

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

MATEMATICKÝ MODEL SOUSTAVY GUNT

RT 040 - REGULACE TEPLoty

David Hlava

Bakalářská práce

2019

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Hlava**
Osobní číslo: **I16048**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Matematický model soustavy GUNT RT 040 - regulace teploty**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl: Vytvoření, identifikace a verifikace matematického modelu laboratorní soustavy GUNT RT 040 - regulace teploty.

Obsah teoretické části: Dynamický systém, statická, přechodová, impulzní a frekvenční charakteristika, modelování, matematicko-fyzikální analýza, experimentální identifikace, simulace, zpětnovazební řízení, PID regulátor.

Obsah praktické části: Vytvoření dynamického modelu soustavy GUNT RT 040 - regulace teploty, změření statické charakteristiky a vybraných přechodových charakteristik, identifikace neznámých parametrů modelu, verifikace modelu soustavy bez regulace a s PID regulátorem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 80

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- DRÁBEK, O., MACHÁČEK, J. Experimentální identifikace. Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1987.
- BALÁŤE, J. Automatické řízení. 2 vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004.
- DUŠEK, F., HONC, D. Matlab a Simulink, Úvod do používání. skriptum, Univerzita Pardubice, vydání první, Pardubice, 2005.
- HONC, D., DUŠEK, F. MATLAB/Simulink Support for GUNT Control Units. In: 19th International Conference on Process Control 2013, Štrbské Pleso, Slovakia, June 18 - 21 2013, Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, pp. 534-539.
- RT 040 Training system: temperature control, HSI [online]. GUNT Hamburg [cit. 31. 10. 2018]. Dostupné na:

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Honc, Ph.D.
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: 14. prosince 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 10. května 2019



L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. prosince 2018

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školní díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 14. 8. 2020

David Hlava

Poděkování

Chci poděkovat vedoucímu katedry Ing. Danielu Honcovi Ph.D. za pomoc a vedení mé bakalářské práce. Dále chci poděkovat doc. Ing. Milanu Javůrkovi CSc., za pomoc při formální úpravě. Také chci poděkovat svým rodičům za podporu a trpělivost.

V Pardubicích dne 14. 8. 2020

David Hlava

ANOTACE

Práce je věnována problematice návrhu řízení laboratorní soustavy GUNT RT 040 - regulace teploty. Byla provedena identifikace parametrů modelu soustavy s uvažováním nelinearity statické charakteristiky. Parametry PI regulátoru byly vypočítány pomocí metody umístění pólů. Strategie řízení byla ověřena nejprve simulačně o poté také na reálné soustavě.

KLÍČOVÁ SLOVA

GUNT RT 040, identifikace, matematický model, PI regulátor.

TITLE

MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM GUNT RT 040 - TEMPERATURE CONTROL

ANNOTATION

Thesis deal with control design for laboratory process GUNT RT040 – temperature control. Model parameters were identified with respect to static characteristics nonlinearity. PI controller parameters were calculated by pole placement method. Control strategy was tested on simulation first and on real system afterwards.

KEYWORDS

Gunt RT 040, identification, mathematical model, PI controller

OBSAH

| | | |
|-------|---|----|
| | SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK | 9 |
| | SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ | 10 |
| | SEZNAM ILUSTRACÍ | 13 |
| | SEZNAM TABULEK | 15 |
| | ÚVOD | 16 |
| 1 | Teoretická část | 17 |
| 1.1 | Dynamický systém | 17 |
| 1.1.1 | Statická charakteristika | 18 |
| 1.1.2 | Přechodová charakteristika | 20 |
| 1.1.3 | Impulzní charakteristika | 23 |
| 1.1.4 | Frekvenční charakteristika | 25 |
| 1.2 | PID regulátor | 27 |
| 1.2.1 | Zpětnovazební řízení | 28 |
| 1.2.2 | Přenos řízení zpětnovazebního zapojení | 30 |
| 1.3 | Modelování a simulace | 31 |
| 1.3.1 | Modelování | 31 |
| 1.3.2 | Simulace | 31 |
| 1.4 | Experimentální identifikace | 32 |
| 1.4.1 | Rozdělení metod podle druhu vstupního signálu | 32 |
| 1.4.2 | Rozdělení metod podle způsobu zpracování výsledků experimentu | 33 |
| 1.4.3 | Rozdělení metod podle druhu modelu | 33 |
| 1.4.4 | Rozdělení metod podle kritéria shody soustavy a modelu | 34 |
| 1.5 | Matematickofyzikální analýza | 34 |
| 1.6 | Peltierův článek | 35 |
| 2 | Praktická část | 36 |

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Gunt RT 040 | 36 |
| 2.2 | Analýza chování soustavy | 38 |
| 2.3 | Experimentální Identifikace a matematický model | 40 |
| 2.4 | Nastavení PI regulátoru | 43 |
| 2.5 | Simulace regulačních pochodů | 47 |
| 2.6 | Řízení reálné soustavy s PI regulátorem..... | 56 |
| 3 | Závěr | 59 |
| | Použitá literatura | 60 |
| | Přílohy | 61 |

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

| | |
|-------------|--|
| M1L | lineární soustava prvního řádu (bez nelinearity) |
| M1N | lineární soustava prvního řádu s nelinearitou |
| M2L | lineární soustava druhého řádu (bez nelinearity) |
| M2N | lineární soustava druhého řádu s linearitou |
| PID | proporcionální, integrační a derivační |
| PI | proporcionální a integrační |
| ZZV | záporná zpětná vazba |
| regul_poch1 | regulační pochod PI regulátoru z prostředí Simulinku |
| up1 | akční veličina z prostředí Simulinku |
| URO | uzavřený regulační obvod |

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

| | |
|-------------|--|
| a_0 | počáteční podmínka koeficientu |
| a_m | konstantní koeficient |
| b_m | konstantní koeficient |
| b_0 | počáteční podmínka koeficientu |
| c | měrná tepelná kapacita, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| dy | derivace regulované veličiny |
| du | derivace akční veličiny |
| $\delta(t)$ | Diracův impuls |
| $e(t)$ | regulační odchylka |
| $E(s)$ | obraz regulační odchylky |
| e_v | chyba výstupu |
| e_i | chyba vstupu |
| ζ_0 | relativní tlumení |
| $g(t)$ | impulzní funkce |
| G_S | přenos regulované soustavy |
| G_R | přenos regulátoru |
| G_W | přenos řízení |
| G | obraz přenosu |
| $h(t)$ | přechodová funkce |
| H | obraz přechodové funkce |
| $\eta(t)$ | jednotkový skok |
| K | konstanta teploty, $W \cdot ^\circ C^{-1}$ |
| k_0 | počáteční zesílení soustavy |
| k | zesílení soustavy |
| L | operátor přímé L-transformace |

| | |
|-----------------|--|
| m | hmota místnosti, kg |
| M | přenos soustavy |
| M_p | přenos soustavy s nelinearitou |
| N | konstanta (filtr) |
| P | vstupní výkon, W |
| p | konstanta nelinearita |
| r_0 | zesílení regulátoru |
| S | chybová funkce |
| t | čas, s |
| τ | časová konstanta, s |
| T | teplota, °C |
| T_{ok} | vnější teplota, °C |
| T_i | integrační časová konstanta, s |
| T_d | derivační časová konstanta, s |
| T_0 | časová konstanta, s |
| T_1 | časová konstanta, s |
| T_2 | časová konstanta, s |
| T1 | data z Matlabu, teplota počáteční strany Peltierovy tyče |
| T2 | data z Matlabu, teplota střední strany Peltierovy tyče |
| T3 | data z Matlabu, teplota koncové strany Peltierovy tyče |
| TM | matematický model z Matlabu |
| TM _p | matematický model s nelinearitou z Matlabu |
| $U(s)$ | obraz akční veličiny |
| u_0 | počáteční podmínka akční veličiny |
| $u(t)$ | akční veličina |
| $w(t)$ | žádaná hodnota, řídicí veličina |

- $W(s)$ obraz žádané hodnoty
- $y(t)$ regulovaná veličina, výstupní veličina
- $Y(s)$ obraz výstupní hodnoty
- y_0 počáteční podmínka regulované veličiny
- y_m regulovaná veličina ve zpětné vazbě

SEZNAM ILUSTRACÍ

| | |
|---|----|
| Obr. 1.1 – Jednotkový (Heavisideův) skok..... | 20 |
| Obr. 1.2 – Přejchodové charakteristiky proporcionálních členů..... | 22 |
| Obr. 1.3 – Impulzní charakteristika proporcionálních členů | 23 |
| Obr. 1.4 – Diracův impulz | 24 |
| Obr. 1.5 – a) Amplitudová frekv. charakteristika, b) Fázová frekv. charakteristika | 26 |
| Obr. 1.6 – Nyquistův diagram | 26 |
| Obr. 1.7 – Uzavřený regulační obvod..... | 29 |
| Obr. 1.8 – Struktura tzv. chladicí termobaterie, převzato z (Reichl, 2007)..... | 35 |
| Obr. 2.1 – Obrázek soustavy Gunt RT, převzato z (Gunt, 2017) | 36 |
| Obr. 2.2 – Zobrazení principu Peltierovy tyče GUNT RT 040, převzato z (Gunt, 2017) | 37 |
| Obr. 2.3 – Průběhy z naměřených dat reálné soustavy s ventilátorem | 38 |
| Obr. 2.4 – Průběh z naměřených dat reálné soustavy s teplotou T3..... | 39 |
| Obr. 2.5 – Zobrazení průběhu naměřených dat a aproximací 1. řádu..... | 40 |
| Obr. 2.6 – Zobrazení modelu naměřených dat a aproximace 2. řádu | 42 |
| Obr. 2.7 – Přejchodová charakteristika URO pro skokovou změnu žádané hodnoty..... | 46 |
| Obr. 2.8 – Schéma zapojení PI regulátoru se soustavou..... | 47 |
| Obr. 2.9 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M1L bez omezení | 48 |
| Obr. 2.10 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M1L s omezením | 49 |
| Obr. 2.11 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2L bez omezení | 50 |
| Obr. 2.12 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2L s omezením | 50 |
| Obr. 2.13 – vnitřní schéma bloku Soustava se soustavou 2. řádu s nelinearitou..... | 51 |
| Obr. 2.14 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M1N bez omezení..... | 52 |
| Obr. 2.15 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M1N s omezením..... | 52 |
| Obr. 2.16 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2N bez omezení..... | 53 |
| Obr. 2.17 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2N s omezením..... | 54 |
| Obr. 2.18 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních M2N a kompenzací (bez omezení).... | 54 |
| Obr. 2.19 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2N a kompenzací (s omezením) | 55 |
| Obr. 2.20 – blokové schéma měřené reálné soustavy s PI regulátorem s kompenzací nelinearity | 56 |
| Obr. 2.21 – Zobrazení regulačního pochodu reálné soustavy s PI regulátorem a akční veličiny s kompenzací nelinearity | 57 |

Obr. 2.22 – Zobrazení regulačního pochodu reálné soustavy s PI regulátorem a akční veličiny bez kompenzací nelinearity58

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 2.1 – Hodnoty parametrů soustav | 43 |
| Tab. 2.2 – Různé nalezené parametry PI regulátoru s volbou konstant..... | 46 |

ÚVOD

Člověk může přímo ručně ovládat či regulovat různá zařízení a procesy, tato činnost se nazývá řízení. Řízení bez lidského faktoru se nazývá automatické řízení. Jsou dva typy řízení – v otevřené nebo uzavřené smyčce. Otevřená smyčka nemá zpětnou vazbu, čili se jedná o systém ovládání, a je to nejjednodušší varianta řízení. Regulace má zápornou zpětnou vazbu, kde se používá informace o stavu řízeného subsystému. Cílem řízení je co nejvíce přiblížit ovládané nebo regulované veličiny k žádané hodnotě i přes působící poruchy.

Pro řízení daných soustav je potřeba vytvořit strategii, která pomůže sestavit regulační obvod pro splnění požadované funkce. Strategie obsahuje informaci o chování soustavy, sestavení modelu a simulace, zvolení vhodného regulátoru, metody pro nastavení parametrů regulátoru, simulace modelu a experimenty na reálné soustavě.

Regulační obvod se skládá z regulátoru a regulované soustavy. Funkcí regulátoru je sledování žádané hodnoty w regulovanou veličinou y a potlačení negativního vlivu poruchových veličin d . Jsou přímé regulátory, které nevyžadují zdroj pomocné energie a nepřímé regulátory, které vyžadují pomocný zdroj energie. Používají se různé typy regulátorů. Dvupolohový regulátor má funkci nastavení pouze dvou hodnot (dvou úrovní) akční veličiny u_{on} a u_{off} (zapnuto/vypnuto, topí/netopí, atd...). Je to dáno nespojitostí použitého akčního členu. PID regulátor je takový, který má proporcionální, integrační a derivační složku. Dále je potřeba nastavit parametry regulátorů tak, aby plnily svůj úkol. Je několik metod pro nastavení parametrů regulátorů např.: Zieglerova-Nicholsova metoda, metoda umístění pólů, metoda pokus-omyl atd... Pak je potřeba ověřit nalezené parametry, zda regulátor dokáže sledovat žádanou hodnotu. Zapojí-li se regulátor a model do uzavřeného regulačního obvodu a provede se simulace, může se ověřit funkce regulátoru pro nastavené parametry. Jedním z nástrojů pro simulaci je aplikace Matlab-Simulink. Problémem bývá volba struktury regulátoru a také volba parametrů regulátoru. Její řešením může být zvolení jiného regulátoru nebo jiný postup.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 DYNAMICKÝ SYSTÉM

Dynamický systém je takový systém, který při změně vstupu nereaguje na výstupu pouze na úrovni algebraické funkce, ale vykazuje přechodový děj, který lze popsat diferenciální rovnicí. Dynamické systémy mají výstupy, které jsou závislé na vstupech. Ale mohou se vyskytnout poruchy, které mohou ovlivnit chování soustavy. Pokud existují ustálené stavy, lze systém graficky znázornit pomocí statické charakteristiky. Mezi dynamické systémy patří přechodová a impulzní charakteristika v časové oblasti a frekvenční charakteristika (Honc, 2018; Balátě, 2007).

Existuje několik typů dynamických systémů: spojité a diskrétní, lineární a nelineární. Spojité systémy jsou takové, které mají veličiny závislé na času, tedy nabývají reálných hodnot. U diskrétních systémů jsou hodnoty veličin v diskrétním čase. Lineární systémy jsou takové, u kterých platí superpozice (Cvejn, 2018; Balátě, 2007).

Příkladem dynamické soustavy může být nádrž s výtokovým otvorem, kde vstupní průtok se mění a dochází k dynamické změně hladiny v nádrži. Tedy platí bilance hmoty, tj. hmota, co přitéká, se musí rovnat té hmotě, co odečte a hmotě, co se akumulovala v nádrži. Dalším příkladem je topení v místnosti, kde při změně výkonu teploty dojde k dynamické změně teploty a je-li okolní teplota nižší, než je v místnosti i v ustáleném stavu (stav, kdy se teplota nemění), dojde k vyrovnání tepla i se ztrátovým výkonem do okolí. Tuto situaci lze zapsat jako bilance

$$P = K \cdot (T - T_{ok}) + m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (1.1)$$

kde P je vstupní výkon (ve W),

K je konstanta (potřebný výkon na topení o 1 °C),

T je teplota v místnosti (v celém objemu místnosti je stejná teplota ve °C),

T_{ok} je vnější teplota (ve °C),

m je hmotnost (v kg),

c je měrná tepelná kapacita (v $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) (Honc, 2018).

Chování systému s m vstupy a n výstupy lze popsat rovnicí, která má konstantní koeficienty, ve tvaru

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_m u^m(t) + \dots + b_0 u(t), \quad (1.2)$$

kde a_n, b_m jsou konstantní koeficienty,

a_0, b_0 jsou počáteční podmínky,

$y(t)$ je vstupní veličina,

$u(t)$ je výstupní veličina,

m, n jsou mocnitelé (Balátě, 2007).

Pak následuje úprava do přenosu systému, kde vstupy jsou ve jmenovateli a výstup v čitateli, která je vyjádřena vztahem

$$G(s) = \frac{b_m u^m(t) + \dots + b_0 u(t)}{a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t)}. \quad (1.3)$$

Musí platit nerovnost $m \leq n$, protože ve jmenovateli musí být řád vyšší nebo roven čitateli, aby rovnice byla řešitelná, neboť řád rovnice určuje hodnota n . Dále je nutné znát počáteční podmínky (Honc, 2018; Balátě, 2007).

1.1.1 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA

Jedná se o charakteristiku, která popisuje závislost ustáleného výstupu na vstupu systému. Systémy, u kterých pro ustálenou hodnotu řízení (vstupu) u_∞ existuje ustálená hodnota výstupu y_∞ , se nazývají systémy statické (Honc, 2018; Cvejn, 2018).

U statické charakteristiky můžeme zjistit zesílení k , které lze vypočítat pomocí první derivace. Zesílení se vypočítá pomocí dvou bodů a je dáno matematickým vztahem

$$k_0 = \left. \frac{dy}{du} \right|_{u_0, y_0}, \quad (1.4)$$

kde dy je derivace výstupu,

du je derivace vstupu,

u_0 je počáteční podmínka pro vstup,

y_0 je počáteční podmínka pro výstup.

Pokud jsou uvedeny počáteční podmínky, lze použít tento vztah

$$k_0 = \frac{y_0}{u_0}, \quad (1.5)$$

platí-li, že $y_0 \neq 0$, je koeficientem přenosu (Honc, 2018; Cvejn, 2018).

Zesílení je směrnice tečny v daném bodě. Je-li $|k_0| > 1$, jedná se o zesílení, je-li $|k_0| < 1$, jedná se o zeslabení. Pokud je k dispozici dvojice hodnot u_0 a y_0 v odpovídajících ustálených stavech, může se vynést do grafu. Z grafu pak lze pomocí aproximace určit směrnici přímek spojujících dva sousední body. Tedy tímto vztahem

$$k_1 = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \quad (1.6)$$

Pro první dvojici sousedních bodů platí

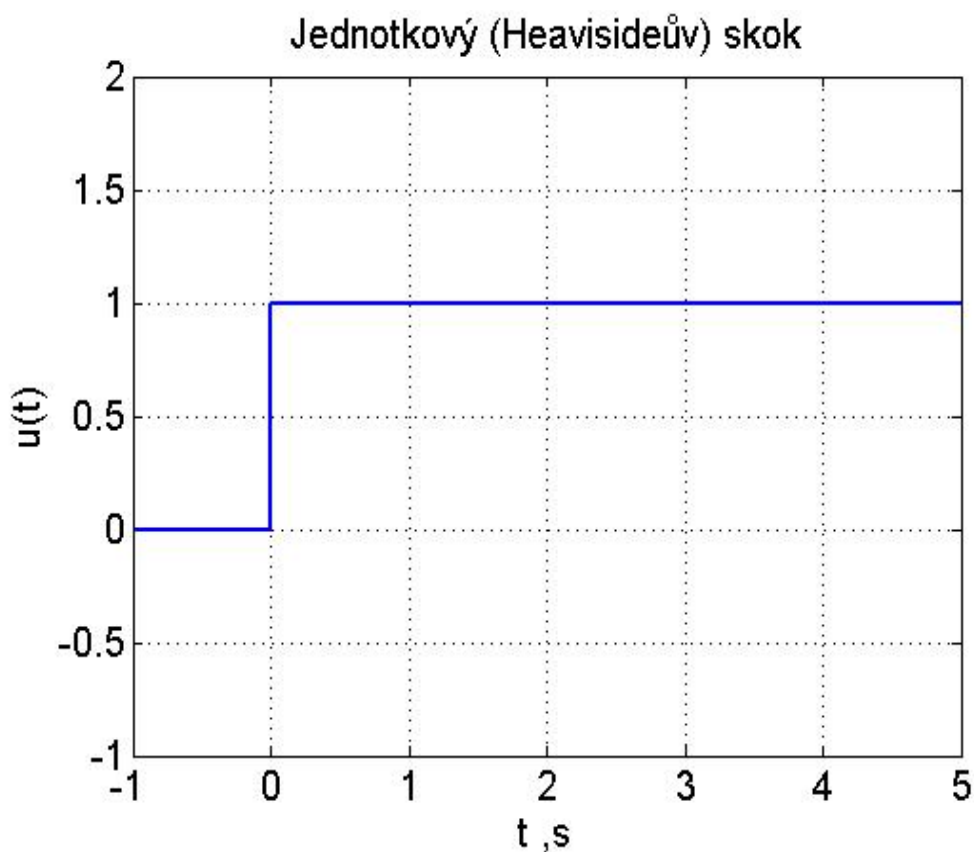
$$k_1 = \frac{y_2 - y_1}{u_2 - u_1}, \quad (1.7)$$

Tedy první derivace je rozdíl předchozích a aktuálních hodnot, jak je vidět v předchozích vztazích (Honc, 2018; Cvejn, 2018).

1.1.2 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA

Přechodová charakteristika je grafické znázornění přechodové funkce – odezvy na jednotkový skok neboli Heavisideův skok, který je zobrazen na obr. 1.1 při nulových počátečních podmínkách. Přechodovou funkci lze označit jako $h(t)$. V teorii lineárních systémů má velký význam pro analýzu odezvy vstupního signálu (Honc, 2018; Cvejn, 2018).

Výhodou přechodové charakteristiky je její snadná realizovatelnost. V praxi se často využívá pro identifikaci parametrů. Typickým příkladem je identifikace soustavy pro regulování pomocí PID regulátoru, kde lze díky přechodové charakteristice zjistit hodnoty zesílení a časových konstant. Způsobů pro určení parametrů PID regulátoru je několik, např. Ziegler-Nicholsovou metodou, experimentálním vyhledáváním kritického zesílení, metodou umístění pólů, metodou pokus-omyl atd (Honc, 2018; Balátě 2007).



Obr. 1.1 – Jednotkový (Heavisideův) skok

Matematická definice jednotkového skoku je

$$u(t) = \eta(t) = 0 \text{ pro } t \in (-\infty, 0), \quad (1.8)$$

$$u(t) = \eta(t) = 1 \text{ pro } t \in (0, \infty), \quad (1.9)$$

kde $u(t)$ – akční veličina,

$\eta(t)$ – jednotkový skok,

t – reálný čas (v s).

Laplaceův obraz jednotkového skoku je

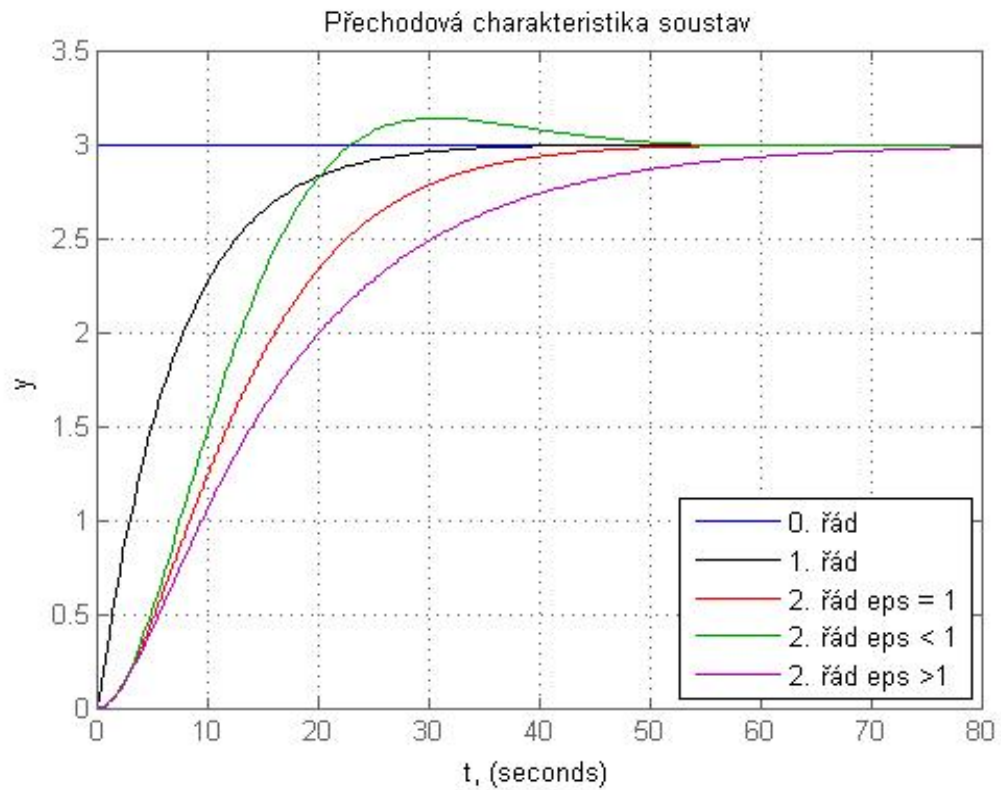
$$L\{\eta(t)\} = L\{1(t)\} = \frac{1}{s}. \quad (1.10)$$

Obraz přechodové funkce je

$$L\{h(t)\} = H(s) = G(s) * U(s) = \frac{G(s)}{s} \quad (1.11)$$

(Cvejn 2018).

Ukázka přechodových charakteristik proporcionálních členů se setrvačností nultého, prvního a druhého řádu jsou na obr. 1.2. Jsou použity tyto parametry: $k_I = 3$, $T_1 = 7$ s, $T_0 = 7$ s, $\xi = \{0,7; 1; 1,3\}$ (Honc, 2018).

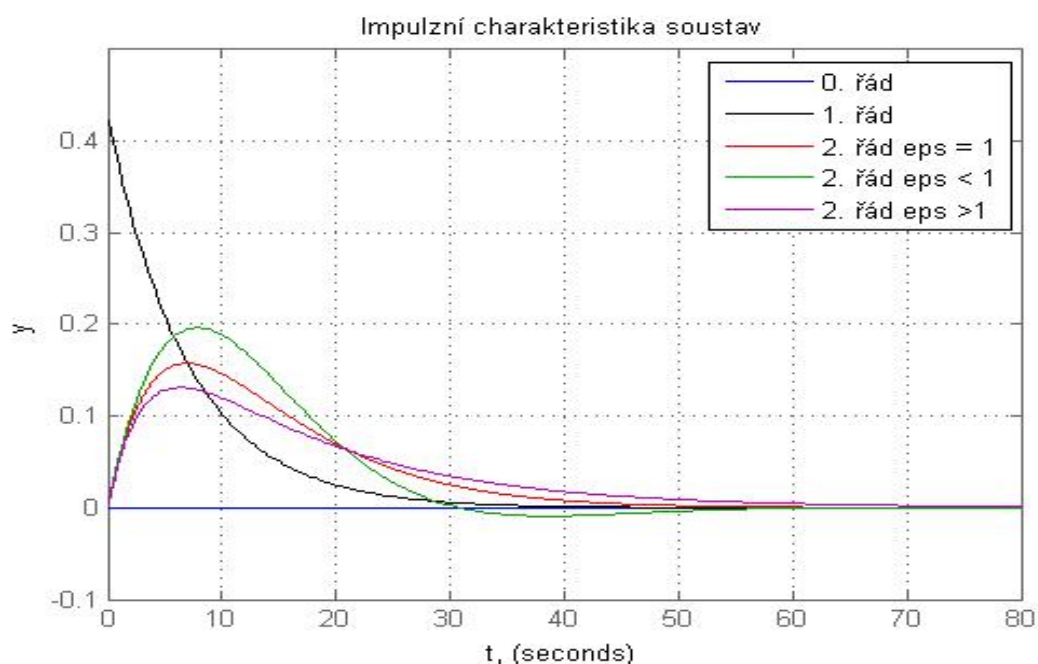


Obr. 1.2 – Přechodové charakteristiky proporcionálních členů

Některé soustavy mohou vykazovat dané zpoždění, označované jako dopravní zpoždění, které oddálí chování výstupu v závislosti na vstupu. Příkladem může být přesouvání fyzikální hmoty, která má dané fyzikální vlastnosti, které nelze měnit. Například voda v potrubí se nedostane z místa do daného cíle za milisekundy, ale v reálném čase. Dopravní zpoždění se označuje T_d , někdy i τ_d (Honc, 2018).

1.1.3 IMPULZNÍ CHARAKTERISTIKA

Impulzní charakteristika, někdy označována jako impulzová charakteristika, je grafické znázornění impulzní funkce – odezvy na jednotkový impulz neboli Diracův impulz při nulových počátečních podmínkách viz obr. 1.4. Impulzní funkce se označuje $g(t)$. Diracův impulz je teoretická funkce, protože je fyzikálně nerealizovatelná. Její plocha je rovna jedné. V praxi lze vyrobit impulz tak, že jeho šířka bude co nejmenší a výška co nejvyšší tak, aby jeho plocha byla rovna 1 (Cvejn, 2018; Honc, 2018).



Obr. 1.3 – Impulzní charakteristika proporcionálních členů

Diracův impulz je definován matematickým vztahem

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, \quad (1.12)$$

pokud platí

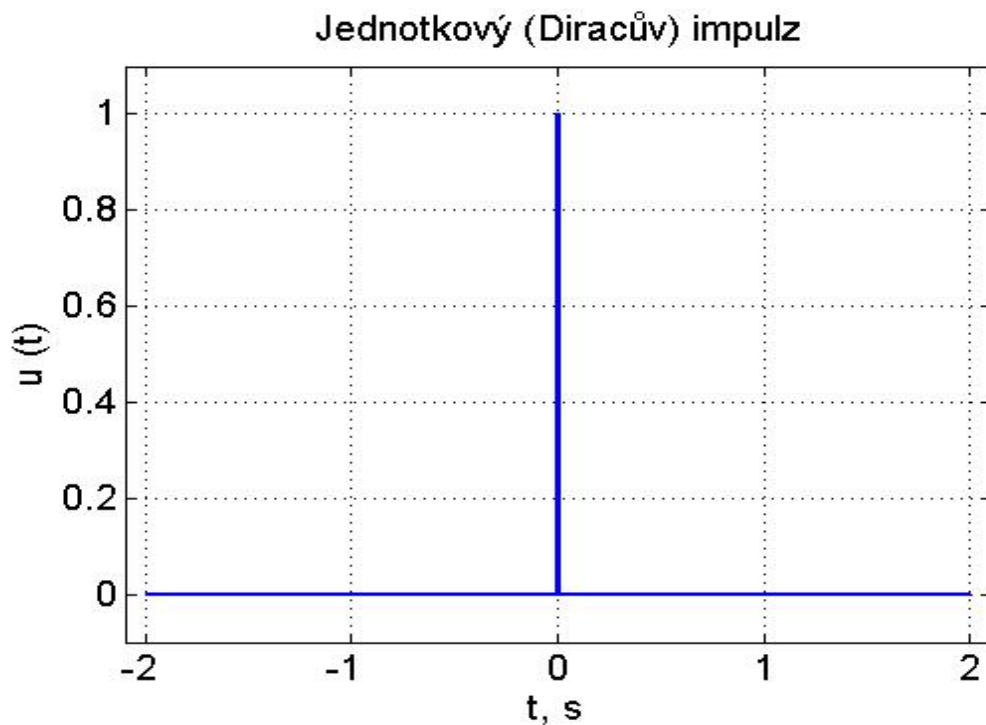
$$\delta(t) = 0 \quad \text{pro} \quad t \neq 0. \quad (1.13)$$

Laplaceův obraz Diracova impulzu je

$$L\{\delta(t)\} = 1. \quad (1.14)$$

Obraz impulzové funkce je

$$L\{g(t)\} = G(s) \cdot L\{\delta(t)\} = G(s). \quad (1.15)$$



Obr. 1.4 – Diracův impulz

Ukázka impulzních charakteristik proporcionálních členů se setrvačností nultého, prvního řádu a druhého řádu je uvedena na obr. 1.3. Použité parametry jsou z předchozí kapitoly. Jako u předchozí kapitoly se může vyskytovat dopravní zpoždění (Cvejn, 2018; Honc, 2018).

1.1.4 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

V předchozích kapitolách jsou charakteristiky v časové oblasti, zatímco v následující kapitole daná charakteristika popisuje chování systému v oblasti frekvenční. Tato charakteristika se dá zjistit pomocí měření nebo výpočtů z modelu. Na vstupu systému je harmonický sinusový signál s danou frekvencí, amplitudou a fází. Zatímco na výstupu systému vychází signál se stejnou frekvencí, ale se změněnou amplitudou a oproti vstupnímu signálu je fázově posunut (Honc, 2018; Cvejn, 2018; Balátě, 2007).

Frekvenční charakteristika se dá vypočítat, když se do přenosové funkce zavede pomocí substituce $s = j \cdot \omega$. Přenos je po změně komplexní číslo, jehož absolutní hodnota je rovna zesílení. Jeho fázový posun je úhel mezi vodorovnou reálnou osou a spojnicí bodu FCH (frekvenční charakteristika) s počátkem. Nyquistův diagram neboli v češtině amplitudofázová frekvenční charakteristika, která popisuje chování systému na každém bodě s jednou frekvencí a obsahuje tři informace o chování soustavy, se málo používá. Příkladné znázornění Nyquistova diagramu je na obr. 1.6 (Honc, 2018; Cvejn, 2018).

Příklad:

Jsou dány soustavy 1. řádu

$$7\dot{y} + y = 4u, \quad (1.16)$$

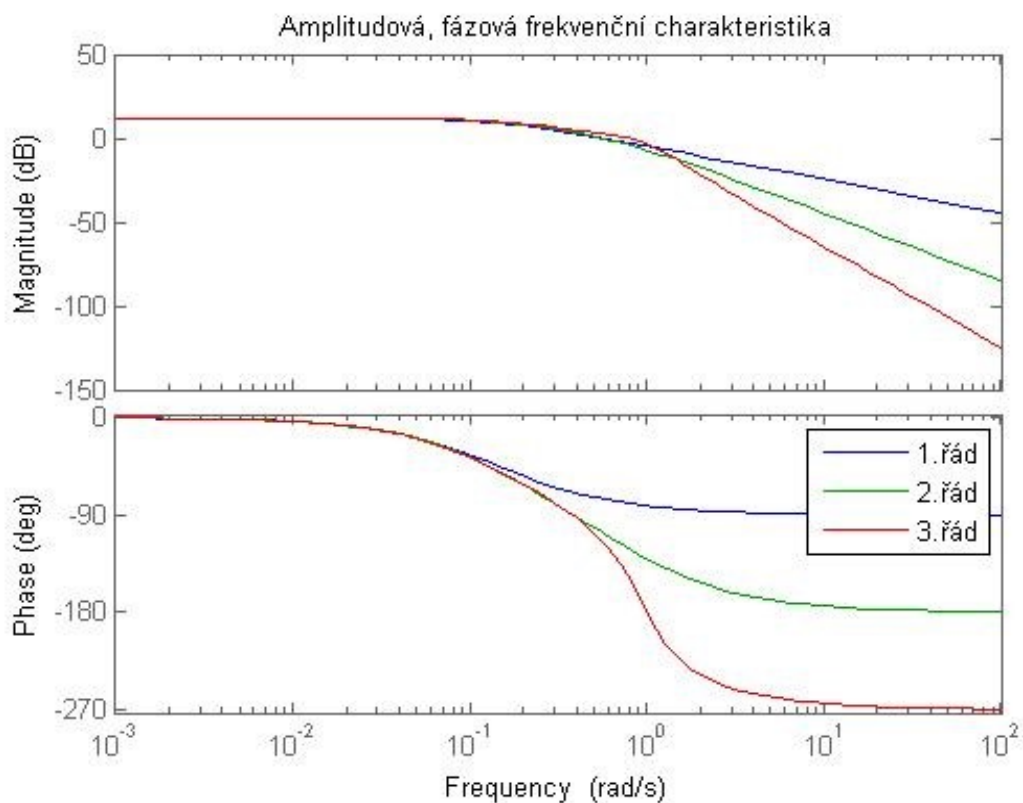
2. řádu

$$7\ddot{y} + 7\dot{y} + y = 4u, \quad (1.17)$$

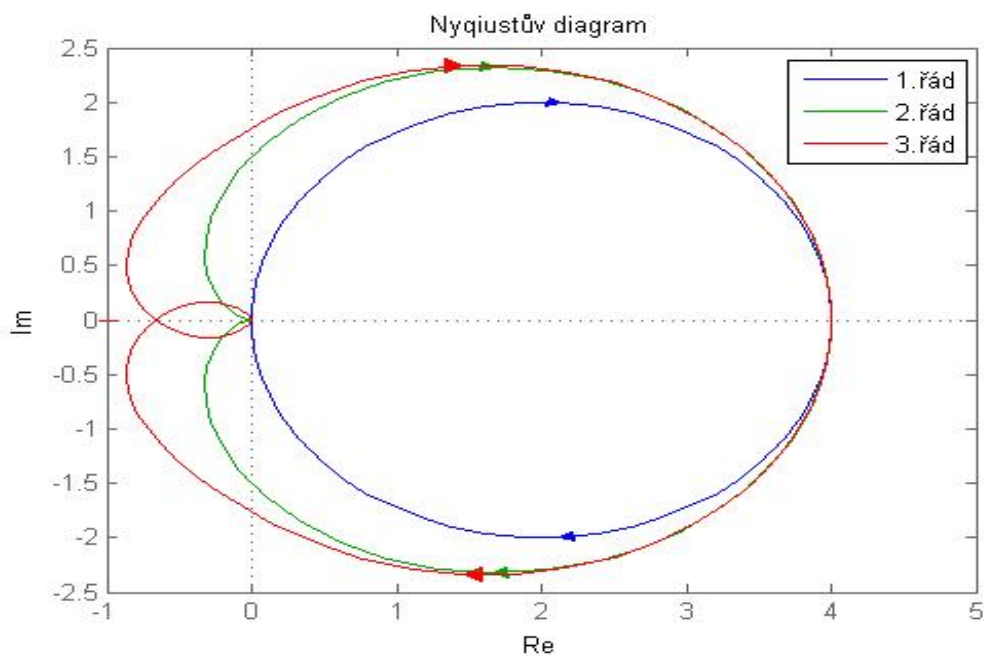
a 3. řádu

$$7\ddot{y} + 7\dot{y} + 7y = 4u. \quad (1.18)$$

Níže na obr. 1.5 je vidět amplitudofázová charakteristika, tedy názorné zobrazení, že soustava vyššího řádu má velké změny amplitudy a posunutí fáze (Honc, 2018).



Obr. 1.5 – a) Amplitudová frekv. charakteristika, b) Fázová frekv. charakteristika



Obr. 1.6 – Nyquistův diagram

1.2 PID REGULÁTOR

Regulátor vyhodnocuje výstup neboli regulační odchylku e a dle jeho účinku se nastaví akční veličina u , která udělá zásah do regulované soustavy. Blokové schéma lze vidět obr. 1.7. Regulační odchylka e je dána rozdílem výstupní hodnoty y a žádané hodnoty w , tedy je definováno vztahem

$$e = w - y, \quad (1.19)$$

kde e je regulační odchylka,

w je žádaná hodnota,

y je regulovaná hodnota (Honc, 2018).

PID regulátor je zkrácený název, jeho celý název je proporcionálně integračně a derivační regulátor. PID regulátor je tedy regulátor obsahující 3 složky: proporcionální, integrační a derivační. Všechny tři složky mají velký vliv na akční veličinu. Proporcionální složka se vyznačuje jako přímo úměrná akční veličina k regulační odchylce. Integrační složka se vyznačuje jako zvětšení či zmenšení akční veličiny tak, dokud není regulační odchylka nulová. Derivační složka se vyznačuje jako úměrnost rychlosti změny akční veličiny na regulační odchylce (Honc, 2018).

Funkce PID regulátoru je definována vztahem

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_1 \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + r_2 \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.20)$$

kde r_0 je konstanta regulátoru,

$e(t)$ je regulační odchylka v čase,

$e(\tau)$ je regulační odchylka,

r_1 je konstanta I složky,

r_2 je konstanta D složky,

$u(t)$ je vstupní hodnota (Honc, 2018; Macháček, 2015).

Rovnice v časové oblasti

$$u(t) = k_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + r_2 \cdot T_d \frac{d(t)}{dt} \right], \quad (1.21)$$

kde k_p je zesílení regulátoru,

T_i je integrační časová konstanta (v s),

T_d je derivační časová konstanta (v s) (Honc, 2018; Macháček, 2015).

U derivační složky bývají problémem šumivé signály, které zesilují negativní vlivy a tím zhoršují chování soustavy. Další problémem je skoková změna regulační odchylky, která by u derivační složky dosáhla teoreticky k nekonečnu. Pro vyloučení těchto problémů se přidává filtr, který eliminuje poruchové signály ve tvaru

$$\frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s}, \quad (1.22)$$

kde N je konstanta, jejíž hodnota se volí libovolně (Honc, 2018; Cejn, 2018; Macháček, 2015).

1.2.1 ZPĚTNOVAZEBNÍ ŘÍZENÍ

Zpětnovazební řízení využívá aktuální informace o procesu, kterým lze dosáhnout požadovaného průběhu výstupní veličiny i bez potřebné znalosti poruch a parametrů systému. Jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole, funkcí regulátoru je udržovat výstup na požadované hodnotě w . Jeho blokové schéma je na obr. 1.7, kde jsou popsány veličiny. Veličina d označuje okolní jevy, které mají značnou váhu na chování soustavy (většinou zhoršují chování, se kterými se musí počítat, aby soustava byla v ustáleném stavu). Popis jednotlivých parametrů regulátoru: w – žádaná hodnota i řídicí veličina (požadovaný vstup, například daný počet otáček motoru), e – regulační odchylka (jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, jedná se o rozdíl mezi w a y), G_R – regulátor (dle regulační odchylky vygeneruje akční veličinu pro

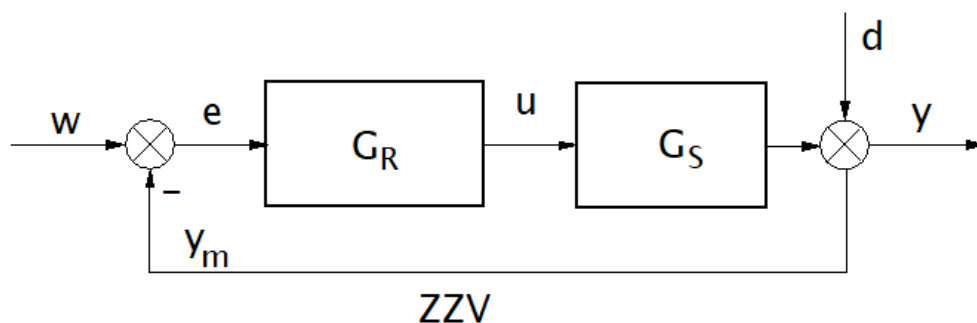
ovládání), u – akční veličina (udělá zásah do regulované soustavy, např. přidání či ubrání otáček), G_S – regulovaná soustava (např. stejnosměrný motor), d – poruchy (např. změna zátěže motoru), y – regulovaná veličina (výstupní hodnota soustavy, např. otáčky motoru), ZZV – zpětná záporná vazba, y_m – měřená hodnota regulační soustavy. Pro akční veličinu mohou nastat 3 možnosti:

- $w > y_m$ – dojde ke zrychlení soustavy,
- $w < y_m$ – dojde ke zpomalení soustavy,
- $w = y_m$ – rovnovážný stav (žádná změna)

(Honc, 2017; Cvejn, 2017; Balátě, 2007).

Působení poruch v regulačním obvodu:

- a) změna napájecího napětí na vstupu
- b) náhlé odlehčení zátěže na vstupu regulační soustavy
- c) vnitřní část soustavy (životnost součástek, chybné zapojení)



Obr. 1.7 – Uzavřený regulační obvod

Existuje mnoho druhů zpětných vazeb např. záporná, kladná, místní, celková, napěťová, proudová, frekvenčně závislá a frekvenčně nezávislá. Jedna z nich je velice užitečná v praxi, a to záporná vazba, lze ji vidět na obr. 1.7. Díky ní lze udržovat daný výstup na žádané hodnotě. Záporná vazba převede výstup do záporného tvaru $-y_m$, který se pak ve sčítacím modulu odečte od řídicí veličiny w (Honc, 2018; Cejn, 2018; Balátě, 2007).

1.2.2 PŘENOS ŘÍZENÍ ZPĚTNOVAZEBNÍHO ZAPOJENÍ

Přenos řízení neboli doplňková citlivostní funkce je přenos mezi žádanou hodnotou a regulovanou veličinou. Nejdříve se odvodí tři přenosy jednotlivých bloků. První přenos mezi regulovanou veličinou a akční veličinou

$$Y(s) = G_S(s) \cdot U(s), \quad (1.23)$$

kde $Y(s)$ je obraz přenosu $y(t)$,

$G_S(s)$ je obraz soustavy,

$U(s)$ je obraz výstupní hodnoty.

Druhý přenos mezi akční veličinou a regulační odchylkou

$$U(s) = G_R(s) \cdot E(s), \quad (1.24)$$

kde $G_R(s)$ je obraz regulátoru,

$E(s)$ je obraz regulační odchylky.

Třetí přenos mezi regulační odchylkou a regulovanou hodnotou

$$E(s) = W(s) \cdot Y(s), \quad (1.25)$$

kde $W(s)$ je obraz žádané hodnoty (Honc, 2018).

Nyní se dosadí do prvního přenosu (1.23) za $U(s)$ druhý přenos (1.24). Pak třetí přenos za $E(s)$ viz rovnice (1.25) do prvního přenosu (1.25) a získá se celkový přenos regulace

$$Y(s) = \frac{G_S \cdot G_R}{1 + G_S \cdot G_R} \cdot W(s) \quad (1.26)$$

(Honc, 2018).

1.3 MODELOVÁNÍ A SIMULACE

1.3.1 MODELOVÁNÍ

Někdy je potřeba pro pochopení jevů nebo složitých systémů vytvořit tzv. obraz reality. Obraz reality je myšlen jako umělý systém, který by se choval jako původní systém, čili by měl aproximovat funkci systému. Potom je umělý systém modelem původního systému. Tvorba modelu se nazývá modelování. Modelování slouží k vyřešení daných problémů systému, umožňuje vyšetřit chování systému, zda odpovídá požadavkům jeho funkce, aby se předešlo k chybám při testování v realitě (Drábek, 1987; Dorda).

Model systému, jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, je obraz systému nebo soustavy, který obsahuje skoro stejné (vždy je snaha dosáhnout nejbližší k původnímu systému) parametry, proměnné. Model může být model matematický a fyzický. Matematický model je obraz systému, který neumožňuje testovat jeho fyzickou podstatu, ale umožňuje testovat jeho průběhy pomocí matematického popisu. Fyzický model je obraz systému, na kterém lze testovat jeho fyzickou či geometrickou podobnost, tudíž na něj platí fyzikální jevy a je hmatatelný. Matematický model je možné získat zásadně dvěma způsoby, které budou vysvětleny v pozdějších kapitolách:

- a) matematickofyzikální analýza,
- b) experimentální identifikace.

Typy modelů lze dělit na hydraulický, elektrický a mechanický model. Testování s modelem bude probráno v kapitole 1.3.2. Díky této činnosti lze opravit chyby systému, zlepšit jeho parametry k dosažení přesnějšího výsledku (Drábek, 1987).

1.3.2 SIMULACE

Činnost pro testování modelu systému se nazývá simulování. Jedná se o postup hodně využívaný v praxi, zvláště po návrhu matematického modelu. Matematický model nevyžaduje přesnou znalost původního modelu, protože ve většině praktických případů je to zbytečné (Drábek, 1987).

Matematický model zkoumaného systému by měl umožnit analýzu statických i dynamických vlastností. Tedy simulace je spíše technika, která má za úkol nahradit původní systém modelem, a simuluje dynamické chování od skutečné soustavy (Drábek, 1987; Dorda).

1.4 EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE

Definuje se jako postup, při kterém se matematický model vypočte z naměřených vstupních a výstupních dat, která mají svá kritéria minimálního rozdílu od skutečné soustavy. Hlavním cílem této kapitoly je určení struktury a odhadů jejích parametrů. Často se vyžaduje popis šumového signálu, odhad směrodatných odchylek, průběhy přechodových a frekvenčních charakteristik (Drábek, 1987).

Z této definice vyplývá, že záleží na volbě vstupního signálu, volbě matematického modelu a jeho struktury, volbě daného kritéria shody modelu a identifikované soustavy. Vzniklo mnoho metod pro určení matematického modelu a jeho parametrů. V následujících kapitolách budou popsány různá rozdělení metod (Drábek, 1987).

1.4.1 ROZDĚLENÍ METOD PODLE DRUHU VSTUPNÍHO SIGNÁLU

Soustavy lze proměřovat vstupními signály nebo jejich poruchami. Jedná se pak o aktivní a pasivní analýzu systémů. Aktivní analýza má tu výhodu, že volba vstupního signálu s danou optimální vlastností je vhodná pro požadavky identifikované soustavy. Zásahy do identifikované soustavy způsobují jevy s danými obtížemi, které jsou součástí soustavy a nelze je vyřadit. U pasivní analýzy jsou známy předem dané vlastnosti vstupních signálů (Drábek, 1987).

Dále podle tvaru vstupního signálu se rozlišují deterministické vstupní signály pro vyhodnocování odezev na náhodné a pseudonáhodné signály. Deterministické vstupní signály mají daný průběh a jsou děleny na periodické a neperiodické (Drábek, 1987).

1.4.2 ROZDĚLENÍ METOD PODLE ZPŮSOBU ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Při zpracování vstupních signálů lze rozlišit spojité nebo diskrétní signály. Příkladem spojitého signálu je přechodová charakteristika. Číslicový počítač zpracovává diskrétní data, v případě spojitého se provádí vzorkování (Drábek, 1987).

Další rozdělení dle metod může být na explicitní a implicitní. Explicitní metoda (nerekurentní) se zabývá zpracováním dat najednou po ukončení měření. Zatímco u implicitní metody (rekurentní) se zpracovávají data postupně dle časového sledu (Drábek, 1987).

1.4.3 ROZDĚLENÍ METOD PODLE DRUHU MODELU

Důležité hledisko pro rozdělení metod je volba modelu nebo zvolený příslušný vstupní signál, kritéria a způsob zpracování. Níže jsou vypsány druhy modelů:

a) Model ve tvaru diferenciální rovnice nebo spojitě přenosové funkce

Tento model je ve tvaru diferenciální rovnice, která popisuje závislost mezi vstupními a výstupními signály.

b) Model ve tvaru diferenční rovnice nebo diskrétní přenosové funkce

Model je tvořen z diferenční rovnice, která znázorňuje závislost mezi diskrétními hodnotami vstupních a výstupních signálů soustav.

c) Model ve tvaru frekvenční charakteristiky

Zde frekvenční charakteristika na základě různých frekvencí popisuje chování soustavy, a to pomocí absolutní hodnoty získané z poměru výstupního a vstupního signálu soustavy s proměnnou frekvencí.

d) Model ve tvaru impulzní charakteristiky

Lze získat přímým měřením odezvy na Diracův impuls, nebo vyhodnocováním vstupního a výstupního signálu soustavy pomocí korelační analýzy, popřípadě konvolucí (Drábek, 1987).

1.4.4 ROZDĚLENÍ METOD PODLE KRITÉRIA SHODY SOUSTAVY A MODELU

Jedná se o kritérium shody, které určuje tzv. chybovou funkci S . Tato konstanta se vyjadřuje pomocí rozdílu mezi chováním soustavy a modelu s určitým měřením. Pro chybu modelu ať spojitého či diskrétního se rozlišují dva způsoby:

- 1) Chyba výstupu e_v , kdy jsou porovnávány výstupní signály modelu a soustavy.
- 2) Chyba vstupu e_i , která je definována rozdílem mezi vstupním signálem soustavy a signálem, kterým by měl být na vstupu modelu (Drábek, 1987).

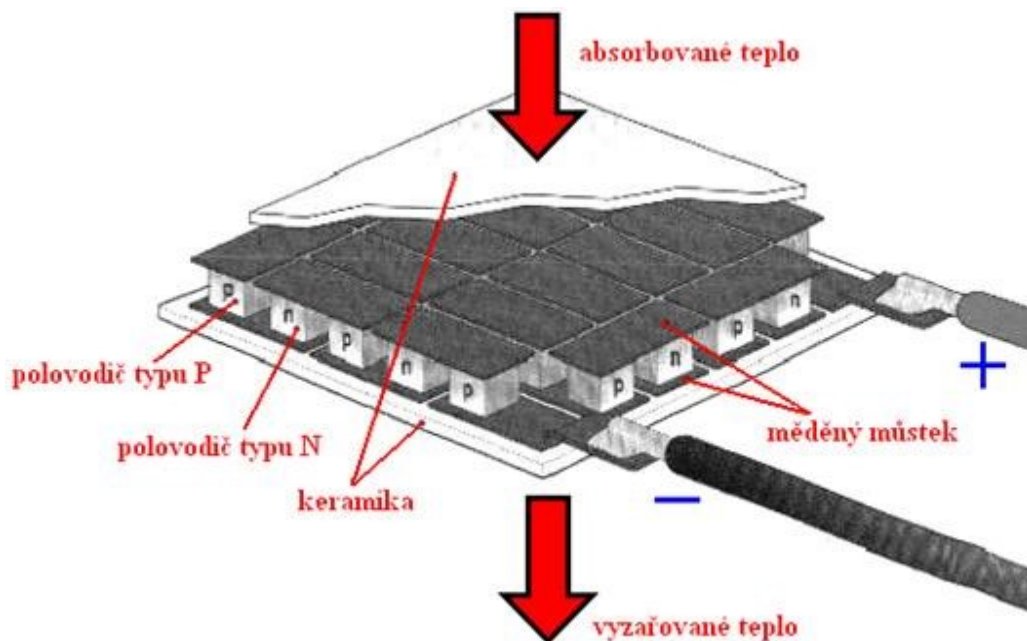
1.5 MATEMATICKOFYZIKÁLNÍ ANALÝZA

Jak již bylo uvedeno v oddíle 1.3.1, jedná se o jeden ze způsobů získání matematického modelu. Pokud je systém modelu složitý, lze ho rozdělit na několik menších částí, jejichž chování lze popsat pomocí bilanční rovnice, ve které se předpokládají fyzikální zákony, tj. zákony o zachování hmoty a energie. Tedy se musí rovnat výstupní energie + energie, která se naakumulovala, se vstupní energií. Příklad o zachování energií je vidět na rovnici (1.1), kde je P jako vstupní výkon, první součinitel představuje přechod tepla se změnami teploty a druhý součinitel obsahuje akumulační část, tedy fyzikální vlastnosti místnosti a jeho obsah (vzduch ať suchý či vlhký). Tato úvaha je výhodná z hlediska povahy systému, jehož koeficienty přímo představují reálné parametry (rozměry, apod.). Při matematickofyzikální analýze lze modelovat existující systémy, nebo i systémy ve stadiu projekce či vývoje (Drábek, 1987).

Na druhou stranu jednoduchý systém vyžaduje znalosti rozboru vnitřního systému, který může většinou provádět specialista daného oboru. Tedy je třeba mít pro analýzu zasvěcený obor. U rozsáhlých systémů bývá výsledný model soustavy natolik složitý, že je nutné aproximovat soustavu na jednodušší model pro další využití. Problémem je určování některých koeficientů v kvantitativní oblasti, které mohou být v bilančních rovnicích, např.: u modelu teploty místnosti je koeficient K (přestup tepla). Výsledný model získaný z matematickofyzikální analýzy bývá často ve tvaru jednoduchých nebo parciálních diferenciálních rovnic (Drábek, 1987).

1.6 PELTIERŮV ČLÁNEK

Jedná se o součástku využívající Peltierův jev. Tento článek je složený z polovodičů typu P a N, viz obr. 1.8. Je obalen měděnou vrstvou, protože měď patří mezi nejlepší vodiče jak elektrické energie, tak i tepelné energie. Vnitřní část je složená ze dvou polovodičů typu P a N, které vytvoří přechody tak, že dochází k činnosti článku. Tedy jedna strana se bude ohřívat (vyzařovat tepelnou energii) a druhá strana ochlazovat (dojde k pohlcování tepelné energie). Článek je obklopen keramickým pláštěm, jehož úkolem je elektrická izolace s dobrou tepelnou vodivostí. Zapojením do série se dá vytvořit tzv. chladicí termobaterie. Pro funkčnost samotného článku je potřeba dodávat elektrické napětí, bez kterého není zajištěna funkce (otevřené přechody PN) (Reichl, 2007; Termoelektrický jev, c1996-2019; MÜLLER, 2012).



Obr. 1.8 – Struktura tzv. chladicí termobaterie, převzato z (Reichl, 2007)

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 GUNT RT 040

GUNT RT 040 je experimentální zařízení s možností regulace teploty, viz obr. 2.1. S tímto zařízením lze simulovat situace pro vytápění i pro chlazení. Soustava obsahuje displej pro zobrazení kontrol a ovládacích prvků, ventilátor, kovová tyč v obkladové trubce s teploměrem, ohřívač/chladič (Gunt, 2017).

Na obr. 2.2 je zobrazen podrobnější popis vnitřní soustavy Gunt RT. Kovová tyč, která je tepelně izolována speciálním opláštěním, je na jednom konci tyče vyhřívána nebo chlazená

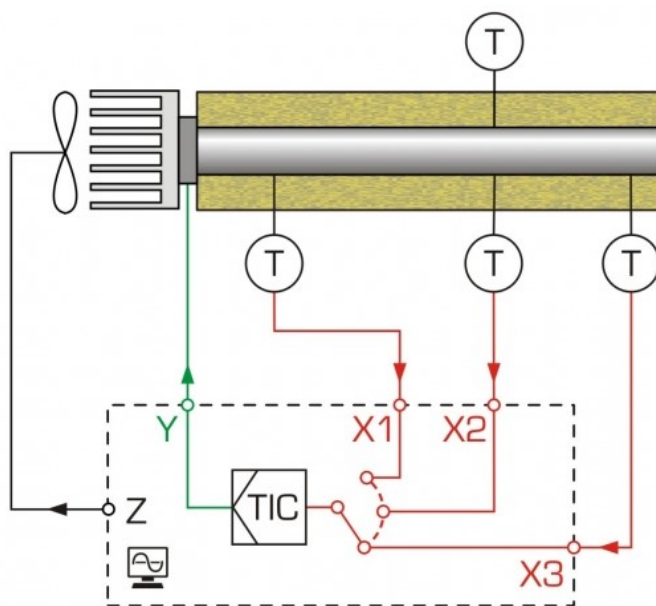


Obr. 2.1 – Obrázek soustavy Gunt RT, převzato z (Gunt, 2017)

Peltierovým prvkem. Obsahuje tři teplotní převodníky podél osy tyče, které umožňují změnu teploty podél délky tyče a provádějí tepelná zpoždění, která mají být získána za různých provozních podmínek. Tepelné senzory posílají naměřená data X1, X2 a X3 do softwaru TIC. Dalším prvkem je vytápěcí teploměr nabízející výhodu odečíst teplotu kdykoliv. Teplota se měří pomocí třech tepelných odporů PTC, ze kterých pocházejí tři data měření X1, X2 a X3. Výstup Y nastavuje chlazení nebo topení na základě vstupu Z, který určí, jaký signál je pro testování teploty. Umožňuje také použít měření s ventilátorem nebo bez ventilátoru pro ukázkou rozdílu mezi nimi (Gunt, 2017).

Výstupní signál, který je na obrázku označen písmenem Z, pochází z regulátoru a ovlivňuje provozní napětí Peltierova prvku i topný výkon. Samotný ventilátor umístěný na

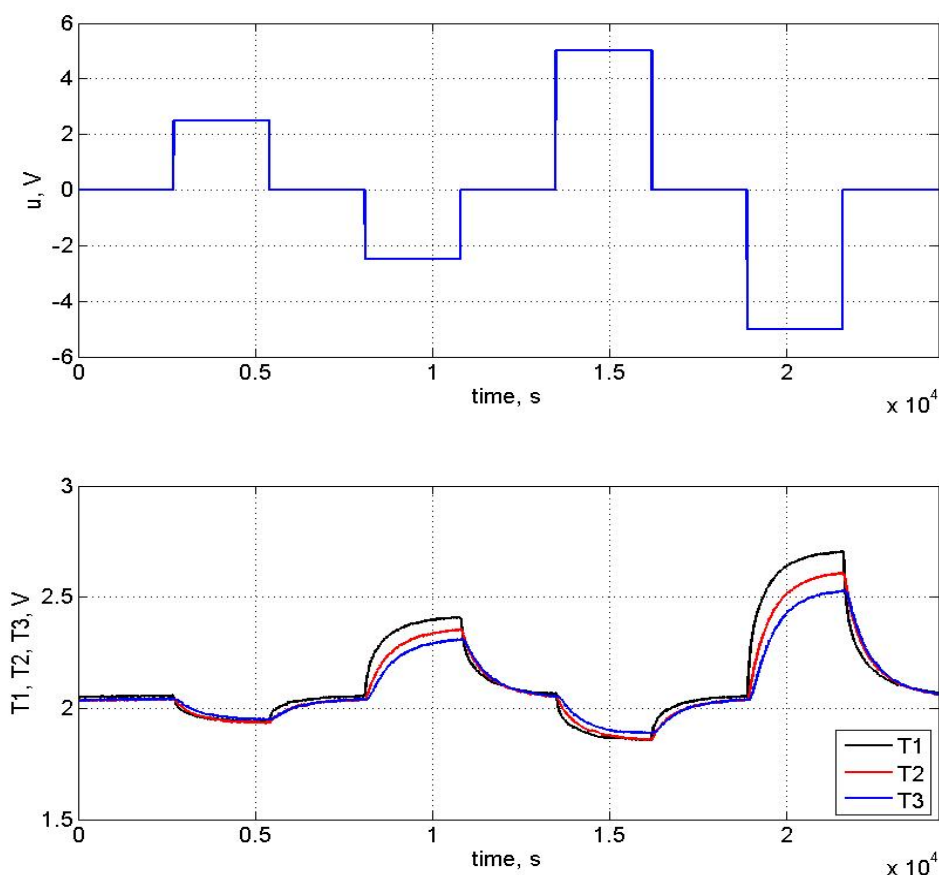
konci trubky, který rozptyluje část topného výkonu, může být aktivován softwarem. Díky softwaru umožňuje zkoumat vlivy proměnného rušení vstupující do tyče. Proto je označován jako důležitá součást systému Gunt. Software je výkonně nejmodernější, ztělesňuje princip integrace hardwaru a softwaru (HSI). Umožňuje provádět a vyhodnocovat experimenty uživatelským způsobem. Také má síťové schopnosti. Spojení mezi experimentální jednotkou a počítačem je prováděno přes USB port (Gunt, 2017).



Obr. 2.2 – Zobrazení principu Peltierovy tyče GUNT RT 040, převzato z (Gunt, 2017)

2.2 ANALÝZA CHOVÁNÍ SOUSTAVY

Průběh soustavy bylo možno popsat po zadání konkrétních dat. S danými hodnotami byl vytvořen v aplikaci Matlab průběh složený ze dvou průběhů viz obr. 2.3. První (horní) průběh byl popsán jako vstupní napětí pro ovládání výkonu Peltierova článku a chování soustavy bylo popsáno binárně: topení či chlazení. Druhý průběh (dolní) byl popsán jako výstup z Peltierovy tyče obsahující tři křivky ze senzorů T1, T2 a T3.

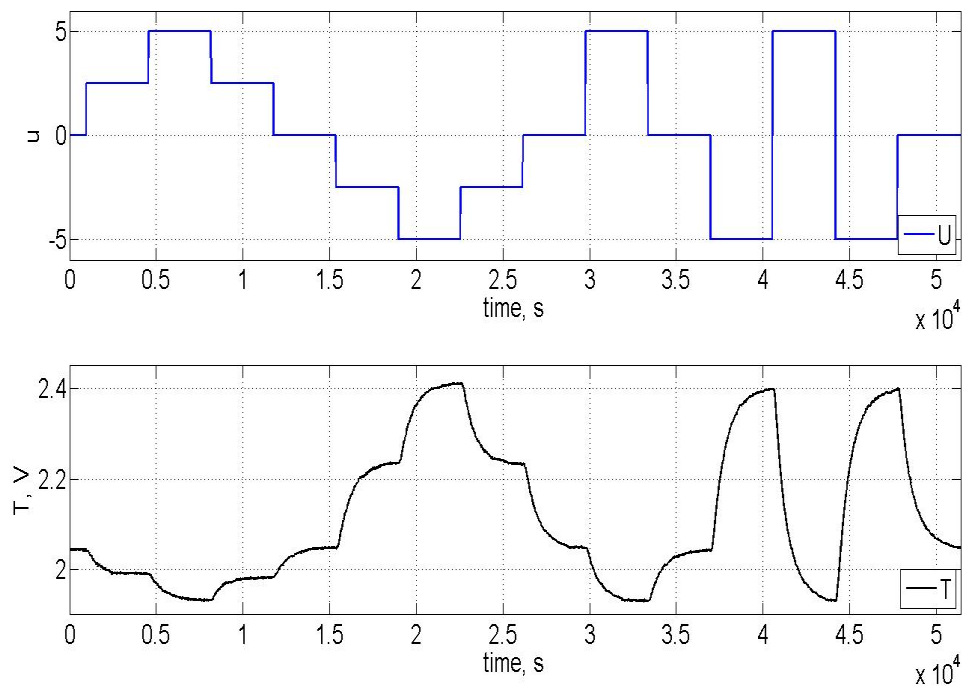


Obr. 2.3 – Průběhy z naměřených dat reálné soustavy s ventilátorem

Z obr. 2.3 je patrné, že všechny tři teploty byly mírně odlišné. Důvodem byla skutečnost, že na Peltierově tyči byly umístěny tři senzory na počáteční, prostřední a koncové straně tyče. Teplota T1 byla nejbližší soustavě, z toho plynulo, že se jednalo o data ze senzoru pocházejícího na přední straně tyče. Teplota T2 pocházela z prostřední části tyče a T3 z koncové strany tyče. Na obr. 2.3 bylo vidět, že docházelo ke změnám stavů jako topení a chlazení. Na obr. 2.3 (horní průběh) bylo zobrazeno vstupní napětí pro ovládání výkonu Peltierovy tyče do soustavy. Toto napětí mělo následující stavy. Prvním signálem bylo zobrazeno chlazení (napětí 2,5 V), druhý

signál byl zobrazován jako topení (napětí $-2,5$ V), třetí signál byl dvojnásobně vyšší oproti prvnímu signálu a jednalo se o chlazení (napětí 5 V), čtvrtý signál byl taktéž dvojnásobně vyšší a jednalo se o topení (napětí -5 V).

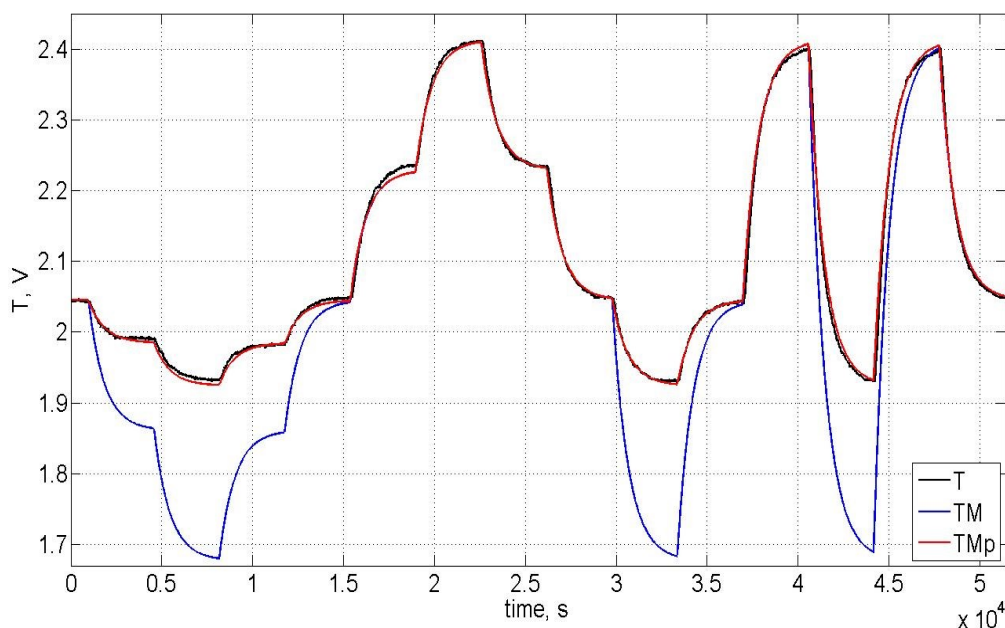
Bylo provedeno opětovné měření na reálné soustavě pro lepší průběh, ze kterého by se dal vytvořit matematický model, který by se přibližoval k chování reálné soustavy. Pro sestavení modelu bylo potřeba počítat se změnami topení a chlazení. Z průběhu viz obr. 2.4 byl prozkoumán výstupní signál popisující napětí z Peltierovy tyče, neboť byl složen z různých velikostí signálu, tj teplota T3. První signál chlazení a třetí signál chlazení byly odlišně velké. Třetí signál byl podle odhadu o jednu třetinu vyšší než první signál.



Obr. 2.4 – Průběh z naměřených dat reálné soustavy s teplotou T3

2.3 EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE A MATEMATICKÝ MODEL

Pro sestavení matematického modelu byla zvolena teplota T3. Pro model, který by se přibližoval k chování reálné soustavy, bylo potřeba najít správný řád soustavy. U dané situace, kde probíhalo střídání topení a chlazení, bylo vhodné zvolit soustavy prvního řádu a druhého řádu.



Obr. 2.5 – Zobrazení průběhu naměřených dat a aproximací 1. řádu

Vytvořil se program pomocí aplikace Matlabu pro hledání parametrů soustavy tak, aby se soustava přibližovala k chování reálné soustavy. Začátkem byla soustava prvního řádu, která by byla jednoduchá pro aplikaci metody umístění pólů, a i soustava druhého řádu pro porovnání. Sestavený program našel parametry soustavy jak pro první řád, tak i pro druhý řád. Po sestavení průběhů soustav prvního řádu a druhého řádu se porovnálo, která z nich by byla vhodná pro další postup, tj. pro metodu hledání parametrů PI regulátoru. Byla zvolena soustava prvního řádu, viz obr. 2.5, protože by byla jednoduchá pro implementaci metody umístění pólů a v porovnání se soustavou druhého řádu se nejednalo o velký rozdíl. Zatímco soustava druhého řádu, viz obr. 2.6 by byla vhodnější pro aproximaci a měla by větší stupeň volnosti, ale bylo by těžší nalezení parametrů PI regulátoru. Byla zvolena soustava prvního řádu. Jednalo se o lineární soustavu s nelinearitou. Lineární soustava s nelinearitou odpovídala přepínání topení na chlazení. Pro lepší aproximaci lineární soustavy s nelinearitou se značením TMp se přidala konstanta nelinearity p . Tato konstanta umožnila zajistit průběhy chlazení tak, jak měla reálná

soustava, protože chlazení mělo signál o třetinu menší než topení. Na obr. 2.5 byl vidět rozdíl mezi modelem prvního řádu a modelem prvního řádu s konstantou nelinearity. Lineární soustava s označením TM měla chlazení mimo reálnou soustavu, ale topení odpovídající. Díky konstantě nelinearity p umožnila aproximovat chlazení. Po provedení identifikace parametrů bylo ověřeno, že chlazení mělo třetinový průběh. Na tab. 2.1 byly zobrazeny hodnoty parametrů zvolených soustav.

Soustava 1. řádu

$$M1L = \frac{k}{T_1s + 1}, \quad (2.1)$$

kde $M1L$ je přenos soustavy,

k je zesílení,

T_l je časová konstanta (v s).

Soustava 1. řádu s nelinearitou

$$M1N = \frac{k \cdot p}{T_1s + 1}, \quad (2.2)$$

kde k je zesílení,

p je konstanta nelinearity,

T_l je časová konstanta (v s).

Soustava 2. řádu

$$M2L = \frac{k}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} = \frac{k}{T_1 \cdot T_2s^2 + 2 \cdot T_1 \cdot T_2s + 1}, \quad (2.3)$$

kde k je zesílení soustavy,

T_l je dominantní časová konstanta (v s),

T_2 je časová konstanta (v s).

Soustava 2. řádu s nelinearitou

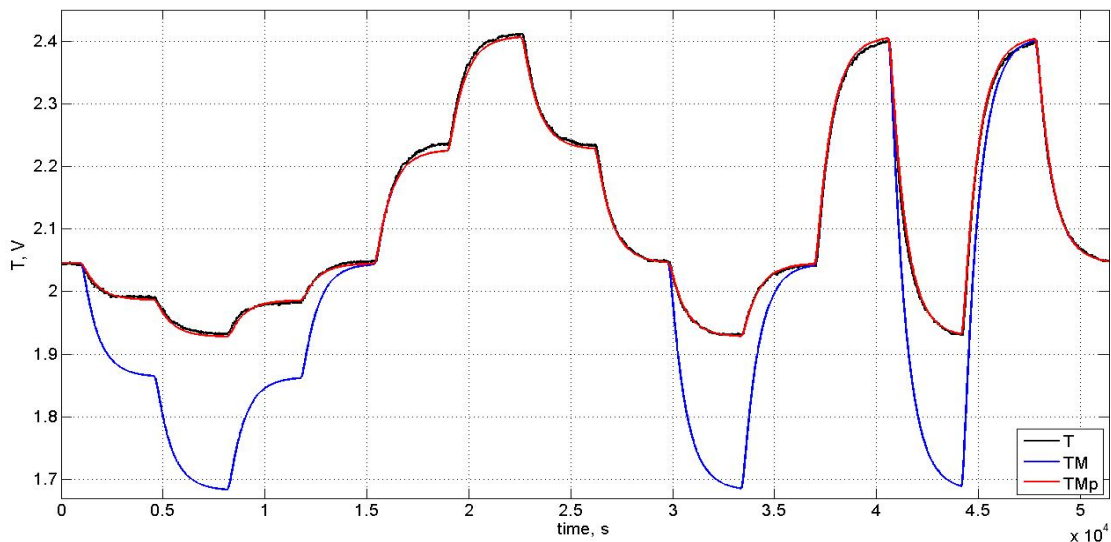
$$M2N = \frac{k \cdot p}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)} = \frac{k \cdot p}{T_1 \cdot T_2 s^2 + 2 \cdot T_1 \cdot T_2 s + 1}, \quad (2.4)$$

kde k je zesílení,

p je konstanta nelinearity,

T_1 je dominantní časová konstanta (v s),

T_2 je časová konstanta (v s).



Obr. 2.6 – Zobrazení modelu naměřených dat a aproximace 2. řádu

Z výše popsaných činností vyplývala skutečnost, že soustava druhého řádu by mohla odpovídat průběhu reálné soustavy Gunt, protože má vyšší stupeň volnosti. Zatímco soustava prvního řádu by se přibližovala k chování reálné soustavy se špatným stupněm volnosti a byla by jednodušší pro metodu umístění pólů.

Tab. 2.1 – Hodnoty parametrů soustav

| | M1L | M1N | M2L | M2N |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| k | -0,0489 | -0,0736 | -0,0481 | -0,0726 |
| T ₁ , s | 871,23 | 870,21 | 758,34 | 750,67 |
| T ₂ , s | – | – | 91,37 | 98,26 |
| p | 1 | 0,33 | 1 | 0,32 |

2.4 NASTAVENÍ PI REGULÁTORU

Pro regulaci nalezeného matematického modelu bylo potřeba zvolit vhodný regulátor. Regulátor typu PID by nebyl ideální, protože derivační složka nebyla potřeba. Výhodnějším byl regulátor typu PI, protože s integrační složkou dosáhl rychleji žádané hodnoty a nepotřeboval derivační složku na útlum překmitu. Pro regulaci matematického modelu byl tedy zvolen PI regulátor. Nalezená soustava prvního řádu měla časovou konstantu přibližně 15 minut a soustava druhého řádu měla časovou konstantu přibližně 13 minut. Proto byl typ PI regulátoru vhodný, jelikož nebyla třeba D složka pro útlum překmitů. Pro samotnou regulaci bylo třeba zjistit parametry regulátoru a na to existuje mnoho metod např.: Ziegler-Nicholsova metoda s přechodovou charakteristikou nebo kritickou hodnotou, metoda pokus-omyl, metoda umístění pólů atd... Pro hledání parametrů regulátoru typu PI byla zvolena metoda umístění pólů.

Metoda umístění pólů umožnila najít takové parametry regulátoru, které byly potřeba pro dobrou regulaci modelu soustavy, aby regulační pochod byl přijatelný bez velkých odchylek a s dobrou kvalitou regulace. Realizace této metody spočívala v hledání stejného charakteristického polynomu s modelem. Pro získání charakteristického polynomu bylo potřeba mít přenos řízení. Tedy po dosazení přenosu soustavy prvního řádu a přenosu regulátoru typu PI byl výsledkem přenos řízení druhého řádu dle vzorce (2.5). Byl zvolen charakteristický polynom druhého řádu. Po úpravách, které budou následně popsány, se získaly parametry regulátoru. Nevýhodou této metody by bylo použití pro vyšší řády, kde by bylo obtížnější vyjádření parametrů regulátoru.

Přenos řízení G_w bylo dáno vztahem

$$G_w = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_R \cdot G_S}, \quad (2.5)$$

kde G_R je přenos regulátoru,

G_S je přenos soustavy (Macháček, 2015).

Přenos regulátoru G_R

$$G_R = r_0 + \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = \frac{r_0 \cdot (T_i s + 1)}{T_i s}, \quad (2.6)$$

kde r_0 je zesílení regulátoru,

T_i je integrační konstanta.

Přenos soustavy byl použit soustavou prvního řádu z rovnice (2.1). Po dosazení do rovnice přenosu řízení se získal tvar

$$G_w = \frac{\frac{r_0 \cdot (T_i s + 1)}{T_i s} \cdot \frac{k}{T_1 s + 1}}{1 + \frac{r_0 \cdot (T_i s + 1)}{T_i s} \cdot \frac{k}{T_1 s + 1}}. \quad (2.7)$$

Po provedení úprav rovnice byl výsledný tvar

$$G_w = \frac{T_i s + 1}{\frac{T_i \cdot T_1}{k \cdot r_0} s^2 + \frac{T_i + k \cdot r_0 \cdot T_i}{k \cdot r_0} s + 1}. \quad (2.8)$$

Tato rovnice, tedy přenos řízení, měla charakter soustavy druhého řádu. Pro určení parametrů regulátoru typu PI byl zvolen způsob volby. Jednalo se o zvolení takové soustavy, která by odpovídala shodnosti polynomu druhého řádu. Protože charakteristický polynom ve jmenovateli měl charakter druhého řádu, tudíž bylo potřeba zvolit druhou soustavu také druhého řádu, aby se dalo na základě volby a rovnosti určit parametry r_0 a T_i .

Charakteristický polynom přenosu řízení byl

$$\frac{T_i \cdot T_1}{k \cdot r_0} s^2 + \frac{T_i + k \cdot r_0 \cdot T_i}{k \cdot r_0} s + 1. \quad (2.9)$$

Soustava druhého řádu pro řešení parametrů dle metody umístění pólu byla ve tvaru

$$T_0 s^2 + 2 \cdot \xi_0 \cdot T_0 s + 1, \quad (2.10)$$

$$T_0 s^2 + 2 \cdot \xi_0 \cdot T_0 s + 1 = \frac{T_i \cdot T_1}{k \cdot r_0} s^2 + \frac{T_i + k \cdot r_0 \cdot T_i}{k \cdot r_0} s + 1, \quad (2.11)$$

kde T_0 je časová konstanta = volitelný parametr (v s),

ξ_0 je relativní tlumení – volitelný parametr,

T_i je integrační časová konstanta (v s),

T_1 je časová konstanta (v s),

k je zesílení soustavy,

r_0 je zesílení regulátoru.

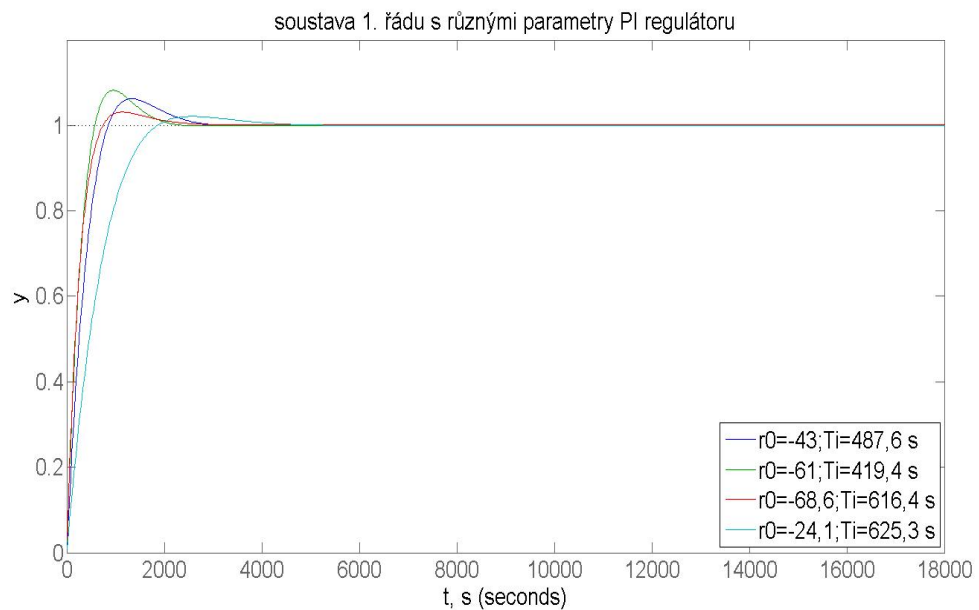
Byla sestavena rovnice a po provedení úprav rovnice se zjistilo vyjádření parametrů regulátoru r_0 a T_i ve tvarech

$$T_i = \frac{2 \cdot \xi_0 \cdot T_1 \cdot T_0 - T_0}{T_1}, \quad (2.12)$$

$$r_0 = \frac{T_i \cdot T_1}{T_0^2 \cdot k}. \quad (2.13)$$

Tab. 2.2 – Různé nalezené parametry PI regulátoru s volbou konstant

| název v grafech | regul_poch1 | regul_poch2 | regul_poch3 | regul_poch4 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| T_0, s | 450 | 350 | 400 | 680 |
| ξ_0 | 0,8 | 0,8 | 1 | 0,85 |
| r_0 | -43 | -61 | -68,6 | -24,1 |
| T_i, s | 487,6 | 419,4 | 616,4 | 625,3 |



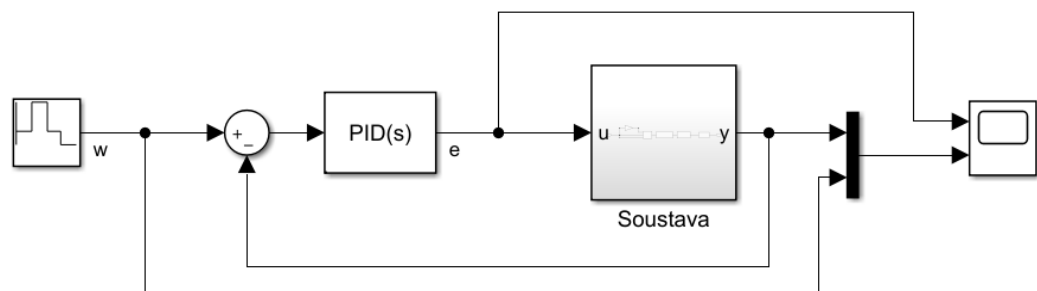
Obr. 2.7 – Přejchodová charakteristika URO pro skokovou změnu žádané hodnoty

Po řešení výpočtu r_0 a T_i byly nalezeny parametry pro regulátor typu PI, protože byla známa časová konstanta T_1 , zesílení soustavy k . Výsledkem této metody umístění dominantních pólů bylo správné zvolení hodnot ξ_0 a T_0 . Byl určen rozsah hledaných hodnot ξ_0 mezi 0,8 a 1,1. Pokud by relativní tlumení bylo pod 0,8, byl by průběh nestabilní a vznikl by problém s regulací pro udržení na žádané hodnotě. A pokud by byla hodnota vyšší než 1,1 byl by průběh horší a dosažení žádané hodnoty by bylo pomalejší. Pro konstantu T_0 byl zvolen rozsah hodnot mezi 250 a 700. Hledaly se takové hodnoty, aby regulace dosáhla požadovaného stavu, kde s překmitem by bylo možné ustálit regulační pochod. Po provedených experimentech byly vybrány čtyři různé parametry regulátoru typu PI, které by mohly být vhodné pro regulaci našeho matematického modelu a byly uvedeny v tab. 2.2. Díky aplikaci Matlab byly vytvořeny

přechodové charakteristiky uzavřeného regulačního pochodu pro skokovou změnu žádané hodnoty w s různými parametry regulátoru typu PI, jak bylo znázorněno na obr. 2.7.

2.5 SIMULACE REGULAČNÍCH POCHODŮ

Po testování bylo nalezeno několik parametrů regulátoru typu PI, které bylo potřeba otestovat, aby bylo vidět jejich chování v regulačním pochodu a jejich akční zásahy. Bylo sestaveno schéma pomocí programu Matlab v prostředí Simulinku, které bylo zobrazeno na obr. 2.8. Schéma bylo složeno z regulátoru typu PI a matematického modelu soustavy Gunt. Jednalo se o zapojení regulátoru se zpětnou vazbou, která umožnila dosáhnout požadované hodnoty při změnách skoku, jelikož vstupní signál byl s přepínáním teploty. Schéma se skládalo ze čtyř částí. První část byl vstupní signál, který byl nastaven dle pracovního bodu z naměřených dat reálné soustavy. Časová délka simulace byla nastavena na 18 000 sekund. Druhá část byl regulátor typu PI, u kterého se postupně měnily parametry dle testování. Mezi první a druhou část byl vložen blok suma, jehož úkolem bylo sečíst hodnotu žádanou a hodnotu ze zpětné vazby. Třetí část byla soustava složená z více bloků. Soustava obsahovala soustavu (model Gunt) a před soustavou byla nastavena podmínka s přepínačem, která upravovala signál podle konstanty nelinearity. S podmínkou se pracovalo pro nastavení lineárních soustav nebo lineárních soustav s nelinearitou. Pokud byla soustava lineární, tak platilo schéma na obr. 2.8 a pokud se jednalo o soustavu s nelinearitou, tak byla přidána konstanta nelinearity s hodnotou 0,33, jelikož bylo uvedeno, že rozdíl signálu chlazení byl třetinový. Poslední částí byl blok scope, jehož úkolem bylo zobrazení průběhu regulačního pochodu.

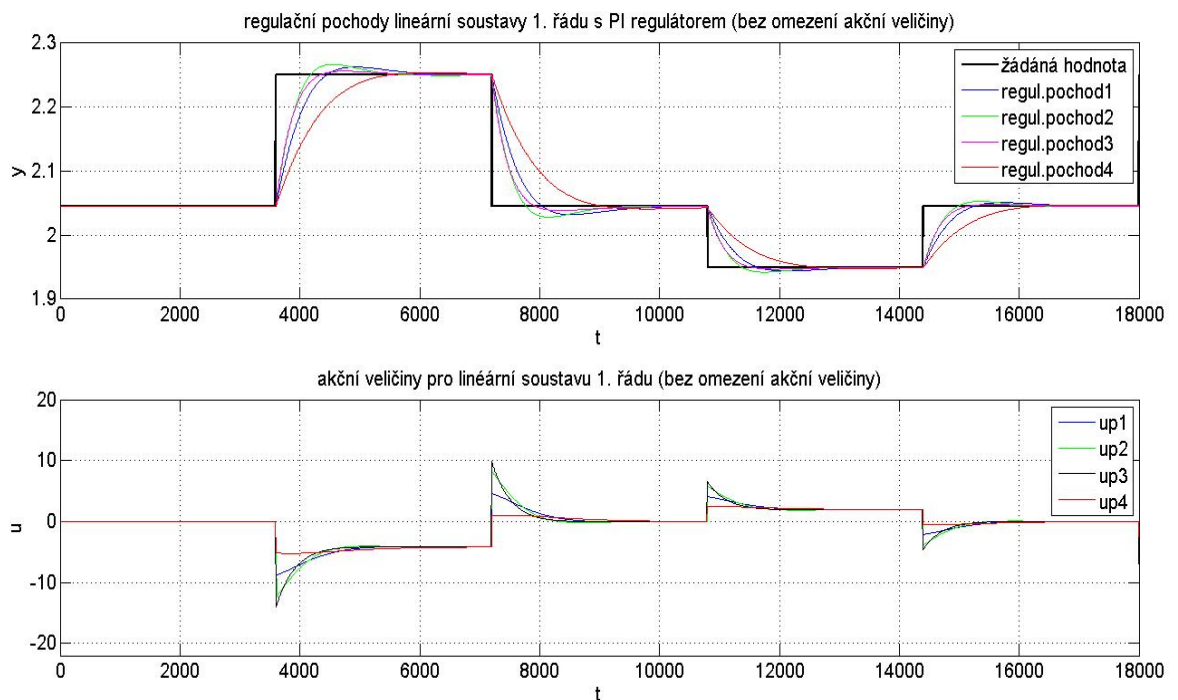


Obr. 2.8 – Schéma zapojení PI regulátoru se soustavou

S tímto schématem byla prováděna simulace nalezených parametrů regulátoru typu PI a zkoumalo se chování soustavy. Délka simulace byla nastavená na 18 000 sekund, aby odpovídala reálné soustavě. Počítalo se také s omezením akční veličiny tak, že do soustavy muselo jít napětí v rozmezí -5 až 5 V, jak bylo předepsáno výrobcem. Začínala se testovat

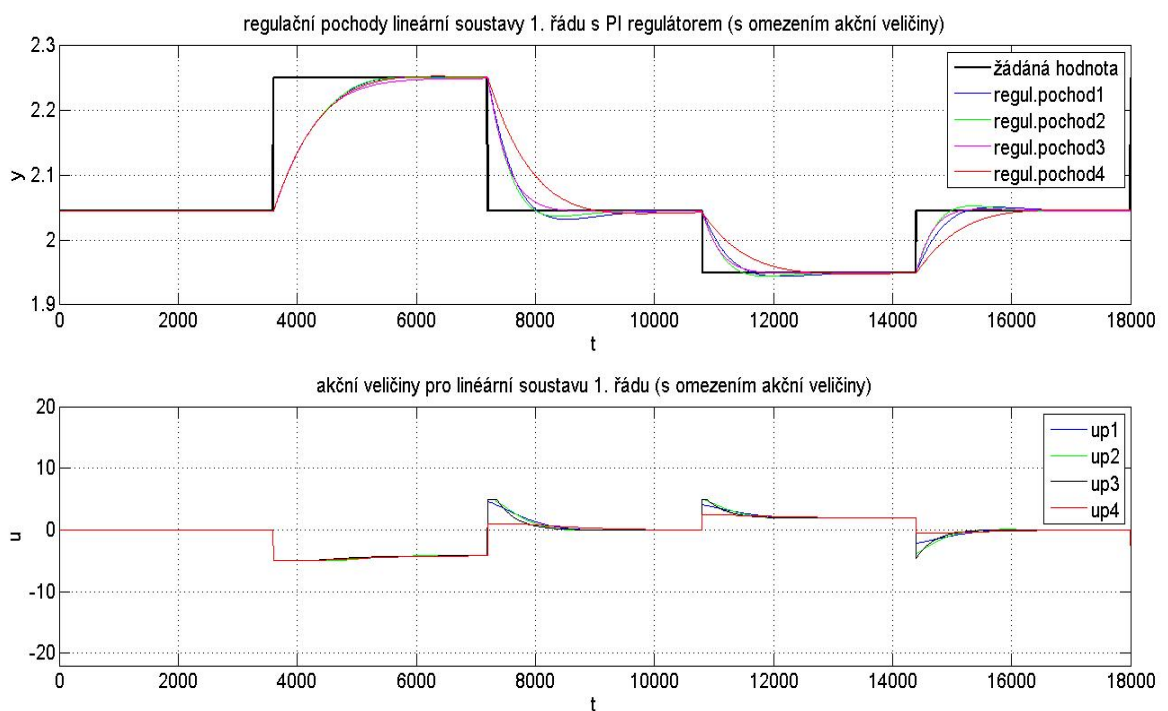
lineární soustava prvního řádu uvedená v tab. 2.1 s označením MIL. Nastavil se regulátor typu PI bez omezení akční veličiny, aby jeho akční zásah nebyl nijak omezen. Bylo tak učiněno z důvodu zjištění, jak velký byl akční zásah do soustavy a mohly se určit správné parametry regulátoru typu PI pro další testování s dalšími parametry regulátoru typu PI.

Z obr. 2.9 byly patrné různé regulační pochody s různými parametry regulátoru typu PI, jejichž hodnoty byly uvedeny v tab. 2.2. Pro soustavu prvního řádu bez omezení akční veličiny bylo vidět, jak velké akční veličiny byly, z toho důvodu bylo nutné zavést omezení. Jinak by mohlo dojít k poškození soustavy, i když by měl být výrobcem dán maximální rozsah napětí -5 až 5 V. Hledala se taková akční veličina, aby nebyla malá (pomalá regulace) a nebyla přehnaně velká (nad 15 V). Velká akční veličina znamenala příliš rychlé dosažení žádané hodnoty s horším ustálením. Z experimentů vyšly čtyři hodnoty jako přijatelné pro regulaci, viz tab. 2.2. Vycházelo se z toho, že bylo dosaženo žádané hodnoty i s malým překmitem v relativně dobrém čase. S použitím regulátoru typu PI by mělo být dosažení požadované hodnoty nejrychleji v čase a s nejmenším překmitem z důvodu včasného ustálení. Testovala se lineární soustava prvního řádu s omezením akční veličiny se značením MIL, která měla vstupní napětí nastavené na -5 až 5 V. Z obr. 2.10 bylo vidět rozdíl mezi akční veličinou s omezením a akční veličinou bez omezení. Simulovaly se i soustavy bez omezení akční veličiny pro zjištění velikostí akčních veličin, aby se mohly určit vhodné parametry pro regulaci.

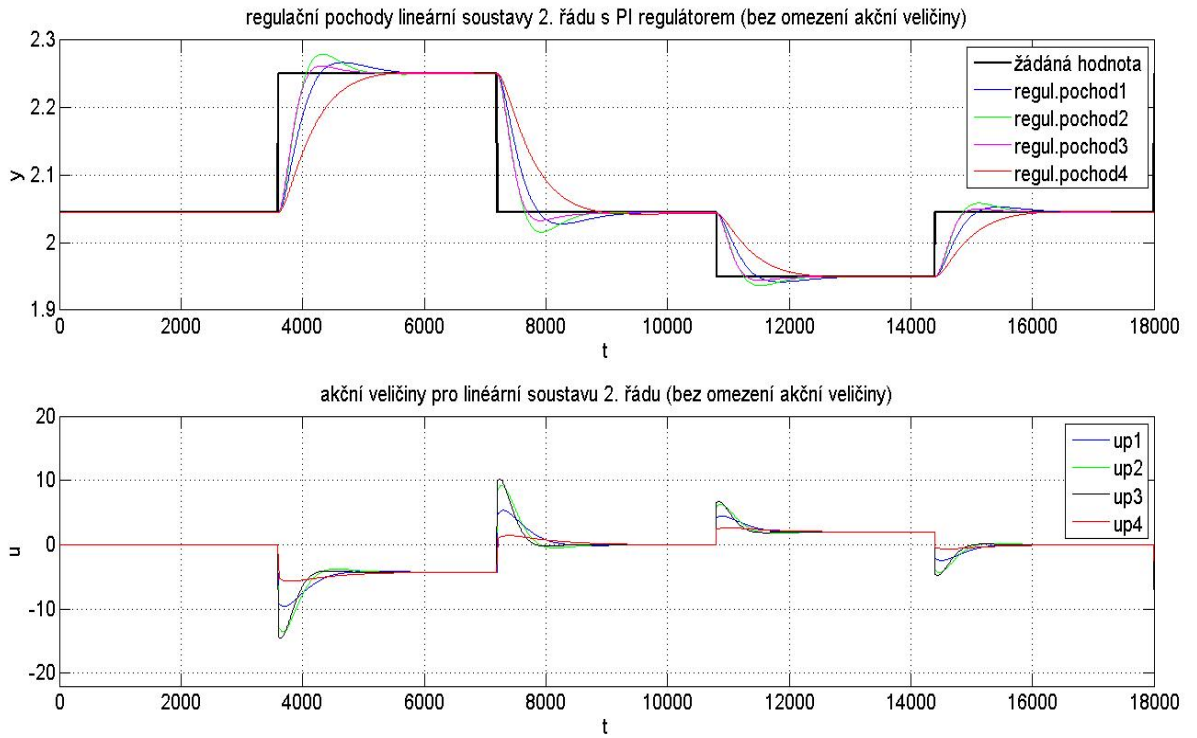


Obr. 2.9 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin MIL bez omezení

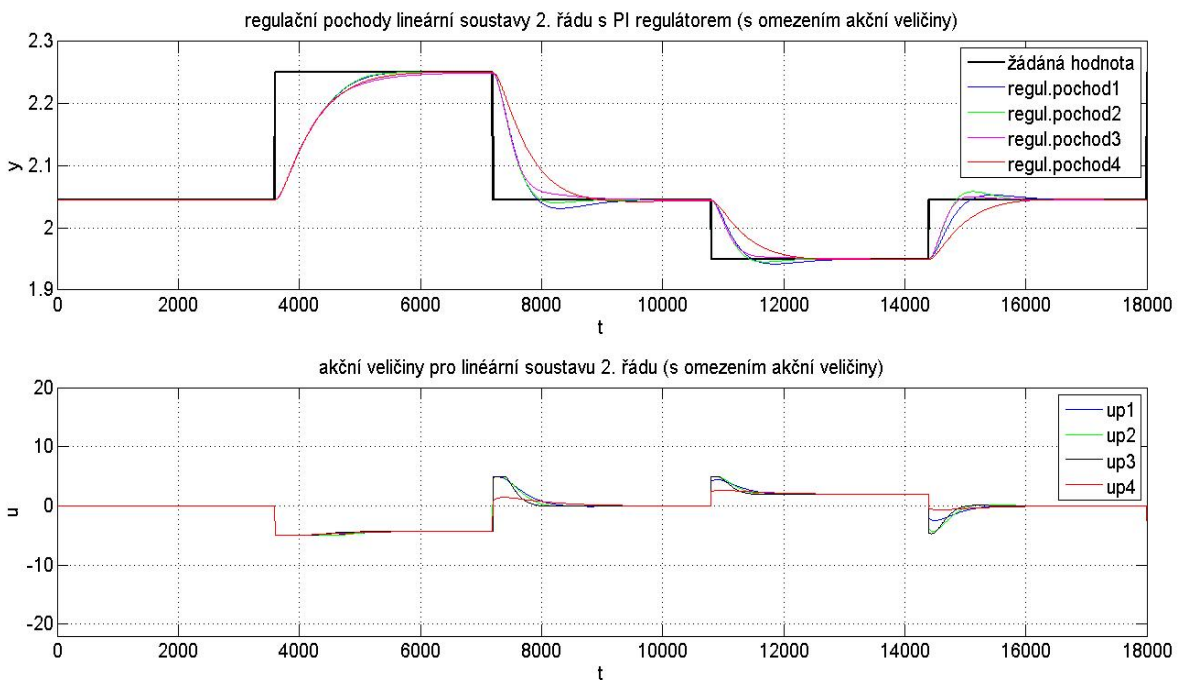
Provedlo se další testování, a to s lineární soustavou druhého řádu s označením M2L, kde bylo předpokládáno, že by se mohlo přiblížit k chování reálné soustavy. Parametry soustavy druhého řádu, které jsou v tab. 2.1 byly dosazeny do bloku soustavy. Postup při simulaci byl stejný jako se soustavami prvního řádu. Jejich průběhy byly zobrazeny na obr. 2.11, kde byla provedena nejdříve simulace bez omezení. Bylo zjištěno, že akční veličiny měly delší časovou prodlevu oproti veličinám prvního řádu. Zde bylo vidět, že soustava druhého řádu by byla vhodnější pro reálnou soustavu, neboť nebylo třeba mít co nejrychlejší akční veličinu.



Obr. 2.10 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M1L s omezením

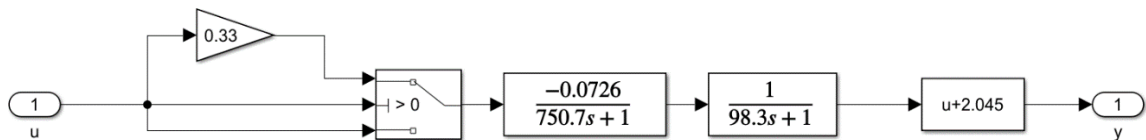


Obr. 2.11 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2L bez omezení



Obr. 2.12 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2L s omezením

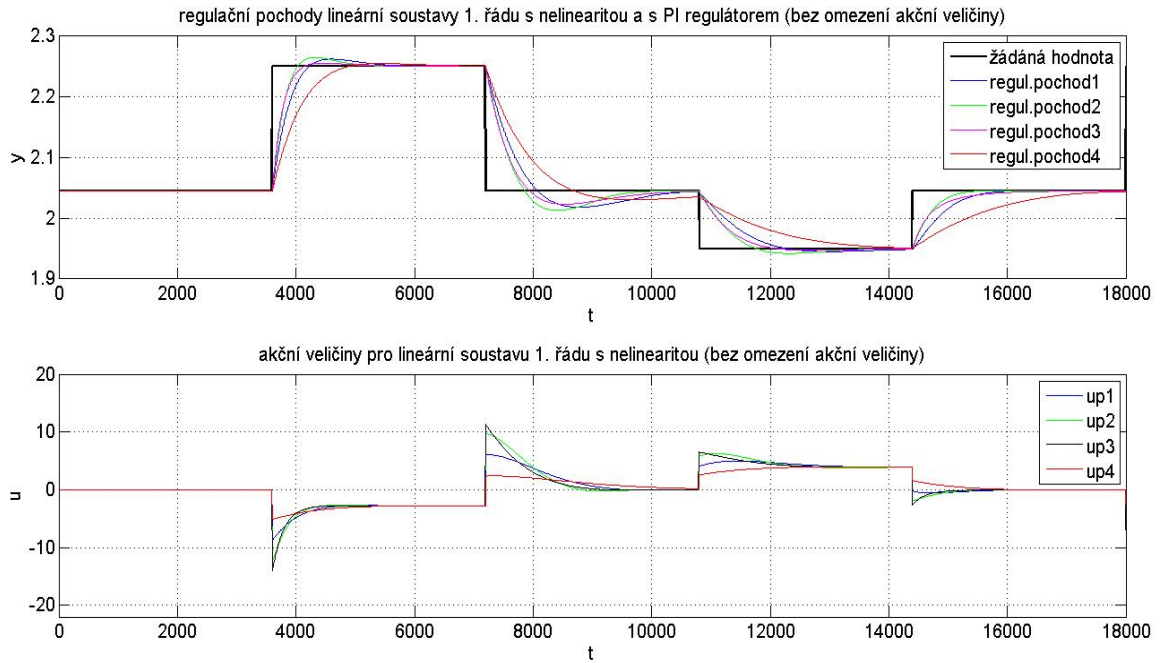
Na obr. 2.11 byly znázorněny průběhy regulačního pochodu M2L bez omezení. Regulační pochody u soustavy bez omezení akční veličiny obsahovaly překmit po dosažení žádané hodnoty. Bylo vidět rozdíl, kde se po zavedení omezení akční veličiny zlepšily regulační pochody u soustavy druhého řádu, a kde se zmírnily překmity. Z toho vyplývalo dosažení žádaných hodnot se zpožděním u třech regulačních pochodů, viz obr. 2.12.



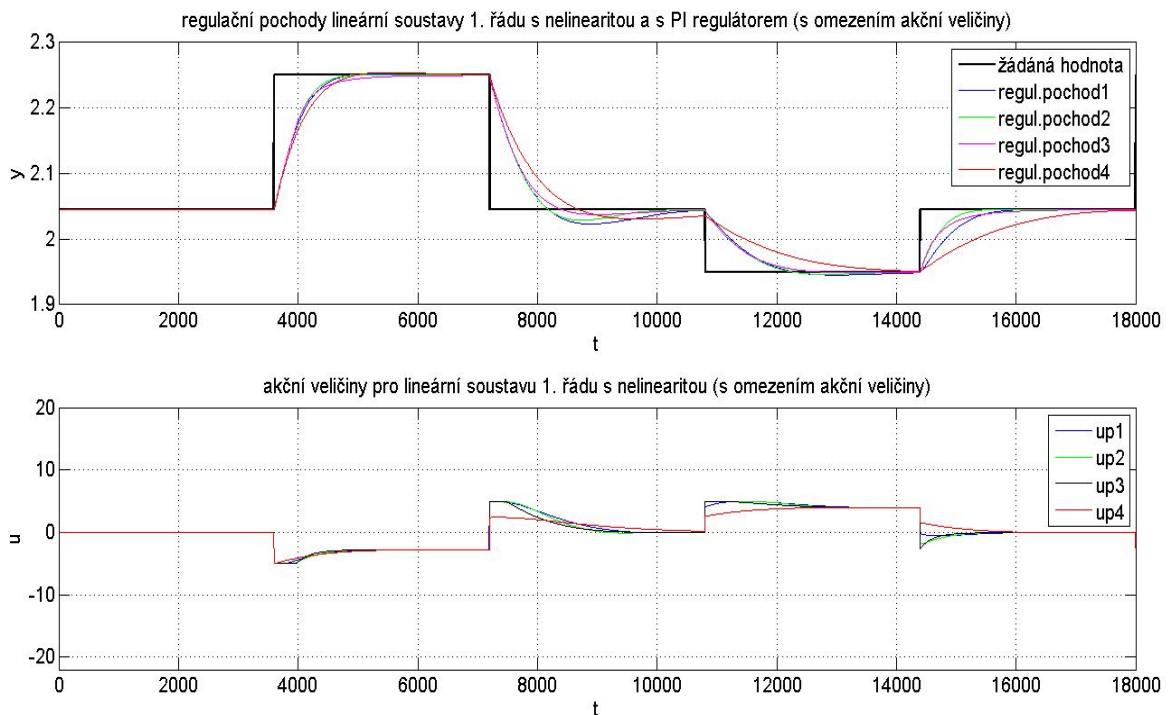
Obr. 2.13 – vnitřní schéma bloku Soustava se soustavou 2. řádu s nelinearitou.

Počítalo se hlavně s lineární soustavou s nelinearitou, která zlepšila chování reálné soustavy. To znamenalo úpravu podmínky s přepínačem ve schématu, kde byla, po splnění podmínky, přidána do soustavy konstanta nelinearity p s hodnotou 0,33 viz obr. 2.13. Výsledkem byl nepatrný rozdíl mezi konstantami nelinearity soustavy prvního řádu a druhého řádu o hodnotě 0,01, což bylo zanedbatelné, protože neměl velký vliv na regulační pochod.

Testovala se soustava prvního řádu s nelinearitou. Daný rozdíl bez konstanty nelinearity a s konstantou nelinearity byl zobrazen na obr. 2.5. Průběhy regulačního pochodu M1N bez omezení akční veličiny mohly být vidět na obr. 2.14. Bez nastaveného omezení akční veličiny bylo vidět, že akční veličiny byly podobné akčním veličinám soustavy bez nelinearity. Zavedlo se omezení akční veličiny (-5 až 5 V) a regulační pochody se zlepšily tak, že překmity vypadaly přijatelně. Jejich průběh bylo možno vidět na obr. 2.15.

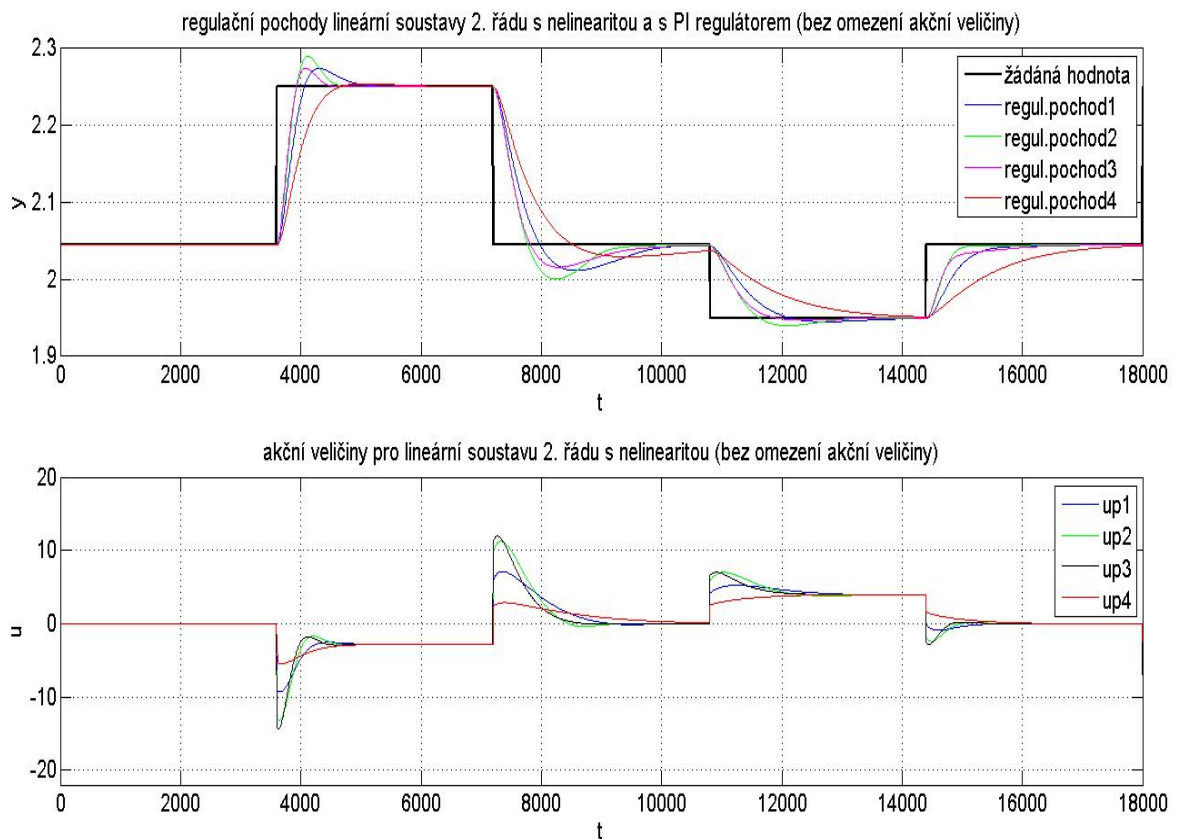


Obr. 2.14 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M1N bez omezení

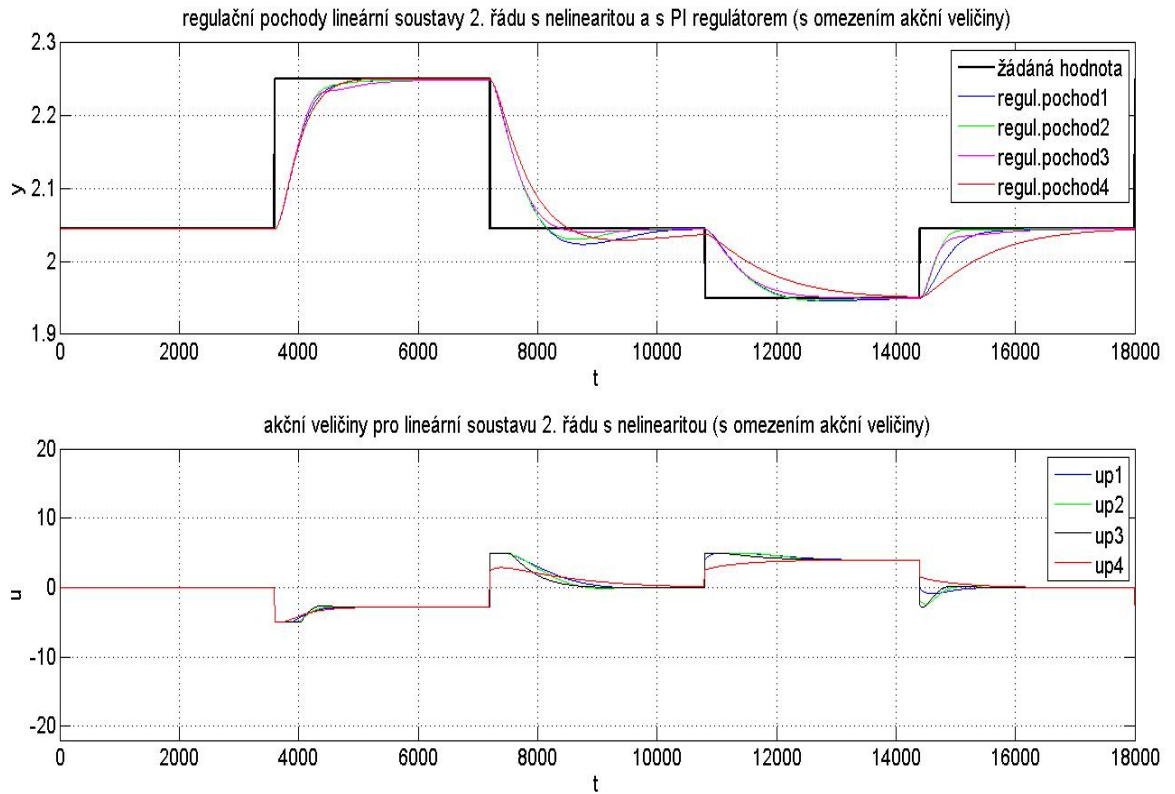


Obr. 2.15 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M1N s omezením

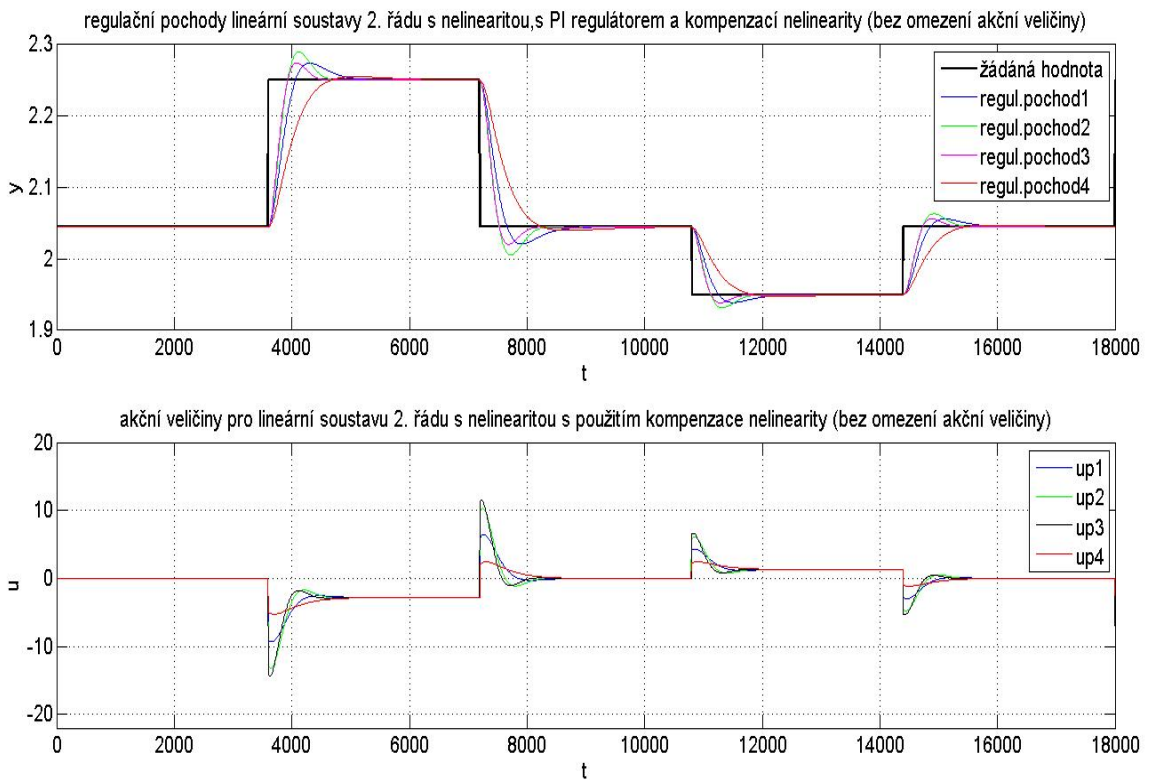
Po testování simulace lineární soustavy druhého řádu s nelinearitou se značením M2N bez omezení akční veličiny byly zaznamenány jejich průběhy a upravily se do příslušné velikosti kvůli přehlednosti, uvedeno na obr. 2.16. Provedla se další simulace pro M2N s omezením akční veličiny pro viditelné rozdíly regulačních pochodů a s akčními veličinami, viz obr. 2.17. Tyto rozdíly akčních veličin stíraly rozdíly mezi regulačními pochody s různými parametry regulátoru typu PI.



Obr. 2.16 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2N bez omezení

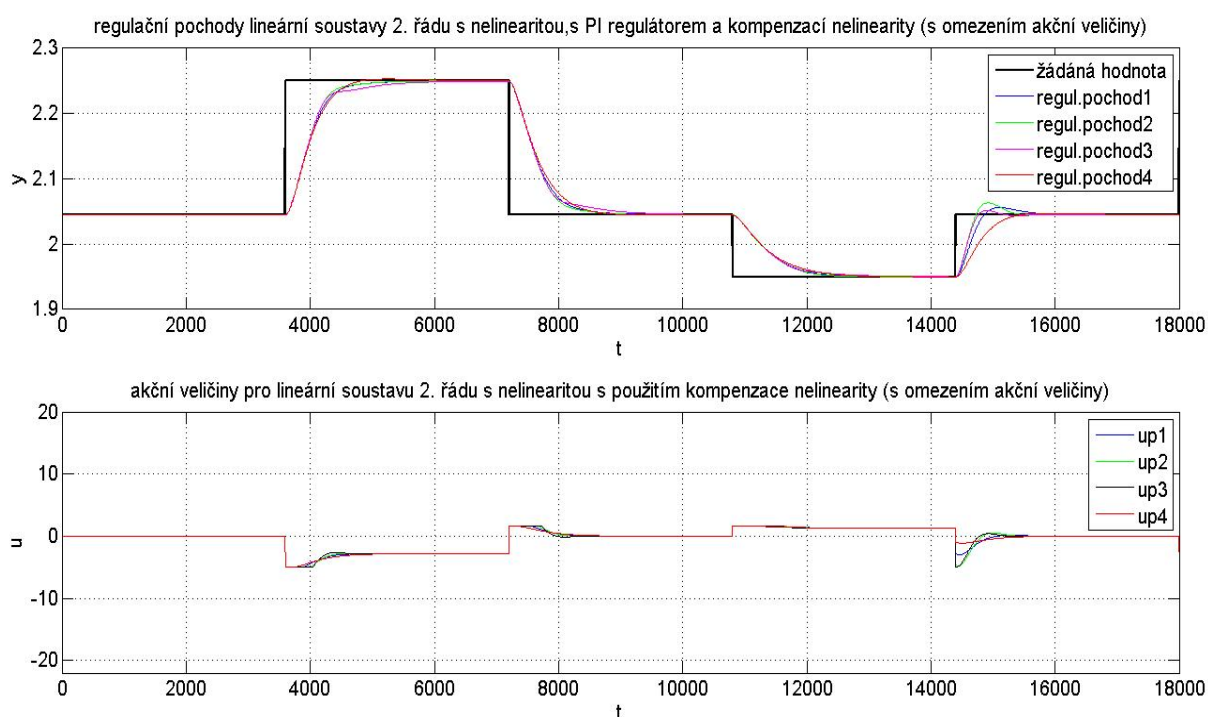


Obr. 2.17 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2N s omezením



Obr. 2.18 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních M2N a kompenzací (bez omezení)

Po dalším testu se soustavou prvního řádu s nelinearitou a s kompenzací nelinearity bylo vidět, že regulační pochody měly podobný průběh se soustavou druhého řádu, viz obr. 2.19. Důvodem zavedení kompenzace nelinearity se zrušila podmínka nelinearity a výsledkem byla lineární soustava bez nelinearity. De facto se snížený signál s hodnotou 0,33 vynásobil třemi a výsledek byl roven jedné (vyrušení). Pro lepší porovnání byla vytvořena simulace bez omezení akční veličiny. Kompenzace nelinearity splnila svůj účel a bylo dokázáno, že soustavy s nelinearitou mohou být realizovány. Regulační pochody s omezením byly vytvořeny pro zobrazení a porovnání, viz obr. 2.18.

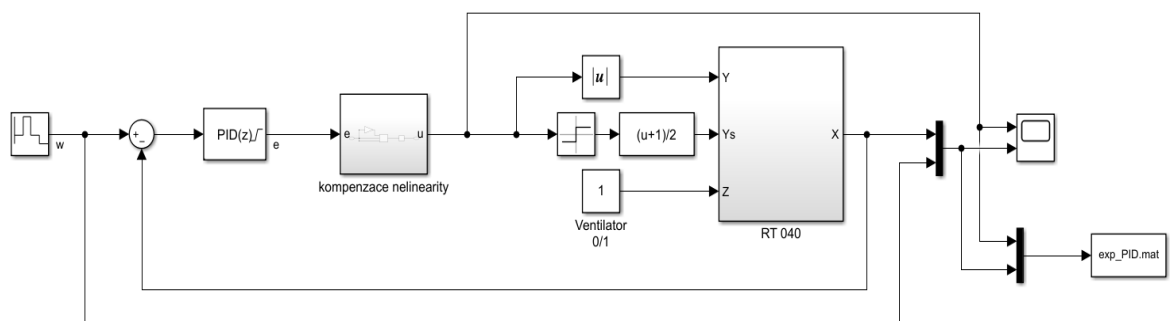


Obr. 2.19 – Zobrazení regulačního pochodu a akčních veličin M2N a kompenzací (s omezením)

Testování a porovnávání regulačních pochodů a akčních veličin bylo ukončeno se závěrem, že vhodnými parametry regulátoru typu PI byly hodnoty $r_0 = -43$, $T_i = 487,6$ s, uvedené v tab. 2.2 pod názvem regul_poch1. Tyto parametry byly vhodné pro regulaci, neboť jejich průběhy regulačního pochodu se všemi nastaveními a soustavami prvního řádu a druhého řádu odpovídaly dobrou kvalitou regulace.

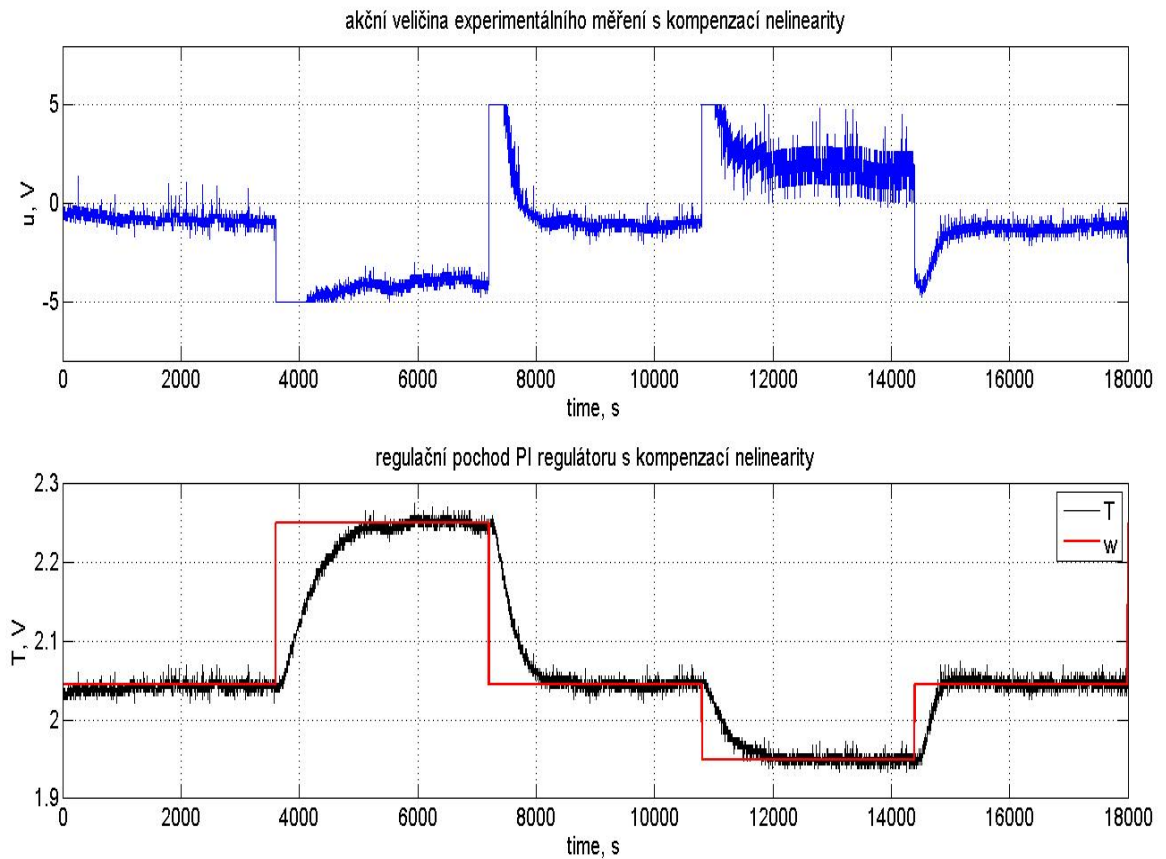
2.6 ŘÍZENÍ REÁLNÉ SOUSTAVY S PI REGULÁTOREM

Před provedením řízení na reálné soustavě muselo být zkontrolováno, zda bylo nastaveno omezení, aby experiment vyšel bezchybně. Pak bylo provedeno testování na zařízení Gunt, na kterém trvalo testování zhruba 18 000 sekund. Pro experiment bylo schéma v prostředí Simulinku upraveno a obsahovalo: generátor signálu obdélníkového tvaru, PID regulátor s nastavenými parametry regulátoru typu PI, saturaci pro omezení signálu pro podmínku nelinearizace, nastavení ventilátoru (zda byl spuštěn nebo nebyl), nastavení akční veličiny na pracovním bodě, subsystém Gunt, na kterém byla reálná soustava, na výstupu subsystému byl blok scope pro zobrazení výsledného měření a blok pro uložení naměřených dat do aplikace Matlabu pro další zpracování. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, kompenzace byla vyrušena nelinearitou a výsledkem bylo lineární soustava bez nelinearity. Výsledek experimentu bylo potřeba upravit pomocí aplikace Matlabu v prostředí Simulink pro přehledné zobrazení průběhu, viz obr. 2.21, kde byl na horním obrázku zobrazen průběh akční veličiny a na dolním obrázku byl zobrazen regulační pochod s regulátorem typu PI a parametry soustavy druhého řádu s nelinearitou obsažené v tab. 2.1.



Obr. 2.20 – blokové schéma měřené reálné soustavy s PI regulátorem s kompenzací nelinearity

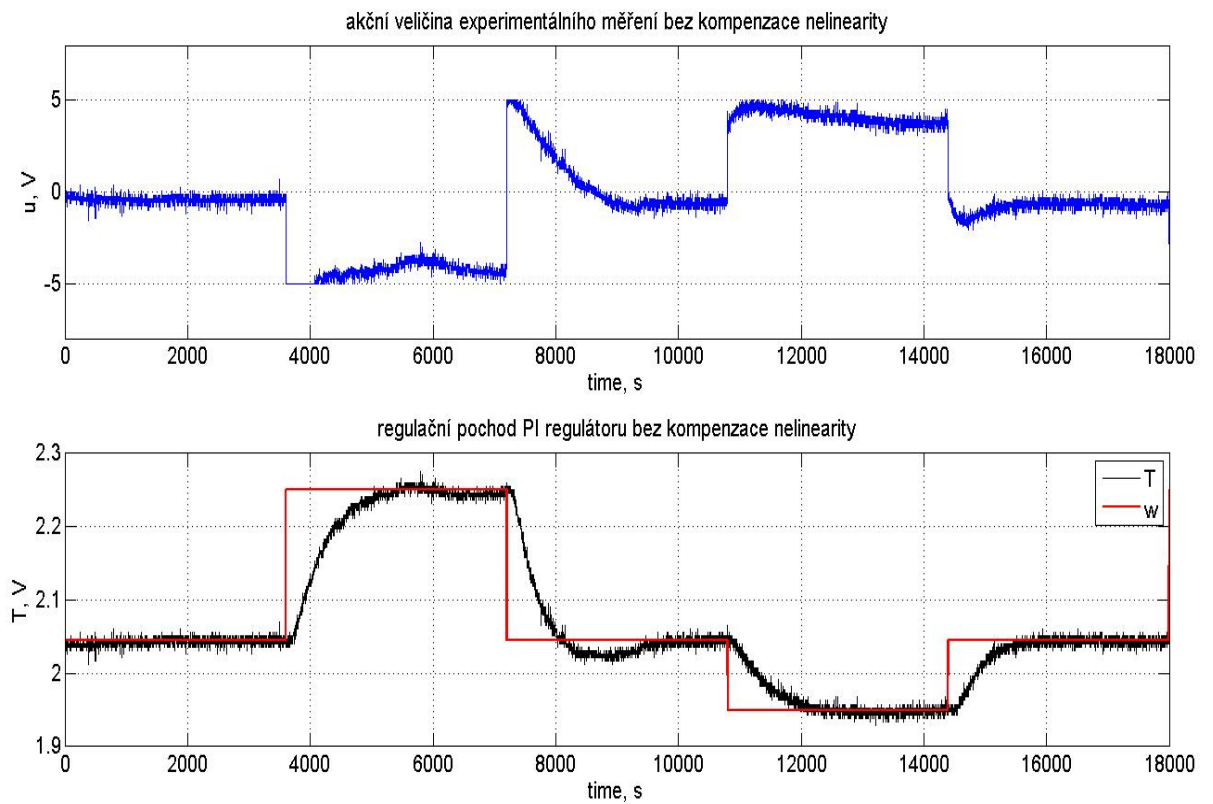
Akční veličina z obr. 2.21 by měla přibližně stejný průběh jako akční veličina soustavy druhého řádu bez nelinearity. Bylo potřeba vybrat takový regulátor, který by plnil svůj úkol a zároveň by rychle dosáhl požadované hodnoty. Pokud by se přidala vyšší hodnota I složky, dosáhlo by se požadované hodnoty v kratším čase, ale docházelo by k rozkmitání a delší době ustálení.



Obr. 2.21 – Zobrazení regulačního pochodu reálné soustavy s PI regulátorem a akční veličiny s kompenzací nelinearity

Provedla se simulace reálné soustavy Gunt bez kompenzace nelinearity, aby bylo vidět daný rozdíl mezi regulací s kompenzací a bez kompenzace. Bylo použito stejné schéma, viz obr. 2.20 jen s menší úpravou tak, aby došlo k odebrání kompenzace. Výsledně byl experiment upraven v prostředí Simulink, aby průběh odpovídal rozměrům os, viz obr. 2.22. Hodnota akční veličiny s kompenzací nelinearity byla o něco výraznější než hodnota akční veličiny s kompenzací. Bylo vidět, že regulace s kompenzací měla menší reakci na změny žádané hodnoty. V čase 6000 s došlo k poklesu a pak k navrácení zpět na žádanou hodnotu, bylo vidět, že před chlazením je další překmit. Regulační pochod systému bez kompenzace byl o trochu

více kmitavý, zatímco systém s kompenzací měl hladší regulační pochod. Bylo vidět, že systém s nelinearitou a s přidanou kompenzací měl lepší průběh.



Obr. 2.22 – Zobrazení regulačního pochodu reálné soustavy s PI regulátorem a akční veličiny bez kompenzací nelinearity

3 ZÁVĚR

Průběh popisující chování tepelné soustavy byl vytvořen z naměřených dat reálné soustavy. Prvním vstupním signálem bylo napětí ovládající výkon Peltierova článku. Druhým vstupním signálem byla binární informace, zda článek topí nebo chladí. Výstupním signálem bylo napětí odpovídající teplotě ve třech místech soustavy. S ohledem na výše uvedené byl vytvořen model ve tvaru obrazového přenosu. Po testování soustav prvního řádu a druhého řádu se ukázalo, že soustava druhého řádu se nejlépe přibližovala k chování reálné soustavy, protože má vyšší stupeň volnosti. Byla zvolena soustava prvního řádu pro jednodušší implementaci hledání parametrů regulátoru. Zvolená soustava vykazovala nelineární chování – při chlazení bylo její zesílení přibližně třetinového oproti topení. Do modelu bylo nutné zavést konstantu nelinearity, aby chování bylo podobné reálné soustavě. Model soustavy byl znám a bylo potřeba regulovat vhodným regulátorem. Ukázalo se, že vhodným regulátorem je regulátor typu PI, protože díky integrační složce rychleji dosáhl žádané hodnoty. Před samotným začátkem regulace bylo potřeba pomocí metody umístění pólů nastavit parametry regulátoru typu PI. K tomuto účelu byla použita metoda umístění pólů. Metoda umístění pólů vycházela z přenosu řízené soustavy a umísťuje póly uzavřeného obvodu do požadovaných poloh podle zadaného charakteristického polynomu. Se zjištěnými hodnotami zesílení k a časové konstanty T_I a zvolenými hodnotami charakteristického polynomu (soustavy druhého řádu) ξ_0 , T_0 bylo možno vypočítat parametry regulátoru typu PI. Pro zvolené tři hodnoty ξ_0 , T_0 byly vypočítány tři sady parametrů regulátoru typu PI, aby se vybral regulátor s nejlepší kvalitou regulace. Model soustavy byl znám, parametry regulátoru typu PI také, tedy bylo možno provést simulaci. Díky simulaci bylo zjištěno, které ze třech nastavení regulátoru typu PI na modelu soustavy dávalo lepší regulaci. Po provedení několika simulačních testů se ukázalo, že tyto parametry regulátoru typu PI $r_0 = -43$, $T_i = 487,6$ s měly nejlepší kvalitu regulace. Tyto parametry byly použity na řízení reálné soustavy Gunt.

Po regulaci na reálné soustavě a zobrazení průběhu bylo možno vyhodnotit kvalitu regulace. Průběh reálné soustavy s regulátorem typu PI byl mírně kmitavý. Celkově regulátor typu PI reguloval reálnou soustavu přijatelně. Oproti simulovaným pochodům nebyly při řízení reálné soustavy tak velké překmity a je menší doba regulace. Vytvořený matematický model soustavy Gunt aproximoval chování reálné soustavy dobře. Bylo ověřeno, že uvažování modelu ve tvaru soustavy prvního řádu pro zjednodušení metody nastavení parametrů regulátoru pro danou soustavu bylo přijatelné.

POUŽITÁ LITERATURA

- BALÁTĚ, J. 2004. *Automatické řízení*. 2.přepř.vyd. Praha: BEN. ISBN 80-7300-148-9. [cit. 2019-10-30].
- CVEJN, J. 2018. *Regulace a automatizace*. Přednášky Fakulta elektrotechniky a informatiky. Univerzita Pardubice: Osobní sdělení. [cit. 2019-10-29].
- DRÁBEK, O; MACHÁČEK, J.1987. *Experimentální identifikace*. Pardubice. [cit. 2019-10-30].
- DORDA, M. *Úvod do modelování a simulace systémů* [online]. [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Aplikace_2.pdf.
- GUNT Hamburk. 2017. *RT 040 Training system: temperature control, HSI* [online]. Hamburk: GUNT Hamburk. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.gunt.de/en/component/gunt/mechatronics/automation-and-process-control-engineering/simple-process-engineering-control-systems/training-system-temperature-control-hsi/080.04000/rt040/glct-1:pa-116:ca-83:pr-1045>.
- HONC, D. 2018. *Automatizace II*. Přednášky Fakulta elektrotechniky a informatiky. Univerzita Pardubice: Osobní sdělení. [cit. 2019-10-30].
- MACHÁČEK, J. 2015. *Pokročilé metody řízení procesů*. Pardubice: Univerzita Pardubice. ISBN 978-80-7395-937-1. [cit. 2019-10-28].
- MÜLLER, P. *Použití Peltierových článků pro tepelné cyklování* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57725.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikační technologie. Vedoucí práce Josef Šandera.
- Termoelektrický jev. c1996-2019. FZU [online]. Praha: Copyright. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/oddeleni/oddeleni-magnetik-a-supravodicu/vyzkumna-temata/termoelektricky-jev>.
- REICHL, J. c2006-2020. Peltierův jev. *Encyklopedie fyzika* [online]. Copyright. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>.

PŘÍLOHY

A – CD

Příloha k bakalářské práci

RT 040 - REGULACE TEPLoty

David Hlava

CD

Obsah

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF.
- 2 Veškeré skripty a slx soubory k bakalářské práci.
- 3 Naměřená data.