ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Podpora výuky řídicí techniky
Bakalářská práce

Vedoucí práce : Ing. Jaroslav Honců, CSc.
Student : Martin Ševčík

Datum : červen 2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 12.6.2009 Martin Ševčík

ANOTACE

Tato práce je zaměřena na tepelnou soustavu, kterou řídí PID regulátor AC10. Seznámíme se s principem identifikací a různých návrhů PID regulátorů. Zároveň si zde ukážeme několik příkladů, které budou sloužit studentům jako domácí příprava.

Také si zde uvedeme několik úloh, které budou realizovány na reálném přípravku, s vyhotovením správného postupu včetně ukázky grafů. Tyto úlohy jsou zaměřeny na identifikaci a návrh jednoduchých PID regulátorů.

ANNOTATION

This labour is focused on heating system, which is controled by PID controller AC10. I try to introduce you with principle of identication and different kinds of design of PID controllers. Of course there will be shown few examples of calculations which will be used for students like homeworks.

In labor will be shown few exercises, which will be realized on real model with documentation with correct order of steps including graphs. These exercises are focused on identification and design of simple PID controllers.

Obsah

1 Úvod ... 2
2 Vnější popis spojitých lineárních systémů ... 3
2.1 Vnější popis systému diferenciální rovnicí ... 3
2.2 Přenos systému v Laplaceově transformaci ... 4
2.3 Přechodová charakteristika systému ... 5
3 PID regulátory ... 8
3.1 Regulační obvod ... 8
3.2 Regulátory ... 9
3.2.1 Proporcionální regulátor (regulátor P) ... 9
3.2.2 Regulátor I ... 9
3.2.3 Regulátor PI ... 10
3.2.4 Regulátor PD ... 12
3.2.5 Regulátor PID ... 13
4 Domácí příprava pro studenty ... 15
4.1 Identifikace ... 15
4.2 Návrh regulátorů ... 17
4.2.1 Návrh P-regulátoru pomocí GMK ... 17
4.2.2 Návrh PI-regulátoru pomocí frekvenční metody ... 18
4.2.3 Návrh PID-regulátoru pomocí frekvenční metody ... 19
5 Popis soustavy ... 21
5.1 Topné zařízení ... 21
5.2 Digitální PID regulátor ... 22
5.3 Napájení topného zařízení ... 23
5.4 PID algoritmus ... 24
6 Laboratorní úlohy ... 25
6.1 Identifikace topného zařízení ... 25
6.2 Návrh P-regulátoru pomocí GMK ... 26
6.3 Návrh PID-regulátoru pomocí frekvenční metody k tepelné soustavě ... 27
6.4 Pokyny pro měření regulátorů: ... 28
7 Manuál PID-regulátoru AC10 ... 29
7.1 Multifunkční programovatelný regulátor AC10 ... 29
7.2 Jak se dostat do hlavního menu regulátoru AC10 ... 30
7.3 Nastavení konstant PID regulátoru ... 31
7.4 Problém s nastavením LSP ... 31
7.5 Nastavení hodnoty MSP ... 32
7.6 Popis panelu při měření ... 34
8 Závěr ... 35
9 Použitá literatura ... 36
10 Přílohy ... 37

1 Úvod

V tomto dokumentu se seznámíme s modelem tepelné soustavy od firmy Electtronica Veneta. Tento model se skládá ze tří samostatných částí, vzájemně propojených. První část modelu je topné zařízení, druhou částí modelu je napájení, PWM modulátor a snímač teploty v podobě termočlánku a třetí část modelu je digitální PID regulátor AC10.

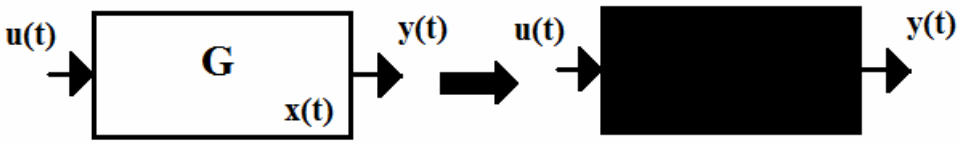
Hlavní částí tohoto dokumentu je identifikace topného zařízení a následný návrh PID regulátoru. Uvedeme si dvě metody návrhu PID regulátoru. První metodou bude geometrické místo kořenů a druhou bude frekvenční metoda. Každou z těchto dvou si napřed ukážeme teoreticky, na úlohách, které jsou připraveny pro studenty jako domácí příprava.

Studenti se v domácí přípravě seznámí s postupem identifikace a návrhu PID regulátoru. Zároveň se také dozví, jak by měla vypadat závěrečná zpráva, a seznámí se s ovládáním regulátoru AC10.

Pro studenty jsou připraveny tři úlohy (Identifikace, P-regulátor a PID-regulátor), které studenti budou na reálném přípravku měřit a následně vypracovávat zprávu. Závěrečné zprávy jsou zde uvedeny také, ale ty jsou určeny především pro vyučujícího, aby mohl snáze kontrolovat výsledky studentů.

2 Vnější popis spojitých lineárních systémů

Vnější popis systému je vyjádřením dynamických vlastností systému relací mezi jeho vstupem a výstupem. Při vnějším popisu je systém na obr. 2.1 považován za černou skřínku, kdy známe průběh jeho vstupní veličiny *u(t)* a výstupní veličiny *y(t)*, ale neznáme jeho vnitřní stavy *x(t)*. Nevíme tedy, "co se děje uvnitř".



Obr. 2.1 Vnější popis dynamického systému

Omezíme-li se na spojité lineární ***SISO*** systémy (***S***ingle ***I***nput ***S***ingle ***O***utput = jeden vstup a jeden výstup), může být relace mezi vstupem a výstupem systému vyjádřena:

a) diferenciální rovnicí
b) přenosem v Laplaceově transformaci
c) přechodovou charakteristikou

Věnujme nyní pozornost jednotlivým možnostem vnějšího popisu.

2.1 Vnější popis systému diferenciální rovnicí

Chování dynamických systémů má kauzální charakter, tzn., že chování systémů – tedy časový vývoj výstupní veličiny – je příčinným následkem působení vstupních veličin a je ovlivněno jeho počátečním stavem. U regulovaných systémů je vstupní veličinou požadovaná hodnota.

Chování spojitého systému jako řešení diferenciální rovnice s různými počátečními podmínkami, je základním způsobem určování chování systému, založeném na reprezentaci znalostí v diferenciálním tvaru. Výhodou je, že vyjádření řešení ve tvaru součtu obecného a partikulárního řešení diferenciální rovnice umožňuje vytvoření fyzikálního názoru na přechodný a vynucený pohyb systému jako předpokladu pro budoucí analýzu chování systému. V řadě praktických případů lze předpokládat, že je-li vstupem systému požadovaná veličina, je systém do zahájení řízení bez energie, tzn., že odpovídající diferenciální rovnice má nulové počáteční podmínky.

Poznamenejme, že v systémech s konečnou rychlostí šíření signálů reagují tyto systémy na změny vstupní veličiny s jistou časovou prodlevou T_d, kterou budeme označovat jako dopravní zpoždění.

Spojitý stacionární lineární SISO systém bez dopravního zpoždění ($T_d = 0$) je popsán diferenciální rovnicí:

$$a_n y^{(n)}(t) + \ldots + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + \ldots + b_o u(t) \qquad (2.1)$$

kde:	a_i, b_i	konstantní koeficienty
	$u(t)$ resp. $y(t)$	vstupní resp. výstupní veličina
	n resp. n-m	řád systému resp. relativní řád systému

Aby byl systém fyzikálně realizovatelný, musí platit ***podmínka fyzikální realizovatelnosti***:

- slabá … $n \geq m$
- silná … $n > m$

Podmínka fyzikální realizovatelnosti je podmínka kauzality. Kdyby byl stupeň čitatele vyšší než stupeň jmenovatele, vznikla by odezva na budicí signál dříve, nežli samotný budicí signál. To je u reálných fyzikálních systémů nemožné!

K řešení diferenciální rovnice je nezbytná znalost průběhu vstupní veličiny $u(t), t > 0$ a počátečních podmínek rovnice s konstantními koeficienty (2.1) je dáno součtem obecného řešení $y_H(t)$ homogenní rovnice (tedy rovnice (2.1) s nulovou pravou stanou) a partikulárního řešení $y_P(t)$:

$$y(t) = y_H(t) + y_P(t).$$

Fyzikálně můžeme obecné řešení chápat jako přechodný pohyb vyzvaný počátečním stavem a partikulárním řešení jako pohyb vynucený řídicím vstupem.

Obecné řešení $y_H(t)$ má tvar:

$$y_H(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + ... + C_n e^{p_n t} = \sum_{i=0}^{n} C_i e^{p_i t}, \tag{2.2}$$

kde $C_1, C_2, ..., C_n$ jsou konstanty určované z počátečních podmínek a $p_1, p_2, ..., p_n$ jsou kořeny charakteristické rovnice:

$$a(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + ... + a_1 s + a_0 = 0. \tag{2.3}$$

Partikulární řešení $y_p(t)$ je určeno pravou stranou rovnice (2.1) a závisí na typu funkce $u(t)$.

Spojitý stacionární lineární SISO systém s dopravním zpožděním ($T_d \neq 0$) je popsán diferenciální rovnicí:

$$a_n y^{(n)}(t) + ... + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t - T_d) + ... + b_0 u(t - T_d) \tag{2.4}$$

2.2 Přenos systému v Laplaceově transformaci

Přenos v Laplaceově transformaci je definován jako podíl Laplaceova obrazu výstupní veličiny ku Laplaceově obrazu vstupní veličiny systému za nulových počátečních podmínek.

Systém popsaný diferenciální rovnicí (2.1), tedy ***spojitý lineární SISO systém bez dopravního zpoždění,*** má přenos v Laplaceově transformaci:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_m s^m + ... + b_0}{a_n s^n + ... + a_0} = \frac{b_m}{a_n} \frac{(s - n_1)(s - n_2)...(s - n_m)}{(s - p_1)(s - p_2)...(s - p_m)} = \\ &= \frac{b_m}{a_n} \frac{(1 - s\tau_1)(1 - s\tau_2)...(1 - s\tau_m)}{(1 - sT_1)(1 - sT_2)...(1 - sT_m)} \end{aligned} \tag{2.5}$$

kde:

$n_i, i = 1 \div m$	nuly přenosu
$p_i, i = 1 \div n$	póly přenosu
$\tau_i = -1/n_i, i = 1 \div m$	časové konstanty činitele
$T_i = -1/p_i, i = 1 \div n$	časové konstanty jmenovatele
n	řád systému

Podmínky fyzikální realizovatelnosti se shodují s podmínkami při popisu diferenciálními rovnicemi. Zvláštní postavení mezi systémy mají tzv. ***astatické systémy,*** popsané přenosovou funkcí:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \ldots + b_0}{s^i (a_n s^{n-1} + \ldots + a_i)} \tag{2.6}$$

Násobnost i nulového pólu těchto systémů nazýváme řádem astatismu. Astatické systémy, mají vždy integrační charakter.

Spojitý stacionární lineární SISO systém s dopravním zpožděním popsaný diferenciální rovnicí (2.4) má přenosovou funkci:

$$G_d(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \ldots + b_0}{a_n s^n + \ldots + a_0} \cdot e^{-T_d s} \tag{2.7}$$

Laplaceův obraz posunuté funkce můžeme odvodit přímo z definičního vztahu pro obraz v Laplaceově transformaci:

$$\begin{aligned} G_d(s) &= \int_0^\infty g(t - T_d) e^{-st} dt = \left| \frac{t^\bullet = t - T_d}{dt^\bullet = dt} \right| = \int_0^\infty g(t^\bullet) e^{-s(t^\bullet + T_d)} dt^\bullet = \\ &= e^{-sT_d} \int_0^\infty g(t^\bullet) e^{-st^\bullet} dt = e^{-sT_d} G(s) = \frac{b_m s^m + \ldots + b_0}{a_n s^n + \ldots + a_0} e^{-T_d s} \end{aligned} \tag{2.8}$$

Nejsou-li počáteční podmínky v diferenciálních rovnicích (2.1) resp. (2.4) nulové, není možné přenosovou funkci v Laplaceově transformaci odvodit, neboť za nenulových podmínek není přenos definován! V takovém případě můžeme pracovat pouze s Laplaceovým obrazem výstupní veličiny:

$$Y(s) = G(s)U(s) + G_P(s) \tag{2.9}$$

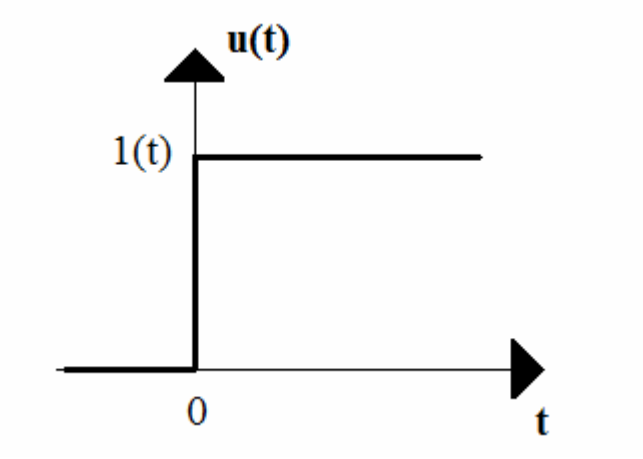
kde $G_P(s)$ je operátor počátečních podmínek a jeho výpočet vychází z věty o obrazu derivace:

$$L\left\{f^{(m)}(t)\right\} = s^m F(s) - \sum_{j=0}^{m-1} f^{(m-j-1)}(0^+) s^j \tag{2.10}$$

2.3 Přechodová charakteristika systému

Přechodová charakteristika je grafickým znázorněním přechodové funkce $h(t)$, která je odezvou systému na vstupní jednotkový skok $1(t)$ při nulových počátečních podmínkách na obr. 2.2. Jednotkový skok je definován vztahy:

$$\begin{aligned} 1(t) &= 0 \quad \text{pro } t < 0 \\ 1(t) &= 1 \quad \text{pro } t \geq 0 \end{aligned} \tag{2.11}$$



Obr. 2.2 Jednotkový skok

Laplaceův obraz jednotkového skoku je roven:

$$L\{1(t)\} = \frac{1}{s} \tag{2.12}$$

Laplaceův obraz $H(s)$ přechodové charakteristiky je roven:

$$Y(s) = U(s)G(s) = \frac{1}{s}G(s) = H(s) \tag{2.13}$$

a tedy přechodová charakteristika $h(t)$ v časové oblasti je:

$$h(t) = L^{-1}\{H(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{1}{s}G(s)\right\} = \int_0^t g(\tau)d\tau \tag{2.14}$$

Podle věty o počáteční hodnotě je ***počáteční hodnota přechodové charakteristiky v*** 0^+ rovna:

$$\lim_{t\to 0^+} h(t) = \lim_{s\to\infty} sH(s) = \lim_{s\to\infty} G(s) \lim_{s\to\infty} \frac{b_m s^m + \ldots + b_0}{a_n s^n + \ldots + a_0} \tag{2.15}$$

a nabývá tedy v bodě 0^+ hodnot:

a) $\frac{b_m}{a_n}$ pro $m = n$

b) 0 pro $n > m$

Obdobně podle věty o koncové hodnotě je ***ustálená hodnota přechodové charakteristiky pro*** $t \to \infty$ rovna:

$$\lim_{t\to\infty} h(t) = \lim_{s\to 0^+} sH(s) = \lim_{s\to 0^+} G(s) = \lim_{s\to 0^+} \frac{b_m s^m + \ldots + b_0}{a_n s^n + \ldots + a_0} \tag{2.16}$$

a pro $t \to \infty$ tedy nabývá hodnot:

a) $\frac{b_0}{a_0}$ pro $a_0 \neq 0$

b) $\pm\infty$ pro $a_0 = 0$

c) 0 např. pro $n = m, b_0 = 0$

Z uvedeného je patrné, že přechodová charakteristika statických systémů (ad a)) se ustálí na konečné nenulové hodnotě, zatímco u astatických systémů (ad b)) roste pro $t \to \infty$ nade všechny meze. Podle stupně astatismu se na konečné nenulové hodnotě ustálí rychlost (astatismus 1.řádu), zrychlení (astatismus 2.řádu), derivace zrychlení (astatismus 3.řádu) atd. Tyto systémy mají vždy integrační charakter.

U systémů s dopravním zpožděním T_d je přechodová charakteristika posunuta o hodnotu T_d doprava.

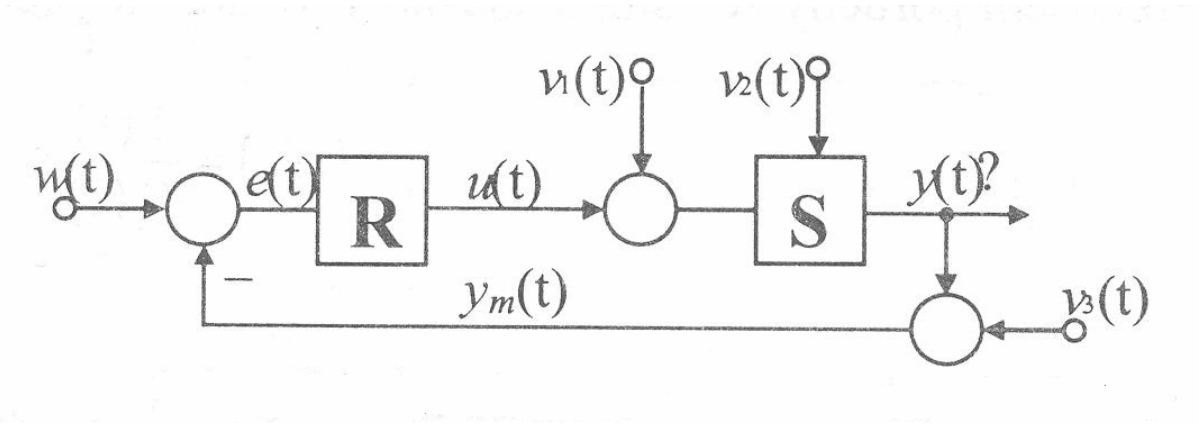
Text převzat z [4].

3 PID regulátory

3.1 Regulační obvod

Budeme uvažovat lineární spojitý jednorozměrný[1] t-invariantní[2] regulační obvod – viz schéma na obrázku 3.1. Ve schématu značí:

- $S(s)$ přenos regulované soustavy
- $R(s)$ přenos regulátoru
- $w(t)$ řídicí veličina (žádaná hodnota)
- $y(t)$ regulovaná veličina (skutečná hodnota)
- $y_m(t)$ výstup čidla regulované soustavy (měřená hodnota)
- $u(t)$ akční veličina regulátoru
- $e(t)$ regulační odchylka
- $v_1(t)$ porucha na vstupu regulované soustavy
- $v_2(t)$ porucha, vstupující do soustavy v libovolném místě
- $v_3(t)$ chyba měření



Obr. 3.1 Blokové schéma regulačního obvodu

Budou nás zajímat přenosy mezi jednotlivými vstupními veličinami a výstupem y regulované soustavy S nebo regulační odchylkou e na vstupu regulátoru R. Přenos sériové kombinace regulátoru R a regulované soustavy S na obr. 3.1 nazýváme *přenosem otevřené smyčky G(s)*.

$$G(s) = S(s) + R(s) \tag{3.1}$$

Přenos žádaná hodnota $w \rightarrow$ regulovaná veličina y nazýváme *přenosem řízení* $F_w(s)$.

$$F_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \tag{3.2}$$

Činitel přenosu řízení je tedy v regulačním obvodu stejný jako činitel přenosu otevřené smyčky a jmenovatel C(s) je dán součtem

$$C(s) = 1 + G(s) \tag{3.3}$$

[1] V angličtině SISO (jeden vstup, jeden výstup).
[2] S časově neproměnnými parametry

Účelem regulace je, aby řídicí a regulovaná veličina byly co nejvíce shodné, což platí pro $|G(s)| >> 1$. Pro $|G(s)| << 1$ je přenos řízení $F_w(s)$ přibližně roven přenosu otevřené smyčky $G(s)$ a vliv regulace se neuplatní.
Velmi zajímavý je přenos žádaná veličina $w \rightarrow$ odchylka e, tzv. *přenos odchylky*

$$F_e(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{1}{1+G(s)} \tag{3.4}$$

Přenos poruchy ze vstupu soustavy rozumíme přenos $v_1 \rightarrow y$

$$F_v(s) = \frac{Y(s)}{V_1(s)} = \frac{S(s)}{1+G(s)} \tag{3.5}$$

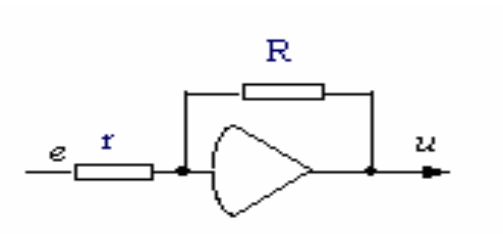
3.2 Regulátory

Budou nás zajímat regulátory s jedním vstupem (regulační odchylkou e) a jedním výstupem (akční veličinou regulátoru u).

3.2.1 Proporcionální regulátor (regulátor P)

je vlastně zesilovač, jehož dynamické vlastnosti se nijak výrazně neodrážejí v dynamice regulačního obvodu. Jeho přenos je $R(s) = k_p$ a jeho elektronická implementace je na obr. 3.2.1. Pro přenos platí:

$$k_p = -R/r \tag{3.6}$$

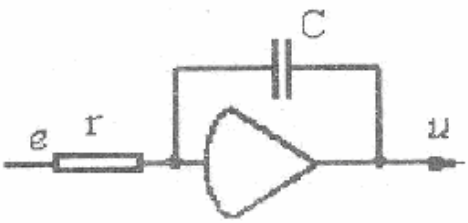


Obr. 3.2.1 Regulátor P

3.2.2 Regulátor I

je integrátor. Zvyšuje statickou přesnost regulačního obvodu, ale zhoršuje jeho dynamiku. Jeho elektronická implementace je na obr. 3.2.2 a pro jeho přenos platí :

$$R(s) = \frac{k_i}{s},\ k_i = -\frac{1}{rC} \tag{3.7}$$



Obr. 3.2.2 Regulátor I

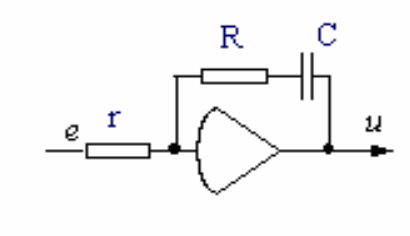
3.2.3 Regulátor PI

je kombinací obou dvou regulátorů. Jeho přenos je

$$R(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_i(T_i s + 1)}{s} = \frac{k_p(s + \omega_i)}{s}$$
$$T_i = \frac{k_p}{k_i}, \omega_i = \frac{1}{T_i} = \frac{k_i}{k_p} \tag{3.8}$$

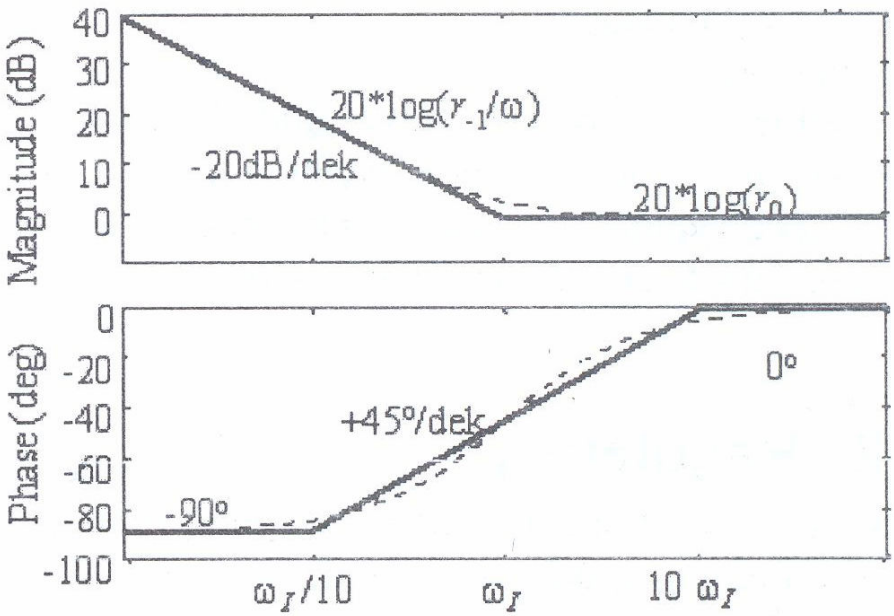
Pro konstanty přenosu v elektronické implementaci na obr. 3.2.3.1 platí :

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = -\frac{R + \frac{1}{sC}}{r} = -(\frac{R}{r} + \frac{1}{srC}) \Rightarrow k_p = -\frac{R}{r}, k_i = -\frac{1}{rC}, T_i = RC\,. \tag{3.9}$$



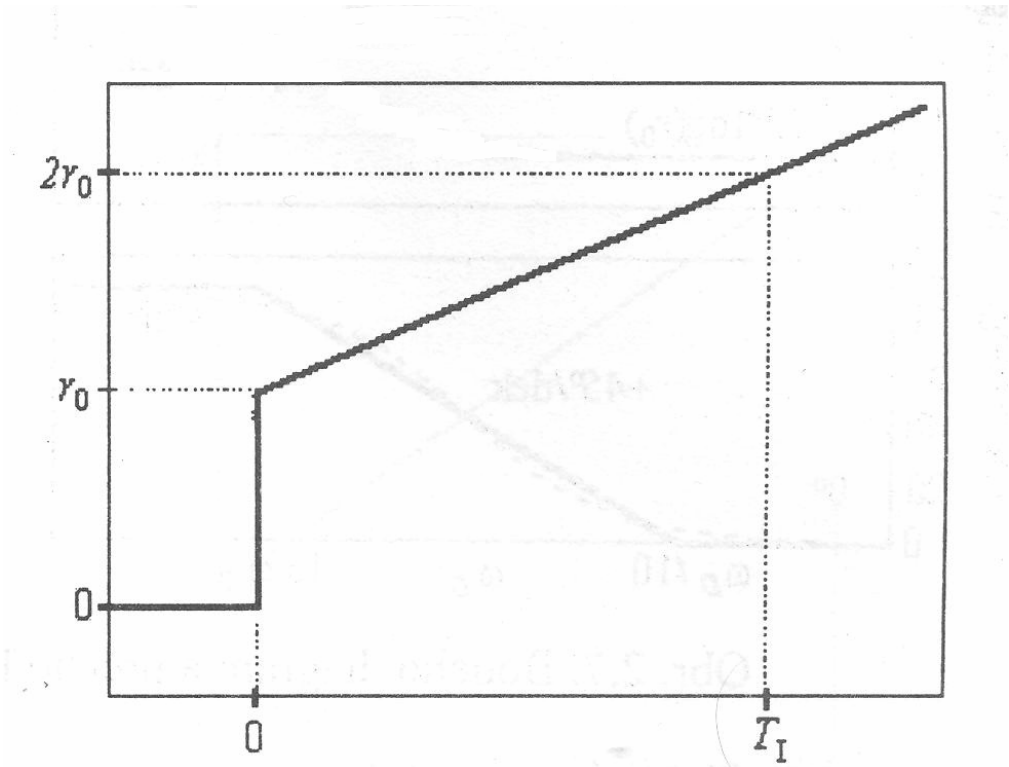
Obr. 3.2.3.1 Regulátor PI

Všimněme si, že integrační časová konstanta T_i je rovna vybíjecí časové konstantě $\tau = RC$ kapacitoru ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích (Bodeho diagram) je na obr. 3.2.3.2. Její modul má pro kruhové frekvence $\omega < \omega_i$ spád $-20dB/dek$, pro vyšší frekvence je pak vodorovnou čarou $|R(j\omega)| = 20\log(r_0)$. Fáze prochází od -90° pro $\omega < \omega_i/10$ do 0° pro $\omega > 10\omega_i$. Pro frekvenci $\omega = \omega_i$ má fázový úhel hodnotu -45°. Opravy mezi asymptotami a skutečným průběhem charakteristiky jsou +3dB v místě zlomu asymptot modulu $(\omega = \omega_i)$ a $0{,}1rad = 5{,}7^\circ$ v místech zlomů asymptot fáze $(\omega = \omega_i)/10$ a $(\omega = 10\omega_i)$.
Frekvenční charakteristika v komplexní rovině je součtem konstantního vektoru k_p a integračního průběhu $k_i/(j\omega)$.



Obr. 3.2.3.2 Bodeho diagram

Přechodová charakteristika na obr. 3.2.3.3 se skládá ze skoku k_p a rampy $k_i \cdot t$ a v čase $t = T_i$ prochází souřadnicemi $2k_p$.



Obr 3.2.3.3 Přechodová charakteristika regulátoru PI

3.2.4 Regulátor PD

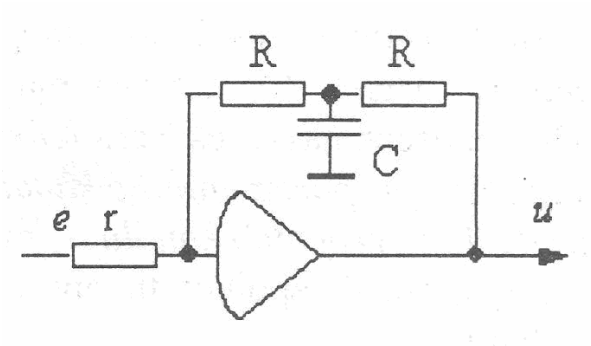
je určitým vylepšením regulátoru P. Vedle regulační odchylky přenáší i její derivaci a tím do výstupního signálu přidává informaci o časovém trendu odchylky. Jeho přenos je

$$R(s) = k_d s + k_p = k_p \cdot (T_d s + 1) = k_d \cdot (s + \omega_d)$$

$$T_d = \frac{k_d}{k_p}, \omega_d = \frac{1}{T_d} = \frac{k_p}{k_d} \tag{3.10}$$

Pro konstanty přenosu v elektronické implementaci na obr. 3.2.4.1 platí

$$k_p = -\frac{2R}{r}, k_d = -\frac{R^2 C}{r}, T_d = \frac{k_d}{k_p} = \frac{RC}{2} \tag{3.11}$$

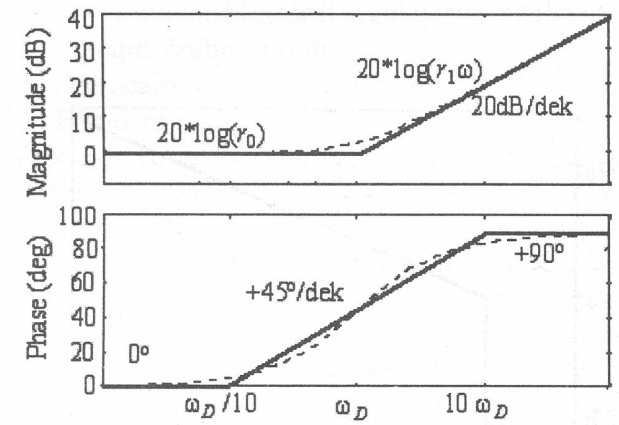


Obr. 3.2.4.1 Regulátor PD

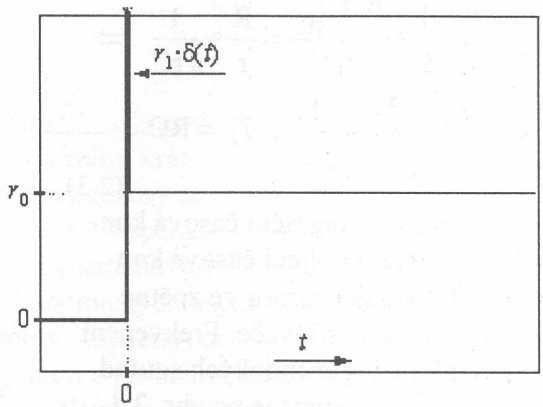
Všimněme si, že derivační časová konstanta T_d je dána vybíjecí časovou konstantou $\tau = RC/2$ kapacitoru ve zpětné vazbě operačního zesilovače (ten se zde vybíjí přes dva paralelně zapojené rezistory R). Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích (Bodeho diagram) je na obr 3.2.4.2. Její modul má pro kruhové frekvence $\omega > \omega_d$ sklon $+20dB/dek$, pro nižší frekvence je pak vodorovnou čarou $20\log|R(j\omega)| = 20\log(k_p)$. Fáze prochází od 0° pro $\omega < \omega_d/10$ do $+90^\circ$ pro $\omega = 10\omega_d$. Pro frekvenci $\omega = \omega_d$ má fázový úhel hodnotu $+45^\circ$. Opravy mezi asymptotami a skutečným průběhem charakteristiky jsou $+3dB$ v místě zlomu asymptot modulu $(\omega = \omega_d)$ a $0{,}1rad = 5{,}7^\circ$ v místech zlomů asymptot fáze $((\omega = \omega_d)/10$ a $\omega = 10\omega_d)$.

Frekvenční charakteristika v komplexní rovině je součtem konstantního vektoru k_p a derivačního průběhu $k_d \cdot (j\omega)$.

Přechodová charakteristika na obr.3.2.4.3 se skládá ze skoku k_p a Diracova impulsu $k_d \cdot \delta(t)$.



Obr. 3.2.4.2 Bodeho diagram

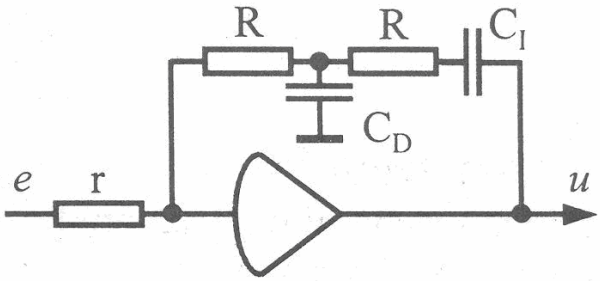


Obr. 3.2.4.3 Přechodová charakteristika PD

3.2.5 Regulátor PID

Typickým příkladem PID regulátoru je elektronické schéma na obr. 3.2.5.1. Přenos PID regulátoru je obecně popsán výrazy:

$$R(s) = k_d s + k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_d \cdot (s+\omega_d)\cdot(s+\omega_i)}{s} = \frac{k_i \cdot (T_d s+1)\cdot(T_i s+1)}{s}. \qquad (3.12)$$

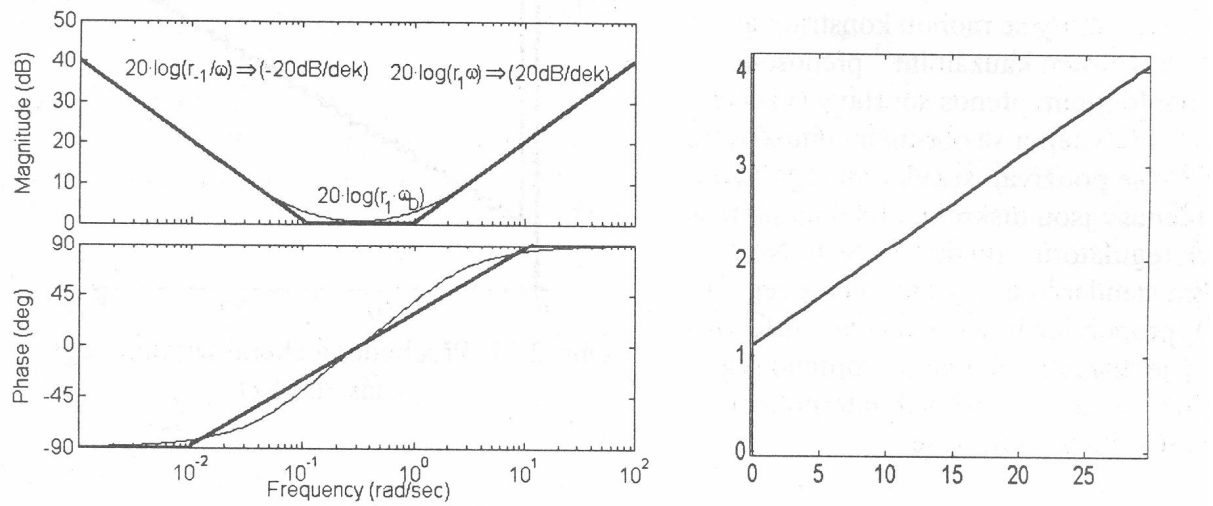


Obr. 3.2.5.1 PID regulátor

V zapojení dle obr. 3.2.5.1 platí pro zmíněné konstanty:

$$k_d = -\frac{R^2 \cdot C_D}{r},\ k_p = -\frac{R\cdot(C_D + 2C_I)}{r\cdot C_I},\ k_i = -\frac{1}{r\cdot C_I} \qquad (3.13)$$

V přenosech regulátorů PD a PI jsou konstanty definovány stejně, pouze konstanty vazby a časové konstanty splývají.

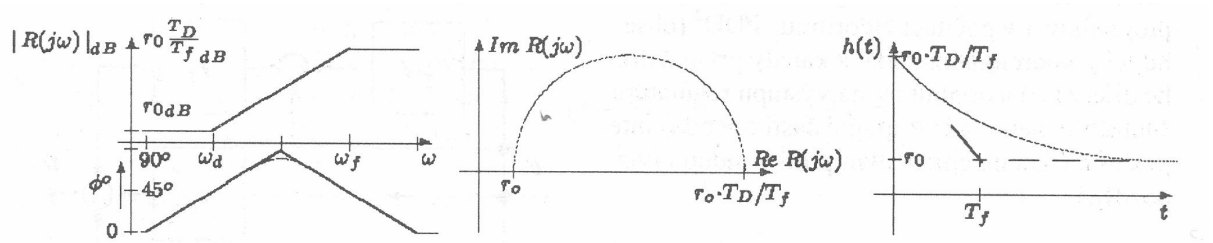


Obr. 3.2.5.2 Bodeho diagram a přechodová charakteristika regulátoru PID

Regulátory s derivačním kanálem se někdy doplňují filtrem, který zamezuje přílišnému zesilování vysokofrekvenčních šumů, takže např. PD regulátor s jednokapacitním filtrem má přenos

$$R(s) = \frac{k_d}{T_f} \cdot \frac{s + \omega_d}{s + \omega_f} = k_p \cdot \frac{T_d s + 1}{T_f s + 1}, \tag{3.14}$$

kde $\omega_f = 1/T_f$ se volívá $(5-20) \cdot \omega_D$.



Obr. 3.2.5.3 Frekvenční a přechodová charakteristika PD regulátoru s filtrem

Frekvenční a přechodová charakteristika takového regulátoru jsou na obr. 3.2.5.3. Vidíme, že Diracův impuls v přechodové charakteristice je u tohoto regulátoru nahrazen exponenciálním impulsem o stejné ploše. Jeho časová konstanta je T_f. Záměna Diracova impulsu exponencielou může mimo jiné příznivě ovlivnit dynamiku regulačního obvodu při případném omezení výstupní veličiny regulátoru např. v jeho výkonové části. Podobně je omezeno zesilování vysokofrekvenčních šumů nad kruhovou frekvencí – viz frekvenční charakteristika. Později uvidíme, že nás nad jistou hodnotou frekvence nebude zajímat ani zesílení užitečných signálů v obvodu.

Text převzat z [3]

4 Domácí příprava pro studenty

V této kapitole si ukážeme na teoretických úlohách, jak postupovat při identifikaci a při návrhu PID regulátorů dvěma způsoby (GMK a frekvenční metody).

4.1 Identifikace

Zadání:

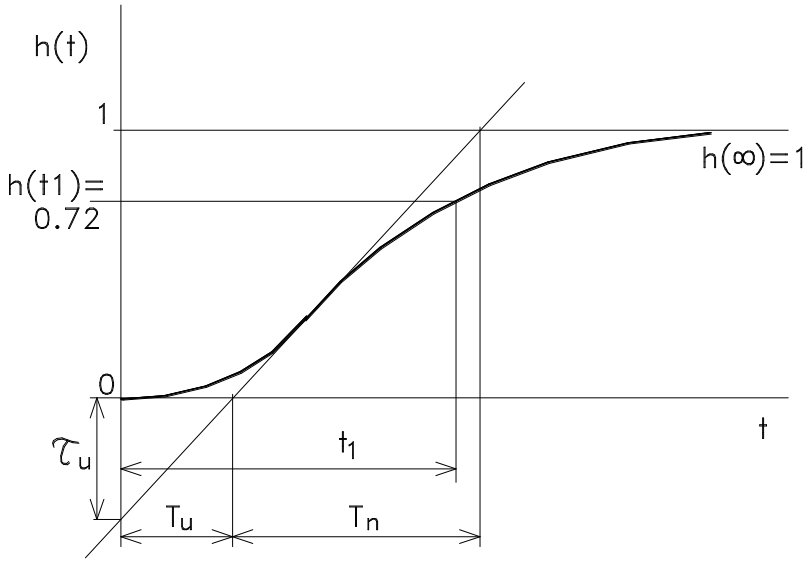
U neznámého systému byla odečtena přechodová charakteristika, která je uvedena v příloze [Graf 1 - Přechodová charakteristika neznámého systému]. Napište přenos systému a porovnejte v jednom grafu neznámý systém a vypočtený přenos systému.

Řešení:

Z charakteristiky je patrné, že se jedná o systém vyššího řádu. Pro jednoduchost budeme uvažovat, že přenos je druhého řádu a bude ve tvaru

$$G(s) = \frac{K}{(1+sA_1)(1+sA_2)} \tag{4.1}$$

a pro zjištění konstant použijme přechodovou charakteristiku na obr. 4.1.1, kde vedeme tečnu v inflexním bodě.



Obr. 4.1.1 Přechodová charakteristika

τ_2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
τ_u	0,050	0,072	0,084	0,092	0,097	0,100	0,102	0,103	0,103	0,104

Obr. 4.1.2 Tabulka závislosti τ_u na τ_2

Po zjištění τ_u odvodíme z tabulky na obr. 4.1.2 τ_2 a pomocí následujících vzorců vypočítáme konstanty systému:

$$K = h(\infty) \tag{4.2}$$

$$\tau_2 = \frac{A_2}{A_1}$$
$$\frac{t_1}{1{,}2564} = A_1 + A_2 \tag{4.3}$$

Když se podíváme na zadanou přechodovou charakteristiku [Graf 1 - Přechodová charakteristika neznámého systému], odečteme hodnoty:

$K = h(\infty) = 1$

$T_u = 0{,}27s$

$T_n = 2{,}6s$

$t_1 = 2{,}5s$

$\tau_u = \frac{T_u}{T_n} = \frac{0{,}27}{2{,}6} = 0{,}104$, teď můžeme odečíst z tabulky na obr. 4.1.2 $\tau_2 = 1$

Po odečtení τ_2 můžeme použít vzorce (4.3) a vypočítat konstanty A_1, A_2.

$$\tau_2 = \frac{A_2}{A_1} \Rightarrow 1 = \frac{A_2}{A_1}$$
$$\frac{t_1}{1{,}2564} = A_1 + A_2 \Rightarrow \frac{2{,}5}{1{,}2564} = A_1 + A_2 \tag{4.4}$$

Po vypočtení této soustavy rovnic dostaneme výsledný přenos

$$G(s) = \frac{1}{(1+s1)(1+s1)} = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}. \tag{4.5}$$

Nyní porovnáme ve společném grafu neznámý systém a výsledný přenos, při odezvě na jednotkový skok. Graf je uveden v příloze [Graf 2 – Porovnání neznámého systému a jeho identifikace].

<u>Závěr:</u>

Když si prohlédneme výsledný graf, uvedený v příloze [Graf 2 – Porovnání neznámého systému a jeho identifikace], zjistíme, že se nám podařilo neznámý systém identifikovat a výsledný přenos identifikace je

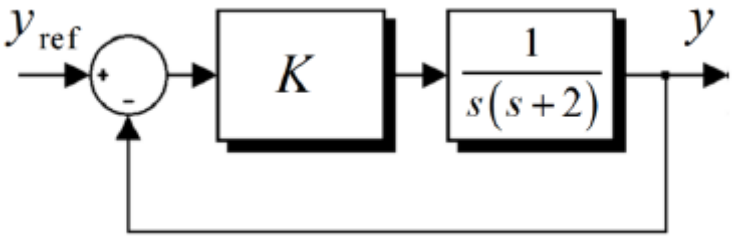
$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}. \tag{4.6}$$

4.2 Návrh regulátorů

4.2.1 Návrh P-regulátoru pomocí GMK

Zadání:

Máme zadané schéma na obr. 4.2.1.1, a naším úkolem je navrhnout P-regulátor metodou GMK, $R(s) = K$ tak, abychom měli maximální překmit výstupní ustálené hodnoty $Mp = 10\%$, při jednotkovém skoku vstupní veličiny.



Obr. 4.2.1.1 Schéma regulované soustavy

Řešení:

Vypočítáme tlumení, které dostaneme z maximálního překmitu

$$\xi = \frac{-\ln\left(\frac{Mp}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{Mp}{100}\right)}} = \frac{-\ln\left(\frac{10}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{10}{100}\right)}} = \frac{-\ln 0{,}1}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 0{,}1}} = \frac{2{,}3}{3{,}895} = 0{,}5912 \tag{4.7}$$

Vypočítáme si přenos uzavřené smyčky:

$$T(s) = \frac{\frac{K}{s^2 + 2s}}{1 + \frac{K}{s^2 + 2s}} = \frac{\frac{K}{s^2 + 2s}}{\frac{s^2 + 2s + K}{s^2 + 2s}} = \frac{K}{s^2 + 2s + K} \tag{4.8}$$

Obecný přenos uzavřené smyčky (4.9) a charakteristický polynom bude jeho jmenovatel:

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \tag{4.9}$$

Druhý člen charakteristického polynomu (4.9) položíme roven $2 \cdot \xi \cdot \omega_n$ a třetí člen položíme roven $\omega_n{}^2$.

$$\begin{aligned} 2 &= 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \\ \omega_n &= \sqrt{K} \\ 2 &= 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{K} \\ K &= \frac{1}{\xi^2} = 2{,}861 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Výsledný graf je uveden v příloze [Graf 3 – Přechodová charakteristika návrhu regulátoru pomocí GMK v úloze 4.2.1]

Závěr:

Na výsledném grafu je patrné, že průběh výstupní veličiny má požadovaný překmit 10%. Přenos regulátoru je $R(s) = 2.861$.

4.2.2 Návrh PI-regulátoru pomocí frekvenční metody

Zadání:

U přenosu systému $G(s) = \dfrac{1}{(s+1)\cdot(s+5)}$ navrhněte PI-regulátor frekvenčními metodami, když budeme uvažovat $PM = 60^\circ$. Odvoďte přenos otevřené a uzavřené smyčky a v grafu udělejte odezvu na jednotkový skok uzavřené smyčky.

Řešení:

Výsledný regulátor bude ve tvaru:

$$R(s) = k_P + \frac{k_I}{s}. \tag{4.11}$$

Odvodíme, čemu se rovná $\arg(G_{(j\omega)})$:

$$\arg(G_{(j\omega)}) + PI_{\omega_I} = -180^\circ + PM \tag{4.12}$$

Když dosadíme do (4.12) dostaneme:

$$\begin{aligned} &\arg(G_{(j\omega)}) - 45^\circ = -180^\circ + 60^\circ \\ &\arg(G_{(j\omega)}) = -75^\circ \end{aligned} \tag{4.13}$$

Z Bodeho diagramu zadaného přenosu odečteme hodnotu zesílení a frekvenci. Na fázové charakteristice Bodeho diagramu zjistíme frekvenci na fázi -75°. Na této frekvenci zjistíme na amplitudové charakteristice hodnotu zesílení.
Bodeho diagram je uveden v příloze pod označením [Graf 4 – Bodeho diagram k úloze 4.2.2 a 4.2.3].

$$\begin{aligned} &G_{(j\omega)} = -19.8dB = 0.1 \\ &\omega_I = 1.57 rad/s \end{aligned}$$

Z těchto hodnot vypočteme koeficienty regulátoru:

$$\begin{aligned} &k_P = \frac{1}{\sqrt{2}\cdot G_{(j\omega)}} = 7.07 \\ &k_I = \omega_I \cdot k_P = 1.57 \cdot 7.07 = 11.1 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Tyto koeficienty dosadíme do (4.11) a výsledný přenos regulátor je:

$$R(s) = 7.07 + \frac{11.1}{s} \tag{4.15}$$

Vypočítáme přenos otevřené smyčky , který označíme $L(s)$:

$$L(s) = R(s) \cdot G(s) = (7.07 + \frac{11.1}{s}) \cdot (\frac{1}{(s+1)\cdot(s+5)}) = \frac{7.07s + 11.1}{s^3 + 6s^2 + 5s} \tag{4.16}$$

Z přenosu otevřené smyčky vypočítáme přenos uzavřené smyčky, který označíme $T(s)$:

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{\frac{7.07s + 11.1}{s^3 + 6s^2 + 5s}}{1 + \frac{7.07s + 11.1}{s^3 + 6s^2 + 5s}} = \frac{7.07s^4 + 53.52s^3 + 101.9s^2 + 55.5s}{s^6 + 12s^5 + 53.07s^4 + 113.5s^3 + 126.9s^2 + 55.5s} \tag{4.17}$$

Po zjištění přenosu uzavřené smyčky, uděláme odezvu na jednotkový skok, ten je uveden v příloze pod označením [Graf 5 – Odezva na jednotkový skok v uzavřené smyčce k úloze 4.2.2].

Závěr:

Výsledný přenos regulátor vyšel:

$$R(s) = 7.07 + \frac{11.1}{s} \tag{4.18}$$

Na výsledném grafu vidíme, že ustálená hodnota je rovna hodnotě požadované. Zároveň vidíme, že maximální překmit je 10%.

4.2.3 Návrh PID-regulátoru pomocí frekvenční metody

Zadání:

U přenosu systému $G(s) = \frac{1}{(s+1)\cdot(s+5)}$ navrhněte PID-regulátor frekvenčními metodami, když budeme uvažovat $PM = 60^\circ$. Odvoďte přenos otevřené a uzavřené smyčky a v grafu udělejte odezvu na jednotkový skok uzavřené smyčky.

Řešení:

Výsledný regulátor bude ve tvaru:

$$R(s) = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s\,. \tag{4.19}$$

Odvodíme, čemu se rovná $\arg(G_{(j\omega)})$:

$$\arg(G_{(j\omega)}) + PID_\omega = -180^\circ + PM \tag{4.20}$$

Když dosadíme do (4.9) dostaneme:

$$\begin{aligned} &\arg(G_{(j\omega)}) + 45^\circ - 5.7^\circ = -180^\circ + 60^\circ \\ &\arg(G_{(j\omega)}) = -159.3^\circ \end{aligned} \tag{4.21}$$

Z Bodeho diagramu zadaného přenosu odečteme hodnotu zesílení a frekvenci. Na fázové charakteristice Bodeho diagramu zjistíme frekvenci na fázi -159.3°. Na této frekvenci zjistíme na amplitudové charakteristice hodnotu zesílení.
Bodeho diagram je uveden v příloze pod označením [Graf 4 – Bodeho diagram k úloze 4.2.2 a 4.2.3].

$$\begin{aligned} G_{(j\omega)} &= -48.6dB = 3.72 \cdot 10^{-3} \\ \omega &= 16 rad/s \end{aligned} \tag{4.22}$$

Z těchto hodnot vypočteme koeficienty regulátoru:

$$\begin{aligned} k_P &= \frac{1}{\sqrt{2} \cdot G_{(j\omega)}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 3.72 \cdot 10^{-3}} = 190.1 \\ k_I &= 0.1 \cdot \omega \cdot k_P = 0.1 \cdot 16 \cdot 190.1 = 304.16 \\ k_D &= k_P / \omega = 190.1/16 = 11.88 \end{aligned} \tag{4.23}$$

Tyto koeficienty dosadíme do (4.19) a výsledný přenos regulátor je:

$$R(s) = 190.1 + \frac{304.16}{s} + 11.88s \tag{4.24}$$

Vypočítáme přenos otevřené smyčky , který označíme $L(s)$:

$$L(s) = R(s) \cdot G(s) = (190.1 + \frac{304.16}{s} + 11.88s) \cdot (\frac{1}{(s+1) \cdot (s+5)}) = \frac{11.8s^2 + 190.1s + 304.2}{s^3 + 6s^2 + 5s} \tag{4.25}$$

Z přenosu otevřené smyčky vypočítáme přenos uzavřené smyčky, který označíme $T(s)$:

$$\begin{aligned} T(s) &= \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{\dfrac{11.8s^2 + 190.1s + 304.2}{s^3 + 6s^2 + 5s}}{1 + \dfrac{11.8s^2 + 190.1s + 304.2}{s^3 + 6s^2 + 5s}} = \\ &= \frac{11.8s^5 + 260.9s^4 + 1504s^3 + 2775s^2 + 1521s}{s^6 + 23.8s^5 + 306.9s^4 + 1564s^3 + 2800s^2 + 1521s} \end{aligned} \tag{4.26}$$

Po zjištění přenosu uzavřené smyčky, uděláme odezvu na jednotkový skok, ten je uveden v příloze pod označením [Graf 6 – Odezva na jednotkový skok v uzavřené smyčce k úloze 4.2.3].

<u>Závěr:</u>
Výsledný přenos regulátoru vyšel:

$$R(s) = 190.1 + \frac{304.16}{s} + 11.88s$$

Na výsledném grafu vidíme, že ustálená hodnota je rovna hodnotě požadované. Zároveň vidíme, že maximální překmit je 17%. Pokud tento graf porovnáme s úlohou 4.2.2, zjistíme, že máme sice větší *maximální překmit*, ale rychlejší dobu ustálení.

5 Popis soustavy

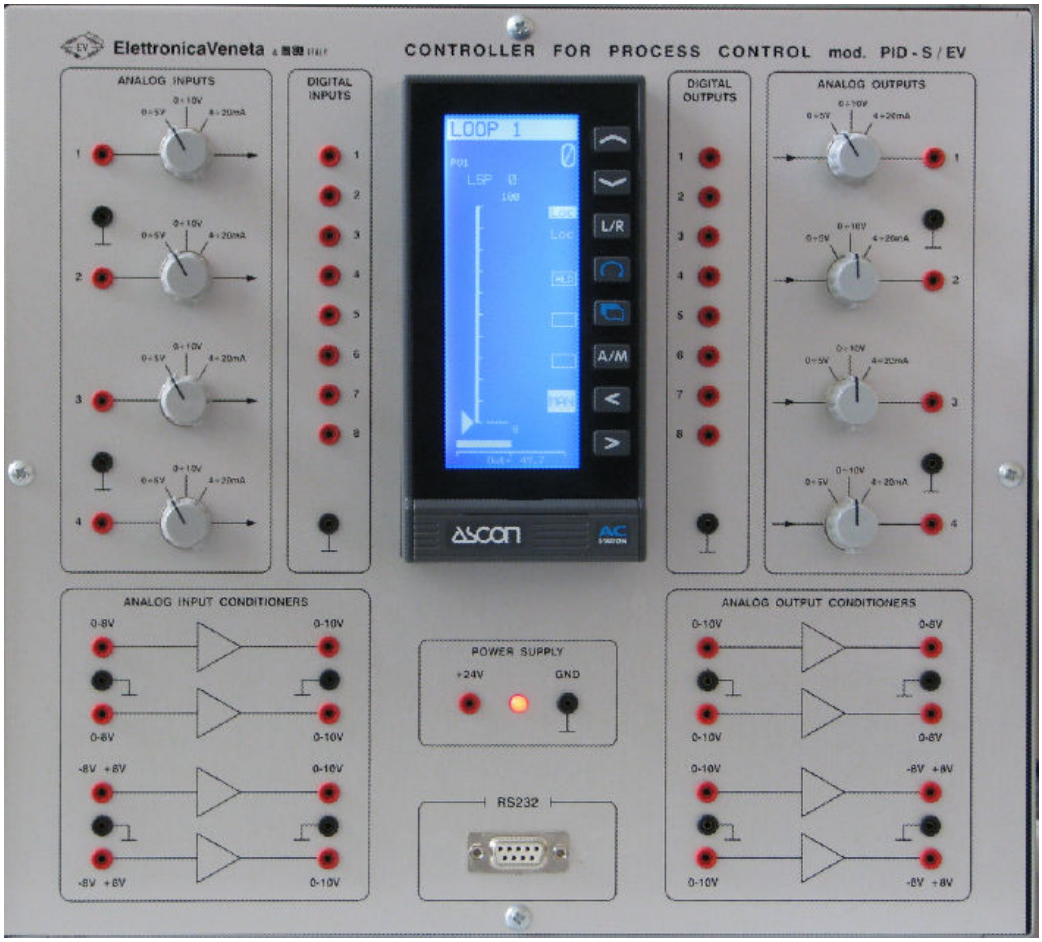
Soustava se skládá ze tří samostatných částí. První část (obr.5.1) je topné zařízení, druhou samostatnou částí (obr. 5.2) je digitální PID regulátor a třetí částí (obr. 5.3) je napájecí jednotka.

5.1 Topné zařízení

Obr. 5.1 : Topné zařízení

Topné zařízení se skládá ze dvou rezistorů, o výkonu $P = 2x50W$ a jednoho ventilátoru, který slouží k chlazení soustavy. Výkon, a tudíž teplota, se reguluje šířkou pulsů z PWM modulátoru. Na předním panelu jsou vstupy, kam přivádíme napětí. Na vrchní straně zařízení je otvor, kam se umístí termočlánek.

5.2 Digitální PID regulátor



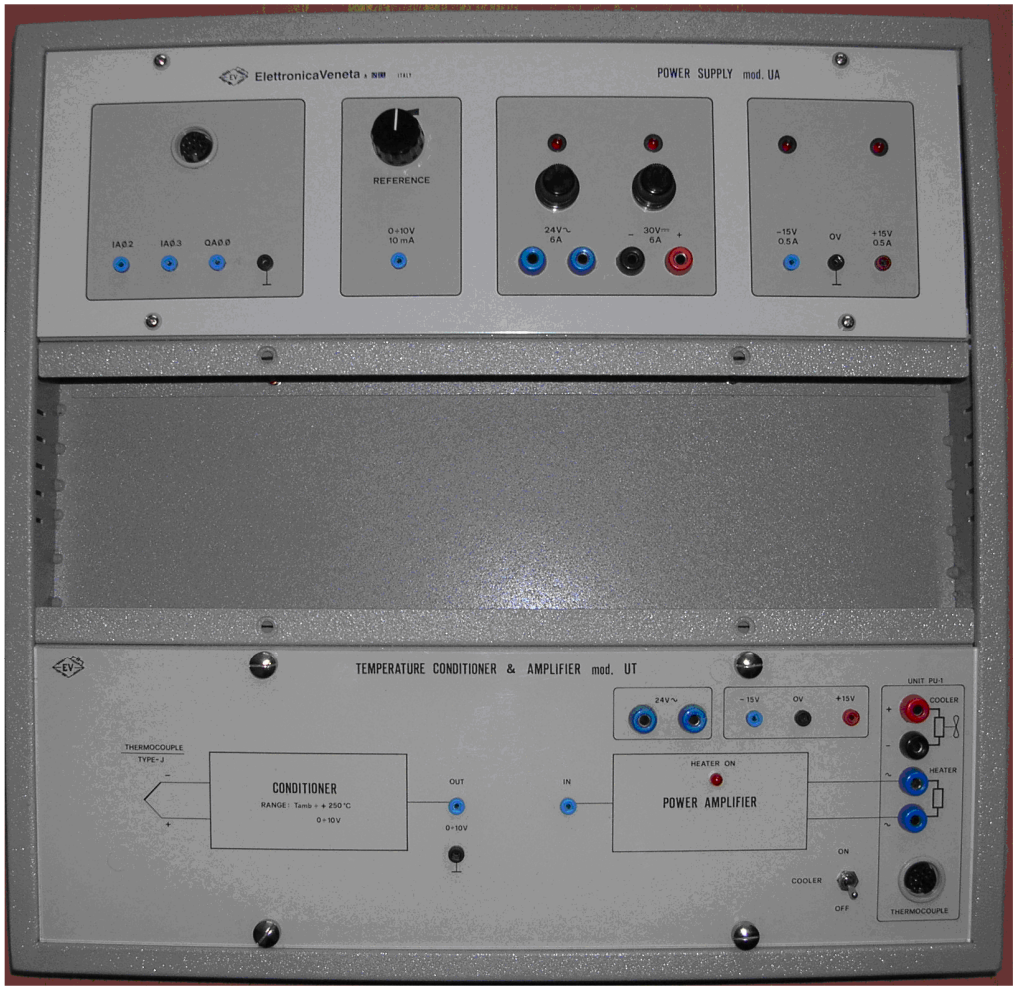
Obr. 5.2 : Digitální PID regulátor

Tato jednotka obsahuje programovatelný multifunkční PID regulátor, kde se nastavují jednotlivé konstanty PID regulátoru, dále zde můžeme měnit typ regulátoru a nastavit žádanou hodnotu.

Také zde máme 4 analogové vstupy a k tomu 4 analogové výstupy. Tyto vstupy mají tři rozsahy $(0 \div 5V,\ 0 \div 10V,\ 4 \div 20mA)$. Pro naše účely budeme používat rozsah $0 \div 10V$.

Je tu k dispozici 8 digitálních vstupů a 8 digitálních výstupů, které slouží pro různá nastavení PID regulátoru. K dispozici je sběrnice RS-232, přes kterou se můžeme připojit k počítači a číst data.

5.3 Napájení topného zařízení

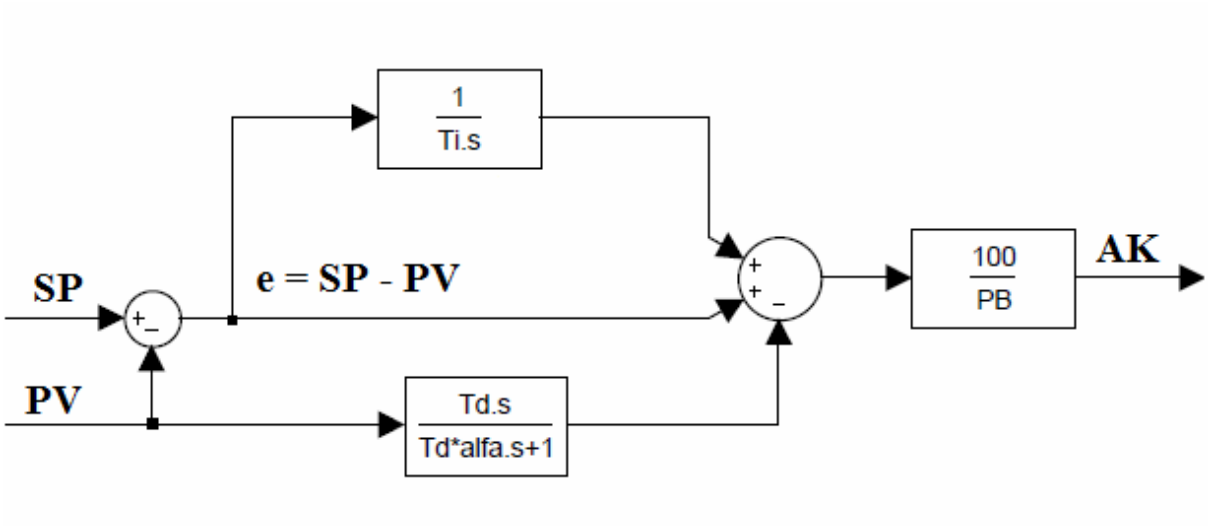


Obr. 5.3 : Napájení topného zařízení

Tato jednotka se skládá z reference, která slouží k nastavení požadované hodnoty (bez regulace), zdroje pro topné zařízení, napájení PWM modulátoru, PWM modulátoru, převodníku pro termočlánek (tedy pro zpětnou vazbu) a vypínače pro ventilátor.

PWM modulátor generuje pulsy neustále, ale šířka pulsů je přímo úměrná velikosti vstupního napětí.

5.4 PID algoritmus



Obr. 5.4 PID algoritmus

Na obr. 5.4 je uveden PID algoritmus, který je použit v multifunkčním PID regulátoru. Po bližším zkoumání dojdeme k závěru, že tento regulátor má zásadní chybu. Chyba je, že do derivační složky vstupuje jen zpětná vazba, a ne odchylka, jak bychom předpokládali. V našem případě to nevadí, protože regulujeme na konstantní hodnotu, a jak už víme, tak derivace konstanty je nula. Chyba ovšem nastane, pokud bychom chtěli regulovat na proměnou hodnotu (např. rampa). V tom případě nemůžeme použít PID regulátor, ale PI nebo P regulátor. Zde je seznam použitých symbolů:

SP	žádaná hodnota
PV	skutečná hodnota (výstup zpětné vazby)
e	odchylka žádané hodnoty od hodnoty skutečné
Ti	integrační časová konstanta
Td	derivační časová konstanta
PB	pásmo proporcionality
AK	akční zásah do soustavy
alfa	omezení zisku derivační složky na vyšších frekvencích (alfa = 1/10)

V našem případě budeme uvažovat konstantní žádanou hodnotu, proto můžeme napsat, že přenos PID regulátoru je

$$R(s) = \frac{100}{PB}\left(1 + \frac{1}{s \cdot T_i} + \frac{T_d s}{T_d \cdot alfa \cdot s + 1}\right) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{k_d \cdot alfa \cdot s + 1} \tag{5.1}$$

To znamená, že jednotlivé koeficienty regulátoru jsou

$$PB = \frac{100}{k_p}$$

$$T_i = \frac{k_p}{k_i} \tag{5.2}$$

$$T_d = \frac{k_d}{k_p}$$

6 Laboratorní úlohy

6.1 Identifikace topného zařízení

Zadání:

Změřte a následně identifikujte přechodovou charakteristiku tepelné soustavy od firmy Elettronica Venta, která je postavena v laboratoři. Poté vypracujte zprávu, ve které bude uveden postup, výsledný přenos a graf, ve kterém porovnáte naměřenou přechodovou charakteristiku a vámi identifikovaný model. Měření proveďte se zapnutým ventilátorem.

Pokyny k měření:

1) Zapněte ventilátor vypínačem.
2) Nastavte referenci na 5V, po ustálení na této hodnotě změňte referenci z 5V na 6V a začněte odečítat.
3) Až se výstupní hodnota ustálí, vyneste hodnoty do grafu (např. v excelu).
4) Poté postupujte podle návodu uvedeného v domácí přípravě.
5) Uvažujte přenos druhého řádu.

Řešení:

Změřená přechodová charakteristika je uvedena v příloze [Graf 6 - Přechodová charakteristika tepelné soustavy]. V grafu je dále uvedena ustálená hodnota, a tečna v inflexním bodě. Takže můžeme odečíst hodnoty:

$$K = h(\infty) = 0{,}6586$$
$$T_u = 19{,}5s$$
$$T_n = 413{,}8s$$
$$t_1 = 457{,}3s$$

Vypočteme τ_u:

$$\tau_u = \frac{T_u}{T_n} = \frac{19{,}5}{413{,}8} = 0{,}047$$

Z tabulky na obr. 4.1.2 můžeme odečíst hodnotu $\tau_2 = 0{,}0088$ a použít vzorce (4.3)

$$\tau_2 = \frac{A_2}{A_1} \Rightarrow 0{,}0088 = \frac{A_2}{A_1}$$
$$\frac{t_1}{1{,}2564} = A_1 + A_2 \Rightarrow \frac{457{,}3}{1{,}2564} = A_1 + A_2$$

Po vypočtení této soustavy rovnice dostaneme přenos

$$G(s) = \frac{0{,}6586}{(1+335s)(1+29{,}5s)} = \frac{0{,}6586}{9850s^2 + 364s + 1} \tag{6.1}$$

Porovnání tepelné soustavy a přenosu provedeme ve společném grafu. Graf je uveden v příloze [Graf 7 – Porovnání tepelné soustavy a její identifikace].

Závěr:

Po shlédnutí grafu v příloze [Graf 7 – Porovnání tepelné soustavy a její identifikace], můžeme konstatovat, že identifikace se nám podařila a výsledný přenos je

$$G(s) = \frac{0{,}6586}{9850s^2 + 364s + 1}.$$

6.2 Návrh P-regulátoru pomocí GMK

Zadání:

Přenos tepelné soustavy je $G(s) = \frac{0{,}6586}{9850s^2 + 364s + 1}$, a úkolem je navrhnout P-regulátor metodou GMK, $R(s) = k_p$, s maximálním překmitem výstupní ustálené hodnoty $Mp = 25\%$, při jednotkovém skoku vstupní veličiny. Porovnejte naměřené hodnoty s modelem v jednom grafu.

Řešení:

Vypočítáme tlumení pomocí (4.6):

$$\xi = \frac{-\ln\left(\frac{Mp}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{Mp}{100}\right)}} = \frac{-\ln\left(\frac{25}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{25}{100}\right)}} = \frac{-\ln 0{,}25}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 0{,}25}} = 0{,}4 \tag{6.2}$$

Vypočteme přenos uzavřené smyčky:

$$G(s) = \frac{\frac{k_P \cdot 0.6586}{9850s^2 + 364s + 1}}{1 + \frac{k_P \cdot 0.6586}{9850s^2 + 364s + 1}} = \frac{k_P \cdot 0.6586}{9850s^2 + 364s + 1 + k_P \cdot 0.6586} =$$
$$= \frac{k_P \cdot 0.6586}{s^2 + \frac{364}{9850}s + \frac{1}{9850} + k_P \cdot \frac{0.6586}{9850}} \tag{6.3}$$

Porovnáním koeficientů podle (4.6) a (4.7) dostaneme hodnotu k_p

$$\begin{aligned} &\frac{364}{9850} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \\ &\omega_n = \sqrt{\frac{1 + k_P \cdot 0.6586}{9850}} \\ &\frac{364}{9850} = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{1 + k_P \cdot 0.6586}{9850}} \\ &k_P = 30.3944 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Pomocí (5.2) vypočteme hodnotu regulátoru AC10:

$$PB = \frac{100}{k_P} = \frac{100}{30.3944} = 3.3 \tag{6.5}$$

Porovnání výsledného grafu je uvedeno v příloze [Graf 8 - Porovnání odezvy na jednotkový skok tepelné soustavy a jejího modelu s P-regulátorem]

Závěr:

Výsledný přenos regulátoru vyšel $R(s) = 30.3944$. Když se podíváme na [Graf 8 - Porovnání odezvy na jednotkový skok tepelné soustavy a jejího modelu s P-regulátorem], zjistíme, že model nesouhlasí s reálnou soustavou. Maximální překmit v obou případech vyšel 25%, takže zadání jsme splnili.

Důvodů, proč nám tyto dvě charakteristiky nesouhlasí, je mnoho. Například měřená veličina je teplota, takže je ovlivnitelná okolním prostředím (průvan, jiná teplota při identifikaci), proto může mít jinou dynamiku. Dalším důvodem je omezení akčního zásahu.

6.3 Návrh PID-regulátoru pomocí frekvenční metody k tepelné soustavě

Zadání:

Přenos tepelné soustavy je $G(s) = \dfrac{0{,}6586}{9850s^2 + 364s + 1}$, a úkolem je navrhnout PID-regulátor frekvenčními metodami s $PM = 70^\circ$. Vypočtěte přenos uzavřené smyčky a porovnejte naměřené hodnoty s modelem ve stejném grafu.

Řešení:

Výsledný regulátor bude ve tvaru:

$$R(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s\,. \tag{6.6}$$

Odvodíme, čemu se rovná $\arg(G_{(j\omega)})$:

$$\arg(G_{(j\omega)}) + PID_\omega = -180^\circ + PM \tag{6.7}$$

Po dosazení do (6.7) dostaneme:

$$\begin{aligned} &\arg(G_{(j\omega)}) + 45^\circ - 5.7^\circ = -180^\circ + 70^\circ \\ &\arg(G_{(j\omega)}) = -149.3^\circ \end{aligned} \tag{6.8}$$

Z Bodeho diagramu zadaného přenosu odečteme hodnotu zesílení a frekvenci. Na fázové charakteristice Bodeho diagramu zjistíme frekvenci na fázi -149.3°. Na této frekvenci zjistíme na amplitudové charakteristice hodnotu zesílení.
Bodeho diagram je uveden v příloze pod označením [Graf 9 – Bodeho diagram tepelné soustavy].

$$G_{(j\omega)} = -36.9dB = 14 \cdot 10^{-3}$$

$$\omega = 0.0641 rad/s$$

Z těchto hodnot vypočteme koeficienty regulátoru:

$$k_p = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot G_{(j\omega)}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 14 \cdot 10^{-3}} = 50.5$$
$$k_i = 0.1 \cdot \omega \cdot k_p = 0.1 \cdot 0.0641 \cdot 50.5 = 0.32 \qquad (6.9)$$
$$k_d = k_p / \omega = 50.5 / 0.0641 = 787.8$$

Dosazením těchto koeficientů do (6.6) získáme přenos regulátoru je:

$$R(s) = 50.5 + \frac{0.32}{s} + 787.8s \qquad (6.10)$$

Pomocí (5.2) vypočteme hodnotu regulátoru AC10:

$$PB = \frac{100}{k_p} = \frac{100}{50.5} = 2$$
$$T_i = \frac{k_p}{k_i} = \frac{50.5}{0.32} = 158 \qquad (6.11)$$
$$T_d = \frac{k_d}{k_p} = \frac{787.8}{50.5} = 15$$

Výsledný grafu je uveden v příloze [Graf 10 - Porovnání odezvy na jednotkový skok tepelné soustavy a jejího modelu s PID-regulátorem]

Závěr:

Výsledný přenos regulátoru vyšel $R(s) = 50.5 + \frac{0.32}{s} + 787.8s$. Po shlédnutí grafu v příloze [Graf 10 - Porovnání odezvy na jednotkový skok tepelné soustavy a jejího modelu s PID-regulátorem] zjistíme, že model nesouhlasí s reálnou soustavou. Maximální překmit modelu a reálné soustavy nesouhlasí. U reálné soustavy je překmit vyšší.

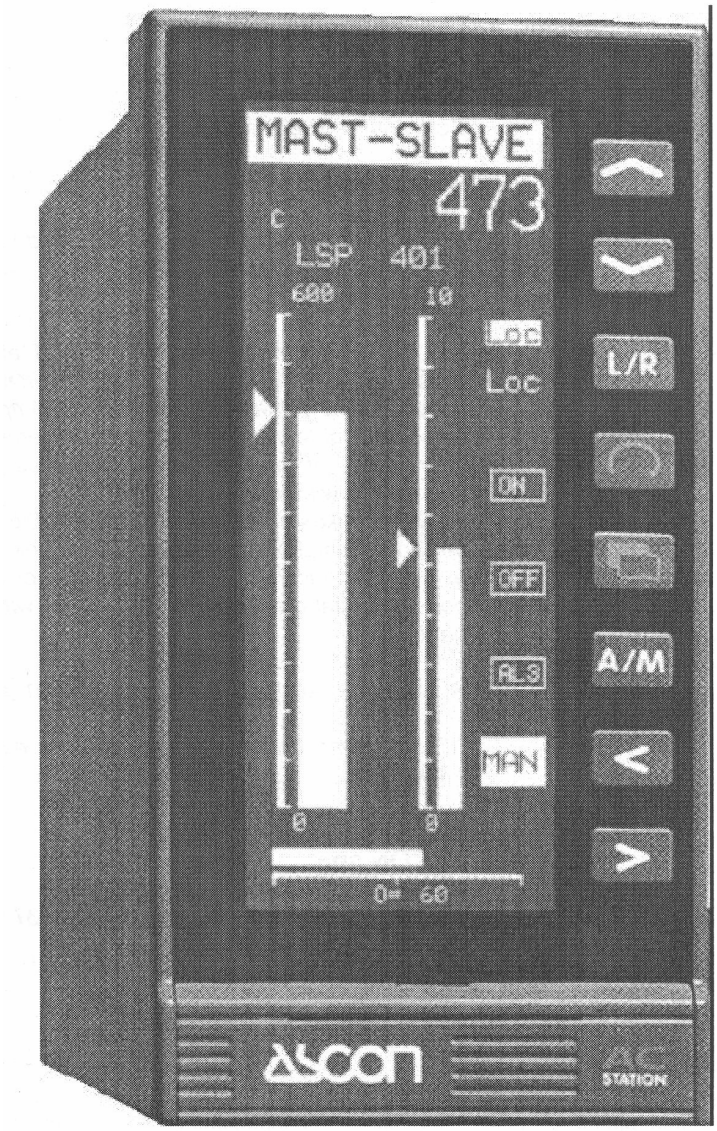
Důvodů, proč nám tyto dvě charakteristiky nesouhlasí, je mnoho. Například měřená veličina je teplota, takže je ovlivnitelná okolním prostředím (průvan, jiná teplota při identifikaci), proto může mít jinou dynamiku. Dalším důvodem je omezení akčního zásahu.

6.4 Pokyny pro měření regulátorů:

1) Nastavíme referenci na 5V
2) Počkáme na ustálení výstupní hodnoty
3) Pomocí manuálu nastavíme parametry PID
4) Nastavíme LSP (MSP) hodnotu na 6V (jednotkový skok)

7 Manuál PID-regulátoru AC10

7.1 Multifunkční programovatelný regulátor AC10



Obr. 7.1 Regulátor AC10

Na obrázku obr. 7.1 je uveden multifunkční programovatelný regulátor s osmi tlačítky po pravé straně a LCD displejem.

Zde jsou uvedeny tlačítka a jejich funkce :

Rychlá změna žádané hodnoty

Změna zdroje pro aktuální hodnotu (Používáme LOC, to je přímá hodnota volitelná na displeji, a také použijeme REM, to je hodnota, uložena v paměti regulátoru)

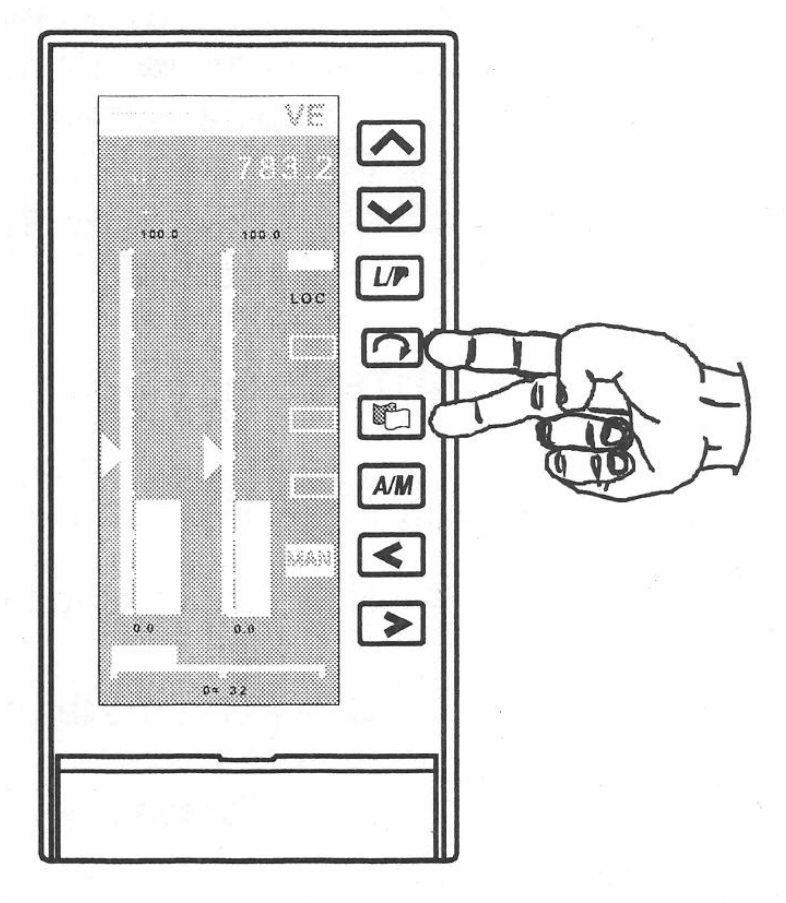
Nastavení požadované hodnoty (používáme LSP ve zdroji LOC, nebo MSP ve zdroji REM)(V hlavním nabídce Enter)

Přepínání jednotlivých obrazů

Přepínání Auto/Man, automatická nebo manuálně nastavitelná hodnota výstupu regulátoru (V hlavní nabídce Return)

Pohyb v menu

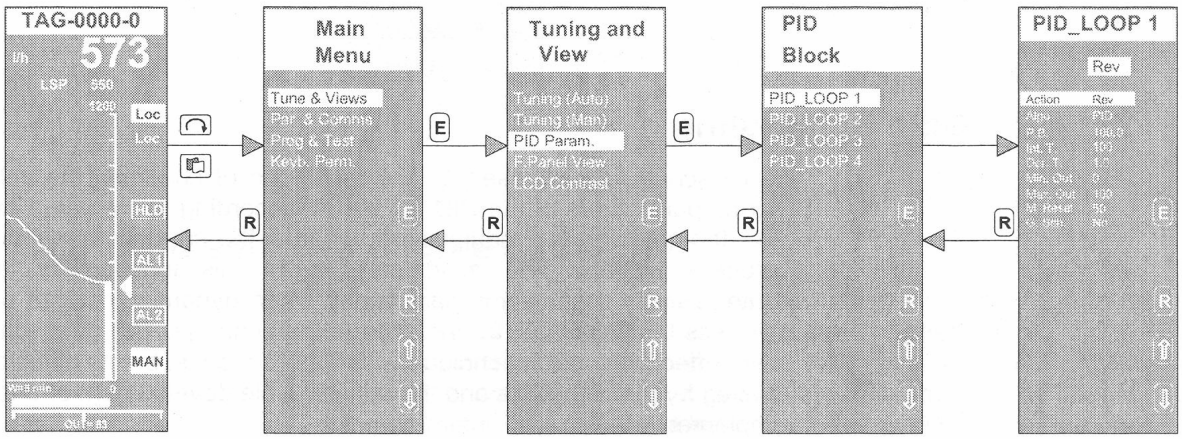
7.2 Jak se dostat do hlavního menu regulátoru AC10



Obr. 7.2 Menu

Do hlavního menu se dostaneme tak, že stiskneme současně dvě modrá tlačítka, podrobně to vidíme na obr. 7.2.

7.3 Nastavení konstant PID regulátoru

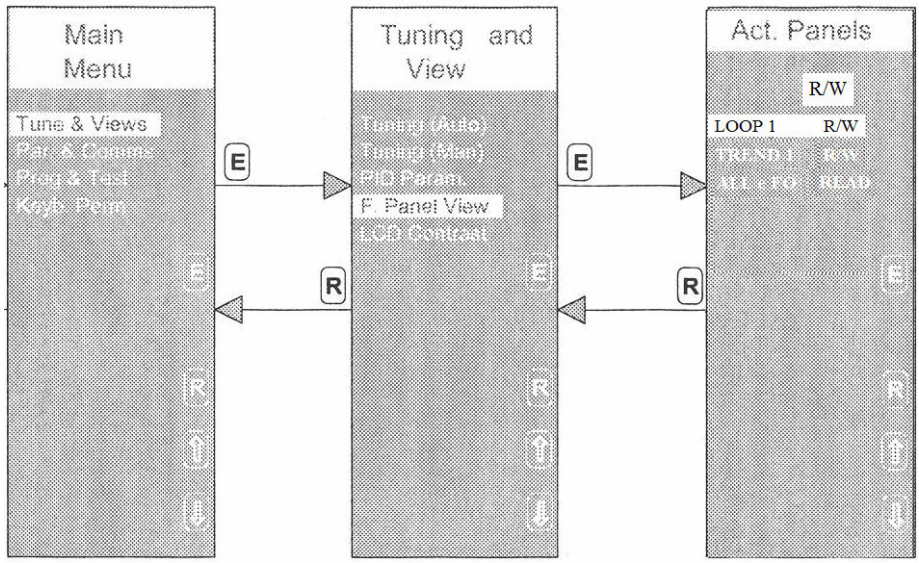


Obr. 7.3 Nastavení konstant PID regulátoru

Nejprve se dostaneme do menu obr. 7.2, a pokračovat podle obr. 7.3. Na poslední kartě budeme mít na vývěr z několika možností:

- Action – nabízí výběr vazby, kterou chceme použít
  a) Rev – záporná zpětná vazba
  b) Dir – přímá vazba
- Algo – udává, jaký regulátor budeme používat => P, PI, PID (pokud chceme PD regulátor, nastavíme integrační složku na 0)
- P. B. – nastavení pásmu proporcionality
- Int. T – nastavení integrační složky
- Der. T – nastavení derivační složky
- Min. Out. – minimální hodnota na výstupu (<u>uvažujeme 0</u>)
- Max. Out. – maximální hodnota na výstupu (<u>uvažujeme 100</u>)
- M. Reset – (nastavíme 50)
- G. Sch. – (nastavíme NO)

7.4 Problém s nastavením LSP



Obr. 7.4 Nastavení panelu

Pokud by nastal problém s nastavením hodnoty LSP, bude nutné zkontrolovat nastavení panelu. Jak se dostat k nastavení panelu, je ukázáno na obr. 7.4.

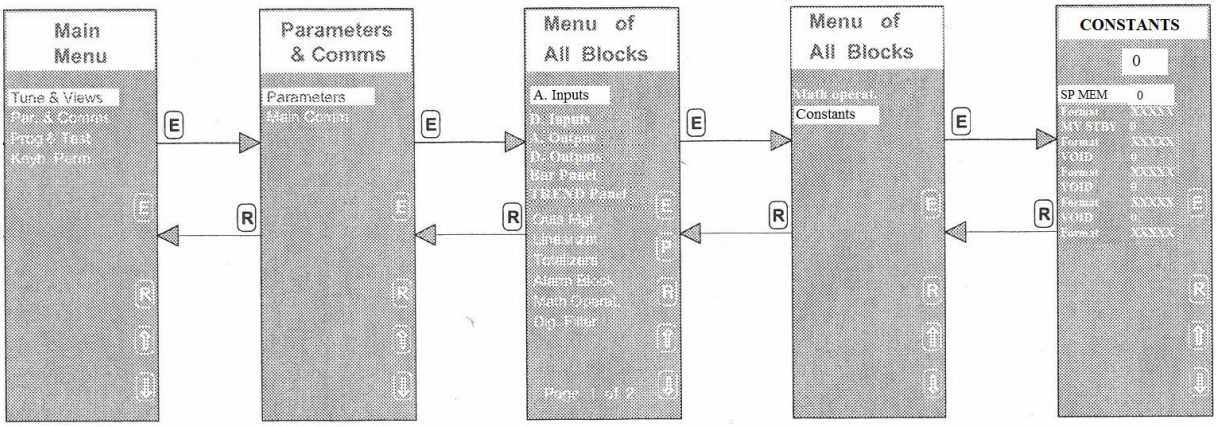
V nastavení zkontrolujeme, zda konfigurace souhlasí se zde uvedeným nastavením:

-LOOP 1 R/W
-TREND 1 R/W
-ALL e FO READ

Pokud tato konfigurace nesouhlasí, změníme ji.

7.5 Nastavení hodnoty MSP

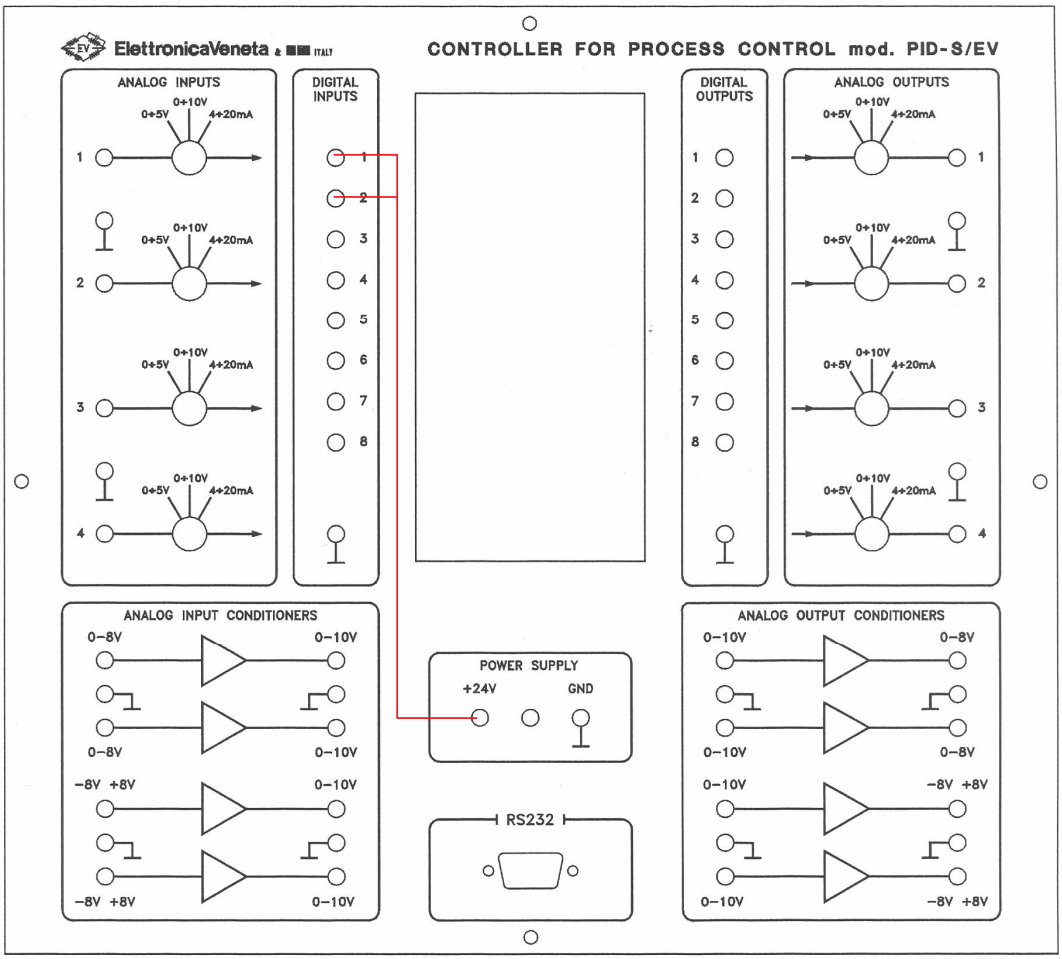
Tuto hodnotu bychom ani nepotřebovali umět nastavit, díky tomu, že můžeme pohodlně používat nastavení hodnoty pomocí LSP. Ale MSP hodí, pokud potřebujeme v čase t=0 udělat skok z jedné hodnoty na hodnotu jinou. Pokud bychom totiž chtěli použít LSP, tak by se nám nepovedl buď přímý skos (nastavení hodnoty chvilku trvá) a nebo by to nebyl skok z původní hodnoty, ale z hodnoty jiné.



Obr. 7.5.1 Nastavení hodnoty MSP

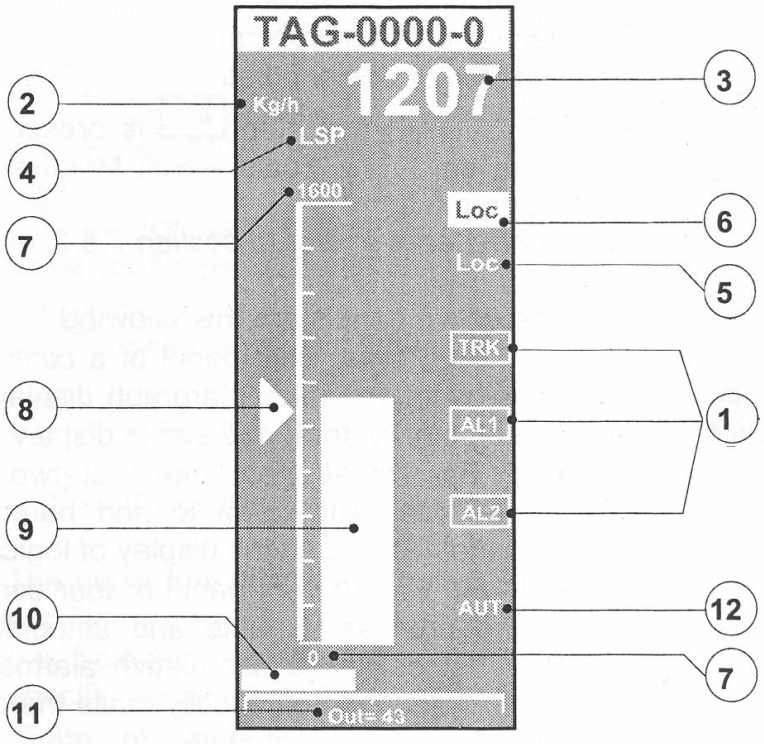
Do menu podle obr. 7.2, poté budeme postupovat podle obr 7.5.1. Až se dostaneme na blok CONSTANTS, nastavíme zde MSP hodnotu, která je zda uvedena pod označením SP MEM.

Aby regulátor věděl, že chceme používat hodnotu MSP, musíme realizovat zapojení podle obr. 7.5.2, tj. přivést "1", tedy 24V, na digitální vstupy 1 a 2.



Obr. 7.5.2 Zapojení digitálních vstupů (pro použití MSP)

7.6 Popis panelu při měření



Obr. 7.6 Panel měření

Co znamenají jednotlivé údaje na obr. 7.6:

1) Aktivní alarmy
2) Označení aktivní smyčky
3) Aktuální hodnota
4) Typ požadované hodnoty (LSP / MSP)
5) Označení hodnoty (Loc / Rem)
6) Výběr hodnoty (Loc / Rem)
7) Minimální / maximální hodnota
8) Grafické znázornění žádané hodnoty
9) Grafické znázornění aktuální hodnoty
10) Grafické znázornění akčního zásahu
11) Hodnota akčního zásahu
12) Automatická regulace

8 Závěr

V kapitole 2 jsme si ukázali, že jakýkoliv systém můžeme vnímat jako "černou skřínku" a abychom mohli s tímto systémem pracovat, musíme znát jeho vnější popis. Různé popisy jsme si popsali a ukázali v téže kapitole. Kapitola 3 se zabývala teorií regulátorů a jejich případnou fyzikální realizací, dále jsme si ukázali, jak se počítají a značí různé koeficienty regulátorů. Také jsme si zde představili nejběžnější a jedny z nejpoužívanějších regulátorů.

Kapitola 4 je určena především pro studenty. Je v ní uvedeno jak snadno postupovat při identifikaci a při návrhu regulátorů. Díky těmto návodům by měl každý student zvládnout úlohu, která mu bude přidělena na cvičení. 5 kapitola je věnována jednoduchému popisu tepelné soustavy, se kterým by se měl student seznámit dříve, nežli začne na cvičení cokoliv dělat, protože soustava může být špatně zapojena.

Laboratorní úlohy jsou v kapitole 6. Jsou tam uvedeny celé, od zadání, přes řešení až k závěru. Studentům se dá pouze zadání a zbytek je určen pro vyučujícího předmětu, aby mohl rychle a snáze hodnotit výsledky studentů. Tyto úlohy jsou určeny pro dvě skupiny studentů. Můžeme tyto dvě skupiny rozdělit podle náročnosti a podle toho budeme volit úlohy. Náročnější skupina studentů dostane za úkol identifikovat soustavu a z identifikace navrhnout jeden regulátor. Druhá skupina naopak dostane zadaný přenos a jen si doma připraví dva regulátory, které odměří.

Na této soustavě můžeme studentům demonstrovat užitečnost regulátorů, ale především jejich omezení. Také si zde ukážeme, že soustava není vždy stejná, proto budou dostávat různé výsledky. Tato soustava je totiž ovlivňována vnějším okolím a to je pro studenty také důležitý poznatek.

Aby mohli studenti rychle a jednoduše pracovat s multifunkčním controllerem, měli by se seznámit s lehkým manuálem, uvedeným v kapitole 7. Je tu uvedeno jen to nejdůležitější, ale pro naše potřeby a pro potřeby studentů je to naprosto vyhovující.

9 Použitá literatura

[1] http://dce.felk.cvut.cz/sari
[2] G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emani-Naeini,:Feedback Control of Dynamic System, Pearson Education Ltd, Londen 2006
[3] J. John : Systémy a řízení, Vydavatelství ČVUT 2003
[4] K. Hyniová: Řídící technika, Nakladatelství ČVUT 2006
[5] Multifunction Pragrammable Controller Installation and User manual of the AC10 – AC20 – AC30 controller, ASCON spa, Milano 1996

10 Přílohy

1) Graf 1 – Přechodová charakteristika neznámého systému
2) Graf 2 – Porovnání neznámého systému a jeho identifikace
3) Graf 3 – Přechodová charakteristika návrhu regulátoru pomocí GMK v úloze 4.2.1
4) Graf 4 – Bodeho diagram k úloze 4.2.2 a 4.2.3
5) Graf 5 – Odezva na jednotkový skok v uzavřené smyčce k úloze 4.2.2
6) Graf 6 – Přechodová charakteristika tepelné soustavy
7) Graf 7 – Porovnání tepelné soustavy a její identifikace
8) Graf 8 – Porovnání odezvy na jednotkový skok tepelné soustavy a jejího modelu s P-regulátorem
9) Graf 9 – Bodeho diagram tepelné soustavy
10) Graf 10 - Porovnání odezvy na jednotkový skok tepelné soustavy a jejího modelu s PID-regulátorem