



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

VLIV VELIKOSTI VZORKOVACÍ PERIODY NA NÁVRH DISKRÉTNÍHO REGULAČNÍHO OBVODU

INFLUENCE OF SAMPLING PERIOD SIZE ON DISCRETE CONTROL CIRCUIT DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZBYNĚK BALABÁN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OLGA DAVIDOVÁ, Ph.D.

BRNO 2012

ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá diskretním regulačním obvodem, u kterého se používá číslicový regulátor, jež má další parametr, a to vzorkovací periodu T . Její velikost má velký vliv na průběh regulace. Pro vybrané regulované soustavy jsou navrženy číslicové regulátory pro různé velikosti vzorkovací periody.

ABSTRACT

This thesis deals with discrete control circuit, which is used in a digital controller, which has an additional parameter, namely the sampling period T . Its size has a large influence on the course of regulation. Plants for selected digital controllers are designed for different sizes of sampling period.

KLÍČOVÁ SLOVA

Diskretní regulační obvod, regulovaná soustava, číslicový regulátor, vzorkovací perioda.

KEYWORDS

Discrete control circuit, plant, digital controller, sampling period.

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Já, Zbyněk Balabán, prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Olgy Davidové, Ph.D a za použití citované literatury.

V Brně dne 24.5.2012

.....
Zbyněk Balabán

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BALABÁN, Z. *Vliv velikosti vzorkovací periody na návrh diskrétního regulačního obvodu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Olga Davidová, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce Ing. Olze Davidové, Ph.D. za pomoc a rady, které mi poskytla při vypracování této práce.

OBSAH

Zadání závěrečné práce.....	3
Abstrakt	5
Prohlášení o originalitě.....	6
Seznam použitých symbolů	10
1 Úvod	11
2 Diskrétní řízení	13
2.1 Diskrétní regulační obvod	13
2.2 Vzorkovač a vzorkování.....	13
2.3 Tvarovač a tvarování.....	15
2.4 Regulátory	16
2.4.1 Spojité regulátory	16
2.4.2 Číslicové regulátory.....	17
3 Syntéza diskrétního regulačního obvodu	19
3.1 Malá vzorkovací perioda	19
3.2 Střední vzorkovací perioda.....	21
3.3 Velká vzorkovací perioda.....	23
4 Metody návrhu regulátorů	25
4.1 Metoda optimálního modulu	25
4.2 Obecný lineární regulátor	27
5 Aplikace na příkladech	29
5.1 Vzorový výpočet při malé vzorkovací periodě	30
5.2 Vzorový výpočet při střední vzorkovací periodě.....	32
5.3 Vzorový výpočet při velké vzorkovací periodě	34
5.4 Výsledky přenosů regulátorů a přechodové charakteristiky	35
5.4.1 Soustava S1	35
5.4.2 Soustava S2	40
5.4.3 Soustava S3	46
6 Závěr	53
Seznam použité literatury	55

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A_w	modul (uzavřeného) regulačního obvodu
$e(t)$	regulační odchylka
$E(z)$	Z-obraz regulační odchylky
$G_R(s)$	přenos regulátoru
$G_R(z)$	Z-přenos regulátoru
$G_S(s)$	přenos regulované soustavy
$G_T(s)$	přenos tvarovače
$G_W(s)$	přenos řízení
$G_W(z)$	Z-přenos řízení
k, kT	diskrétní čas
q_0, q_1, q_2	stavitelné parametry regulátoru
r_0	zesílení regulátoru
s	komplexní proměnná v L-transformaci
t	čas
t_r	doba regulace
T	perioda vzorkování
T_1	největší časová konstanta regulované soustavy
T_{95}	doba dosažení 95 % ustálené hodnoty přechodové charakteristiky
T_d	dopravní zpoždění
T_D	derivační časová konstanta
T_I	integrační časová konstanta
$u(kT)$	diskrétní akční veličina
$u(t)$	akční veličina
$u_T(t)$	tvarovaná akční veličina
$v(t)$	poruchová veličina
$V(z)$	Z-obraz poruchové veličiny
$w(kT)$	diskrétní žádaná veličina
$W(z)$	Z-obraz žádané veličiny
$y(kT)$	diskrétní regulovaná veličina
$y(t)$	regulovaná veličina
$Y(z)$	Z-obraz regulované veličiny
z	komplexní proměnná v Z-transformaci
$\delta(kT)$	jednotkový impulz
ξ_0	koeficient poměrného tlumení regulované soustavy
κ	relativní překmit
τ_i	časová konstanta regulované soustavy
τ_{min}	nejmenší časová konstanta regulované soustavy
ω	kmitočet, úhlová frekvence
ω_m	mezní úhlová frekvence

1 Úvod

Diskrétní regulační obvod je takový obvod, jehož alespoň jedna veličina má tvar posloupnosti diskrétních hodnot. Pro návrh tohoto obvodu je nezbytné zvolit vhodnou vzorkovací periodu T . Při použití nevhodné vzorkovací periody by se ze stabilního obvodu stal obvod nestabilní. Proto nelze vzorkovací periodu i vzorkovací kmitočet volit libovolně.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních částí: teoretické a praktické.

Teoretická část obsahuje čtyři kapitoly, přičemž první kapitolou je úvod. Druhá kapitola popisuje diskrétní regulační obvod, vzorkování, určování vzorkovací periody, tvarování, spojitě a číslíkové PID regulátory. Třetí kapitola se zabývá syntézou diskrétního regulačního obvodu při návrhu různých velikostí vzorkovacích period. Čtvrtá kapitola uvádí metody pro určení přenosu regulátorů. V praxi se používá celá řada těchto metod, přičemž v této práci jsou uvedeny dvě metody a to metoda optimálního modulu a obecný lineární regulátor. Pro určení parametrů obecného lineárního regulátoru lze použít více metod, zde byla použita jednoduchá metoda, kdy se požaduje konečný nejmenší možný počet kroků regulace.

Pátá kapitola je praktická část, kde se aplikují informace z teoretické části na příkladech. Jsou zde uvedeny vzorové příklady výpočtů, jejich výsledky a přechodové charakteristiky těchto výsledků.

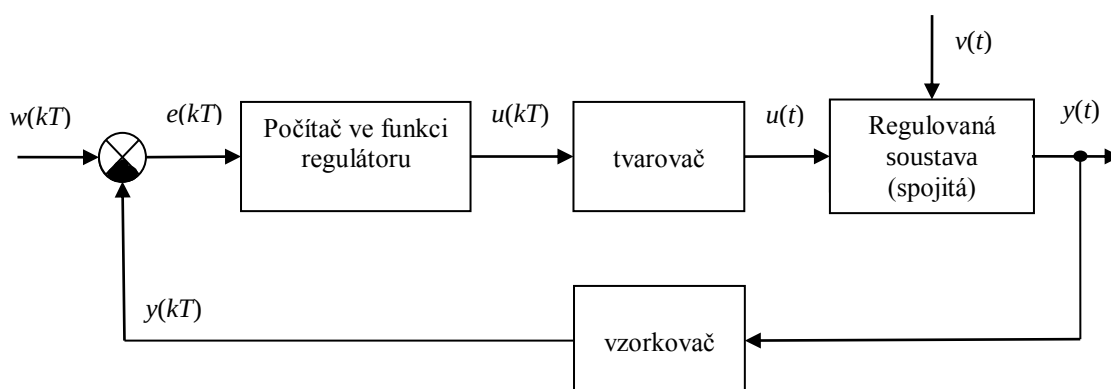
Poslední kapitolou je závěr, kde jsou vyhodnoceny výsledky.

2 Diskrétní řízení

Tato kapitola se bude zabývat popisem diskrétního regulačního obvodu. Uvede a rozebere jednotlivé části obvodu, jako jsou vzorkovač, tvarovač atd..

2.1 Diskrétní regulační obvod

Diskrétní regulační obvod [1], [4], [7] je takový obvod, jehož alespoň jeden člen pracuje diskrétně v určitých pravidelných okamžicích T , které se nazývají intervaly vzorkování. Diskrétní regulační obvod obvykle využívá číslicový počítač pro výpočet akční veličiny. V dnešní době se zásluhou nového trendu zvyšuje nutnost používání systémů s číslicovými počítači (především díky dálkovému přenosu velkého množství informací).



Obr. 2.1 Diskrétní regulační obvod

Na obrázku 2.1 je vidět nejčastější typ regulačního obvodu, kdy je regulovaná veličina $y(t)$ vzorkována s periodou T za pomoci vzorkovače. Veličina je následně převedena na číslicový tvar diskrétní funkce $y(kT)$. Počítač vypočítá z diskrétní žádané veličiny $w(kT)$ a $y(kT)$ regulační odchylku $e(kT)$ a určí danou hodnotu regulačního zásahu $u(kT)$. Tato hodnota je převedena tvarovačem na spojitý signál $u(t)$.

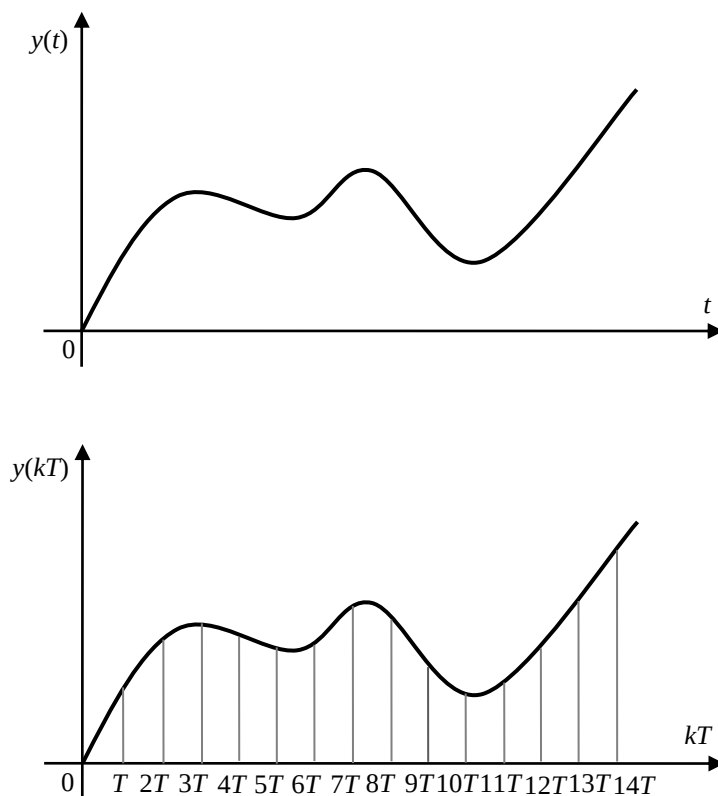
2.2 Vzorkovač a vzorkování

Vzorkovací člen bývá často znázorňován spínačem s vyznačenou periodou vzorkování obr. 2.2 [4].



Obr. 2.2 Vzorkovač ve smyslu spínače

Vzorkovač periodicky snímá hodnoty vstupní veličiny v čase kT . Tyto hodnoty zjišťuje v pravidelných intervalech jako vzorky, přičemž průběh této veličiny mezi odběry pro něj není důležitý obr. 2.3.



Obr. 2.3 Vzorkování

Vzorkování je děj, při kterém se vytváří posloupnost impulzů kT kde k je $0, 1, 2, 3, \dots$

Vzorkovací kmitočet je dán následujícím vztahem

$$\omega_y = \frac{2\pi}{T}. \quad (2.1)$$

Určování vzorkovací periody

Při návrhu diskrétního regulačního obvodu je nezbytné zvolit vhodnou vzorkovací periodu T , protože při použití nevhodné volby by se ze stabilního obvodu stal obvod nestabilní. Vzhledem k tomu nelze volit vzorkovací periodu i vzorkovací kmitočet libovolně. Regulovaná soustava s malými časovými konstantami by měla mít i kratší vzorkovací periodu a opačně. Čím má regulovaná soustava větší časové konstanty, tím delší může být i perioda vzorkování [1], [4], [7].

Pro přibližné určení vzorkovací periody lze použít některý ze vztahů:

$$T \cong \frac{T_1}{10}, \quad (2.2)$$

$$T \cong \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) T_{95}, \quad (2.3)$$

$$T \cong \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{8} \right) T_d, \quad (2.4)$$

$$T \cong \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{4} \right) \sum_i \tau_i, \quad (2.5)$$

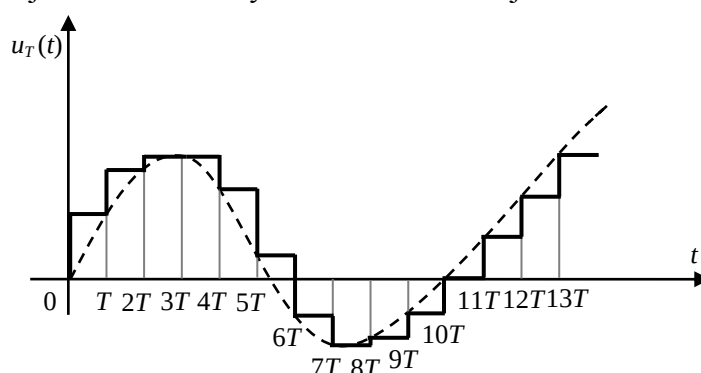
$$T \cong 0,5 \tau_{min}, \quad (2.6)$$

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_m}, \quad (2.7)$$

kde T_1 je největší časová konstanta regulované soustavy, T_{95} je doba dosažení 95 % ustálené hodnoty na přechodové charakteristice regulované soustavy, $\sum \tau_i$ je součet časových konstant regulované soustavy, T_d je dopravní zpoždění, τ_{min} je nejmenší časová konstanta regulované soustavy, ω_m je mezní úhlová frekvence.

2.3 Tvarovač a tvarování

Tvarovací člen tvaruje vstupní impuls šířky na signál, který trvá jednu periodu vzorkování. Podstatou tvarování diskrétního signálu popsaného v [5], je jeho přeměna na signál spojitý (nebo alespoň částečně spojitý). Tento spojitý signál musí předávat informace, ale i energii dalšímu členu. V praxi se používají především tvarovače nultého řádu. Během celé doby periody T je výstupní veličina konstantní a je rovna amplitudě vstupního impulsu, který byl přiveden na počátku periody. Princip tvarovače nultého řádu je patrný z následujícího obr. 2.4. Výsledkem tvarovače je schodová funkce.



Obr 2.4 Tvarování

Pro následující práci s diskretním obvodem je nutné znát přenos tvarovače nultého řádu $G_T(s)$, který je dán následujícím vztahem

$$G_T(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}. \quad (2.8)$$

2.4 Regulátory

Regulátor je takové zařízení regulačního obvodu, které provádí regulaci prostřednictvím akční veličiny a působí na regulovanou soustavu tak, aby se regulovaná veličina udržovala na předepsané hodnotě a aby byla regulační odchylka nulová nebo co nejmenší.

V této práci se využívá kromě diskretního regulátoru i regulátor spojitý. Při návrhu spojitého regulátoru probíhá výpočet v oblasti s , kde se určí jeho stavitelné parametry. Posléze se tento regulátor převede do oblasti z .

Další výpočty v této práci obsahují jen diskretní regulátor a celý výpočet probíhá pouze v oblasti z .

2.4.1 Spojité regulátory

U spojitých regulátorů jsou všechny veličiny spojité v čase. Regulátor může regulační odchylku zesilovat, integrovat a derivovat, jak udává [1], [5].

Spojitý regulátor lze zapsat diferenciální rovnicí

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 e'(t), \quad (2.9)$$

kde $r_0 e(t)$ je proporcionální složka regulátoru, $r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$ je integrační složka regulátoru a $r_1 e'(t)$ je derivační složka regulátoru.

Vztah (2.11) lze převést na přenos ideálního PID regulátoru

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right), \quad (2.10)$$

$$T_I = \frac{r_0}{r_{-1}}; \quad T_D = \frac{r_1}{r_0}, \quad (2.11)$$

kde r_0 je zesílení regulátoru, T_I je integrační časová konstanta, T_D je derivační časová konstanta.

2.4.2 Číslicové regulátory

Číslicový regulátor pracuje s nespojitým signálem a plní stejné požadavky, jako spojitý regulátor, jak je uvedeno v [1], [3], [5].

Ideální PID regulátor je popisován diferenciální rovnicí

$$u(t) = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (2.12)$$

Vzhledem k tomu, že číslicový regulátor nevyhodnocuje informaci spojitě, ale v diskretních okamžicích, je potřeba převést spojitý čas na diskretní časové okamžiky

$$t = kT, \quad (2.13)$$

kde $k = 0, 1, 2, \dots$, a T je perioda vzorkování.

Volba kratší vzorkovací periody má za následek přesnější regulaci.

Pro určení diskretní verze regulátoru se využívá několika způsobů diskretních náhrad spojitých algoritmů integrace a derivace. Integrace je provedena náhradou spojitého signálu tzv. zpětnou obdélníkovou metodu (ZOBD), ale může být použita dopředná obdélníková metoda (DOBD) i lichoběžníková metoda (LICHŮ). Pro tuto práci byla zvolena zpětná obdélníková metoda.

U číslicových regulátorů se používají dva typy algoritmů: polohový a přírůstkový. Polohový algoritmus se využívá především pro regulátory, které neobsahují sumační složku (P, PD) a přírůstkový algoritmus, který se naopak užívá u regulátorů, které sumační složku obsahují (S, PS, PSD).

Po úpravách které jsou uvedeny v [4] jsou získány následující diferenční rovnice

$$\begin{aligned} u(k) - u(k-1) &= \\ &= r_0 \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) e(k) - r_0 \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) e(k-1) + r_0 \frac{T_D}{T} e(k-2), \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$u(k) - u(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2). \quad (2.15)$$

Pro jednotlivé typy diskretních regulátorů je možno určit příslušné hodnoty q_0, q_1, q_2 . Rovněž je možné stanovit Z- přenosy regulátorů $G_R(z)$, které jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Přenosy číslicových regulátorů

typ	T_I, T_D	q_0	q_1	q_2	$G_R(z)$
P	$T_I \rightarrow \infty,$ $T_D \rightarrow 0$	r_0	0	0	q_0
S	$T_D \rightarrow 0$	$r_0 \frac{T}{T_I}$	0	0	$\frac{q_0}{1 - z^{-1}}$
PS	$T_D \rightarrow 0$	$r_0 \left(1 + \frac{T}{T_I}\right)$	$-r_0$	0	$\frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$
PD	$T_I \rightarrow \infty$	$r_0 \left(1 + \frac{T_D}{T}\right)$	$-r_0 \frac{T_D}{T}$	0	$q_0 + q_1 z^{-1}$
PSD	-	$r_0 \left(1 + \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I}\right)$	$-r_0 \left(1 + 2 \frac{T_D}{T}\right)$	$r_0 \frac{T_D}{T}$	$\frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$

3 Syntéza diskrétního regulačního obvodu

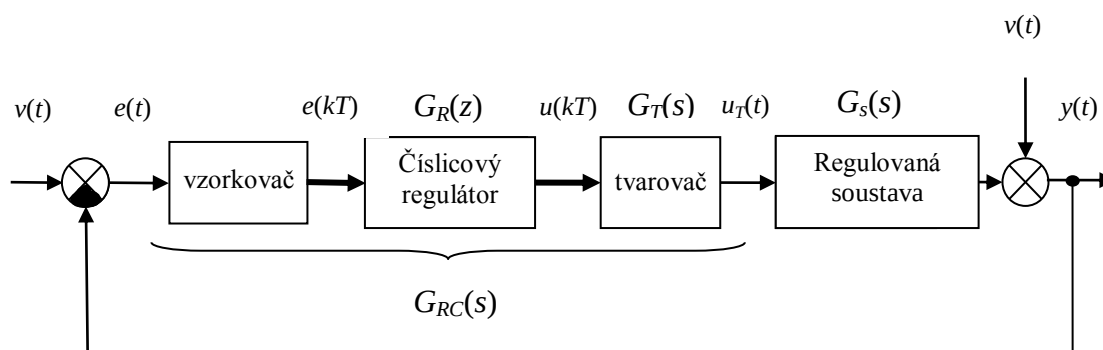
Tato kapitola se bude zabývat syntézou diskrétního regulačního obvodu [1], [6]. Aby byla dosažena požadovaná kvalita regulace, musí být navržena struktura regulátoru a vypočteny jeho parametry. Při syntéze diskrétního regulačního obvodu se vychází ze tří postupů dle velikosti vzorkovací periody. Volba tohoto parametru má zásadní vliv na stabilitu regulačního obvodu. Při nevhodné velikosti vzorkovací periody se z dosud stabilního obvodu může stát obvod nestabilní.

3.1 Malá vzorkovací perioda

Vzorkovací perioda je časová konstanta, která rozděluje spojitou část obvodu na hodnoty dané v časových intervalech. Jak již z názvu vyplývá, tento postup je možno uvažovat při malé vzorkovací periodě, přičemž je nejvíce používáný.

Volba malé vzorkovací periody vychází ze vztahů, které byly uvedeny výše (2.2 – 2.7). Aby vzorkovací perioda plnila kritéria malé vzorkovací periody T [1], musí být splněna některá z těchto podmínek, přičemž malá vzorkovací perioda musí být o hodně menší než uvedené vztahy (2.2 – 2.7) např. $T < 1/6T_{95}$.

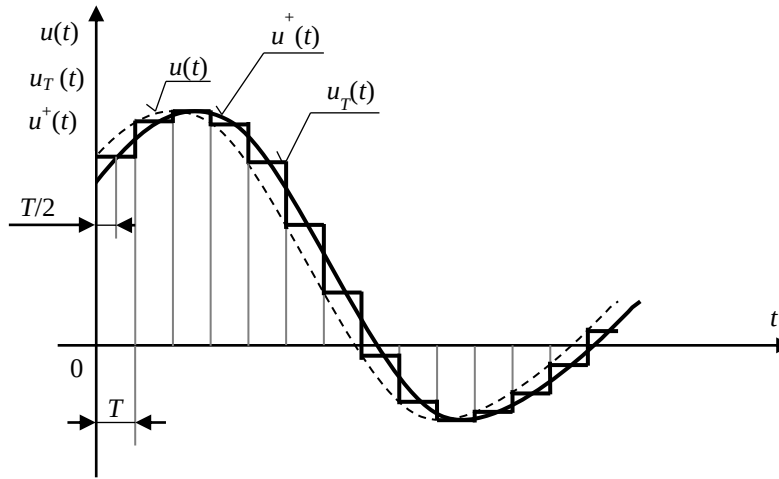
Na obr. 3.1 je zobrazen regulační obvod pro malou periodu vzorkování. Tento obvod obsahuje vzorkovač, číslicový regulátor, tvarovač a v neposlední řadě regulovanou soustavu.



Obr. 3.1 Regulační obvod pro malou vzorkovací periodu

Vzorkovač je umístěn před číslicovým regulátorem. Tento vzorkovač tak společně s původním spojitým regulátorem (s přenosem $G_R(s)$) a tvarovačem (s přenosem $G_T(s)$) tvoří celek s přenosem $G_{RC}(s)$. Tučnou čarou jsou v obrázku označeny diskrétní veličiny.

Z obr. 3.2 vyplývá přenos náhradního regulátoru.



Obr. 3.2 Náhrada tvarované akční veličiny $u_T(t)$ veličinou $u^+(t)$ zpožděnou o $\frac{T}{2}$ za výstupní veličinu $u(t)$ původního regulátoru $G_R(s)$

Veličina náhradního regulátoru $u^+(t)$ je zpožděna o polovinu vzorkovací periody $\frac{T}{2}$ za výstupním signálem původního regulátoru $u(t)$. Na základě tohoto zpoždění lze přenos popsat následujícím vztahem

$$G_{RC}(s) = G_R(s)e^{-\frac{T}{2}s}. \quad (3.1)$$

Metoda je dána následujícím postupem:

- v první řadě se vybere spojitý regulátor $G_R(s)$ určitého typu,
- pro získání $G_{RC}(s)$ je nutné regulátor $G_R(s)$ zatížit tzv. dopravním zpožděním, které bývá často nahrazeno proporcionálním prvkem se setrvačností prvního řádu podle rovnice (3.2)

$$e^{-\frac{T}{2}s} \approx \frac{1}{1 + \frac{T}{2}s}, \quad (3.2)$$

- následně se stanoví hodnoty stavitelných parametrů regulátoru podle některé ze spojitých metod syntézy, pro tuto práci bude použita metoda optimálního modulu,
- určí se přenos řízení regulačního obvodu

$$G_W(s) = \frac{G_{RC}(s)G_S(s)}{1 + G_{RC}(s)G_S(s)}, \quad (3.3)$$

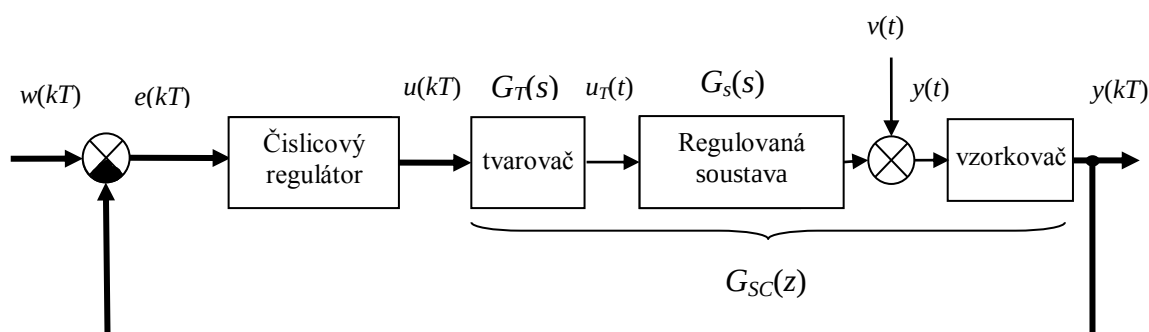
- vypočtou se stavitelné parametry regulátoru,

- $G_R(s)$ se převede do oblasti proměnné z a to například pomocí přírůstkového algoritmu a ZOBD metody podle rov.(2.16), tím je získán Z-přenos regulátoru $G_R(z)$.

3.2 Střední vzorkovací perioda

Při volbě střední vzorkovací periody je nutné opět vycházet ze vztahů, které byly uvedeny výše (2.2 –2.7), jak tomu bylo u malé vzorkovací periody. Aby vzorkovací perioda plnila kritéria střední vzorkovací periody T [1], musí být splněna jedna ze zmiňovaných podmínek, přičemž střední vzorkovací perioda musí být menší než dané vztahy (2.2 –2.7) např. $T < 1/6T_{95}$.

Regulační obvod pro střední vzorkovací periodu (obr. 3.3) se skládá z číslicového regulátoru, tvarovače, regulované soustavy a vzorkovače.



Obr. 3.3 Regulační obvod pro střední vzorkovací periodu

Tvarovač, původní regulovaná soustava $G_S(s)$ a vzorkovač společně tvoří náhradní regulovanou soustavu danou přenosem $G_{SC}(z)$. Vzorkovač je v tomto regulačním obvodu představen na výstup regulované soustavy. Jak tomu bylo u malé vzorkovací periody, tak i u střední vzorkovací periody jsou diskrétní veličiny opět znázorněny tučnou čarou.

Z-přenos náhradní regulované soustavy $G_{SC}(z)$ lze určit podle následujícího vztahu, přičemž tato soustava zahrnuje přenos původní regulované soustavy $G_S(s)$, tvarovače nultého řádu a vzorkovače.

$$G_{SC}(z) = (1 - z^{-1})Z \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{G_S(s)}{s} \right\} \right\} \Bigg|_{t=kT}. \quad (3.4)$$

Popsaná metoda je dána následujícím postupem:

- ze zadané spojité regulované soustavy $G_S(s)$ je určen podle rov. (3.4) Z-přenos náhradní regulované soustavy $G_{SC}(z)$,
- pak z rov. (3.5) je substitucí získán přenos $G_{SC}(s)$ v oblasti komplexně proměnné s

$$G_{SC}(s) = G_{SC}(z) \left| \begin{array}{l} z = \frac{1 + \frac{T}{2}s}{1 - \frac{T}{2}s} \end{array} \right. , \quad (3.5)$$

- je nutné provést výběr typu spojitého regulátoru $G_R(s)$ a určit hodnoty stavitelných parametrů regulátoru podle některé ze spojitých metod syntézy, pro tuto práci byla použita metoda optimálního modulu,
- přenos řízení regulačního obvodu je následující

$$G_W(s) = \frac{G_R(s)G_{SC}(s)}{1 + G_R(s)G_{SC}(s)}, \quad (3.6)$$

- vypočtou se stavitelné parametry regulátoru $G_R(s)$,
- $G_R(s)$ se převede do oblasti proměnné z podle rovnice (3.7) a tím je získán Z -přenos regulátoru $G_R(z)$

$$G_R(z) = G_R(s) \left| \begin{array}{l} s = \frac{2}{T} \frac{z - 1}{z + 1} \end{array} \right. . \quad (3.7)$$

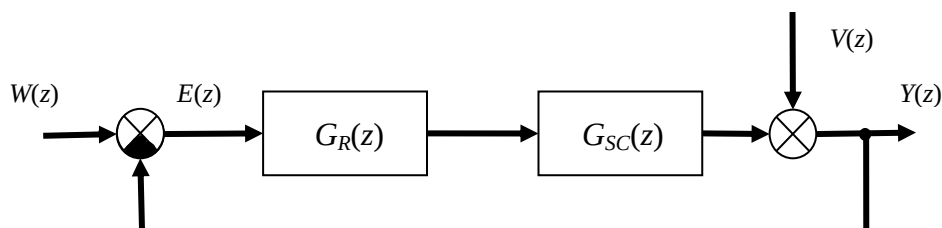
3.3 Velká vzorkovací perioda

Jak již bylo uvedeno v podkapitole 3.1, vzorkovací perioda je časová konstanta, která rozděluje spojitou část obvodu na hodnoty dané v časových intervalech.

Volba velké vzorkovací periody vychází ze vztahů (2.2 – 2.7). Za velkou vzorkovací periodu T [1] je možno považovat takovou periodu, která nevyhovuje těmto vztahům např. $T > 1/6T_{95}$.

Na obr. 3.4 je znázorněn regulační obvod pro velkou periodu vzorkování, kde je zobrazen celkový Z-přenos regulované soustavy $G_{SC}(z)$, který se skládá jednak z přenosu spojitě soustavy a přenosu tvarovače 0. řádu. Jak již bylo zmíněno, diskrétní veličiny jsou opět znázorněny tučnou signální čarou.

K návrhu a řešení diskrétního regulačního obvodu dochází pouze v oblasti z .



Obr. 3.4 Regulační obvod pro velkou vzorkovací periodu

Metoda je dána následujícím postupem:

- ze zadané spojitě regulované soustavy $G_S(s)$ je určen podle rov. (3.4) Z-přenos náhradní regulované soustavy $G_{SC}(z)$,
- vypočtou se hodnoty stavitelných parametrů regulátoru podle některé z diskrétních metod syntézy, pro tuto práci bude použit obecný lineární regulátor,
- podle rovnice (3.8) lze určit celkový přenos řízení

$$G_W(z) = \frac{G_R(z)G_{SC}(z)}{1 + G_R(z)G_{SC}(z)}. \quad (3.8)$$

4 Metody návrhu regulátorů

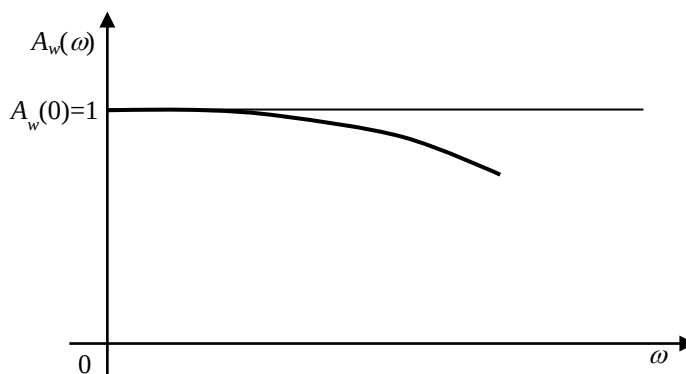
Tato kapitola se bude zabývat metodami pro nastavení parametrů číslicových regulátorů. Existuje celá řada metod pro jejich určování. Pro tuto práci byly vybrány následující metody a to optimálního modulu, která je použita pro spojitý seřízení regulátoru, a obecný lineární regulátor pro diskretní seřízení regulátoru.

4.1 Metoda optimálního modulu

Metoda optimálního modulu, která je popsána v [1], [4], se převážně používá pro seřízení spojitých regulátorů. Vychází z přenosu řízení regulačního obvodu $G_w(s)$. V ideálním případě by měl být splněn požadavek $G_w(s) = 1$. Tuto podmínku lze vyjádřit v kmitočtové oblasti následovně

$$G_w(j\omega) = 1 \quad \Rightarrow \quad |G_w(j\omega)| = A_w(\omega) = 1. \quad (4.1)$$

Tato podmínka je však v praxi nesplnitelná. Ve skutečnosti regulační děj nejrychleji odezní, jestliže amplitudová charakteristika bude ze začátku plochá a poté bude mít monotónně klesající průběh obr. 4.1.



Obr. 4.1

Pak má platit

$$A_w(j\omega) \rightarrow 1 \quad \Rightarrow \quad A_w^2(\omega) \rightarrow 1. \quad (4.2)$$

Je-li předpokladem následující tvar přenosu řízení

$$G_w(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (4.3)$$

pak frekvenční přenos řízení má tvar

$$G_w(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_4(j\omega)^4 + b_3(j\omega)^3 + b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_4(j\omega)^4 + a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + a_0}, \quad (4.4)$$

druhá mocnina modulu řízení je potom

$$|G_w(j\omega)|^2 = G_w(j\omega)G_w(-j\omega) = \frac{B_m\omega^{2m} + B_{m-1}\omega^{2(m-1)} + \dots + B_1\omega^2 + B_0}{A_n\omega^{2n} + A_{n-1}\omega^{2(n-1)} + \dots + A_1\omega^2 + A_0}. \quad (4.5)$$

Z přenosu řízení rov. (4.3) se vypočtou následující koeficienty

$$\begin{aligned} B_0 &= b_0^2 & A_0 &= a_0^2 \\ B_1 &= b_1^2 - 2b_0b_2 & A_1 &= a_1^2 - 2a_0a_2 \\ B_2 &= b_2^2 - 2b_1b_3 + 2b_0b_4 & A_2 &= a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 \\ B_3 &= b_3^2 - 2b_2b_4 + 2b_1b_5 - 2b_0b_6 & A_3 &= a_3^2 - 2a_2a_4 + 2a_1a_5 - 2a_0a_6 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Je-li počet stavitelných parametrů regulátoru roven jedné (P, I), pak

$$A_1B_0 = A_0B_1, \quad (4.7)$$

při dvou stavitelných parametrech regulátoru (PI, PD), budou rovnice dvě

$$A_1B_0 = A_0B_1; \quad A_2B_0 = A_0B_2, \quad (4.8)$$

se třemi stavitelnými parametry regulátoru (PID), budou rovnice tři

$$A_1B_0 = A_0B_1; \quad A_2B_0 = A_0B_2; \quad A_3B_0 = A_0B_3. \quad (4.9)$$

Podle rovnic (4.7), (4.8) a (4.9) se vypočtou stavitelné parametry regulátorů.

Metoda optimálního modulu nemůže zaručit stabilitu, proto se musí vždy následně kontrolovat.

4.2 Obecný lineární regulátor

V předchozí metodě se vycházelo z pevně dané struktury regulátoru, ale někdy je mnohem výhodnější použít regulátor ve tvaru poměru obecně dvou polynomů [1], [3], [7].

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_q z^{-q}}{1 + p_1 z^{-1} + \dots + p_p z^{-p}}. \quad (4.10)$$

Úkolem je určit parametry regulátoru. To následně umožní do syntézy zapracovat základní požadavky na chování uzavřeného regulačního obvodu, ale i další požadavky, které mohou optimalizovat přechodový děj podle vybraného kritéria. Metod syntézy existuje velké množství. Bude zde popsána jednoduchá metoda, kdy se požaduje konečný nejmenší možný počet kroků regulace, který se často označuje jako časově optimální řízení.

Princip je následující. Po určitém počtu kroků regulace k je regulační odchylka nulová.

Pro regulační odchylku platí

$$E(z) = (1 - G_{W/Y}(z)) W(z). \quad (4.11)$$

Pokud má být splněn požadavek nejmenšího počtu kroků regulace, pak musí být polynom $E(z)$ s konečným počtem členů. Označuje-li se stupeň polynomu $E(z)$ jako δe , potom počet kroků řízení je

$$k = \delta e + 1. \quad (4.12)$$

Předpokládá-li se, že Z-obraz žádané veličiny je ve tvaru $w(t) = 1$, jeho Z-obraz $W(z)$ je následující

$$W(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} = 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots \quad (4.13)$$

průběh regulované veličiny je vyjádřen posloupností

$$Y(z) = y(1T)z^{-1} + y(2T)z^{-2} + \dots + 1z^{-k_{min}} + 1z^{-(k_{min}+1)} + \dots \quad (4.14)$$

a akční veličiny určuje posloupnost

$$U(z) = u(0) + u(1T)z^{-1} + u(2T)z^{-2} + \dots + u(k_{min}T)z^{-k_{min}} + \\ + u(k_{min}T)z^{-(k_{min}+1)} + \dots \quad (4.15)$$

Dělením $Y(z)$ a $W(z)$ je dán vztah

$$\frac{Y(z)}{W(z)} = p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{k_{min}} z^{-k_{min}} = P(z). \quad (4.16)$$

Dělením $U(z)$ a $W(z)$ je získán vztah

$$\frac{U(z)}{W(z)} = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{min}} z^{-k_{min}} = Q(z). \quad (4.17)$$

Dále je nutné uvažovat Z-přenos regulované soustavy

$$G_s(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_{min}} z^{-k_{min}}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{k_{min}} z^{-k_{min}}} = \frac{B(z)}{A(z)}. \quad (4.18)$$

Dělením čitatele i jmenovatele obrazem $W(z)$ se získá rovnice

$$\begin{aligned} G_s(z) &= \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\frac{Y(z)}{W(z)}}{\frac{U(z)}{W(z)}} = \frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{p_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_{min}} z^{-k_{min}}}{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{min}} z^{-k_{min}}} = \\ &= \frac{\frac{p_1}{q_0} z^{-1} + \frac{p_2}{q_0} z^{-2} + \dots + \frac{p_{k_{min}}}{q_0} z^{-k_{min}}}{1 + \frac{q_1}{q_0} z^{-1} + \dots + \frac{q_{k_{min}}}{q_0} z^{-k_{min}}} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{k_{min}} z^{-k_{min}}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{k_{min}} z^{-k_{min}}}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Porovnáním koeficientu u jednotlivých mocnin z^{-i} z rovnice (4.19) jsou dány rovnice

$$q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{min}} b_i}, \quad (4.20)$$

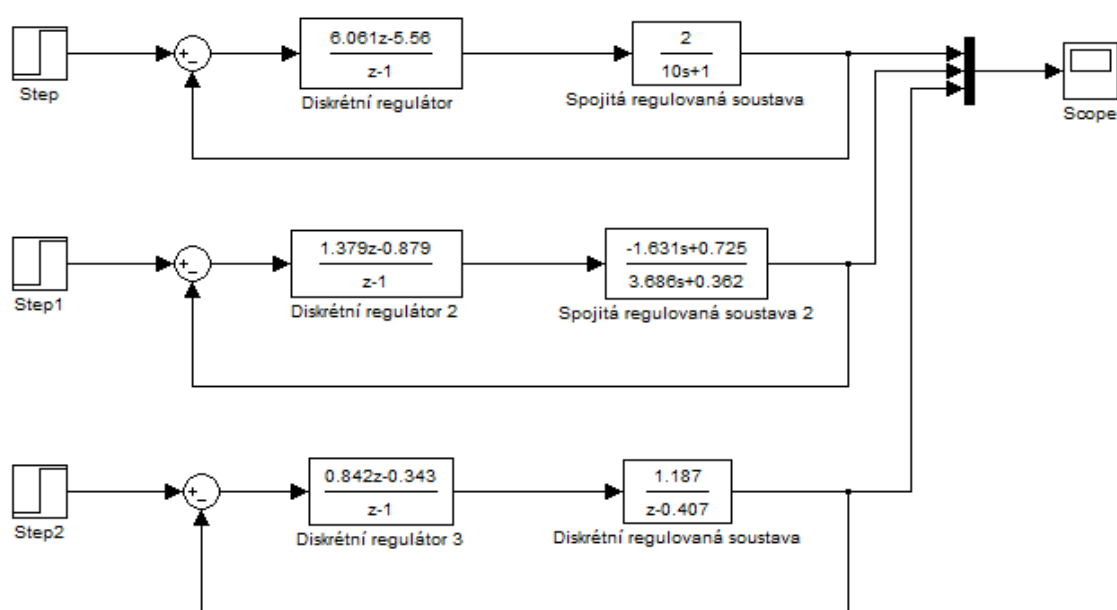
$$\begin{aligned} q_1 &= a_1 q_0 & p_1 &= b_1 q_0 \\ q_2 &= a_2 q_0 & p_2 &= b_2 q_0 \\ &\vdots & &\vdots \\ q_{k_{min}} &= a_{k_{min}} q_0 & p_{k_{min}} &= b_{k_{min}} q_0. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Výsledný Z-přenos regulátoru je

$$G_R(z) = \frac{1}{\frac{P(z)}{Q(z)}} \frac{P(z)}{1 - P(z)} = \frac{Q(z)}{1 - P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{k_{min}} z^{-k_{min}}}{1 - p_1 z^{-1} - p_2 z^{-2} - \dots - p_{k_{min}} z^{-k_{min}}}. \quad (4.22)$$

5 Aplikace na příkladech

Tato kapitola se bude zabývat výpočty a výsledky. Je zde zvoleno několik proporcionálních regulovaných soustav (5.1), (5.2) a (5.3). Protože se k určení vzorkovací periody používá 95 % ustálené hodnoty na přechodové charakteristice regulované soustavy, nebylo možno použít integrační soustavy. Na soustavy (5.1), (5.2) a (5.3) jsou aplikovány různé velikosti vzorkovacích period. Podle výpočtových postupů v kapitole 3, v závislosti na velikosti vzorkovací periody, byly vypočteny parametry regulátorů. Dále se určí relativní překmit κ a odečte se doba regulace t_r z přechodové charakteristiky [4]. Za dobu regulace t_r , je považován takový časový úsek, kdy trvale klesne odchylka regulované veličiny pod 5% ustálené hodnoty na přechodové charakteristice diskrétního regulačního obvodu. Výsledky jsou zpracovány do tabulek a následně zadány do modelu v prostředí Matlab-Simulink obr. 5.1.



Obr. 5.1 Simulační model

Soustavy byly pro zjednodušení označeny S1, S2 a S3.

Soustava S1:

$$G_s(s) = \frac{2}{10s + 1} \quad (5.1)$$

Soustava S2:

$$G_s(s) = \frac{2}{s + 1} \quad (5.2)$$

Soustava S3:

$$G_s(s) = \frac{5}{(4s + 1)(s + 1)} \quad (5.3)$$

5.1 Vzorový výpočet při malé vzorkovací periodě

Byla zde použita metoda optimálního modulu, která je popsána v kapitole 4.

Zadání:

Je dána regulovaná soustava a úkolem je určit PI (PS) regulátor.

$$G_s(s) = \frac{2}{10s + 1}$$

Řešení:

Nejprve se z přechodové charakteristiky regulované soustavy odečte hodnota T_{95} , která je 36,9[s] a potom se určí vzorkovací perioda $T \ll 1/6T_{95}$ $T = 0,9$ [s].

Přenos regulátoru PI

$$G_R(s) = \frac{r_0s + r_{-1}}{s}$$

Náhradní přenos regulátoru podle vztahu (3.1), (3.2)

$$G_{RC}(s) = \frac{r_0s + r_{-1}}{s} \frac{1}{1 + \frac{T}{2}s} = \frac{r_0s + r_{-1}}{0,45s^2 + s}$$

Přenos řízení je podle vztahu (3.3)

$$G_w(s) = \frac{G_{RC}(s)G_s(s)}{1 + G_{RC}(s)G_s(s)} = \frac{2r_0s + 2r_{-1}}{4,5s^3 + 10,45s^2 + (1 + 2r_0)s + 2r_{-1}}$$

a z něho koeficienty pro následující výpočet jsou

$$\begin{aligned} a_0 &= 2r_{-1} & b_0 &= 2r_{-1} \\ a_1 &= 1 + 2r_0 & b_1 &= 2r_0 \\ a_2 &= 10,45 & b_2 &= 0 \\ a_3 &= 4,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_0 &= a_0^2 = 4r_{-1}^2 \\ A_1 &= a_1^2 - 2a_0a_2 = 1 + 4r_0 + 4r_0^2 - 41,8r_{-1} \\ A_2 &= a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 = 100,203 - 18r_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_0 &= b_0^2 = 4r_{-1}^2 \\ B_1 &= b_1^2 - 2b_0b_2 = 4r_0^2 \\ B_2 &= b_2^2 - 2b_1b_3 + 2b_0b_4 = 0 \end{aligned}$$

Protože se jedná o PI regulátor, jsou dvě podmínkové rovnice

$$A_1 B_0 = A_0 B_1 \qquad A_2 B_0 = A_0 B_2$$

z nich se určí parametry r_0 a r_{-1}

$$r_0 = 5,56 \qquad r_{-1} = 0,557$$

$$T_I = \frac{r_0}{r_{-1}} = 9,981$$

Číslicový regulátor je možné určit zpětnou obdélníkovou metodou, kdy se PI regulátor převede na PS regulátor

$$G_R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = 5,56 \left(1 + \frac{1}{9,981 s} \right)$$

$$q_0 = r_0 \left(1 + \frac{T}{T_I} \right) = 5,56 \left(1 + \frac{0,9}{9,981} \right) = 6,061$$

$$q_1 = -r_0 = -5,56$$

Výsledný Z-přenos regulátoru je

$$G_R(z) = \frac{6,061 - 5,56z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

5.2 Vzorový výpočet při střední vzorkovací periodě

Byla zde použita metoda optimálního modulu, která je popsána v kapitole 4.

Zadání:

Je dána regulovaná soustava a úkolem je určit PI (PS) regulátor.

$$G_s(s) = \frac{2}{10s + 1}$$

Řešení:

Opět se zde používá stejná regulovaná soustava. Hodnota T_{95} je stejně jako v předchozím příkladu (podkapitola 5.1) 36,9[s]. Rovnou se může určit vzorkovací perioda $T < 1/6T_{95}$ $T = 4,5$ [s].

Stanoví se Z-přenos náhradní regulované soustavy $G_{SC}(z)$ podle vztahu (3.4), který se upraví pomocí rozkladu na parciální zlomky. Následně se pomocí slovníku Z-transformace určí Z-obraz. Postupným dosazením a matematickými úpravami je získán náhradní diskretní přenos regulované soustavy.

$$\begin{aligned} G_{SC}(z) &= (1 - z^{-1})Z \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{G_s(s)}{s} \right\} \right\} \Big|_{t=kT} = \\ &= \frac{z-1}{z} \left[2 \frac{z}{z-1} - 2 \frac{z}{z - e^{-0,1T}} \right] = \frac{0,725}{z - 0,638} \end{aligned}$$

Převod z oblasti komplexní proměnné z do oblasti komplexně proměnné s pomocí vztahu (3.5)

$$\begin{aligned} G_{SC}(s) &= G_{SC}(z) \Big|_{z = \frac{1 + \frac{T}{2}s}{1 - \frac{T}{2}s}} \\ G_{SC}(s) &= \frac{0,725}{\frac{1 + \frac{T}{2}s}{1 - \frac{T}{2}s} - 0,638} = \frac{-1,631s + 0,725}{3,686s + 0,362} \end{aligned}$$

Zvolením PI regulátoru je přenos řízení podle vztahu (3.6)

$$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_{SC}(s)}{1 + G_R(s)G_{SC}(s)} = \frac{-1,631r_0s^2 + (0,725r_0 - 1,631r_{-1})s + 0,725r_{-1}}{(3,686 - 1,631r_0)s^2 + (0,362 + 0,725r_0 - 1,631r_{-1})s + 0,725r_{-1}}$$

Pomocí metody optimálního modulu jsou určeny následující koeficienty

$$A_0 = a_0^2 = 0,526r_{-1}^2$$

$$A_1 = a_1^2 - 2a_0a_2 = 2,66r_{-1}^2 + 0,526r_0^2 - 6,525r_{-1} + 0,524r_0 + 0,131$$

$$A_2 = a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 = 2,66r_0^2 - 12,024r_0 + 13,587$$

$$B_0 = b_0^2 = 0,526r_{-1}^2$$

$$B_1 = b_1^2 - 2b_0b_2 = 0,526r_0^2 + 2,66r_{-1}^2$$

$$B_2 = b_2^2 - 2b_1b_3 + 2b_0b_4 = 2,66r_0^2$$

Pro PI regulátor platí dvě podmínkové rovnice

$$A_1B_0 = A_0B_1$$

$$A_2B_0 = A_0B_2$$

Do rovnic je dosazeno a následně jsou vypočteny parametry r_0 a r_{-1} .

$$r_0 = 1,129 \quad r_{-1} = 0,111$$

$$T_I = \frac{r_0}{r_{-1}} = 10,175$$

$$G_R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = \frac{11,488s + 1,129}{10,175s}$$

Zpětnou diskretizací je určen výsledný Z-přenos regulátoru podle vztahu (3.7)

$$G_R(z) = G_R(s) \Big|_{s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}}$$

$$G_R(z) = \frac{11,488 \left(\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \right) + 1,129}{10,175 \left(\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \right)} = \frac{1,379 - 0,879z^{-1}}{1 - z^{-1}}.$$

5.3 Vzorový výpočet při velké vzorkovací periodě

Byl zde použit obecný lineární regulátor, který je popsán v kapitole 4.

Zadání:

Je dána regulovaná soustava a úkolem je určit obecný lineární regulátor.

$$G_s(s) = \frac{2}{10s + 1}$$

Řešení:

Protože se zde použije stejná regulovaná soustava jako v předchozích dvou příkladech (podkapitola 5.1, 5.2), hodnota T_{95} je opět 36,9[s] a může se přímo určit vzorkovací perioda $T > 1/6T_{95}$ $T = 9$ [s].

Rovněž jako v předchozím příkladu se stanoví podle vztahu (3.4) Z-přenos náhradní regulované soustavy $G_{SC}(z)$, který se následně upraví pomocí rozkladu na parciální zlomky. Pomocí slovníku Z-transformace je určen Z-obraz. Postupným dosazením a matematickými úpravami je získán náhradní Z-přenos regulované soustavy.

$$\begin{aligned} G_{SC}(z) &= (1 - z^{-1})Z \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{G_s(s)}{s} \right\} \right\} \Big|_{t=kT} = \\ &= \frac{z-1}{z} \left[2 \frac{z}{z-1} - 2 \frac{z}{z - e^{-0,1T}} \right] = \frac{1,187}{z - 0,407} \end{aligned}$$

Výsledný Z-přenos $G_{SC}(z)$ je převeden na tvar mocniny se zápornými koeficienty

$$G_{SC}(z) = \frac{1,187z^{-1}}{1 - 0,407z^{-1}}$$

Počet kroků regulace k_{min} je roven 1. Podle rovnice (4.20) se určí

$$q_0 = u(0) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k_{min}} b_i} = \frac{1}{1,187} = 0,842$$

Dle (4.21) se vypočítají parametry polynomů $Q(z)$ a $P(z)$

$$\begin{aligned} q_1 &= a_1 q_0 = -0,407 \cdot 0,842 = -0,343 \\ p_1 &= b_1 q_0 = 1,187 \cdot 0,842 = 1 \end{aligned}$$

Výsledný Z-přenos regulátoru je

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - p_1 z^{-1}} = \frac{0,842 - 0,343 z^{-1}}{1 - z^{-1}}.$$

5.4 Výsledky přenosů regulátorů a přechodové charakteristiky

U soustav S1, S2 a S3 byly vypočteny parametry regulátorů dle zvolených metod, jak bylo uvedeno v kapitole 4. Dále se určila doba regulace t_r a relativní překmit κ . Vypočtené hodnoty se zadaly do programu Matlab-Simulink. Ze všech výsledků byly vybrány pouze některé přechodové charakteristiky a následně vykresleny.

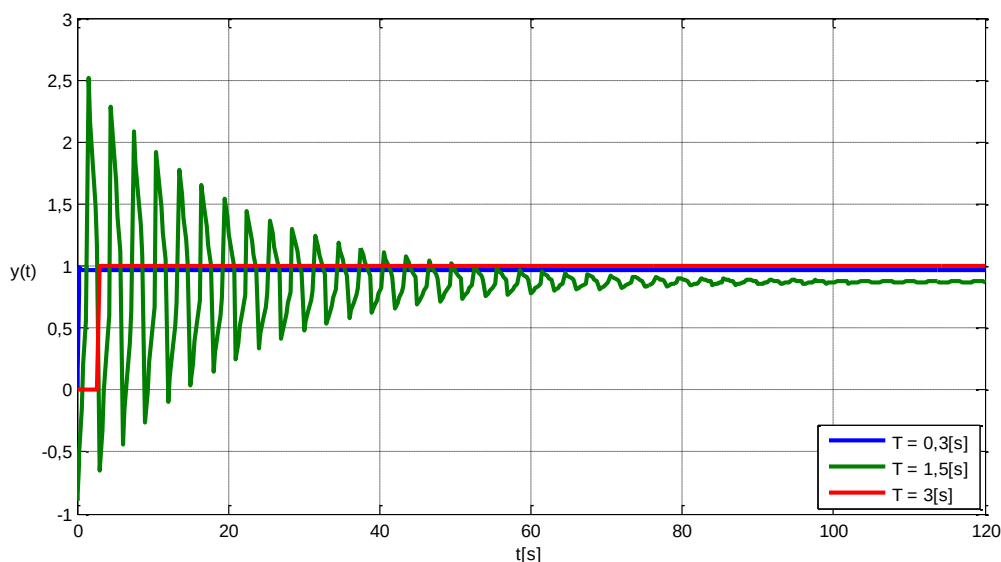
5.4.1 Soustava S1

Pro soustavu S1 byly vypočteny parametry pro regulátory P, S, PS a obecný lineární regulátor. U soustavy S1 měl obecný lineární regulátor počet kroků regulace rovno jedné a tudíž byl vždy uveden stejný tvar regulátoru.

Tab. 5.1 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S1 s použitím P regulátoru a obecného lineárního regulátoru

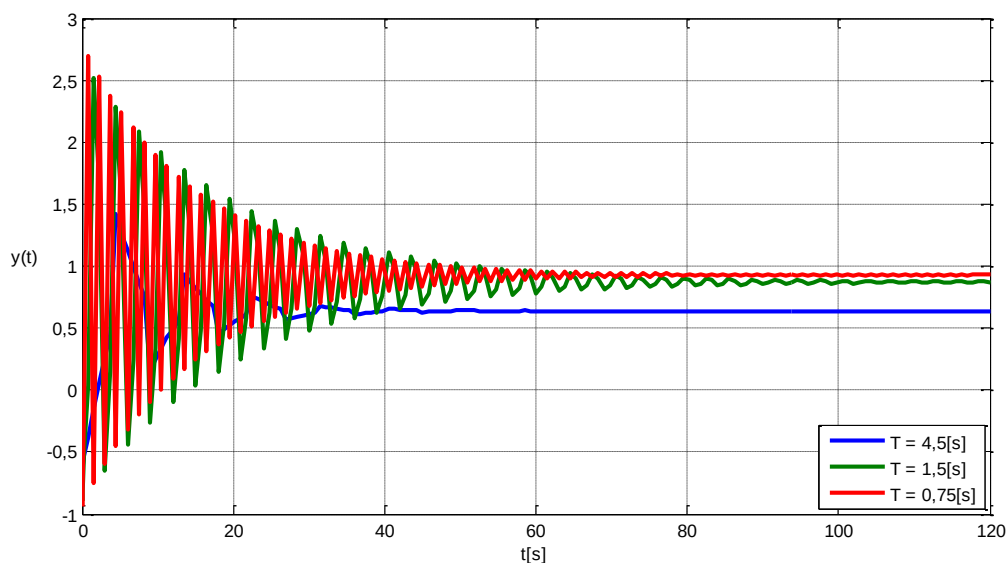
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T \ll 1/6 * T_{95}$	0,9	$G_R(z) = 5,567$	0,044	0,9
$T < 1/6 * T_{95}$	4,5	$G_R(z) = 0,88$	1,232	32
$T > 1/6 * T_{95}$	9	$G_R(z) = \frac{0,842 - 0,343z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	9
$T \ll 1/15 * T_{95}$	0,3	$G_R(z) = 16,671$	0,014	0,3
$T < 1/15 * T_{95}$	1,5	$G_R(z) = 3,389$	1,881	74
$T > 1/15 * T_{95}$	3	$G_R(z) = \frac{1,931 - 1,431z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	3
$T \ll T_1/10$	0,15	$G_R(z) = 33,335$	0,008	0,15
$T < T_1/10$	0,75	$G_R(z) = 6,465$	1,908	56
$T > T_1/10$	1,5	$G_R(z) = \frac{3,584 - 3,086z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	1,5

Na obr. 5.1 jsou zobrazeny přechodové charakteristiky P regulátoru a obecného lineárního regulátoru, které jsou uvedeny v tab. 5.1. U malé vzorkovací periody $T = 0,3[s]$, vzniká nepřesná regulace, která má nejkratší dobu. Střední vzorkovací perioda $T = 1,5[s]$ má velký relativní překmit a nepřesnou regulaci s nejdelší dobou regulace. Velká vzorkovací perioda $T = 3[s]$ má přesnou regulaci a nedochází zde k relativnímu překmitu. Je proto nejlepším výsledkem regulace.



Obr. 5.1 Přebíhové charakteristiky P regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy S1 za podmínky $1/15 \cdot T_{95}$

Na obr. 5.2 je zobrazeno porovnání přechodových charakteristik středních vzorkovacích period P regulátorů, které jsou uvedeny v tabulce 5.1. U všech vzorkovacích period vzniká nepřesná regulace. Vzorkovací perioda $T = 4,5[s]$ má nejmenší relativní překmit a nejkratší dobu regulace, současně je nejlepším výsledkem. Vzorkovací perioda $T = 1,5[s]$ má nejdelší dobu regulace a větší relativní překmit. Vzorkovací perioda $T = 0,75[s]$ má největší relativní překmit.

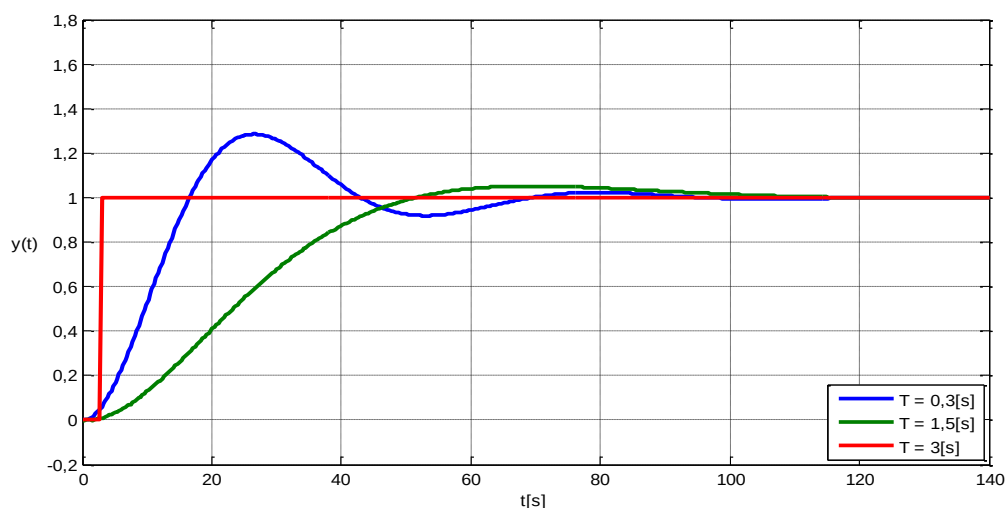


Obr. 5.2 Přebíhové charakteristiky P regulátoru soustavy S1 pro střední vzorkovací periody

Tab. 5.2 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S1 s použitím S regulátoru a obecného lineárního regulátoru

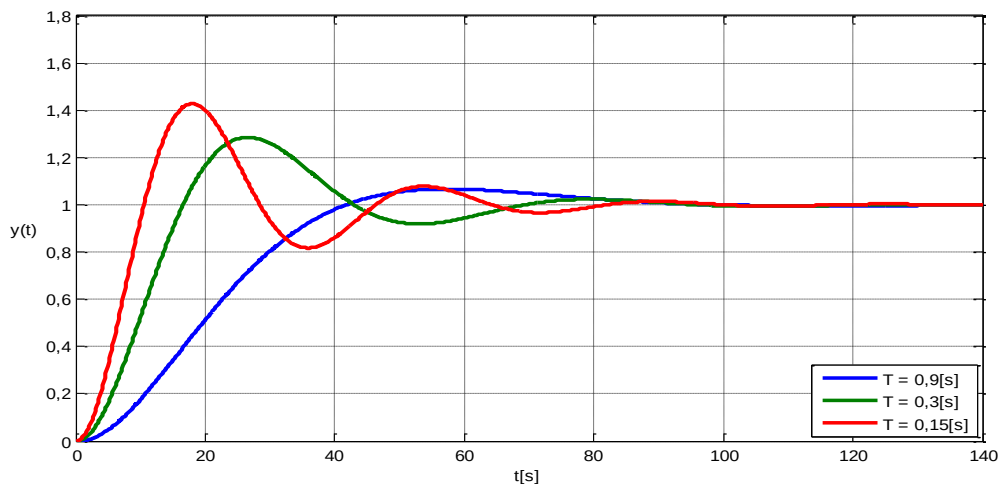
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T \ll 1/6 * T_{95}$	0,9	$G_R(z) = \frac{0,0239}{1 - z^{-1}}$	0,067	70
$T < 1/6 * T_{95}$	4,5	$G_R(z) = \frac{0,045 - 0,045z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,089	86
$T > 1/6 * T_{95}$	9	$G_R(z) = \frac{0,842 - 0,343z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	9
$T \ll 1/15 * T_{95}$	0,3	$G_R(z) = \frac{0,0246}{1 - z^{-1}}$	0,285	61
$T < 1/15 * T_{95}$	1,5	$G_R(z) = \frac{0,016 - 0,016z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,052	74
$T > 1/15 * T_{95}$	3	$G_R(z) = \frac{1,931 - 1,431z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	3
$T \ll T_1/10$	0,15	$G_R(z) = \frac{0,0248}{1 - z^{-1}}$	0,427	59
$T < T_1/10$	0,75	$G_R(z) = \frac{0,009 - 0,009z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,049	65
$T > T_1/10$	1,5	$G_R(z) = \frac{3,584 - 3,086z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	1,5

Z přechodových charakteristik S regulátoru a obecného lineárního regulátoru na obr. 5.3 je vidět, že všechny regulace jsou přesné. Malá vzorkovací perioda $T = 0,3[s]$ má největší relativní překmit. Střední vzorkovací perioda $T = 1,5[s]$ má malý relativní překmit a nejdelší dobu regulace. Velká vzorkovací perioda $T = 3[s]$ nemá relativní překmit, má nejkratší dobu regulace a je nejlepším výsledkem regulace.



Obr. 5.3 Přechodové charakteristiky S regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy S1 za podmínky $1/15 * T_{95}$

Z porovnávání přechodových charakteristik malých vzorkovacích period S regulátoru na obr. 5.4 je zřejmé, že všechny regulace jsou přesné a nejlepšího výsledku regulace dosahuje vzorkovací perioda $T = 0,9[s]$, která má nejmenší relativní překmit a nejdelší dobu regulace. Se snižující se vzorkovací periodou se zvětšuje relativní překmit a zkracuje doba regulace.

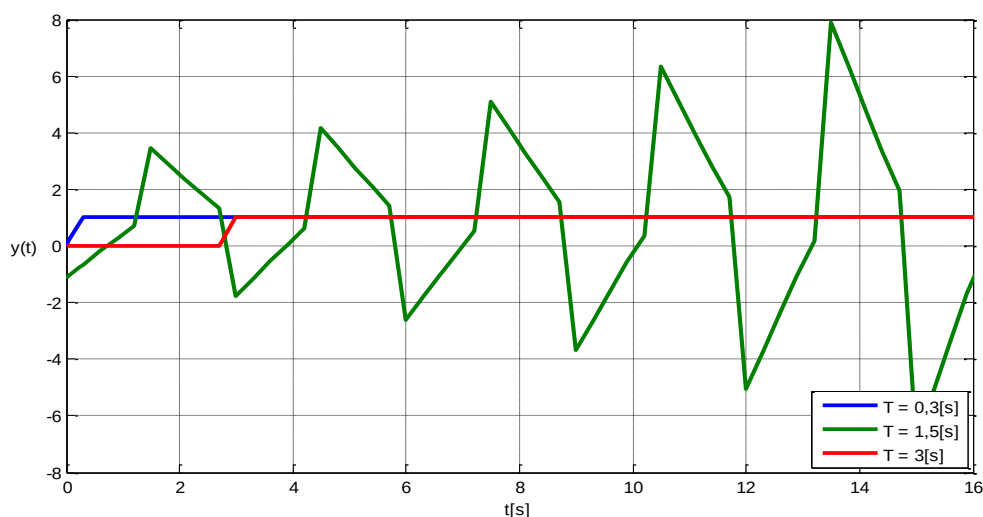


Obr. 5.4 Přechodové charakteristiky S regulátoru soustavy $S1$ pro malé vzorkovací periody

Tab. 5.3 Výsledné přenosy regulátorů soustavy $S1$ s použitím PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru

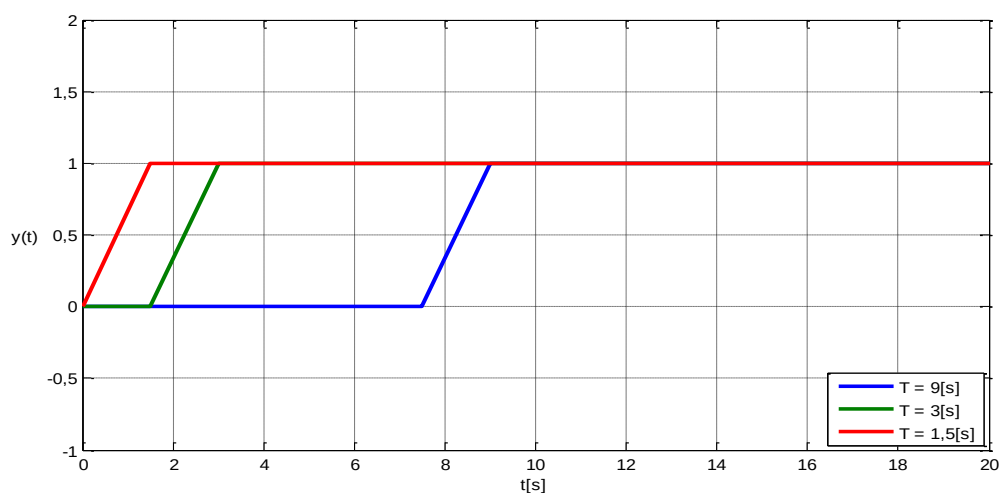
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T \ll 1/6 * T_{95}$	0,9	$G_R(z) = \frac{6,061 - 5,56z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,043	0,9
$T < 1/6 * T_{95}$	4,5	$G_R(z) = \frac{1,379 - 0,879z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/6 * T_{95}$	9	$G_R(z) = \frac{0,842 - 0,343z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	9
$T \ll 1/15 * T_{95}$	0,3	$G_R(z) = \frac{17,168 - 16,668z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,015	0,3
$T < 1/15 * T_{95}$	1,5	$G_R(z) = \frac{3,82 - 3,322z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/15 * T_{95}$	3	$G_R(z) = \frac{1,931 - 1,431z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	3
$T \ll T_1/10$	0,15	$G_R(z) = \frac{33,86 - 33,36z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,008	0,15
$T < T_1/10$	0,75	$G_R(z) = \frac{6,95 - 6,449z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > T_1/10$	1,5	$G_R(z) = \frac{3,584 - 3,086z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	1,5

Z obr. 5.5 vyplývá, že malá vzorkovací perioda $T = 0,3[s]$ má přesnou regulaci, malý relativní překmit, nejkratší dobu regulace a je nejlepším výsledkem regulace. Střední vzorkovací perioda $T = 1,5[s]$ je nestabilní a velká vzorkovací perioda $T = 3[s]$ má přesnou regulaci bez relativního překmitu.



Obr. 5.5 Přechodové charakteristiky PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy S1 za podmínky $1/15 \cdot T_{95}$

Obr. 5.6 dokazuje, že při porovnávání velkých vzorkovacích period obecného lineárního regulátoru jsou všechny regulace přesné a nedochází k žádnému relativnímu překmitu. Vzorkovací perioda $T = 1,5[s]$ má nejkratší dobu regulace a je tudíž nejlepším výsledkem regulace. Se zvětšující se vzorkovací periodou se prodlužuje doba regulace.



Obr. 5.6 Přechodové charakteristiky obecného lineárního regulátoru soustavy S1, pro velké vzorkovací periody

Zhodnocení

Při porovnávání malých, středních a velkých vzorkovacích period viz tab. 5.1 považují za nejlepší výsledek regulace velké vzorkovací periody. Nedocházelo zde k nepřesnostem regulace ani k relativním překmitům. Snižováním velké vzorkovací periody se zkracovala doba regulace. U středních vzorkovacích period docházelo k nepřesným regulacím a se snižováním vzorkovací periody se zvětšoval relativní překmit a prodlužovala se doba regulace. Malé vzorkovací periody měly také nepřesné regulace. Se snižováním vzorkovací periody klesal relativní překmit i doba regulace.

Užitím S regulátoru a obecného lineárního regulátoru viz tab. 5.2 bych hodnotil opět velké vzorkovací periody jako nejlepší výsledek regulace. Střední vzorkovací periody měly nejdelší doby regulace s malými relativními překmity a se snižováním vzorkovací periody se zmenšoval relativní překmit i doba regulace. Malé vzorkovací periody měly největší relativní překmity a se snižováním vzorkovací periody tento překmit vzrůstal a současně se zkracovala doba regulace.

Srovnáním vzorkovacích period PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru v tab. 5.3 docházelo u malých vzorkovacích period k malým relativním překmitům a nejkratším dobám regulace. Se snižováním vzorkovací periody klesal relativní překmit i doba regulace. Střední vzorkovací periody byly vždy nestabilní a velké vzorkovací periody měly nejdelší doby regulace bez relativních překmitů.

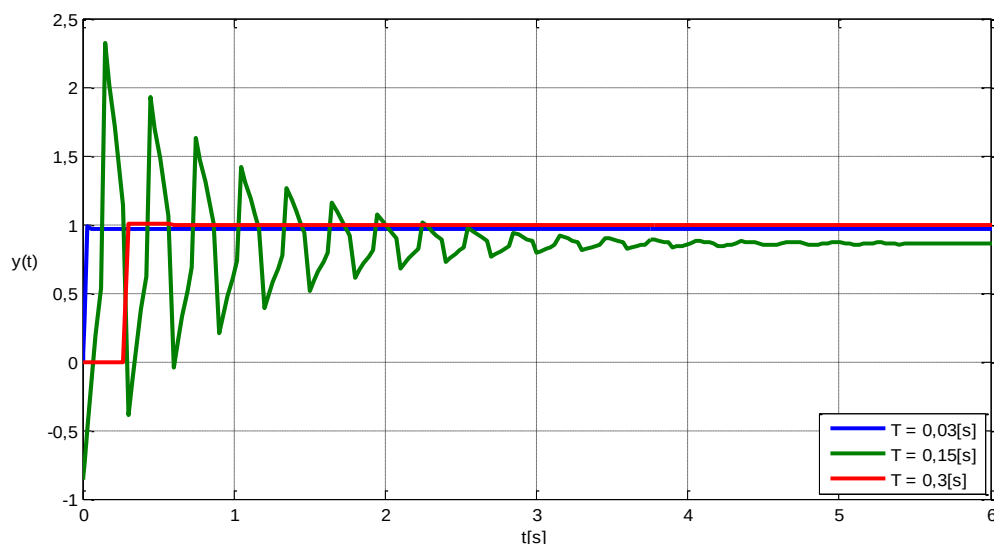
5.4.2 Soustava S2

Pro soustavu S2 byly vypočteny parametry pro regulátory P, S, PS a obecný lineární regulátor. Obecný lineární regulátor měl u soustavy S2 počet kroků regulace rovno jedné a tudíž byl vždy uveden stejný tvar regulátoru.

Tab. 5.4 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S2 s použitím P regulátoru a obecného lineárního regulátoru

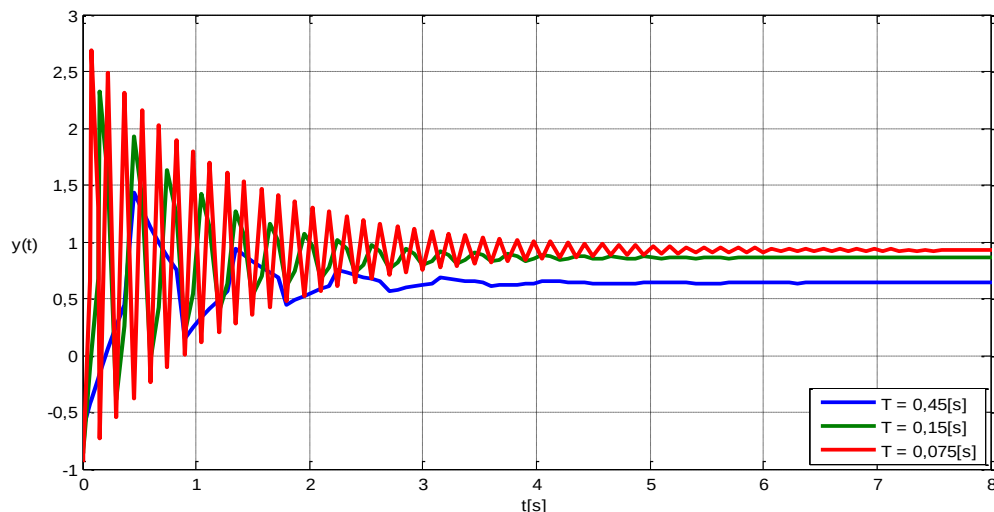
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T < 1/6 * T_{95}$	0,09	$G_R(z) = 5,567$	0,044	0,09
$T < 1/6 * T_{95}$	0,45	$G_R(z) = 0,883$	0,477	3,2
$T > 1/6 * T_{95}$	0,9	$G_R(z) = \frac{0,842 - 0,343z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,9
$T < 1/15 * T_{95}$	0,03	$G_R(z) = 16,661$	0,015	0,03
$T < 1/15 * T_{95}$	0,15	$G_R(z) = 3,084$	1,704	3,5
$T > 1/15 * T_{95}$	0,3	$G_R(z) = \frac{1,931 - 1,431z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,3
$T < T_1/10$	0,015	$G_R(z) = 33,333$	0,007	0,015
$T < T_1/10$	0,075	$G_R(z) = 6,4$	1,855	3,7
$T > T_1/10$	0,15	$G_R(z) = \frac{3,584 - 3,086z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,15

Z obr. 5.7 vyplývá, že malá vzorkovací perioda $T = 0,03[s]$ má nepřesnou regulaci malý relativní překmit a nejmenší dobu regulace. Střední vzorkovací perioda $T = 0,15[s]$ má nepřesnou regulaci, velký relativní překmit a nejdelší dobu regulace. Velká vzorkovací perioda $T = 0,3[s]$, při níž byl použit obecný lineární regulátor, má přesnou regulaci a je bez relativního překmitu. Z hlediska přesnosti regulace lze považovat za nejlepší výsledek právě velkou vzorkovací periodu.



Obr. 5.7 Přechodové charakteristiky P regulátoru soustavy a obecného lineárního regulátoru $S2$, za podmínky $1/15 \cdot T_{95}$

Obr. 5.8 dokazuje, že při porovnávání středních vzorkovacích period P regulátoru má vzorkovací perioda $T = 0,45[s]$ nejmenší relativní překmit a nejkratší dobu regulace a je nejlepším výsledkem regulace. Snižováním velikosti vzorkovací periody narůstá relativní překmit a prodlužuje se doba regulace. U všech vzorkovacích period dochází k nepřesné regulaci.

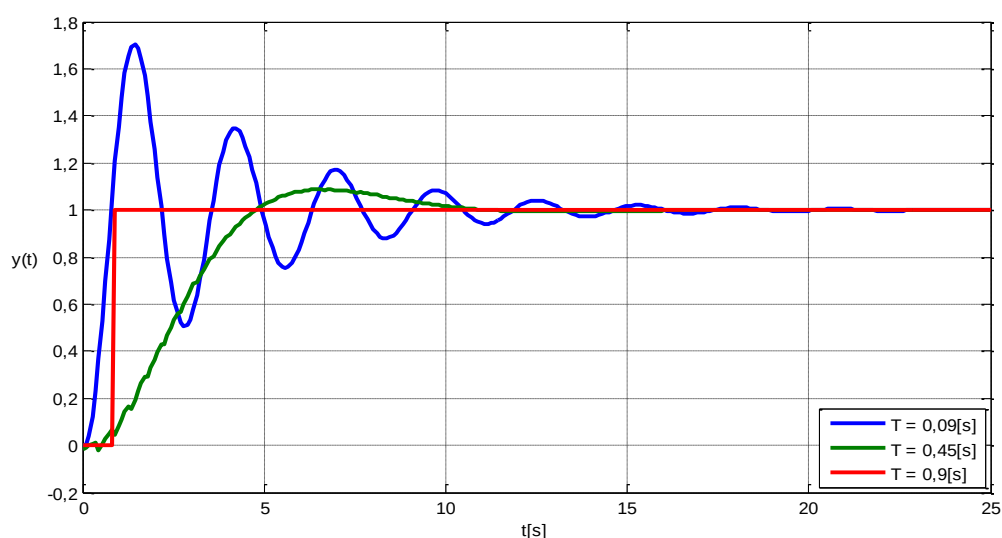


Obr. 5.8 Přechodové charakteristiky P regulátoru soustavy $S2$ pro střední vzorkovací periody

Tab. 5.5 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S2 s použitím S regulátoru a obecného lineárního regulátoru

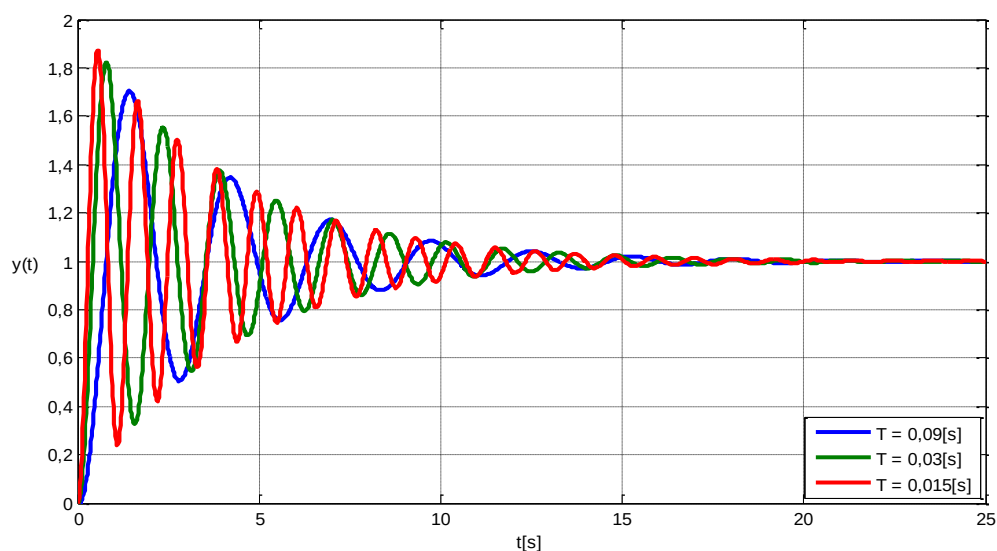
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T < 1/6 * T_{95}$	0,09	$G_R(z) = \frac{0,239}{1 - z^{-1}}$	0,706	11,4
$T < 1/6 * T_{95}$	0,45	$G_R(z) = \frac{0,045 - 0,045z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,089	8,5
$T > 1/6 * T_{95}$	0,9	$G_R(z) = \frac{0,842 - 0,343z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,9
$T < 1/15 * T_{95}$	0,03	$G_R(z) = \frac{0,246}{1 - z^{-1}}$	0,822	11,8
$T < 1/15 * T_{95}$	0,15	$G_R(z) = \frac{0,017 - 0,017z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,052	7
$T > 1/15 * T_{95}$	0,3	$G_R(z) = \frac{1,931 - 1,431z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,3
$T < T_1/10$	0,015	$G_R(z) = \frac{0,248}{1 - z^{-1}}$	0,872	11,6
$T < T_1/10$	0,075	$G_R(z) = \frac{0,01 - 0,01z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,067	6,9
$T > T_1/10$	0,15	$G_R(z) = \frac{3,584 - 3,086z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,15

Na obr. 5.9 jsou zobrazeny přechodové charakteristiky S regulátoru a obecného lineárního regulátoru, které jsou uvedeny v tab. 5.4. U všech vzorkovacích period vzniká přesná regulace. Malá vzorkovací perioda $T = 0,09[s]$ má velký relativní překmit a nejdelší dobu regulace. Střední vzorkovací perioda $T = 0,45[s]$ má menší relativní překmit a velká vzorkovací perioda $T = 0,9[s]$ má zaručeně nejlepší průběh, protože zde nedochází k relativnímu překmitu a má nejkratší dobu regulace.



Obr. 5.9 Přechodové charakteristiky S regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy $S2$, za podmínky $1/6 \cdot T_{95}$

Obr. 5.10 dokazuje, že při porovnávání malých vzorkovacích period S regulátoru má vzorkovací perioda $T = 0,09[s]$ nejlepší průběh regulace s nejmenším relativním překmitem a nejkratší dobou regulace. U žádné vzorkovací periody nevzniká nepřesnost regulace a se snižující se vzorkovací periodou vzniká větší relativní překmit.

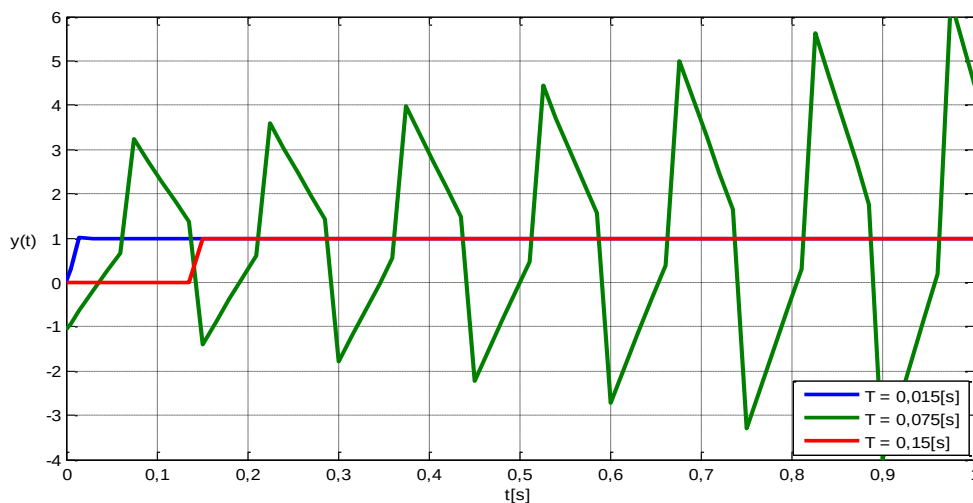


Obr. 5.10 Přechodové charakteristiky S regulátoru soustavy $S2$ pro malé vzorkovací periody

Tab. 5.6 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S2 s použitím PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru

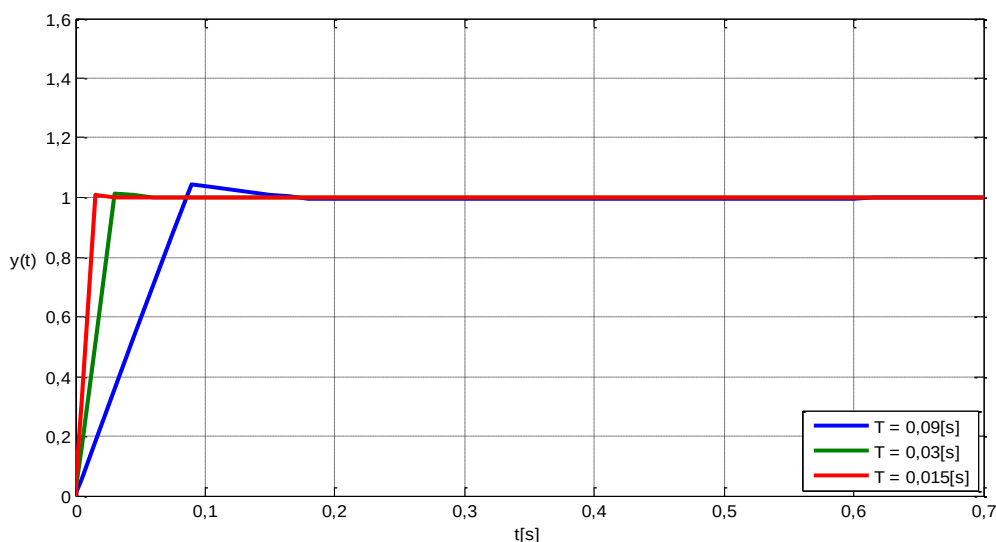
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T < 1/6 * T_{95}$	0,09	$G_R(z) = \frac{6,068 - 5,567z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,045	0,09
$T < 1/6 * T_{95}$	0,45	$G_R(z) = \frac{1,394 - 0,89z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/6 * T_{95}$	0,9	$G_R(z) = \frac{0,842 - 0,343z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,9
$T < 1/15 * T_{95}$	0,03	$G_R(z) = \frac{17,166 - 16,666z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,015	0,03
$T < 1/15 * T_{95}$	0,15	$G_R(z) = \frac{3,655 - 3,147z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/15 * T_{95}$	0,3	$G_R(z) = \frac{1,931 - 1,431z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,3
$T < T_1/10$	0,015	$G_R(z) = \frac{33,834 - 33,334z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,008	0,015
$T < T_1/10$	0,075	$G_R(z) = \frac{6,893 - 6,397z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > T_1/10$	0,15	$G_R(z) = \frac{3,584 - 3,086z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0	0,15

Z obr. 5.11 vyplývá, že malá vzorkovací perioda $T = 0,015[s]$ má přesnou regulaci s malým relativním přeskmitem, krátkou dobou regulace a zároveň je nejlepším výsledkem. Střední vzorkovací perioda $T = 0,075[s]$ je nestabilní. Velká vzorkovací perioda má přesnou regulaci bez relativního přeskmitu avšak delší dobou regulace.



Obr. 5.11 Přejídné charakteristiky PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy S2 za podmínky $T_1/10$

Z obr. 5.12 je patrné, že při porovnávání malých vzorkovacích period PS regulátoru nedochází k nepřesnostem regulace. Vzorkovací perioda $T = 0,09[s]$ má největší relativní překmit a nejdelší dobu regulace. Při zmenšování vzorkovací periody se snižuje relativní překmit i doba regulace. Nejlepšího výsledku regulace dosahuje perioda $T = 0,015[s]$.



Obr. 5.12 Přechodové charakteristiky PS regulátoru soustavy S2 pro malé vzorkovací periody

Zhodnocení

Porovnáváním vzorkovacích period v tab. 5.4 považuji za nejlepší výsledek regulace opět velké vzorkovací periody. Nedocházelo k nepřesným regulacím ani k relativním překmitům. Se snižováním vzorkovací periody se zkracovala i doba regulace. U středních vzorkovacích period docházelo k nepřesným regulacím a se snižováním vzorkovací periody se zvětšoval relativní překmit a prodlužovala se doba regulace. Malé vzorkovací periody měly také nepřesné regulace. Se snižováním vzorkovací periody klesal relativní překmit i doba regulace.

Při použití S regulátoru a obecného lineárního regulátoru viz tab. 5.5 hodnotím jako nejlepší výsledek regulace opět velké vzorkovací periody. Střední vzorkovací periody měly malé relativní překmity, přičemž se snižováním vzorkovací periody klesal relativní překmit i doba regulace. Malé vzorkovací periody měly největší relativní překmity a doby regulace. Snižováním vzorkovací periody tento překmit vzrůstal a prodlužovala se doba regulace.

Srovnáním vzorkovacích period PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru v tab. 5.6 docházelo u malých vzorkovacích period k malým relativním překmitům a nejkratším dobám regulace. Se snižováním vzorkovací periody se zmenšoval relativní překmit i doba regulace. Střední vzorkovací periody byly vždy nestabilní a velké vzorkovací periody měly nejdelší doby regulace bez relativních překmitů.

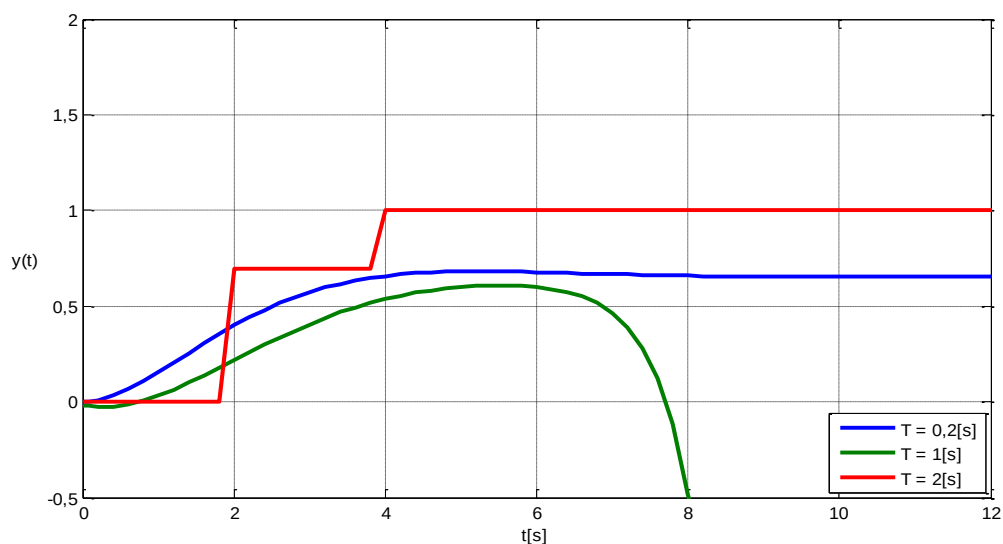
5.4.3 Soustava S3

U soustavy S3 byly vypočteny parametry pro regulátory P, S, PS, PSD a obecný lineární regulátor. Protože soustava S3 byla proporcionální soustava druhého řádu, obecný lineární regulátor měl počet kroků regulace rovno dvěma.

Tab. 5.7 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S3 s použitím P regulátoru a obecného lineárního regulátoru

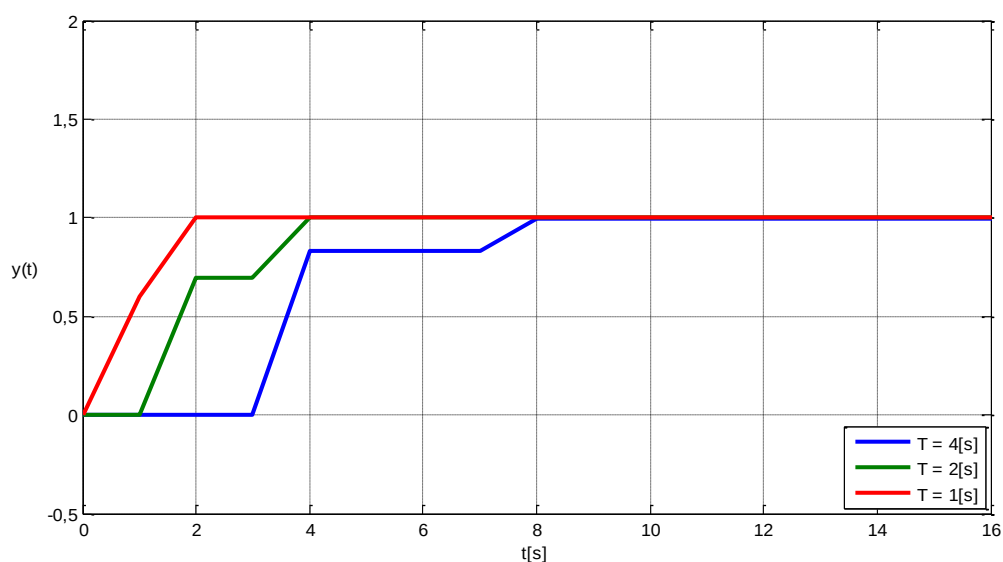
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T < 1/6 * T_{95}$	0,4	$G_R(z) = 0,341$	0,044	3,6
$T < 1/6 * T_{95}$	2	$G_R(z) = 0,188$	-	-
$T > 1/6 * T_{95}$	4	$G_R(z) = \frac{0,322 - 0,125z^{-1} + 0,002z^{-2}}{1 - 0,83z^{-1} - 0,169z^{-2}}$	0	8
$T < 1/4 * \sum \tau_i$	0,2	$G_R(z) = 0,378$	0,043	5,2
$T < 1/4 * \sum \tau_i$	1	$G_R(z) = 0,258$	-	-
$T > 1/4 * \sum \tau_i$	2	$G_R(z) = \frac{0,588 - 0,436z^{-1} + 0,048z^{-2}}{1 - 0,694z^{-1} - 0,305z^{-2}}$	0	4
$T < 1/15 * T_{95}$	0,1	$G_R(z) = 0,4$	0,043	3,4
$T < 1/15 * T_{95}$	0,5	$G_R(z) = 1,192$	-	-
$T > 1/15 * T_{95}$	1	$G_R(z) = \frac{1,429 - 1,639z^{-1} + 0,41z^{-2}}{1 - 0,603z^{-1} - 0,397z^{-2}}$	0	2

Z obr. 5.13 vyplývá, že malá vzorkovací perioda $T = 0,2[s]$ má nejdelší dobu regulace s malým relativním překmitem a nepřesnou regulací. Střední vzorkovací perioda $T = 1[s]$ je nestabilní. Velká vzorkovací perioda $T = 2[s]$ je přesná, bez relativního překmitu a s nejkratší dobou regulace. Zároveň je nejlepším výsledkem regulace.



Obr. 5.13 Přejchodové charakteristiky P regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy $S3$, za podmínky $1/4 \cdot \sum \tau_i$

Obr. 5.14 dokazuje, že porovnáváním velkých vzorkovacích period, kde je použit obecný lineární regulátor, dochází k přesným regulacím bez relativního překmitu. Nejlepším výsledkem regulace je vzorkovací perioda $T = 1[s]$, která má nejkratší dobu regulace. Se zvyšující se vzorkovací periodou se prodlužuje doba regulace.

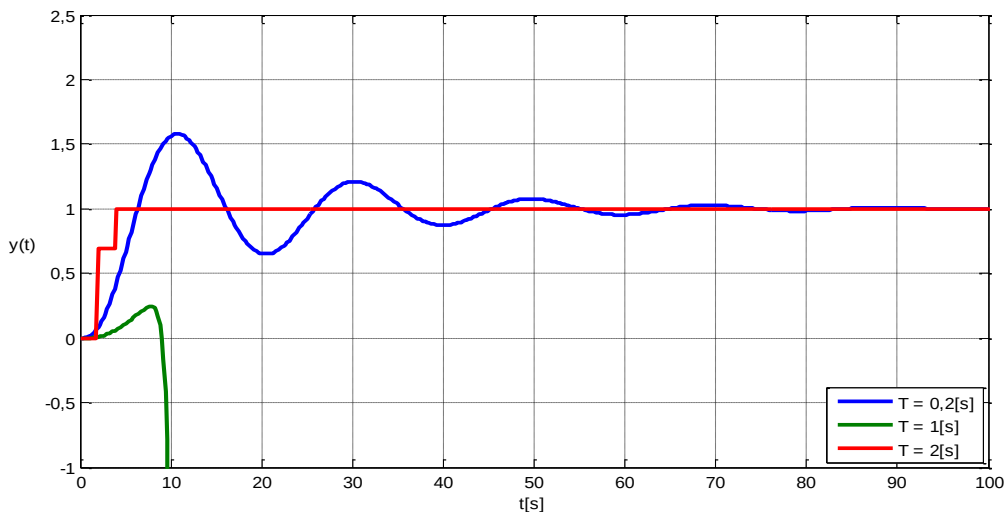


Obr. 5.14 Přejchodové charakteristiky obecného lineárního regulátoru soustavy $S3$ pro velké vzorkovací periody

Tab. 5.8 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S3 s použití S regulátoru a obecného lineárního regulátoru

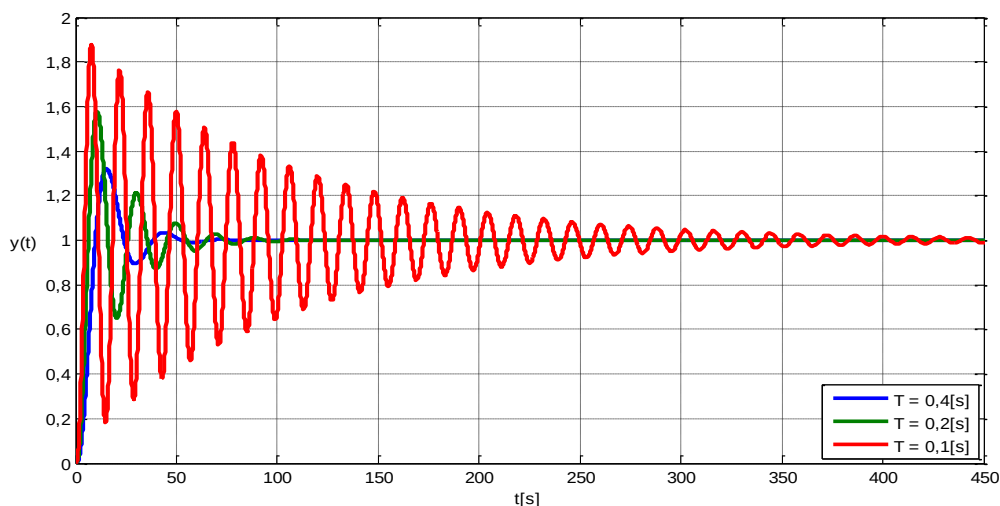
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T \ll 1/6 * T_{95}$	0,4	$G_R(z) = \frac{0,0192}{1 - z^{-1}}$	0,321	35
$T < 1/6 * T_{95}$	2	$G_R(z) = \frac{0,017 - 0,017z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/6 * T_{95}$	4	$G_R(z) = \frac{0,322 - 0,125z^{-1} + 0,002z^{-2}}{1 - 0,83z^{-1} - 0,169z^{-2}}$	0	8
$T \ll 1/4 * \sum \tau_i$	0,2	$G_R(z) = \frac{0,0196}{1 - z^{-1}}$	0,58	53
$T < 1/4 * \sum \tau_i$	1	$G_R(z) = \frac{0,009 - 0,009z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/4 * \sum \tau_i$	2	$G_R(z) = \frac{0,588 - 0,436z^{-1} + 0,048z^{-2}}{1 - 0,694z^{-1} - 0,305z^{-2}}$	0	4
$T \ll 1/15 * T_{95}$	0,1	$G_R(z) = \frac{0,0198}{1 - z^{-1}}$	0,876	295
$T < 1/15 * T_{95}$	0,5	$G_R(z) = \frac{0,003 - 0,003z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/15 * T_{95}$	1	$G_R(z) = \frac{1,429 - 1,639z^{-1} + 0,41z^{-2}}{1 - 0,603z^{-1} - 0,397z^{-2}}$	0	2

Obr. 5.15 dokazuje, že malá vzorkovací perioda $T = 0,2[s]$ má přesnou regulaci a velký rozkmit s nejdelší dobou regulace. Střední vzorkovací perioda $T = 1[s]$ je nestabilní a velká vzorkovací perioda $T = 2[s]$ má přesnou regulaci, krátkou dobu regulace bez relativního překmitu a je tudíž nejlepším výsledkem regulace.



Obr. 5.15 Přechodové charakteristiky S regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy S3, za podmínky $1/4 * \sum \tau_i$

Z obr. 5.16 vyplývá, že porovnáním malých vzorkovacích period S regulátoru dochází k přesným regulacím. Nejlepším výsledkem je vzorkovací perioda $T = 0,4[s]$, která má nejmenší relativní překmit a nejkratší dobu regulace. Se snižováním vzorkovací periody dochází k prodlužování doby regulace a zvyšování relativního překmitu.

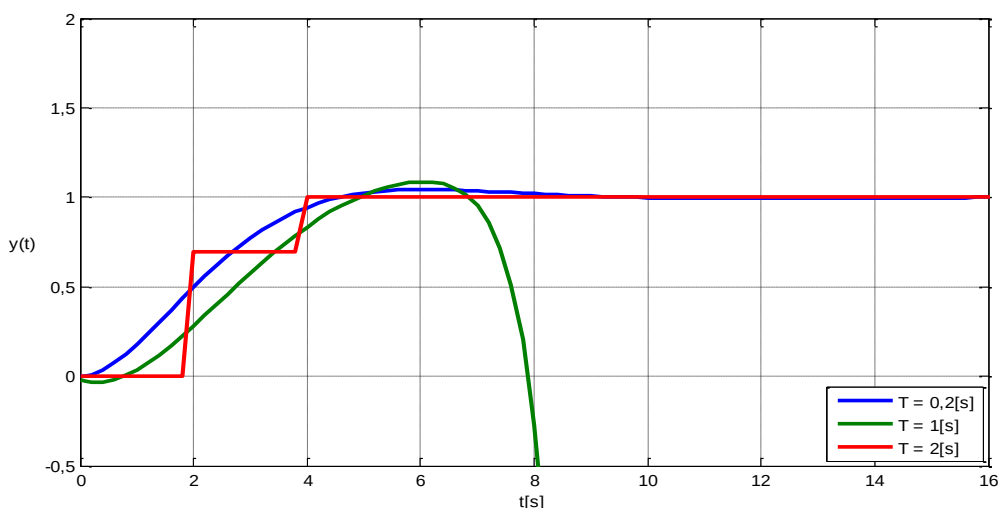


Obr. 5.16 Přechodové charakteristiky S regulátoru soustavy $S3$ pro malé vzorkovací periody

Tab. 5.9 Výsledné přenosy regulátorů soustavy $S3$ s použití PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru

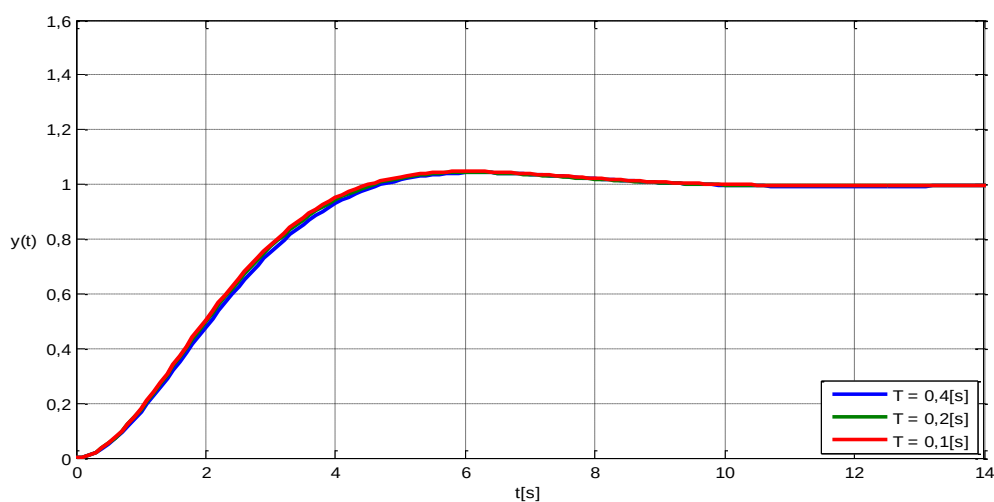
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T \ll 1/6 * T_{95}$	0,4	$G_R(z) = \frac{0,393 - 0,358z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,043	4,2
$T < 1/6 * T_{95}$	2	$G_R(z) = \frac{0,251 - 0,192z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/6 * T_{95}$	4	$G_R(z) = \frac{0,322 - 0,125z^{-1} + 0,002z^{-2}}{1 - 0,83z^{-1} - 0,169z^{-2}}$	0	8
$T \ll 1/4 * \sum \tau_i$	0,2	$G_R(z) = \frac{0,409 - 0,39z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,044	4,1
$T < 1/4 * \sum \tau_i$	1	$G_R(z) = \frac{0,325 - 0,254z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/4 * \sum \tau_i$	2	$G_R(z) = \frac{0,588 - 0,436z^{-1} + 0,048z^{-2}}{1 - 0,694z^{-1} - 0,305z^{-2}}$	0	4
$T \ll 1/15 * T_{95}$	0,1	$G_R(z) = \frac{0,414 - 0,404z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	0,048	4
$T < 1/15 * T_{95}$	0,5	$G_R(z) = \frac{1,297 - 1,201z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	-	-
$T > 1/15 * T_{95}$	1	$G_R(z) = \frac{1,429 - 1,639z^{-1} + 0,41z^{-2}}{1 - 0,603z^{-1} - 0,397z^{-2}}$	0	2

Z obr. 5.17 vyplývá, že malá vzorkovací perioda $T = 0,2[s]$ má přesnou regulaci s malým relativním překmitem a nejdelší dobou regulace. Střední vzorkovací perioda $T = 1[s]$ je nestabilní a velká vzorkovací perioda $T = 2[s]$ má přesnou regulaci bez relativního překmitu s nejkratší dobou regulace. Je tudíž nejlepším výsledkem regulace.



Obr. 5.17 Přechodové charakteristiky PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy S3, za podmínky $1/4 * \sum \tau_i$

Z obr. 5.18 je patrné, že při porovnávání malých vzorkovacích period PS regulátoru nedochází k velkým regulačním rozdílům. Všechny vzorkovací periody mají přesnou regulaci s malým relativním překmitem. Snižováním vzorkovací periody se zvyšuje relativní překmit a zkracuje se doba regulace, přičemž rozdíly jsou nepatrné.

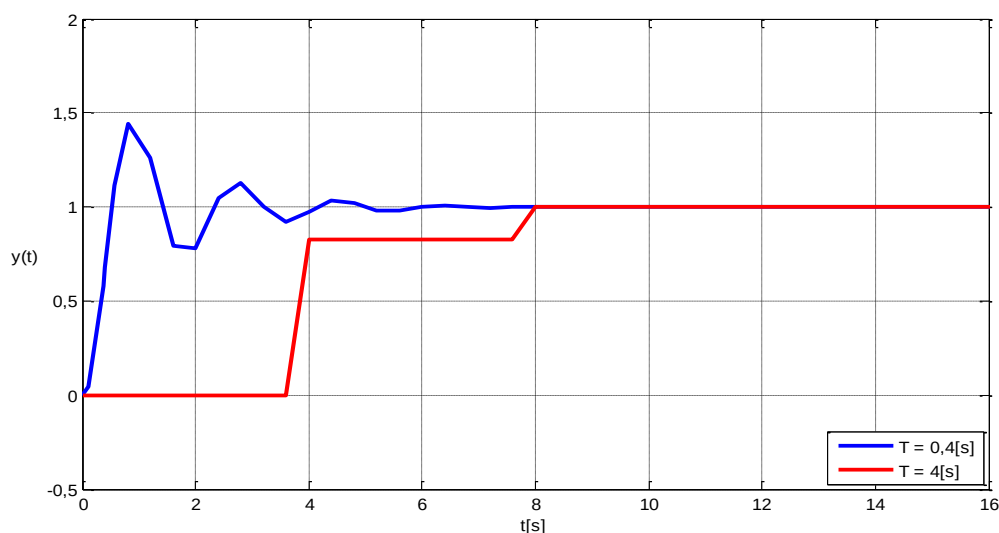


Obr. 5.18 Přechodové charakteristiky PS regulátoru soustavy S3 pro malé vzorkovací periody

Tab. 5.10 Výsledné přenosy regulátorů soustavy S3 s použití PSD regulátoru a obecného lineárního regulátoru

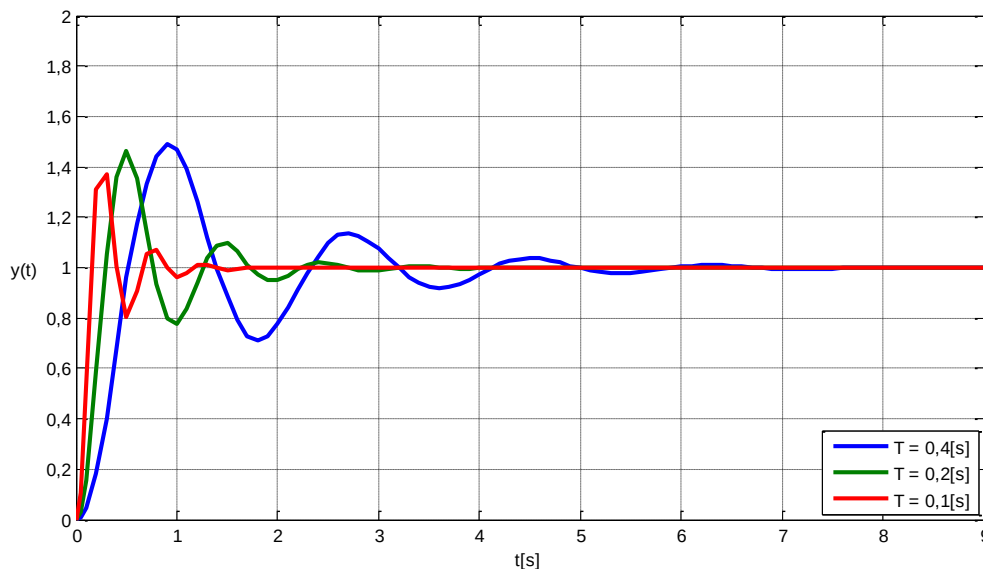
podmínky	T	Regulátor	κ	t_r
$T < 1/6 * T_{95}$	0,4	$G_R(z) = \frac{8,015 - 13,022z^{-1} + 5,214z^{-2}}{1 - z^{-1}}$	0,47	3,8
$T < 1/6 * T_{95}$	2	—	-	-
$T > 1/6 * T_{95}$	4	$G_R(z) = \frac{0,322 - 0,125z^{-1} + 0,002z^{-2}}{1 - 0,83z^{-1} - 0,169z^{-2}}$	0	8
$T < 1/4 * \sum \tau_i$	0,2	$G_R(z) = \frac{25,427 - 45,459z^{-1} + 20,204z^{-2}}{1 - z^{-1}}$	0,464	2
$T < 1/4 * \sum \tau_i$	1	—	-	-
$T > 1/4 * \sum \tau_i$	2	$G_R(z) = \frac{0,588 - 0,436z^{-1} + 0,048z^{-2}}{1 - 0,694z^{-1} - 0,305z^{-2}}$	0	4
$T < 1/15 * T_{95}$	0,1	$G_R(z) = \frac{90,435 - 170,455z^{-1} + 80,22z^{-2}}{1 - z^{-1}}$	0,373	1
$T < 1/15 * T_{95}$	0,5	—	-	-
$T > 1/15 * T_{95}$	1	$G_R(z) = \frac{1,429 - 1,639z^{-1} + 0,41z^{-2}}{1 - 0,603z^{-1} - 0,397z^{-2}}$	0	2

Z obr. 5.19 je patrné, že dochází k přesným regulacím. Malá vzorkovací perioda $T = 0,4[s]$ má velký relativní přechmit s krátkou dobou regulace. Velká vzorkovací perioda $T = 4[s]$ má delší dobu regulace bez relativního přechmitu. Je tedy nejlepším výsledkem regulace.



Obr. 5.19 Přechodové charakteristiky PSD regulátoru a obecného lineárního regulátoru soustavy S3 za podmínky $1/6 * T_{95}$

Z obr. 5.20 vyplývá, že při porovnávání malých vzorkovacích period PSD regulátoru dochází k přesným regulacím. Nejlepším výsledkem je vzorkovací perioda $T = 0,1[s]$, která má nejkratší dobu regulace a nejmenší relativní překmit. Se zvyšující se vzorkovací periodou dochází k většímu relativnímu překmitu a prodlužování doby regulace.



Obr. 5.20 Přechodové charakteristiky PSD regulátoru soustavy S3 pro malé vzorkovací periody

Zhodnocení

Porovnáváním vzorkovacích period v tab. 5.7 považuji za nejlepší výsledek regulace velké vzorkovací periody. Nedocházelo k nepřesným regulacím ani k relativním překmitům. Se snižováním vzorkovací periody se zkracovala doba regulace. Střední vzorkovací periody byly nestabilní. U malých vzorkovacích period docházelo k nepřesným regulacím s malými relativními překmity, přičemž se snižováním vzorkovací periody klesal relativní překmit i doba regulace.

Užitím S regulátoru a obecného lineárního regulátoru viz tab. 5.8 bych hodnotil opět velké vzorkovací periody za nejlepší výsledek. Střední vzorkovací periody byly nestabilní. Malé vzorkovací periody měly velké relativní překmity a doby regulace. Snižováním vzorkovací periody tento překmit vzrůstal a prodlužovala se doba regulace.

Srovnáním vzorkovacích period PS regulátoru a obecného lineárního regulátoru v tab. 5.9 docházelo u malých vzorkovacích period k malým relativním překmitům. Se snižováním vzorkovací periody se zvyšoval relativní překmit a zkracovala se doba regulace. Střední vzorkovací periody byly vždy nestabilní a velké vzorkovací periody měly nejkratší doby regulace bez relativních překmitů.

V tabulce 5.10 je uveden PSD regulátor a obecný lineární regulátor. Nejlepší výsledek měly opět velké vzorkovací periody, při nichž nedocházelo k relativním překmitům. Se snižováním vzorkovací periody se zkracovala doba regulace. U malých vzorkovacích period docházelo k velkým relativním překmitům a zároveň nejkratším dobám regulace. Se snižováním vzorkovací periody klesal relativní překmit a zkracovala se doba regulace.

6 Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o vlivu velikosti vzorkovací periody na návrh diskrétního regulačního obvodu, věnuje se výběru vhodných vzorkovacích period, které jsou nezbytné pro stabilitu regulačního obvodu. Práci lze rozdělit na teoretickou a praktickou část, přičemž teoretická část zahrnuje první čtyři kapitoly. Praktická část je soustředěna v páté kapitole.

Po úvodní kapitole následuje objasnění teoretických informací, které jsou nezbytné pro realizaci této práce. Popisuje diskrétní regulační obvod, uvádí a rozebírá jednotlivé části obvodu, jako jsou vzorkovač, tvarovač, spojitě a číslicové regulátory.

Třetí kapitola se zabývá syntézou diskrétního regulačního obvodu, při níž se vychází ze tří různých postupů podle velikosti vzorkovací periody. Popíše vliv malé, střední a velké vzorkovací periody na diskrétní regulační obvod a určí kritéria pro jejich volbu.

Čtvrtá kapitola se zabývá metodami pro nastavení parametrů regulátorů. Z celé řady metod byla vybrána metoda optimálního modulu a obecný lineární regulátor, kde byla použita jednoduchá metoda, kdy se požaduje konečný nejmenší možný počet kroků regulace. Jsou zde popsány tyto dvě metody a je uveden postup pro výpočet stavitelných parametrů regulátoru.

Pátá kapitola obsahuje vyhodnocení výsledků. Vzhledem k tomu, že se k určení vzorkovací periody používá 95 % ustálené hodnoty na přechodové charakteristice regulované soustavy a tudíž nebylo možno užít integrační soustavy, byly zvoleny tři proporcionální soustavy. První část uvádí vzorové výpočty pro určení parametrů regulátoru při malé, střední a velké vzorkovací periodě. Pro výpočet při malé a střední vzorkovací periodě byla využita metoda optimálního modulu a pro výpočet při velké vzorkovací periodě byl zvolen obecný lineární regulátor. Druhá část zpracovala získané výsledky, které byly zadány do programu Matlab-Simulink, ve kterém se ke každému diskrétnímu regulačnímu obvodu vytvořila přechodová charakteristika. Na základě průběhu této přechodové charakteristiky byla určena doba regulace a relativní překmit.

Všechny přechodové charakteristiky byly porovnávány na základě dvou hledisek. Prvním z nich bylo srovnávání malých, středních a velkých vzorkovacích period, z dalšího hlediska byly srovnávány pouze malé, střední nebo velké vzorkovací periody.

Ve většině případů bych hodnotil za nejlepší výsledek regulace velké vzorkovací periody, u kterých jsem použil obecný lineární regulátor. Bylo dosaženo přesných regulací bez relativních překmitů. U malých vzorkovacích period byly ve většině případů výsledkem přesné regulace, avšak docházelo zde k relativním překmitům. Jako nejhorší výsledek regulace bych hodnotil střední vzorkovací periody, u níž ve většině případů docházelo k nestabilním průběhům nebo velkým rozkmitům.

Nejobtížnějším výpočtem se mi jevil výpočtový postup pro střední vzorkovací periodu, proto nebyly použity v této práci regulované soustavy třetího a vyššího řádu. Naopak nejlepší výpočty vycházely při malé a velké vzorkovací periodě. Početně nebyly tak náročné a docházelo i k přesnějším výsledkům regulace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2003. 664s. ISBN 80-7300-020-2.
- [2] BALÁTĚ, J. *Vybrané statě z automatického řízení*. Zlín: [s.n.], 2003. 360s. ISBN 80-7318-120-7.
- [3] ŠULC, B.; VÍTEČKOVÁ, M. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5.
- [4] ŠVARC, I.; ŠEDA, M.; VÍTEČKOVÁ, M. *Automatické řízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 324s. ISBN 978-80-214-3491-2.
- [5] ŠVARC, I. *AUTOMATIZACE – Automatické řízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 262 s. ISBN 80-214-2943-7.
- [6] ŠVARC, I. *Teorie automatického řízení II*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, 1993. 231 s. ISBN 80-214-0550-3.
- [7] VAŠEK, V. *Teorie automatického řízení II*. [s.l.]: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 139 s. ISBN 80-214-0115-X.
- [8] WAGNEROVÁ, R. & MINÁŘ, M.: *Syntéza regulačních obvodů*. Ostrava: VŠB-TUO, KATŘ, 2000. Dostupné z:
http://www.fs.vsb.cz/fakulta/kat/352/uc_texty/Synteza/main.htm.