



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**JEDNODUCHÉ A ROZVĚTVENÉ REGULAČNÍ
OBVODY**

SIMPLE AND BRANCHED CONTROL CIRCUITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Holoubek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Olga Davidová, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Lukáš Holoubek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	Ing. Olga Davidová, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Jednoduché a rozvětvené regulační obvody

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednoduché regulační obvody lze použít pro běžné regulační úlohy. Pokud je však požadována lepší přesnost a především dynamika regulačního pochodu, tyto jednoduché obvody již nestačí. V takovém případě se využívají různé varianty rozvětvených regulačních obvodů

Cíle bakalářské práce:

Popište jednoduchý regulační obvod.

Popište varianty rozvětvených regulačních obvodů.

K vybraným regulovaným soustavám navrhnete regulátory, jak pro jednoduché, tak i rozvětvené regulační obvody.

V Simulinku namodelujte regulační průběhy jednoduchých a rozvětvených obvodů.

Proveďte vyhodnocení regulace s ohledem na její přesnost a kvalitu.

Seznam doporučené literatury:

BALÁTEĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-020-2.

ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03007-5.

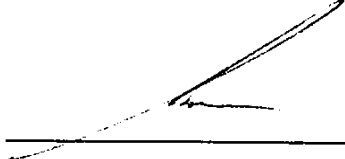
ŠVARC, Ivan, Radomil MATOUŠEK, a Miloš ŠEDA a Miluše VÍTEČKOVÁ. Automatické řízení. Brno: CERM - Akademické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.

VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. Základy automatické regulace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1068.

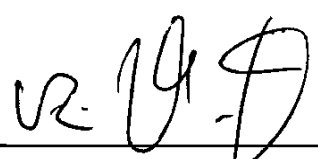
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 23. 10. 2017





doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je teoretické a praktické porovnání kvality regulace rozvětvených regulačních obvodů s obvody jednoduchými. V teoretické části je obecně popsáno řízení, regulace, regulační obvod, regulátor a nastavení jeho parametrů. V praktické části jsou zadány přenosy regulovaných soustav, na kterých jsou prakticky simulovány přechodové charakteristiky při skokové změně žádané hodnoty a při vlivu poruchové veličiny u čtyřech typů rozvětvených a jednoduchých regulačních obvodů. Výsledky kvality regulace jsou popsány a vyhodnoceny s použitím programu Matlab/Simulink.

ABSTRACT

The goal of this thesis is a theoretical and practical comparison of simple and branched controlled circuits in relation to regulation's quality. Theoretical part describes control, regulation, regulation's circuit, regulator and its parameters setting. There are specific transmissions of the regulated system set on which a step signal response and a fault's signal pulses are simulated on. Regulation's quality results are closely analyzed and described using Matlab/Simulink program.

KLÍČOVÁ SLOVA

regulace, jednoduchý regulační obvod, rozvětvený regulační obvod, regulátor, obvod s pomocnou regulovanou veličinou, rozvětvený obvod s pomocnou akční veličinou, rozvětvený obvod s pomocnou měřenou poruchovou veličinou

KEYWORDS

control, simple control circuit, branched control circuit, regulator, auxiliary controlled quantity circuit, branched circuit with auxiliary action quantity, branched circuit with auxiliary measured fault quantity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLOUBEK, L. *Jednoduché a rozvětvené regulační obvody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Olga Davidová, Ph.D

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí své bakalářské práce paní Ing. Olze Davidové, Ph.D. za průběžnou pomoc a odborné konzultace.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Olgy Davidové Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Lukáš Holoubek

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	ŘÍZENÍ A REGULACE.....	17
2.1	Řízení.....	17
2.2	Jednoduchý regulační obvod	18
2.3	Přenosy jednoduchého regulačního obvodu	18
2.4	Regulátor	19
2.4.1	Blokové schéma regulátoru	19
2.4.2	Dynamické vlastnosti a typy spojitých regulátorů	19
2.5	Regulovaná soustava	20
2.6	Metoda požadovaného modelu	21
3	ROZVĚTVENÉ REGULAČNÍ OBVODY	23
3.1	Obvod s pomocnou regulovanou veličinou	24
3.1.1	Matematický model	24
3.1.2	Obvod s pomocnou regulovanou veličinou v sérii (kaskádově).....	25
3.1.3	Matematický model	26
3.1.4	Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem.....	26
3.2	Obvod s pomocnou akční veličinou	27
3.2.1	Matematický model	27
3.2.2	Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem.....	28
3.3	Obvod s měřením poruchové veličiny	28
3.3.1	Matematický model	29
3.3.2	Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem.....	29
3.4	Obvod se Smithovým prediktorem regulované soustavy	30
3.4.1	Matematický model	30
3.4.2	Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem.....	31
3.5	Obvod s vnitřním modelem regulované soustavy	31
4	PRAKTICKÉ POROVNÁNÍ JEDNODUCHÝCH A ROZVĚTVENÝCH REGULAČNÍCH OBVODŮ	33
4.1	Jednoduchý regulační obvod	34
4.2	Obvod s pomocnou regulovanou veličinou	34
4.2.1	Jednoduchý regulační obvod sériového (kaskádového) zapojení.....	34
4.2.2	Rozvětvený regulační obvod sériového (kaskádového) zapojení.....	35
4.2.3	Jednoduchý regulační obvod paralelního zapojení.....	39
4.2.4	Rozvětvený regulační obvod paralelního zapojení.....	40
4.3	Obvod s pomocnou akční veličinou	43
4.3.1	Jednoduchý regulační obvod s pomocnou akční veličinou	43
4.3.2	Rozvětvený regulační obvod s pomocnou akční veličinou	44
4.4	Obvod s pomocným měřením poruchové veličiny	47
4.4.1	Jednoduchý regulační obvod s pomocným měřením poruchové veličiny.....	47
4.4.2	Rozvětvený regulační obvod s pomocným měřením poruchové veličiny.....	48
5	ZÁVĚR	51
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	53
7	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	55

1 ÚVOD

Regulace je neodmyslitelná součást automatizované výroby ve většině průmyslových odvětví, ale i v domácnostech a běžném životě. Pokrok v technologiích snímání, měření fyzikálních veličin a vzestup výpočetní techniky umožňuje regulaci zkvalitňovat a otevírá více možností, jak zavádět do regulačních procesů více proměnných, které je možné ovlivňovat. V oblasti regulace jsou běžně používány jednoduché regulační obvody, jsou podstatné, ale často už neumožňují uspokojit dnešní vysoké nároky na stabilitu a kvalitu regulace. V takovém případě je výhodné zavádění pomocných rozvětvených regulačních obvodů. Cílem této práce je především praktické porovnání kvality regulace jednoduchých a rozvětvených regulačních obvodů, přesto je velmi důležitá i teoretická část, která umožňuje pochopit, jak postupovat při aplikaci těchto obvodů na konkrétních regulovaných soustavách a při výpočtech parametrů různých typů regulátorů.

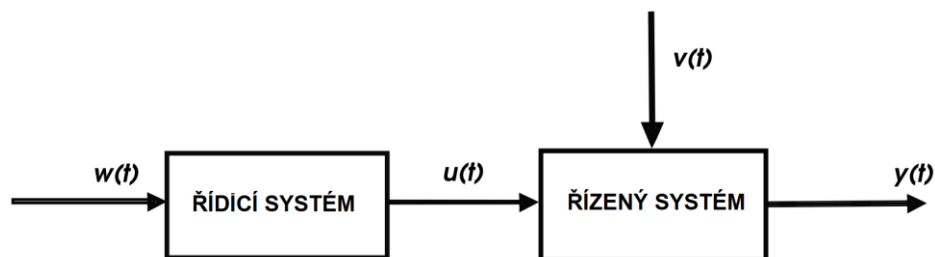
Teoretická část této práce je rozdělena do tří kapitol. Kapitola první je úvodní a popisuje smysl regulace, rozdělení a cíle této práce. Kapitola druhá popisuje princip regulace v oblasti řízení a základní schéma. Dále je popsán jednoduchý regulační obvod, schéma a přenosy jednoduchého regulačního obvodu a také princip činnosti. Popis funkce regulátoru, zvolená metoda pro nastavení parametrů regulátoru a regulovaná soustava je popsána v závěru této kapitoly. Kapitola třetí popisuje rozvětvené regulační obvody. Je popsán obvod s pomocnou regulovanou veličinou v sériovém a paralelním zapojení, s pomocnou akční veličinou, s pomocným měřením poruchové veličiny a rozvětvené obvody s vnitřním modelem a Smithovým prediktorem.

Praktická část je zpracována použitím programu Matlab 2016a a jeho simulačním prostředím Simulink [10]. Je namodelované blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu, zde jsou podrobně popsány parametry použitých bloků, které budou později použité u všech simulovaných obvodů. U každého typu jednoduchého a rozvětveného regulačního obvodu jsou zadány konkrétní přenosy regulovaných soustav s dopravním zpožděním, pro které jsou vypočítány a nastaveny parametry jednotlivých typů regulátorů zvolenou metodou. Při simulaci jsou regulační obvody zatíženy poruchovou veličinou a skokovou změnou signálu k žádané hodnotě. Kvalita regulace mezi jednoduchým a rozvětveným typem regulačního obvodu je vždy porovnávána na jednom typu přenosu zadané regulované soustavy a výsledné průběhy včetně jejich hodnot jsou vyhodnoceny graficky i matematicky. Celkové zhodnocení těchto dosažených výsledků je podrobněji popsáno v závěru této práce.

2 ŘÍZENÍ A REGULACE

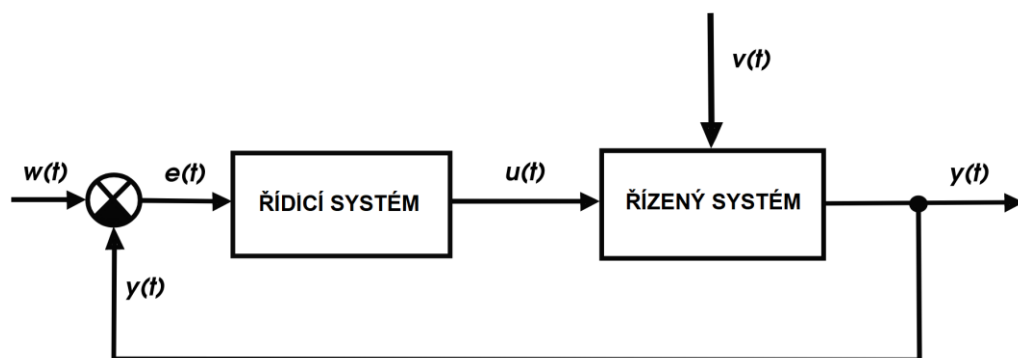
2.1 Řízení

Řízení obecně je cílené působení na určitý objekt tak, aby pochody a děje v něm probíhaly podle předem nastavených požadavků. Řízení dělíme na ovládání a regulaci. Ovládání je možné chápat jako systém řízení v přímé struktuře, kde není technickými prostředky realizována zpětná vazba [1, 2]. (Obr. 1)



Obr. 1: Blokové schéma ovládání

Regulace je systém řízení s uzavřenou strukturou, kde je řídicí systém (regulátor) informován o stavu řízeného systému pomocí zpětné vazby (Obr. 2). Cílem regulace je, aby se regulovaná veličina neustále rovnala hodnotě žádané $w \rightarrow y$. [1, 2]

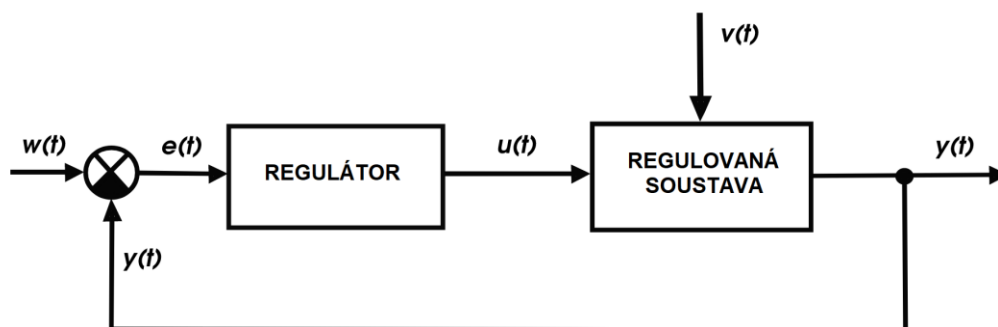


Obr. 2: Blokové schéma regulace

Další formy řízení jsou tzv. vyšší formy řízení, které se dělí na optimální řízení, adaptivní řízení a umělou inteligenci. Optimální řízení si automaticky nastavuje regulační proces tak, aby udržoval řízený systém v požadovaném stavu s optimálním využitím spotřebovávané energie. V adaptivním řízení je systém regulace schopen sám měnit parametry podle dynamických změn parametrů řízeného systému. Umělá inteligence je systém řízení, který se sám učí, předvídá a zdokonaluje svou činnost. [11]

2.2 Jednoduchý regulační obvod

Regulační obvod je soubor technických prostředků, kterými se na daném zařízení zajišťuje automatické udržení vybraných veličin procesu na požadované hodnotě. Blokové schéma (Obr. 3) jednoduchého regulačního obvodu je znázorněné v základní obecné formě bez dalších nezbytných členů, tj. např. akční člen, snímací člen apod. [1, 3]



Obr. 3: Blokové schéma regulačního obvodu

Do regulátoru vstupuje žádaná hodnota $w(t)$ a pomocí zpětné vazby regulovaná veličina $y(t)$. Jestliže se výstup regulované soustavy nerovná žádané hodnotě, vzniká regulační odchylka $e(t)$, kterou můžeme vyjádřit jako rozdíl žádané hodnoty a regulované veličiny $e(t) = w(t) - y(t)$. Z toho dále plyne, že regulační odchylka bude nenulová v případě, když na regulovanou soustavu působí nežádoucí vliv, který způsobí poruchu (neočekávanou změnu) funkce regulované soustavy a tím její vychýlení od nastavené požadované činnosti (například vliv prostředí). Tyto neočekávané poruchové vlivy nazýváme poruchové veličiny $v(t)$. Výstupem regulátoru o odchýlení mezi žádanou hodnotou a aktuálním stavem regulované soustavy je akční veličina $u(t)$. Akční veličina působí pomocí dalších technických prostředků na regulovanou soustavu tak, aby nastavila její vychýlení zpět do požadovaného stavu. [1, 2, 4]

2.3 Přenosy jednoduchého regulačního obvodu

Přenos řízení (s podmínkou $w(t)=0$)

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \quad (2.1)$$

Přenos poruchy (s podmínkou $v(t)=0$)

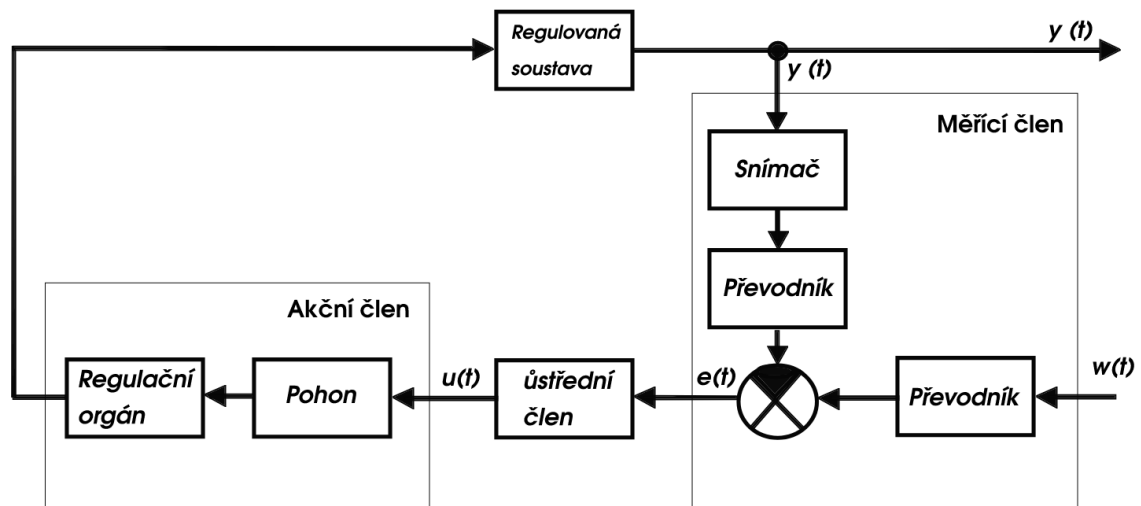
$$G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \quad (2.2)$$

2.4 Regulátor

Regulátor je soubor členů v systému, který má za úkol vytvářet takovou akční veličinu, aby její působení na regulovanou soustavu zajišťovalo, že regulační odchylka se bude udržovat v každém časovém okamžiku co nejmenší. [3] Regulátor se strukturou skládá z měřicího, ústředního a akčního členu (Obr. 4) a samotný algoritmus řízení se nachází v ústředním členu regulátoru.

Regulátory dělíme podle druhu potřebné energie na přímé, které nevyžadují ke své činnosti vnější zdroj energie a na nepřímé, které vnější přívod energie vyžadují, ty už jsou dnes aplikovány častěji. Nepřímé regulátory dělíme podle druhu pomocné energie na elektrické, pneumatické, mechanické a hydraulické. Za nejrozšířenější se považují regulátory elektrické. Regulátory spojitě a nespojitě v čase definují jaký druh signálu konkrétní regulátor využívá. [4, 7]

2.4.1 Blokové schéma regulátoru



Obr. 4: Blokové schéma regulátoru [4, 7]

2.4.2 Dynamické vlastnosti a typy spojitých regulátorů

Regulátory dělíme podle dynamických vlastností na proporcionální, dále P, integrační, dále I a derivační, dále D a tyto vlastnosti je možné kombinovat současně, paralelně, sériově apod. Kombinace všech tří vlastností je např. nejčastěji používaný PID regulátor. Vhodný typ regulátoru se odvíjí podle typu regulované soustavy. P regulátor je přesný, ale má trvalou regulační odchylku. I regulátor odstraňuje trvalou regulační odchylku, ale je pomalý a na velkou četnost poruch nevhodný. PD regulátor je rychlý a přesný, vhodný na časté poruchy, zde ale stejně jako u typu P zůstává trvalá regulační odchylka. PI regulátor odstraňuje trvalou regulační odchylku a zároveň kombinuje přesnost typu P. PID regulátor je pro svoje vlastnosti využíván jako rychlejší a dokonalejší typ regulátoru PI, díky derivaci potlačí překmity poruch rychleji, ale je nákladnější a složitější. [1, 2, 3] Matematický popis přenosů těchto dynamických vlastností regulátorů je popsán (Tab.1).

Tab. 1: Přenosy analogových regulátorů:

Typ	Přenosy
P	$G_R(s) = r_0$
I	$G_R(s) = \frac{r_{-1}}{s} = \frac{1}{T_i s}$
D	$G_R(s) = r_1 s = T_d s$
PI	$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$
PD	$G_R(s) = r_0 + r_1 s = r_0 (1 + T_d s)$
PID	$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$

2.5 Regulovaná soustava

Regulovaná soustava (řízený systém), je technologický proces, který je řízen regulátorem a je předmětem regulace samotné. Podle typu regulované soustavy, která má specifickou dynamiku a vlastnosti, je zvolen typ regulátoru a jeho nastavení.

Pro určení typu soustavy, tj. dynamických vlastností regulované soustavy existuje mnoho metod, analyticky, experimentálně apod.

Jsou uvedeny obecné tvary vyjádření přenosů pomocí koeficientů diferenciální rovnice s dopravním zpožděním (2.3), (2.4), (2.5) a typy regulovaných soustav (Tab. 2) vyšších řádů setrvačnosti. [1, 3]

Přenos proporcionální soustavy se setrvačností n -tého řádu s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} e^{-T_D s} \quad (2.3)$$

Přenos derivační soustavy obecný s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{s^r (b_m s^{m-r} + \dots + b_r)}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} e^{-T_D s} \quad (2.4)$$

Přenos integrační soustavy obecný s dopravním zpožděním

$$G_s(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^q (a_n s^{n-q} + \dots + a_q)} e^{-T_D s} \quad (2.5)$$

Pro správnou identifikaci typu regulované soustavy, která je nezbytná pro optimální nastavení regulace je použita (Tab. 2).

Tab. 2: Přenosy regulovaných soustav [3].

Setrvačnost	Proporcionální	Integrační	Derivační
0. řadu	k_0	$\frac{k_0}{s}$	$k_0 s$
1. řadu	$\frac{k_0}{T_1 s + 1}$	$\frac{k_0}{s(T_1 s + 1)}$	$\frac{k_0 s}{T_1 s + 1}$
2. řadu	$\frac{k_0}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$\frac{k_0}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$\frac{k_0 s}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$

2.6 Metoda požadovaného modelu

K určení parametrů regulátorů je použita metoda požadovaného modelu.

Pomocí tabulky (Tab. 2) je určený typ přenosu zadané regulované soustavy. Vybraný typ přenosu soustavy je potom porovnán s tabulkou (Tab. 3), kde je vztah pro výpočet parametrů regulátoru. Jakmile je zvolena hodnota relativního překmitu regulátoru, tak je pomocí (Tab. 4) a dosazením do vztahu (2.6) získáno zesílení otevřeného regulačního obvodu. Nakonec je celkové zesílení regulátoru r_0 získáno dosazením výsledné hodnoty otevřeného regulačního obvodu ze vztahu (2.6) do (Tab. 3).

Tab. 3: Parametry pro metodu požadovaného modelu [3].

Přenos regulované soustavy	Regulátor				
	Typ	$T_D = 0$	$T_D > 0$		
		r_0^*		T_i^*	T_d^*
$\frac{k}{s} e^{-T_D s}$	P	$\frac{2}{k 2 T_w}$	$\frac{a}{k}$	-	-
$\frac{k}{(T_1 s + 1)} e^{-T_D s}$	PI	$\frac{2 T_i^*}{k 2 T_w}$	$\frac{a T_i^*}{k}$	T_1	-
$\frac{k}{s(T_1 s + 1)} e^{-T_D s}$	PD	$\frac{2}{k 2 T_w}$	$\frac{a}{k}$	-	T_1
$\frac{k_0}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_D s}$ $T_1 \geq T_2$	PID	$\frac{2 T_i^*}{k 2 T_w}$	$\frac{a T_i^*}{k}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$
$G_s(s) = \frac{k_0}{(T_0^2 s^2 + 2 \xi T_0 s + 1)}$ $0.5 < \xi_0 \leq 1$	PID	$\frac{2 T_i^*}{k 2 T_w}$	$\frac{a T_i^*}{k}$	$2 \xi_0 T_0$	$\frac{T_0}{2 \xi_0}$

Zesílení otevřeného regulačního obvodu je určeno na základě vztahu (2.6) [3]

$$a = \frac{1}{\beta T_D} \quad (2.6)$$

Při zvolení překmitu κ je zesílení otevřeného regulačního obvodu určeno z tabulky závislosti koeficientu β na relativním překmitu (Tab. 4).

Tab. 4: Závislost koeficientu β na relativním překmitu [3]

κ	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
β	2.718	1.940	1.720	1.561	1.437	1.337	1.248	1.172	1.104

3 ROZVĚTVENÉ REGULAČNÍ OBVODY

Jednoduché regulační obvody tzv. jednosmyčkové nemusí vždy dostatečně zajistit požadovanou dynamiku, přesnost a statické vlastnosti regulačního obvodu a v takovém případě je vhodné použít regulátory se složitější (rozvětvenou) strukturou, tj. rozvětvené regulační obvody [3, 4]. Rozvětvené regulační obvody jsou už dnes hojně využívány a pokud je možnost zavádět další proměnné do regulačního obvodu, jako např. další měření fyzikálních veličin regulované soustavy, potom rozvětvené obvody umožňují výrazně posílit kvalitu regulace. Regulované soustavy s vyšším řádem setrvačnosti mají větší sklon k nestabilitě, jsou to právě soustavy složitějšího charakteru, kde je výhodné využívat další pomocné větve. Různé typy rozvětvených obvodů mají své specifické podmínky, při kterých je možné a výhodné je využít. Jedna z takových podmínek může být například možnosti dělení regulované soustavy na více částí s různými dynamickými vlastnostmi. [1, 3]

Rozdělení typů rozvětvených regulačních obvodů

- Obvod s pomocnou regulovanou veličinou
- Obvod s pomocnou akční veličinou
- Obvod s měřením poruchové veličiny
- Obvod se Smithovým prediktorem
- Obvod s vnitřním modelem

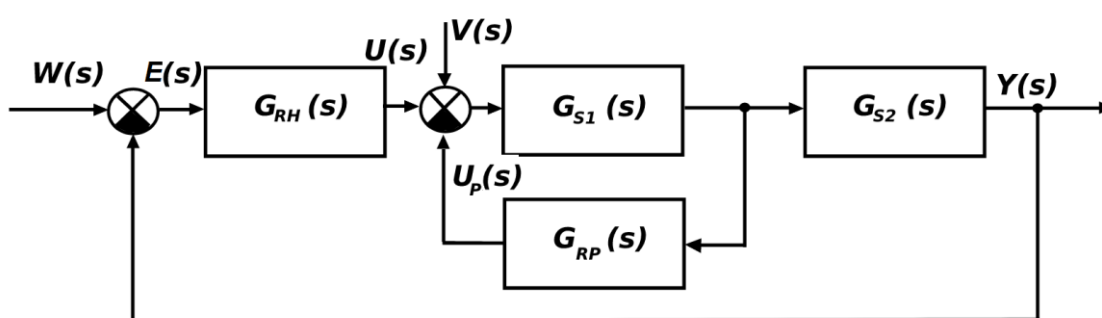
V případě, že obvod jednoduchý (jednosmyčkový) je schopen požadovanou kvalitu regulace téměř zajistit dostatečně, nemusí být použití rozvětvených obvodů i přes mírné zlepšení průběhu regulace vždy trvale výhodné, například z ekonomického hlediska. Snímání nebo přídavné působení na regulovanou soustavu je často zpravidla nákladné, technicky složitější a náročnější na údržbu a optimální nastavení.

Dnes už je možné běžně zavádět i složitější rozvětvené regulační obvody, to jsou tzv. sdružené rozvětvené obvody, kde je využíváno více typů těchto obvodů současně. Cílem této práce je především základní přehled, popis a výhody použití těchto obvodů s jednou pomocnou smyčkou a porovnání s obvody jednoduchými. [1]

3.1 Obvod s pomocnou regulovanou veličinou

Při použití obvodu s pomocnou regulovanou veličinou je stejně jako u většiny dalších rozvětvených obvodů nutná možnost rozdělení regulované soustavy na dvě části s různou setrvačností. Vnitřní smyčka by neměla obsahovat dopravní zpoždění, respektive část soustavy použitá pro vnitřní smyčku by měla být rychlejší než část soustavy v hlavní smyčce. Hlavní regulátor reaguje se zpožděním, ale pomůže zajistit nekmitavý průběh, stabilitu a měl by proto obsahovat integrační složku. Volíme tedy regulátor typu PI, PID. Při realizaci pomocného regulátoru se obvykle využívá jednoduchého typu P, nebo PI regulátoru. [1, 3]

Tento typ rozvětveného obvodu je možné zapojovat sériově (nazýván také “kaskádově”) (Obr. 6), nebo paralelně (Obr. 5).



Obr. 5: Blokové schéma obvodu s pomocnou regulovanou veličinou paralelně

Obvody s pomocnou regulovanou veličinou jsou využívány k regulaci elektrických pohonů, servomechanismů, ale především kotlů a jiných zařízení k přenosu tepelné energie, u nichž je většinou spousta setrvačných článků spojených do sebe a pokud zavedeme pomocné měření regulované veličiny co nejbližší vstupu do regulované soustavy, dostáváme rychlejší reakci na vznik poruchy, regulace obvodu se stává stabilnější a kvalitnější. U servomechanismů je kromě regulace natočení polohy hřídele možné využít pomocné větve s dalšími regulátory, např. pro regulaci proudu a otáček hřídele. [1, 2, 5]

3.1.1 Matematický model

Přenos řízení:

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

$$= \frac{G_{RH}(s)G_S(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{RH}(s)G_S(s)} \quad (3.1)$$

Přenos poruchy:

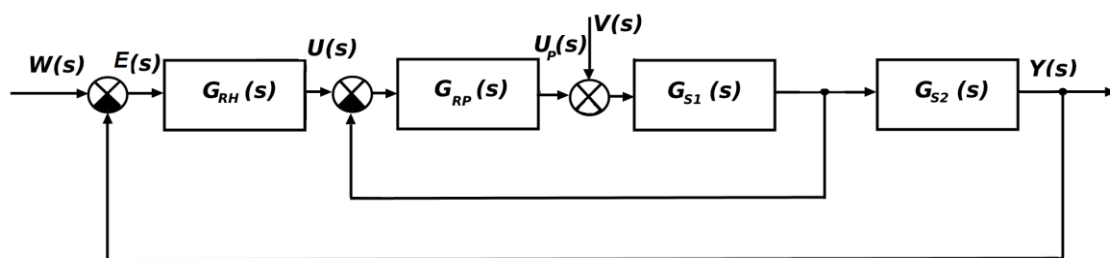
$$\begin{aligned} G_v(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} &= \frac{\frac{G_{S1}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)}{1 + \frac{G_{S1}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s)} G_{S2}(s)G_{RH}(s)}} = \\ &= \frac{G_{S1}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{S1}(s)G_{S2}(s)G_{RH}(s)} = \\ &= \frac{G_S(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{RH}(s)G_S(s)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Charakteristická rovnice:

$$1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{RH}(s)G_S(s) = 0 \quad (3.3)$$

3.1.2 Obvod s pomocnou regulovanou veličinou v sérii (kaskádově)

Podle blokového schématu (Obr. 6) lze odhadnout, že akční veličina hlavního regulátoru vstupuje jako žádaná hodnota do regulátoru pomocného. Při správném seřízení obou regulátorů je vnitřní smyčka soustavy eliminována, včetně poruch na ní působících a obvod se chová jako jednoduchý regulační obvod s regulátorem hlavním.



Obr. 6: Blokové schéma obvodu s pomocnou regulovanou veličinou v sérii (kaskádově)

3.1.3 Matematický model

Přenos řízení:

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

$$= \frac{G_{RH}(s)G_{RP}(s)G_S(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{RH}(s)G_{RP}(s)G_S(s)} \quad (3.4)$$

Přenos poruchy:

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

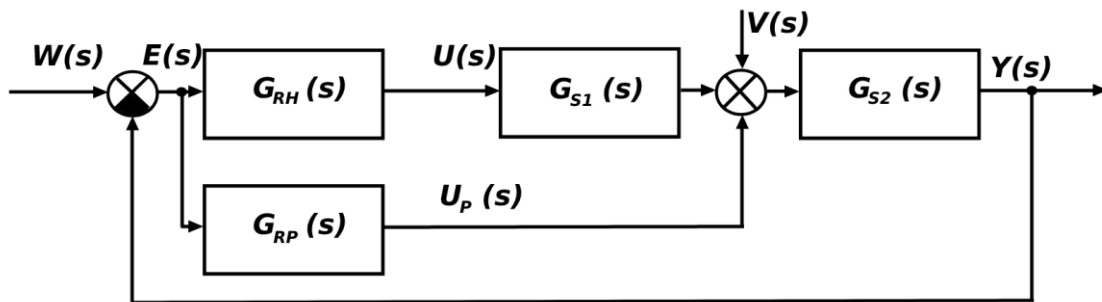
$$= \frac{G_{S1}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{S1}(s)G_{RP}(s) + G_{RH}(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)} \quad (3.5)$$

3.1.4 Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem

V praktickém případě, například při regulaci kotle vytápěného plynem je poruchová veličina změna tlaku v potrubí a změna teploty. Je nutné, aby signál poruchové veličiny změny teploty media kotle nejdříve prošel celou regulovanou soustavou, než dosáhne regulátoru, který následně reaguje. Při zavedení pomocné regulované veličiny např. snímání teploty pláště kotle, kde se teplota projeví rychleji, je reakce při kompenzaci poruchy pomocného regulátoru také rychlejší než v případě hlavního regulátoru. Taková regulace je vhodně zapojena formou kaskádního zapojení (Obr. 6). Zesílení pomocného regulátoru nebývá velké, přesto je schopen celkový obvod zajistit nekmitavý průběh. Nevýhoda použití pomocného regulačního obvodu může být stejně jako u dalších rozvětvených obvodů nutnost zavádět další technické prostředky pro snímání a přenos poruchové veličiny, což může být z ekonomického hlediska náročnější. [1, 2, 4]

3.2 Obvod s pomocnou akční veličinou

Působí-li zásah hlavní akční veličiny s určitým setrvačným zpožděním, pak je možné takové zpoždění částečně snížit pomocí rozvětveného obvodu s pomocnou akční veličinou. Pomocný regulátor by měl být schopen reagovat rychleji a většinou obsahuje proporcionální, případně derivační složku. Hlavní regulátor potom odstraňuje případnou trvalou regulační odchylku, a proto musí obsahovat integrační složku. Blokové schéma (Obr. 7) ukazuje, že pomocná akční veličina vynechá na své cestě signálu zpožďující členy soustavy a má tím možnost působit na regulovanou soustavu přímo razantnější dynamikou. [1, 2, 3]



Obr. 7: Blokové schéma obvodu s pomocnou akční veličinou

Použití obvodu s pomocnou akční veličinou je navrženo tak, že je soustava rozdělena na rychlejší a pomalejší část soustavy. Rychlejší část soustavy je ve vnější smyčce obvodu a pomalejší část je v obvodu vnitřním. Výhoda takového zapojení umožňuje pomocnému regulátoru působit na rychlejší část soustavy a tím urychlit reakci akční veličiny na regulovanou soustavu a obvod se tak rychleji stabilizuje na požadované hodnotě. Obvody s pomocnou akční veličinou jsou často využívány při regulacích teplot výměníků nebo ocelových pásů. [1, 2, 3]

3.2.1 Matematický model

Přenos řízení:

$$\begin{aligned} G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} &= \frac{(G_{RH}(s)G_{S1}(s) + G_{RP}(s))G_{S2}(s)}{1 + (G_{RH}(s)G_{S1}(s) + G_{RP}(s))G_{S2}(s)} = \\ &= \frac{G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Přenos poruchy:

$$\begin{aligned} G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} &= \frac{G_{S2}(s)}{1 + G_{S2}(s)(G_{RH}(s)G_{S1}(s) + G_{RP}(s))} = \\ &= \frac{G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Charakteristická rovnice:

$$1 + G_{RH}(s)G_S(s) + G_{RP}(s)G_{S2}(s) = 0 \quad (3.8)$$

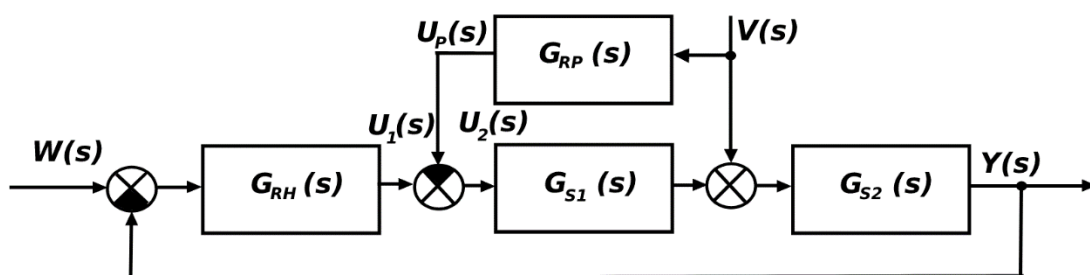
3.2.2 Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem

Velmi často je tento typ obvodu používán pro teplotu výměníku, kde je hlavní akční veličina ventil přívodu páry do výměníku. V případě jednoduchého regulačního obvodu je při změně přívodu páry značné setrvačné zpoždění teplot, a tím je snížena dynamika celého obvodu. Zapojením pomocné akční veličiny na přívod vody by např. při poklesu teploty byl snížen průtok vody, ta by měla možnost převzít tepelnou energii rychleji a celá regulace by měla lepší dynamiku a odezvu na poruchové vlivy. [1, 2, 5]

Nevýhodou použití pomocné akční veličiny může být konstrukční náročnost realizace, kde už se nejedná o pouhé měření veličin, ale celé zařízení, které akční zásah vykonává. [1, 2, 5]

3.3 Obvod s měřením poruchové veličiny

Jestliže je technicky možné poruchovou veličinu měřit, tak s použitím rozvětveného obvodu výrazně posílíme kvalitu takového obvodu. Pomocné měření poruchové veličiny nemá na přenos řízení vliv a dynamické vlastnosti (stabilita) obvodu tím nejsou ovlivněny. Rozvětvený regulační obvod s měřením poruchové veličiny obsahuje kompenzátor, který na základě měřené poruchové veličiny vytváří její kompenzaci (protipůsobení) a kompenzuje její vliv na regulovanou veličinu. Kompenzátor pro svoji jednoduchost a jednostrannou úlohu není vhodné nazývat regulátorem. [1, 2]



Obr. 8: Blokové schéma obvodu s měřením poruchové veličiny

Rozvětvené regulační obvody s měřením poruchové veličiny jsou výhodné například v chemickém průmyslu nebo v tepelné technice. [1, 2]

Kdyby platila rovnost $G_{vy}(s) = 0$, potom by poruchová veličina neměla žádný vliv na daný rozvětvený obvod. Této vlastnosti se říká úplná invariantnost (neměnnost) vzhledem k poruchové veličině a je v praxi obtížně realizovatelná. [1]

3.3.1 Matematický model

Přenos řízení:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{RH}(s)G_S(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s)} \quad (3.9)$$

Přenos poruchy:

$$G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{[1 - G_{RP}(s)G_{S1}(s)]G_{S2}(s)}{1 + G_{RH}(s)G_{S1}(s)G_{S2}(s)} = \frac{G_{S2}(s) - G_{RP}(s)G_S(s)}{1 + G_{RH}(s)G_S(s)} \quad (3.10)$$

Vhodné nastavení kompenzátoru pro dosažení úplné invariantnosti (neměnnosti) k poruchové veličině (při působení poruch se nemění regulovaná veličina)

$$G_v(s) = 0, \quad G_{S2}(s) - G_{RP}(s)G_S(s) = 0 \quad (3.11)$$

Přenos kompenzátoru:

$$G_{RP}(s) = \frac{G_{S2}(s)}{G_S(s)} = \frac{G_{S2}(s)}{G_{S1}(s)G_{S2}(s)} = \frac{1}{G_{S1}(s)} \quad (3.12)$$

3.3.2 Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem

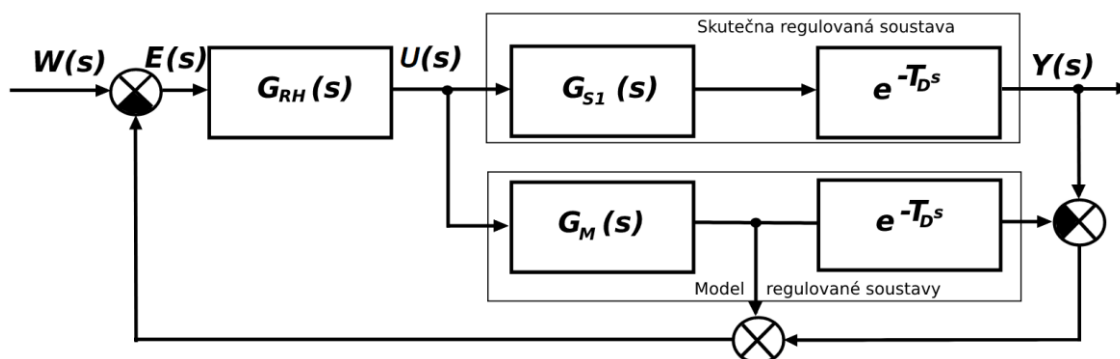
Výhoda obvodu s pomocným měřením poruchové veličiny je hlavně snížením hodnoty přenosu poruchy, kde hlavní regulátor není nucen reagovat na větší změny regulační odchylky poruchové veličiny. Úplné odstranění regulační odchylky je ale výjimečné, zpožděný zásah akční veličiny a nepřesné měření mají negativní vliv. [1, 2]

V praktickém případě například při vytápění domu je změna teplot hlavní poruchovou veličinou. Použitím jednoduchého regulačního obvodu s měřením teploty v domě je teplota regulována s výrazným dopravním zpožděním. Kotel ohřeje vodu, která je čerpána do topení, které ohřívá médium v domě a tím nastává nežádoucí dopravní zpoždění. Při pomocném měření poruchových veličin, umístěním dalšího měření, měřením venkovní teploty začne kotel ohřívát vodu ještě dříve, než se změna teploty projeví na místnostech budovy a poruchová veličina je kompenzována.

Nevýhodou obvodu s měřením poruchové veličiny může být nemožnost technickými prostředky poruchovou veličinu měřit. [4]

3.4 Obvod se Smithovým prediktorem regulované soustavy

Dopravní zpoždění má negativní vliv na stabilitu regulačních obvodů a v mnoha případech, kdy pracujeme pouze s parametry regulátorů, je náročné dosáhnout úplné stability obvodu. V takových případech je snahou vliv dopravního zpoždění snížit, a to umožňuje rozvětvený obvod se Smithovým prediktorem. Jako jedna z nejstarších metod řízení spočívá v zavedení zpětné vazby, která obsahuje model regulované soustavy, včetně jejího dopravního zpoždění. Na schéma (Obr. 9) je zřejmé, že obvod obsahuje pouze jeden (hlavní) regulátor $G_{RH}(s)$, který řídí skutečnou regulovanou soustavu, i model regulované soustavy současně. Výstup modelu je porovnáván s výstupem skutečné regulované soustavy a tento rozdíl je přičten k regulované veličině ve zpětné vazbě, a tím je vliv dopravního zpoždění odečten.



Obr. 9: Blokové schéma obvodu se Smithovým prediktorem

Blokové schéma ukazuje (Obr. 9), že pokud by byl model regulované soustavy identický s výstupní hodnotou skutečné regulované soustavy je v ideálním případě vliv dopravního zpoždění v regulační veličině nulový. Je výjimečné, aby model regulované soustavy přesně vystihl vlastnosti skutečného procesu regulované soustavy, pokud tedy proces obsahuje jakékoliv dopravní zpoždění, stále platí, že dopravní zpoždění je jen přibližujícím odhadem a hodnoty se mohou lišit. [1, 2, 3]

3.4.1 Matematický model

Přenos řízení

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

$$= \frac{G_{RH}(s)G_S(s)e^{T_D s}}{1 + G_{RH}(s)G_M(s) + G_{RH}(s)e^{T_D s} [G_S(s) - G_M(s)]} \quad (3.13)$$

Charakteristická rovnice

$$1 + G_{RH}(s)G_M(s) + G_{RH}(s)e^{T_D s} [G_S(s) - G_M(s)] = 0 \quad (3.14)$$

Pokud $G_S(s) = G_M(s)$, jmenovatel je bez dopravního zpoždění $e^{-T_D s}$

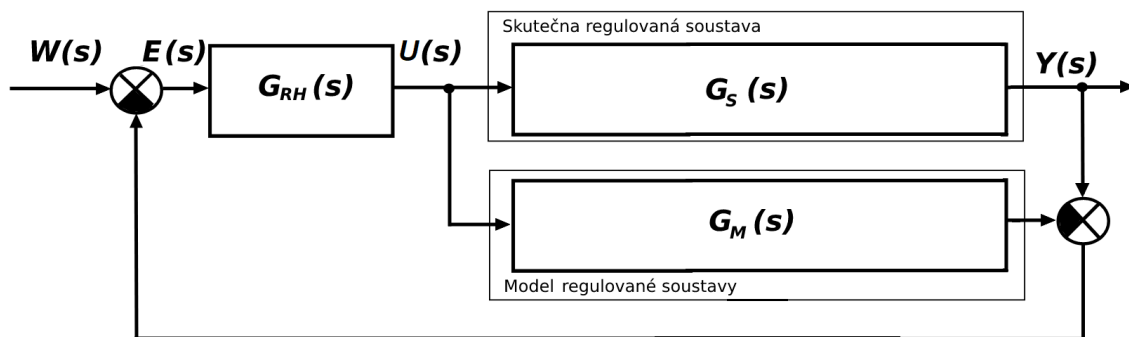
$$1 + G_{RH}(s)G_M(s) = 0 \quad (3.15)$$

3.4.2 Porovnání s jednoduchým regulačním obvodem

Použitelnost Smithova prediktoru často výrazně ovlivní snadná regulovatelnost systému. Vlastnost obvodu snižovat vliv dopravního zpoždění je v praxi výhodná, protože dopravní zpoždění většinou výrazně zhoršuje stabilitu regulace, zároveň je ale model soustavy náročný na technickou realizaci. Ve většině případů je model dopravního zpoždění oproti reálné soustavě s menšími rozdíly a tyto rozdíly jsou následně jediné zpoždění, které jde do regulátoru. [1, 2, 3]

3.5 Obvod s vnitřním modelem regulované soustavy

Obvod s vnitřním modelem regulované soustavy je další ze způsobu zapojení vhodný zejména pro soustavy s větším dopravním zpožděním. Obsahuje pouze jeden regulátor, regulovanou soustavu a smyčku, která je zapojena paralelně s regulovanou soustavou a obsahuje matematický model regulované soustavy. Princip funkce je nastavený tak, že regulátor působí na regulovanou soustavu i její model současně a následně na výstupu odečítá ve zpětné vazbě i výstup modelu regulované soustavy. [1, 2, 3]



Obr. 10: Blokové schéma obvodu s vnitřním modelem regulované soustavy

Výhodou může být určitá predikce chování regulované soustavy a schopnost regulátoru reagovat včas na neočekávané změny. Realizace obvodu s vnitřním modelem je stejně, jako u Smithova prediktoru poměrně náročná a vyžaduje dokonalou znalost možného chování regulované soustavy, které je převedeno do výpočetních modelů. [1, 2, 3]

4 PRAKTICKÉ POROVNÁNÍ JEDNODUCHÝCH A ROZVĚTVENÝCH REGULAČNÍCH OBVODŮ

Simulační a praktické porovnání kvality regulace jednotlivých obvodů je realizováno použitím programu Matlab R2016a a jeho simulačním prostředím Simulink [10]. Zde jsou namodelovaná schémata funkčních bloků. Na začátku praktické části je popsáno schéma jednoduchého regulačního obvodu a popis nastavených parametrů funkčních bloků, které jsou použity u všech modelů regulačních obvodů.

V praktické části jsou simulovány průběhy kvality regulace těchto typů obvodů

- RRO s pomocnou regulovanou veličinou paralelně a v sérii
- RRO s pomocnou akční veličinou
- RRO s pomocným měřením poruchové veličiny

Nejdříve je namodelován jednoduchý regulační obvod (dále JRO), který bude porovnán se zvoleným typem rozvětveného regulačního obvodu. Pro namodelování JRO je zvolen následující postup.

- Je zvolen přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním
- Je namodelované blokové schéma JRO
- Jsou vypočítané a nastavené parametry regulátoru JRO
- Je spuštěna simulace a výsledné hodnoty kvality regulace jsou změřeny

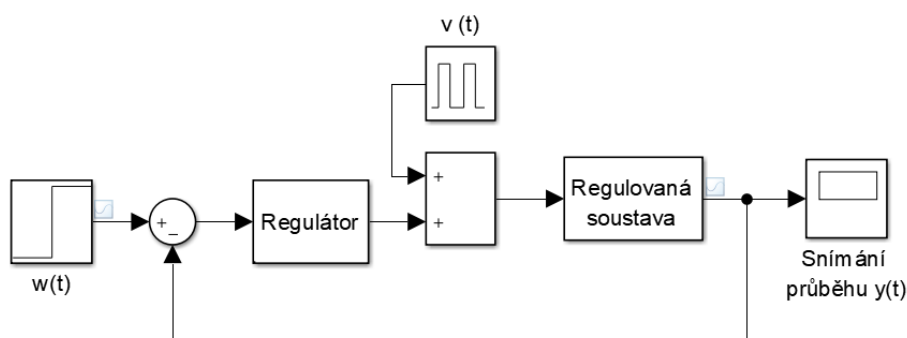
Následně je namodelován zvolený typ rozvětveného regulačního obvodu (dále RRO), kde je použitý identický přenos regulované soustavy jako u JRO. Pro namodelování RRO je zvolen následující postup.

- Přenos regulované soustavy je rozdělen na dvě části s různou dynamikou
- Je namodelované blokové schéma RRO
- Jsou vypočítané a nastavené parametry pomocného regulátoru
- Jsou dopočítány parametry hlavního regulátoru (pokud nelze použít stejné z JRO)
- Je spuštěna simulace a výsledné hodnoty kvality regulace jsou změřeny

Nakonec jsou hodnoty kvality regulace JRO a RRO vyhodnoceny matematicky a zapsány do tabulky.

4.1 Jednoduchý regulační obvod

Jednoduchý regulační obvod (Obr. 11) a popis použitých bloků.



Obr. 11: Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu

Poruchová veličina $v(t)$ je nastavená jako obdélníkový jednotkový skok, působí jednorázově kladným součtem na obvod a její působení je se zpožděním podle typu obvodu 50 nebo 60 s. Šířka impulzu je 1 % periody a výška amplitudy je 0.5. Skoková změna signálu k žádané hodnotě $w(t)$ je nastavena od $0 \rightarrow 1$. Tolerované pásmo stability je $\pm 5\%$. Při měření výšky amplitudy vlivu poruchy je hodnota 1 (také velikost skokové změny v čase) brána jako 100 %.

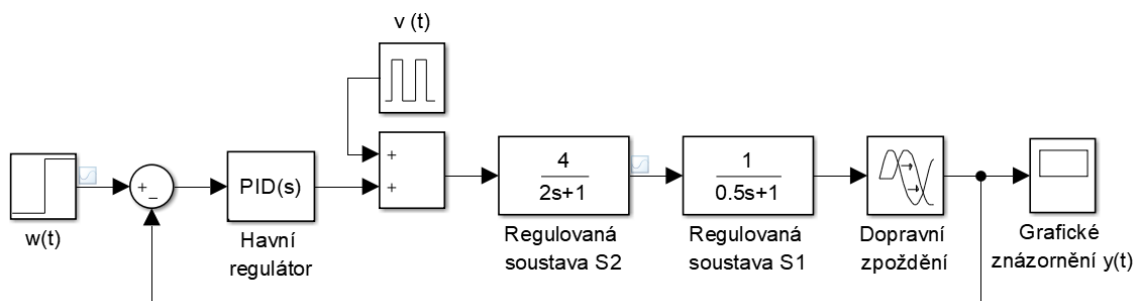
4.2 Obvod s pomocnou regulovanou veličinou

4.2.1 Jednoduchý regulační obvod sériového (kaskádového) zapojení

Zadaná soustava je daná přenosem

$$G_S(s) = \frac{4}{(2s + 1)(0.5s + 1)} e^{-4s} \quad (4.1)$$

Blokové schéma JRO s použitím PID regulátoru (Obr.12)



Obr. 12: Blokové schéma JRO

Parametry soustavy (4.1) jsou $k = 4, T_1 = 2, T_2 = 0.5, T_D = 4$

Návrh parametrů PID regulátoru JRO použitím tabulky (Tab. 2) a výše uvedených parametrů soustavy (4.1) dostáváme

$$T_i = T_1 + T_2 = 2.5 \quad (4.2)$$

$$T_d = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2} = 0.4 \quad (4.3)$$

Použitím tabulky (Tab. 4) a vztahu (2.6) dostáváme při hodnotě relativního překmitu $\kappa = 0$ následující zesílení otevřeného regulačního obvodu

$$a = \frac{1}{\beta T_D} = \frac{1}{2.718 \cdot 4} = 0.0919 \quad (4.4)$$

Výsledné zesílení r_0 a vztahy parametrů podle tabulky (Tab. 3) je potom

$$r_0 = \frac{a T_i}{k} = \frac{0.0919 \cdot 2.5}{4} = 0.0574 \quad (4.5)$$

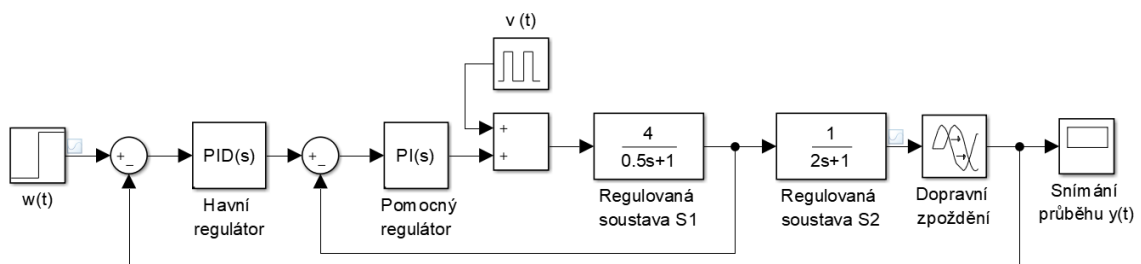
Tab. 5: Parametry PID regulátoru JRO

Parametr	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
r_0	0.057	0.108
T_i	2.5	2.5
T_d	0.4	0.4

4.2.2 Rozvětvený regulační obvod sériového (kaskádového) zapojení

Pro návrh parametrů regulátorů a splnění podmínek realizace RRO je vhodné rozdělení soustavy (4.1) na dvě části. Soustava s rychlejším přenosem S_1 (4.6) a přenos pomalejší soustavy S_2 (4.7), která je včetně dopravního zpoždění. Soustava S_1 je díky rychlejšímu přenosu vhodná pro regulátor vnitřní smyčky, kde bude použitý pomocný regulátor PI a pro soustavu S_2 hlavního obvodu vnější smyčky bude použitý regulátor PID.

Blokové schéma rozvětveného regulačního obvodu RRO (Obr. 13)



Obr. 13: Blokové schéma RRO (kaskádové) sériové zapojení

Zadaná soustava (4.1) je rozdělena na dvě části (4.6) a (4.7)

$$G_{S1}(s) = \frac{4}{(0.5s + 1)} \quad (4.6)$$

$$G_{S2}(s) = \frac{1}{(2s + 1)} e^{-4s} \quad (4.7)$$

Návrh vnitřního regulátoru PI pro přenos soustavy $G_{S1}(s)$ (4.6), která má parametry $k = 4$, $T_i = T_1 = 0.5$ a vztahem s použitím tabulky (Tab. 3)

$$r_0 = \frac{2T_i}{2kT_w} = \frac{2 \cdot 0.5}{2 \cdot 4 \cdot 0.5} = 0.25 \quad (4.8)$$

Použitím uvedených parametrů (4.8) a podle tabulky (Tab. 1) je dán přenos PI regulátoru

$$G_R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = 0.25 \left(1 + \frac{1}{0.5s}\right) = \frac{(0.125s + 0.25)}{0.5s} \quad (4.9)$$

Řešením hlavního regulačního obvodu vnější smyčky a parametrů hlavního regulátoru je nahrazení vnitřního obvodu pomocného regulátoru použitím přenosu (3.4).

Výpočet přenosu pomocného regulátoru a přenosu soustavy vnitřní smyčky (4.10)

$$\begin{aligned} G_{S1}^*(s) &= \frac{G_{RP}(s)G_{S1}(s)}{1 + G_{RP}(s)G_{S1}(s)} = \frac{\frac{(0.125s + 0.25)}{0.5s} \frac{4}{(0.5s + 1)}}{1 + \frac{(0.125s + 0.25)}{0.5s} \frac{4}{(0.5s + 1)}} = \\ &= \frac{0.5s + 1}{0.25(s^2 + 4s + 4)} = \frac{1}{0.5s + 1} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Soustava vnitřního regulačního obvodu je nahrazena výše uvedenou soustavou $G_{S1}^*(s)$ (4.10) a společně s přenosem (4.7) je vytvořen přenos soustavy $G_S^*(s)$ (4.11) hlavního regulačního obvodu, který odpovídá přenosu

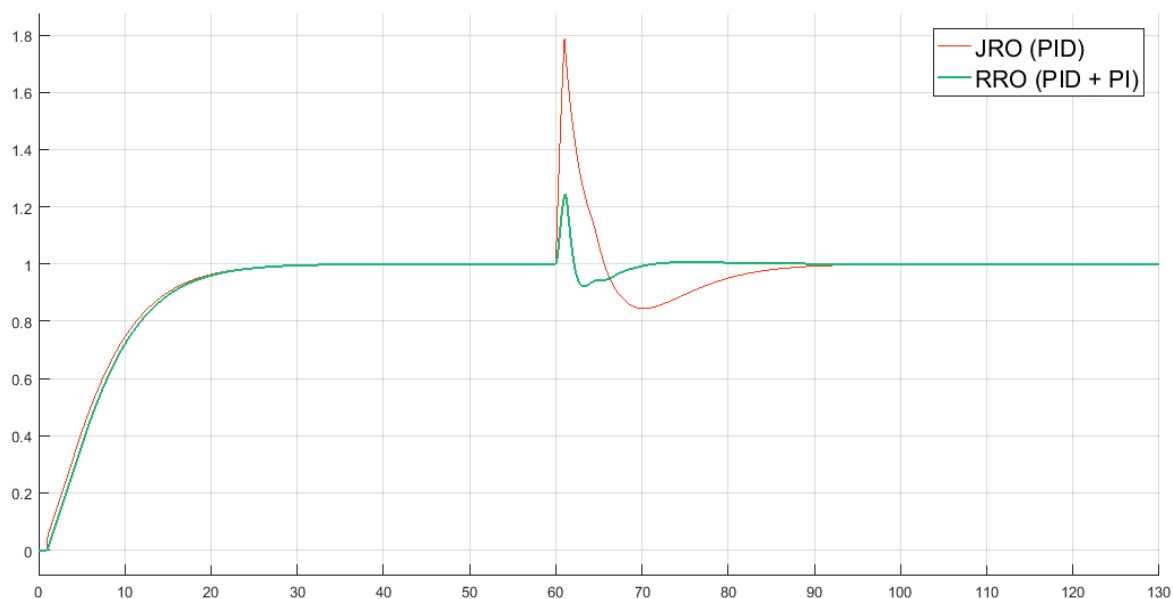
$$G_S^*(s) = \frac{1}{(0.5s + 1)(2s + 1)} e^{-4s} \quad (4.11)$$

Parametry výše uvedené soustavy (4.11) jsou $k = 1$, $T_1 = 2$, $T_2 = 0.5$, $T_D = 4$ a z nich je výpočet parametrů hlavního regulátoru v (Tab. 6)

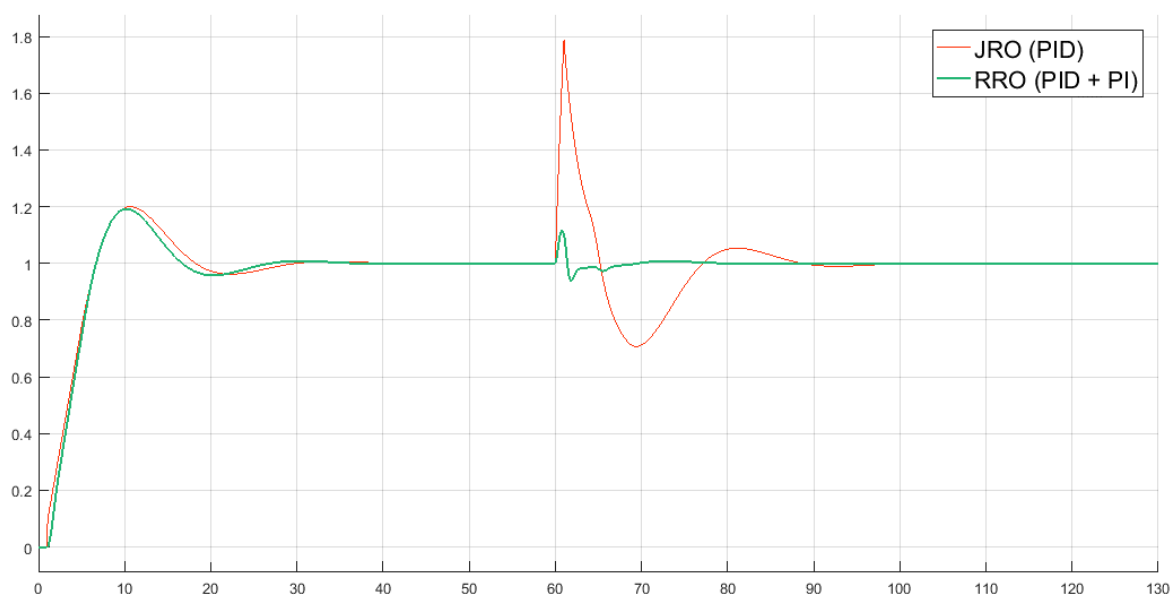
Tab. 6: Parametry PID regulátoru RRO

Parametr	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
r_0	0.229	0.432
T_i	2.5	2.5
T_d	0.4	0.4

Porovnání průběhů JRO a RRO



Obr. 14: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0$



Obr. 15: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0.2$

Hodnoty kvality regulace

Tab. 7: Tabulka hodnot průběhů JRO a RRO (Obr. 14) a (Obr. 15)

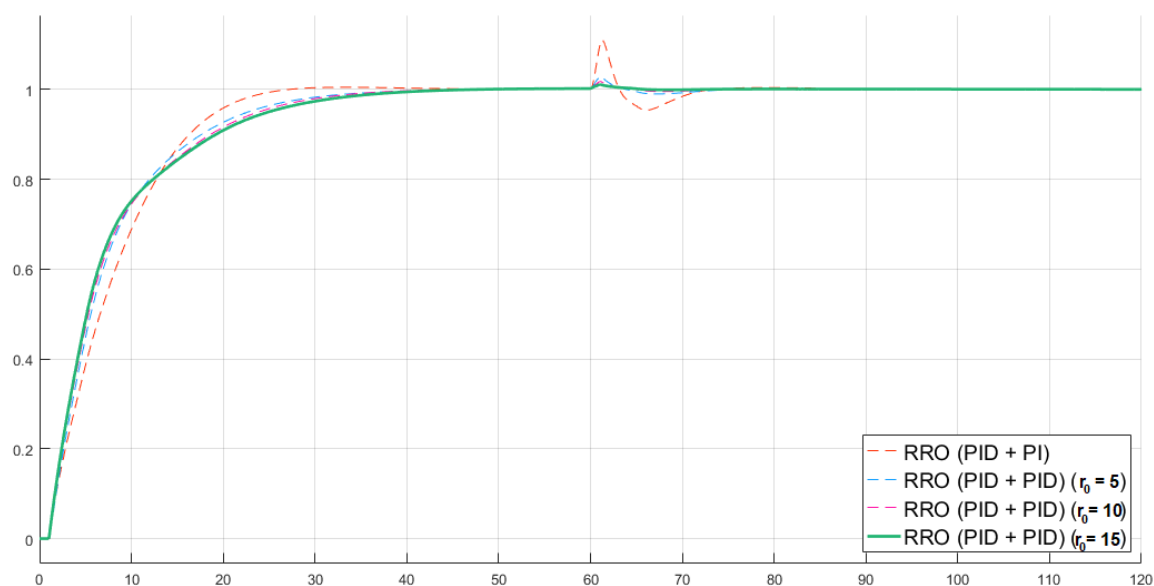
	Obvod	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
Doba regulace t_r [s]	JRO	18.9	16.4
	RRO	18.9	15.2
Výchylka při poruše [%]	JRO	79	79
	RRO	24	12
Doba do ustálení po zásahu poruchy [s]	JRO	20	23.1
	RRO	6.2	2.1

Porovnání průběhů RRO pro jiné nastavení regulátorů

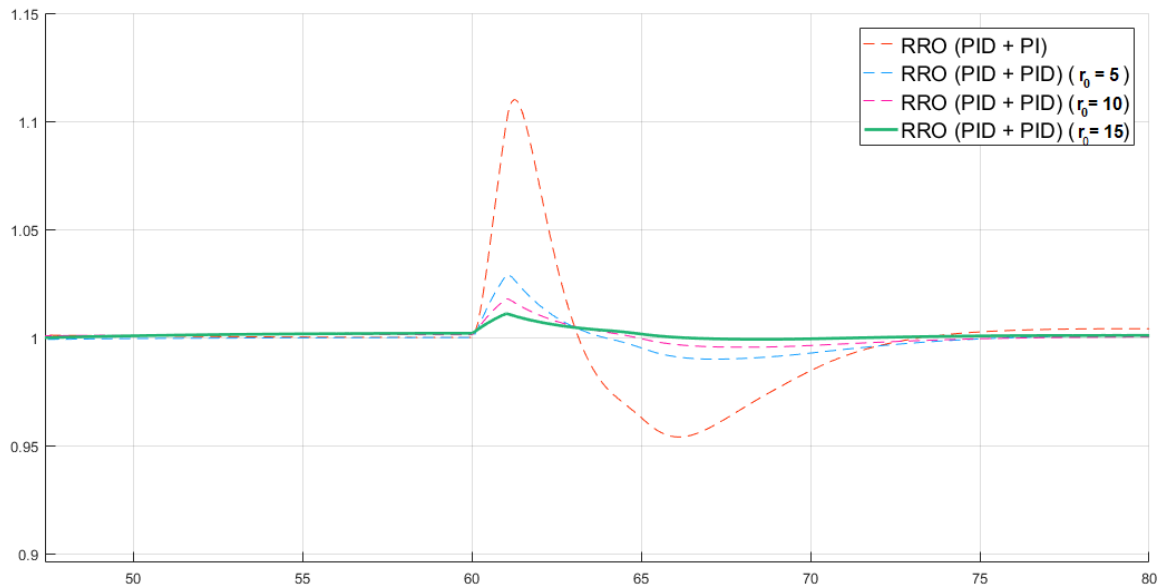
Použití dvou (PID + PID) regulátorů s významným zesílením regulátoru pomocného, je vyznačeno v grafu (Obr.16, Obr. 17) zelenou barvou. Předchozí průběh RRO PID + PI z (Obr. 14) je vyznačen červenou barvou. Zde byla výchylka poruchové veličiny výrazně potlačena.

Tab. 8: Různá nastavení parametrů regulátoru PID u RRO (Obr. 16)

Parametr	$\kappa = 0$		
r_0	5	10	15
T_i	1	1	1
T_d	1	1	1



Obr. 16: Vliv poruchy RRO při relativním překmitu $\kappa = 0$



Obr. 17: Zvětšený detail (Obr. 16) vliv poruchy RRO

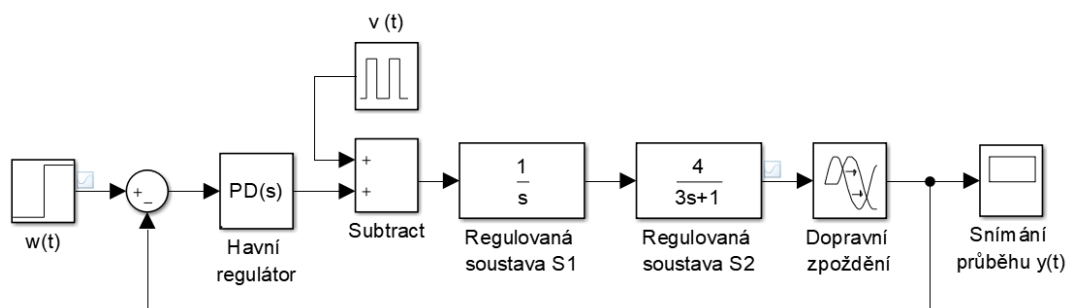
4.2.3 Jednoduchý regulační obvod paralelního zapojení

Zapojení JRO je realizováno použitím PD regulátoru.

Zadaná soustava je daná přenosem

$$G_s(s) = \frac{4}{s(3s + 1)} e^{-2s} \quad (4.12)$$

Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu JRO (Obr. 18)



Obr. 18: Blokové schéma JRO

Postup pro výpočet parametrů regulátoru je identický jako u zapojení v sérii (str. 36).

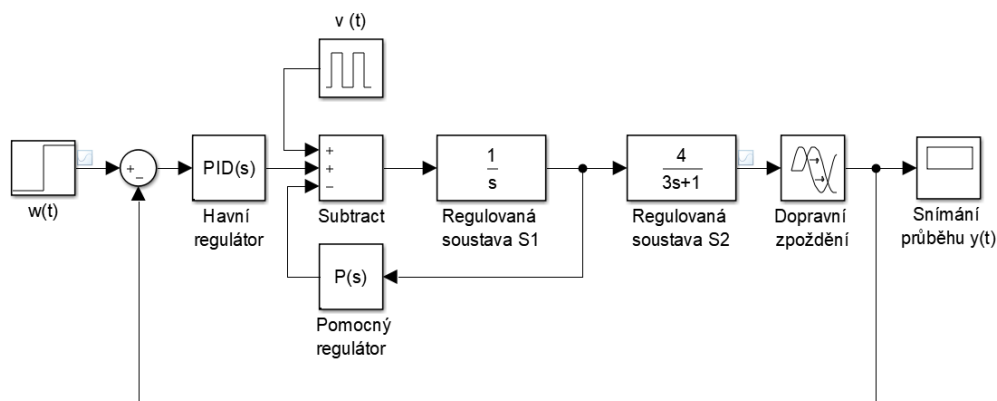
Tab. 9: Parametry PD regulátoru pro JRO

Parametr	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
r_0	0.045	0.086
T_d	3	3

4.2.4 Rozvětvený regulační obvod paralelního zapojení

Zapojení RRO je realizováno pomocí PID regulátoru pro hlavní smyčku a P regulátoru pro smyčku pomocnou.

Blokové schéma rozvětveného regulačního obvodu RRO (Obr. 19)



Obr. 19: Blokové schéma RRO s pomocnou regulovanou veličinou paralelního zapojení

Zadaná soustava (4.12) je rozdělena na dvě části (4.13) a (4.14)

$$G_{S1}(s) = \frac{1}{s} \quad (4.13)$$

$$G_{S2}(s) = \frac{4}{(3s + 1)} e^{-2s} \quad (4.14)$$

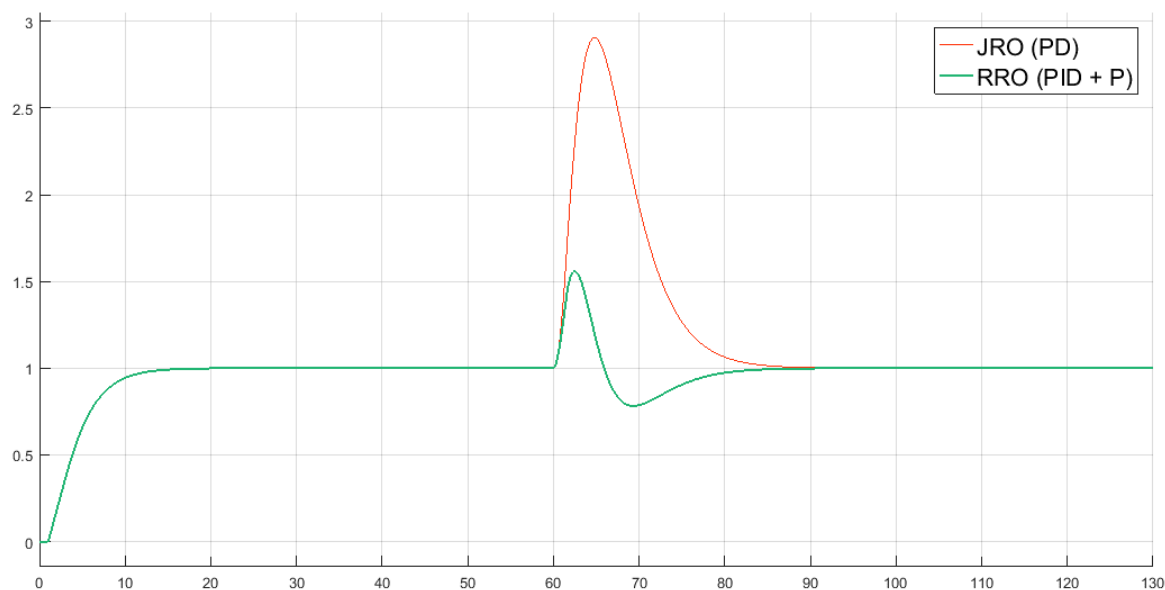
Výsledné parametry P regulátoru RRO soustavy vnitřní smyčky S_1 (4.13)

$$r_0 = 1 \quad (4.15)$$

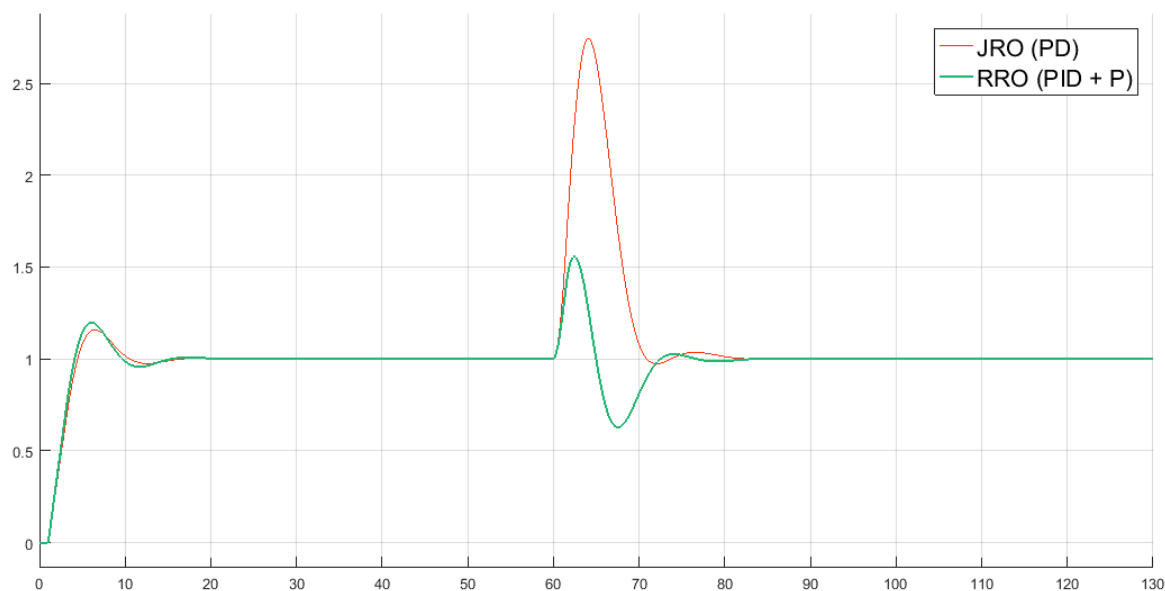
Tab. 10: Parametry PID regulátoru RRO

Parametr	$K = 0$	$K = 0.2$
r_0	0.18	0.347
T_i	4	4
T_d	0.75	0.75

Porovnání průběhů JRO a RRO



Obr. 20: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0$



Obr. 21: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0.2$

Hodnoty kvality regulace

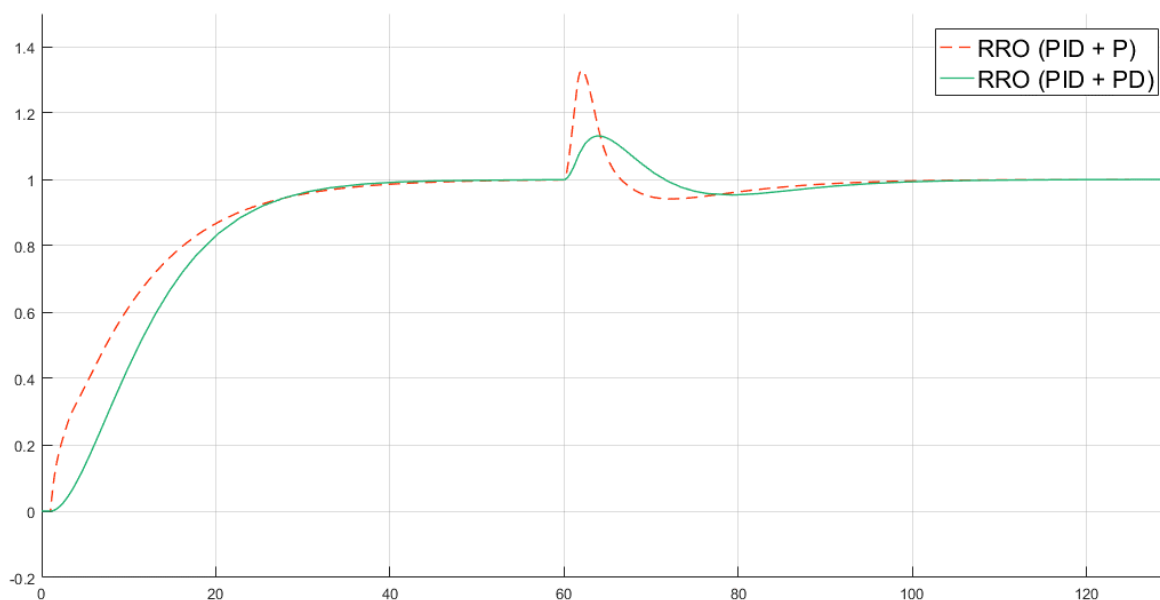
Tab. 11: Tabulka hodnot průběhů JRO a RRO (Obr. 20) a (Obr. 21)

	Obvod	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
Doba regulace t_r [s]	JRO	10.1	9.1
	RRO	10.1	8.8
Výchylka při poruše [%]	JRO	191	174
	RRO	56	56
Doba do ustálení po zásahu poruchy [s]	JRO	20.6	10.2
	RRO	17.3	11.6

Porovnání průběhů RRO pro jiné nastavení regulátorů

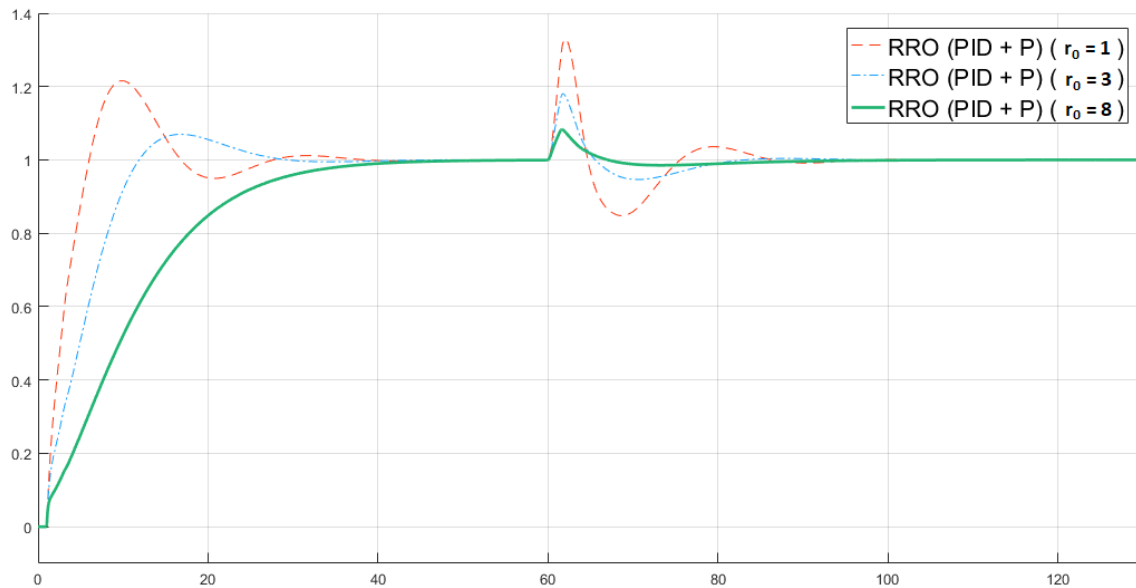
Při minimálním překmitu je možné pro zlepšení odezvy na poruchovou veličinu zapojení pomocného regulátoru s derivační složkou PD s parametry $r_0 = 1.5$, $T_d = 8$ (Obr. 22). Původní průběh RRO z (Obr. 20) je vyznačený červenou barvou.

Další nastavení odlišných parametrů pomocného regulátoru P je na (Obr. 23).



Obr. 22: Porovnání RRO při relativním překmitu $\kappa = 0$

Různá nastavení parametrů P regulátoru



Obr. 23: Porovnání RRO při relativním překmitu $\kappa = 0.2$

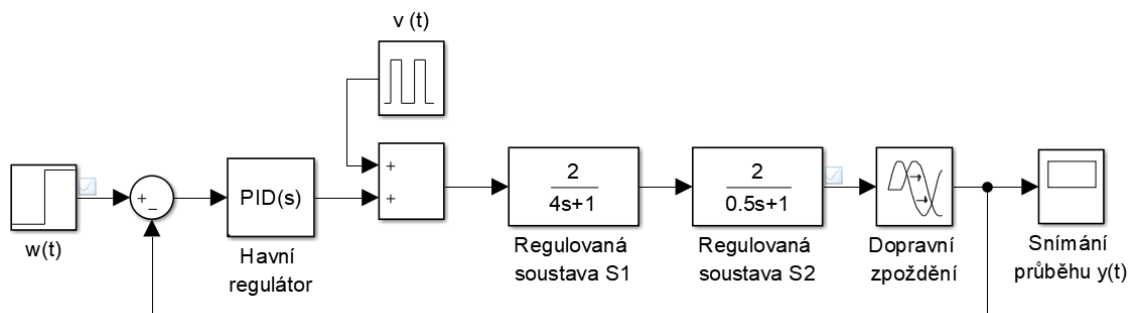
4.3 Obvod s pomocnou akční veličinou

4.3.1 Jednoduchý regulační obvod s pomocnou akční veličinou

Zadaná soustava je daná přenosem

$$G_S(s) = \frac{4}{(4s + 1)(0.5s + 1)} e^{-2s} \quad (4.16)$$

Blokové schéma JRO s použitím PID regulátoru (Obr. 24)



Obr. 24: Blokové schéma JRO

Tab. 12: Parametry PID regulátoru JRO

Parametr	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
r_0	0.103	0.19
T_i	4.5	4.5
T_d	0.4	0.4

4.3.2 Rozvětvený regulační obvod s pomocnou akční veličinou

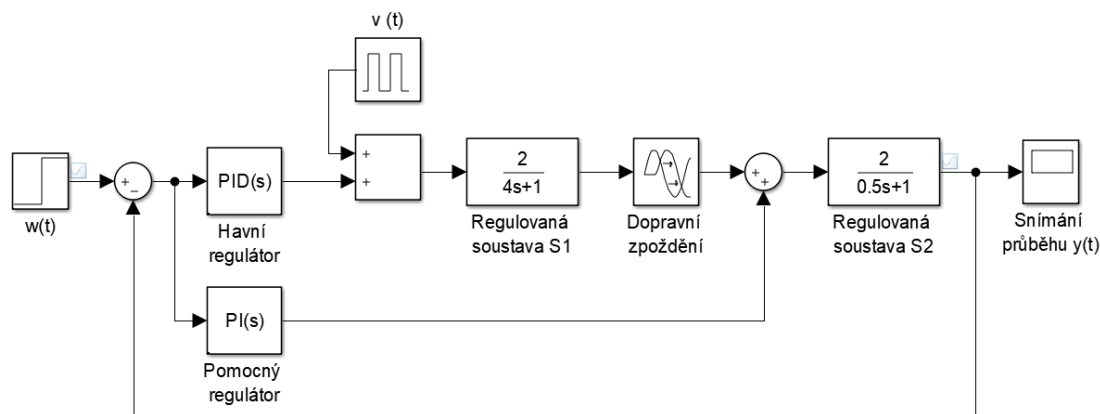
Zapojení RRO je realizováno pomocí PID regulátoru pro hlavní smyčku a PI regulátoru pro smyčku pomocnou.

Zadaná soustava (4.16) je rozdělena na dvě části (4.17) a (4.18)

$$G_{S1}(s) = \frac{2}{(4s + 1)} e^{-2s} \quad (4.17)$$

$$G_{S2}(s) = \frac{2}{(0.5s + 1)} \quad (4.18)$$

Blokové schéma RRO (Obr. 25)



Obr. 25: Blokové schéma RRO s pomocnou akční veličinou

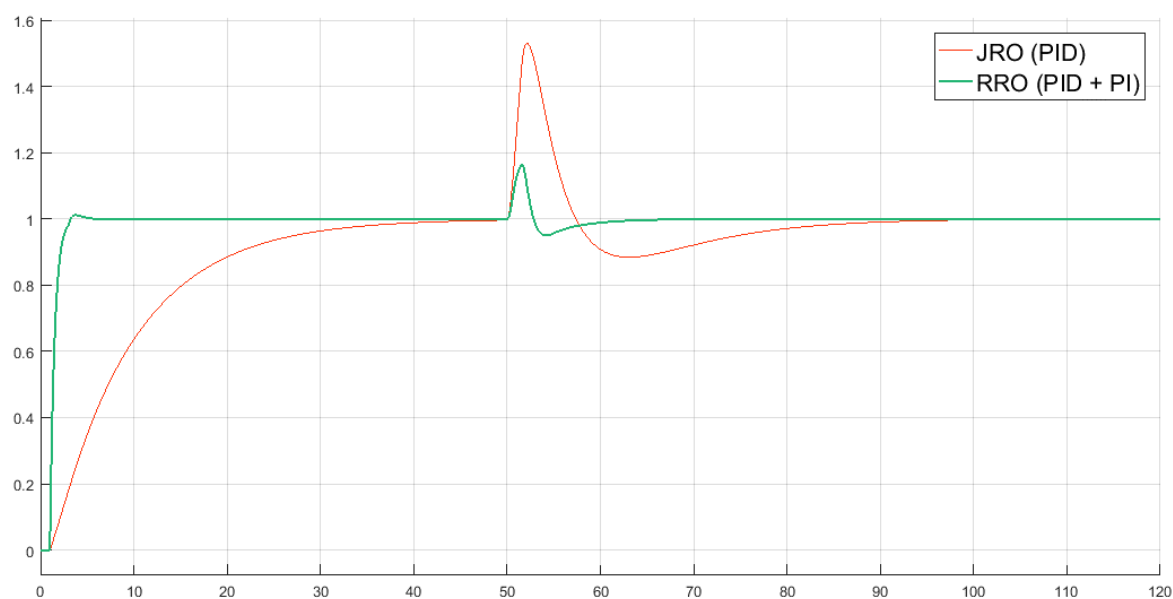
Výsledné parametry pomocného PI regulátoru RRO pro soustavu S_2 (4.18)

Tab. 13: Parametry PI regulátoru RRO

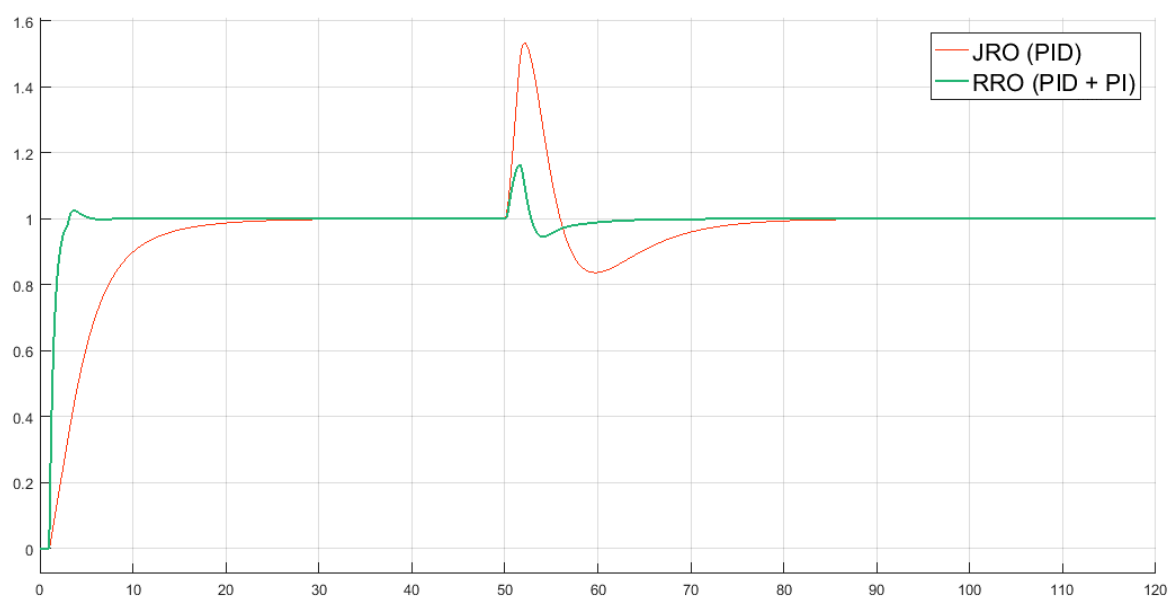
Parametr	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
r_0	0.5	0.5
T_i	1	1

Parametry pro hlavní PID regulátor u RRO budou identické jako u JRO (Tab. 12).

Porovnání průběhů JRO a RRO



Obr. 26: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0$



Obr. 27: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0.2$

Hodnoty kvality regulace

Tab. 14: Tabulka hodnot průběhů JRO a RRO (Obr. 26) a (Obr. 27)

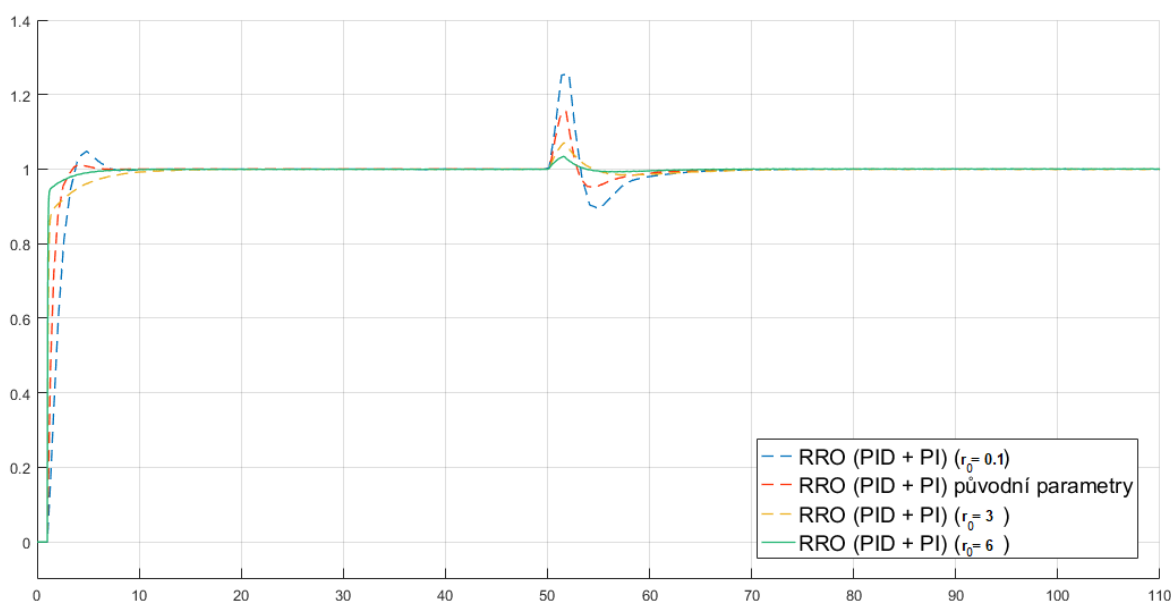
	Obvod	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
Doba regulace t_r [s]	JRO	27.9	12.7
	RRO	2.5	2.5
Výchylka při poruše [%]	JRO	53	53
	RRO	17	17
Doba do ustálení po zásahu poruchy [s]	JRO	24.1	18.3
	RRO	4.6	4.6

Porovnání průběhů RRO pro jiné nastavení regulátorů

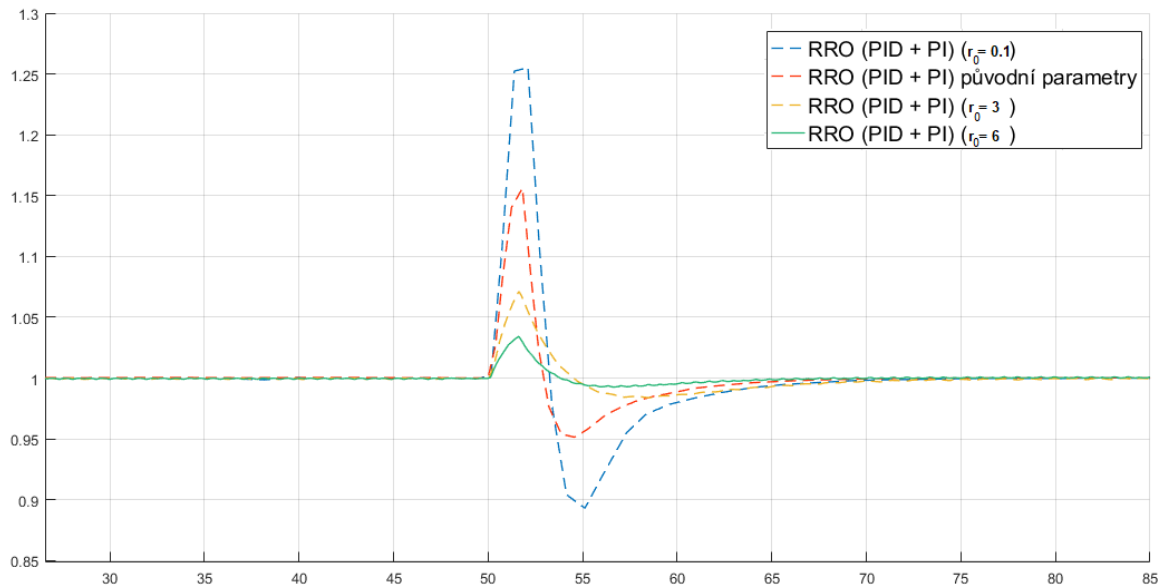
Různá další nastavení zesílení pomocného PI regulátoru u RRO (Obr. 28) dobu regulace zrychlují k dosažení žádané hodnoty a výrazně snižují vliv poruchové veličiny.

Tab. 15: Různá nastavení parametrů regulátoru PI u RRO (Obr. 28)

Parametr	$\kappa = 0$			
r_0	0.1	0.5	3	6
T_i	0.5	1	1	3



Obr. 28: Porovnání RRO při $\kappa = 0$



Obr. 29: Zvětšený detail (Obr. 28), vliv poruchy RRO

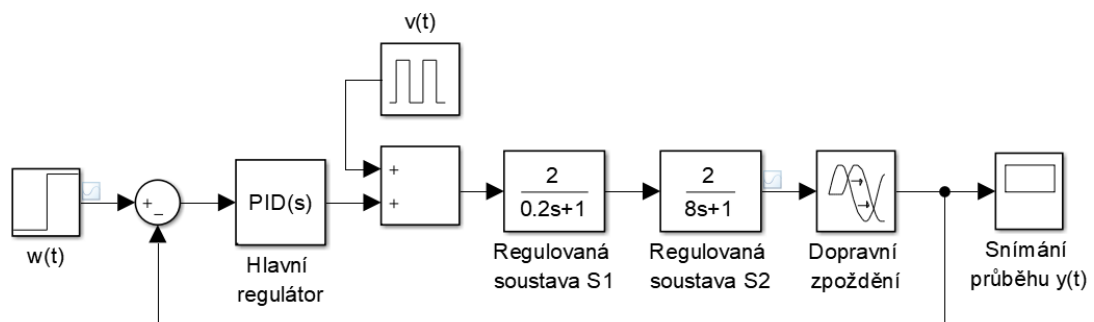
4.4 Obvod s pomocným měřením poruchové veličiny

4.4.1 Jednoduchý regulační obvod s pomocným měřením poruchové veličiny

Zadaná soustava je daná přenosem

$$G_S(s) = \frac{4}{(8s + 1)(0.2s + 1)} e^{-6s} \quad (4.19)$$

Blokové schéma JRO s použitím PID regulátoru (Obr. 30)



Obr. 30: Schéma JRO

Tab. 16: Parametry PID regulátoru JRO

Parametr	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
r_0	0.123	0.257
T_i	8.2	8.2
T_d	0.195	0.195

4.4.2 Rozvětvený regulační obvod s pomocným měřením poruchové veličiny

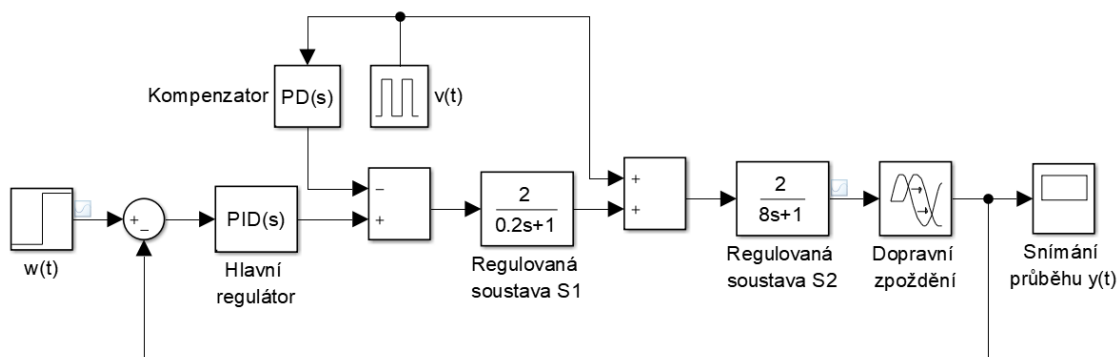
Zapojení RRO je realizováno pomocí PID regulátoru, který je zapojen do smyčky hlavní a P kompenzátoru zapojeného do smyčky pomocné.

Zadaná soustava (4.19) je rozdělena na dvě části (4.20) a (4.21)

$$G_{S1}(s) = \frac{2}{(0.2s + 1)} \quad (4.20)$$

$$G_{S2}(s) = \frac{2}{(8s + 1)} e^{-6s} \quad (4.21)$$

Blokové schéma RRO (Obr. 31)



Obr. 31: Blokové schéma RRO s pomocným měřením poruchové veličiny

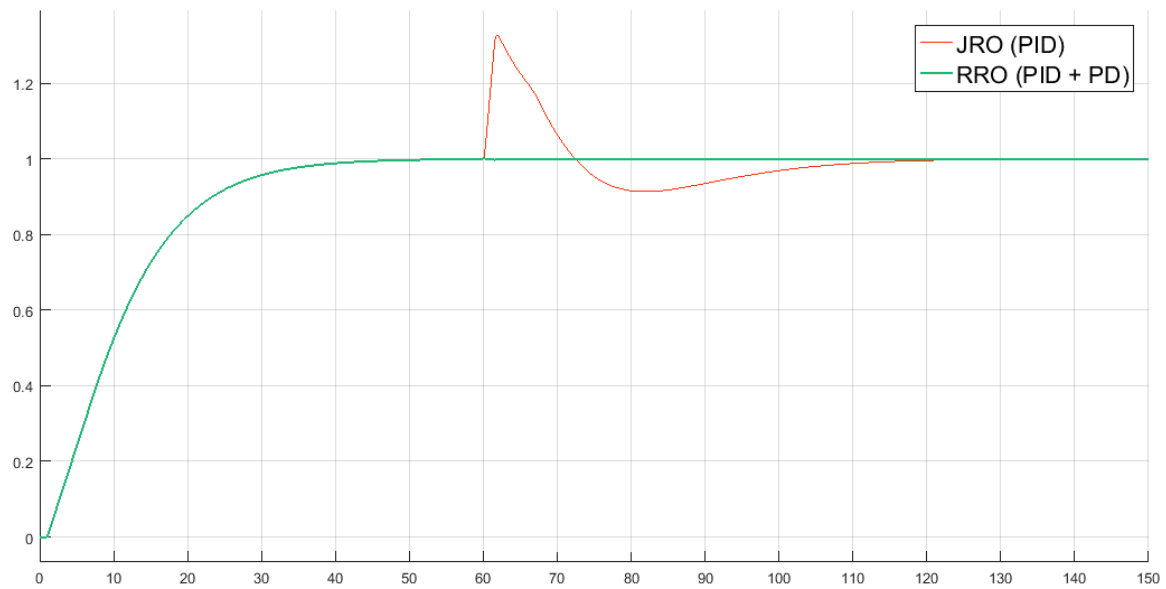
Výpočet parametrů PD kompenzátoru RRO pro vnitřní soustavu S_1 (4.20)

Tab. 17: Parametry PD kompenzátoru RRO

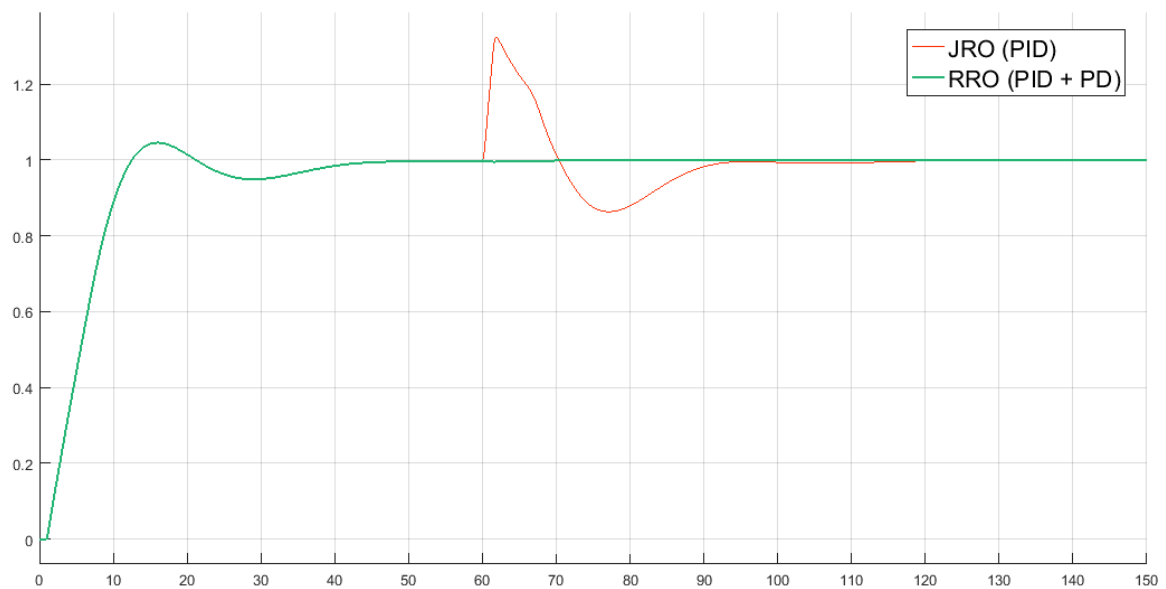
Parametr	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
r_0	0.5	0.5
T_d	0.1	0.1

Parametry pro hlavní PID regulátor u RRO budou identické jako u JRO (Tab. 16).

Porovnání průběhů JRO a RRO



Obr. 32: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0$



Obr. 33: Porovnání JRO a RRO při relativním překmitu $\kappa = 0.2$

Hodnoty kvality regulace

Tab. 18: Tabulka hodnot průběhů JRO a RRO (Obr. 32) a (Obr. 33)

	Obvod	$\kappa = 0$	$\kappa = 0.2$
Doba regulace $t_r [s]$	JRO	28.4	11.2
	RRO	28.4	11.2
Výchylka při poruše [%]	JRO	33	33
	RRO	0	0
Doba do ustálení po zásahu poruchy [s]	JRO	32.9	26.4
	RRO	0	0

5 ZÁVĚR

V teoretické části této práce byly popsány výhody, vlastnosti a předpokládané chování jednotlivých typů rozvětvených regulačních obvodů, které byly využity pro dosažení optimálních výsledků v části praktické.

Praktická část porovnává čtyři typy rozvětvených regulačních obvodů s obvody jednoduchými. Rozvětvený obvod s pomocnou regulovanou veličinou zapojený paralelně a v sérii, obvod s pomocnou akční veličinou a obvod s pomocným měřením poruchové veličiny. Z důvodu objektivního měření a posouzení kvality regulace jak pro jednoduchý, tak pro rozvětvený typ obvodu je zadán identický přenos regulované soustavy.

Rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou v sérii je první testovaný obvod. Doba regulace je pro jednoduchý i rozvětvený obvod téměř identická a je zřejmé, že tento typ rozvětveného obvodu dobu regulace k dosažení žádané hodnoty při skokové změně nebo zásahu poruchy výrazně nezlepší. Tento typ rozvětveného obvodu především výrazně potlačuje výchylku při zásahu poruchové veličiny, zde je více než padesátiprocentní rozdíl mezi jednoduchým a rozvětveným obvodem. Další výhodou může být odolnost rozvětveného obvodu zachovat podobnou dobu regulace k dosažení žádané hodnoty při různých hodnotách překmitu.

Rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou paralelního zapojení stejně jako v sérii dobu regulace k dosažení žádané hodnoty nezlepšuje. Je zde však také výrazné potlačení výchylky na poruchovou veličinu. Výchylka rozvětveného obvodu je o více než sto třicet procent menší v porovnání s jednoduchým regulačním obvodem.

Rozvětvený regulační obvod s pomocnou akční veličinou je třetím testovaným obvodem. Tento druh rozvětveného obvodu má zásadní vliv na dobu regulace k žádané hodnotě. Pokud je požadovaný robustnější zásah a větší rychlost k dosažení žádané hodnoty, jak při skokové změně, tak při zásahu poruchy, je tento typ rozvětveného obvodu velmi užitečný. Potlačení výchylky při zásahu poruchy není tak velké, jako u předchozích typů rozvětvených obvodů, ale obvod je velmi odolný vůči překmitu.

Rozvětvený regulační obvod s pomocným měřením poruchové veličiny je poslední z testovaných obvodů. Vliv poruchové veličiny byl zcela eliminován. Obvod je možné zatížit až na desetinásobek testované hodnoty výšky amplitudy poruchové veličiny a stále je kompenzátor schopen udržet stabilitu obvodu pod 5 % povolené odchylky. Doba regulace při skokové změně k žádané hodnotě je neměnná a obvod se tedy chová jako jednoduchý regulační obvod bez ohledu na nastavené hodnoty relativního překmitu.

Získané výsledky reálně simulovaných obvodů potvrdily popsané teoretické předpoklady a úspěšně splnily očekávání. Hodnoty získané pro nastavení parametrů regulátorů nesplnily v některých případech stoprocentní výsledek a tyto nesrovnalosti byly vyřešeny drobnou úpravou těchto parametrů.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠULC, Bohumil a VÍTEČKOVÁ, Miluše. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03007-5.
- [2] BALÁTEĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-020-2.
- [3] VÍTEČKOVÁ, Miluše a VÍTEČEK Antonín. Základy automatické regulace. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1068.
- [4] ŠVARC, Ivan a MATOUŠEK Radomil, a ŠEDA Miloš a VÍTEČKOVÁ Miluše. Automatické řízení. Brno: CERM – Akademické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [5] NAVRÁTIL Pavel. Automatizace. Vybrané statě. ZLÍN 2011, (Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011), Recenzent: prof. Ing. Miluše Vítečková, CSc. ISBN: 978-80-7318-935-8
- [6] KUČERA, M. Regulátory s auto tunery v ŘS ZAT. Automatizace, 50 (2007), č.12, s. 803–804.
- [8] BLAHA, Petr a VAVŘÍN Petr. Řízení a regulace I, Základy regulace lineárních systémů – spojitě a diskrétní. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně
- [9] ZÁVORKA, Jiří. Základy automatické regulace, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 10 (1965), No. 4, 202—226
- [10] MATLAB/SIMULINK [online]. The MathWorks, United States, c1994-2018 Dostupné z: <https://www.mathworks.com/>
- [11] FANUC Czech s.r.o. Magazín o průmyslové automatizaci a robotice, Praha. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/osvezte-si-zaklady-automatizace-znate-definici-regulace/>

7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$e(t)$	regulační odchylka
$G_M(s)$	přenos modelu regulované soustavy
$G_R(s)$	přenos regulátoru
$G_{RH}(s)$	přenos hlavního regulátoru
$G_{RP}(s)$	přenos pomocného regulátoru
$G_S(s)$	přenos soustavy
$G_v(s)$	přenos poruchy
$G_w(s)$	přenos řízení
κ	relativní překmit
r_0	zesílení
$T_1 \dots T_n$	setrvačná časová konstanta
T_i	integrační časová konstanta
t_r	doba regulace
T_d	derivační časová konstanta
T_D	dopravní zpoždění
$u(t)$	akční veličina
$V(s)$	obraz poruchy
$v(t)$	poruchová veličina
$W(s)$	obraz žádané hodnoty
$w(t)$	žádaná hodnota
$Y(s)$	obraz regulované veličiny
$y(t)$	regulovaná veličina