1}{T_1}$$

Jen jedno řešení vyhovuje a je vhodné podle potřeby upravit hodnotu ω_{\max} podle výsledků vykreslené stabilní oblasti.

Příklad 2

Určete oblasti stavitelných parametrů robustního PI regulátoru pro regulovanou soustavu

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}, \text{ kde } k_1 = 1, T_1 = 10 \text{ s}, T_d = 2 \text{ s}.$$

Pro bezpečnost ve fázi $m_A = 2, 3$ a 4 vykreslete doporučené oblasti stavitelných parametrů robustního regulátoru PI. Vyznačte v této oblasti parametry PI regulátoru, které vypočtete MPM pro $\kappa = 0; 0,05; 0,1; 0,2$.

Řešení:

Pro stabilní oblast volitelných parametrů regulátoru PI volíme $m_A = 1$, pro další oblasti zaručující amplitudovou bezpečnost dosadíme do vztahů (9) a (10) za $m_A = 2, 3$ a 4

$$K_p(\omega) = \frac{1}{m_A} [10\omega \sin(2\omega) - \cos(2\omega)]$$

$$K_i(\omega) = \omega^2 [\omega \sin(2\omega) + 10\omega^2 \cos(2\omega)] \frac{1}{m_A}$$

Výpočet ω_{\max} :

$$\text{Pro } \omega_{\max} \leq \frac{1}{T_1} = \frac{1}{10} = 0,1:$$

$$\omega_{\max} = \frac{\pi}{\frac{\pi}{4}T_1 + T_d} = \frac{\pi}{\frac{\pi}{4}10 + 2} = \frac{4\pi}{10\pi + 8} \doteq 0,32 \text{ - nevyhovuje podmínice}$$

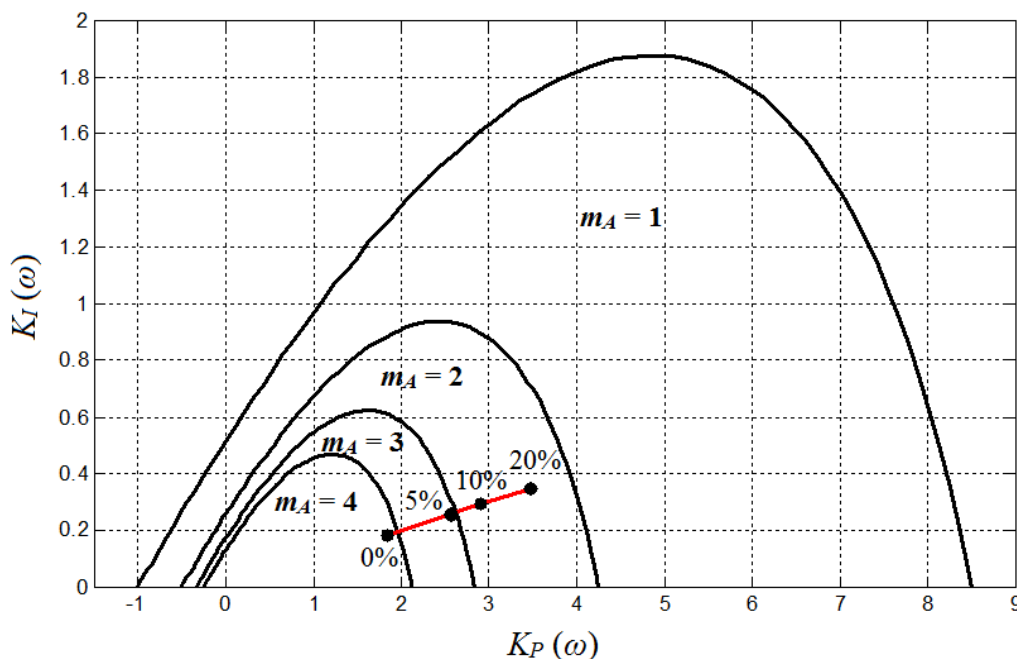
$$\text{Pro } \omega_{\max} > \frac{1}{T_1} = \frac{1}{10} = 0,1:$$

$$\omega_{\max} = \frac{\pi + \sqrt{\pi^2 + \frac{4T_d\pi}{T_1}}}{4T_d} = \frac{\pi + \sqrt{\pi^2 + \frac{4 \cdot 2 \cdot \pi}{10}}}{4 \cdot 2} = \frac{\pi + \sqrt{\pi^2 + 0,8\pi}}{8} \doteq 0,83 \text{ - vyhovuje podmínice}$$

Stabilní oblasti budeme vykreslovat pro $\omega \in \langle 0; 0,83 \rangle$. Výpočet stavitelných parametrů regulátoru typu PI pro MPM provedeme pomocí těchto vzorců. Stavitelné parametry PI regulátoru seřízeným MPM pro $\kappa = 0; 0,05; 0,1; 0,2$ jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 2 Stavitelné parametry PI regulátoru seřízeným MPM pro $\kappa = 0; 0,05; 0,1; 0,2$

κ	0	0,05	0,1	0,2
K_I	1,84	2,57	2,91	3,48
K_P	0,184	0,257	0,291	0,348
T_1	10	10	10	10



Obr. 3 Stabilní oblasti pro různé amplitudové bezpečnosti m_A a s vyznačenými hodnotami stavitelných parametrů PI regulátoru seřízeným MPM pro různé překmity – příklad 2

Na obr. 3 můžeme vidět oblasti stavitelných parametrů regulátoru PI pro zadaný přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním, které zajišťují požadovanou amplitudovou bezpečnost m_A .

Dále na obr. 3 můžeme vidět, že stavitelné parametry regulátoru PI vypočtené MPM leží uvnitř stabilní oblasti pro stavitelné parametry robustního PI regulátoru a bude zajištěna amplitudová bezpečnost $m_A \geq 2$. V případě požadovaného relativního překmitu 0 – 20 % leží uprostřed této oblasti. Z toho vyplývá, že můžeme konstatovat, že pokud je u MPM požadován překmit 0 – 20 %, tak regulátor bude robustní i v případě, že byla použita hrubá aproximace přenosu regulované soustavy.

4. Závěr

Robustní regulace je stále žhavé téma v oblasti automatizace. V dnešní době existuje spousta metod pro robustní regulaci, ale u žádné metody nemůžeme nekompromisně říct, že by byla nejvhodnější. Každá metoda pro robustní regulaci je něčím specifická a má své výhody a nevýhody.

V této práci je popsána robustní regulace a robustní oblasti stability. V práci je teoreticky popsán výpočet stavitelných parametrů PID regulátoru pro regulované soustavy, jak bez dopravního, tak i s dopravním zpožděním. Dále jsou tyto metody ukázány na konkrétních příkladech.

Použitá literatura

KUČERA, V. Robustní regulátory. *Automa*, 6, 2001, str. 43 – 45

MATUŠŮ, R. *International journal of mathematics and computers in simulation*, vydání 3, díl 5, 2011, 224 - 231 s.

VESELÝ, V., HARSÁNYI, L. *Robustné riadenie dynamických systémov*. Bratislava: Vydavateľství STU, 2008, ISBN 978-80-227-2801-0

VÍTEČEK, A. & VÍTEČKOVÁ, M. *Zpětnovazební řízení mechatronických systémů*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 200 s. ISBN 978-80-248-3232-6.

VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011, 230 s. ISBN 978-802-4825-038.

VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. Přepřacované 2. vydání - dotisk. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014, 243 s. ISBN 978-80-248-1924-2.

ZÁVACKÁ, JANA, *Návrh robustných PID regulátorov pre riadenie chemickotechnologických procesov s parametrickými neurčitostami*. Disertační práce (školitelka: doc. Bakošová), FCHaPT, STU v Bratislavě, 2011, 126 str.