

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

NÁVRH ŘÍZENÍ LABORATORNÍ SOUSTAVY GUNT

Milan Souček

Bakalářská práce
2017

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan Souček, DiS.**
Osobní číslo: **I14054**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Návrh řízení laboratorní soustavy GUNT**
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: Identifikovat soustavu a navrhnout a aplikovat řízení laboratorní soustavy GUNT

Obsah teoretické části: Modelování a experimentální identifikace dynamického modelu řízeného systému, simulace a metody návrhu regulátoru na základě znalosti modelu řízené soustavy.

Obsah implementační části: Experimentální identifikace řízeného systému, návrh regulátoru vybranou metodou, simulace regulačních pochodů a aplikace vybraného algoritmu řízení - porovnání simulovaných a reálných experimentů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

DRÁBEK, O., MACHÁČEK, J. Experimentální identifikace. Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1987.

BALÁTE, 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.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Daniel Honc, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **8. prosince 2016**

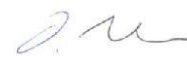
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2017**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. prosince 2016

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární 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 školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne 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. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 17. 03. 2017

Milan Souček

Poděkování

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu práce Ing. Danielu Honcovi, PhD, za čas, který mi věnoval, za věcné připomínky a rady, při tvorbě této bakalářské práce. Poté bych rád poděkoval rodičům a své přítelkyni za trpělivost a podporu, kterou mi věnovali.

V Pardubicích dne 17. 03. 2017

Milan Souček

ANOTACE

Cílem této práce je identifikovat laboratorní soustavu GUNT RT 050 a navrhnout optimální řízení. Práce je rozdělena na dvě hlavní kapitoly, teoretickou a implementační. V teoretické části se snažím přiblížit pojmy modelování, identifikace, regulace a také ukázat softwarové prostředí Matlab, které jsem použil. V části implementační se zaměřuji na praktickou realizaci návrhu regulátorů a uvádím reálné a simulované regulační pochody. Závěrem porovnávám tyto pochody v souvislosti s kvalitou regulace.

KLÍČOVÁ SLOVA

modelování, experimentální identifikace, řízení, návrh regulátoru.

TITLE

CONTROL DESIGN OF GUNT LABORATORY SYSTEM

ANNOTATION

The objective of this work is to identify the laboratory system GUNT RT 050 and suggest optimal control. The work is divided into two main chapters, theoretical and implementation. In the theoretical part I try to show the concepts of modeling, identification, control, and also to introduce the software Matlab, which I used. In the implementation part I focus on the practical realization of the controller design, I show real and simulated control responses. In the final part I compare these responses in the context of the control quality.

KEYWORDS

Modeling, System identification, Control, Controller design.

Obsah

Seznam zkratk a značek	9
Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí	10
Seznam ilustrací	12
Seznam tabulek	14
ÚVOD	15
1 TEORETICKÁ ČÁST	16
1.1 MODEL	16
1.1.1 Fyzikální model.....	16
1.1.2 Abstraktní model.....	16
1.2 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE	17
1.2.1 Analytický postup	17
1.2.2 Empirický postup	17
1.2.3 Rozdělení systémů	18
1.2.4 Postup při identifikaci	20
1.2.5 Identifikace struktury	21
1.2.6 Identifikace parametrů	21
1.3 VNĚJŠÍ POPIS SOUSTAVY	22
1.3.1 Pomocí lineární diferenciální rovnice	23
1.3.2 Pomocí přenosu systému.....	23
1.3.3 Pomocí přechodové funkce	24
1.3.4 Pomocí impulsní funkce.....	26
1.4 ŘÍZENÍ.....	27
1.4.1 Zpětnovazební řízení.....	27
1.4.2 Jednoduchý uzavřený regulační obvod	28
1.5 REGULÁTORY.....	29
1.5.1 Regulator PID	29
1.5.2 Regulator PI	30
1.6 METODY NÁVRHU REGULÁTORŮ	31
1.6.1 Pomocí umístění pólů.....	32
1.6.2 Pomocí integrálního kritéria.....	34
1.7 KVALITA REGULACE.....	35
1.7.1 Kritérium podle maximálního přeregulování.....	35

1.7.2	Kritérium podle doby regulace	36
1.7.3	Kritérium podle tlumení regulačního pochodu	36
1.7.4	Kritérium podle regulační plochy	37
2	IMPLEMENTAČNÍ ČÁST	38
2.1	LABORATORNÍ SOUSTAVA GUNT RT 050	38
2.2	IDENTIFIKACE SOUSTAVY.....	39
2.2.1	Identifikace soustavy pomocí Matlab	40
2.2.2	Identifikace soustavy pomocí Strejcovy metody	41
2.3	VERIFIKACE MODELU.....	44
2.4	NÁVRH REGULÁTORŮ	44
2.4.1	Návrh regulátoru pomocí metody umístění pólů	44
2.4.2	Návrh regulátoru pomocí integrálního kritéria	49
2.4.3	Návrh regulátoru pomocí funkce TUNE v Simulink	49
2.5	POROVNÁNÍ REGULAČNÍCH POCHODŮ	50
3	ZÁVĚR	54
	POUŽITÁ LITERATURA	55
	PŘÍLOHY	56

Seznam zkratek a značek

ISE	Integral Squared Error
L	Laplaceova
P	proporcionální
PC	personal computer
PD	proporcionálně derivační
PCH	přechodová charakteristika
PI	proporcionálně integrační
PID	proporcionálně-integračně derivační
R	regulátor
S	soustava
URO	uzavřený regulační obvod
USB	universal serial bus
ZN	Ziegler-Nichols

Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí

a_i	konstantní koeficient
b_i	konstantní koeficient
c	charakteristický polynom
$e(t)$	regulační odchylka
$F(s)$	přenos systému
F_0	přenos reálné soustavy
F_{M1}	přenos získaný pomocí Matlab
F_{M2}	přenos získaný pomocí Strejcovy metody
F_R	přenos regulátoru
F_s	přenos soustavy
F_w	přenos řízení
G	obrazový přenos
$g(t)$	impulsní funkce
H	Laplaceův obraz přechodové funkce
$h(t)$	přechodová funkce
J	hodnota integrálního kritéria
n	nuly
p	póly
r_0	zesílení
s	nezávisle proměnná u obrazu v L transformaci
t	čas, s
T	časová konstanta, s
T_1	časová konstanta, s
T_2	časová konstanta, s
T_D	derivační časová konstanta, s
T_I	integrační časová konstanta, s
T_n	doba náběhu
t_p	doba regulace
T_u	doba průtahu
$U(s)$	Laplaceův obraz vstupní veličiny
$u(t)$	vstup do systému, akční veličina

u_R	akční zásah
$v_n(t)$	poruchová veličina
$w(t)$	žádaná hodnota
$Y(s)$	Laplaceův obraz výstupní veličiny
$y(t)$	výstup ze systému, regulovaná veličina
$y_M(t)$	výstup z modelu
y_{MAX}	maximální přeregulování
Z	zesílení
α	parametr
δ	Diracův impuls
ζ	tlumení
η	jednotkový skok
σ	hodnota maximálního přeregulování, %
τ	časová konstanta
ω_0	vlastní frekvence

Seznam ilustrací

Obr. 1.1 – Porovnání reálné soustavy a modelu	20
Obr. 1.2 – Blokové schéma identifikace parametrů.....	22
Obr. 1.3 – Jednotkový skok	25
Obr. 1.4 – Přechodová charakteristika systému 2. řádu.....	26
Obr. 1.5 – Diracův impuls	26
Obr. 1.6 – Impulsní charakteristika	27
Obr. 1.7 – Blokové schéma URO	28
Obr. 1.8 – Blokové schéma PID regulátoru.....	30
Obr. 1.9 – PCH PID regulátoru.....	30
Obr. 1.10 – Blokové schéma PI regulátoru.....	31
Obr. 1.11 – PCH PI regulátoru	31
Obr. 1.12 – Stabilita nul a pólů	32
Obr. 1.13 – Blokové schéma URO s polynomy	33
Obr. 1.14 – Ukázka maximálního přeregulování.....	35
Obr. 1.15 – Ukázka doby regulace	36
Obr. 1.16 – Ukázka tlumení kmitů	36
Obr. 1.17 – Regulační plochy	37
Obr. 2.1 – GUNT RT 050	38
Obr. 2.2 – PCH laboratorní soustavy GUNT RT 050.....	40
Obr. 2.3 – Program pro volání funkce hledej	40
Obr. 2.4 – Funkce hledej.....	41
Obr. 2.5 – Aproximace PCH pomocí Strejcovy metody	41
Obr. 2.6 – Porovnání PCH.....	43
Obr. 2.7 – Verifikace soustavy	44
Obr. 2.8 – Simulační schéma pro porovnání regulačních pochodů	46
Obr. 2.9 – Regulační pochody pro různé hodnoty vlastní frekvence ω_0	47
Obr. 2.10 – Regulační pochody pro různé hodnoty tlumení ζ	48
Obr. 2.11 – Simulační schéma, integrální kritérium.....	49
Obr. 2.12 – Ukázka funkce TUNE	50
Obr. 2.13 – Schéma regulačního obvodu.....	51
Obr. 2.14 – Regulační pochod, regulátor navržen pomocí metody umístění pólů	51

Obr. 2.15 – Regulační pochod, regulátor navržen pomocí kritéria kvadrátu odchylek	52
Obr. 2.16 – Regulační pochod, regulátor navržen pomocí funkce TUNE.....	52

Seznam tabulek

Tab. 1.1 – Vlastnosti analytické a experimentální identifikace	18
Tab. 1.2 – Rozdělení systémů	19
Tab. 2.1 – Technické parametry soustavy	39
Tab. 2.2 – Určení poměru τ_2	42
Tab. 2.3 – Porovnání parametrů.....	43
Tab. 2.4 – Použité hodnoty ω_0	47
Tab. 2.5 – Použité hodnoty ζ	48
Tab. 2.6 – Parametry regulátorů PI.....	50
Tab. 2.7 – Hodnoty kritéria kvadrátu regulační plochy (ISE)	53

ÚVOD

Většina moderních technologií má společný prvek, a to je automatické řízení procesů. Důvodem je, že automatické řízení nám zvyšuje efektivitu a bezpečnost provozu. Některé procesy jsou natolik složité, že manuální řízení je velmi náročné, v některých situacích i nemožné, nebo nevede k přesným výsledkům. V nedávné historii byly procesy navrhovány a projektovány samostatně a jednotlivé části řízení poté připojeny dodatečně. Dnes již, ale chápeme procesy komplexně, tzn. že řídicí systémy používáme nejen při řízení procesů, ale i při návrhu a projekci (Řízení technologických procesů, 2011).

V naší době, kdy velká část zařízení kolem nás je automatizovaná si nemůžeme dovolit experimentovat na reálných zařízeních. Buď jsou velmi drahá, mohlo by při nevhodné manipulaci dojít k nenávratné havárii nebo experimentu nejsme vůbec schopni.

Nejlepší možné řešení v této situaci je vytvořit model. Takový model, aby z hlediska daného jevu, který budeme zkoumat, byl co nejpřesnější. Na tomto modelu můžeme simulovat jakékoliv situace a nemusíme se strachovat o jeho životnost. Tím můžeme vytvářet nové a lepší systémy nebo předvídat jejich budoucí vývoj. Simulace na těchto modelech nám také pomáhá uvažovat o systému jiným způsobem, můžeme vyzkoušet různá nastavení a parametry, které by v reálu nebyly možné.

Modelování se nepoužívá jen v automatizaci, ale můžeme ho znát z mnoha jiných odvětví. Ať už je to například ve fyzice model atomu nebo v ekonomice modelování kvality procesů. Z toho vyplývá, že modelování má celou škálu uplatnění.

Mým cílem bylo vytvořit model systému a navrhnout pomocí různých metod regulátor pro řízení laboratorní soustavy GUNT RT 050.

Podle nejnovějších trendů by měly systémy a procesy běžet bez většího zásahu uživatele bezpečně a pokud možno co nejdelší časový rámeček. Pro tyto účely slouží regulátory. V mé práci jsem se zaměřil na řízení pomocí regulátoru PI.

1 TEORETICKÁ ČÁST

V této části se zabývám teorií modelování, experimentální identifikací, věnuji se regulovaným soustavám, regulátorům a regulačnímu obvodu.

1.1 MODEL

Pro zkoumání komplikovaných jevů ve vědě a technice se používají modely. Model musí mít náležité vlastnosti, co se týče zkoumaného jevu. Pokud se podaří vytvořit takový umělý systém, jehož parametry a chování budou obdobné chováním skutečného systému, pak se umělý systém nazývá modelem skutečného systému. Jak již bylo zmíněné, mezi originálem a jeho modelem musí být určitá analogie. Model skutečného objektu může být buď reálný, nebo abstraktní. Průběh tvorby modelu se nazývá modelování (Řízení technologických procesů, 2011).

1.1.1 Fyzikální model

Může být zmenšená kopie skutečného předmětu, která funguje na obdobném fyzikálním principu jako objekt původní. U tohoto modelu se používá tzv. teorie podrobnosti. Fyzikální modely mohou být založeny i na jiném fyzikálním principu než objekt skutečný, ale musí se řídit obdobnými zákony. Je známo například spojení elektrický obvod – potrubí s vodou. Fyzikální model nemůže vystihovat všechny vlastnosti skutečného jevu, ale může ho obstojně simulovat (Řízení technologických procesů, 2011).

1.1.2 Abstraktní model

Do třídy abstraktních modelů zapadá například matematický model skutečného objektu. Matematický model je vyjádřen rovnicemi. Tyto rovnice obsahují souhrn veličin, které odpovídají skutečným fyzikálním veličinám reálného objektu. Matematický model by měl sdělovat takové stránky původního systému, které jsou pro zkoumání důležité. Neměl by obsahovat nedůležité vlastnosti, které by model udělaly zbytečně komplikovaný. Poté se může na tomto modelu experimentovat, jestliže se jedná o model matematický, tak simulovat. V dnešní technologicky pokročilé době se simulace provádí výhradně na číslicových počítačích, mluvíme tedy o číslicové simulaci (Řízení technologických procesů, 2011).

1.2 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE

Identifikace je proces vytváření matematického popisu (modelu) reálného systému. Je to činnost, při které určujeme strukturu a parametry modelu (Vrožina, 2012).

Identifikace a modelování jsou takové činnosti, které se navzájem prolínají. Procesy modelování a identifikace jsou rozděleny na dva hlavní postupy. První se jmenuje analytický postup a druhý je nazýván postup empirický (Řízení technologických procesů, 2011).

1.2.1 Analytický postup

Tento postup je závislý například na fyzikálních, chemických nebo biologických znalostech daného objektu. Z těchto znalostí je zhotoven matematický popis soustavy. Také musí být dbáno na konstrukci a vlastnosti materiálu. Použitím všech těchto vlastností a znalostí je získán analytický model zkoumaného objektu. Získaný model popisuje vnitřní, stavové veličiny a jejich provázanost. Neboli, vyjadřuje vztahy mezi vstupními, výstupními a stavovými signály. Tato metoda si žádá obsáhlé teoretické a praktické vědomosti. Je třeba nejrůznějších zjednodušení a aproximací složitějších vztahů (Řízení technologických procesů, 2011).

1.2.2 Empirický postup

Matematický model soustavy je získán experimentováním. Při empirickém postupu musí být splněna jedna hlavní podmínka, a to, že můžeme měřit hodnoty vstupních a výstupních veličin. Produktem těchto měření je poté experimentální model skutečného objektu. Takto získaný model nepopisuje vnitřní stavové veličiny, jelikož není modelem struktury, ale popisuje pouze chování soustavy. Takto získaný model může být charakterizován jako vnější (vstupně-výstupní) popis soustavy. Empirický postup byl použit při mém návrhu modelu.

Oba tyto postupy mají svá využití. Analytický postup se například uplatňuje tam, kde reálný objekt ještě není vytvořen, ale je potřeba znát jeho budoucí chování. Nevýhoda oproti empirickému postupu je obtížnost sestavení hlavně ve složitějších procesech.

U empirického postupu je vyžadováno, aby skutečný objekt existoval. Jsou na něm prováděna měření. V některých případech může být experimentální model přesnější, protože při měření se objevují i ty vlastnosti, které nejsou při analytickém modelování zaznamenatelné. Nevýhoda spočívá v existenci modelu a také v tom, že tento model je platný pouze jen pro měřenou oblast, pro pásmo jiných vstupních signálů musím sestavit model jiný. Oba tyto

postupy jsou však pouze krajním řešením. Existuje mezi nimi celá řada metod identifikace, která tyto postupy různě kombinuje (Řízení technologických procesů, 2011).

V tab. 1.1 jsou shrnuty vlastnosti analytické a experimentální identifikace (Noskievič, 1999).

Tab. 1.1 – Vlastnosti analytické a experimentální identifikace

Vlastnost modelu	Analytická identifikace	Experimentální identifikace
Struktura modelu	Struktura vyplývá z přírodních zákonů	Struktura musí být zvolena.
Popis systému	Systém je popsán pomocí stavového popisu.	Systém je popsán pomocí relace vstup – výstup.
Parametry modelu	Parametry mají fyzikální význam.	Parametry modelu většinou nemají souvislost s fyzikálními proměnnými. Jsou jen analytické.
Platnost modelu	Model platí pro různé provozní stavy.	Model platí pouze pro zkoumaný proces.
Existence originálního systému	Model může být zhotoven i pro neexistující systém.	Model můžeme získat pouze pro reálný systém.
Znalost vnitřní struktury	Důležité vnitřní vlastnosti musí být známé.	Vnitřní procesy nemusí být známé.
Opakované použití metody	Každá tvorba modelu představuje opakovanou aplikaci fyzikálních zákonů.	Vytvořené programové vybavení může být použito opakovaně.

1.2.3 Rozdělení systémů

V této kapitole ukážu základní rozdělení dynamických systémů. Výčet tříd není úplný, jelikož třídění může proběhnout podle mnoha kritérií. Uvedu tedy jen ty základní. Jednotlivé třídy jsou uvedeny v tab. 1.2.

Jednotlivé třídy se mohou různě prolínat, systém může být například spojitý a deterministický, ale nemůže být současně lineární a nelineární.

Tab. 1.2 – Rozdělení systémů

Spojité	Diskrétní
Deterministický	Stochastický
Lineární	Nelineární
Se soustředěnými parametry	S rozloženými parametry
Jednorozměrový	Mnoharozměrový
Vnější	Vnitřní

Spojité systém je takový, kde se vstup i výstup mění spojitě. Diskrétní znamená, že systém se mění jen v určitých časech ($t = 1, 2, \dots, n$) (Vrožina, 2012).

Deterministické systémy jsou takové, jejichž aktuální stav je dán pouze předcházejícím vstupem. U stochastických systémů můžeme aktuální stav určit jen s určitou pravděpodobností (Řízení technologických procesů, 2006).

Lineární znamená, že všechny operace matematického popisu jsou lineární. Nelineární naopak značí, že alespoň jedna operace je nelineární (Vrožina, 2012).

Jestliže je systém se soustředěnými parametry, znamená to, že veličiny tohoto systému jsou nezávislé na poloze v prostoru a jsou proměnné jen v čase. Naopak systém s rozloženými parametry má různé hodnoty parametrů podle polohy v objektu (Vrožina, 2012).

Jednorozměrové systémy obsahují pouze jeden vstup a jeden výstup. Kdežto mnoharozměrové mají více než jeden vstup, či výstup. Může to být například i systém, který má dva vstupy a pouze jeden výstup (Řízení technologických procesů, 2011).

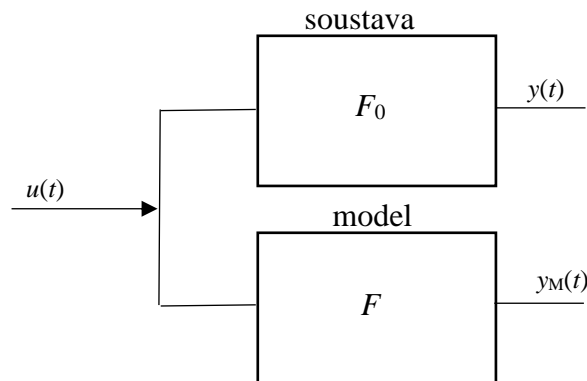
Vnější model definuje pouze vztah mezi vstupem a výstupem. Nejčastěji je tento vztah dán přenosem systému. Používají se také popisy pomocí přechodové a impulsní charakteristiky apod. Vnitřní model popisuje se vstupem a výstupem také stav. Takže známe i vnitřní vlastnosti systému, pomocí stavové proměnné. Je to výhodné pro prostředky moderní výpočetní techniky (Vrožina, 2012).

1.2.4 Postup při identifikaci

Postup a řešení problémů spojených s modelováním a identifikací, lze rozdělit do následujících kroků.

- Seznámení se systémem, pro který se model vytváří.
- Rozdělení složitého systému na jednotlivé samostatné složky, pro které již jsme schopni identifikace realizovat.
- Tvorba modelu těchto jednotlivých podsystémů.
- Zpětné složení jednotlivých složek a vytvoření celkového modelu systému.

Podle dat charakterizujeme model jako: spojité nebo diskrétní, lineární nebo nelineární, deterministický nebo stochastický, jednorozměrný anebo mnohorozměrný apod. Je patrné, že představa o druhu modelu se může změnit po proměření, nebo také potvrdit.



Obr. 1.1 – Porovnání reálné soustavy a modelu

Všechny informace o modelu se zahrnují do operátoru F . Tento operátor ke vstupu $u(t)$ přiřadí příslušný výstup $y_M(t)$. Výstup $y_M(t)$ je aproximací reálného výstupu $y(t)$. Hlavní úkol identifikace je najít takový operátor F , aby byl, pokud možno, totožný s operátorem F_0 .

Oba operátory mohou mít různé složení, mohou být sestaveny odlišnými prostředky. Je tedy porovnána odezva modelu $y_M(t)$ a reálné soustavy $y(t)$ na vstupní signál $u(t)$.

V návaznosti na tuto situaci je zavedeno vhodné kritérium tzv. kritérium přiléhavosti, které dovoluje porovnávat shodnost obou operátorů F a F_0 při běhu identifikace. Obecně je tato funkce definovaná jako

$$J = f(y(t); y_M(t)). \quad (1.1)$$

Pro funkci (1.1) platí:

- nezáporná pro libovolná $y(t)$ a $y_M(t)$,
- má být také rovna 0 pro $y(t) = y_M(t)$,

- má být spojitá pro $y(t)$ a $y_M(t)$.

Příhodnou funkcí je součet kvadrátů odchylek mezi odezvou modelu a odezvou reálné soustavy na vstupní signál. Při identifikaci je pak nalezen takový operátor, aby bylo kritérium co možná nejmenší hodnoty. Toto kritérium se poté dá napsat pro spojitě soustavy ve tvaru

$$J(x) = \int_0^T [y(t) - y_M(t)]^2 \cdot dt \quad (1.2)$$

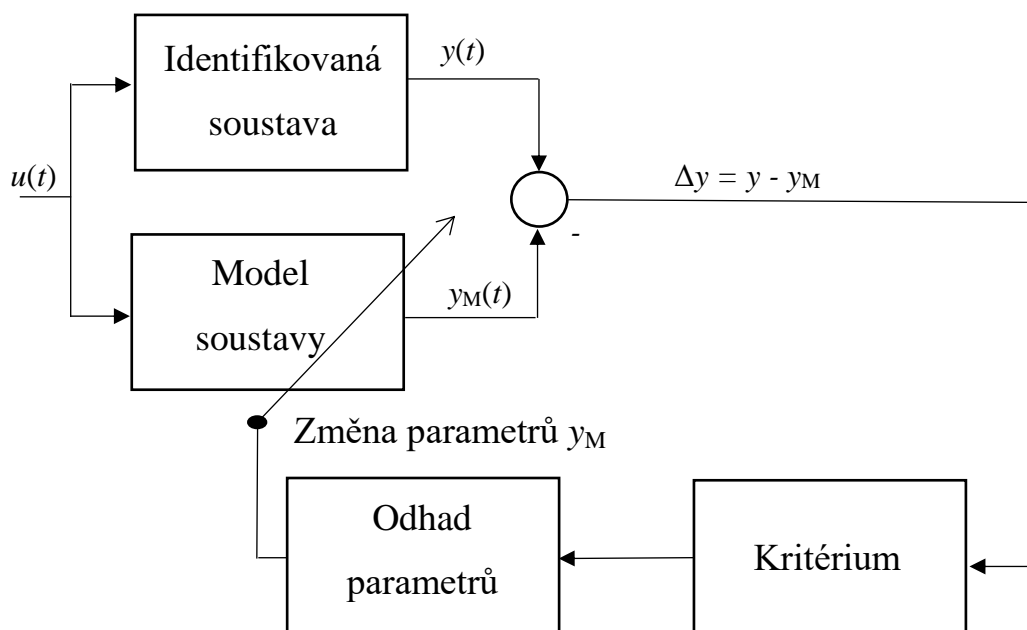
Parametry modelu jsou nalezeny takové, aby odchylka obou signálů $y(t)$ a $y_M(t)$, byla co nejmenší. Tato úloha se řeší pomocí některé numerické metody optimalizace parametrů. Úkol je řešen jako vyhledání extrému funkce více proměnných. Tyto proměnné jsou poté hledané parametry a jsou uloženy ve vektoru parametrů (Vrožina, 2012).

1.2.5 Identifikace struktury

Strukturou modelu rozumíme způsob matematického vyjádření závislosti výstupního signálu na signálu vstupním např. ve tvaru diferenciální rovnice, přenosu, přechodové, impulsní charakteristiky apod. Struktura modelu se většinou volí vzhledem k vlastnostem soustavy (Vrožina, 2012).

1.2.6 Identifikace parametrů

Rozlišují se dva způsoby identifikace parametrů a to off-line a on-line. Off-line identifikace je taková, při které se nejprve vykoná identifikační měření, které se následně uloží na libovolné médium a poté se zpracování měření provádí mimo měřený systém. On-line identifikace se naopak provádí na skutečné soustavě, a to v reálném čase.



Obr. 1.2 – Blokové schéma identifikace parametrů

1.3 VNĚJŠÍ POPIS SOUSTAVY

Vstupně-výstupní popis vyjadřuje dynamické vlastnosti mezi vektory vstupu a výstupu. Vektor stavu v tomto případě nevystupuje. Systém je považován za takový předmět, do kterého není viděno a je známa pouze reakce na vstupní signál. Vnější popis může být popsán několika způsoby:

- lineární diferenciální rovnicí,
- přenosem systému,
- přechodovou funkcí a přechodovou charakteristikou,
- impulsní funkcí a impulsní charakteristikou,
- frekvenčním přenosem,
- polohou pólů a nul v komplexní rovině.

Speciálním příkladem vstupně-výstupního přenosu je statická charakteristika, která je dána rovnicí

$$y = f(u). \quad (1.3)$$

Je to grafická závislost výstupního signálu na vstupní, ale v ustáleném stavu (Navrátil, 2011).

1.3.1 Pomocí lineární diferenciální rovnice

Spojité systém s jedním vstupem a s jedním výstupem lze popsat lineární diferenciální rovnicí n -tého řádu s konstantními koeficienty ve tvaru

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_0 u(t), \quad (1.4)$$

kde a_i, b_i – konstantní koeficienty,

$u(t)$ – vstupní veličina systému,

$y(t)$ – výstupní veličina systému.

Mezi řády derivací na pravé a levé straně musí platit podmínka $m \leq n$.

Tato podmínka musí být splněna, kdyby tomu tak nebylo, systém by nebyl fyzikálně realizovatelný. Tato podmínka znamená, že stupeň nejvyšší derivace výstupní veličiny musí být větší nebo rovno stupni derivace veličiny vstupní. Řád diferenciální rovnice n stanovuje řád systému.

Pro vyřešení diferenciální rovnice (1.4) je potřeba znát počáteční podmínky systému. Nejčastěji se setkáme se situací, kde počáteční podmínky jsou nulové (Balátě, 2003).

1.3.2 Pomocí přenosu systému

Použitím Laplaceovy transformace na diferenciální rovnici (1.4), za předpokladu nulových počátečních podmínek, dostaneme

$$\begin{aligned} (a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) \cdot Y(s) = \\ (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0) \cdot U(s). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Po jednoduché úpravě získáme přenosovou funkci (přenos)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}. \quad (1.6)$$

Ten je definován jako podíl Laplaceových obrazů výstupní a vstupní veličiny.

Polynom $a(s)$ ve jmenovateli přenosové funkce, rovnice (1.6), je takzvaný charakteristický polynom. Jestliže tento polynom je položen roven nule, tedy $a(s) = 0$ je dostána takzvaná charakteristická rovnice. Kořeny této rovnice se nazývají také kořeny charakteristického polynomu. Kořeny polynomu $a(s)$ jsou nazývány póly přenosu, naopak kořeny polynomu čitatele $b(s)$ jsou často nazývány nuly přenosu.

Přenosovou funkci lze vyjádřit i v jiných tvarech například pomocí nulových bodů a pólů

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m(s - n_1) \cdots (s - n_j) \cdots (s - n_m)}{a_n(s - p_1) \cdots (s - p_j) \cdots (s - p_n)}, \quad (1.7)$$

kde p – póly (kořeny jmenovatele)

n – nuly (kořeny čitatele)

Další tvar, ve kterém může být přenosová funkce zapsána je pomocí časových konstant. Časové konstanty jsou převrácené hodnoty reálných pólů a nul. Ty mohou být zavedeny do rovnice (1.7), pomocí vztahů

$$T_i = -\frac{1}{p_i}, \quad (1.8)$$

$$\tau_i = -\frac{1}{n_i}, \quad (1.9)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2) \cdots (1 + s\tau_m)}{a_0(1 + sT_1)(1 + sT_2) \cdots (1 + sT_n)} = k_0 \frac{b_0(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2) \cdots (1 + s\tau_m)}{a_0(1 + sT_1)(1 + sT_2) \cdots (1 + sT_n)}, \quad (1.10)$$

kde k_0 – je zesílení systému, dáno poměrem b_0/a_0 (Balátě, 2003).

1.3.3 Pomocí přechodové funkce

Přechodová funkce, kterou je označována $h(t)$, je definována jako odezva systému na vstupní signál $u(t)$ ve tvaru jednotkového skoku za nulových počátečních podmínek. Přechodová funkce má také grafické vyjádření, kterému se říká přechodová charakteristika (Balátě, 2003).

Jednotkový skok je definován

$$u(t) = \eta(t) = \begin{cases} 1 & \text{pro } t \geq 0 \\ 0 & \text{pro } t < 0 \end{cases}. \quad (1.11)$$

Jednotkový skok má následující Laplaceův obraz

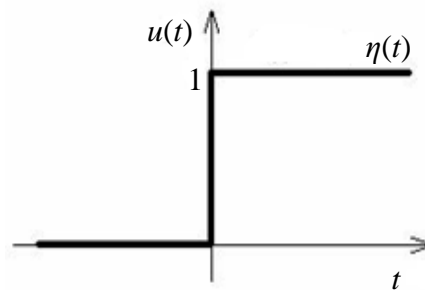
$$L\{\eta(t)\} = L\{1(t)\} = \frac{1}{s}. \quad (1.12)$$

Za předpokladu, že systém má přenosovou funkci

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (1.13)$$

a obraz jednotkové skoku, který je uveden výše, dostaneme Laplaceův obraz přechodové funkce

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) = G(s) \cdot \frac{1}{s} \Rightarrow H(s) = \frac{G(s)}{s}. \quad (1.14)$$



Obr. 1.3 – Jednotkový skok

Dále představím přechodovou charakteristiku systému 2. řádu. Ukáži pouze 2. řád, jelikož systém 2. řádu byl v mé práci identifikován.

Uvažujme o stabilním systému ($a_0, a_1 > 0$) s přenosem

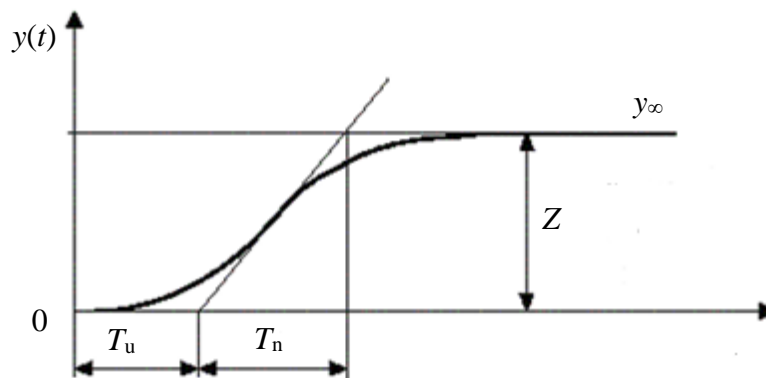
$$G(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (1.15)$$

Poté charakteristický polynom přenosu má následující kořeny

$$s_{1,2} = \frac{a_1}{2} \pm \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_0}}{2}. \quad (1.16)$$

Kořeny charakteristického polynomu mohou být typu

- dva různé reálné kořeny,
- dvojnásobný reálný kořen,
- dvojice komplexně sdružených kořenů.



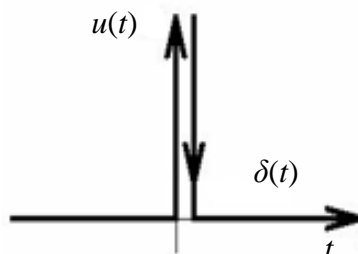
T_u – doba průtahu, T_n – doba náběhu, Z – zesílení systému

Obr. 1.4 – Přejchodová charakteristika

1.3.4 Pomocí impulsní funkce

Impulsní funkce, kterou je označována $g(t)$, je definována jako odezva systému na vstupní signál $u(t)$, který je ve tvaru Diracova impulsu při nulových počátečních podmínkách. Impulsní funkce má také grafické vyjádření, kterému se říká impulsní charakteristika.

Jednotkový (Diracův) impuls má následující Laplaceův obraz

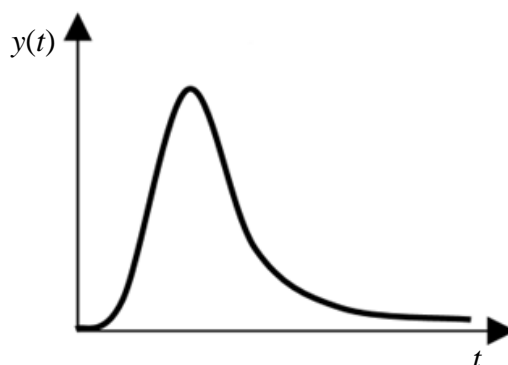


Obr. 1.5– Diracův impuls

$$L\{\delta(t)\} = 1. \tag{1.17}$$

Za předpokladu, že systém má přenosovou funkci, rovnice (1.6) a obraz jednotkové Diracova impulsu, rovnice (1.17), který je uveden výše. Dostaneme Laplaceův obraz impulzní funkce

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) = G(s) \cdot 1 = G(s). \tag{1.18}$$



Obr. 1.6 – Impulsní charakteristika

Z rovnice (1.18), je vidět že impulsová funkce se rovná přenosu systému.

Mezi přechodovou a impulsní funkcí platí tyto vztahy

$$h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau \quad \text{resp.} \quad g(t) = \frac{dh(t)}{dt}. \quad (1.19)$$

Tyto vztahy ukazují, že impulsní funkce je derivací funkce přechodové (Balátě, 2003).

1.4 ŘÍZENÍ

V této kapitole se budu zabývat řízením. Mezi hlavní prvky řízení patří regulovaná soustava a regulátor, kterému se budu věnovat v další kapitole. Řízení může být dvojího typu,

- dopředné řízení,
- zpětnovazební řízení (regulace).

Řízení je působení na řízený systém s cílem dosáhnout předem určeného stavu. Jestliže toto řízení probíhá automaticky, hovoříme o automatickém řízení.

V mé bakalářské práci je použito zpětnovazební řízení, proto se dopřednému řízení nebudu dále věnovat.

1.4.1 Zpětnovazební řízení

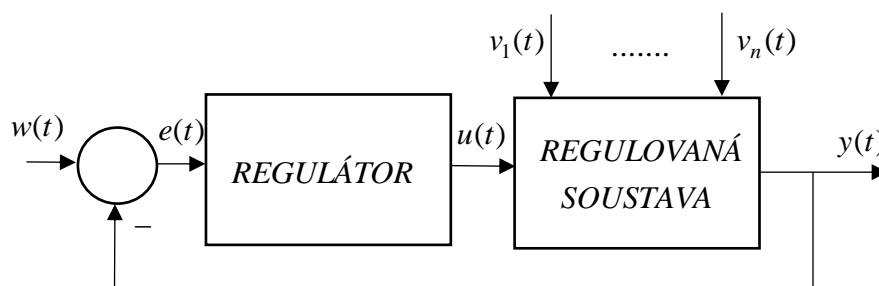
Je takové řízení, kde výstup systému ovlivňuje zpětně jeho výstup. Zpětnovazební řízení neboli regulace, je známa z mnoha příkladů našeho života. Příkladem může být slepecká hůl. Tento nástroj dává svému uživateli zpětnou vazbu o stavu před ním a ovlivňuje tak jeho další kroky.

Další příklad můžu uvést ze světa zvířat. Kde se navzájem ovlivňuje kořist a predátor. Jestliže je málo kořisti, začnou predátoři vymírat hlady. Tím, že se počet predátorů začne zmenšovat, rozmnožuje se kořist, a to způsobí její nárůst, jelikož má v tuto dobu méně nepřátel. Poté se začnou rozmnožovat opět predátoři, díky nárůstu kořisti. Tento děj se opakuje periodicky. Zde je vidět, že množství jednoho druhu závisí na počtu jedinců druhu druhého. Znamená to, že se navzájem ovlivňují (Matematická biologie, 2015).

1.4.2 Jednoduchý uzavřený regulační obvod

Uzavřený regulační obvod pracuje na principu zpětné vazby, kdy je do záporné zpětné vazby zařazen řídicí člen, nazýváme ho regulátor.

Dále budu pracovat pouze s jednoduchým regulačním obvodem, obr. 1.7. Reálný obvod má navíc ještě další prvky, které ovlivňují jeho vlastnosti. Jsou to například různé převodníky, měřící a akční členy.



Obr. 1.7 – Blokové schéma URO

Kde $w(t)$ – žádaná hodnota regulované veličiny,

$e(t)$ – regulační odchylka,

$u(t)$ – akční veličina,

v_1, v_n – jsou poruchové veličiny,

$y(t)$ – je veličina výstupní.

Regulační pochod probíhá v regulačním obvodu, který vznikne, jestliže k regulované soustavě připojíme regulátor. Výstupní veličinou obvodu je veličina výstupní $y(t)$. Rozdílem této veličiny a žádané hodnoty $w(t)$ dostaneme regulační odchylku $e(t)$

$$e(t) = w(t) - y(t) . \quad (1.20)$$

Logicky je požadováno, aby regulační odchylka byla co nejmenší, nejlépe nulová. O to se stará právě regulátor, tudíž jeho výstupní signál má opačné znaménko než vstupní signál (Balátě, 2003).

1.5 REGULÁTORY

Jsou zařízení, která vyhodnocují regulační odchylku $e(t)$ a podle ní generují akční veličinu na svém výstupu $u(t)$. S cílem, aby regulační odchylka $e(t)$ byla nulová nebo aby byla co nejmenší. Regulátory se dělí podle mnoha kritérií:

- podle přívodu energie na přímé a nepřímé,
- podle signálu na elektrické, hydraulické a jiné,
- podle průběhu výstupní veličiny na spojitě a nespojitě.

Při práci s regulátory lze nastavit tři základní složky. Jedná se o proporcionální, integrační a derivační složku. Kombinací těchto složek vznikají různé typy regulátorů například P, I, PI, PD a nejčastěji používaný PID regulátor (Balátě, 2003).

1.5.1 Regulátor PID

Základní rovnice PID regulátoru je následující

$$u_R(t) = r_0 \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1.21)$$

kde r_0 – zesílení PID regulátoru,

T_I – integrační konstanta,

T_D – derivační konstanta,

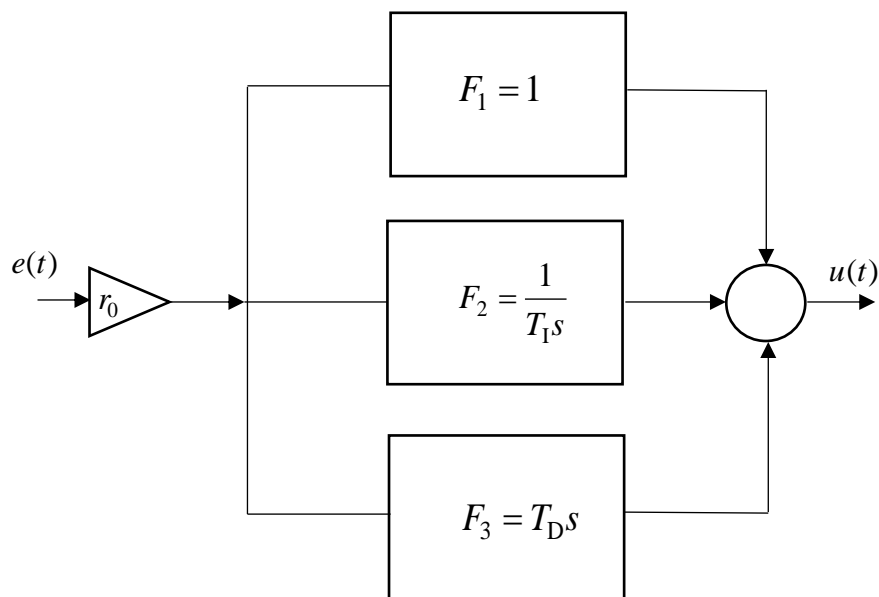
$u_R(t)$ – akční zásah,

$e(t)$ – regulační odchylka.

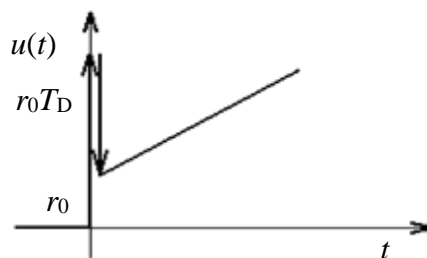
Přenos PID spojitého regulátoru je

$$F_R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (1.22)$$

Na obr. 1.9 je znázorněna přechodová charakteristika PID regulátoru (Balátě, 2003).



Obr. 1.9 – Blokové schéma PID regulátoru



Obr. 1.8 – PCH PID regulátoru

1.5.2 Regulátor PI

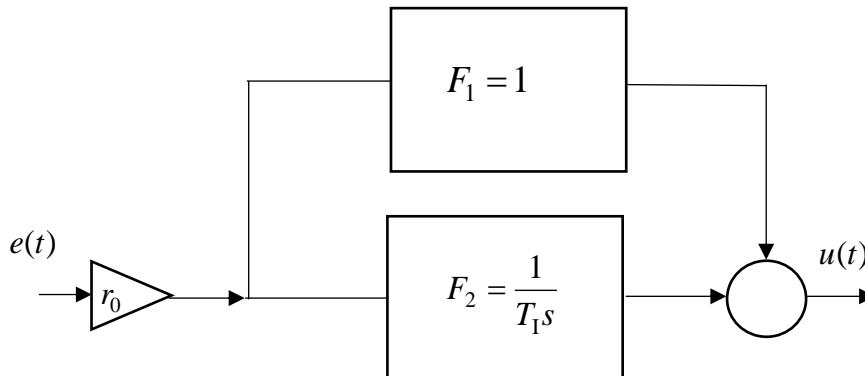
V mé bakalářské práci jsem se zabýval nastavením regulátoru PI, jehož rovnice je

$$u_R(t) = r_0 \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (1.23)$$

A tím je dán přenos PI regulátoru

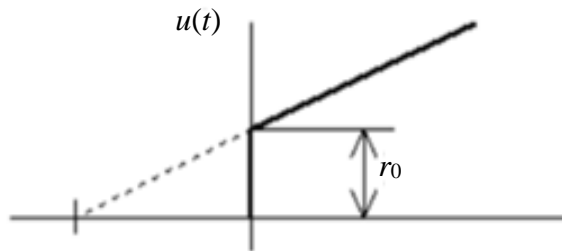
$$F_R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (1.24)$$

Tento regulátor patří k nejpoužívanějším regulátorům v oblasti elektrických pohonů. PI regulátor vznikne paralelním spojením integračního a proporcionálního členu.



Obr. 1.10 – Blokové schéma PI regulátoru

Přechodová charakteristika PI regulátoru je na obr. 1.11.



Obr. 1.11 – PCH PI regulátoru

1.6 METODY NÁVRHU REGULÁTORŮ

Většinu regulačních obvodů dominují PID regulátory, v mnoha situacích s potlačenou derivační složkou. Na světě je celá řada pravidel a metod pro jejich nastavení. Během svého studia jsem se nejčastěji setkal s nastavením podle ZN metody. Tato metoda vede k až k 50% přeregulování a kmitavé regulační odezvě. Taková nastavení nejsou akceptována obsluhou regulátorů (Klán, 2000).

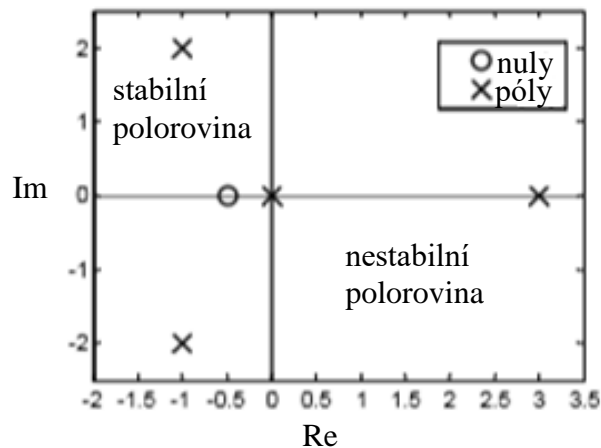
Pro můj návrh regulátoru jsem si proto vybral netradiční metodu a tou je metoda umístění pólů.

1.6.1 Pomocí umístění pólů

V originálním znění metoda pole placement definuje přesně póly URO.

Póly a nuly neboli jejich poloha je patrná z formy přenosu, kde polynomy jmenovatele a čitatele jsou umístěny v součinu kořenových čitateľů. Jak již bylo řečeno v předcházející kapitole, póly a nuly jsou jedním ze zápisů přenosu systému. Umístění pólů má vliv na stabilitu systému. Přenos spojitého systému ve formě pólů a nul je, rovnice (1.5).

U nul i pólů je důležitá jejich poloha v komplexní rovině vzhledem k ose y (imaginární osa). Stabilní póly a nuly leží v levé polorovině osy x (reálná osa), tzn. jsou záporné. Póly a nuly, které leží v polorovině pravé jsou kladné, a tím také poznáme, že jsou nestabilní. Čím dále jsou stabilní póly od osy y , tím je přechodový děj více tlumen. Na obr. 1.12 jsou znázorněny komplexní poloroviny se stabilními i nestabilními póly a nuly (Navrátil, 2011).

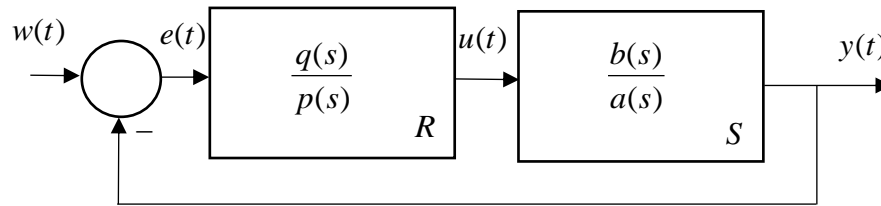


Obr. 1.12 – Stabilita nul a pólů

Při návrhu regulátoru pomocí metody umístění pólů je třeba nejprve vypočítat přenos URO. Obecný výpočet přenosu řízení je

$$F(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{RS}{1 + RS} = \frac{\frac{q}{p} \cdot \frac{b}{a}}{1 + \frac{q}{p} \cdot \frac{b}{a}} = \frac{bq}{ap + bq} \quad (1.25)$$

Tento přenos vyplývá z následujícího obrázku URO.



Obr. 1.13 – Blokové schéma URO s polynomy

Po dosazení

$$\frac{b(s)}{a(s)} = \frac{Z}{(z_1 + s)(z_2 + s)}, \quad (1.26)$$

$$\frac{q(s)}{p(s)} = k_P + \frac{k_I}{s} = \frac{k_P s + k_I}{s}. \quad (1.27)$$

Tímto je získán charakteristický polynom $c(s)$, který vypadá takto

$$c(s) = a(s)p(s) + b(s)q(s). \quad (1.28)$$

Charakteristická rovnice poté vypadá následovně

$$c(s) = a(s)p(s) + b(s)q(s) = 0. \quad (1.29)$$

V mé bakalářské práci jsem zkoumal soustavu 2. řádu a regulátor byl zvolen typu PI. Proto charakteristický polynom bude stupně tři a nelze ho vybrat libovolně. Charakteristický polynom zvolíme ve tvaru

$$c(s) = (s + \alpha\omega_0)(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2), \quad (1.30)$$

kde ω_0 – vlastní frekvence,
 ζ – tlumení,
 α – parametr, který volíme.

Dosazením získáme rovnici

$$(z_1 + s)(z_2 + s)s + K(k_P s + k_I) = (s + \alpha\omega_0)(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2), \quad (1.31)$$

výsledkem této rovnice jsou parametry regulátoru (Šebek, 2016).

1.6.2 Pomocí integrálního kritéria

Integrální kritéria charakterizují průběh regulačního pochodu na nekonečném časovém horizontu (Řízení technologických procesů, 2011).

Snaha při návrhu regulátoru je, aby tyto kritéria nabývala co nejmenších hodnot. Nejznámější integrální kritéria jsou

- kritérium lineární regulační plochy,
- kritérium absolutní hodnoty regulační plochy,
- kritérium kvadrátu regulační plochy.

Kritérium lineární regulační plochy je dáno vztahem

$$J_1 = \int_0^{\infty} e(t) dt = \int_0^{\infty} [w(t) - y(t)] dt. \quad (1.32)$$

Toto kritérium má nejlepší uplatnění pro aperiodické regulační pochody. Je to dáno sčítáním ploch s kladnými a zápornými znaménky. Tudiž by integrál J_1 nabýval nejmenší hodnotu pro kmity, které nejsou tlumené, to jsou regulační pochody na mezi stability.

Kritérium absolutní hodnoty regulační plochy je dáno vztahem

$$J_2 = \int_0^{\infty} |e(t)| dt = \int_0^{\infty} |w(t) - y(t)| dt. \quad (1.33)$$

Výhoda tohoto kritéria je, že všechny plochy pod křivkou $e(t)$ mají kladné znaménko. Toto kritérium je tedy vhodné i pro kmitavé regulační pochody.

Kritérium kvadrátu regulačních plochy je dáno hodnotou integrálu

$$J_3 = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt = \int_0^{\infty} [w(t) - y(t)]^2 dt. \quad (1.34)$$

Toto kritérium je vhodné jak pro periodické, tak pro aperiodické regulační pochody. Existuje ještě celá řada integrálních kritérií. V mé bakalářské práci jsem pro návrh regulátoru použil kritérium, které penalizuje nejen kvadrát regulační odchylky, ale i kvadrát akční veličiny. Kritérium má tvar

$$J_4 = \int_0^{\infty} [e^2(t) + qu^2(t)] dt. \quad (1.35)$$

1.7 KVALITA REGULACE

Aby bylo možné porovnat metody nastavení regulátorů, je potřeba použít libovolnou metodu, která určí kvalitu regulace. Platí, že pochod vyhovující pro jeden řízený proces, nemusí být vhodný pro proces druhý. Volba vhodného kritéria určitým způsobem záleží na typu řízeného procesu.

Nejčastěji je chování regulačního obvodu vyšetřováno při skokových změnách žádané hodnoty výstupu nebo poruchy. Poté se očekává, že když regulační pochod vyhovuje skokové změně, je vyhovující i pro jiné omezené signály (Řízení technologických procesů, 2011).

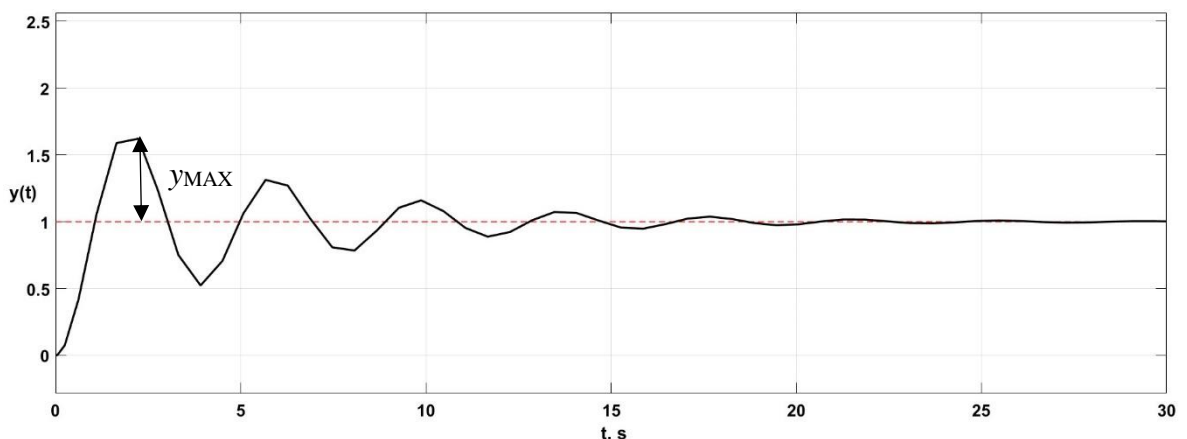
Dále uvedu jen některá základní kritéria, které hodnotí průběh řízeného výstupu. Těmi jsou

- kritérium podle maximálního přeregulování,
- kritérium podle doby regulace,
- kritérium podle tlumení regulačního pochodu,
- kritérium podle regulační plochy.

1.7.1 Kritérium podle maximálního přeregulování

Přeregulování je chápáno jako překmit nad hodnotu žádané hodnoty. Maximální přeregulování je nejvyšší hodnota tohoto překmitu. K této situaci dochází v první fázi řízení. Tento jev je na obr. 1.14. Maximální přeregulování se hodnotí v procentech podle vztahu

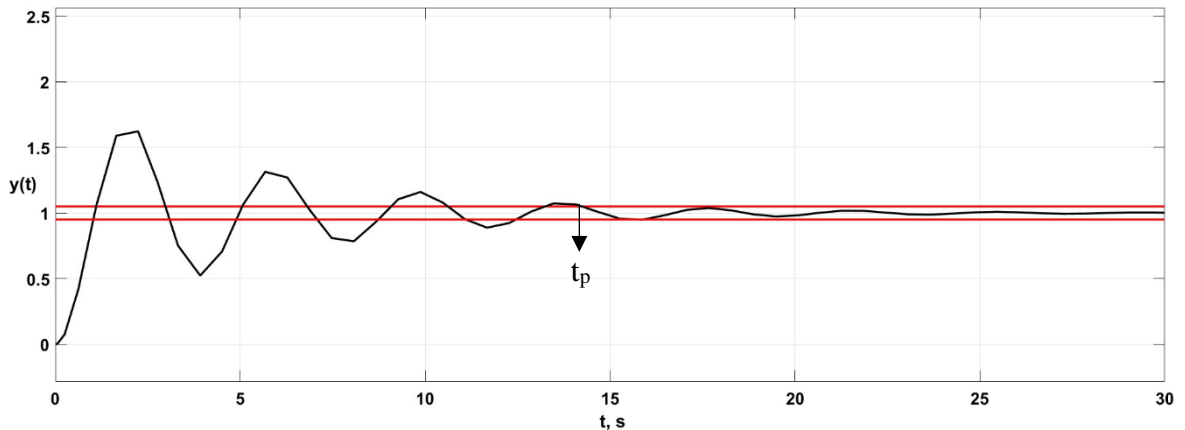
$$\sigma = \frac{y_{\text{MAX}}}{w} . \quad (1.36)$$



Obr. 1.14 – Ukázka maximálního přeregulování

1.7.2 Kritérium podle doby regulace

Doba regulace je čas, ve kterém regulovaný výstup přejde do hraničního pásma a dále z něj již nevystoupí. Obvykle se toto pásmo volí $\pm 5\%$. Toto pásmo je v blízkosti své žádané hodnoty. Tento jev je na obr. 1.15. Tato hodnota se obvykle označuje jako t_p .

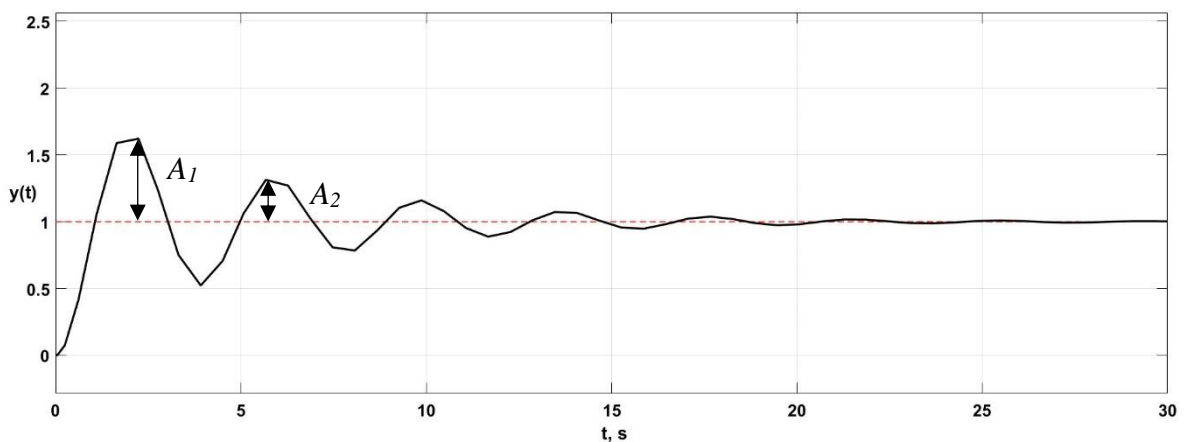


Obr. 1.15 – Ukázka doby regulace

1.7.3 Kritérium podle tlumení regulačního pochodu

Toto kritérium vychází z vyhodnocení dvou po sobě jdoucích amplitud kmitů a vyhodnocuje se koeficient tlumení. Slouží k hodnocení periodických pochodů, kdy výstup má charakter tlumených kmitů. Plochy jednotlivých kmitů jsou na obr. 1.16 (Řízení technologických procesů, 2011). Hodnotí se podle vztahu

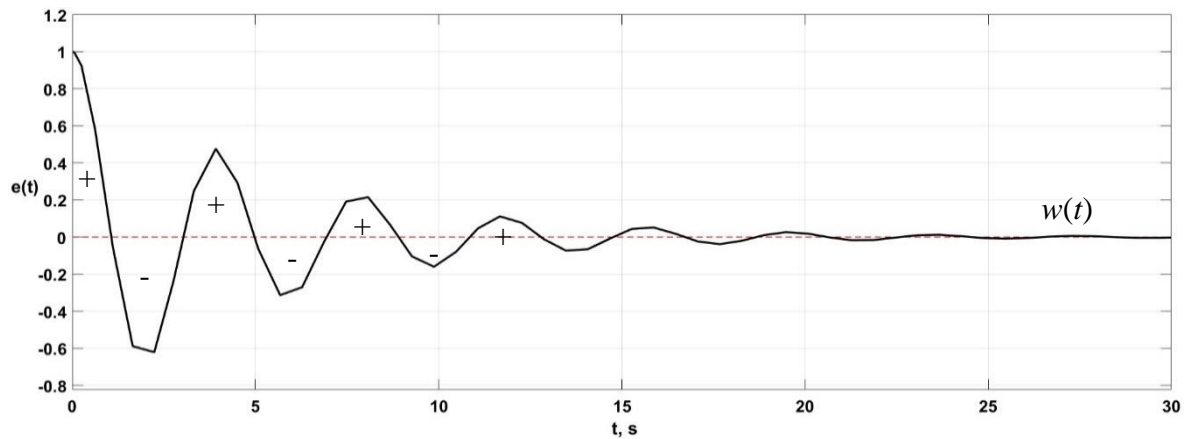
$$\xi = \frac{A_1 - A_2}{A_1}, 0 < \xi < 1. \quad (1.37)$$



Obr. 1.16 – Ukázka tlumení kmitů

1.7.4 Kritérium podle regulační plochy

Tato metoda určuje velikost plochy, která leží mezi žádanou hodnotou $w(t)$ a přechodovou charakteristikou regulačního obvodu $y(t)$ (Navrátil, 2011).



Obr. 1.17 – Regulační plochy

Kritérium využívá vztah rovnice (1.33). Na obr. 1.17 jsou regulační plochy zobrazeny (Řízení technologických procesů, 2011).

2 IMPLEMENTAČNÍ ČÁST

V této kapitole se budu věnovat praktické části mé bakalářské práce. Nejdříve představím laboratorní soustavu GUNT RT 050, poté ukáži identifikace soustavy, a nakonec předvedu návrh regulátoru a porovnáám jejich regulační pochody z pohledu kvality regulace

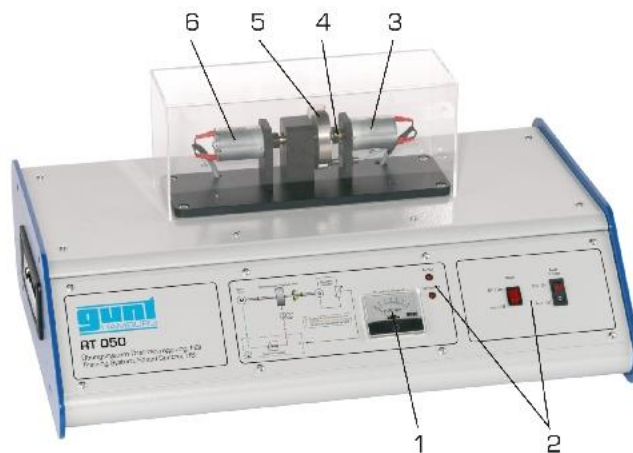
2.1 LABORATORNÍ SOUSTAVA GUNT RT 050

Hlavním cílem mé práce bylo identifikovat a navrhnout řízení pro laboratorní soustavu GUNT RT 050 na obr. 2.1, kterou vyrábí společnost G.U.N.T. Hamburk. Jedná se o pomůcku, která má za úkol simulovat stejnosměrný motor. Slouží jako experimentální jednotka pro inženýrské pokusy. Na této soustavě lze regulovat otáčky motoru, měřit je a odregulovávat poruchu.

System je upevněn na kovovém těle, které chrání elektroniku a je na něm také upevněno manuální ovládání. Na soustavě motor-generátor je umístěno plastové průhledné pouzdro, které slouží k bezpečnému pozorování motoru a generátoru. Technické parametry laboratorní soustavy jsou v tab. 2.1.

Vstupním signálem systému je napětí, které se přivádí na motor. Výstupní veličinou je také napětí, které je ale závislé na otáčkách motoru. Otáčky jsou měřeny pomocí indukčního snímače otáček.

K tomuto zařízení je dodáván manuál a také software, který umožňuje se soustavou komunikovat. Připojení k PC je realizováno kartou Labjack připojené do USB portu. Pro experimentování na soustavě jsem použil softwarové prostředí Matlab případně Simulink.



Obr. 2.1 – GUNT RT 050

- Kde 1 – ukazatel otáček,
 2 - ovládání a displej,
 3 – generátor,
 4 – indukční snímač otáček,
 5 – rotor,
 6 – motor.

V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry GUNT RT 050 (GUNT Hamburk, 2017).

Tab. 2.1 – Technické parametry soustavy

Přístroj	Max. rychlost, $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	Max. výkon, W	Max, točivý moment, Nm
Motor	4500	10	1,7
Generátor	4500	10	1,7
Ukazatel otáček	6000		

2.2 IDENTIFIKACE SOUSTAVY

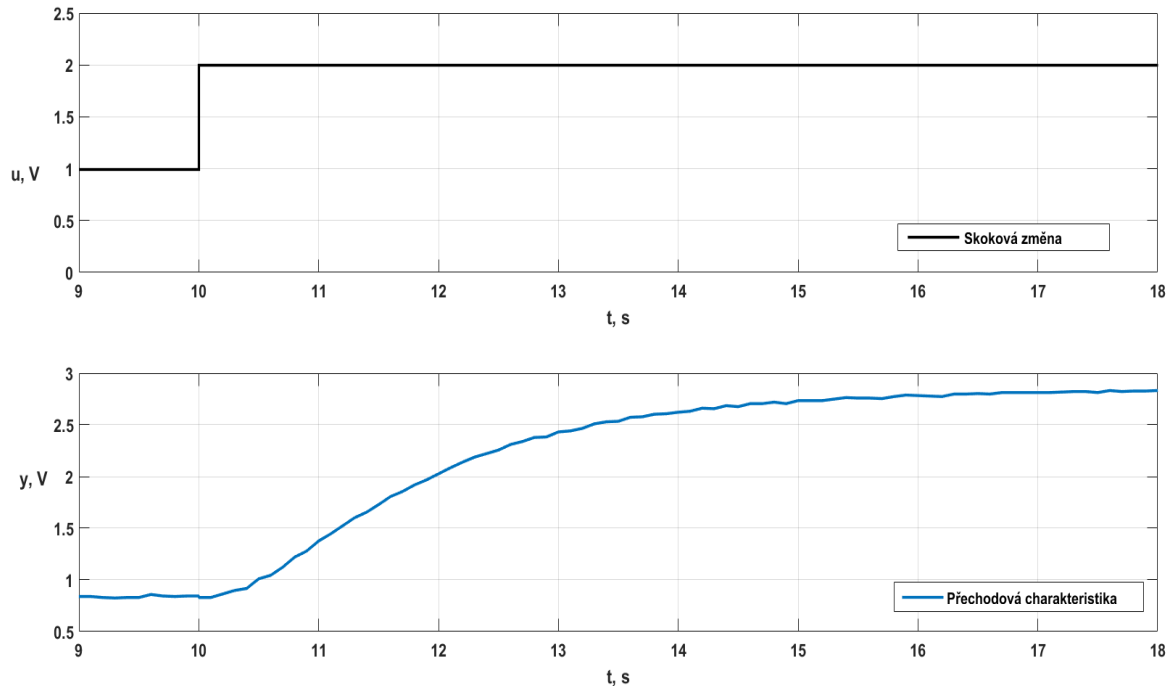
Předtím než jsem přešel k samotné identifikaci, musel jsem se seznámit s konstrukcí soustavy. Poté jsem si musel rozmyslet, na co sestavený model budu používat. Můj cíl byl zhotovit takový model, podle kterého bude možné navrhnout řízení zmiňované soustavy. Došel jsem k názoru, že na můj úkol postačí vnější popis soustavy.

Základní vlastnosti modelu jsem vyčetl z jeho přechodové charakteristiky. Už na první pohled je zřejmé, že soustava GUNT RT 050 není soustava 1. řádu.

Pro získání přechodové charakteristiky je potřeba skoková změna vstupního signálu. Přechodová charakteristika je na obr. 2.2.

Dále jsem zvolil dva způsoby získání přenosu soustavy:

- pomocí Matlab,
- pomocí aproximace soustavy.



Obr. 2.2 – PCH laboratorní soustavy GUNT RT 050

2.2.1 Identifikace soustavy pomocí Matlab

Pro určení parametrů přenosu byla použita optimalizační metoda. Pro tuto metodu jsem použil výpočetní software Matlab a některé jeho nástroje. Nejdůležitější funkce, které mi pomohly k identifikaci soustavy jsou,

- *fminsearch()*, tato funkce vyhledává minimum vícerozměrové funkce a vrací vektor X . V tomto vektoru jsou obsaženy parametry přenosu,
- *lsim()*, tento nástroj dokáže ze zadaného přenosu, vektoru času a vektoru vstupního signálu simulovat odezvu obrazového přenosu,
- *tf()* neboli transfer function. Tato funkce vypíše obrazový přenos.

Volání funkce je na obr. 2.3 a samotná funkce na obr. 2.4.

```
X=fminsearch('hledej',[1 1 1],[],t,U-U0,Y-Y0);
Z=X(1); T1=X(2); T2=X(3);
M=tf(Z,[T1*T2 T1+T2 1]);
```

Obr. 2.3 – Program pro volání funkce hledej

Tento skript volá vytvořenou funkci *hledej*. Tato funkce mění vektor X , tak aby byla hodnota kritéria K , co možná nejmenší. Znění tohoto kritéria je znázorněno v rovnici 1.2.


```

function K=hledej(X,t,U,Y)
Z=X(1); T1=X(2); T2=X(3);
M=tf(Z,[T1*T2 T1+T2 1]);
Ym=lsim(M,U,t,'zoh');
K=(Y-Ym)'*(Y-Ym);

```

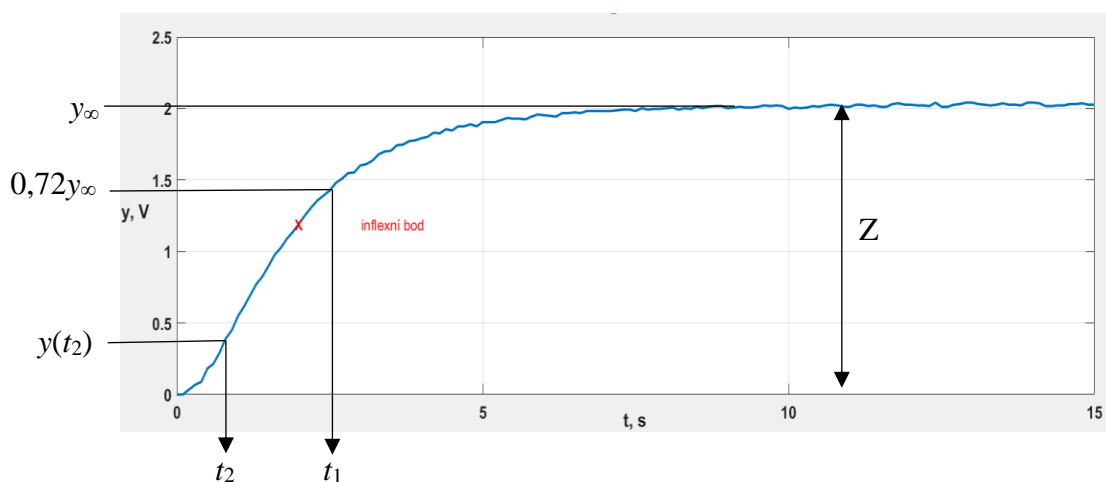
Obr. 2.4 – Funkce hledej

Z tohoto postupu zjistíme parametry přenosu. Výsledný přenos pro zkoumanou soustavu je

$$F_{M1}(s) = \frac{Z}{(T_1s+1)(T_2s+1)} = \frac{2,13}{(2,5s+1)(0,57s+1)} \quad (2.1)$$

2.2.2 Identifikace soustavy pomocí Strejcovy metody

Pro aproximaci přechodové charakteristiky jsem použil Strejcovu metodu.



Obr. 2.5 – Aproximace PCH pomocí Strejcovy metody

Jako první krok jsem změřil zesílení soustavy. Z přechodové charakteristiky lze tuto hodnotu vyčíst a rovná se

$$Z = 2,017 \quad (2.2)$$

Poté jsem pro hodnotu $0,72y_\infty$ odečetl z PCH dobu t_1 a zjistil součet časových konstant T_1 a T_2 podle rovnice

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564} = \frac{2,55}{1,2564} = 2,02 \quad (2.3)$$

Dalším krokem je výpočet časového okamžiku t_2 , ten jsem vypočetl podle vztahu

$$t_2 = 0,3574 \cdot (T_1 + T_2) = 0,3574 \cdot (2,02) = 0,72. \quad (2.4)$$

Když jsem znal hodnotu časového okamžiku t_2 , mohl jsem z grafu přechodové charakteristiky odečíst hodnotu $y(t_2)$. Podle tab. 2.2 jsem určil poměr časových konstant τ_2

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2} = 0,105. \quad (2.5)$$

Tab. 2.2 – Určení poměru τ_2

$y(t_2)$	τ_2
0,30	0,000
0,29	0,023
0,28	0,043
0,27	0,063
0,26	0,084
0,25	0,105

Poté co jsem znal poměr a součet časových konstant, jsem mohl vypočítat jednotlivé konstanty (Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik, 2006).

Použil jsem dosazovací metodu a celkový přenos zkoumané soustavy vyšel

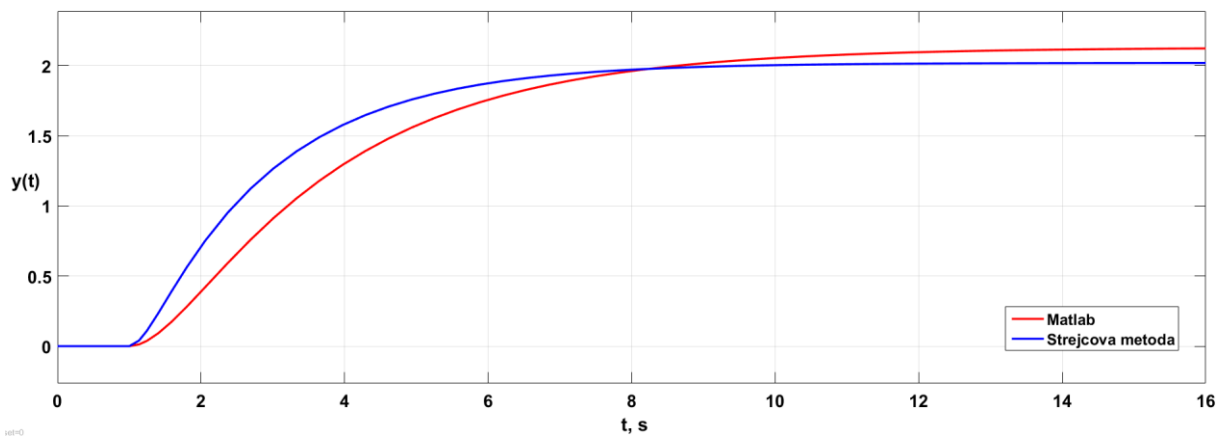
$$F_{M2}(s) = \frac{Z}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{2,02}{(1,97s + 1)(0,05s + 1)}. \quad (2.6)$$

Jak je vidět v tab. 2.3, jednotlivé parametry se liší. Je to dáno nepřesným odečítáním hodnot z grafu, a také tím že pro Strejcovu metodu jsem použil jen náběžnou část, zatímco identifikace pomocí Matlab proběhla v celém rozsahu, tzn. i pro sestupnou část charakteristiky. Strejcová metoda se již moc nepoužívá, jelikož máme přesnější nástroje v podobě moderních výpočetních systémů. Také proto se již v mé bakalářské práci nebudu ohlížet na přenos

vypočítaný pomocí Strejcovy metody, ale budu používat přenos získaný pomocí softwarového prostředí Matlab.

Tab. 2.3 – Porovnání parametrů

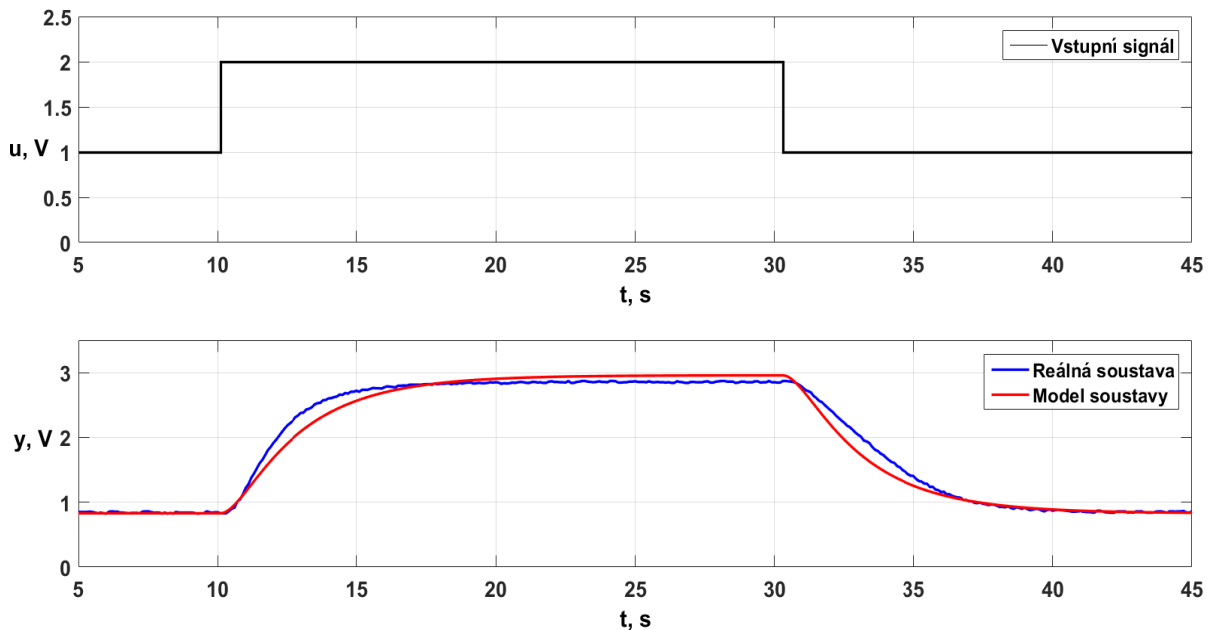
Parametr	Parametry získané pomocí Matlab	Parametry získané pomocí Strejcovy metody
Z	2,13	2,02
T_1	2,5	1,82
T_2	0,57	0,2



Obr. 2.6 – Porovnání PCH

2.3 VERIFIKACE MODELU

Verifikace je ověření platnosti neboli kontrola pravdivosti. Průběh mé verifikace je na obr. 2.6. Na grafu je vidět shodnost výstupního signálu reálné soustavy s výstupním signálem modelu soustavy. Je zde patrná odlišná dynamika při zvyšování a snižování vstupního signálu. Model je navržen, aby co nejlépe tento jev potlačoval. Jedná se tedy o rovnováhu mezi těmito jevy.



Obr. 2.7 – Verifikace soustavy

2.4 NÁVRH REGULÁTORŮ

V této kapitole předvedu praktické zpracování návrhu regulátoru pomocí vybraných metod. Všechny tyto metody jsou zhotoveny ve výpočetním prostředí Matlab a skripty jsou přiloženy v příloze. Pro regulaci jsem použil regulátor PI.

2.4.1 Návrh regulátoru pomocí metody umístění pólů

Ještě předtím, než jsem aplikoval metodu umístění pólů, musel jsem získat přenos řízení $F_w(s)$. Přenos PI regulátoru je dán rovnicí (1.23) a přenos soustavy je zobrazen rovnicí (2.1.) Když jsem tyto přenosy dosadil do rovnice (1.24), získal jsem přenos zpětnovazební regulace.

Přenos regulace je

$$F_w = \frac{F_s F_R}{1 + F_s F_R} = \frac{\frac{Zr_0 \cdot (T_1 s + 1)}{T_1 T_2 T_I s^3 + (T_1 + T_2) \cdot T_1 s^2 + T_1 s}}{1 + \frac{Zr_0 \cdot (T_1 s + 1)}{T_1 T_2 T_I s^3 + (T_1 + T_2) \cdot T_1 s^2 + T_1 s}}. \quad (2.7)$$

Po drobných úpravách jsem dostal rovnici

$$F_w = \frac{Zr_0 \cdot (T_1 s + 1)}{T_1 T_2 T_I s^3 + (T_1 + T_2) \cdot T_1 s^2 + T_1 s + Zr_0 \cdot (T_1 s + 1)}. \quad (2.8)$$

Charakteristický polynom se rovná jmenovateli přenosu regulace a je

$$c(s) = T_1 T_2 T_I s^3 + (T_1 T_1 + T_2 T_1) s^2 + (T_1 + Zr_0 T_1) s + Zr_0. \quad (2.9)$$

Po matematických úpravách a se srovnáním s voleným charakteristickým polynomem, který je v rovnici (1.29) jsem dostal vztah

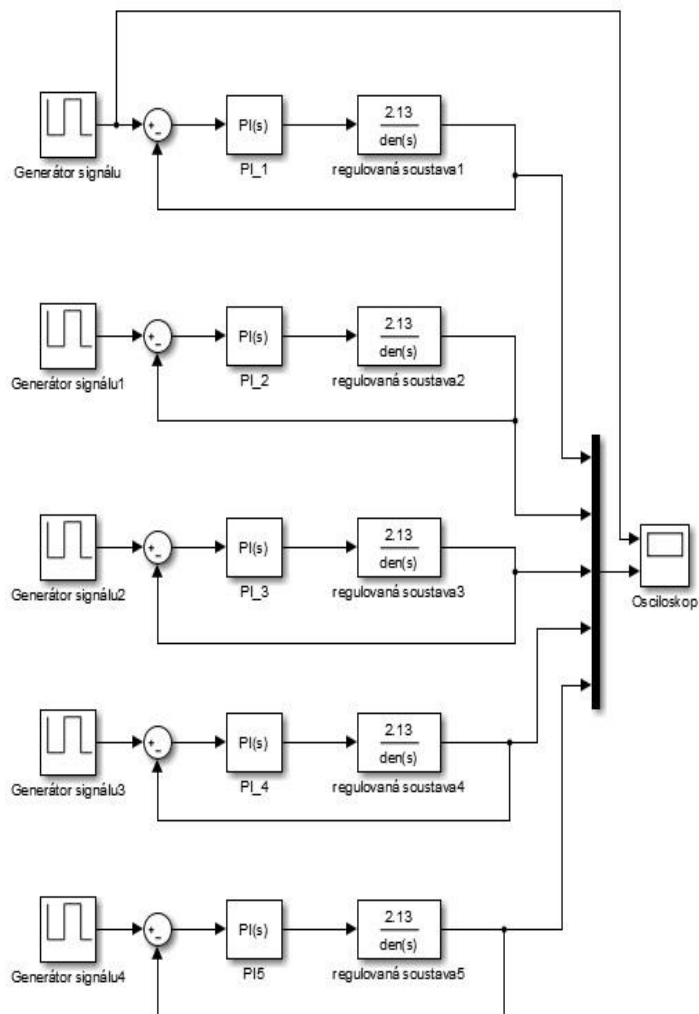
$$s^3 + \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} s^2 + \frac{(1 + Zr_0)}{T_1 T_2} s + \frac{Zr_0}{T_1 T_2 T_I} = s^3 + (\alpha \omega_0 + 2\zeta \omega_0^2 + \omega_0^2) s + \alpha \omega_0^3. \quad (2.10)$$

Po vyřešení této rovnice jsem získal následující vzorce pro parametry regulátoru PI a pro volný parametr α . Parametry se rovnají

$$\alpha = \frac{\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} - 2\zeta \omega_0}{\omega_0}, \quad (2.11)$$

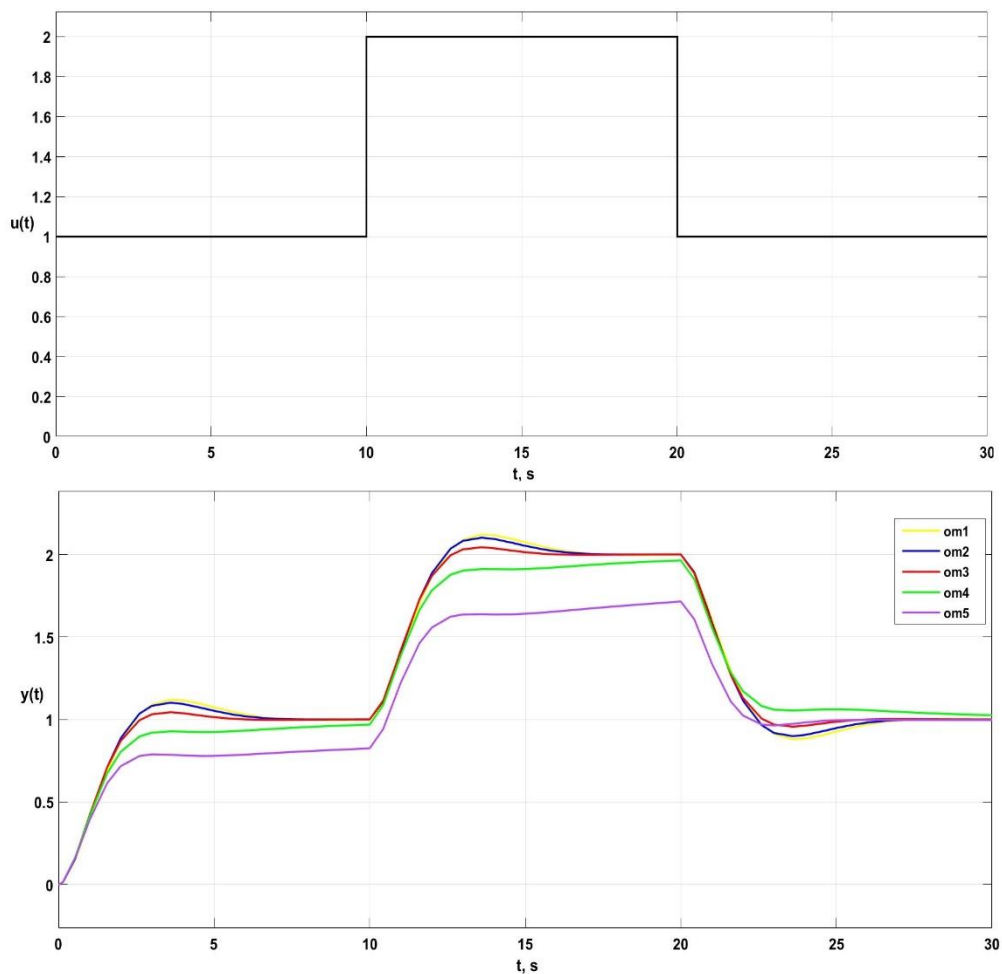
$$r_0 = \frac{(\alpha 2\zeta \omega_0^2 + \omega_0^2)(T_1 T_2) - 1}{Z}, \quad (2.12)$$

$$T_I = \frac{Zr_0}{\alpha \omega_0^3 T_1 T_2}. \quad (2.13)$$



Obr. 2.8 – Simulační schéma pro porovnání regulačních pochodů

Dalším krokem je volba vlastní frekvence ω_0 a tlumení ζ . Nejdříve jsem porovnal regulační pochody pro tlumení $\zeta = 0,7$ s tím že jsem měnil vlastní frekvenci ω_0 . Regulační pochody jsou vidět na obr. 2.9.

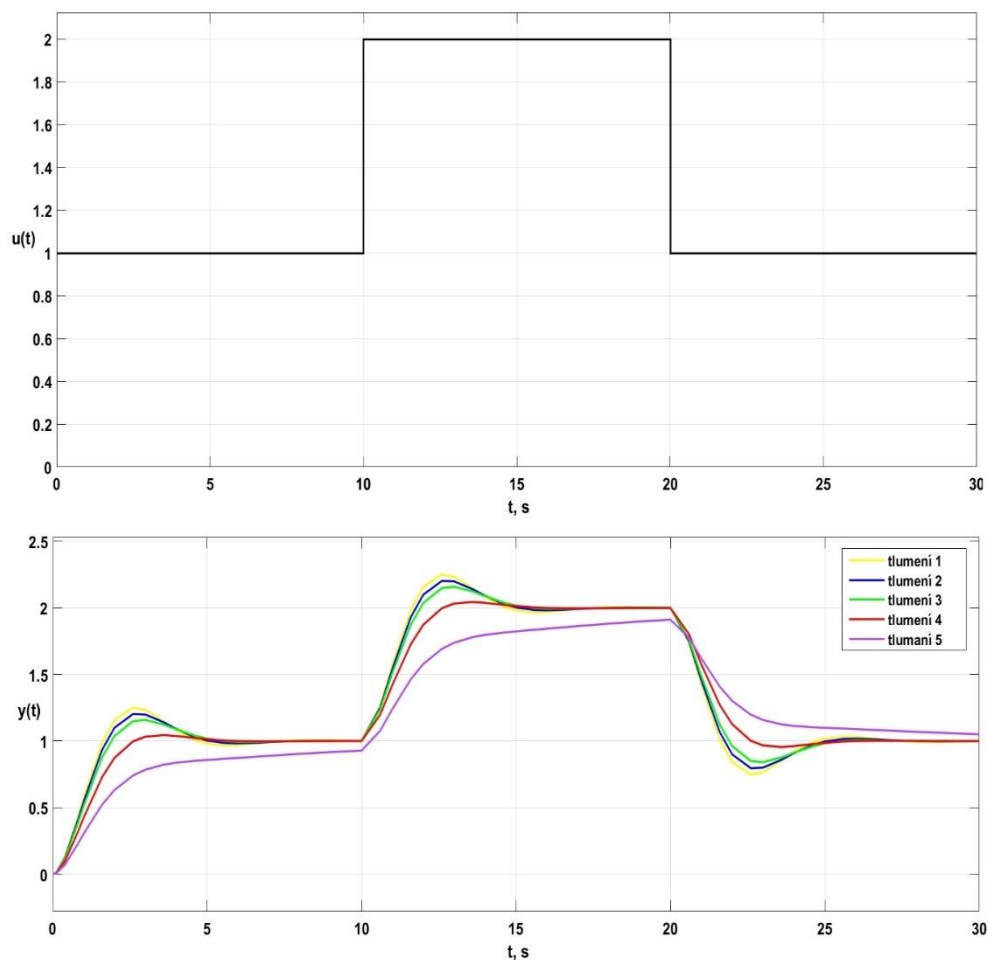


Obr. 2.9 – Regulační pochody pro různé hodnoty vlastní frekvence ω_0

Jak je z obr. 2.9 patrné nejlepší kvalitu regulace má červená křivka. Tato křivka se rovná hodnotě vlastní frekvence $\omega_0 = 1,25$ viz. tab. 2.4. Pro tuto hodnotu mezní frekvence jsem provedl další simulaci, abych našel optimální hodnotu tlumení.

Tab. 2.4 – Použité hodnoty ω_0

p.č.	ω_0 , Hz
1	1,00
2	1,10
3	1,25
4	1,40
5	1,50

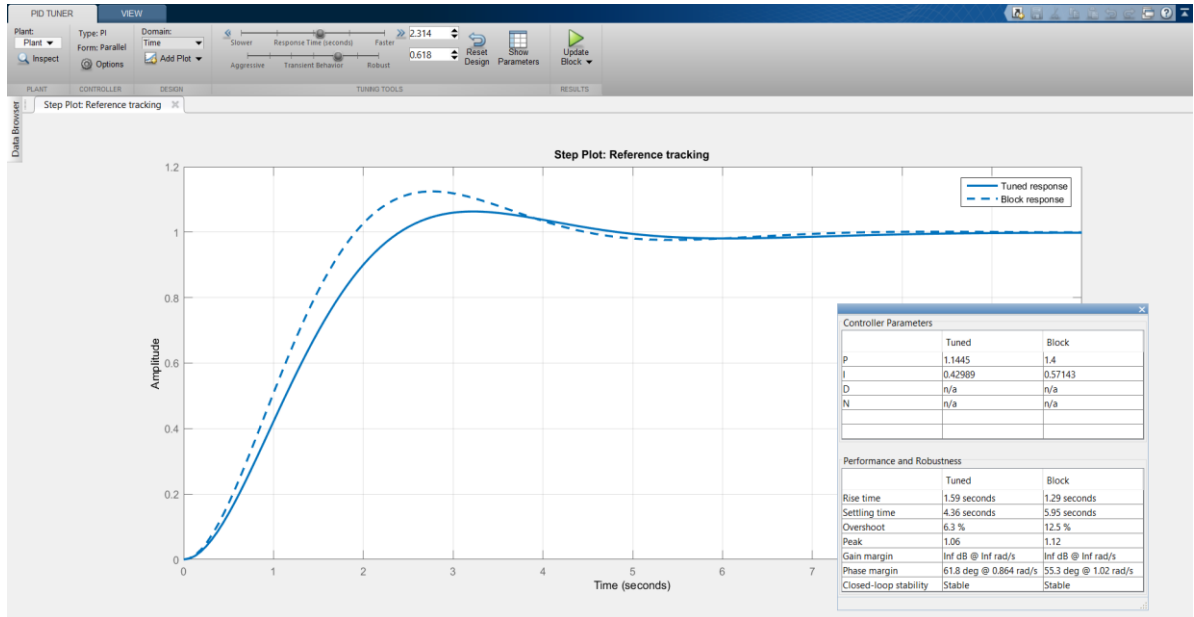


Obr. 2.10 – Regulační pochody pro různé hodnoty tlumení ζ

Tab. 2.5 – Použité hodnoty ζ

p.č.	ζ
1	0,50
2	0,55
3	0,60
4	0,70
5	0,80

Jak je z obr. 2.10 zřejmé, nejlepší kvalitu regulace má červená křivka. Tato křivka se rovná hodnotě tlumení $\zeta = 0,7$, viz tab. 2.5. Jestliže tyto výsledky jsou dosazeny do rovnic (2.11), (2.12) a (2.13), parametry regulátoru PI jsou $r_0 = 1,06$ a $T_I = 2,52$.



Obr. 2.12 – Ukázka funkce TUNE

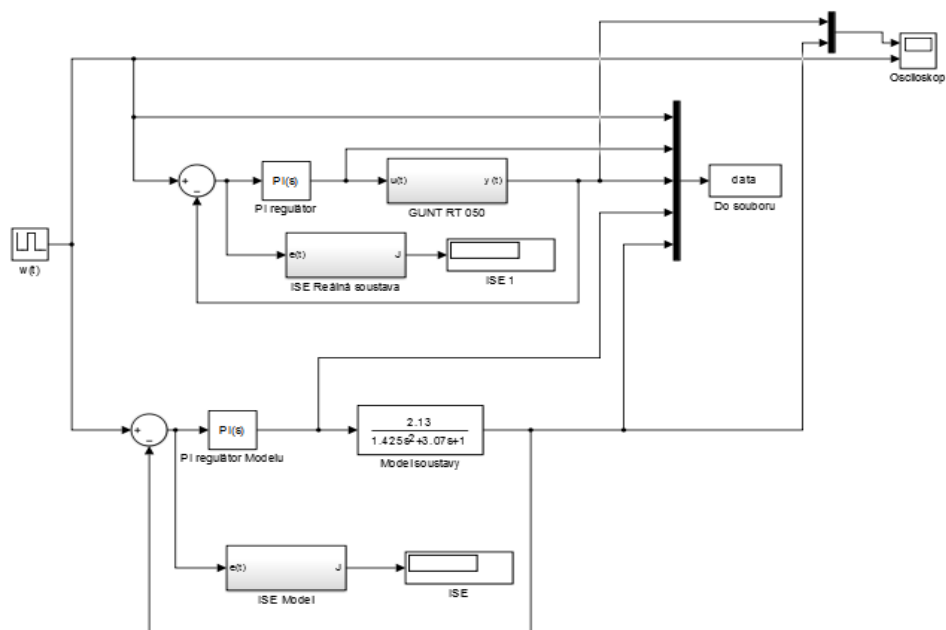
Následná tabulka obsahuje parametry PI regulátoru pro všechny metody.

Tab. 2.6 – Parametry regulátorů PI

Metoda	r_0	T_1
Umístění pólů	1,06	2,52
Integrální kritérium	1,40	2,45
Funkce TUNE	1,15	2,67

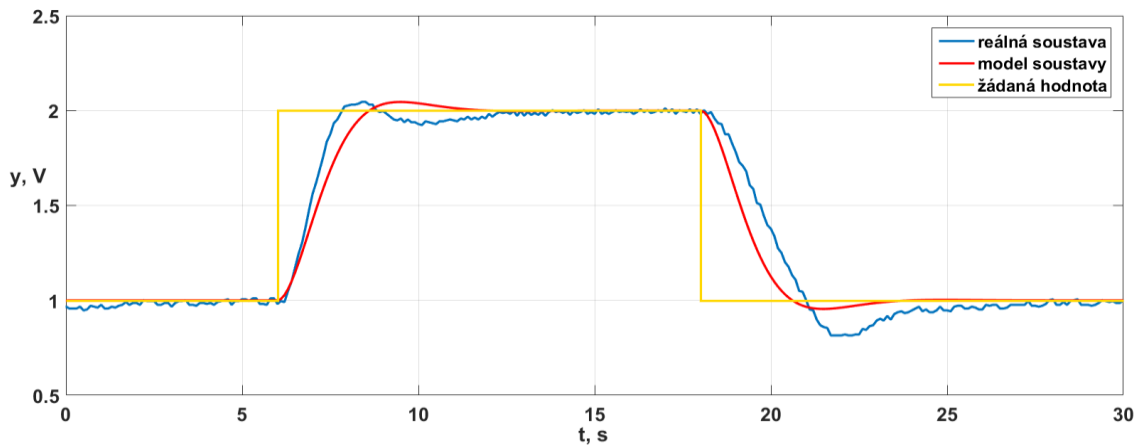
2.5 POROVNÁNÍ REGULAČNÍCH POCHODŮ

V této kapitole ukáži regulační pochody, které jsem změřil a nasimuloval. Na následujícím obrázku je schéma regulačních obvodů, jak pro skutečnou soustavu, tak i pro model soustavy. Obvod jsem vytvořil v simulačním prostředí Matlab.

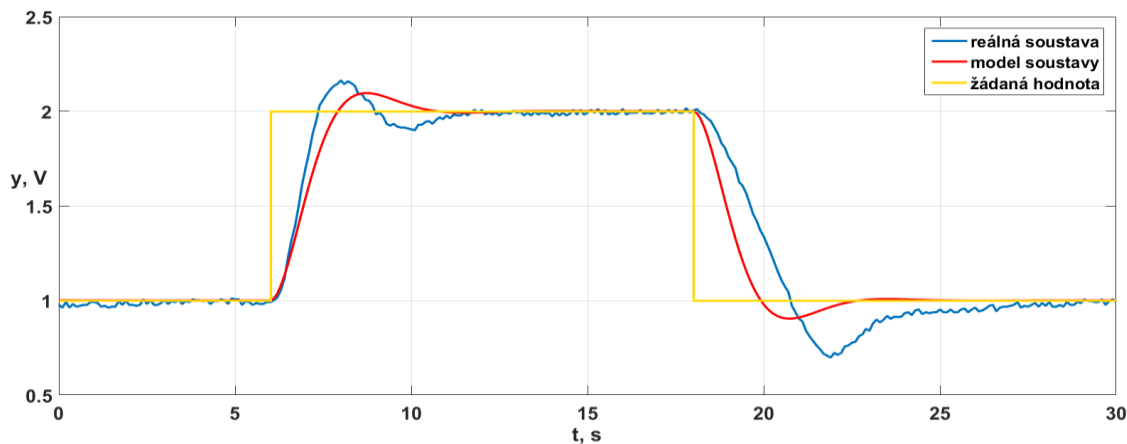


Obr. 2.13 – Schéma regulačního obvodu

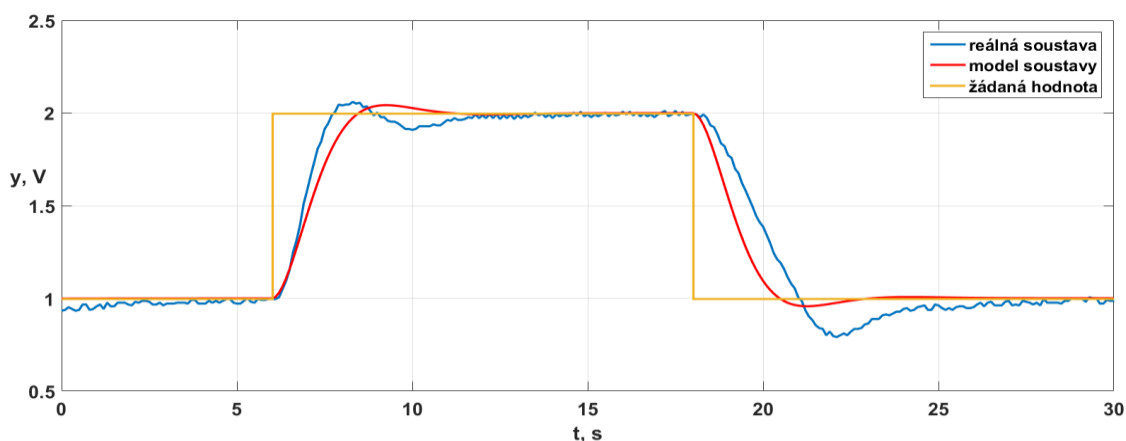
Na nadcházejících obrázcích jsou znázorněny regulační pochody pro různá nastavení PI regulátoru. V jednotlivých grafech jsou znázorněny průběhy pro reálnou i namodelovanou soustavu a žádaná hodnota $w(t)$.



Obr. 2.14 – Regulační pochod, regulátor navržen pomocí metody umístění pólů



Obr. 2.15 – Regulační pochod, regulátor navržen pomocí kritéria kvadrátu odchylek



Obr. 2.16 – Regulační pochod, regulátor navržen pomocí funkce TUNE

Z grafů lze vyčíst drobné odchylky reálných soustav a jejich modelů. Tento jev je dán různou dynamikou motoru při rozběhu a při brždění.

Všechny pochody jsou podobné, jelikož i parametry regulátorů také vyšly obdobně. Tímto jsem si ověřil, že všechny metody návrhu regulátoru, které jsem využil jsou správné.

Kvalitu regulace jsem vyšetřil pomocí kritéria kvadrátu regulační plochy (ISE). Na blok ISE jsem využil subsystem v Simulink viz obr. 2.13. V tab. 2.7. jsou znázorněny výsledky měření kritéria. Nejmenší hodnota znamená nejlepší kvalitu regulace. Mohl jsem porovnávat i jednotlivé nastavení PI regulátorů mezi sebou, jelikož žádaná hodnota $w(t)$ a doba simulace zůstaly totožné.

Tab. 2.7 – Hodnoty kritéria kvadrátu regulační plochy (ISE)

Metoda nastavení regulátoru	Model soustavy	Reálná soustava
Umístění pólů	42,57	44,23
Kritérium kvadrátu odchylek	42,04	43,19
Funkce TUNE	42,47	43,99

Z tabulky je vidět, že vzhledem ke kritériu kvadrátu regulační plochy se jednotlivé nastavení regulátorů výrazně neliší. Z tohoto hlediska nejlépe dopadl návrh regulátoru pomocí kritéria kvadrátu odchylek.

3 ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo identifikovat laboratorní soustavu GUNT RT 050, vytvořit její model a navrhnout vhodné řízení. Regulátor jsem navrhl metodou umístění pólů, pomocí kritéria kvadrátu odchylek a funkce TUNE v Simulink.

Metodou experimentální identifikace jsem musel zjistit odezvu systému na jednotkový skok a tím změřit jeho přechodovou charakteristiku. Poté jsem k její aproximaci využil výpočetní prostředí Matlab a určil matematický model. Ten je znázorněn vnějším popisem soustavy, a to přenosem druhého řádu s různými časovými konstantami. Byly porovnány naměřené a simulované přechodové charakteristiky.

Matematický model jsem potřeboval, abych mohl určit parametry regulátoru PI. Různými metodami pro návrh regulátorů jsem zjistil jejich parametry. Dále byly porovnány regulační pochody pro různá nastavení regulátoru. Tyto pochody byly porovnány z hlediska kvality regulace kritériem kvadrátu regulační plochy. Jak je z regulačních pochodů vidět, matematický model, který jsem identifikoval je celkem přesný.

Drobné odchylky jsou dány různou dynamikou soustavy při rozběhu a při brždění motoru. Model také vyhovuje pro simulaci chování regulované soustavy bez regulátoru. Z porovnání regulačních pochodů je patrné, že navrhované metody nastavení regulátorů jsou pro zkoumanou soustavu vhodné.

POUŽITÁ LITERATURA

- BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura. 70-220 s. ISBN 80-7300-020-2.
- KLÁN, P. 2000. Moderní metody nastavení PID regulátorů. *AUTOMA*. Vol. 9 (2000), 54. [online]. Ústav informatiky AV ČR Praha a Univerzita Pardubice. [cit. 2017-03-02]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://valter.byl.cz/sites/default/files/soubory/moderni_nastav_pid.pdf.
- NAVRÁTIL, P. 2011. *Automatizace – Vybrané statě*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 90-100 s. ISBN 978-80-7318-935-8
- NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex. ISBN 80-722-5030-2.
- VROŽINA, M; JANČIKOVA, Z a DAVID, J. 2012. *Identifikace systémů*. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava. 7-22 s. ISBN 978-80-248-2594-6
- GUNT Hamburk. 2017. *RT 050 Training systém: speed control, HSI*. [online]. Hamburk: GUNT Hamburk. [cit. 24. 02. 2017]. Dostupné z: http://www.gunt.de/index.php?option=com_gunt&task=gunt.list.category&product_id=1046&lang=en.
- Matematická biologie: Model dravec-kořist Johna Maynarda Smithe*. 2015. [online]. Brno: Institut biostatistiky a analýz Masarykovy univerzity, [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-modelovani-dynamicky-biologicky-dat--diskretni-deterministicke-modely--aplikace--dynamika-dvou-interagujicich-populaci--model-dravec-korist-johna-maynarda-smithe>.
- Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik: Aproximace přechodových charakteristik s aperiodickým průběhem – Strejcova metoda*. 2006. [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm#ma3.
- Řízení technologických procesů: Úvod*. 2011. [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://rtp.webzdarma.cz/uvod.php>.

PŘÍLOHY

A - CD

Příloha k bakalářské práci
NÁVRH ŘÍZENÍ LABORATORNÍ SOUSTAVY GUNT
Milan Souček

CD

Obsah

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