

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

NÁVRH REGULÁTORŮ PRO REGULOVANÉ SOUSTAVY S VELKÝMI ČASOVÝMI KONSTANTAMI

CONTROLLERS DESIGN FOR PLANTS WITH LARGE TIME CONSTANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VLASTIMIL OMELKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OLGA DAVIDOVÁ, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s návrhem vhodných spojitých regulátorů pro regulované soustavy. Je zde uveden stručný přehled nejpoužívanějších metod. Vybrané metody jsou detailněji popsány a aplikovány na čtyřech konkrétních soustavách s různými časovými konstantami. Vypočtené hodnoty jsou dále zpracovány v programu MATLAB – Simulink. Výsledné hodnoty jsou v závěru vyhodnoceny a porovnány s ohledem na kvalitu a přesnost regulace.

ABSTRACT

This bachelor thesis aims to present a design of convenient continuous action controllers for plants. A brief summary of methods of design mostly in use is listed in the work. Selected methods are presented with more detailed description and are applied on four particular systems with different time constants. Furthermore the calculated values are being processed using MATLAB - Simulink program. The final readings are evaluated and compared with respect to the quality and precision of the regulation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulační obvod, regulátor, regulovaná soustava, metody návrhu.

KEYWORDS

Control system, controller, plant, method of design.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí své práce Ing. Olze Davidové, Ph.D. za věcné rady a připomínky, které mi poskytla v průběhu tvorby této práce.

OBSAH:

	Zadání bakalářské práce.....	3
	Abstrakt	5
	Poděkování	7
1	Úvod	11
2	Regulační obvod.....	13
3	Regulátory	15
	3.1 Proporcionální regulátor.....	16
	3.2 Integrovační regulátor	16
	3.3 Derivační regulátor.....	16
	3.4 Proporcionálně integrovační regulátor	16
	3.5 Proporcionálně derivační regulátor	17
	3.6 Proporcionálně integrovačně derivační regulátor.....	17
	3.7 Přesnost a kvalita regulace	18
4	Metody nastavení parametrů regulátorů	19
	4.1 Seřízení podle optimálního modulu	19
	4.2 Ziegler-Nicholsova metoda kritického zesílení.....	21
	4.3 Ziegler-Nicholsova metoda čtvrtinového tlumení.....	22
5	Aplikace vybraných metod na příkladech.....	25
	5.1 Metoda optimálního modulu	26
	5.2 Metoda kritických parametrů	28
	5.3 Metoda čtvrtinového tlumení	30
6	Vyhodnocení výsledků.....	33
	6.1 Vyhodnocení soustavy S1	33
	6.2 Vyhodnocení soustavy S2	37
	6.3 Vyhodnocení soustavy S3	42
	6.4 Vyhodnocení soustavy S4	44
7	Závěr	49
	Seznam literatury.....	51

1 ÚVOD

Regulátor má za úkol působením akční veličiny snižovat vliv poruchových veličin nebo při změně žádané hodnoty nastavit regulovanou veličinu na tuto hodnotu. Důležité je navrhnout takový regulátor, který poskytuje minimální přeregulování a nejkratší dobu regulace. Někdy to jsou ovšem velmi protichůdné požadavky, které se snaží řešit celá řada metod seřizování regulátorů.

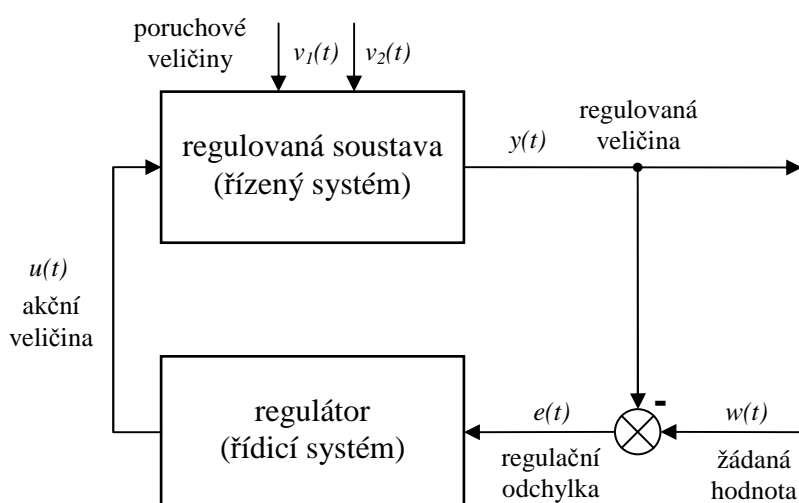
Tato práce se zabývá návrhem regulátorů pro regulované soustavy s velkými časovými konstantami. Jsou to tzv. pomalé děje. V praxi se jedná např. o výměňkové stanice, ohřevy vody či tavící pece.

Práce je rozdělena do několika kapitol. Nejprve shrnuje teoretické minimum pro spojitě lineární řízení. Dále uvádí přehled metod, které se používají při návrhu parametrů regulátorů. Vybrané metody jsou detailněji popsány a to Ziegler-Nicholsovi metody kritických parametrů a čtvrtinového tlumení a metoda optimálního modulu. Pro zvolené proporcionální a integrační soustavy jsou pomocí těchto metod navrženy stavitelné parametry regulátorů, které jsou shrnuty v tabulkách. Poté jsou pomocí programu Matlab–Simulink provedeny simulace soustav s různými velikostmi velkých časových konstant a pro různé typy regulátorů. Z regulačních průběhů jsou následně odečteny doba regulace, maximální překmit a hodnota ustálení regulované veličiny, jež jsou základními požadavky na přesnost a kvalitu regulace. Nakonec jsou metody porovnány a vyhodnoceny.

2 REGULAČNÍ OBVOD

Řízení se zpětnou vazbou se nazývá regulace, jenž se uskutečňuje v regulačním systému zvaném regulační obvod. Regulačním obvodem se míní soubor technických prostředků, kterými se na daném zařízení zabezpečuje automatické udržení vybraných veličin procesu na požadované hodnotě. Tvoří jej technické zařízení, které se nazývá regulovaná soustava, a pak přístrojové vybavení, které je nutné přidat kvůli automatickému udržování, označované jako regulátor [2].

Regulační obvod můžeme také prezentovat v grafické podobě pomocí blokového schématu podle obr. 1.



Obr. 1 Blokové schéma regulačního obvodu

Blokové schéma zobrazuje regulační obvod jako spojení dvou podsystémů. Jeden představuje regulovanou soustavu (řízený systém) a druhý regulátor (řídící systém), jenž jsou reprezentovány bloky navzájem propojenými do uzavřeného obvodu.

Regulovaná soustava je obvykle zjednodušená představa o řízeném objektu a v něm probíhajících procesech významných pro regulaci. K jejímu vyjádření se používá určitá forma reprezentace vztahů mezi proměnnými reprezentující konkrétní fyzikální veličiny – regulovaná veličina y , akční u a poruchové v_1, v_2 .

Regulovaná veličina y je výstupem z regulované soustavy a regulací se udržuje na požadované hodnotě. Žádaná hodnota w určuje hodnotu, kterou má dosahovat regulovaná hodnota. V regulačním obvodu se hodnota regulované veličiny trvale měří a porovnává se žádanou hodnotou a vytváří se rozdíl $e = w - y$, který se nazývá regulační odchylka e . Na tento rozdíl reaguje regulátor zásahem, který je jeho výstupní veličinou a vstupní veličinou regulované soustavy a nazývá se akční veličina u . Je nutné zapojit regulátor tak, aby akční veličina zmenšovala regulační odchylku. Příčinou, proč musíme regulovat, jsou poruchové veličiny v_1, v_2 . Poruchové veličiny nežádoucím a nepředvídatelným způsobem působí na regulovanou soustavu a ovlivňují regulovanou veličinu.

Popis spojitého systému

Lineární spojitý systém můžeme definovat diferenciální rovnicí ve tvaru

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 y' + a_0 y = b_m u^{(m)} + \dots + b_1 u' + b_0 u \quad (2.1)$$

kde a_i, b_j jsou konstantní koeficienty. Rovnice platí pouze za podmínky fyzikální realizovatelnosti $m \geq n$.

Přenos systému je definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny k Laplaceově obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách systému $y(0) = y'(0) = \dots = y^{(n-1)}(0) = 0$ a vstupního signálu $u(0) = u'(0) = \dots = u^{(m-1)}(0) = 0$. [1]

Po transformaci diferenciální rovnice dostáváme rovnici ve tvaru

$$G(s) = \frac{L\{y(t)\}}{L\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.2)$$

V této práci jsou přenosy uváděny v upraveném tvaru s časovými konstantami

$$G(s) = k \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \dots (\tau_m s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)} \quad (2.3)$$

Pokud je regulovaná soustava dána přenosem $G_S(s)$ a regulátor přenosem $G_R(s)$ pak přenos řízení $G_w(s)$, pokud vyloučíme vliv poruchových veličin, je dán

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_S(s)G_R(s)}{1 + G_S(s)G_R(s)} = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} \quad (2.4)$$

Součin přenosu regulované veličiny a přenosu regulátoru byl označen $G_0(s)$ a nazývá se přenos rozpojeného obvodu, který získáme přerušením obvodu.

Nepůsobí-li na obvod žádaná veličina a regulovaná veličina je závislá pouze na poruchové veličině jedná se přenos poruchy pro který platí

$$G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_S(s)}{1 + G_S(s)G_R(s)} = \frac{G_S(s)}{1 + G_0(s)} \quad (2.5)$$

Přenos řízení i přenos poruchy mají ve jmenovateli stejný výraz $1 + G_0(s)$, který je důležitý pro stanovení stability ve tvaru charakteristické rovnice regulačního obvodu $1 + G_0(s) = 0$. Vyjádříme-li přenos rozpojeného obvodu jako podíl polynomů

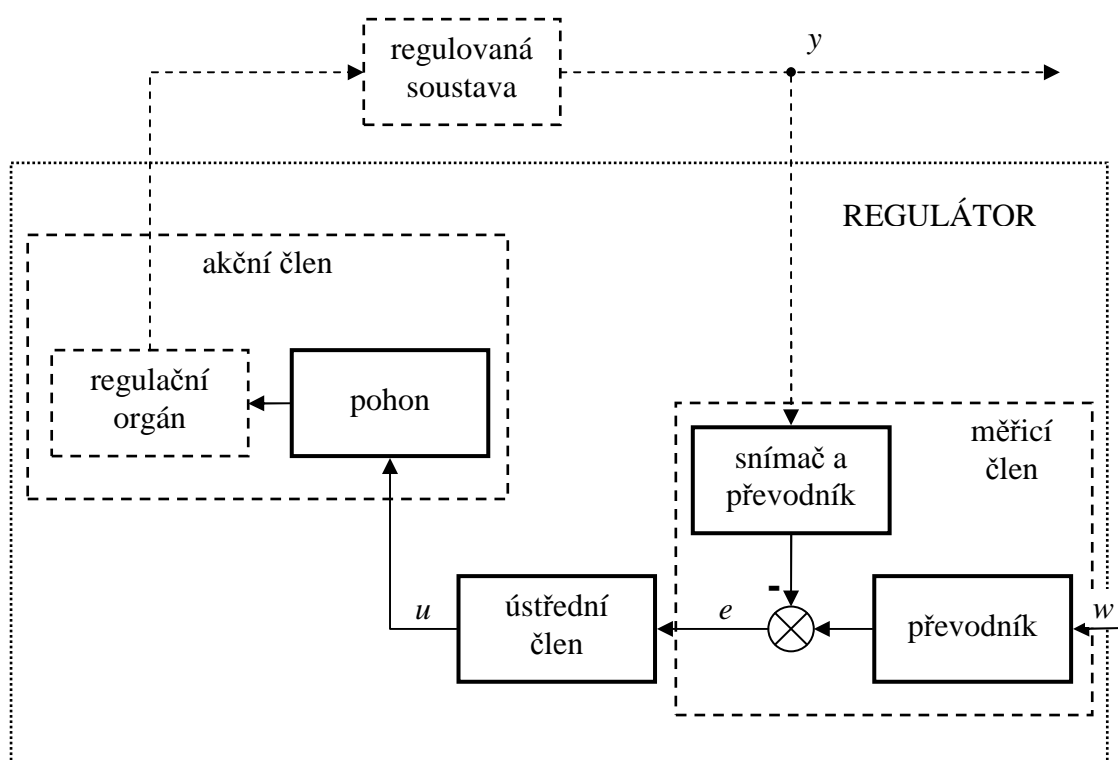
$G_0(s) = \frac{M_0(s)}{N_0(s)}$, dostaneme po úpravách charakteristickou rovnici ve tvaru

$$M_0(s) + N_0(s) = 0 \quad (2.6)$$

3 REGULÁTORY

Hlavní úlohou regulátoru je prostřednictvím akční veličiny působit na regulovanou soustavu, tak aby se regulovaná veličina udržovala na předepsané hodnotě a regulační odchylka byla nulová nebo co nejmenší. Působením poruchové veličiny v se změní regulovaná veličina y a odchýlí se od žádané hodnoty w . Tím vznikne regulační odchylka $e = w - y$, kterou odstraňuje regulátor svým zásahem prostřednictvím akční veličiny u . Zapojení obvodu je se zpětnou vazbou, tím regulátor zmenšuje regulační odchylku. Jestliže je regulační odchylka nulová, je na jeho výstupu nula a regulátor je bez funkce.

Regulátor se skládá z prvků zobrazených na obr. 2. Jedná se o měřicí člen, ústřední člen a akční člen.



Obr. 2 Schéma regulátoru

Měřicí člen se skládá ze snímače s převodníkem, z převodníku řídicí veličiny a z porovnávacího členu. Snímač neboli čidlo zjišťuje časový průběh regulované veličiny. Volba čidla závisí na druhu fyzikální veličiny, jenž měříme a také na umístění v regulované soustavě. Přesnost čidla se volí s ohledem na přesnost regulace. Čidlo je vybaveno převodníkem, který převádí regulovanou veličinu na elektrické napětí nebo proud. Výstupní signál je následně odečten porovnávacím členem od žádané hodnoty regulované veličiny a rozdílem je regulační odchylka.

Ústřední člen regulátoru zpracovává regulační odchylku, kterou může zesilovat, integrovat a derivovat. Má hlavní vliv na regulační pochod a jeho vlastnosti můžeme volit. Při návrhu vhodných parametrů regulátoru mluvíme vlastně o ústředním členu.

Akční člen je složen z pohonu a regulačního orgánu. Pohon je zdrojem energie pro regulační orgán. Regulační orgán mění hodnotu akční veličiny a většinou se přičleňuje k regulované soustavě. Příkladem jsou různé ventily, klapky, šoupátka atd.

3.1 Proporcionální regulátor

Jak již bylo uvedeno výše regulátor může regulační odchylku zesilovat, integrovat a derivovat. Proporcionální regulátor či P regulátor je nejjednodušší formou regulátoru a funguje jako zesilovač. Akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce. Základním znakem proporcionálních regulátorů je ten, že se jeho přechodová charakteristika ustálí v krátkém čase.

3.2 Integrovní regulátor

Integrovní regulátor, též jako regulátor I může jako jediný regulátor úplně odstranit regulační odchylku e , protože regulační odchylka e je tímto regulátorem integrována. Úplnému odstranění regulační odchylky e dochází až za určitý čas. Integrovní regulátor používáme tam, kde má regulovaná soustava velkou setrvačnost nebo tam, kde poruchy nejsou příliš časté. Regulátor má také velkou odolnost proti krátkodobým poruchám.

3.3 Derivační regulátor

Derivační regulátor se jako ideální nedá realizovat. Za následek to má parazitní setrvačnost. Tato setrvačnost potlačuje při vysokých frekvencích jeho přenos. Zrovna v těchto vysokých frekvencích by měl být přenos derivačního regulátoru největší. Při konstantním vstupu má regulátor přenos rovnající se nule. Jelikož samotný derivační regulátor nedokáže zesilovat regulační odchylku, musíme tento derivační regulátor kombinovat s proporcionálním nebo integračním regulátorem. Při těchto kombinacích dokáže derivační regulátor zrychlit regulaci a zvýšit stabilitu. Výše uvedený jev má obrovský význam při odstraňování četných a krátkodobých poruch.

3.4 Proporcionálně integrační regulátor

Proporcionálně integrační regulátor je tvořen paralelním spojením regulátoru typu P a regulátoru typu I. Díky spojení regulátoru P a regulátoru I můžeme na vniklém PI regulátoru měnit parametry zesílení a integrační časovou konstantu. Mezi kombinovanými je PI regulátor nerozšířenější. Má univerzální použití. PI regulátor je schopen úplně odstranit regulační odchylku. Je také schopen odstraňovat poruchy, které vstupují do regulované soustavy. Také zlepšuje stabilitu celé regulované soustavy. Jeho největší využití je při regulaci kmitavých soustav druhého i vyššího řádu. Při regulování vyšších soustav musíme úměrně k tomu zmenšovat jeho zesílení. Nebo také můžeme zvětšovat časovou konstantu. Pokud máme statickou soustavu je lepší v tomto případě použít regulátor typu I.

3.5 Proporcionálně derivační regulátor

Proporcionálně derivační regulátor je tvořen paralelním spojením proporcionálního a derivačního regulátoru. PD regulátor můžeme požit tam, kde je pro své vlastnosti vhodný regulátor P. Největší výhodou je především vyšší rychlost regulace. Tato vlastnost má vliv při potlačování rychlých výchylek regulované veličiny. Je vhodné PD regulátor používat tam, kde do regulované soustavy často vstupují poruchy. Volbou vhodné časové konstanty se nám může podařit snížit řád regulované soustavy a tím pádem se nám zvýší stabilita regulované soustavy.

3.6 Proporcionálně integrační derivační regulátor

Proporcionálně integrační derivační regulátor je tvořen paralelním spojením proporcionálního, integračního a derivačního regulátoru. PID regulátor se dá použít všude tam, kde se hodí PI regulátor. Na rozdíl od PI regulátoru je PID regulátor rychlejší. Může tedy lépe tlumit rychlé překmity regulované veličiny.

Rovnice a přenosy regulátorů jsou shrnuty v tab. 1.

Typ regulátoru	Rovnice	Přenos $G_R(s)$	
P	$u(t) = r_0 e(t)$	r_0	r_0
I	$u(t) = r_{-1} \int e(t) dt$	$\frac{r_{-1}}{s}$	$\frac{r_0}{T_i s}$
D	$u(t) = r_1 e'(t)$	$r_1 s$	$r_0 T_d s$
PI	$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s}$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$
PD	$u(t) = r_0 e(t) + r_1 e'(t)$	$r_0 + r_1 s$	$r_0 (1 + T_d s)$
PID	$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt + r_1 e'(t)$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$

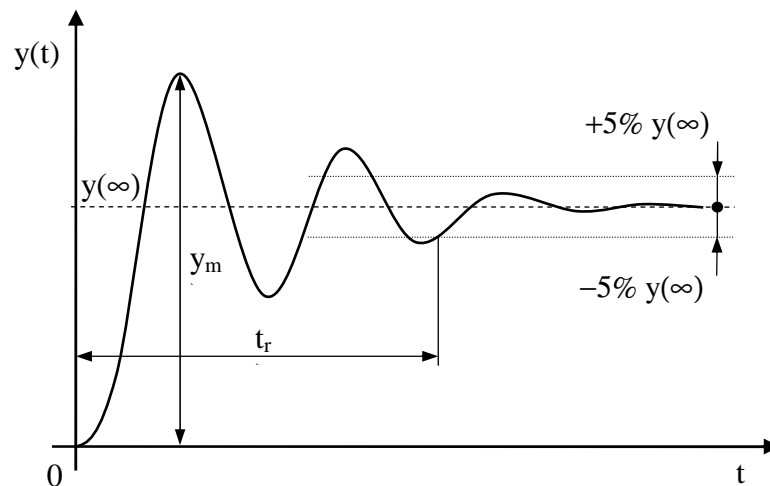
Tab. 1 Dynamické vlastnosti spojitých regulátorů [3]

V dalších výpočtech jsou místo konstant r_0 , r_{-1} a r_1 používány časové konstanty T_i a T_d pro které platí

$$T_i = \frac{r_0}{r_{-1}} \qquad T_d = \frac{r_1}{r_0} \qquad (3.1)$$

3.7 Přesnost a kvalita regulace

V této práci se budeme věnovat regulaci v časové oblasti, která vychází z časových průběhů. Konkrétně z průběhu regulované veličiny nebo poruchové veličiny, většinou z odezvy na jednotkový skok žádané veličiny. Typickým případem je přechodová charakteristika na obr. 3.



Obr. 3 Ukazatele kvality regulace [3].

Hlavními ukazateli kvality regulace jsou doba regulace t_r , která je rovna době za kterou klesne odchylka regulované veličiny pod 5% její ustálené hodnoty a relativní překmit regulované veličiny κ , který je dán vztahem

$$\kappa = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)}$$

kde y_m je maximální hodnota regulované veličiny a $y(\infty)$ ustálená hodnota regulované veličiny.

4 METODY NASTAVENÍ PARAMETRŮ REGULÁTORŮ

Hlavní úkolem při návrhu regulačního obvodu je zajištění jeho stability a poté dosažení jisté kvality regulace. Kvalita regulace je hodnocena dle kritérií, která jsou velmi různorodá. Výsledky tohoto hodnocení lze použít při následném seřízení regulátorů. Na optimalizaci chování regulačních obvodů můžeme nahlížet ze dvou pohledů a to z globálního a odezвовého. Globální pohled sleduje obecné charakteristické rysy chování obvodu, které jsou většinou spojeny s charakteristickým polynomem. Výhodou globálního pohledu je jeho obecnější platnost. Odezвовý pohled hodnotí optimální průběh na konkrétní odezvy. Jeho uplatnění je hlavně v případech, kdy známe typické poruchy nebo změny žádaných hodnot.

Integrální kritéria jakosti regulace jsou představitelé odezвовého hodnocení kvality regulace [3]. Tyto kritéria vychází z minima regulační plochy. Základním kritériem je kritérium lineární regulační plochy označováno jako IE (Integral of Error). Další používané kritéria jsou kritérium absolutní regulační plochy, značíme zkratkou IAE (Integral of Absolute Error), kritérium kvadratické regulační plochy označované ISE (Integral of Squared Error) a v některých případech používané kritérium ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error).

Mezi **globální metody seřizování** patří metody relativního tlumení, bezpečnosti ve fázi, kompenzačního seřízení, požadovaného modelu, násobného dominantního pólu a metoda optimálního modulu. Tato metoda bude dále podrobněji popsána.

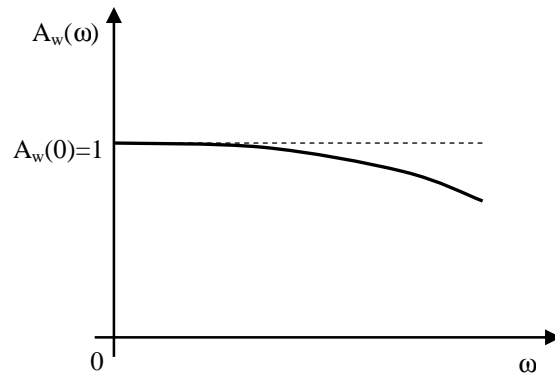
Experimentální a empirické metody seřizování se vyznačují nastavením parametrů regulátoru připojeného ke skutečné regulované soustavě. Klasické metody seřizování na základě experimentálních měření jsou Zigler-Nicholsovy metody. Jsou to metoaya přechodové charakteristiky, kritických parametrů a čtvrtinového tlumení. Poslední dvě jmenované budou podrobněji popsány. Použitelné metody mohou být i metoda seřízení regulátorů podle Chiena, Hronese a Reswicka, metoda pokus-omyl či metoda relé.

4.1 Seřízení podle optimálního modulu

Kritérium optimálního modulu vychází z přenosu řízení uzavřeného regulačního obvodu $G_w(s)$. Ideálně by měl být splněn požadavek $G_w(s) = 1$, jenž lze vyjádřit ve frekvenční oblasti ve tvaru

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

Tato podmínka je v reálných podmínkách nesplnitelná, platí spíše $A_w(\omega) \rightarrow 1$, kde $A_w(\omega)$ je amplituda frekvenčního přenosu. Optimální průběh této veličiny je takový, který je v počátku konstantní pro co největší rozsah frekvencí ω a jinak je monotónně klesající funkcí úhlové frekvence ω podle obr. 4



Obr. 4 Průběh amplitudy frekvenčního přenosu [3].

Pro snadnější výpočet budeme používat druhou mocninu vztahu

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

Je-li přenos řízení ve tvaru

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

pak frekvenční přenos řízení bude mít tvar

$$G_w(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_m (j\omega)^m + a_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (4.4)$$

Po dosazení do rovnice (4.2)

$$\begin{aligned} A_w^2(j\omega) = |G_w(j\omega)|^2 &= \frac{\operatorname{Re}_{\text{cit}}^2 + \operatorname{Im}_{\text{cit}}^2}{\operatorname{Re}_{\text{jmen}}^2 + \operatorname{Im}_{\text{jmen}}^2} = \frac{(\dots + b_4 \omega^4 - b_2 \omega^2 + b_0)^2 + (\dots - b_3 \omega^3 + b_1 \omega)^2}{(\dots + a_4 \omega^4 - a_2 \omega^2 + a_0)^2 + (\dots - a_3 \omega^3 + a_1 \omega)^2} = \\ &= \frac{B_m \omega^{2m} + B_{m-1} \omega^{2(m-1)} + \dots + B_2 \omega^4 + B_1 \omega^2 + B_0}{A_n \omega^{2n} + A_{n-1} \omega^{2(n-1)} + \dots + A_2 \omega^4 + A_1 \omega^2 + A_0} \end{aligned}$$

kde

$$\begin{array}{ll} B_0 = b_0^2 & A_0 = a_0^2 \\ B_1 = b_1^2 - 2b_0 b_2 & A_1 = a_1^2 - 2a_0 a_2 \\ B_2 = b_2^2 - 2b_1 b_3 + 2b_0 b_4 & A_2 = a_2^2 - 2a_1 a_3 + 2a_0 a_4 \\ \vdots & \vdots \\ B_{m-1} = b_{m-1}^2 - 2b_{m-2} b_m & A_{n-1} = a_{n-1}^2 - 2a_{n-2} a_n \\ B_m = b_m^2 & A_n = a_n^2 \end{array}$$

Vhodného regulačního pochodu podosáhneme pokud bude průběh amplitudové frekvenční charakteristiky s rostoucí frekvencí monotónně klesající, to znamená tehdy když

$$\frac{B_0}{A_0} \geq \frac{B_i}{A_i} \quad (4.5)$$

Pro P a I regulátory je počet stavitelných parametrů roven jedné a máme jednu rovnici

$$A_1 B_0 = A_0 B_1, \quad (4.6)$$

pro PI a PD regulátor dvě rovnice

$$\begin{aligned} A_1 B_0 &= A_0 B_1 \\ A_2 B_0 &= A_0 B_2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

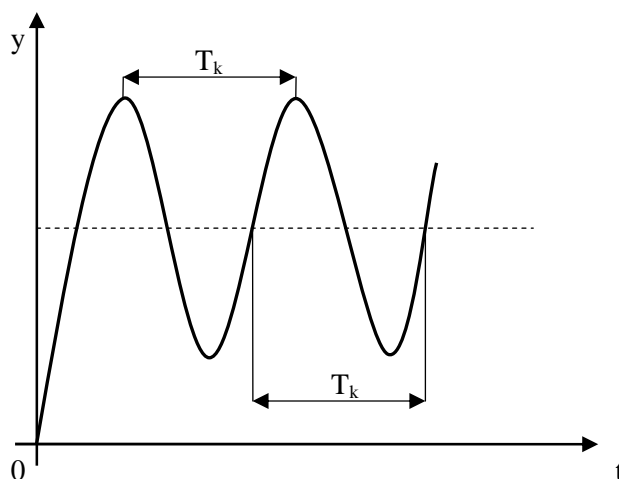
a pro PID regulátor tři rovnice

$$\begin{aligned} A_1 B_0 &= A_0 B_1 \\ A_2 B_0 &= A_0 B_2 \\ A_3 B_0 &= A_0 B_3 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Uvedené výpočty nám nezaručí stabilitu, musíme ji tedy ověřit. V této práci nebyla stabilita ověřována početně, ale pouze simulací.

4.2 Ziegler-Nicholova metoda kritického zesílení

Metoda byla původně empirická a sloužila k nastavení parametrů regulátoru ve skutečném zapojení. Později byl odvozen i matematický postup. Principem metody je přivést obvod do kritického stavu tj. na hranici stability, přičemž jsou vyřazeny integrační a derivační složka $T_i \rightarrow \infty$, $T_d \rightarrow 0$ resp. $r_{-1} \rightarrow 0$, $r_1 \rightarrow 0$. Na hranici stability obvod přivedeme postupným zvyšováním zesílení r_0 , až začne obvod kmitat netlumenými kmity. Zesílení na hranici stability se nazývá kritické zesílení r_{0k} a perioda netlumených kmitů kritická perioda T_k , kterou určíme podle obr. 5.



Obr. 5 Určení kritické periody kmitu.

Pokud známe parametry r_{0k} a T_k můžeme určit parametry regulátorů z tab. 2.

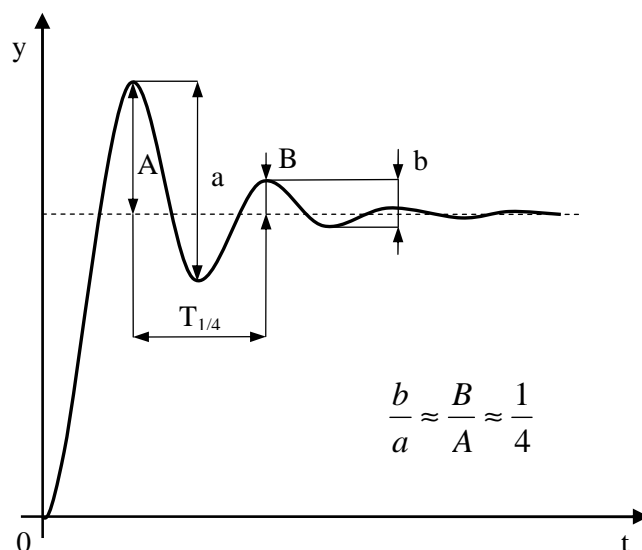
Typ regulátoru	r_0	T_i	T_d
P	$0,5 r_{0k}$	-	-
PI	$0,45 r_{0k}$	$0,83T_k$	-
PD	$0,4 r_{0k}$	-	$0,05 T_k$
PID	$0,6 r_{0k}$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$

Tab. 2 Parametry regulátorů dle Ziegler-Nicholse [3].

Počtní řešení spočívá v nalezení kritického zesílení r_{0k} z charakteristické rovnice přenosu rozpojeného obvodu pomocí Hurwitzova kritéria. Kritickou periodu vypočteme pomocí úhlové frekvence ω_k , kterou určíme dosažením $r_0 = r_{0k}$ a $s = j\omega_k$ do charakteristické rovnice. Parametry regulátoru se určí také z tab. 2.

4.3 Ziegler-Nicholsova metoda čtvrtinového tlumení

Mnoho regulovaných soustav není možné jejich rozkmitání a dosažení hranice stability. V tomto případě je použitelná modifikace metody kritických parametrů metoda čtvrtinového tlumení. Změnou zesílení nepřivedeme obvod na hranici stability, ale je musíme zajistit, aby přechodová charakteristika obvodu byla ve stavu tlumených kmitů, tedy aby podíl dvou po sobě jdoucích amplitud výchylky byl roven 0,25 (útlum je přibližně roven 4) viz obr. 6.



Obr. 6 Určení kritické periody tlumených kmitů [2].

Kritické zesílení při útlumu 4 je $r_{01/4}$ a kritická perioda $T_{1/4}$ se určí podle obr. 5 a optimální nastavení regulátoru stanovíme z tab. 3.

Typ regulátoru	r_0	T_i	T_d
P	$r_{01/4}$	-	-
PI	$0,9r_{01/4}$	$T_{1/4}$	-
PID	$1,2r_{01/4}$	$0,6T_{1/4}$	$0,15T_{1/4}$

Tab. 3 Parametry regulátorů pro čtvrtinové tlumení [3].

5 APLIKACE VYBRANÝCH METOD NA PŘÍKLADECH

Vybrané metody byly aplikovány na dvě proporcionální a dvě integrační soustavy se setrvačností druhého a třetího řádu s velkými časovými konstantami různých velikostí. Pro jednoduchou orientaci byly soustavy označeny jako S1, S2, S3 a S4.

Soustava S1:

$$G_s(s) = \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (5.1)$$

kde $T_1 = 5, 10, 20$ min a $T_2 = 1$ min.

Soustava S2:

$$G_s(s) = \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)} \quad (5.2)$$

kde $T_1 = 20$ min, $T_2 = 5, 10, 15$ min a $T_3 = 1$ min.

Soustava S3:

$$G_s(s) = \frac{1}{s(T_1s + 1)} \quad (5.3)$$

kde $T_1 = 5, 10, 20$ min a $T_2 = 1$ min.

Soustava S4:

$$G_s(s) = \frac{1}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (5.4)$$

kde $T_1 = 5, 10, 15$ min a $T_2 = 1$ min.

5.1 Metoda optimálního modulu

Výpočet byl nejprve proveden pro soustavu S1, časové konstanty $T_1=5\text{min}$ a $T_2=1\text{min}$ a pro P regulátor. Přenos soustavy je dán vztahem

$$G_s(s) = \frac{1}{(5s+1)(s+1)} = \frac{1}{5s^2 + 6s + 1}$$

a přenos regulátoru

$$G_R(s) = r_0$$

Pro přenos řízení platí

$$G_w(s) = \frac{G_s(s)G_R(s)}{1 + G_s(s)G_R(s)} = \frac{\frac{r_0}{5s^2 + 6s + 1}}{1 + \frac{r_0}{5s^2 + 6s + 1}} = \frac{r_0}{5s^2 + 6s + 1 + r_0}$$

příslušné koeficienty charakteristické rovnice jsou

$$\begin{array}{ll} a_0 = r_0 + 1 & b_0 = r_0 \\ a_1 = 6 & b_1 = 0 \\ a_2 = 5 & b_2 = 0 \end{array}$$

$$A_0 = a_0^2 = (r_0 + 1)^2$$

$$A_1 = a_1^2 - 2a_0a_2 = 6^2 - 2(r_0 + 1)5 = 26 - 10r_0$$

$$B_0 = b_0^2 = r_0^2$$

$$B_1 = b_1^2 - 2b_0b_2 = 0$$

Pro P regulátor máme pouze jednu podmínkovou rovnici

$$\begin{aligned} A_1B_0 &= A_0B_1 \\ (26 - 10r_0)r_0^2 &= (r_0 + 1)^2 \cdot 0 \\ 26 - 10r_0 &= 0 \\ r_0 &= 2,6 \end{aligned}$$

Tento výpočet byl zopakován pro ostatní časové konstanty. Parametry pro PI regulátor byly vypočítány stejným způsobem, jen podmínkové rovnice byly dvě podle (4.7). Parametry pro PD a PID regulátor se nepodařilo stanovit. U soustavy S2 byl PID regulátor navrhnout dle rovnic (4.8).

Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.

S1	T ₁	T ₂	O.M.	
			r ₀	r ₋₁
P	5	1	2,6	-
	10		5,05	-
	20		10,03	-
PI	5	1	2,6	0,517
	10		5,05	0,505
	20		10,03	0,501

Tab. 4 Parametry regulátorů pro soustavu S1.

Pro soustavu S2 byly navrženy P, PI, PD a PID regulátory.

S2	T ₁	T ₂	T ₃	O.M.		
				r ₀	r ₋₁	r ₁
P	20	5	1	1,70	-	-
		10		1,09	-	-
		15		0,93	-	-
PI	20	5	1	1,76	0,09	-
		10		1,14	0,05	-
		15		0,98	0,04	-
PD	20	5	1	10,34	-	52,13
		10		10,11	-	101,25
		15		12,31	-	151,04
PID	20	5	1	13,40	1,07	52,13
		10		15,19	0,51	101,25
		15		17,61	0,50	151,04

Tab. 5 Parametry regulátorů pro soustavu S2.

U soustavy S3 se podařilo navrhnout pouze P regulátor viz tab. 6.

S3	T ₁	O.M.	
		r ₀	r ₋₁
P	5	0,10	-
	10	0,05	-
	20	0,03	-

Tab. 6 Parametry regulátorů pro soustavu S3.

Pro soustavu S4 byly navrženy P a PD regulátor.

S4	T ₁	T ₂	O.M.	
			r ₀	r ₁
P	5	1	0,083	-
	10		0,045	-
	15		0,031	-
PD	5	1	0,517	2,6
	10		0,505	5,05
	15		0,502	7,533

Tab. 7 Parametry regulátorů pro soustavu S4.

5.2 Metoda kritických parametrů

Postup výpočtu je ukázán pro soustavu S2 a časové konstanty $T_1=20\text{min}$, $T_2=5\text{min}$ a $T_3=1\text{min}$. Přenos soustavy je dán

$$G_s(s) = \frac{1}{(20s+1)(5s+1)(s+1)} = \frac{1}{100s^3 + 125s^2 + 26s + 1}$$

Po vyřazení integrační a derivační složky je přenos regulátoru

$$G_R(s) = r_0$$

Přenos rozpojeného obvodu určíme ze vztahu

$$G_0(s) = G_s(s)G_R(s) = \frac{r_0}{100s^3 + 125s^2 + 26s + 1}$$

Charakteristická rovnice je pak rovna

$$100s^3 + 125s^2 + 26s + 1 + r_0 = 0$$

Pro obvod na hranici stability platí (podle Hurwitzova kritéria)

$$H_2 = \begin{vmatrix} 125 & 1+r_0 \\ 100 & 26 \end{vmatrix} = 125 \cdot 26 - 100(1+r_0) = 0$$

$$3150 - 100r_{0k} = 0 \Rightarrow r_{0k} = 31,5$$

Kritickou periodu T_k určíme z úhlové frekvence podle

$$T_k = \frac{2\pi}{\omega} \tag{5.1}$$

Charakteristická rovnice má na hranici stability dvojici imaginárních kořenů $s_{1,2} = \pm j\omega$. Dosadíme-li je do této rovnice a r_0 položíme rovno r_{ok} dostaneme

$$\begin{aligned} 100(j\omega)^3 + 125(j\omega)^2 + 26(j\omega) + 1 + 31,5 &= 0 \\ -100j\omega^3 - 125\omega^2 + 26j\omega + 32,5 &= 0 \end{aligned}$$

Reálná i imaginární část je rovna nule

$$\left. \begin{aligned} -125\omega^2 + 32,5 &= 0 \\ -100\omega^3 + 26\omega &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega = \sqrt{0,26}$$

Po dosazení do rovnice (5.1)

$$T_k = \frac{2\pi}{\sqrt{0,26}} = 12,32$$

Nyní můžeme určit parametry regulátorů podle tab.2. Výsledky jsou shrnuty v následujících tabulkách pouze pro soustavy S2 a S4. Pro soustavy S1 a S3, tedy soustavy se setrvačností 2. řádu, je metoda kritických parametrů nepoužitelná, neboť koeficienty charakteristické rovnice jsou kladné, a proto nelze zvyšováním zesílení r_0 přivést soustavu na hranici stability.

Pro soustavu S2 byly navrženy P, PI, PD a PID regulátory.

S2	T_1	T_2	T_3	K.P.		
				r_0	r_{-1}	r_1
P	20	5	1	15,75	-	-
		10		17,33	-	-
		15		19,60	-	-
PI	20	5	1	14,18	1,39	-
		10		15,60	1,18	-
		15		17,64	1,17	-
PD	20	5	1	12,60	-	7,76
		10		13,86	-	11,06
		15		15,68	-	14,22
PID	20	5	1	18,90	3,07	27,94
		10		20,79	2,61	39,82
		15		23,52	2,59	51,20

Tab. 8 Parametry regulátorů pro soustavu S2.

Pro soustavu S4 byly navrženy P, PI, PD a PID regulátory.

S4	T_1	T_2	K.P.		
			r_0	r_{-1}	r_1
P	5	1	0,60	-	-
	10		0,55	-	-
	15		0,54	-	-
PI	5	1	0,54	0,05	-
	10		0,50	0,03	-
	15		0,48	0,02	-
PD	5	1	0,48	-	0,34
	10		0,44	-	0,44
	15		0,43	-	0,52
PID	5	1	0,72	0,10	1,21
	10		0,66	0,07	1,57
	15		0,64	0,05	1,87

Tab. 9 Parametry regulátorů pro soustavu S4.

5.3 Metoda čtvrtinového tlumení

Kritické zesílení a kritická perioda tlumených kmitů byly stanoveny na základě simulace v programu Matlab-Simulink. Zesílení bylo postupně zvyšováno až do dosažení tlumených kmitů při útlumu 4. Toto zesílení je právě hodnota kritické zesílení a z přechodové charakteristiky je odečtena kritická perioda. Z těchto hodnot byly určeny parametry regulátorů podle tab. 3 pro soustavy S1, S2, S3 a S4.

Pro soustavy S1, S2, S3 a S4 byly navrženy P, PI a PID regulátory a jejich parametry jsou uvedeny v tab.10 až tab.13.

S1	T_1	T_2	Č.T.		
			r_0	r_{-1}	r_1
P	5	1	36	-	-
	10		71	-	-
	20		122	-	-
PI	5	1	36	16,01	-
	10		71	28,57	-
	20		122	41,92	-
PID	5	1	43,20	26,69	12,14
	10		85,20	47,62	26,47
	20		146,40	69,87	53,25

Tab. 10 Parametry regulátorů pro soustavu S1.

S2	T ₁	T ₂	T ₃	Č.T.		
				r ₀	r ₋₁	r ₁
P	20	5	1	10,90	-	-
		10		9,90	-	-
		15		10,30	-	-
PI	20	5	1	10,90	0,53	-
		10		9,90	0,35	-
		15		10,30	0,32	-
PID	20	5	1	13,08	0,88	33,68
		10		11,88	0,58	42,17
		15		12,36	0,54	49,44

Tab. 11 Parametry regulátorů pro soustavu S2.

S3	T ₁	Č.T.		
		r ₀	r ₋₁	r ₁
P	5	1,20	-	-
	10	0,54	-	-
	20	0,30	-	-
PI	5	1,20	0,10	-
	10	0,54	0,02	-
	20	0,30	0,01	-
PID	5	1,44	0,16	2,21
	10	0,65	0,03	2,28
	20	0,36	0,01	2,11

Tab. 12 Parametry regulátorů pro soustavu S3.

S4	T ₁	T ₂	Č.T.		
			r ₀	r ₋₁	r ₁
P	5	1	0,39	-	-
	10		0,28	-	-
	15		0,22	-	-
PI	5	1	0,39	0,016	-
	10		0,28	0,007	-
	15		0,22	0,004	-
PID	5	1	0,47	0,026	1,46
	10		0,34	0,012	1,60
	15		0,26	0,007	1,74

Tab. 13 Parametry regulátorů pro soustavu S4.

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou vyhodnoceny výsledky. Výše určené stavitelné parametry regulátorů byly použity pro vytvoření a simulaci regulačních obvodů v programu Matlab-Simulink. Následně byly stanoveny základní ukazatele pro hodnocení z hlediska přesnosti a kvality regulace z přechodových charakteristik obvodů. Jsou to doba regulace t_r , relativní překmit Δy_{\max} a ustálená hodnota regulované veličiny $y(\infty)$.

6.1 Vyhodnocení soustavy S1

Metodou optimálního modulu byly navrženy P regulátor a PI regulátor. Na obr. 7 a obr. 8 lze vidět vliv změny časové konstanty. U P regulátoru se při zvyšování časové konstanty snižovala trvalá regulační odchylka. Relativní překmit a doba regulace se nepatrně zvyšovaly. PI regulátoru se změna časové konstanty téměř nedotkla.

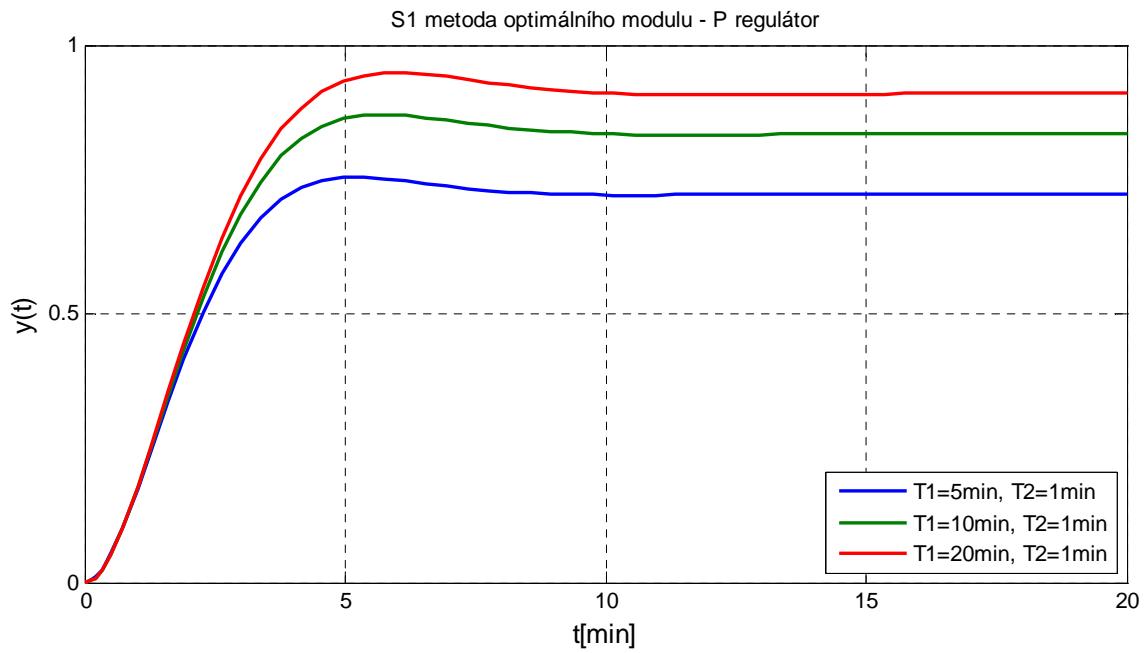
Metodou čtvrtinového tlumení byly navrženy P, PI a PID regulátory. Při zvýšení časové konstanty se jen málo zvýšily doba regulace a relativní překmit.

Porovnání metod bylo provedeno u P a PI regulátorů pro časovou konstantu $T_1 = 5 \text{ min}$ a $T_2 = 1 \text{ min}$. Je zřejmé, že návrh metodou optimálního modulu dává oproti metodě čtvrtinového tlumení kratší dobu regulace i menší relativní překmit. Jen u P regulátoru je větší trvalá regulační odchylka. PID regulátor se nám pomocí metody optimálního modulu nepodařilo navrhnout.

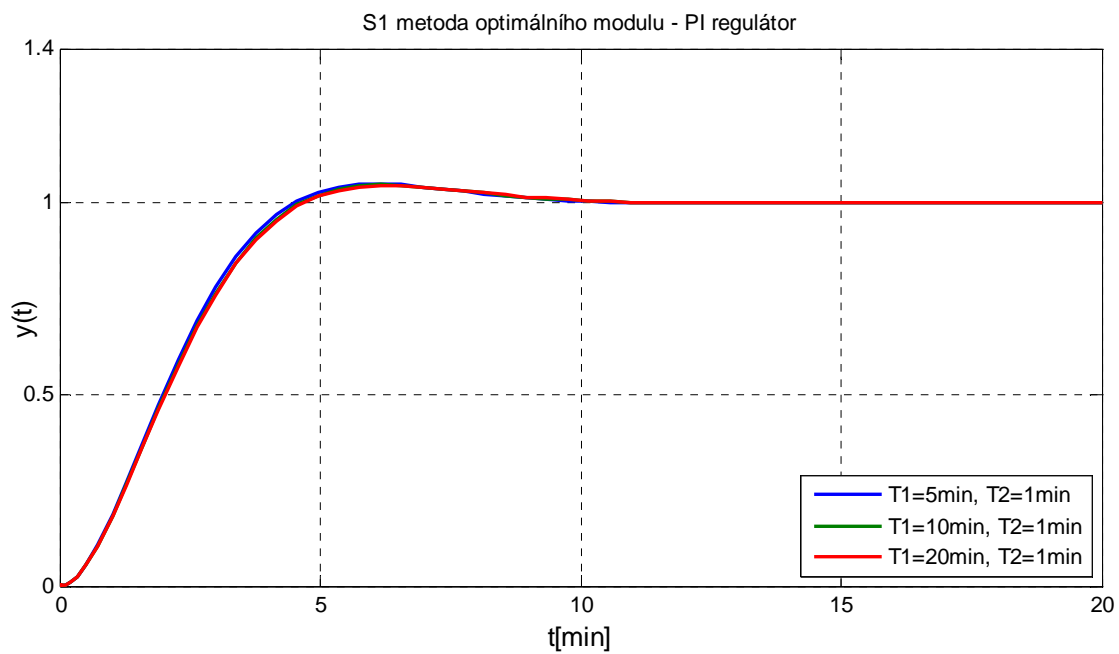
Všechny odečtené hodnoty jsou uvedeny v tab.14.

S1		$T_1 = 5 \text{ min},$ $T_2 = 1 \text{ min}$		$T_1 = 10 \text{ min},$ $T_2 = 1 \text{ min}$		$T_1 = 20 \text{ min},$ $T_2 = 1 \text{ min}$	
		O.M.	Č.T.	O.M.	Č.T.	O.M.	Č.T.
P	t_r	3,45	45,7	3,78	48,80	3,96	49,60
	Δy_{\max}	4,29	5,77	4,31	6,10	4,40	6,43
	$y(\infty)$	0,72	0,86	0,84	0,97	0,91	0,99
PI	t_r	4,00	62,70	4,11	66,20	4,14	66,80
	Δy_{\max}	4,70	8,45	4,5	8,53	4,30	9,06
	$y(\infty)$	1	1	1	1	1	1
PID	t_r	-	26,6	-	24,2	-	21,7
	Δy_{\max}	-	3,79	-	4,2	-	4,84
	$y(\infty)$	-	1	-	1	-	1

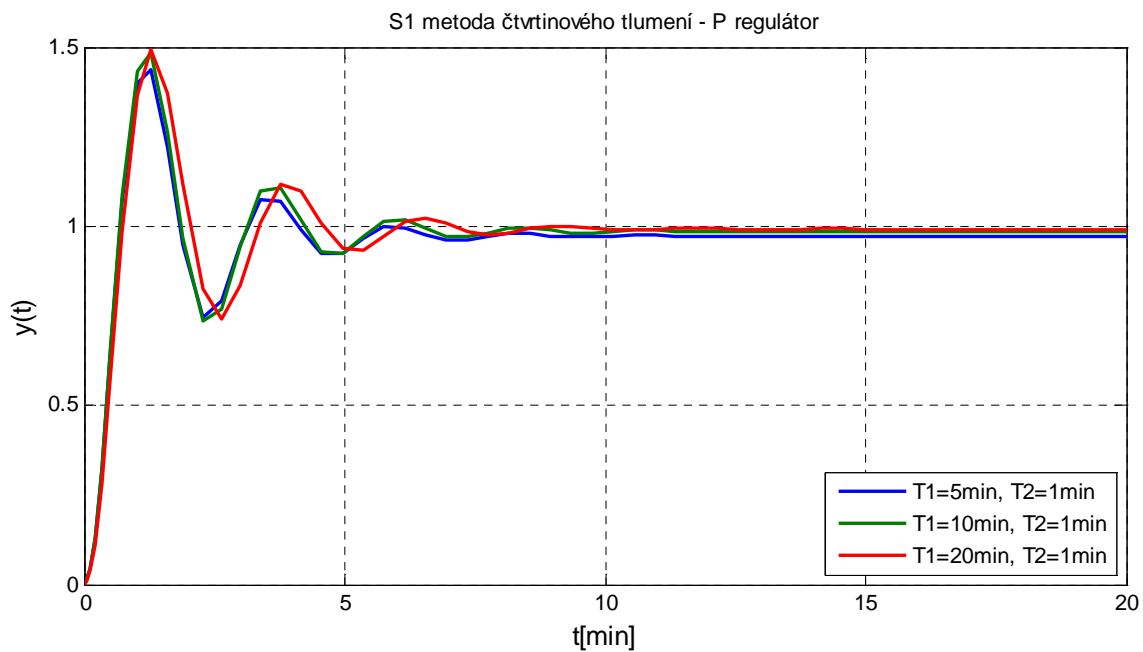
Tab. 14 Vyhodnocení soustavy S1



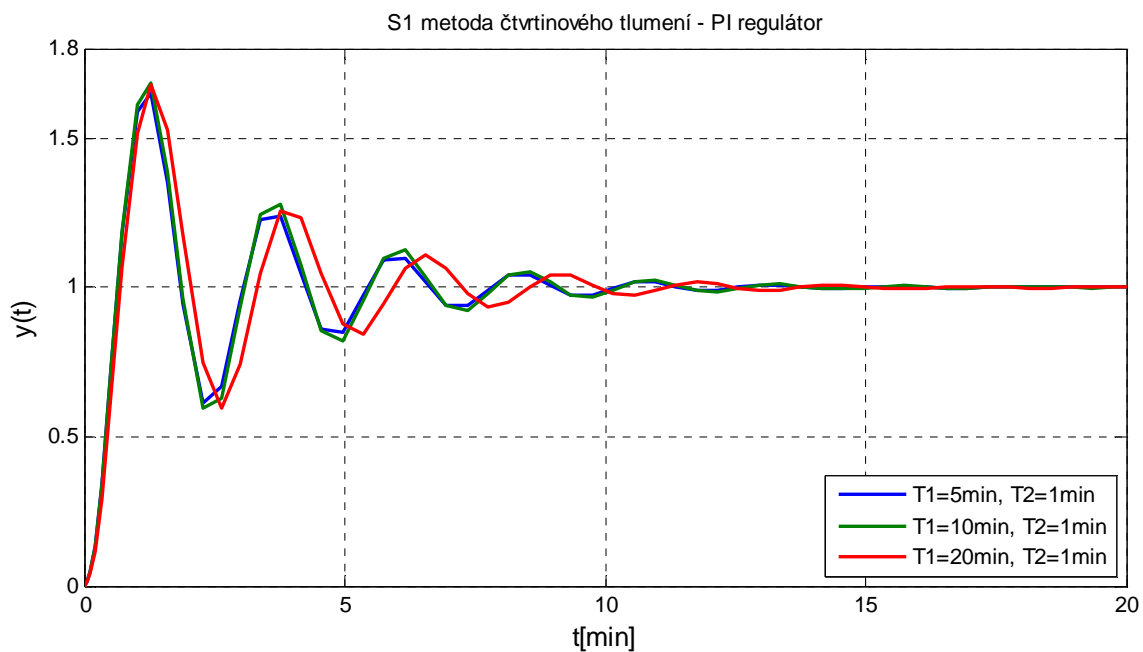
Obr.7 Soustava S1 metoda optimálního modulu – P regulátor.



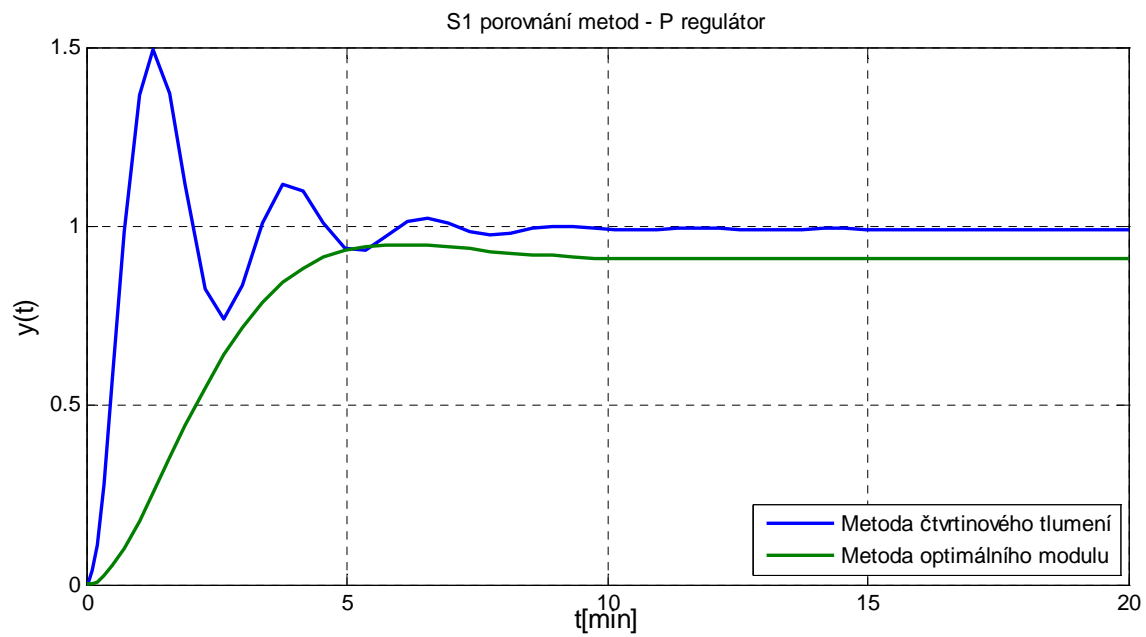
Obr.8 Soustava S1 metoda optimálního modulu – PI regulátor.



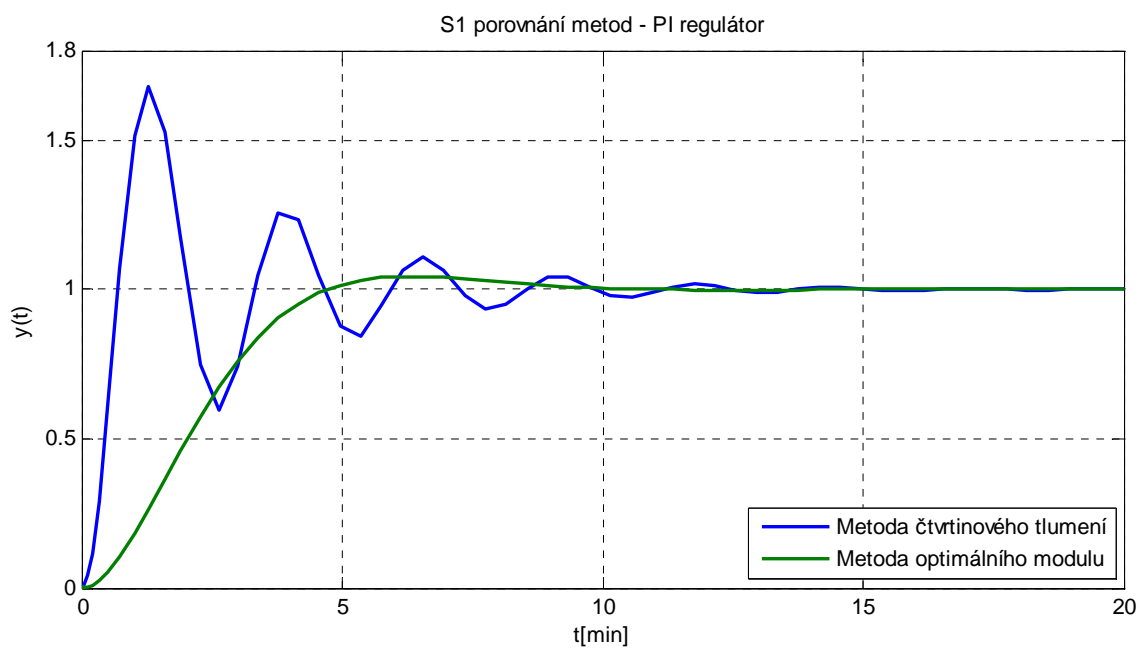
Obr.9 Soustava S1 metoda čtvrtinového tlumení – P regulátor.



Obr.10 Soustava S1 metoda čtvrtinového tlumení – PI regulátor.



Obr.11 Soustava S1 porovnání metod – P regulátor.



Obr.12 Soustava S1 porovnání metod – PI regulátor.

6.2 Vyhodnocení soustavy S2

Na tuto soustavu bylo možné použít jak Ziegler-Nicholsovi metody kritických parametrů a čtvrtinového tlumení tak metodu optimálního modulu.

Metodou optimálního modulu byly navrženy P, PI, PD a PID regulátory. Jako u předešlé soustavy u P regulátoru má zvyšování časové konstanty zásadní vliv na velikost trvalé regulační odchylky. PD regulátor má aperiodický průběh. Všechny regulátory reagovaly na zvýšení časové konstanty prodlužováním doby regulace.

Metodou kritických parametrů byly navrženy také P, PI, PD, a PID regulátory. Opět se zvyšováním časové konstanty docházelo k prodlužování doby regulace a ke zvyšování relativního překmitu. V případě P regulátoru byla trvalá regulační odchylka malá. Výpočtem byly určeny i parametry PI regulátor, ale simulací bylo zjištěna nestabilita soustavy.

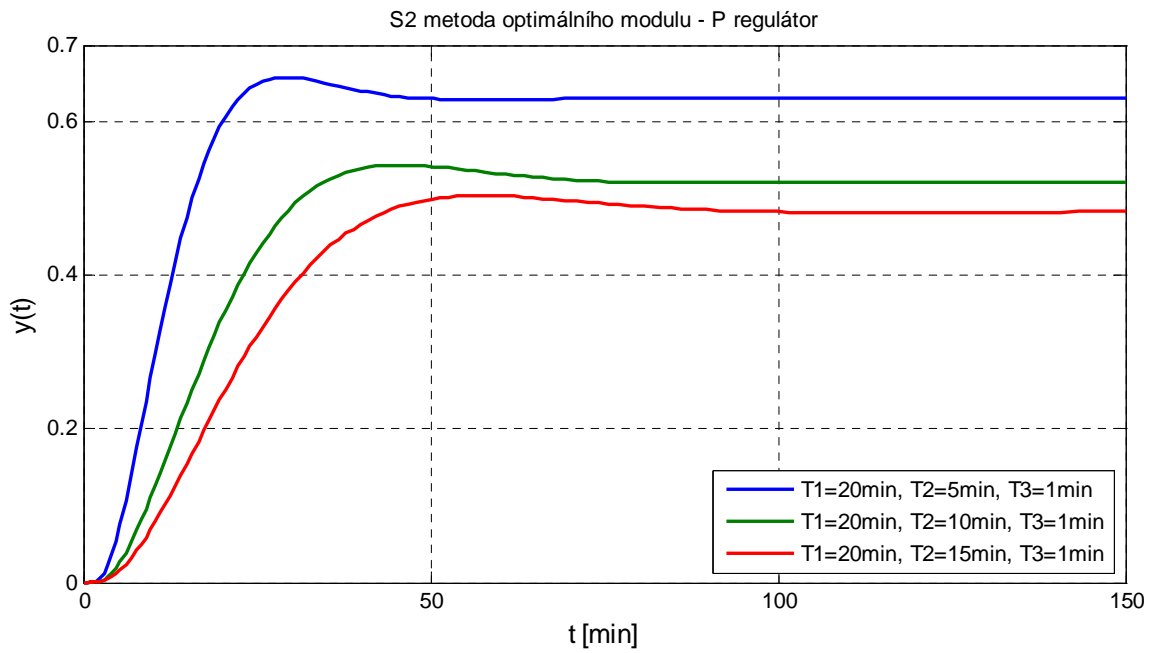
Porovnání bylo provedeno u P a PID regulátoru pro časové konstanty $T_1 = 20 \text{ min}$, $T_2 = 5 \text{ min}$ a $T_3 = 1 \text{ min}$. P regulátor navržený metodou optimálního modulu má sice malý relativní překmit, ale velkou regulační odchylku, metodou kritických parametrů má největší relativní překmit i nejdelší dobu regulace, při nejmenší trvalé regulační odchylce a metodou čtvrtinového tlumení menší relativní překmit i kratší dobu regulace než metoda kritických parametrů.

Největší relativní překmit je u PID regulátoru navrženého metodou kritických parametrů. Nejmenší doba regulace je u metody čtvrtinového tlumení a relativní překmit je srovnatelný s metodou optimálního modulu.

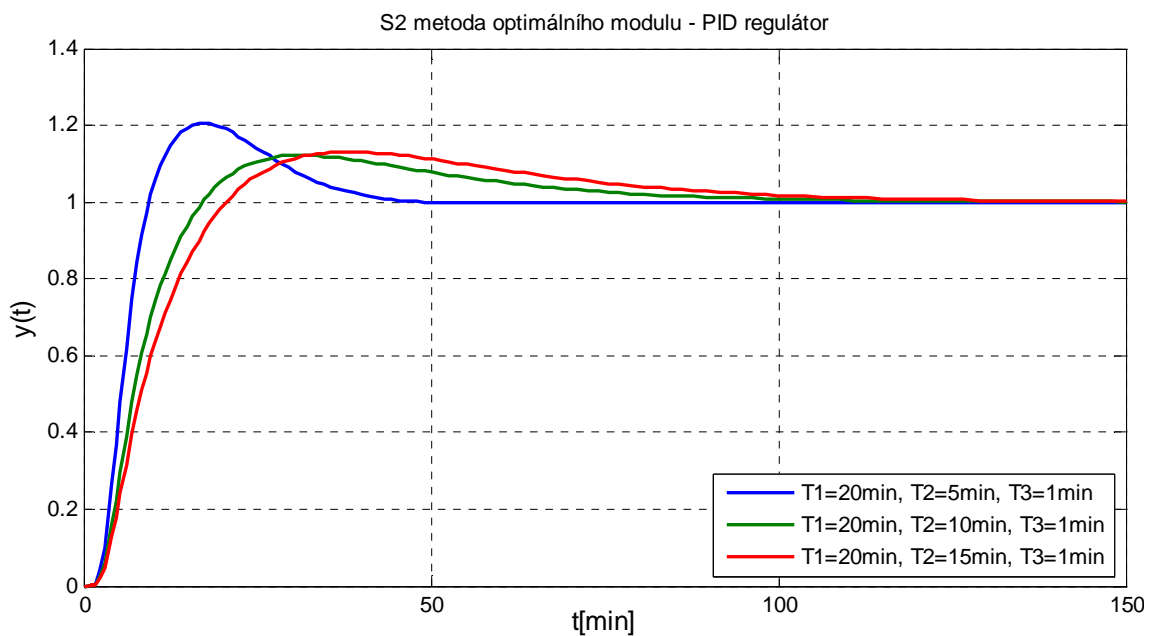
Všechny odečtené hodnoty jsou uvedeny v tab.15.

S2		$T_1 = 20 \text{ min}, T_2 = 5 \text{ min}, T_3 = 1 \text{ min}$			$T_1 = 20 \text{ min}, T_2 = 10 \text{ min}, T_3 = 1 \text{ min}$			$T_1 = 20 \text{ min}, T_2 = 15 \text{ min}, T_3 = 1 \text{ min}$		
		O.M.	K.P.	Č.T.	O.M.	K.P.	Č.T.	O.M.	K.P.	Č.T.
P	t_r	20,00	60,85	43,40	30,70	90,60	61,30	38,60	104,60	73,20
	Δy_{\max}	4,44	62,50	48,67	4,41	67,30	48,68	4,35	70,00	49,75
	$y(\infty)$	0,63	0,94	0,92	0,52	0,95	0,91	0,48	0,95	0,91
PI	t_r	23,70	nest.	64,10	63,90	nest.	91,30	82,40	nest.	109,80
	Δy_{\max}	4,90	nest.	59,40	5,70	nest.	58,60	5,80	nest.	60,80
	$y(\infty)$	1	nest.	1	1	nest.	1	1	nest.	1
PD	t_r	18,40	30,90	-	33,50	41,50	-	39,90	59,10	-
	Δy_{\max}	0	38,15	-	0	42,80	-	0	45,10	-
	$y(\infty)$	0,91	0,93	-	0,91	0,93	-	0,93	0,94	-
PID	t_r	34,00	35,45	28,30	61,00	47,10	34,60	75,10	63,60	36,80
	Δy_{\max}	20,70	70,40	22,60	12,20	72,20	24,30	13,10	73,50	27,60
	$y(\infty)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1

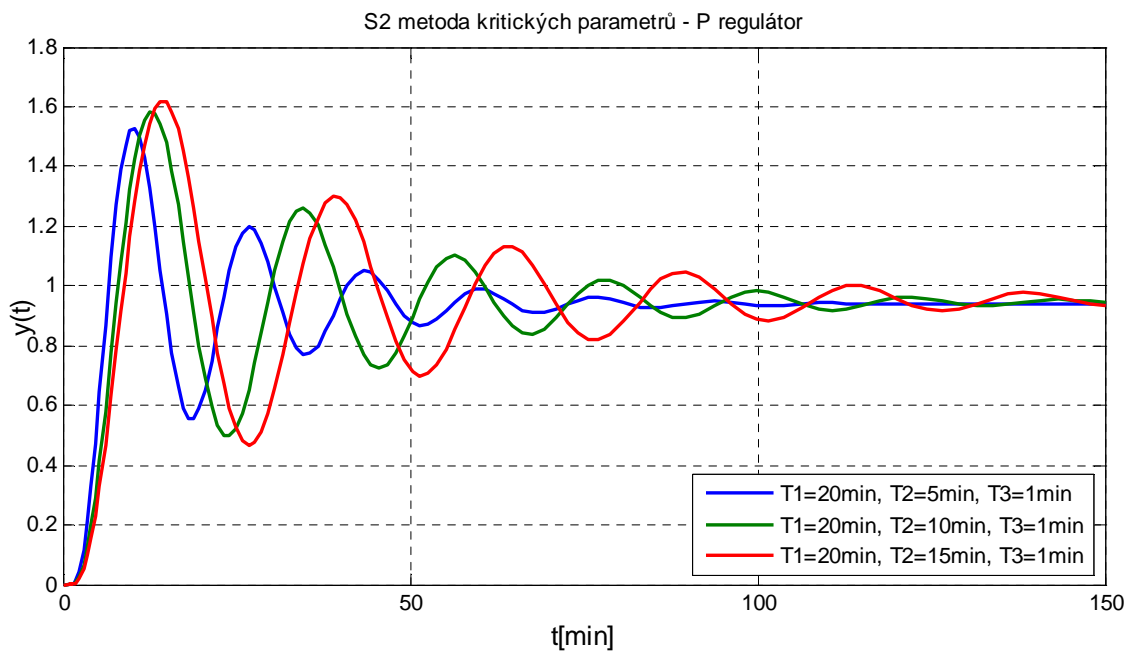
Tab. 15 Vyhodnocení soustavy S2



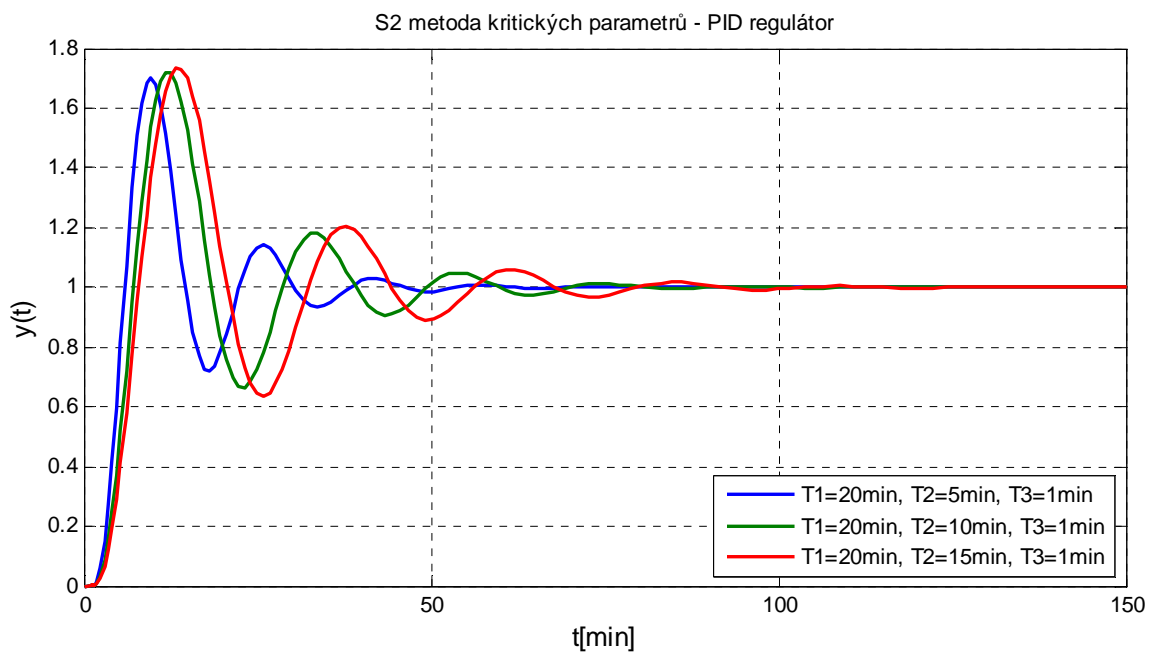
Obr.13 Soustava S2 metoda optimálního modulu – P regulátor.



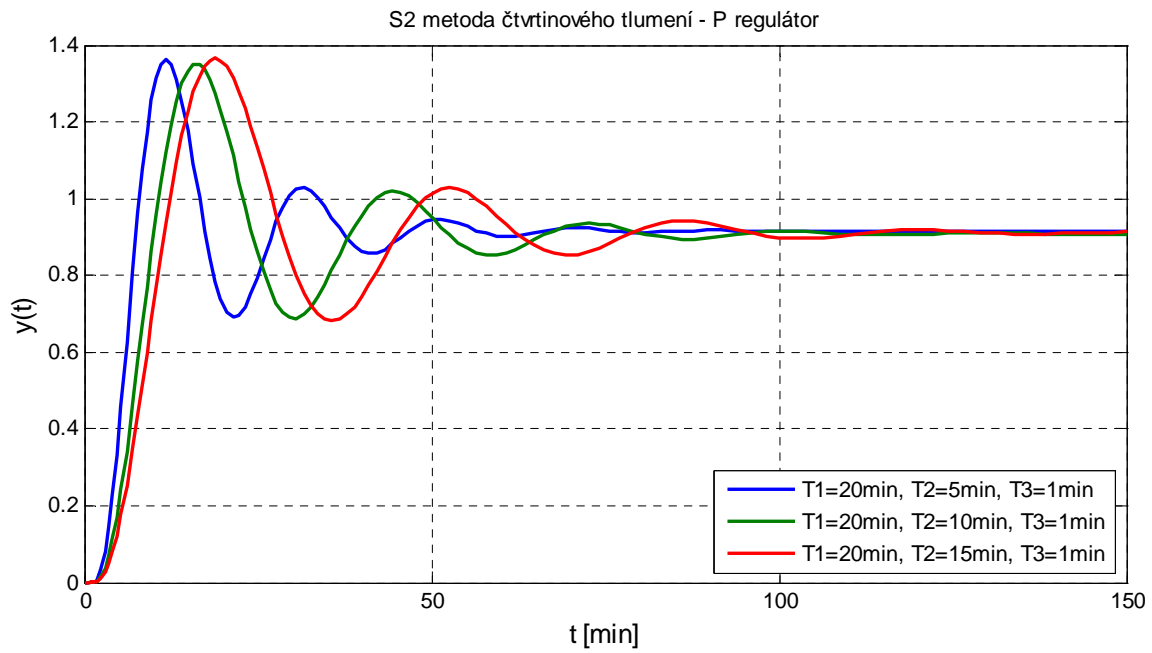
Obr.14 Soustava S2 metoda optimálního modulu – PID regulátor.



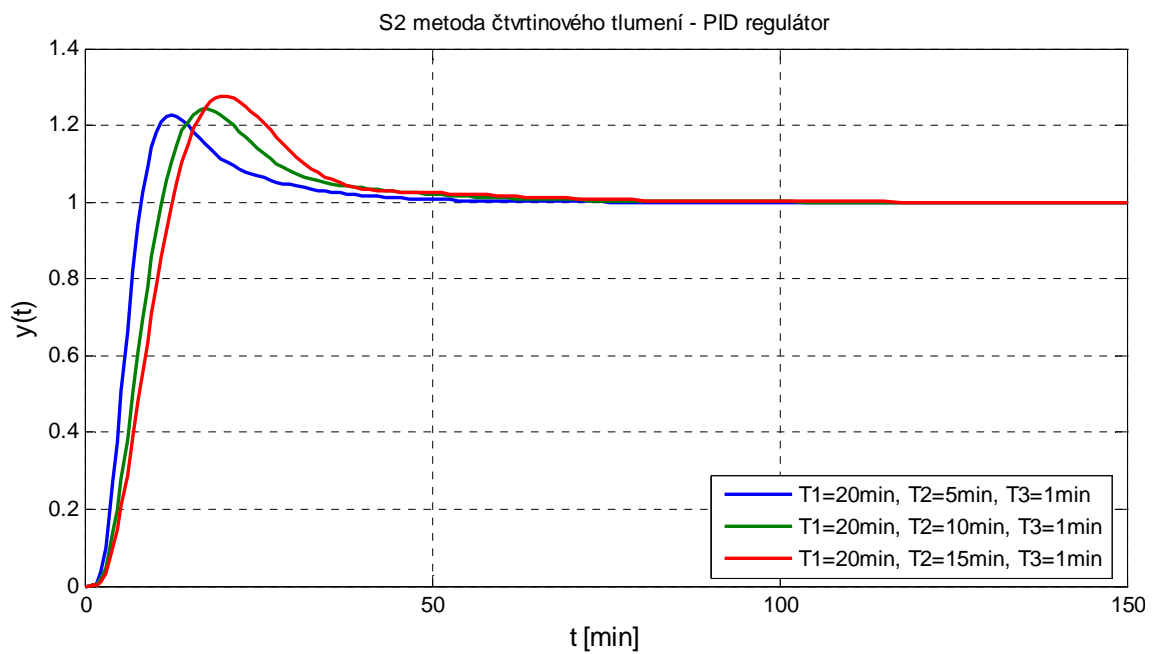
Obr.15 Soustava S2 metoda kritických parametrů – P regulátor.



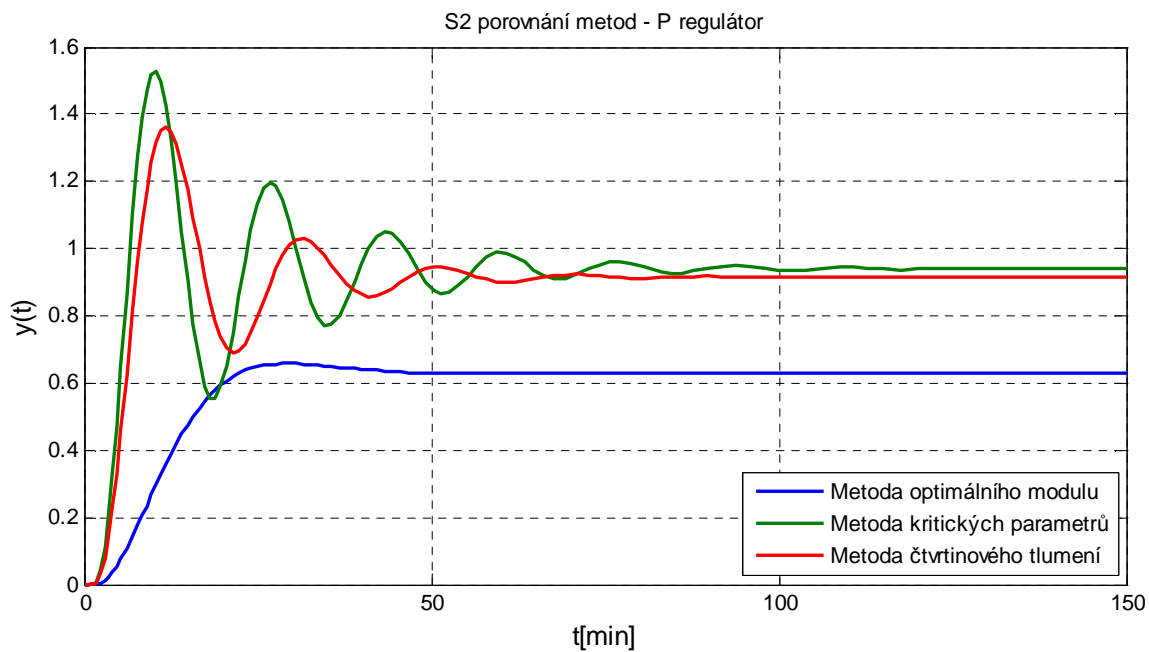
Obr.16 Soustava S2 metoda kritických parametrů – PID regulátor.



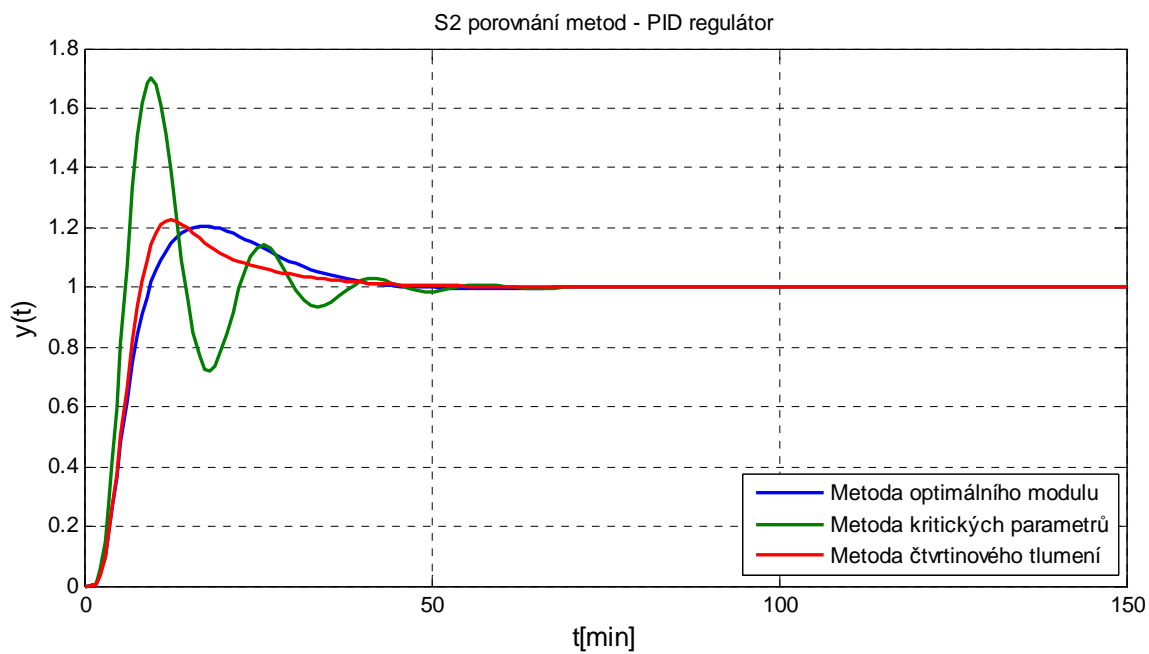
Obr.17 Soustava S2 metoda čtvrtinového tlumení – P regulátor.



Obr.18 Soustava S2 metoda čtvrtinového tlumení – PID regulátor.



Obr.19 Porovnání metod pro soustavu S2 – P regulátor.



Obr.20 Porovnání metod pro soustavu S2 – PID regulátor.

6.3 Vyhodnocení soustavy S3

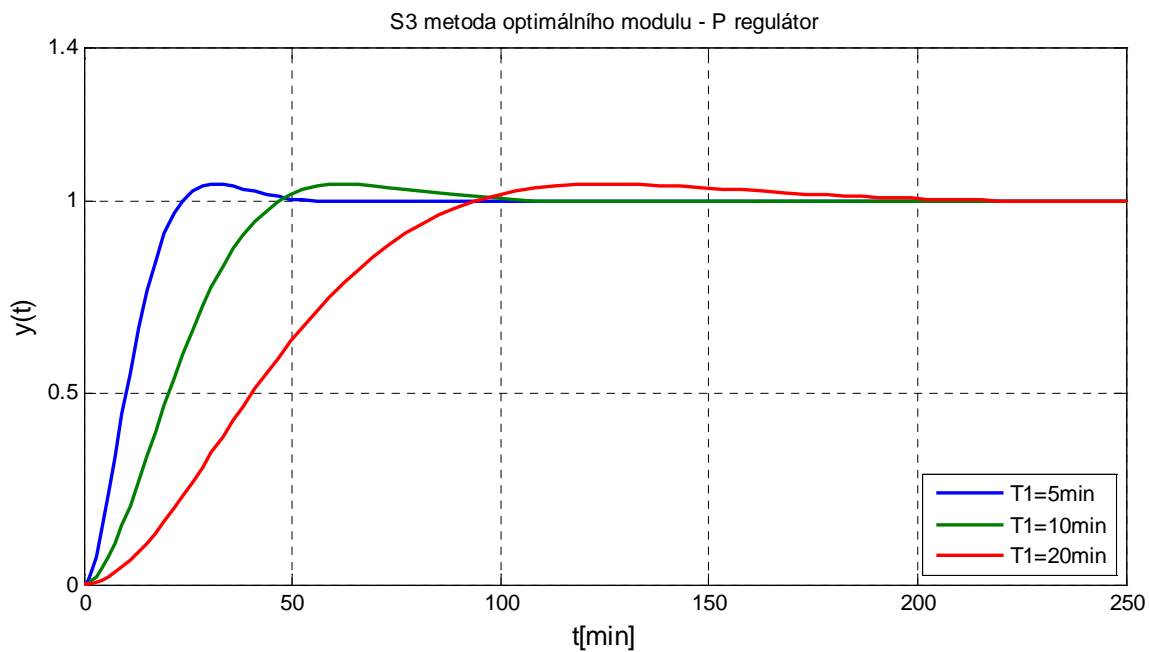
Metodou optimálního modulu byl navržen pouze P regulátor a metodou čtvrtinového tlumení P, PI a PID regulátor. Jelikož se jedná o integrační soustavu neměl žádný navržený regulátor trvalou regulační odchylku. Zvyšování časové konstanty mělo za následek spíše prodlužování doby regulace a na relativní překmit vliv nemělo.

Při porovnání P regulátoru pro $T_1 = 5 \text{ min}$ měly doby regulace téměř stejnou velikost, jen regulátor navržený metodou čtvrtinového tlumení měl mnohem větší relativní překmit.

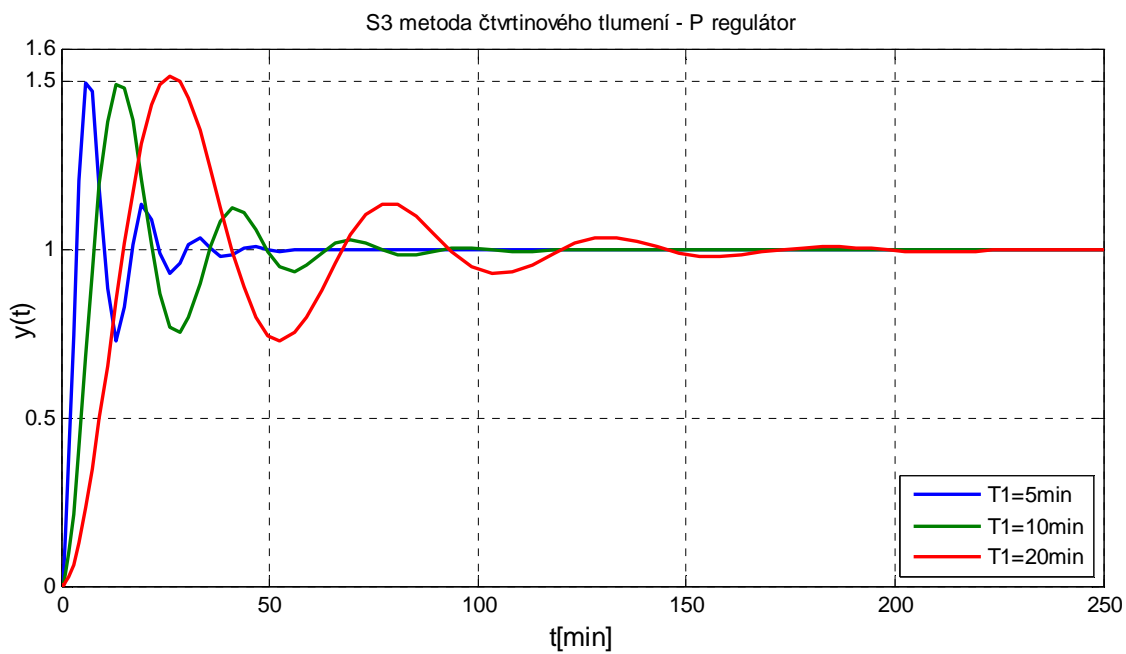
Všechny odečtené hodnoty jsou uvedeny v tab.16.

S3		$T_1 = 5 \text{ min}$		$T_1 = 10 \text{ min}$		$T_1 = 20 \text{ min}$	
		O.M.	Č.T.	O.M.	Č.T.	O.M.	Č.T.
P	t_r	21,80	28,90	42,50	59,00	83,90	112,70
	Δy_{\max}	4,30	51,90	4,30	50,00	4,30	51,80
	$y(\infty)$	1	1	1	1	1	1
PI	t_r	-	48,90	-	88,10	-	192,50
	Δy_{\max}	-	73,90	-	70,00	-	73,30
	$y(\infty)$	-	1	-	1	-	1
PID	t_r	-	16,20	-	35,80	-	53,40
	Δy_{\max}	-	30,20	-	28,40	-	36,30
	$y(\infty)$	-	1	-	1	-	1

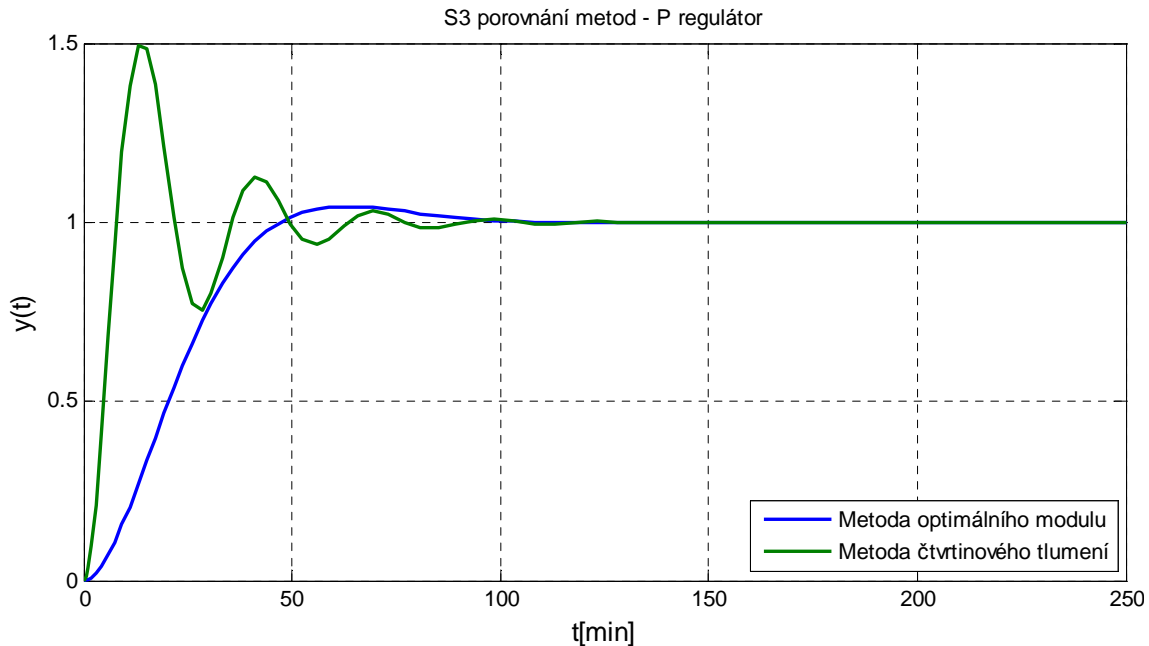
Tab. 16 Vyhodnocení soustavy S3



Obr.21 Soustava S3 metoda optimálního modulu – P regulátor.



Obr.22 Soustava S3 metoda čtvrtinového tlumení – P regulátor.



Obr.23 Soustava S3 porovnání metod – P regulátor.

6.4 Vyhodnocení soustavy S4

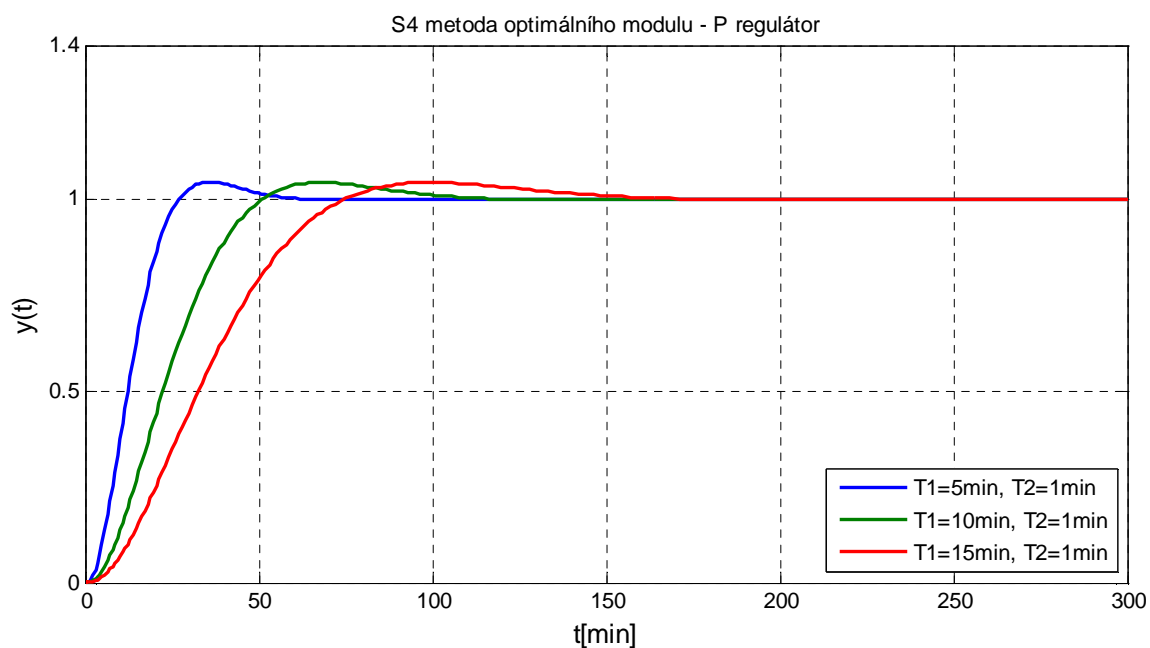
Metodou optimálního modulu byly navrženy P a PD regulátor, metodou kritických parametrů P, PI, PD a PID regulátor a metodou čtvrtinového tlumení P, PI a PID regulátor. Podobně jako u předcházející soustavy mělo zvyšování časové konstanty vliv především na prodloužení doby regulace, než na relativní překmit, který se měnil jen minimálně. Trvalá regulační odchylka byla také nulová. PI regulátor navržený metodou kritických parametrů měl nestabilní průběh.

Porovnání bylo realizováno pro P a PID regulátor s časovými konstantami $T_1 = 5$ min a $T_2 = 1$ min. P regulátor navržený metodou optimálního modulu má nejmenší dobu regulace i relativní překmit, metodou kritických parametrů největší dobu regulace i relativní překmit. Metoda čtvrtinového tlumení tyto hodnoty zmenšuje, ale nedosahuje takových výsledků jako metoda optimálního modulu. Porovnání PID regulátorů vychází lépe pro regulátor navržený metodou čtvrtinového tlumení, neboť poskytuje výrazně menší relativní překmit i kratší dobu regulace než regulátor navržený metodou kritických parametrů.

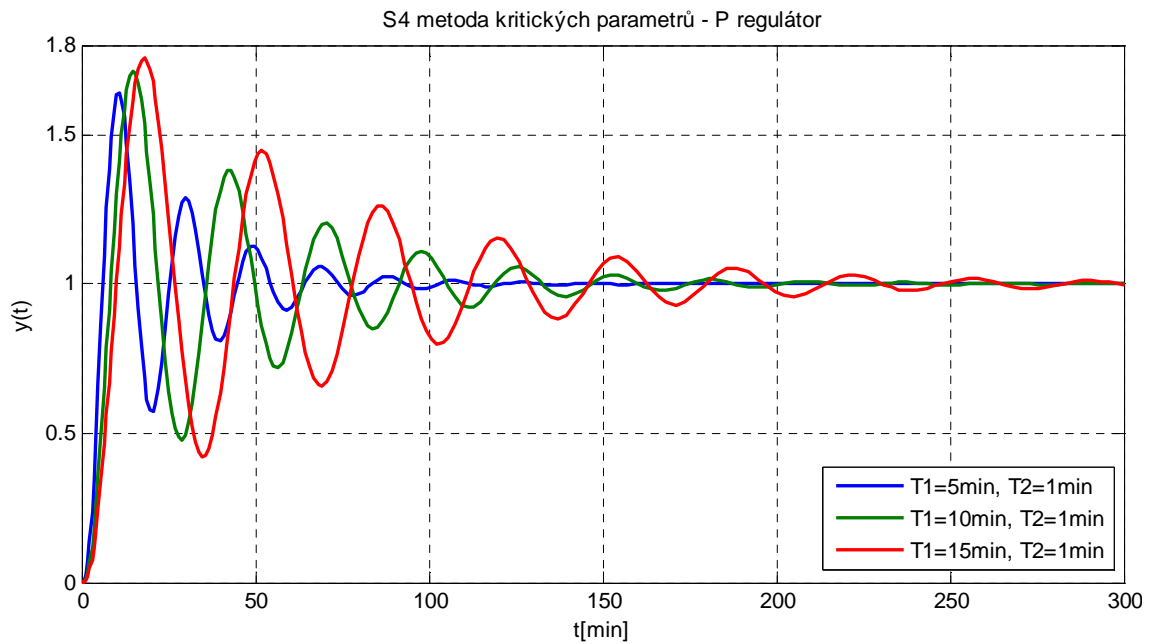
Všechny odečtené hodnoty jsou uvedeny v tab.17.

S4		T ₁ = 5min, T ₂ =1min			T ₁ = 10min, T ₂ =1min			T ₁ = 15min, T ₂ =1min		
		O.M.	K.P.	Č.T.	O.M.	K.P.	Č.T.	O.M.	K.P.	Č.T.
P	t _r	25,00	71,10	51,80	46,00	128,40	84,10	66,80	190,30	114,70
	Δy _{max}	4,30	64,00	47,50	4,20	71,30	49,50	4,20	75,50	49,80
	y(∞)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PI	t _r	-	nest.	78,20	-	nest.	126,30	-	nest.	192,50
	Δy _{max}	-	nest.	72,00	-	nest.	72,50	-	nest.	72,10
	y(∞)	-	nest.	1	-	nest.	1	-	nest.	1
PD	t _r	18,50	36,20	-	33,50	53,40	-	48,50	81,30	-
	Δy _{max}	0	38,50	-	0	45,20	-	0	49,10	-
	y(∞)	1	1	-	1	1	-	1	1	-
PID	t _r	-	41,70	36,40	-	71,20	50,00	-	101,60	65,90
	Δy _{max}	-	75,90	28,30	-	78,00	31,60	-	79,90	32,00
	y(∞)	-	1	1	-	1	1	-	1	1

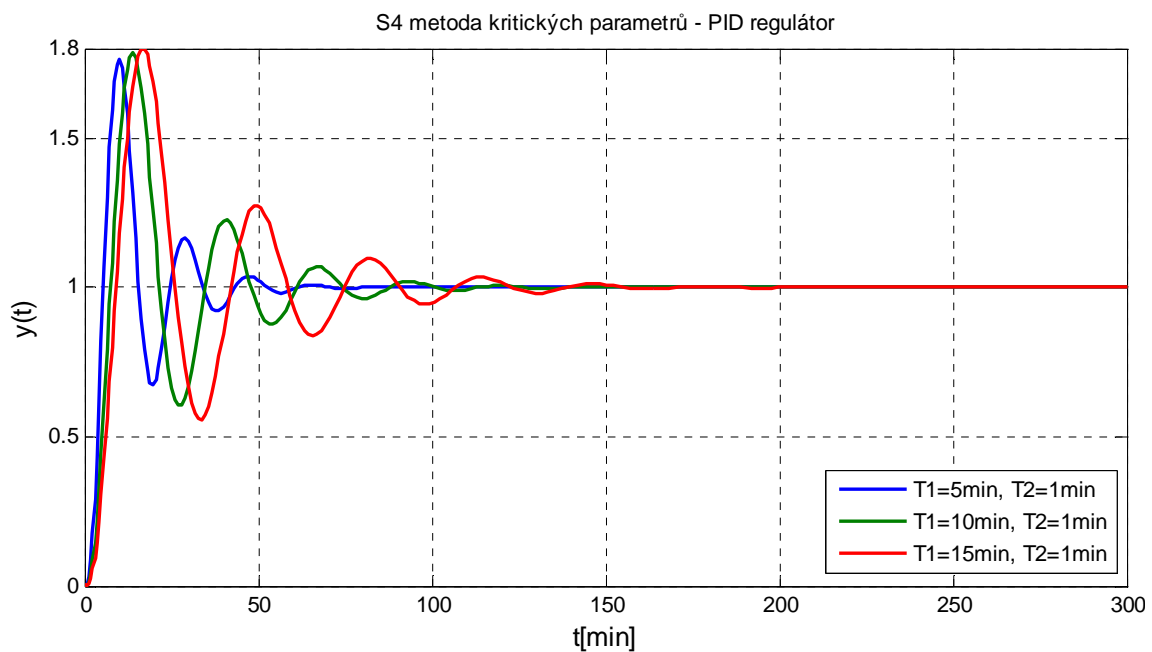
Tab. 17 Vyhodnocení soustavy S4



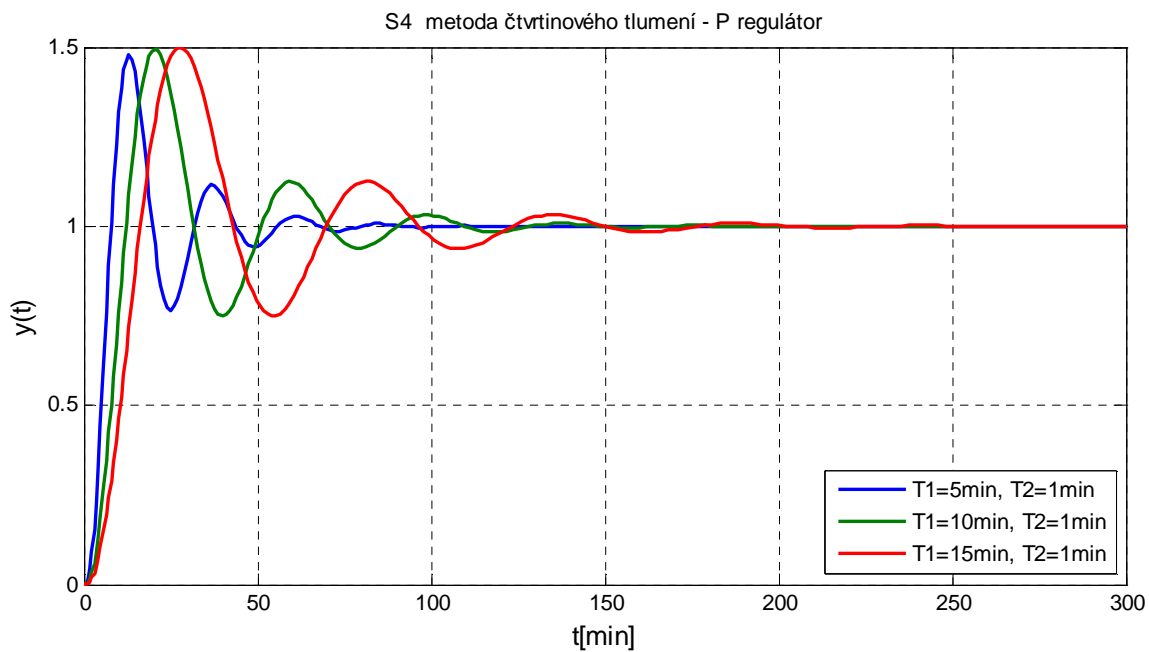
Obr.24 Soustava S4 metoda optimálního modulu – P regulátor.



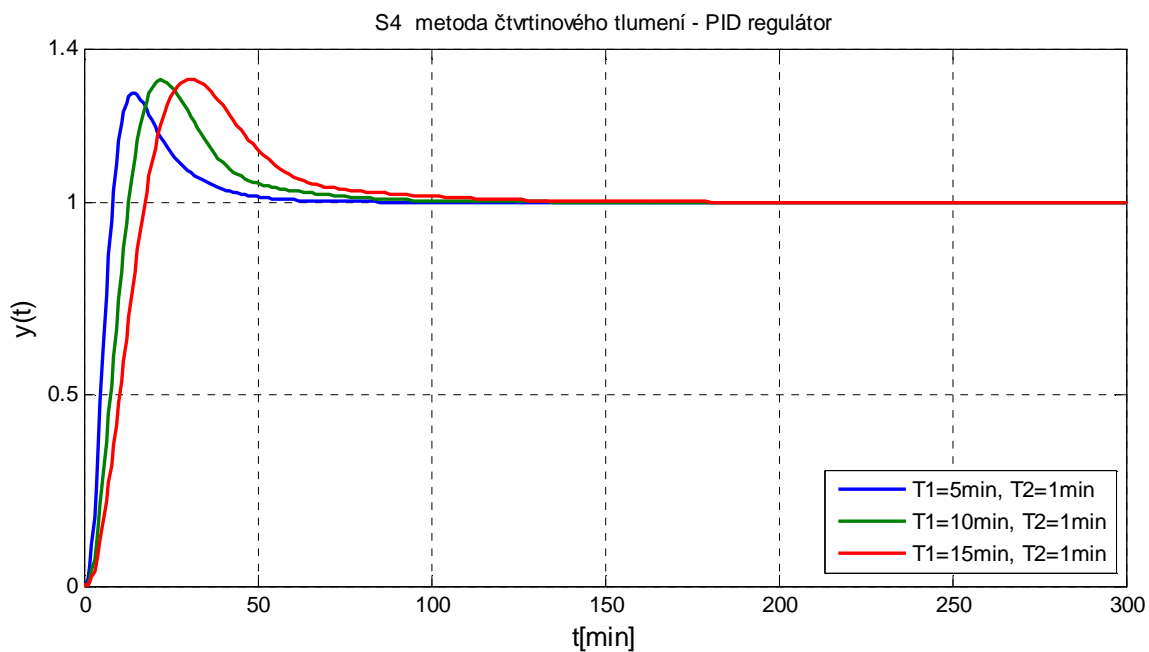
Obr.25 Soustava S4 metoda kritických parametrů – P regulátor.



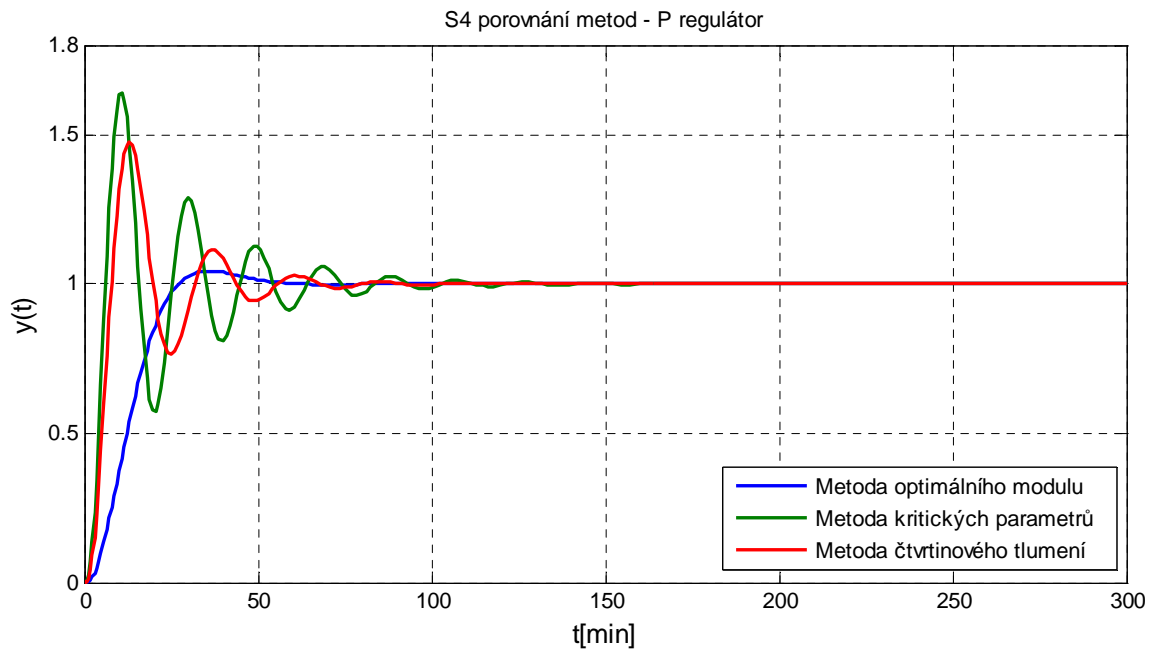
Obr.26 Soustava S4 metoda kritických parametrů – PID regulátor.



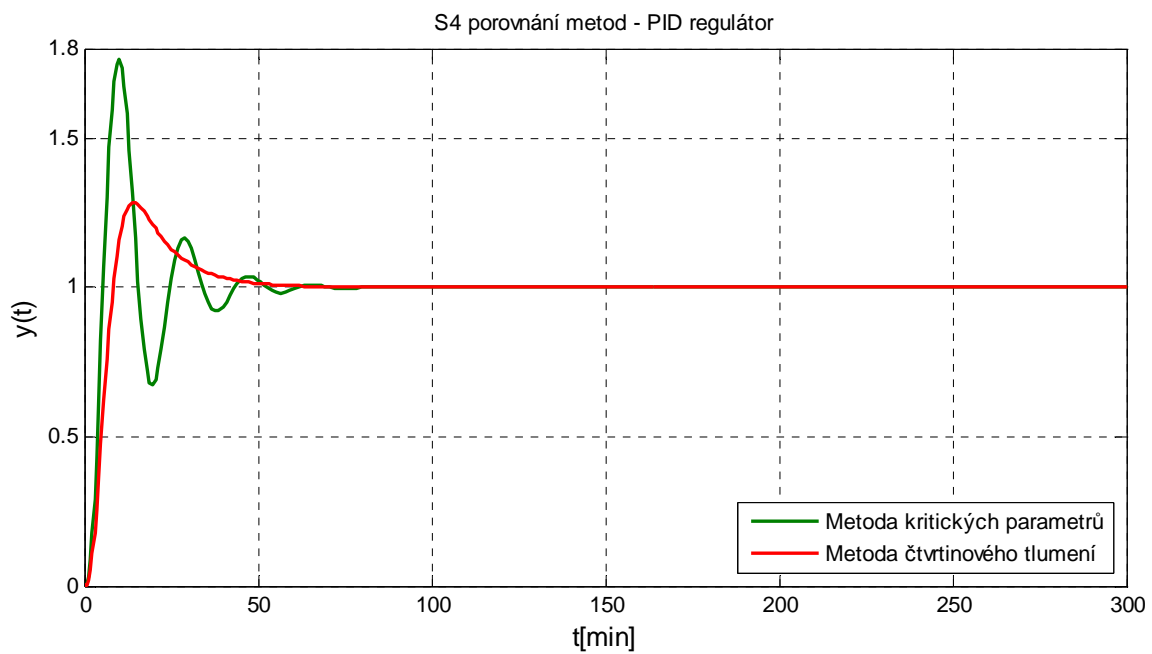
Obr.27 Soustava S4 metoda čtvrtinového tlumení – P regulátor.



Obr.28 Soustava S4 metoda čtvrtinového tlumení – PID regulátor.



Obr.29 Soustava S4 porovnání metod – P regulátor.



Obr.30 Soustava S4 porovnání metod – PID regulátor.

7 ZÁVĚR

Úlohou této práce bylo popsat některé metody návrhu regulátorů a aplikovat je na proporcionální a integrační soustavy s různě velkými časovými konstantami.

V kapitolách 2 a 3 byly shrnuty základní znalosti o regulačním obvodu, regulátorech a kvalitě regulace. Ty jsou nutné k pochopení souvislostí při návrhu parametrů regulátorů.

V kapitole 4 jsou popsány metody návrhu parametrů regulátorů. Ziegler-Nicholsovi metody kritických parametrů a čtvrtinového tlumení a metoda optimálního modulu jsou dále rozvedeny a je ukázán způsob výpočtu či stanovení parametrů regulátorů.

V kapitole 5 jsou výše jmenované metody aplikovány na dvě proporcionální a integrační soustavy. Pro názornost je uveden jen výpočet pro jeden regulátor. Mimo to bylo provedeno nespočet výpočtů pro různé regulátory a regulované soustavy s rozdílnými časovými konstantami. Zde jsou uvedeny jen výsledky těchto výpočtů. V programu Matlab-Simulink byly poté sestaveny modely regulačních obvodů a byly použity vypočtené parametry regulátorů. Výstupem simulací byly přechodové charakteristiky. Jejich množství bylo opět velké a jsou zde uvedeny jen vybrané.

V kapitole 6 jsou z přechodových charakteristik odečteny doba regulace, maximální překmit a hodnota ustálené veličiny. Tyto hodnoty byly shrnuty do tabulek a vyhodnoceny v závislosti na zvyšování časových konstant. Dále byly metody mezi sebou porovnány.

Metoda optimálního modulu vykazovala dobré průběhy regulačního pochodu, kdy měla nejmenší relativní překmit a nejkratší dobu regulace. Pro P regulátor byla trvalá regulační odchylka největší ze všech metod. Navíc u některých soustav nebylo možné stanovit parametry pro všechny typy regulátorů.

Nastavení parametrů podle Ziegler-Nicholsovi metody kritických parametrů je jednoduché a v praxi používané. Metodu nebylo možné použít pro soustavy se setrvačností druhého řádu. Přechodové charakteristiky měli největší relativní překmity i nejdelší doby regulace. PI regulátor nebylo možné navrhnout z důvodu rozkmitání obvodu za hranicí stability.

Ziegler-Nicholsovi metoda čtvrtinového tlumení měla stabilní průběhy regulačního pochodu. Bylo ji možné aplikovat na všechny soustavy a snižovala relativní překmit i zkracovala dobu regulace oproti metodě kritických parametrů. Nevýhodou je odečítání parametrů regulované soustavy z jejího průběhu a zanesení chyb odečtu do výsledných hodnot.

Vhodnost jednotlivých metod závisí na požadavcích regulačních obvodů a nelze proto říci, která metody je univerzálně použitelná. Pro soustavy zvolené v této práci bych přesto hodnotil jako nejhodnější Ziegler-Nicholsovu metodu čtvrtinového tlumení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. 2. vyd. Praha: Nakladatelství BEN-technická literatura, 2009. 664 s. ISBN 80-7300-148-9.
- [2] ŠULC, Bohumil; VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5.
- [3] ŠVARC, Ivan; ŠEDA, Miloš; VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Automatické řízení*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 324 s. ISBN 978-80-214-3491-2.
- [4] ŠVARC, Ivan. *Automatizace-automatické řízení*. 1. vyd. Brno: CERM, 2002.262 s. ISBN 80-214-2087-1.
- [5] VÍTEČKOVÁ, Miluše; VÍTEČEK, Antonín. *Základy automatické regulace*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. 198 s. ISBN 80-248-1068-9.
- [6] KUPKA, Libor. *Matlab & Simulink* [online].červen 2008. Dostupné z: <http://www.mti.tul.cz/files/zky/MATLABaSimulink.pdf>
- [7] MODRLÁK, Osvald. *Syntéza regulačních obvodů* [online]. 23.8.2004 Dostupné z: http://www.fm.vslib.cz/~krtsub/fm/tr1/tar1_syn.pdf

PŘÍLOHY

Součástí této práce je CD obsahující:

- Bakalářská práce ve formátu Adobe Acrobat (PDF)