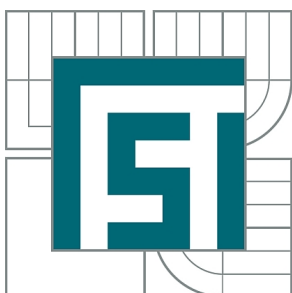


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

SROVNÁNÍ JEDNODUCHÝCH A ROZVĚTVENÝCH REGULAČNÍCH OBVODŮ

COMPARISON OF SIMPLE AND BRANCHED CONTROL CIRCUITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ BLAHÚT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OLGA DAVIDOVÁ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Blahút

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Srovnání jednoduchých a rozvětvených regulačních obvodů

v anglickém jazyce:

Comparison of simple and branched control circuits

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pomocí jednoduchých regulačních obvodů lze řešit běžné regulační úlohy. V případě, kdy je požadována lepší přesnost a dynamika regulačního pochodu, tyto jednoduché obvody již nestačí. V takovém případě se používají rozvětvené regulační obvody v různých variantách. Práce se bude zabývat návrhem obou typů obvodů a porovnáním získaných výsledků.

Cíle bakalářské práce:

- Popište jednoduchý regulační obvod.
- Uveďte typy rozvětvených regulačních obvodů.
- Ke zvoleným regulovaným soustavám navrhnete regulátory ve variantách pro jednoduché i rozvětvené regulační obvody.
- V Simulinku namodelujte regulační průběhy.
- Proveďte vyhodnocení regulace s ohledem na její přesnost a kvalitu.

Seznam odborné literatury:

BALÁTEĚ, J. Automatické řízení. Praha: Nakladatelství BEN–technická literatura, 2003. 664s. ISBN 80-7300-020-2.

ŠULC, B.; VÍTEČKOVÁ, M. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 333s.

ISBN 80-01-03007-5

ŠVARC, I.; MATOUŠEK, R.; ŠEDA, M.; VÍTEČKOVÁ, M. Automatické řízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 348. ISBN 978-80-214-4398-3.

VÍTEČKOVÁ, M.; VÍTEČEK, A. Základy automatické regulace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. 198s. ISBN 80-248-1068-9.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Olga Davidová, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 20.11.2013




Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá možnosťami zlepšenia presnosti a kvality regulácie pomocou rozvetvenia jednoduchého regulačného obvodu. Práca obsahuje popis jednoduchého regulačného obvodu a jednotlivé možnosti jeho rozvetvenia. Záver práce obsahuje návrh parametrov regulátora pre jednoduché a rozvetvené regulačné obvody spolu s regulačnými priebehmi nasimulovanými v programe Simulink.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with possibilities of improving the accuracy and quality by branching simple control loop. The work contains a description of a simple control loop and the different possibilities of its branching. The conclusion includes a proposal of control parameters for simple and branched control loops with regulator's waveforms simulated in Simulink program.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Jednoduchý regulačný obvod, rozvetvený regulačný obvod, obvod s pomocnou regulovanou veličinou, kaskádová regulácia, obvod s pomocnou akčnou veličinou, obvod s meraním poruchovej veličiny, obvod s modelom regulovanej sústavy.

KEYWORDS

Simple control circuit, branched control circuit, control circuit with auxiliary controlled variable, cascade control, control circuit with auxiliary manipulated variable, feed-forward control, model based control.

PREHLÁSENIE O ORIGINALITE

Prehlasujem, že predkladaná bakalárska práca je mojou pôvodnou autorskou prácou, ktorú som vypracoval pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím uvedenej literatúry.

V Brne 30.5.2014

Lukáš Blahút

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BLAHÚT, L. *Srovnání jednoduchých a rozvětvených regulačních obvodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Olga Davidová, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Chcem sa poďakovať vedúcej práce Ing. Olga Davidová, Ph.D., za cenné rady, odbornú pomoc a konzultácie, ktoré mi poskytla pri vypracovaní tejto bakalárskej práce. Osobitné poďakovanie patrí mojej rodine a priateľom za podporu a pochopenie.

OBSAH

Zoznam použitých symbolov a skratiek	13
Zoznam obrázkov	14
Zoznam tabuliek	15
1 Úvod	17
2 Riadenie	19
3 Jednoduchý regulačný obvod	21
3.1 Regulátor	21
3.2 Regulovaná sústava	22
3.3 Prenosy regulačných obvodov	23
3.4 Návrh parametrov regulátora.....	24
3.5 Iné nerozvetvené regulačné obvody	24
4 Rozvetvené regulačné obvody	25
4.1 Obvody s pomocnou regulovanou veličinou.....	25
4.1.1 Matematický popis	26
4.1.2 Kaskádová regulácia	26
4.1.3 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom	27
4.2 Obvody s pomocnou akčnou veličinou	28
4.2.1 Matematický popis	28
4.2.2 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom	28
4.3 Obvody s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny	29
4.3.1 Matematický popis	29
4.3.2 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom	29
4.4 Obvody s modelom regulovanej veličiny.....	30
4.5 Smithov prediktor.....	30
4.5.1 Matematický popis	31
4.5.2 Modifikácie Smithovho prediktora	31
4.5.3 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom	31
5 Porovnanie riešených regulovaných sústav	33
5.1 Jednoduchý regulačný obvod	33
5.2 Obvod s pomocnou regulovanou veličinou v sériovom zapojení	34
5.2.1 Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod	34

5.2.2	Návrh regulátorov pre rozvetvený regulačný obvod.....	34
5.2.3	Návrh regulátorov so zjednodušeným prenosom vnútornej slučky	36
5.2.4	Porovnanie výsledkov regulácie.....	38
5.3	Obvod s pomocnou regulovanou veličinou v paralelnom zapojení	39
5.3.1	Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod	39
5.3.2	Návrh regulátorov pre rozvetvený regulačný obvod.....	39
5.3.3	Porovnanie výsledkov regulácie.....	42
5.4	Obvod s pomocnou akčnou veličinou	42
5.4.1	Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod	42
5.4.2	Návrh regulátorov pre rozvetvený regulačný obvod.....	43
5.4.3	Porovnanie výsledkov	45
5.5	Obvod s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny	46
5.5.1	Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod	46
5.5.2	Návrh kompenzátora pre rozvetvený regulačný obvod.....	47
5.5.3	Porovnanie výsledkov	49
6	Záver	51
7	Zoznam použitej literatúry	53
	Prílohy	55

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

$E(s)$	obraz regulačnej odchýlky
$e(t)$	regulačná odchýlka
$G_{DM}(s)$	prenos modelu dopravného oneskorenia
$G_M(s)$	prenos modelu sústavy
$G_R(s)$	prenos regulátora
$G_{RH}(s)$	prenos hlavného regulátora
$G_{RP}(s)$	prenos pomocného regulátora
$G_S(s)$	prenos sústavy
$G_V(s)$	prenos poruchy
$G_w(s)$	prenos riadenia
JRO	jednoduchý regulačný obvod
κ	relatívny prekmit
k_0	koeficient prenosu
r_0	zosilnenie
RRO	rozvetvený regulačný obvod
s	komplexná premenná
T_1, T_2	zotrvačná časová konštanta
T_d	derivačná časová konštanta
T_D	dopravné oneskorenie
T_i	integračná časová konštanta
t_r	doba regulácie
$U(s)$	obraz akčnej veličiny
$u(t)$	akčná veličina
$U_P(s)$	obraz pomocnej akčnej veličiny
$V(s)$	obraz poruchovej veličiny
$v(t)$	poruchová veličina
$W(s)$	obraz žiadanej veličiny
$w(t)$	žiadaná veličina
$Y(s)$	obraz regulovanej veličiny
$y(t)$	regulovaná veličina

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1: Schéma riadenia	19
Obr. 3.1: Jednoduchý regulačný obvod.....	21
Obr. 4.1: Schéma obvodu s pomocou regulovanou veličinou.....	25
Obr. 4.2: Schéma kaskádovej regulácie	26
Obr. 4.3: Schéma obvodu s pomocnou akčnou veličinou	28
Obr. 4.4: Schéma obvodu s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny	29
Obr. 4.5: Schéma obvodu s modelom regulovanej veličiny	30
Obr. 4.6: Schéma Smithovho prediktora	30
Obr. 4.7: Modifikovaný Smithov prediktor	31
Obr. 5.1: Model jednoduchého regulačného obvodu	33
Obr. 5.2: Model rozvetveného regulačného obvodu s pomocnou regulovanou veličinou.....	35
Obr. 5.3: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou.....	37
Obr. 5.4: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou.....	37
Obr. 5.5: Odozva JRO a RRO s rôznymi nastaveniami P pomocného regulátora.....	38
Obr. 5.6: Model rozvetveného regulačného obvodu s pomocnou regulovanou veličinou.....	40
Obr. 5.7: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou.....	41
Obr. 5.8: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou.....	41
Obr. 5.9: Model rozvetveného obvodu s pomocnou akčnou veličinou.....	43
Obr. 5.10: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s pomocnou akčnou veličinou	44
Obr. 5.11: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s pomocnou akčnou veličinou	44
Obr. 5.12: Odozva regulačného obvodu na rôzne nastavenia pomocného P regulátora	45
Obr. 5.13: Model rozvetveného obvodu s kompenzátorom	47
Obr. 5.14: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s kompenzátorom	48
Obr. 5.15: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s kompenzátorom	48

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1: Rovnice a prenosy regulátorov	22
Tab. 2: Prenosy regulovaných sústav	22
Tab. 3: Všeobecné prenosy regulovaných sústav.....	23
Tab. 4: Staviteľné parametre regulátorov pre metódu požadovaného modelu	24
Tab. 5: Závislosť koeficientu β na relatívnom prekmitu	24
Tab. 6: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu	34
Tab. 7: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu	36
Tab. 8: Staviteľné parametre PI regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu.....	36
Tab. 9: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s pomocnou regulovanou veličinou...	38
Tab. 10: Staviteľné parametre PD regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu	39
Tab. 11: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu	40
Tab. 12: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s pomocnou regulovanou veličinou.	42
Tab. 13: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu	42
Tab. 14: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s pomocnou akčnou veličinou	45
Tab. 15: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu	46
Tab. 16: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s kompenzátorom.....	49

1 ÚVOD

Regulácia patrí medzi nedielnu súčasť súčasnej priemyselnej doby. Ľudská práca je nahradzovaná robotmi, zariadenia a stroje sú čoraz sofistikovanejšie, výrobné procesy zase komplexnejšie. S týmto trendom rastie i zložitosť regulačných obvodov. Jednoduché regulačné obvody v mnohých prípadoch nedosahujú požadovanú presnosť, kvalitu a stabilitu. Ako jedno z riešení tohto problému sa začali využívať rozvetvené regulačné obvody.

Táto práca má 5 cieľov. Prvé dva sú teoretického charakteru. Ide o popis jednoduchého regulačného obvodu a možností jeho rozvetvenia. Ďalšie tri ciele sú praktického zamerania. Cieľom je navrhnúť regulátory pre jednoduchý i rozvetvený regulačný obvod tej istej regulovanej sústavy, odsimulovať modely týchto obvodov v programe Simulink a následne vyhodnotiť reguláciu oboch obvodov z hľadiska presnosti a kvality.

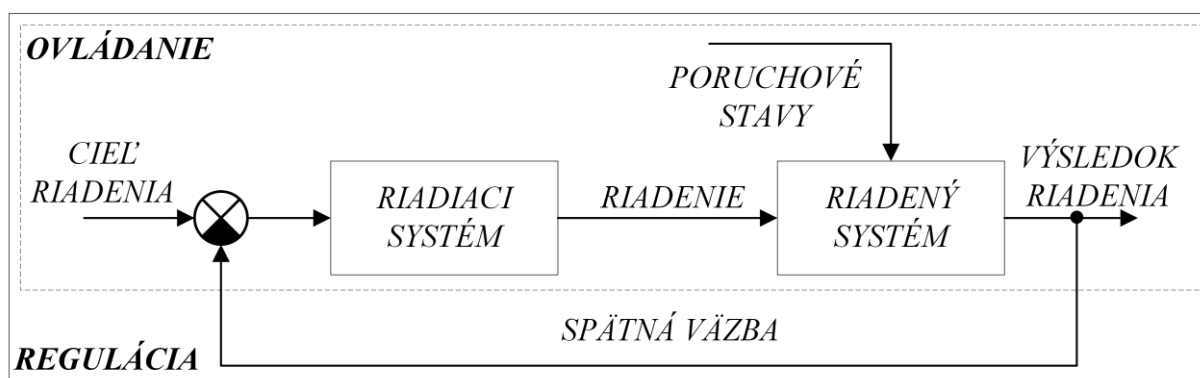
V úvodnej teoretickej časti práce bude popísané umiestnenie regulácie v rámci riadenia. Ďalej bude popísaný jednoduchý regulačný obvod, jeho základné prvky a vlastnosti. Ďalšia kapitola teoretickej časti bude popisovať rozvetvené regulačné obvody. Jednotlivé typy rozvetvenia budú obsahovať základný popis, schému zapojenia, vlastnosti a porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom.

Záverečná časť práce bude zameraná na praktické porovnanie jednoduchého a rozvetveného regulačného obvodu. V tejto kapitole budú riešené príklady pre rôzne spôsoby rozvetvenia. Súčasťou každého príkladu je návrh parametrov regulátora pre oba typy obvodov. Pre návrh parametrov regulátora bude zvolená vhodná metóda. Nedielnou súčasťou práce bude simulácia jednotlivých regulačných obvodov s navrhnutými parametrami regulátorov v programe Simulink. Na záver každého príkladu bude krátke zhrnutie nameraných odoziev a ich číselne vyhodnotenie. Samotný záver bude obsahovať vyhodnotenie jednotlivých riešených príkladov.

2 RIADENIE

„Riadenie je cielené pôsobenie na určitú vymedzenú časť reality – objekt tak, aby pochody a deje v ňom prebiehali podľa daných požiadaviek.“ [1]

Riadenie sa obecnne rozdeľuje na ovládanie a reguláciu. Ovládanie je taký spôsob riadenia, ktorý neobsahuje spätnú väzbu, teda riadiaci systém nemá informácie o aktuálnom stave riadeného systému. Z tohto dôvodu nedokáže adekvátne reagovať na prípadne zmeny v jeho vlastnostiach alebo na pôsobiace poruchové stavy. Táto vlastnosť sa negatívne odráža na vysokých nárokoch na modely ovládaných sústav, kvalite a presnosti riadenia. Pripojením spätnej väzby do systému sa ovládanie mení na reguláciu. Táto situácia je zachytená na obrázku 2.1. Takto zapojený riadiaci systém má potrebné informácie o aktuálnom stave systému a je schopný kompenzovať nedostatky spôsobené charakterom regulovanej sústavy alebo výskytom poruchy.

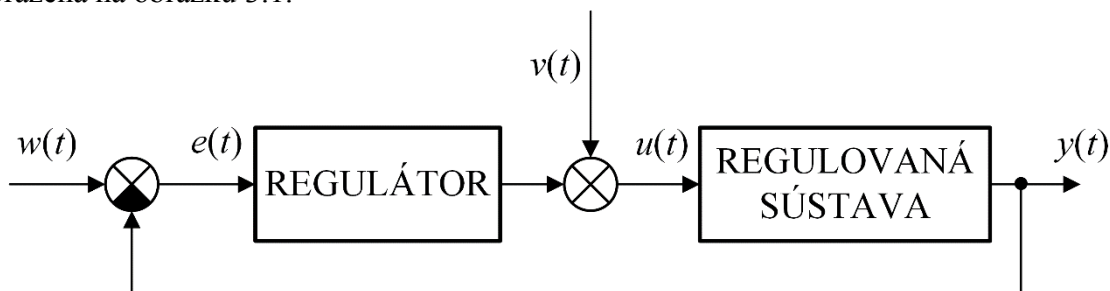


Obr. 2.1: Schéma riadenia

Regulačný obvod vzniká pripojením regulátora k regulovanej sústave. Zmena vlastností regulovanej sústavy býva obmedzená, častokrát nemožná. Avšak zmena na strane regulátora je možná a rôznymi spôsobmi zapojenia a nastavenia tohto bloku je možné docieľiť presnejšiu, stabilnejšiu a kvalitnejšiu reguláciu.

3 JEDNODUCHÝ REGULAČNÝ OBVOD

Jednoduchý regulačný obvod je základným typom regulačného obvodu. Jeho schéma je zobrazená na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Jednoduchý regulačný obvod

Vstupnými veličinami do obvodu sú žiadaná veličina $w(t)$ a poruchové veličiny $v(t)$. Výstupnou veličinou je regulovaná veličina $y(t)$. Pokiaľ má regulačný obvod plniť svoj účel je potrebné, aby regulovaná veličina $y(t)$ kopírovala žiadanú veličinu $w(t)$ bez ohľadu na pôsobiace poruchové veličiny $v(t)$. Žiadaná veličina pritom môže byť v podobe pevne danej veličiny, časovej funkcie alebo funkčnej závislosti na inej veličine.

3.1 Regulátor

Regulátor reprezentuje súbor prvkov v regulačnom obvode, ktoré sú pridané k regulovanej sústave. Vo všeobecnosti ide o súbor riadiaceho, meracieho, porovnávacieho, ústredného a akčného člena. [2] V ďalších kapitolách sa bude pod pojmom regulátor myslieť ústredný člen. „Podstata činnosti regulátora spočíva vo vyhodnocovaní regulačnej odchýlky $e(t) = w(t) - y(t)$ ako vstupného signálu, v spracovaní tejto odchýlky podľa zákonov riadenia, ktorý je vlastný použitému regulátoru a vo vytvorení výstupného signálu – akčnej veličiny $u(t)$ s cieľom takým, aby odchýlka $e(t)$ bola eliminovaná úplne alebo aby bola čo najmenšia.“ [3]

Rozdelenie

Regulátory je možné rozdeliť podľa viacerých kritérií. Z konštrukčného hľadiska je možné regulátory rozdeliť do kategórií podľa druhu energie s ktorou pracujú. Ide o regulátory mechanické, pneumatické, hydraulické a elektrické. Ďalším typickým kritériom delenia je spôsob napájania. V prípade, že regulátor využíva na svoj chod energiu z regulovanej sústavy, hovoríme o regulátore priamom. Ak je potrebné dodávať do regulátora energiu z externého zdroja, ide o regulátor nepriamy. V neposlednom rade sa regulátory delia podľa typu spracovávaného signálu. Rozoznávame spojité regulátory pre analógové signály a číslicové regulátory pre diskrétny signály. V ďalších kapitolách sa budeme venovať spojitým regulátorom.

Medzi analógové regulátory radíme regulátory P (proporcionálne), I (integračné), D (derivačné) a ich kombinácie PI, PD a PID. V tabuľke 1 [2] [3] [4] je uvedený prehľad rovníc akčných veličín a prenosov jednotlivých druhov regulátorov. Parametre r_0 , T_i a T_d sa nazývajú staviteľné parametre a slúžia k nastaveniu regulátora.

Tab. 1: Rovnice a prenosy regulátorov

Typ	Rovnica	Prenos $G_R(s)$
P	$u = r_0 e$	r_0
I	$u = r_{-1} \int e dt$	$\frac{1}{T_i s}$
D	$u = r_1 e'$	$T_d s$
PI	$u = r_0 e + r_{-1} \int e dt$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$
PD	$u = r_0 e + r_1 e'$	$r_0 (1 + T_d s)$
PID	$u = r_0 e + r_{-1} \int e dt + r_1 e'$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$

3.2 Regulovaná sústava

Regulovanú sústavu je možné vyjadriť vhodným matematicko-fyzikálnym modelom reálneho riadeného objektu, v ktorom vhodná zmena akčnej veličiny $u(t)$ mení výstupnú veličinu $y(t)$. Tieto sústavy je možné rozdeliť podľa spôsobu odozvy na jednotkový skok na proporcionálne, derivačné a integračné. V tabuľke 2 [2] [3] sú popísané základné prenosy týchto sústav.

Tab. 2: Prenosy regulovaných sústav

Rád zotrvačnosti	Prenos $G(s)$		
	Proporcionálne členy	Derivačné členy	Integračné členy
0. Ideálny	k_0	$k_0 s$	$\frac{k_0}{s}$
1. Reálny	$\frac{k_0}{T_1 s + 1}$	$\frac{k_0 s}{T_1 s + 1}$	$\frac{k_0}{s(T_1 s + 1)}$
2.	$\frac{k_0}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$\frac{k_0 s}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$\frac{k_0}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$

V tabuľke 3 [2] [3] sú popísané prenosy sústav n-tého rádu s dopravným oneskorením.

Tab. 3: Všeobecné prenosy regulovaných sústav

Typ sústavy	Prenos $G(s)$
Proporcionálna	$\frac{b_ms^m + \dots + b_1s + b_0}{a_ns^n + \dots + a_1s + a_0} e^{-sT_d}$
Integračná	$\frac{s^r(b_ms^m + \dots + b_1s + b_0)}{a_ns^n + \dots + a_1s + a_0} e^{-sT_d}$
Derivačná	$\frac{1}{s^q} \frac{b_ms^m + \dots + b_1s + b_0}{a_ns^n + \dots + a_1s + a_0} e^{-sT_d}$

V závislosti na druhu sústavy je potrebné vhodne voliť druh regulátora.

3.3 Prenosy regulačných obvodov

Podľa pravidiel blokovej algebry je možné zapísať dva dôležité prenosy regulovanej sústavy podľa obrázku 3.1. Prenos regulátora je popísaný členom $G_R(s)$ a prenos regulovanej sústavy členom $G_S(s)$.

- prenos riadenia (pri podmienke $v(t) = 0$) [4]

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \quad (3.1)$$

- prenos poruchy (pri podmienke $w(t) = 0$) [4]

$$G_V(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \quad (3.2)$$

Úlohou regulácie je doceliť stav keď bude platiť

$$G_w(s) \rightarrow 1 \quad (3.3)$$

a

$$G_V(s) \rightarrow 0 \quad (3.4)$$

„Prvá podmienka pre prenos riadenia (3.3) vyjadruje funkciu regulátora spočívajúcu v zaistovaní sledovania žiadanej veličiny $W(s)$ regulovanou veličinou $Y(s)$. Druhá podmienka pre prenos poruchy (3.4) vyjadruje funkciu regulátora spočívajúcu v potlačení vplyvu poruchovej veličiny $V(s)$ na činnosť regulačného obvodu.“ [4]

Pri určovaní stability regulačného obvodu je možné využiť viaceré kritéria. Mnohé z nich ako Hurwitzovo alebo Routh-Schurovo vychádzajú z definície charakteristickej rovnice, ktorá je pre jednoduchý regulačný obvod definovaná ako:

$$1 + G_R(s)G_S(s) = 0 \quad (3.5)$$

Úpravou tvaru charakteristickej rovnice je možné doceliť zlepšenia stability a kvality regulácie. [1] [2] [3] [4]

3.4 Návrh parametrov regulátora

Pre návrh parametrov regulátora existuje viacero metód akými sú metóda požadovaného modelu, metóda násobného pólu, Ziegler-Nicholsonova metóda a iné. [2] Pre návrh parametrov regulátora bola zvolená analytická metóda požadovaného modelu. Staviteľné parametre k príslušným normovaným typom regulátora sú vypísané v tabuľke 4. [1]

Tab. 4: Staviteľné parametre regulátorov pre metódu požadovaného modelu

Prenos regulovanej sústavy $G(s)$	Regulátor				
	Typ	r_0		T_i	T_d
		$T_D = 0$	$T_D > 0$		
$\frac{k}{s} e^{-T_D s}$	P	$\frac{2}{2kT_w}$	$\frac{a}{k}$	-	-
$\frac{k}{T_1 s + 1} e^{-T_D s}$	PI	$\frac{2T_i}{2kT_w}$	$\frac{aT_i}{k}$	T_1	-
$\frac{k}{s(T_1 s + 1)} e^{-T_D s}$	PD	$\frac{2}{2kT_w}$	$\frac{a}{k}$	-	T_1
$\frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_D s}$ $T_1 > T_2$	PID	$\frac{2T_i}{2kT_w}$	$\frac{aT_i}{k}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$

Koeficient a reprezentuje zosilnenie otvoreného regulačného obvodu. Jeho hodnotu pre spojitý regulátor je možné určiť podľa vzťahu (3.6) [1]:

$$a = \frac{1}{\beta T_D} \quad (3.6)$$

kde koeficient β je možné určiť z tabuľky 5 [1] podľa veľkosti relatívneho prekmitu.

Tab. 5: Závislosť koeficientu β na relatívnom prekmite

κ	0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25
β	2,718	1,944	1,720	1,561	1,437	1,337

3.5 Iné nerozvetvené regulačné obvody

Okrem jednoduchých a rozvetvených regulačných obvodov existuje množstvo iných často využívaných regulačných obvodov. Za zmienku stojí servomechanizmus, ktorý spája blok regulátora a regulovanej sústavy do jedného samostatného bloku. Inou variantou je extrémny regulačný obvod. „Cieľom extrémnej regulácie je vyhľadať na statickej charakteristike extrémnej sústavy extrém požadovaného druhu a regulovanú veličinu $y(t)$ na ňom udržať, i keď tento extrém pri pôsobení porúch neustále mení svoju polohu.“ [4] Medzi ďalšie typy patria viacrozmerné regulačné obvody, kde jedna regulovaná sústava má viaceré regulované veličiny $y(t)$ a k nim zodpovedajúce požadované hodnoty $w(t)$. Pre každú dvojicu $y(t) - w(t)$ existuje potom samostatný regulátor. [4]

4 ROZVETVENÉ REGULAČNÉ OBVODY

V rámci regulácie sú pre veľa úloh postačujúce zapojenia kopírujúce princíp jednoduchého regulačného obvodu. S narastajúcou zložitou regulovanej sústavy, výskytom dopravného oneskorenia a zvyšujúcim sa počtom vstupných poruchových veličín klesá kvalita a stabilita regulácie. Tento negatívny trend je možné riešiť rozvetvením obvodu, teda rozšírením regulačného obvodu o viaceré funkčné bloky, ktoré sú navzájom prepojené väzbami.

Podľa druhu doplnených blokov a väzieb následne rozlišujeme tieto základné typy rozvetvených regulačných obvodov:

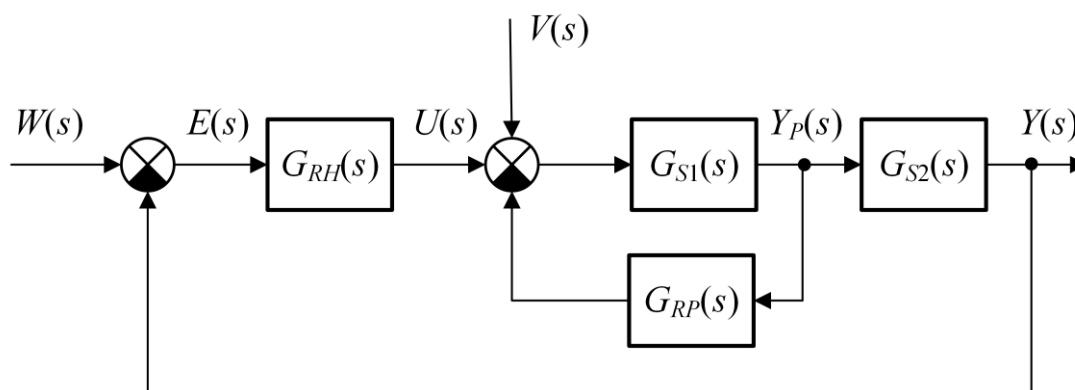
- Obvody s pomocnou regulovanou veličinou
- Obvody s pomocnou akčnou veličinou
- Obvody s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny
- Obvody s modelom regulovanej veličiny

4.1 Obvody s pomocnou regulovanou veličinou

Pri regulácii fyzikálnych veličín, ktoré sú závislé na viacerých vstupných veličinách sa regulácia komplikuje s výskytom nemerateľných poruchových stavov. Typickým predstaviteľom tejto kategórie je prenos tepelnej energie pomocou médií akými sú voda či para. Regulátor pomocou akčných zásahov reguluje otvorenie ventila, ktorý ovláda množstvo prepúšťaného média. Regulovaná sústava je nastavená na konštantný prietok zodpovedajúci aktuálnemu pootvoreniu ventila. Táto situácia však neberie ohľad na výskyt poruchových veličín ako je zmena teploty alebo tlaku média. Regulátor začne reagovať, až keď sa negatívny vplyv porúch prejaví na regulovanej veličine. Táto zmena môže nastať až za markantný čas a následný akčný zásah môže presahovať reálne uskutočniteľné zmeny. Zmienená situácia sa dá riešiť zavedením pomocnej regulovanej veličiny.

V jednoduchom regulačnom obvode zavedieme merateľnú pomocnú regulovanú veličinu y_p . Táto veličina musí adekvátne reagovať na poruchové veličiny, musí byť podriadená hlavnej regulovanej veličine a jej dynamické správanie musí byť rýchlejšie ako pri veličine primárnej. [2] [3] Spolu s touto veličinou sa do systému zavádza ďalší, pomocný regulátor s prenosom $G_{RP}(s)$. Táto dvojica následne vytvára pomocný obvod vnorený do hlavnej regulačnej slučky. Schéma obvodu je zobrazená na obrázku 4.1. [2] Pôvodná regulovaná sústava s prenosom $G_S(s)$ sa rozdelí na dve sústavy s prenosmi $G_{S1}(s)$ a $G_{S2}(s)$, pričom platí:

$$G_S(s) = G_{S1}(s)G_{S2}(s) \quad (4.1)$$



Obr. 4.1: Schéma obvodu s pomocou regulovanou veličinou

4.1.1 Matematický popis

Pomocou pravidiel blokovej algebry je možné vyjadriť prenos riadenia (4.2) a prenos poruchy (4.3) [2]:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{RH}(s) \frac{G_{S1}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s) \frac{G_{S1}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)} \quad (4.2)$$

$$= \frac{G_{RH}(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{RH}(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)}$$

$$G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{\frac{G_{S1}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)}{1 + \frac{G_{S1}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)G_{RH}(s)} \quad (4.3)$$

$$= \frac{G_{S1}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{RH}(s)}$$

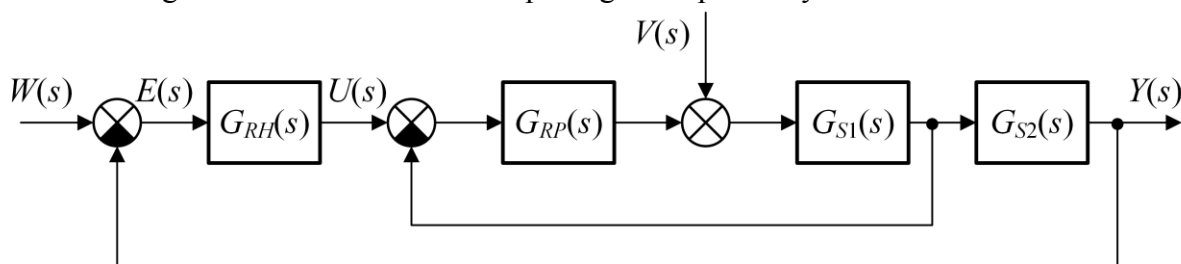
Charakteristická rovnica tohto obvodu je následne:

$$1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{RH}(s) = 0 \quad (4.4)$$

Pokiaľ porovnáme charakteristickú rovnicu (4.4) s charakteristickou rovnicou jednoduchého regulačného obvodu (3.5) vidíme, že sa líšia iba členom $G_{S1}(s)G_{RP}(s)$. Vhodným nastavením prenosu pomocného regulátora $G_{RP}(s)$ teda dosahujeme zlepšenie kvality a stability regulačného obvodu. [1] [2] [3]

4.1.2 Kaskádová regulácia

Zapojením pomocného regulátora do série s hlavným vzniká regulačný obvod s pomocnou regulovanou veličinou nazývaný tiež kaskádová regulácia. Schéma tohto zapojenia je na obrázku 4.2. [5] Na rozdiel od predchádzajúceho paralelného zapojenia, kde sa akčné veličiny oboch regulátorov sčítavali, v kaskádovej regulácii je akčná veličina ako výstup z hlavného regulátora žiadanou veličinou pre regulátor pomocný.



Obr. 4.2: Schéma kaskádovej regulácie

Podobne ako v predchádzajúcom prípade je možné odvodiť prenos riadenia [5]:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{RH}(s) \frac{G_{S1}(s)G_{RP}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s) \frac{G_{S1}(s)G_{RP}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)} \quad (4.5)$$

$$= \frac{G_{RH}(s)G_{RP}(s)G_S(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{RH}(s)G_{RP}(s)G_S(s)}$$

A prenos poruchy [5]:

$$G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{\left[1 - \frac{G_{RP}(s)G_{S1}(s)}{1 + G_{RP}(s)G_{S1}(s)}\right] G_{S1}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s)G_{S2}(s) \frac{G_{RP}(s)G_{S1}(s)}{1 + G_{RP}(s)G_{S1}(s)}} \quad (4.6)$$

$$= \frac{G_{S1}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{RH}(s)}$$

4.1.3 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom

Zavedením pomocnej regulovanej veličiny do obvodu sa potlačuje vplyv poruchových stavov na hlavnú regulovanú veličinu pomocou akčných zásahov pomocného regulovaného obvodu. Taktiež sa znižuje citlivosť hlavného regulovaného obvodu na nepriaznivé dynamické správanie (napr. nelineárnosť) procesu regulovaného pomocným regulátorom. [5] V skratke povedané, zvýši sa stabilita a rýchlosť odozvy regulačného obvodu.

Z charakteru princípu tohto rozvetveného obvodu vyplýva, že poruchová veličina nemusí byť merateľná. Na rozdiel od toho, pomocná regulovaná veličina, na ktorej sa prejavujú účinky poruchovej veličiny, musí byť merateľná. Z nutnosti merať a regulovať ďalšiu veličinu sa obvod musí rozšíriť o dodatočný hardvér, čo má za následok zvýšenie nákladov pri realizácii tohto zapojenia. Rozdelenie regulovanej sústavy na dve (v niektorých prípadoch i viaceré) menšie sústavy komplikuje nastavenie regulátorov. I keď samotné rozdelenie môže zjednodušiť jednotlivé sústavy, ich vzájomná interakcia (i správne nastavených regulátorov) môže spôsobovať nestabilitu celého systému. Podľa [6] sa napríklad nedoporučuje použitie základných nastavovacích metód ako nemodifikovaný Ziegler-Nichols alebo Cohen-Coon, pretože môžu spôsobovať nestabilitu pre obvody, ktorých hlavné a pomocné obvody majú podobnú dynamiku.

Tento spôsob regulácie sa hojne využíva v regulácii prenosu tepelnej energie (pomocná regulovaná veličina je teplota alebo tlak), regulácii otáčok elektrických motorov (vytvárajú sa prúdové a momentové slučky), riadenie chemických reakcií a iné. [1] [2] [5]

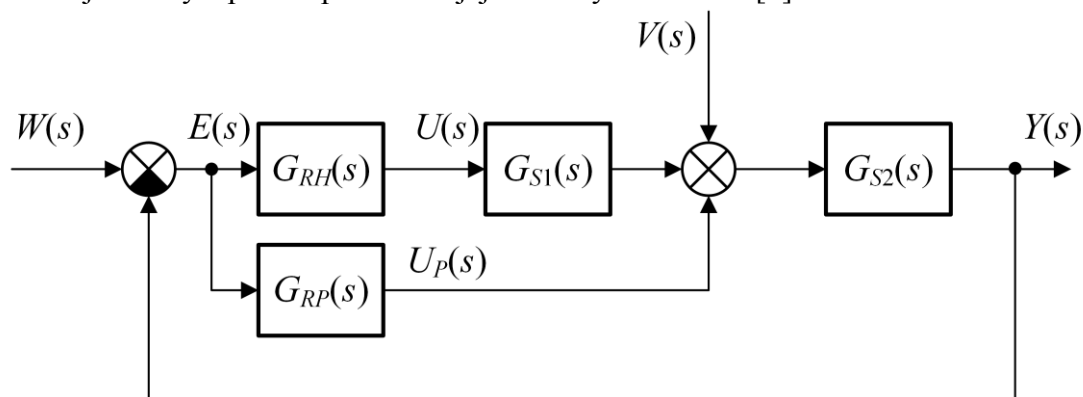
Celý princíp regulácie s pomocnou regulovanou veličinou je možné kombinovať s ďalšími typmi rozvetvených obvodov popísaných v nasledujúcich kapitolách.

Väčšina dnešnej literatúry [1] [2] [3] [4] sa zhoduje na fakte, že jednou z podmienok kaskádovej regulácie je fakt, že sekundárna regulovaná veličina musí mať rýchlejšie dynamické správanie ako veličina primárna. Podľa [5] je možné vhodnými modifikovanými metódami funkčne nastaviť sekundárny regulátor i za predpokladu, že sekundárna veličina je rovnako rýchla, prípadne pomalšia ako veličina primárna.

4.2 Obvody s pomocnou akčnou veličinou

Pri riadení procesov, ktorých regulovanú sústavu je možné rozdeliť na dve časti s rôznou dynamikou, je možné využiť rozvetveného obvodu s pomocnou akčnou veličinou. Regulovaná sústava $G_S(s)$ sa rozdelí na dve zložky, sústavu s pomalšou dynamikou $G_{S1}(s)$ a sústavu s rýchlejšou dynamikou $G_{S2}(s)$. Do obvodu sa zavedie druhý, pomocný regulátor $G_{RP}(s)$. Schéma obvodu je na obrázku 4.3. [2]

„Idea tohto rozvetvenia spočíva v tom, že pomocný regulátor obíde prvú pomalú časť regulovanej sústavy a pôsobí priamo na jej druhú rýchlu časť.“ [1]



Obr. 4.3: Schéma obvodu s pomocnou akčnou veličinou

4.2.1 Matematický popis

Podľa pravidiel blokovej algebry je opäť možné popísať prenos riadenia [2]:

$$\begin{aligned} G_w(s) &= \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{[G_{RH}(s)G_{S1}(s) + G_{RP}(s)]G_{S2}(s)}{1 + [G_{RH}(s)G_{S1}(s) + G_{RP}(s)]G_{S2}(s)} \\ &= \frac{G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

A prenos poruchy [2]:

$$\begin{aligned} G_v(s) &= \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_{S2}(s)}{1 + G_{S2}(s)[G_{RH}(s)G_{S1}(s) + G_{RP}(s)]} \\ &= \frac{G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Charakteristická rovnica obvodu takto rozvetveného obvodu potom bude:

$$1 + G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s) = 0 \quad (4.9)$$

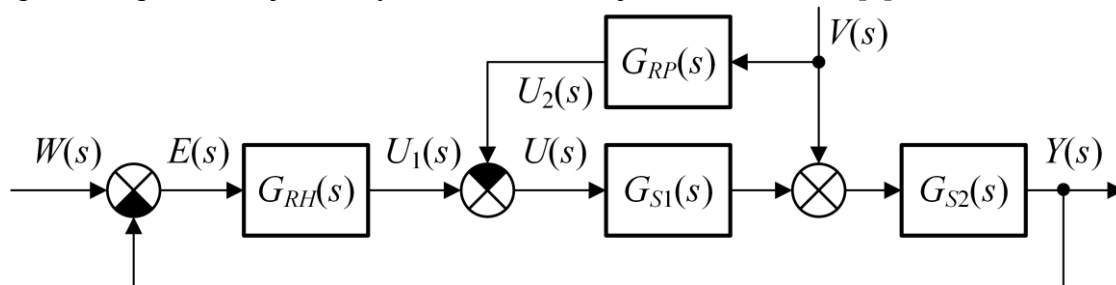
Podobne ako pri obvodoch s pomocnou regulovanou veličinou, je možné vhodným nastavením regulátora $G_{RP}(s)$ doceliť zlepšenie kvality a stability regulačného obvodu.

4.2.2 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom

Táto metóda rozvetvenia zlepšuje dynamické správanie obvodu podobne ako pri použití obvodu s pomocnou regulovanou veličinou. Zavedenie pomocnej akčnej veličiny však na rozdiel od predchádzajúcej metódy vyžaduje druhú akčnú veličinu, ktorej realizácia nie je už tak jednoduchá. Takáto úprava vyžaduje mnohokrát fyzický zásah do sústavy.

4.3 Obvody s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny

Pre systémy, v ktorých je možné merať poruchové veličiny je možné postupovať inou stratégiou. Obvod sa doplní o pomocný regulátor $G_{RP}(s)$, ktorý v tomto prípade pôsobí ako kompenzátor poruchovej veličiny. Schéma obvodu je na obrázku 4.4. [2]



Obr. 4.4: Schéma obvodu s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny

4.3.1 Matematický popis

Podľa pravidiel blokovej algebry je možné určiť prenos riadenia [2]:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{RH}(s)G_S(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s)} \quad (4.10)$$

A prenos poruchy [2]:

$$G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_{S2} - G_{RP}(s)G_S(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s)} \quad (4.11)$$

Vhodným nastavením kompenzátora $G_{RP}(s)$ je možné doceliť nulový prenos poruchy $G_v(s) = 0$. Potom sa zmeny poruchovej veličiny neprejavia zmenou regulovanej veličiny. Takýto regulačný obvod sa označuje ako invariantný vzhľadom k poruchovej veličine. [1] [2]

Z podmienky nulového prenosu poruchy $G_v(s) = 0$ je možné určiť prenos kompenzátora:

$$G_{RP}(s) = \frac{1}{G_{S1}} \quad (4.12)$$

Takýto prenos je v mnohých prípadoch fyzikálne nerealizovateľný. „Väčšinou sa realizuje čiastočná invariantnosť rozvetveného regulačného obvodu s meranou poruchovou veličinou, a to dynamická alebo iba v ustálenom stave.“ [1]

4.3.2 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom

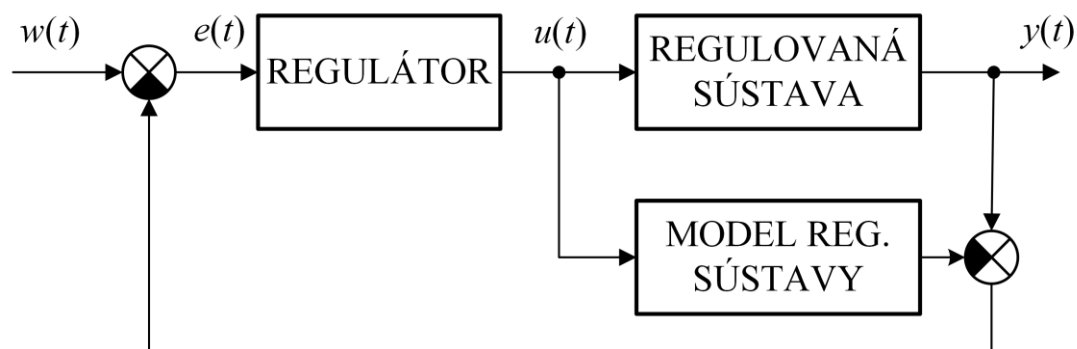
Regulačný obvod bez doprednej kompenzácie poruchovej veličiny je nútený odstraňovať vplyv poruchových veličín v plnom rozsahu. Zavedením kompenzátora do obvodu sa poruchové veličiny eliminujú čiastočne už pred vstupom do obvodu a regulátor následne nemusí robiť také veľké akčné zásahy ako v prípade jednoduchého regulačného obvodu.

Zavedenie kompenzátora do obvodu predstavuje zvýšenie nákladov za hardvér a dodatočnú prácu pri nastavovaní a ladení oproti jednoduchému regulačnému obvodu. Väčšina kompenzátorov sa zavádza do obvodov, ktoré sú vysoko citlivé na poruchové veličiny a majú pomalý akčný zásah voči nim. Medzi takéto obvody patria bojler, kompresory, závody na likvidáciu odpadov, viacúčelové odparovače a iné ťažko ovládateľné procesy. [7]

4.4 Obvody s modelom regulovanej veličiny

Predchádzajúce kapitoly upravovali vlastnosti a dynamiku regulovaných systémov ich rozdelením a pôsobením samostatne na jednotlivé časti. Na prelome 80-tich rokov minulého storočia sa spolu s rozvojom počítačov začal i rozvoj odlišného prístupu k týmto systémom. Spoločnosť Shell Oil vyvinula novú prelomovú metódu pre reguláciu systémov v rafinériách a petrochemickom priemysle. Odvtedy sa stala jednou z najefektívnejších metód regulácie vo veľkom počte priemyselných odvetví. [7]

Jej princíp spočíval v zavedení vetvy s matematickým modelom regulovanej sústavy. Schéma tohto zapojenia je na obr. 4.5 [7]



Obr. 4.5: Schéma obvodu s modelom regulovanej veličiny

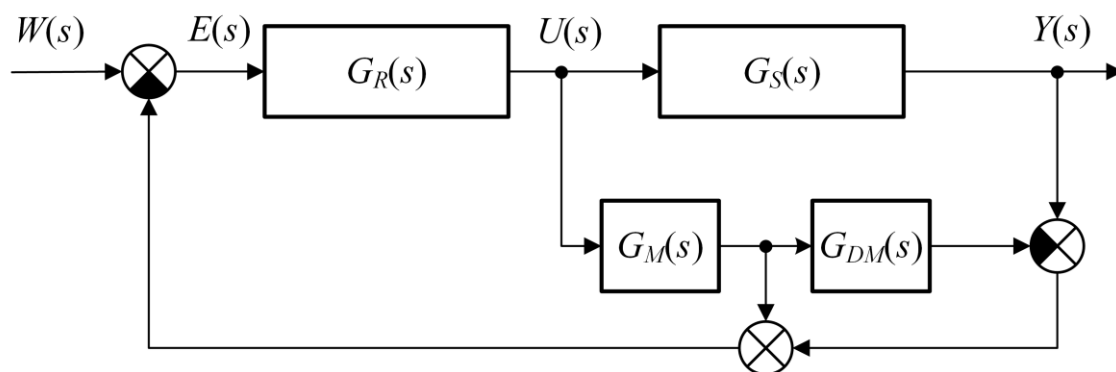
Vytvorenie modelu je v mnohých prípadoch komplikovaný proces. Na jeho realizáciu je potrebný dodatočný softvér a vysoko kvalifikovaní odborníci. Avšak s hlbším pochopením vnútorných procesov v regulovanom obvode je možné zabezpečiť vyššiu kvalitu regulácie.

Nedielnou výhodou tohto spôsobu regulácie je možnosť predvídať kritické stavy procesov a predčasne im zabrániť. Tohto efektu sa využíva hlavne pri regulácii nebezpečných procesoch akými sú procesy chemické či jadrové. [5]

4.5 Smithov prediktor

Jednou z najpoužívanějších prediktívnych metód pre reguláciu systémov s dominantným časovým oneskorením je využitie Smithova prediktora. Pôvodná myšlienka vznikla už v roku 1957, ale jej implementácia vzhľadom k vysokým nárokom na hardvér sa vo veľkom začala až v posledných rokoch. [8]

Základná schéma je zobrazená na obrázku 4.6 [8]. Do sústavy sa zavedie prídavná vetva s modelom regulovanej sústavy a modelom dopravného oneskorenia



Obr. 4.6: Schéma Smithovho prediktora

4.5.1 Matematický popis

Pri podmienke, že dopravné oneskorenie sústavy je zhodné s dopravným oneskorením modelu je možné určiť prenos riadenia [2]:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{RH}(s)G_S(s)e^{-T_D s}}{1 + G_{RH}(s)G_M(s) + G_{RH}(s)e^{-T_D s}[G_S(s) - G_M(s)]} \quad (4.13)$$

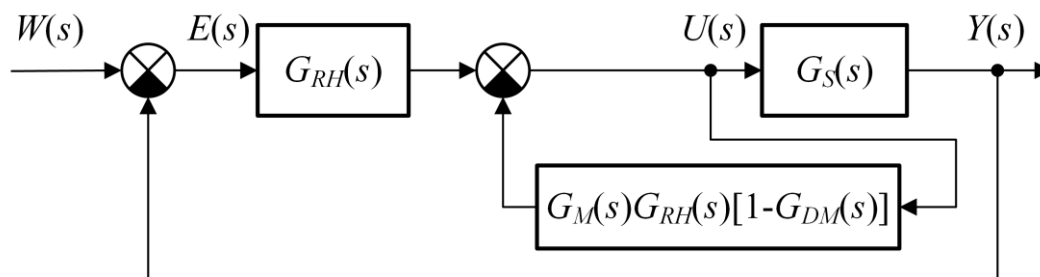
Z rovnice prenosu riadenia (4.13) je vidieť, že pokiaľ bude prenos modelovej sústavy zhodný s prenosom regulovanej sústavy, člen $G_{RH}(s)e^{-T_D s}[G_S(s) - G_M(s)]$ zo sústavy vypadne. Charakteristická rovnica uzavretého obvodu za tejto podmienky bude:

$$1 + G_{RH}(s)G_M(s) = 0 \quad (4.14)$$

a nadobúda tvar zhodný s charakteristickou rovnicou jednoduchého regulačného obvodu (3.5).

4.5.2 Modifikácie Smithovho prediktora

„Pretože Smithovov prediktor v najjednoduchšej podobe obsahuje päť parametrov, je jeho nastavenie metódou pokus-omyl zložitá, a v dôsledku toho nie je v praxi používaný.“ [9] Ďalšou veľkou nevýhodou je neuniverzálnosť. Matematický model je potrebné pre každú aplikáciu práce vypracovať odznova. Preto časom vzniklo niekoľko modifikácií tohto zapojenia. Medzi známe modifikácie patrí napr. PI regulátor s prediktívnou zložkou, ktorého použitie je univerzálne a pracuje len s tromi nastavitelnými parametrami. [9] [10] Ďalšou modifikáciou je úprava podľa Majhiho a Athertona. [11] Ich modifikácia spočíva v rozšírení obvodu o ďalšie dva regulátory. Toto zapojenie slúži najmä na riadenie nestabilných procesov s dopravným oneskorením. Ďalším známym zapojením je modifikovaný Smithov prediktor. Jeho schéma je zobrazená na obr. 4.7 [1]



Obr. 4.7: Modifikovaný Smithov prediktor

Modifikovaný Smithov prediktor sa skladá z konvenčného regulátora a nekonvenčnej časti s dvoma ďalšími staviteľnými parametrami. Zároveň je ho možné oproti štandardnému Smithovmu prediktoru možné realizovať ako univerzálny regulátor. [1] Jednoduchosť nastavenia a univerzálnosť je na druhej strane vyvážená nižšou kvalitou a presnosťou regulácie ako pri pôvodnom Smithovom prediktore.

4.5.3 Porovnanie s jednoduchým regulačným obvodom

Kvalita regulácie pomocou Smithovho prediktora úzko súvisí s kvalitou matematického modelu regulovanej sústavy. Vytvorenie tohto modelu býva v mnohých prípadoch však veľmi zložitá. Táto problematika je rovnaká ako pri obvodoch s modelom regulovanej sústavy.

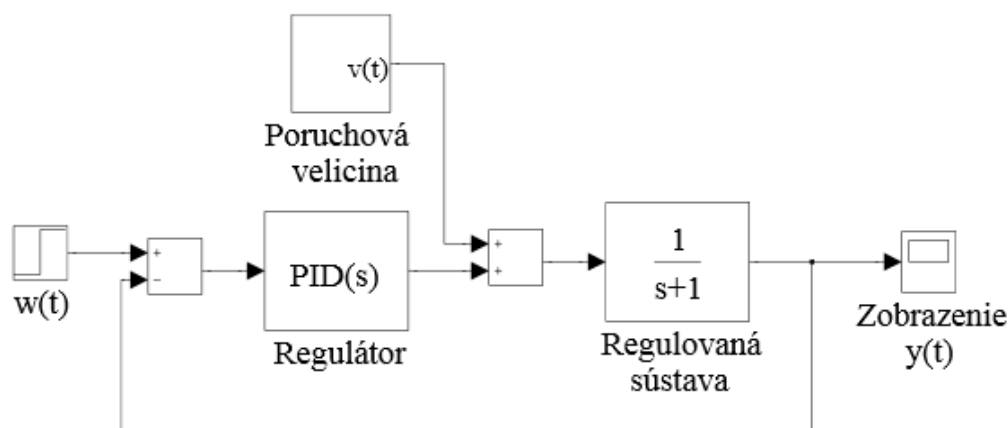
5 POROVNANIE RIEŠENÝCH REGULOVANÝCH SÚSTAV

V predchádzajúcich kapitolách boli jednotlivé možnosti rozvetvenia popísané z teoretickej stránky. Pre ich praktické overenie bude použitý program Simulink, ktorý je nadstavbou pre Matlab. Slúži pre modelovanie a simulácie dynamických sústav pomocou blokových schém. Pre porovnanie jednotlivých typov rozvetvených obvodov s jednoduchým regulačným obvodom je potrebné:

- Namodelovať jednoduchý i rozvetvený regulačný obvod
- Navrhnuť vhodné parametre regulátorov pre jednotlivé regulačné obvody
- Previesť simuláciu odozvy na skokovú zmenu žiadanej veličiny a pôsobenie poruchovej veličiny
- Vyhodnotiť kvalitu a presnosť regulácie

5.1 Jednoduchý regulačný obvod

Pre vyhodnotenie prínosov rozvetvenia regulačných obvodov je potrebné najprv definovať jednoduchý regulačný obvod. Podľa schémy z obrázku 3.1 je možné namodelovať jednoduchý model v programe Simulink. Táto schéma je zobrazená na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Model jednoduchého regulačného obvodu

Zmena požadovanej veličiny je reprezentovaná skokovou zmenou v čase $t = 0s$. Výskyt poruchovej veličiny je modelovaný pravouhlým impulzom s amplitúdou 1 a dĺžkou 1s v čase $t = 50s$.

5.2 Obvod s pomocnou regulovanou veličinou v sériovom zapojení

Zadanie

Navrhnete regulátory pre jednoduchý regulačný obvod a rozvetvený regulačný obvod s pomocnou regulovanou veličinou pre regulovanú sústavu s prenosom:

$$G_S(s) = \frac{2}{(3s + 1)(0.8s + 1)} e^{-2s} \quad (5.1)$$

5.2.1 Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod

Pre sústavu (5.1) s parametrami $k = 2$, $T_1 = 3$, $T_2 = 0.8$, $T_D = 2$ je možné podľa tabuľky 4 získať nasledovné staviteľné parametre:

$$r_0 = \frac{aT_i}{k} = \frac{\frac{1}{\beta \cdot T_D} \cdot T_i}{k} = \frac{1}{2,718 * 2} * 3,8 = 0,35 [-] \quad (5.2)$$

$$T_i = T_1 + T_2 = 3 + 0,8 = 3,8 [s] \quad (5.3)$$

$$T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} = \frac{3 \cdot 0,8}{3 + 0,8} = 0,63 [s] \quad (5.4)$$

Pre $\kappa = 0$ je hodnota $\beta = 2,718$. Pre $\kappa = 0,2$ je hodnota $\beta = 1,437$.

Parametre regulátorov v ďalších kapitolách budú vyčíslené podľa predchádzajúceho príkladu za použitia tabuľky 4.

Parametre PID regulátora pre sústavu (5.1) sú zobrazené v tabuľke 6.

Tab. 6: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu

Parameter	$\kappa = 0$	$\kappa = 0,2$
r_0	0,35	0.66
T_i	3.8	22
T_d	0.63	0.63

5.2.2 Návrh regulátorov pre rozvetvený regulačný obvod

Nastavenie parametrov regulátorov pre obvody s pomocnou regulovanou veličinou je možné vykonať viacerými spôsobmi. Postupy popísané v [1] [5] [6] sa líšia len minimálne a je možné ich zhrnúť nasledovne:

- Nastavenie vnútornej regulačnej slučky: Typ regulátora sa volí čo najjednoduchší, v mnohých prípadoch ide len o P regulátor [1], príp. PI. [12] Nie sú však výnimočné prípady, keď sa uvažuje i s komplexným PID regulátorom. [13]
- Nastavenie vonkajšej regulačnej slučky: Typ regulátora pre vonkajšiu slučku sa volí rovnaký alebo zložitejší ako pre vnútornú slučku, zväčša PI alebo PID. Pri jeho nastavení sa vnútorná slučka nahradí jediným členom s totožným alebo zjednodušeným

prenosom. V určitých prípadoch je možné tento člen vynechať (prenos člena je rovný jednej). [1]

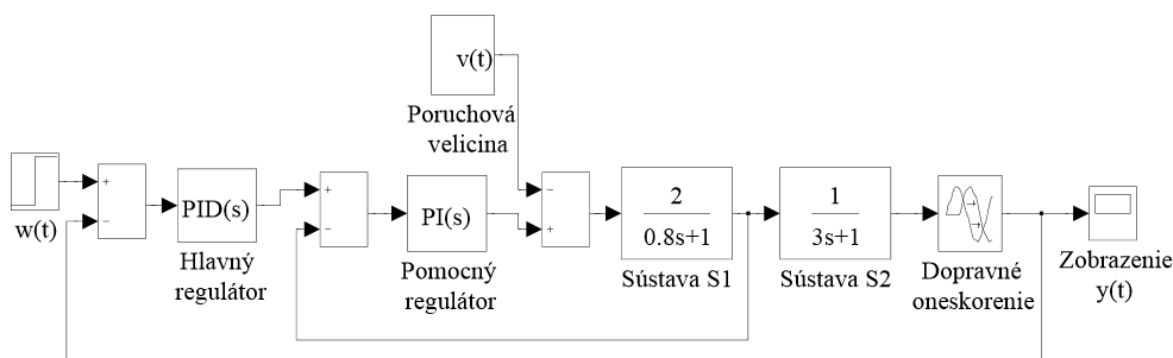
Pre návrh kaskádovej regulácie je potrebné obvod rozdeliť vo vhodnom mieste pri dodržaní podmienky (4.1). V tomto prípade je možné vytvoriť dve regulované sústavy s prenosmi:

$$G_{S1}(s) = \frac{2}{(0.8s + 1)} \quad (5.5)$$

$$G_{S2}(s) = \frac{1}{(3s + 1)} e^{-2s} \quad (5.6)$$

Z prenosov sústav je vidieť, že sústava $G_{S1}(s)$ je niekoľko násobne rýchlejšia ako sústava $G_{S2}(s)$. Toto vyhovuje jednej zo základných podmienok pre použitie kaskádovej regulácie. Sústava $G_{S1}(s)$ bude použitá pre vytvorenie vnútornej slučky, zatiaľ čo sústava $G_{S2}(s)$ bude súčasťou slučky vonkajšej.

Podľa predchádzajúcej úvahy a schémy kaskádovej regulácie podľa obrázku 4.2 je možné vytvoriť simulačný model v Simulinku. Ten je zobrazený na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Model rozvetveného regulačného obvodu s pomocnou regulovanou veličinou

Návrh regulátora pre vnútornú slučku

Parametre regulátora pre sústavu (5.5) sú $r_0 = 0,5 [-]$ a $T_i = 0,8 [s]$. Dosadením týchto parametrov do rovnice prenosu PI regulátora podľa tabuľky 2 dostávame prenos pomocného regulátora:

$$G_{RP}(s) = r_0 * \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{0.8s}\right) = \frac{(0.8s + 1)}{1.6s} \quad (5.7)$$

Návrh regulátora pre vonkajšiu slučku

Pri návrhu regulátora pre vonkajšiu slučku je potrebné nahradiť celú vnútornú slučku členom s odpovedajúcim prenosom (5.7). Člen bude mať tvar:

$$G_{S1}^*(s) = \frac{G_{RP}(s)G_{S1}(s)}{1 + G_{RP}(s)G_{S1}(s)} = \frac{\frac{(0.8s + 1)}{1.6s} \frac{2}{(0.8s + 1)}}{1 + \frac{(0.8s + 1)}{1.6s} \frac{2}{(0.8s + 1)}} = \dots = \frac{1}{(0.8s + 1)} \quad (5.8)$$

Nahradením vnútornej regulačnej slučky jej prenosom $G_{s1}^*(s)$ vzniká nová sústava $G_s^*(s)$.

$$G_s^*(s) = \frac{1}{(2s + 1)} \frac{1}{(3s + 1)} e^{-4s} \quad (5.9)$$

Parametre PID regulátora pre sústavu $G_s^*(s)$ sú zobrazené v tabuľke 7.

Tab. 7: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu

Parameter	$\kappa = 0$	$\kappa = 0,2$
r_0	0,7	1,32
T_i	3,8	3,8
T_d	0,63	0,63

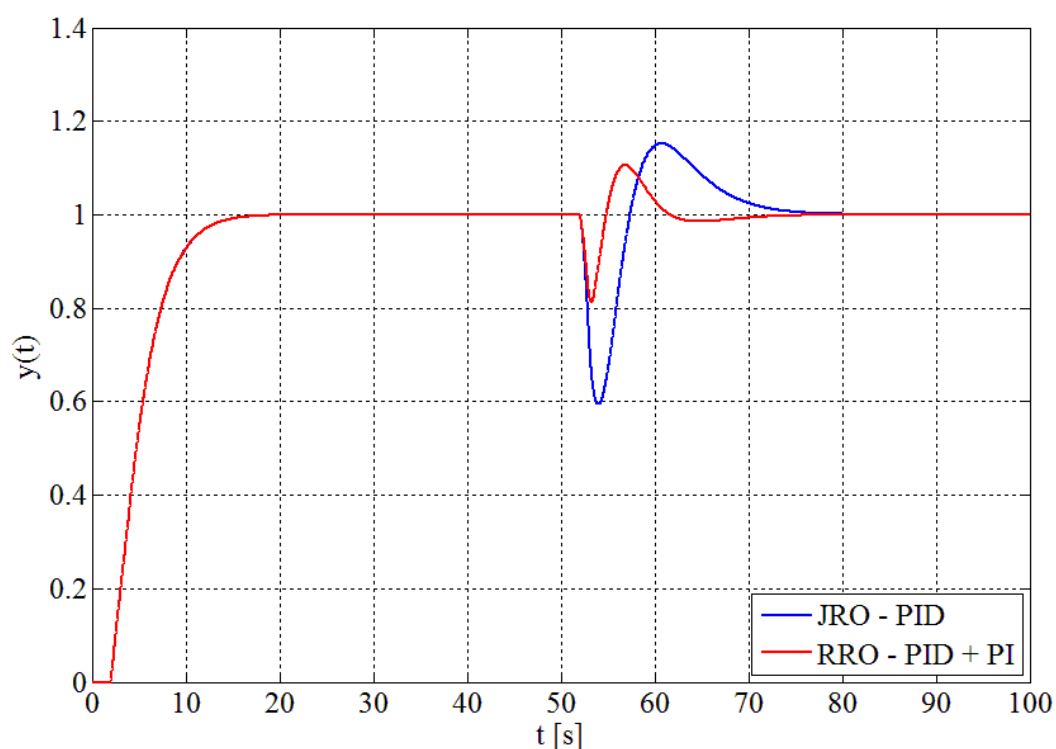
5.2.3 Návrh regulátorov so zjednodušeným prenosom vnútornej slučky

Pokiaľ použijeme P regulátor vo vnútornej slučke s dostatočne veľkým zosilnením, môžeme nahradiť prenos vnútornej slučky (5.7) prenosom jednotkovým, teda $G_{s1}^*(s) = 1$. Hlavný regulátor bude potrebné nastaviť len pre sústavu (5.6). V tomto prípade bude hlavný regulátor typu PI a jeho parametre pre sú sú vypísané v tabuľke 8.

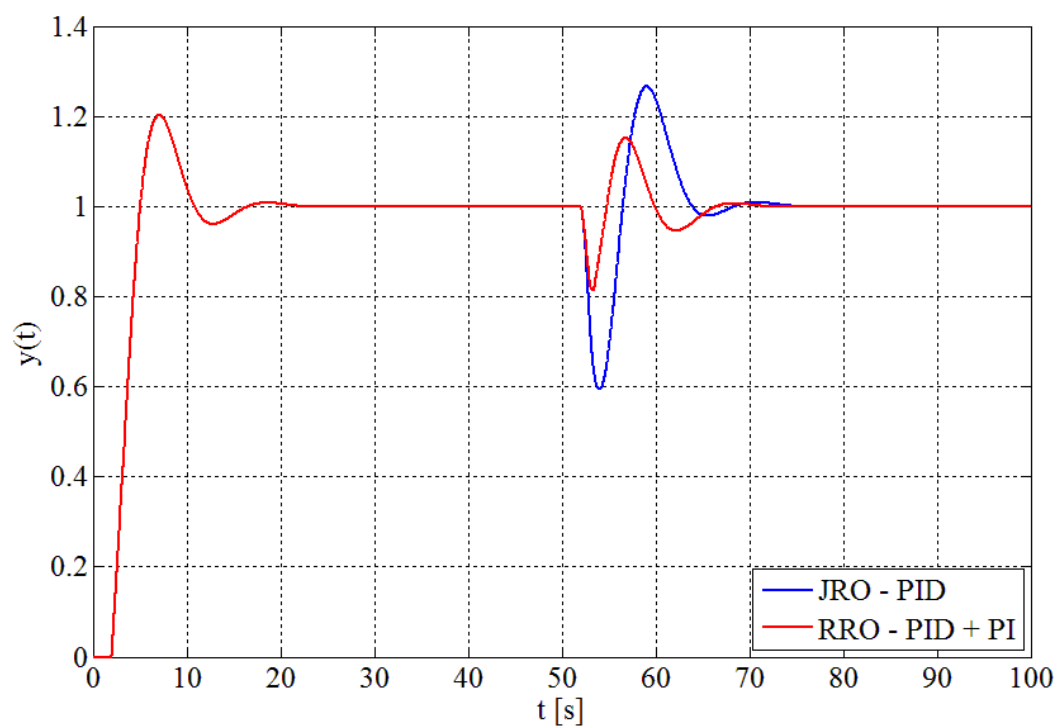
Tab. 8: Staviteľné parametre PI regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu

Parameter	$\kappa = 0$	$\kappa = 0,2$
r_0	0,92	1,74
T_i	20	20

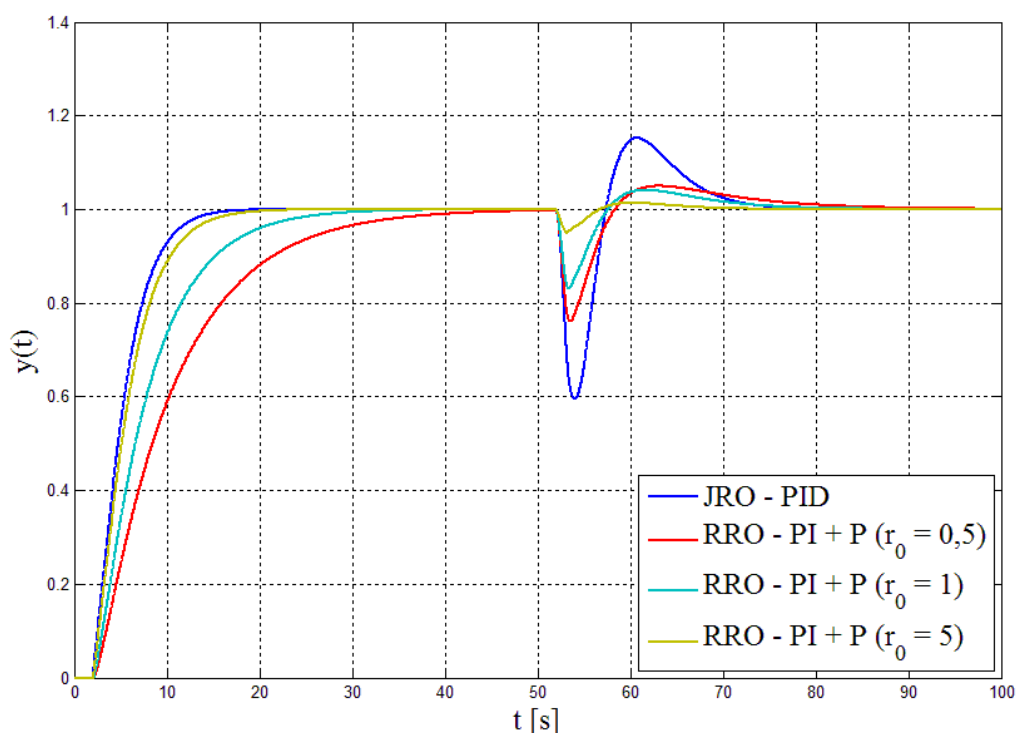
Dosadením parametrov z tabuliek 6, 7 a 8 do simulačnej schémy boli získané regulačné priebehy zobrazené na obrázkoch 5.3, 5.4 a 5.5.



Obr. 5.3: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou



Obr. 5.4: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou



Obr. 5.5: Odozva JRO a RRO s rôznymi nastaveniami P pomocného regulátora

5.2.4 Porovnanie výsledkov regulácie

V tabuľke 10 sú vypísané hodnoty niektorých veličín odčítaných z programu Simulink z odoziev zobrazených na obrázkoch 5.4 a 5.5.

Tab. 9: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s pomocnou regulovanou veličinou

Odčítané veličiny	Typ	Nastavené pre $\kappa = 0$	Nastavené pre $\kappa = 0,2$
Relatívny prekmit κ [%]	JRO	0	20
	RRO	0	20
Doba regulácie t_r [s]	JRO	11	9,9
	RRO	11	9,9
Relatívny výchylka $y(t)$ pri poruche [%]	JRO	41	41
	RRO	19	19
Doba ustálenia $y(t)$ po pôsobení $v(t)$ [s]	JRO	17	13
	RRO	9,5	9

Prechodová charakteristika pre JRO a RRO je zhodná. Z tohto faktu možno usúdiť, že RRO s pomocnou regulovanou veličinou pri nastavení podľa popísaného postupu nemá žiadny pozitívny vplyv na správanie regulovaného obvodu pri zmene žiadanej hodnoty.

Prínos tohto typu rozvetvenia sa prejaví pri pôsobení poruchovej veličiny. Relatívna výchylka regulovanej veličiny pri RRO je o 54% menšia ako pri JRO. Taktiež sa skrátil čas do opätovného ustálenia regulovanej veličiny o 45% pre $\kappa = 0$, resp. 30% pre $\kappa = 0,2$.

Na obrázku 5.5 sú zobrazené odozvy regulovanej sústavy pri použití P pomocného regulátora s rôznymi nastaveniami zosilnenia r_0 . Ako je vidieť z obrázka, rôznymi nastaveniami P regulátora sa predlžuje doba regulácie, znižuje sa však relatívna odchýlka regulovanej veličiny i keď doba opätovného ustálenia po pôsobení poruchovej veličiny sa výrazne neznižuje oproti JRO.

5.3 Obvod s pomocnou regulovanou veličinou v paralelnom zapojení

Zadanie

Navrhňte regulátory pre jednoduchý regulačný obvod a rozvetvený regulačný obvod s pomocnou regulovanou veličinou pre regulovanú sústavu s prenosom:

$$G_S(s) = \frac{2}{s(4s + 1)} e^{-3s} \quad (5.10)$$

5.3.1 Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod

Pre sústavu (5.10) s parametrami $k = 2$, $T_1 = 4$, $T_D = 3$ je možné podľa tabuľky 4 získať nasledovné staviteľné parametre pre PD regulátor:

Tab. 10: Staviteľné parametre PD regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu

Parameter	$\kappa = 0$	$\kappa = 0,2$
r_0	0,06	0,12
T_d	4	4

5.3.2 Návrh regulátorov pre rozvetvený regulačný obvod

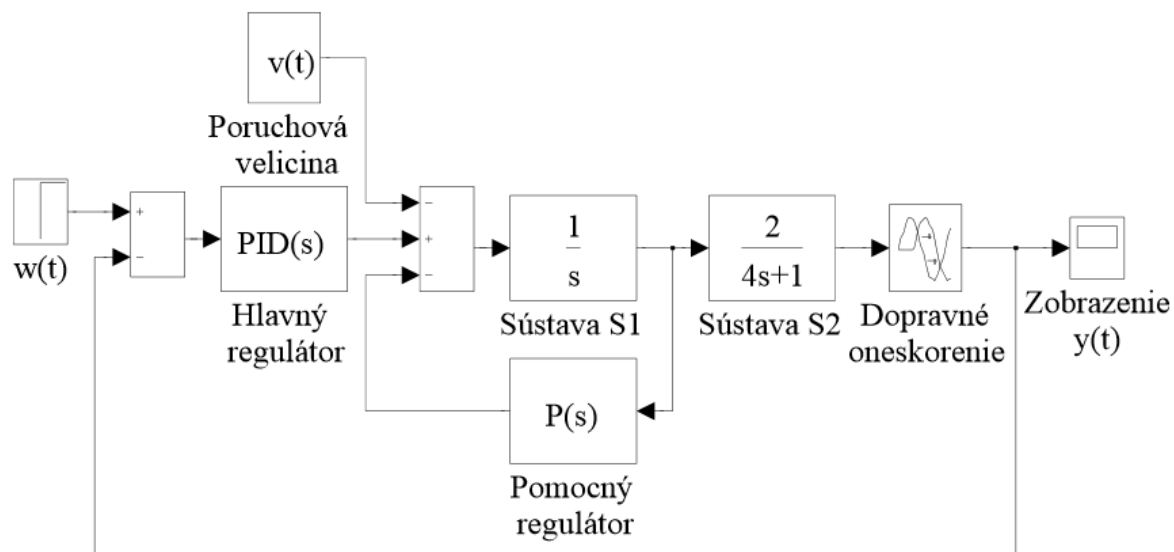
Návrh regulátorov pre rozvetvený regulačný obvod s pomocnou regulovanou veličinou zapojenou paralelne s hlavnou regulovanou veličinou má rovnaký princíp nastavenia ako pri sériovom zapojení.

Sústavu (5.10) rozdelíme na dve sústavy $G_{S1}(s)$ a $G_{S2}(s)$:

$$G_{S1}(s) = \frac{1}{s} \quad (5.11)$$

$$G_{S2}(s) = \frac{2}{(4s + 1)} e^{-3s} \quad (5.12)$$

Podľa schémy (obrázok 4.3) je možné namodelovať tento rozvetvený regulačný obvod v Simulinku. Simulačný model je zobrazená na obrázku 5.6.



Obr. 5.6: Model rozvetveného regulačného obvodu s pomocnou regulovanou veličinou

Návrh regulátora pre vnútornú slučku

Parametre regulátora pre sústavu (5.11) sú $r_0 = 1$ [–].

Návrh regulátora pre vonkajšiu slučku

Pri návrhu regulátora pre vonkajšiu slučku je potrebné nahradiť celú vnútornú slučku členom s odpovedajúcim prenosom. Člen bude mať tvar:

$$G_{S1}^*(s) = \frac{G_{S1}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s} \cdot 1} = \dots = \frac{1}{s+1} \quad (5.13)$$

Nahradením vnútornej regulačnej slučky jej prenosom $G_{S1}^*(s)$ vzniká nová sústava $G_s^*(s)$.

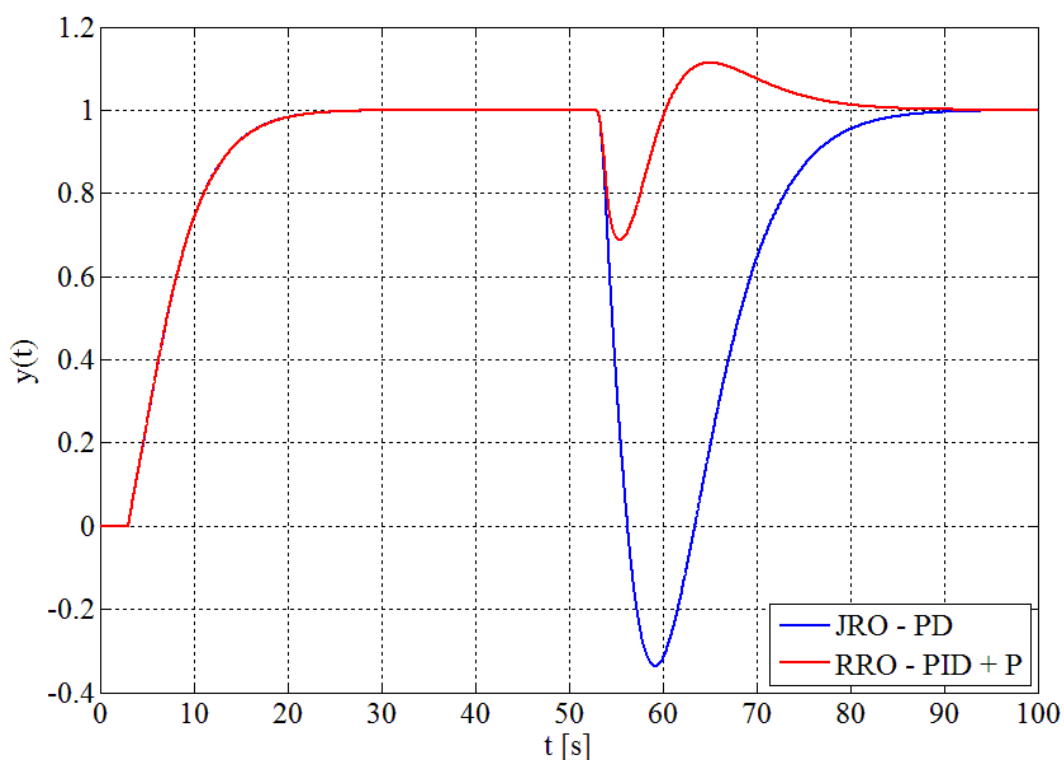
$$G_s^*(s) = \frac{1}{(s+1)} \frac{2}{(4s+1)} e^{-3s} \quad (5.14)$$

Parametre PID regulátora pre sústavu $G_s^*(s)$ podľa metódy požadovaného modelu sú zobrazené v tabuľke 11.

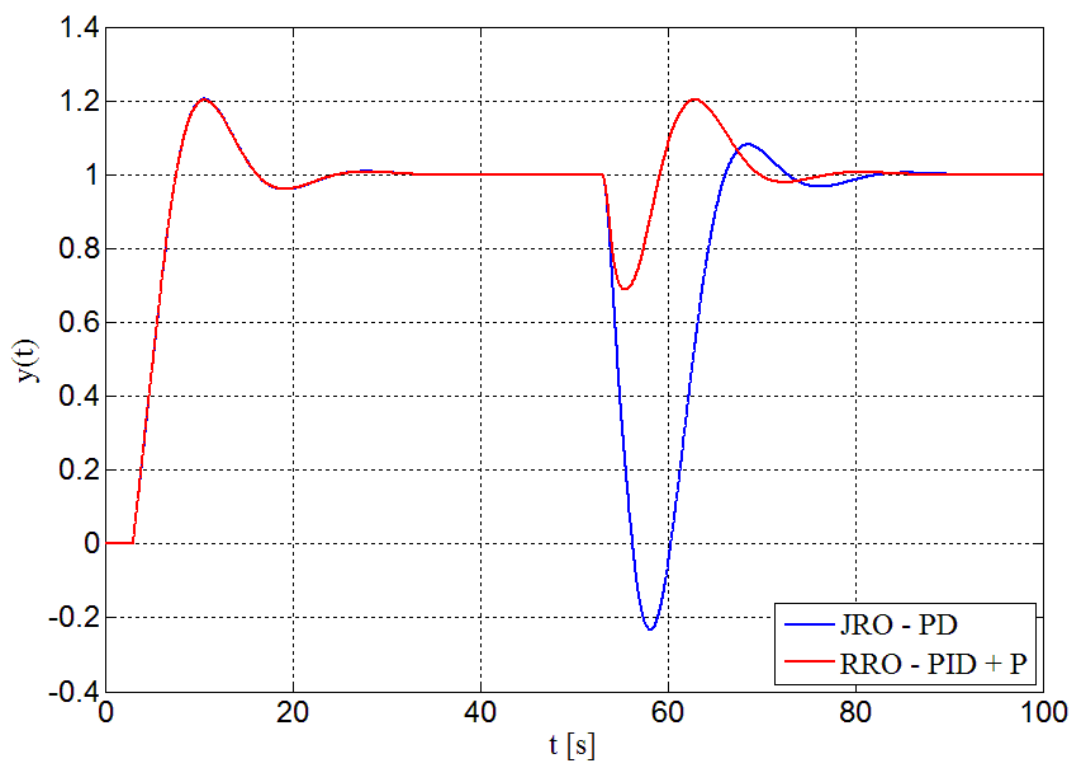
Tab. 11: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu

Parameter	$\kappa = 0$	$\kappa = 0,2$
r_0	0,3	0,58
T_i	5	5
T_d	0,8	0,63

Dosadením parametrov z tabuliek 10 a 11 do simulačnej schémy boli získané regulačné priebehy zobrazené na obrázkoch 5.7 a 5.8.



Obr. 5.7: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou



Obr. 5.8: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s pomocnou regulovanou veličinou

5.3.3 Porovnanie výsledkov regulácie

V tabuľke 12 sú vypísané hodnoty niektorých veličín odčítaných z programu Simulink z odoziev zobrazených na obrázkoch 5.7 a 5.8.

Tab. 12: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s pomocnou regulovanou veličinou

Odčítané veličiny	Typ	Nastavené pre $\kappa = 0$	Nastavené pre $\kappa = 0,2$
Relatívny prekmit κ [%]	JRO	0	20
	RRO	0	20
Doba regulácie t_r [s]	JRO	16,3	15
	RRO	16,3	15
Relatívny výchylka $y(t)$ pri poruche [%]	JRO	133	123
	RRO	31	32
Doba ustálenia $y(t)$ po pôsobení $v(t)$ [s]	JRO	30	20,7
	RRO	23	18

Prechodové charakteristiky sú zhodné pre JRO a RRO pre obe nastavenia relatívneho prekmitu.

V tomto prípade je veľmi výrazne potlačenie poruchovej veličiny. Relatívna výchylka regulovanej veličiny klesla v oboch prípadoch o vyše 70%. Skrátila sa aj doba do opätovného ustálenia po pôsobení poruchovej veličiny.

5.4 Obvod s pomocnou akčnou veličinou

Zadanie

Navrhnite regulátory pre jednoduchý regulačný obvod a rozvetvený regulačný obvod s pomocnou akčnou veličinou pre regulovanú sústavu s prenosom:

$$G_S(s) = \frac{4}{(5s + 1)(0.5s + 1)} e^{-4s} \quad (5.15)$$

5.4.1 Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod

Pre sústavu (5.15) s parametrami $k = 4$, $T_1 = 5$, $T_2 = 0.5$, $T_D = 4$ je možné podľa tabuľky 4 vypočítať parametre PID regulátora. Tieto hodnoty sú zapísané v tabuľke 13.

Tab. 13: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu

Parameter	$\kappa = 0$	$\kappa = 0,2$
r_0	0,13	0,24
T_i	5,5	5,5
T_d	5/11	5/11

5.4.2 Návrh regulátorov pre rozvetvený regulačný obvod

Pri nastavovaní regulátorov v tomto prípade sa postupuje nasledovne [1]:

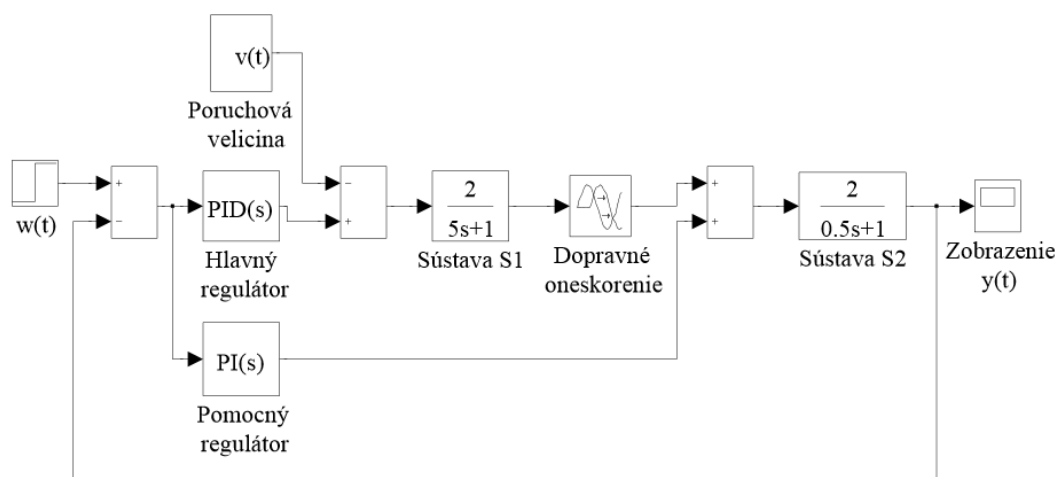
- Nastavenie regulátora pre celú sústavu, zhodné s nastavením nerozvetveného regulačného obvodu
- Nastavenie pomocného regulátora
- V prípade potreby doladenie parametrov regulátorov

Sústavu (5.15) rozdelíme na dve sústavy $G_{S1}(s)$ a $G_{S2}(s)$:

$$G_{S1}(s) = \frac{2}{(5s + 1)} e^{-4s} \quad (5.16)$$

$$G_{S2}(s) = \frac{2}{(0,5s + 1)} \quad (5.17)$$

Podľa schémy (obrázok 4.3) je možné namodelovať tento rozvetvený regulačný obvod v simulinku. Simulačný model je zobrazený na obrázku 5.9.

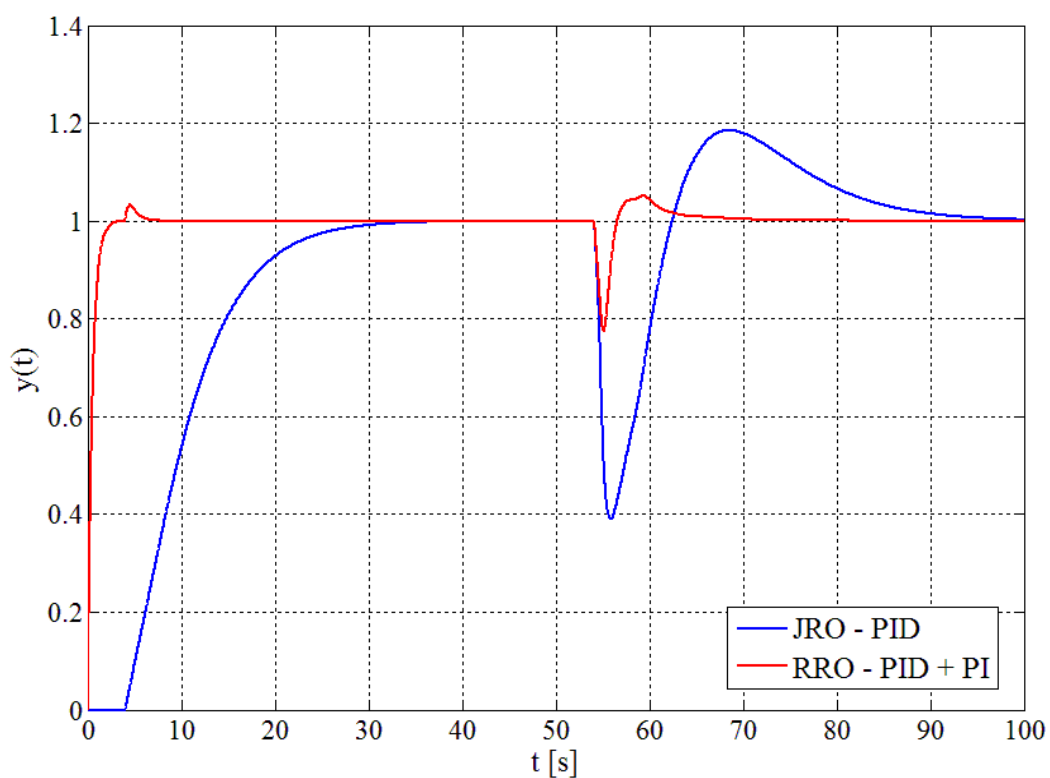


Obr. 5.9: Model rozvetveného obvodu s pomocnou akčnou veličinou

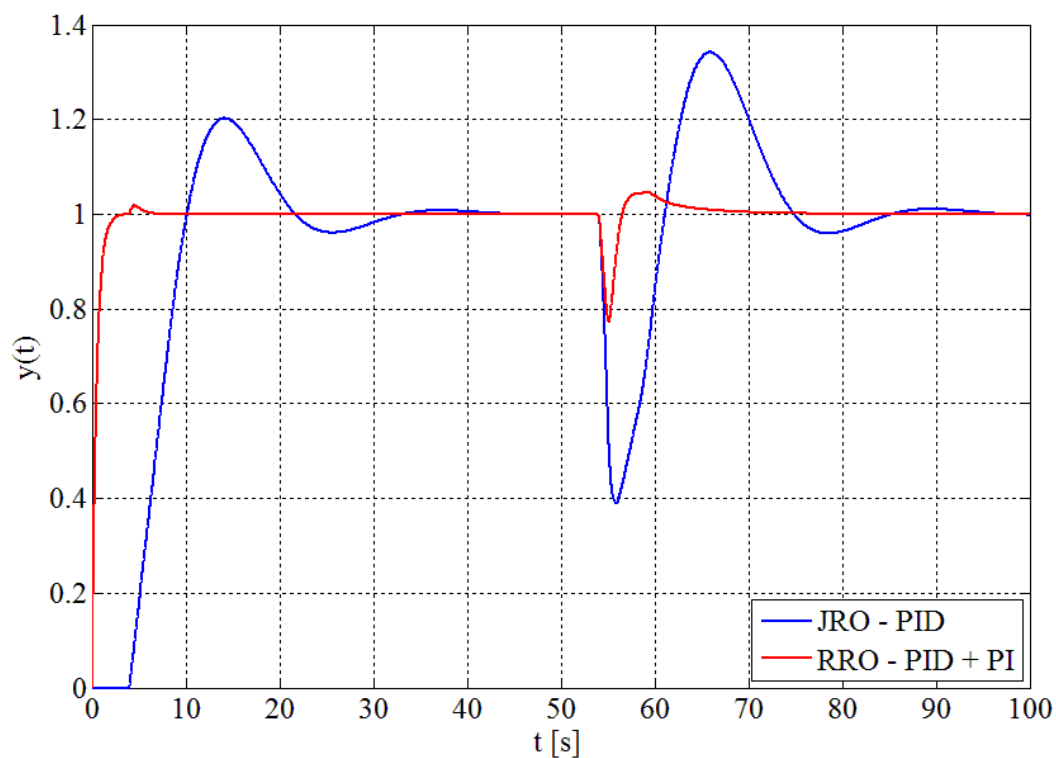
Parametre pre hlavný regulátor sú zhodné s parametrami pre jednoduchý regulačný obvod zapísané v tabuľke 13.

Parametre pre pomocný regulátor boli určené metódou požadovaného modelu pre sústavu $G_{S2}(s)$, a sú $r_0 = 0,5$ a $T_i = 0,5$ [s].

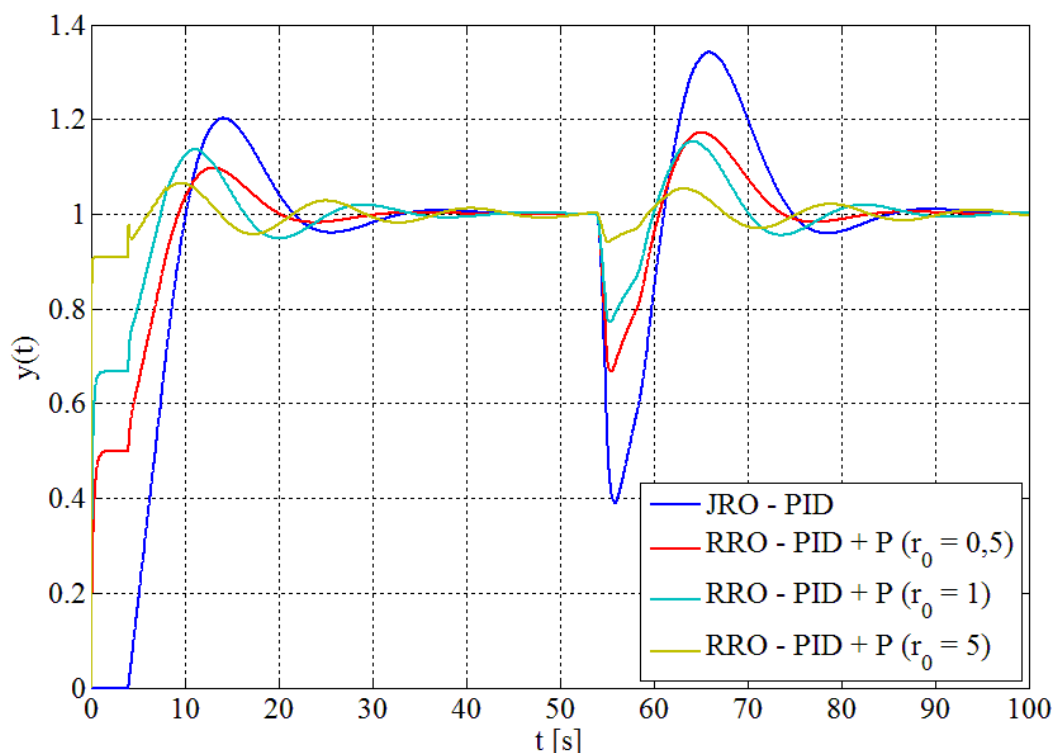
Dosadením všetkých parametrov do simulačnej schémy boli získané regulačné priebehy zobrazené na obrázkoch 5.10 a 5.11.



Obr. 5.10: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s pomocnou akčnou veličinou



Obr. 5.11: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s pomocnou akčnou veličinou



Obr. 5.12: Odozva regulačného obvodu na rôzne nastavenia pomocného P regulátora

Ako pomocný regulátor sa môže použiť i samotný P regulátor. V tom prípade je ale potrebné zladit' zosilnenie hlavného a pomocného regulátora. [1] Odozvy na rôzne nastavenia pomocného P regulátora sú zobrazené na obrázku 5.12.

5.4.3 Porovnanie výsledkov

V tabuľke 14 sú vypísané hodnoty niektorých veličín odčítaných z programu Simulink z odoziev zobrazených na obrázkoch 5.10 a 5.11.

Tab. 14: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s pomocnou akčnou veličinou

Odčítané veličiny	Typ	Nastavené pre $\kappa = 0$	Nastavené pre $\kappa = 0,2$
Relatívny prechyt κ [%]	JRO	0	20
	RRO	3,5	3,5
Doba regulácie t_r [s]	JRO	22	20,8
	RRO	1,5	1,5
Relatívny výchylka $y(t)$ pri poruche [%]	JRO	61	61
	RRO	23	23
Doba ustálenia $y(t)$ po pôsobení $v(t)$ [s]	JRO	32,5	23,5
	RRO	9,7	6,2

Relatívny prechyt pre JRO je totožný s hodnotou κ , pre ktorú boli metódou

požadovaného modelu spočítané parametre regulátora. V prípade RRO je táto hodnota nezávislá na hodnote κ a je 3,5%. Táto výchylka sa prejaví v čase $t = 4s$, teda v momente, keď sa v systéme prejaví pôsobenie sústavy S1 s dopravným oneskorením $t_D = 4s$. Pomocná akčná veličina v prípade RRO začína pôsobiť ihneď po zmene požadovanej veličiny, nie je ovplyvnená dopravným oneskorením. Doba regulácie sa pre obe nastavenia κ skrúti pri použití pomocnej akčnej veličiny z vyše 20s na dobu 1,5s, čo je viac ako 90%.

Pri pôsobení poruchovej veličiny v čase $t = 50s$ je možné pozorovať zlepšenie odozvy RRO voči JRO. Doba ustálenia sa skrútila o 70% a maximálna výchylka regulovanej veličiny sa zmenšila o 62%.

Na obrázku 5.12 sú zobrazené odozvy regulovanej sústavy pri použití P pomocného regulátora s rôznymi nastaveniami zosilnenia r_0 . Ako je vidieť z obrázka, rôznymi nastaveniami P regulátora sa zlepšuje relatívny prekmit a relatívna výchylka regulovanej veličiny pri pôsobení poruchovej veličiny avšak skrátenie doby regulácie i doby opätovného ustálenia obvodu po pôsobení poruchovej veličiny už nie je tak výrazne ako pri použití vyššie zmieneného PI regulátora.

5.5 Obvod s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny

Zadanie

Navrhните regulátor pre jednoduchý regulačný obvod a kompenzátor pre rozvetvený regulačný obvod s pomocnou akčnou veličinou pre regulovanú sústavu s prenosom:

$$G_S(s) = \frac{8}{(5s + 1)(4s + 1)} e^{-2s} \quad (5.18)$$

5.5.1 Návrh regulátora pre jednoduchý regulačný obvod

Pre sústavu (5.18) s parametrami $k = 8$, $T_1 = 5$, $T_2 = 4$, $T_D = 2$ je možné podľa tabuľky 4 vypočítať parametre PID regulátora. Tieto hodnoty sú zapísané v tabuľke 15.

Tab. 15: Staviteľné parametre PID regulátora pre rôzne hodnoty relatívneho prekmitu

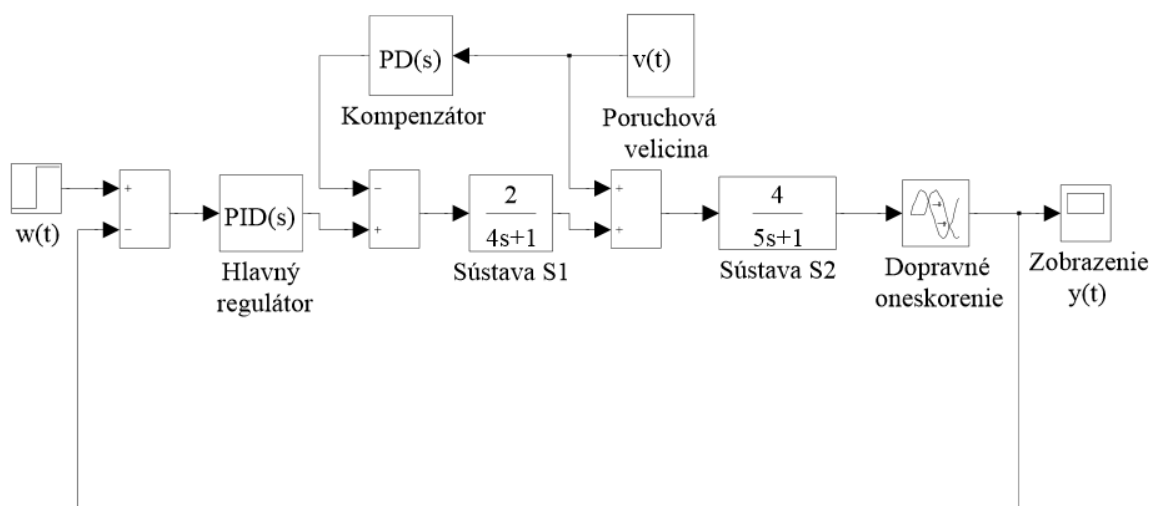
Parameter	$\kappa = 0$	$\kappa = 0,2$
r_0	0,2	0,39
T_i	9	9
T_d	20/9	20/9

5.5.2 Návrh kompenzátora pre rozvetvený regulačný obvod

Pri nastavovaní kompenzátora v tomto prípade sa postupuje nasledovne [1] [2]:

- Nastavenie regulátora pre jednoduchý regulačný obvod bez ohľadu na kompenzátor
- Nastavenie kompenzátora (využitím rovnice 4.12)

Podľa schémy (obrázok 4.4) je možné namodelovať tento rozvetvený regulačný obvod v Simulinku. Simulačný model je zobrazený na obrázku 5.13:



Obr. 5.13: Model rozvetveného obvodu s kompenzátorom

Parametre pre hlavný regulátor sú zhodné s parametrami vypočítanými pre jednoduchý regulačný obvod.

Pri návrhu kompenzátora sa vychádza z rovnice 4.12.

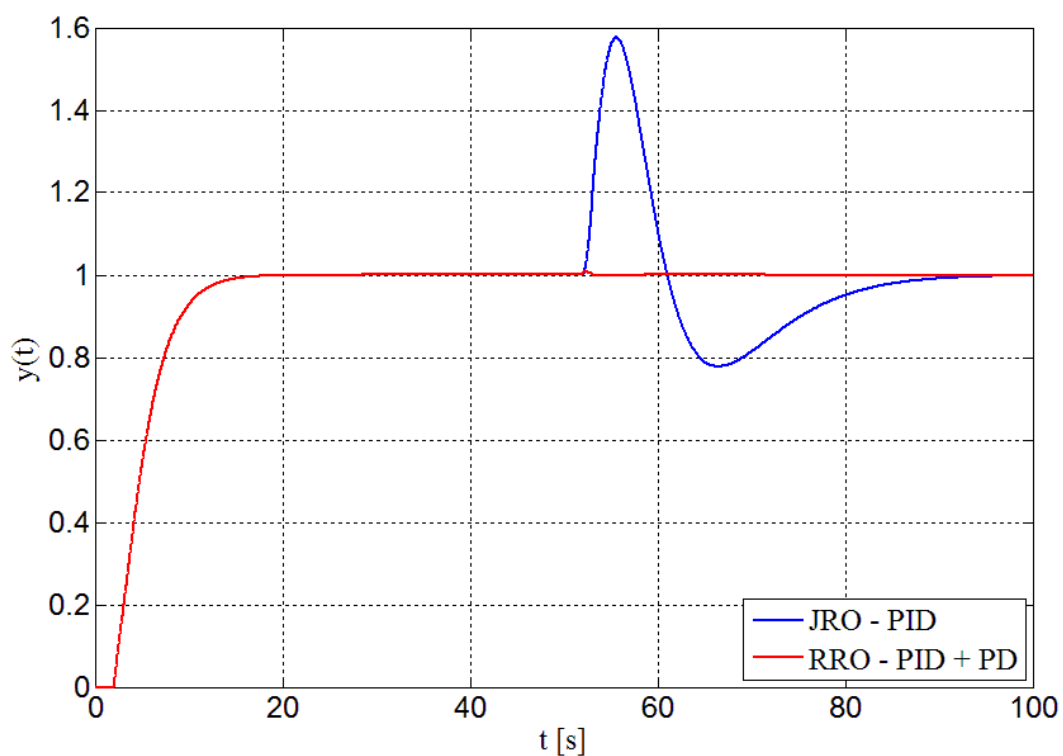
$$G_{RP}(s) = \frac{1}{G_{S1}} = \frac{1}{\frac{2}{(4s+1)}} = \frac{(4s+1)}{2} \quad (5.19)$$

Vzťah (5.19) je možné upraviť nasledovne:

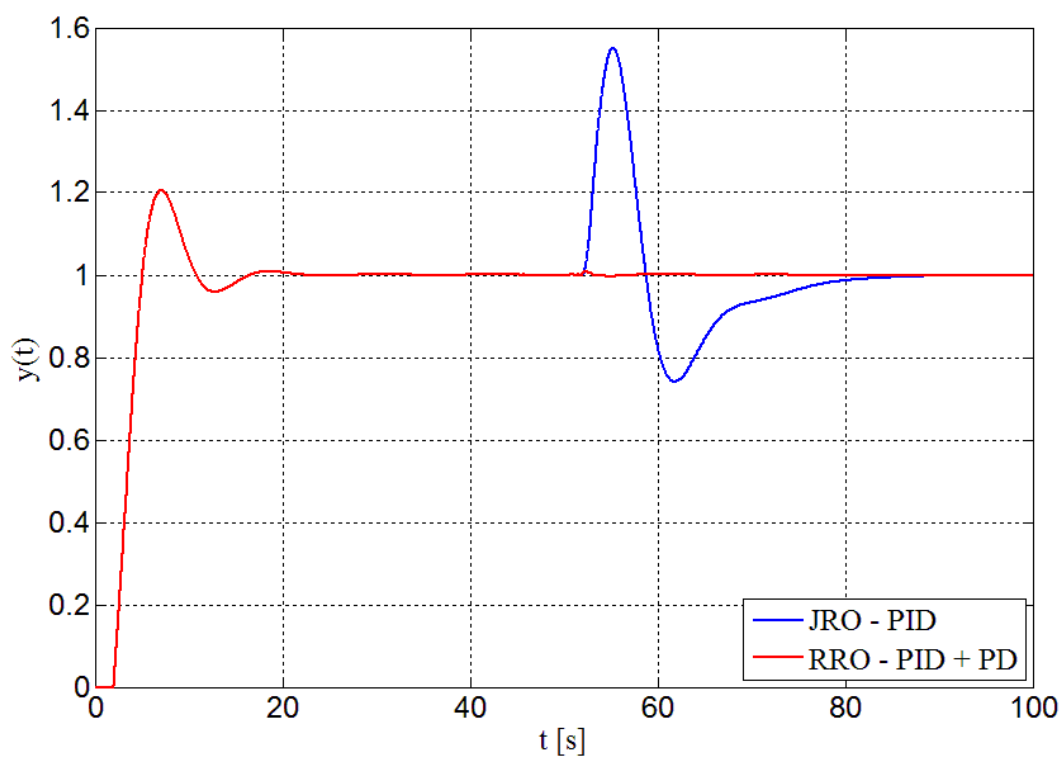
$$G_{RP}(s) = \frac{(4s+1)}{2} = \frac{1}{2}(1+4s) \quad (5.20)$$

Výsledný vzťah (5.20) zodpovedá prenosu PD regulátora zobrazeného v tabuľke 1. Jeho parametre sú $r_0 = 0,5 [-]$ a $T_d = 4 [s]$.

Dosadením vypočítaných parametrov do simulačnej schémy boli získané regulačné priebehy zobrazené na obrázkoch 5.14 a 5.15.



Obr. 5.14: Odozva JRO pri $\kappa = 0$ a RRO s kompezátorom



Obr. 5.15: Odozva JRO pri $\kappa = 0,2$ a RRO s kompezátorom

5.5.3 Porovnanie výsledkov

V tabuľke 16 sú vypísané hodnoty niektorých veličín odčítaných z programu Simulink z odoziev zobrazovaných na obrázkoch 5.14 a 5.15.

Tab. 16: Porovnanie výsledkov regulácie JRO a RRO s kompenzátorom

Odčítané veličiny	Typ	Nastavené pre $\kappa = 0$	Nastavené pre $\kappa = 0,2$
Relatívny prechod κ [%]	JRO	0	20
	RRO	0	20
Doba regulácie t_r [s]	JRO	11	4,9
	RRO	11	4,9
Relatívny výchylka $y(t)$ pri poruche [%]	JRO	57	55
	RRO	0	0
Doba ustálenia $y(t)$ po pôsobení $v(t)$ [s]	JRO	30	23
	RRO	0	0

Keďže je v oboch prípadoch (JRO i RRO) použitý rovnaký hlavný regulátor, sú prechodové charakteristiky totožné.

Vychýlenie systému z rovnovážnej polohy pri pôsobení poruchovej veličiny je pri JRO výrazné. Relatívna výchylka regulovanej veličiny presahuje 50%, čo je v mnohých prípadoch neakceptovateľné. Pri použití kompenzátora sa pôsobenie poruchovej veličiny na regulovanej veličine neprejaví. Môžeme povedať, že systém je invariantný k poruchovej veličine.

6 ZÁVER

Témou tejto bakalárskej práce bolo porovnanie jednoduchých a rozvetvených regulačných obvodov. Práca bola rozčlenená do viacerých logicky nadväzujúcich kapitol.

Prvá kapitola je samotný úvod. Druhá kapitola v krátkosti popisuje umiestnenie regulácie v rámci riadenia.

Tretia kapitola sa zaoberá teoretickým popisom jednoduchého regulačného obvodu. V skratke popisuje regulovanú sústavu a regulátor. Taktiež obsahuje popis základných prenosov regulačného obvodu. Súčasťou tejto kapitoly je i popis metódy požadovaného modelu slúžiacej k výpočtu parametrov regulátorov. Metóda je následne použitá v praktickej časti práce. Na záver tejto kapitoly sú okrajovo spomenuté iné nerozvetvené regulačné obvody.

Štvrtá kapitola teoreticky popisuje jednotlivé typy rozvetvených regulačných obvodov. Sú v nej popísané obvody s pomocnou regulovanou veličinou, obvody s pomocnou akčnou veličinou, obvody s doprednou kompenzáciou poruchovej veličiny a obvody využívajúce model regulovanej sústavy, akými je napríklad Smithov prediktor. Podkapitoly jednotlivých typov rozvetvenia obsahujú základný popis, blokové schémy zapojenia, vlastnosti a ich teoretické porovnanie s jednoduchým regulačným obodom popísaným v predchádzajúcej kapitole.

Piata kapitola obsahuje praktickú časť. V praktickej časti boli vyriešené štyri príklady porovnávajúce jednoduchý regulačný obvod s rozvetveným na rovnakej regulovanú sústavu.

V prvom prípade bola vyriešená kaskádová regulácia pre proporcionálnu sústavu s dopravným oneskorením. V prípade rozvetveného regulačného obvodu bol použitý pomocný regulátor typu PI. Regulátory boli nastavené tak, že prechodová charakteristika oboch obvodov bola totožná. Výrazné sa však zlepšila odozva na poruchovú veličinu.

Pokiaľ sa návrh regulátora zjednoduší, a namiesto kombinácie PID a PI regulátora sa použije PI a P regulátor, tak sa opäť zlepši odozva na poruchovú veličinu. V tomto prípade sa prechodové charakteristiky nerovnajú a predlžuje sa doba regulácie rozvetveného obvodu.

V druhom prípade bola vyriešená integračná sústava s dopravným oneskorením pomocou obvodu s pomocnou regulovanou veličinou v paralelnom zapojení. Opäť bola dosiahnutá rovnaká prechodová charakteristika pre oba typy obvodov. Odozva na poruchovú veličinu sa však výrazne zlepšila.

V treťom prípade bola vyriešená regulácia proporcionálnej sústavy s dopravným oneskorením pomocou rozvetveného obvodu s pomocnou akčnou veličinou. Tento typ rozvetvenia výrazne zlepšil odozvu na žiadanú veličinu tak i na poruchovú veličinu. Zlepšila sa i doba regulácie vďaka priamemu pôsobeniu pomocného regulátora na rýchlejšiu časť regulovanej sústavy.

Posledný, štvrtý príklad sa zaoberá návrhom kompenzátora pre proporcionálnu sústavu s dopravným oneskorením. Pre tento príklad bol navrhnutý PD kompenzátor, ktorý svojou prítomnosťou v regulačnom obvode neovplyvňuje odozvu obvodu na zmenu požadovanej veličiny. Svojím pôsobením ale kompenzuje pôsobenie poruchovej veličiny a tá sa v tomto prípade neprejavila na zmene regulovanej veličiny. Obvod je možno považovať za invariantný voči poruchovej veličine.

Regulačné priebehy riešených príkladov potvrdili poznatky popísané v teoretickej časti tejto práce.

7 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 333 s. ISBN 80-010-3007-5.
- [2] ŠVARC, Ivan, Radomil MATOUŠEK, Miloš ŠEDA a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, vi, 348 s. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [3] BALÁTEĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004, 663 s. ISBN 80-730-0148-9.
- [4] VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. *Základy automatické regulace*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006, 198 s. ISBN 80-248-1068-9.
- [5] BROSILOW, Coleman a Babu JOSEPH. *Techniques of model-based control*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c2002, xxi, 680 p. ISBN 01-302-8078-X.
- [6] *Instrument engineer's handbook*. 4th ed. Editor Béla G Lipták. Boca Raton: CRC/Taylor, 2006, lxx, 2387 s. ISBN 08-493-1081-4.
- [7] REES, Edited by K. Warwick and D. *Industrial digital control systems*. Rev. ed. London: Peter Peregrinus, 1988. ISBN 08-634-1137-1.
- [8] SMUTS, Jacques. A tutorial on cascade control. *Control notes* [online]. 2010 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://blog.opticontrols.com/archives/105>
- [9] Designing Cascade Control System with PI Controllers. *Mathworks* [online]. 2014 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/control/ug/designing-cascade-control-system-with-pi-controllers.html>
- [10] HÄGGLUND, T. An industrial dead-time compensating PI controller. *Control Engineering Practice*. 1996, vol. 4, issue 6, s. 749-756. DOI: 10.1016/0967-0661(96)00065-2.
- [11] PADHAN, D.G. a S. MAJHI. Modified Smith predictor and controller for time delay processes. *Electronics Letters*. 2011, vol. 47, issue 17, s. 959-961. DOI: 10.1049/el.2011.0378.
- [12] SCHLEGEL a Oldřich VEČEREK. Regulátory pro procesy s velkým dopravním zpožděním. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2001, č. 12.
- [13] ARRIETA, Orlando, Ramon VILANOVA a Pedro BALAGUER. Procedure for cascade control systems design: Choice of suitable PID Tunings. *International journal of computers, communication & control*. 2008, Vol: III, No. 3, s. 235-248.

PRÍLOHY

Súčasťou tejto práce je CD obsahujúce:

Bakalárska práca vo formáte Adobe Acrobat (PDF)