

METODY A SIMULACE KASKÁDNÍHO ŘÍZENÍ, ROZVĚTVENÉ REGULAČNÍ OBVODY

Tomáš Zimčík

Bakalářská práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav řízení procesů
akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš ZIMČÍK**
Studijní program: **B 2807 Chemické a procesní inženýrství**
Studijní obor: **Automatizace a řídicí technika**

Téma práce: **Metody a simulace kaskádního řízení, rozvětvené regulační obvody**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat přehled metod rozvětvených regulačních obvodů.
2. Vytvoření simulačního prostředí v Matlab, Simulinku.
3. Vypracování příručky.
4. Vypracování vzorových a komparativních příkladů pro spojitě lineární systémy.
5. Aplikace vybraných způsobů pro technologický proces v simulačním prostředí.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Kubík,S. a kol. Teorie automatického řízení I,II.SNTL Alfa,Praha 1982.

Šulc,B.,Vítečková,M.:Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů.ČVUT Praha,2004

Levine,W.S.:The control handbook.IEEE Press.Boca Raton,1996.

Kuo,B.C.:Automatic control systems.Prentice Hall,Englewood Cliffs,1995.

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Roman Prokop, CSc.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2006

Termín odevzdání bakalářské práce:

16. června 2006

Ve Zlíně dne 25. února 2006

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ke pověřený děkan



prof. Ing. Petr Dostál, CSc.

ředitel ústavu

Dovoluji si tímto poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu prof.Ing. Romanu Prokopovi, CSc, za odborné vedení, cenné rady, připomínky a za čas, který mi věnoval při zpracování této bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 01.06. 2006

.....

jméno diplomanta

ABSTRAKT

V mnoha praktických aplikacích zpětnovazebního řízení nestačí pro zajištění kvality a požadavků regulace pouze jednoduchá zpětná vazba. Je to způsobeno dopravním zpožděním, komplikovanou dynamikou, přítomností poruch, množstvím akčních veličin. Vznikají tak regulační obvody složitější rozvětvené struktury. Práce se zabývá hlavními typy těchto obvodů. Jedná se o obvod s měřením poruchové veličiny, obvod s omezením akční veličiny, s pomocnou akční veličinou, s vnitřním modelem a Smithův prediktor pro kompenzaci dopravního zpoždění. Jednotlivé typy obvodů jsou simulačně implementovány v prostředí Simulink a jsou ilustrovány příklady.

Klíčová slova: Zpětná vazba, poruchy, akční veličiny, kaskádní regulace, vnitřní model

ABSTRACT

A single feedback control loop is often not a satisfactory solution for many practical applications of control problems. It can be caused by time-delay terms, load and attenuation disturbance, multiple load variables, complex dynamics. The way how to solve these problems is to introduce complex, cascade and multivariable loops into feedback. The work deals with basic types of such control systems. There are analyzed cascade control systems, internal model principle, Smith predictor. All control principles are implemented into Simulink programs and simulation examples illustrate the control behavior.

Keywords: Feedback systems, load disturbance, cascade regulation, internal model principle

OBSAH

I	ÚVOD.....	7
1.	ROZVĚTVENÉ REGULAČNÍ OBVODY.....	9
1.1	Regulátory v rozvětvených regulačních obvodech.....	9
1.2	Rozdělení rozvětvených regulačních obvodů.....	9
2.	OBVOD S POMOCNOU REGULOVANOU VELIČINOU.....	11
2.1	Vlastnosti a popis obvodu.....	11
2.2	Postup při seřízení rozvětveného reg. obvodu s pomocnou reg. vel.....	12
3.	OBVOD S POMOCNOU AKČNÍ VELIČINOU.....	12
3.1	Vlastnosti a popis obvodu.....	12
3.2	Postup při seřízení rozvětveného reg. obvodu s pomocnou akční vel.....	15
4.	OBVOD S VNITŘNÍM MODELEM.....	16
4.1	Vlastnosti a popis obvodu.....	16
4.2	Postup při seřízení rozvětveného reg. obvodu s vnitřním modelem.....	22
5.	OBVOD S KOMPENZACÍ DOPRAVNÍHO ZPOŽDĚNÍ.....	23
5.1	Vlastnosti a popis obvodu.....	23
5.2	Postup při seřízení rozvětveného reg. obvodu se Smithovým prediktorem.....	25
5.3	Postup při seřízení rozvětveného reg. obvodu s modifikovaným Smithovým prediktorem.....	28
6.	OBVOD S MĚŘENÍM PORUCHOVÉ VELIČINY.....	29
6.1	Vlastnosti a popis obvodu.....	29
6.2	Postup při seřízení rozvětveného reg. obvodu s měřením poruchové vel...	31
7.	OBVOD POMĚROVÉ REGULACE.....	32
7.1	Vlastnosti a popis obvodu.....	32
7.2	Postup při seřízení rozvětveného reg. obvodu poměrové regulace.....	36
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	37

ZÁVĚR.....	59
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	60
SEZNAM SYMBOLŮ A SKRATEK.....	61
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	62
SEZNAM TABULEK.....	64
SEZNAM PŘÍLOH.....	65

ÚVOD

Zpětná vazba je nejúčinnější způsob, jak změnit dynamiku řízeného objektu. Návrhem vhodných regulátorů se věda zabývá již mnohá desetiletí a existuje řada způsobů a metod, jak regulátory navrhovat. Uvádí se, že přes 90% regulačních smyček v průmyslu je osazeno standardními PID regulátory obvykle ke spokojenosti technologické obsluhy. Existuje však řada případů, kdy jednoduchá zpětná vazba je nedostatečná nebo přímo nemožná. Tyto situace mohou mít různé příčiny. Důvodem může být poruchová veličina, několik akčních veličin, dopravní zpoždění ve smyčce, komplikovaná dynamika, nebo více rozměrnost problému. Jednoduchá zpětná vazba se tak musí rozšiřovat ve smyslu rozvětvené a komplikovanější struktury.

Práce je věnována metodice a simulačnímu ověření základních typů rozvětvených regulačních obvodů, které jsou známy ze standardní literatury. Jedná se o obvod s měřením poruchy, s pomocnou akční veličinou, s pomocnou regulovanou veličinou, s kompenzací dopravního zpoždění, s vnitřním modelem a obvod poměrové regulace. Obvod s měřením poruchy je vhodný v případech, kdy existuje měřitelná, ale neovlivnitelná veličina, která má na regulovanou veličinu významný vliv. Obvod s kompenzací dopravního zpoždění můžeme použít tam, kde je potřeba zlepšit kvalitu regulačního pochodu při regulaci soustav s dopravním zpožděním. Obvod s vnitřním modelem se využívá v různých technologických procesech, především v tepelných nebo dopravních, kde se vyskytuje dopravní zpoždění. Obvod s pomocnou akční veličinou je typický tím, že na soustavu působíme druhou akční veličinou. Výhodou tohoto obvodu je, že neobsahuje zpoždění, nevýhodou je, že musí být velice přesně stanoveny přenosy hlavního i pomocného regulátoru. Do obvodů s pomocnou regulovanou veličinou přivádíme ve vhodném místě regulované soustavy pomocnou regulovanou veličinu, podmínkou však musí být, že se dá měřit. Tuto veličinu nemusíme regulovat, ale je velmi důležité, aby reagovala na poruchovou veličinu podstatně rychleji než vlastní regulovaná veličina. Obvody poměrové regulace jsou využívány převážně proto, že dokážou udržovat požadovaný poměr mezi dvěma veličinami, např. průtoky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZVĚTVENÉ REGULAČNÍ OBVODY

1.1 Regulátory v rozvětvených obvodech regulace jedné veličiny

Jednoduché regulační obvody s konvenčními regulátory (tj. jednoduché jednosmyčkové regulační obvody) nemusí vždy zajistit požadovanou kvalitu regulačního pochodu. V tomto případě se ve velké míře používají regulátory se složitější strukturou, popř. se používají složitější regulační obvody.

V prvním případě návrh, seřízení, ale hlavně pozdější údržba v provozních podmínkách jsou velmi náročné jak z finančního, tak především z odborného hlediska.

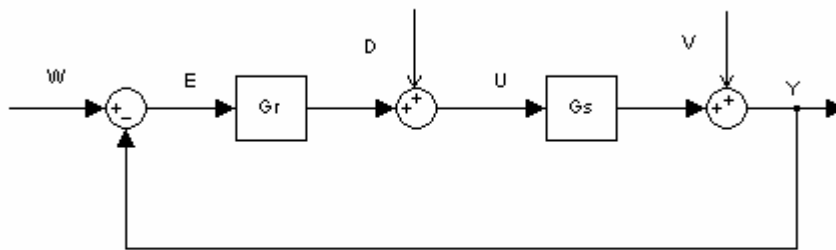
Často využívaný je druhý způsob, který je nenáročný z hlediska finančního, kdy použitím složitější, tzv. rozvětvené struktury regulačního obvodu lze dosáhnout podstatného zvýšení kvality regulačního pochodu.

Těmto regulačním obvodům říkáme rozvětvené a to proto, že obsahují pouze jednu hlavní žádanou veličinu w a jednu regulovanou veličinu y .

Význam rozvětvených regulačních obvodů je v současné době značně velký, protože dostupnost kvalitní měřicí a výpočetní techniky umožňuje snadné začlenění rozvětvené struktury do průmyslové praxe.

1.2 Rozdělení rozvětvených regulačních obvodů

Pro mnoho úloh regulačních obvodů nemusí být klasický regulační obvod z Obr. 1 vždy vyhovující. Jedná se např. o kompenzaci některých z poruchových veličin, kompenzaci přítomnosti dopravního zpoždění atd. Proto se tedy používají i další komplikovanější zpětnovazební obvody.



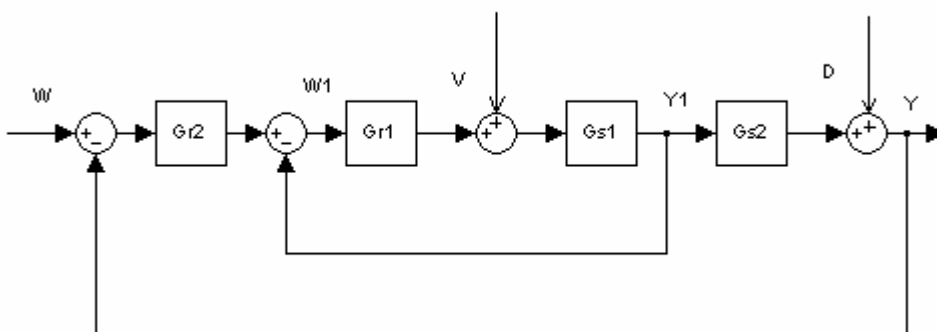
obr. 1 Základní regulační obvod

- a) Obvod s pomocnou regulovanou veličinou
- b) Obvod s pomocnou akční veličinou
- c) Obvod s vnitřním modelem
- d) Obvod s kompenzací dopravního zpoždění-Smithův prediktor
- e) Obvod s měřením poruchové veličiny
- f) Obvod poměrové regulace
 - S násobícím členem použitým na hlavní regulovanou veličinu y_I
 - S násobícím členem použitým na hlavní žádanou veličinu w_I
 - S výpočetním členem

2.OBVOD S POMOCNOU REGULOVANOU VELIČINOU

2.1 Vlastnosti a popis obvodu

Blokové schéma rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou je též nazýván kaskádový regulační obvod a je na Obr.2.1.



obr. 2.1 Rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou

Ze schématu je zřejmé, že se skládá z pomocného (podřízeného) regulačního obvodu (tj. vnitřní smyčky) a z hlavního (nadřazeného) regulačního obvodu (tj. vnější smyčky). Regulovaná veličina y_1 se nazývá pomocná, podobně jako žádaná veličina w_1

-Dle Obr.1.1 můžeme určit přenos pro pomocný regulační obvod:

$$G_{wy1} = \frac{G_{R1} G_{S1}}{1 + G_{R1} G_{S1}} = \frac{1}{\frac{1}{G_{R1} G_{S1}} + 1}, G_{vy1} = \frac{G_{S1}}{1 + G_{R1} G_{S1}} = (1 - G_{wy1}) G_{S1} \quad (1)$$

-Přenosové vztahy pro hlavní regulační obvod:

$$G_{wy} = \frac{G_{R2} G_{S2} G_{wy1}}{1 + G_{R2} G_{S2} G_{wy1}}, G_{vy} = \frac{(1 - G_{wy1}) G_{S1} G_{S2}}{1 + G_{R2} G_{S2} G_{wy1}}, G_{dy} = \frac{1}{1 + G_{R2} G_{S2} G_{wy1}}$$

(2)

Pokud bude daný regulační obvod správně seřízen, pak pro dostatečně veliký modul otevřené vnitřní smyčky můžeme napsat:

$$|G_{r1}G_{s1}| \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad G_{w1y1} \rightarrow 1 \quad (3)$$

Přenosy hlavního regulačního obvodu mohou být zjednodušeny a to takto:

$$G_{wy} \approx \frac{G_{R2}G_{S2}}{1 + G_{R2}G_{S2}}, G_{vy} \approx 0, G_{dy} \approx \frac{1}{1 + G_{R2}G_{S2}} \quad (4)$$

Seřízením hlavního regulačního obvodu se pak zajistí požadovaná kvalita regulačního pochodu. Rozvětvená struktura s pomocnou regulovanou veličinou se používá v tom případě kdy popis regulované soustavy se dá rozdělit na dvě části s přenosy G_{s1}, G_{s2} (tj. na vhodném místě můžeme měřit y_1). Její základní vlastností a tedy i výhodou je, že v podstatě eliminuje vnitřní smyčku včetně poruch působících na vstupu nebo výstupu první části regulované soustavy a případných jejích nelinearit. V daném obvodu se nejčastěji používají P a PI regulátory. P regulátor proto, že nechceme aby vnitřní smyčka obsahovala dopravní zpoždění a taky daný regulátor byl co nejjednodušší, aby nezvyšoval dynamiku. Hlavní regulátor by měl obsahovat integrační (sumační složku), proto volíme PI regulátor (případně je možné použít i PID regulátor).

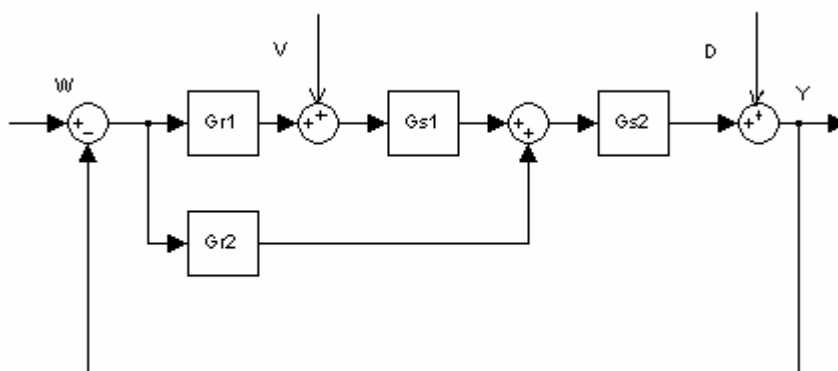
2.2 Postup při seřízení rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou:

1. Seřídí vnitřní smyčku (tj. pomocný regulační obvod) pro první část regulované soustavy při použití P regulátoru (není závadou, když na výstupu jsou trvalé regulační odchylky)
2. Nahradit vnitřní smyčku pokud možno co nejjednodušším dynamickým členem s přenosem G_{w1y1} (pokud bude možné zastoupit hodnotu limitně se blížíící k 1)
3. Seřídí vnější smyčku (tj. hlavní regulační obvod) při použití regulátoru typu PI (popřípadě PID) a nejlépe ověřit kvalitu regulačního pochodu simulačně.

3. OBVOD S POMOCNOU AKČNÍ VELIČINOU

3.1 Vlastnosti a popis obvodu

Blokové schéma rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou akční veličinou je na Obr. 3.1



obr. 3.1 Rozvětvený regulační obvod s pomocnou akční veličinou

Daný obvod se skládá z hlavního regulátoru s přenosem G_{r1} , který vytváří akční veličinu, která dále působí na celou regulovanou soustavu, která má přenos $G_s = G_{s1}G_{s2}$ a z pomocného regulátoru s přenosem G_{r2} , který ovšem působí pouze na druhou část regulované soustavy s přenosem G_{s2} . Předpokládá se, že regulovaná soustava má proporcionální charakter a že její první část s přenosem G_{s1} , ve srovnání s její druhou částí G_{s2} , obsahuje vysokou setrvačnost, popř. dopravní zpoždění.

Dle Obr.1.2 můžeme pro rozvětvený regulační obvod s pomocnou akční veličinou odvodit základní přenosy:

$$G_{wy} = \frac{G_{r1}G_{s1}G_{s2} + G_{r2}G_{s2}}{1 + G_{r1}G_{s1}G_{s2} + G_{r2}G_{s2}} = \frac{1}{\frac{1}{G_{r1}G_{s1}G_{s2} + G_{r2}G_{s2}} + 1} \quad (5)$$

$$G_{vy} = \frac{G_{S1}G_{S2}}{1 + G_{R1}G_{S1}G_{S2} + G_{R2}G_{S2}} = (1 - G_{wy})G_{S1}G_{S2} \quad (6)$$

$$G_{dy} = \frac{1}{1 + G_{R1}G_{S1}G_{S2} + G_{R2}G_{S2}} = 1 - G_{wy} \quad (7)$$

U jednoduchého(tj. jednosmyčkového) regulačního obvodu ve výše uvedených přenosech nevystupuje výraz $G_{R2}G_{S2}$, a tedy je zřejmé, že u rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou akční veličinou lze díky tomuto dosáhnout vyšší hodnoty modulu přenosu otevřeného regulačního obvodu,tj. lze snadněji splnit podmínku

$$|G_{R1}G_{S1}G_{S2} + G_{R2}G_{S2}| \rightarrow \infty \quad (8)$$

Jednoduchý reg. obvod

a tedy lze snadněji splnit požadované podmínky pro výše uvedené základní přenosy

$$G_{wy} \rightarrow 1, \quad G_{vy} \rightarrow 0, \quad G_{dy} \rightarrow 0 \quad (9)$$

Je zřejmé,že použití pomocné akční veličiny u_2 zkvalitní regulační pochod nejenom vzhledem k žádané veličině w ,ale i vzhledem k oběma poruchovým veličinám v a d . Z hlediska regulace nelze „nevhodnou“ hlavní akční veličinu u_1 vypustit, protože je dána nutností z energetického a technologického důvodu ustálený stav $y=w$.

Rozvětvenou strukturu regulačního obvodu s pomocnou akční veličinou lze použít pouze v těch případech, kdy regulovanou soustavu můžeme rozdělit na dvě části, přičemž první z nich je podstatně pomalejší než druhá.Ovšem nejdůležitější podmínkou je, aby na druhou část regulované soustavy bylo možné působit pomocnou akční veličinou u_2 .Tento požadavek je však značně náročnější než u rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou, kterou bylo třeba měřit. Z tohoto důvodu se tyto obvody používají značně méně než rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou.

3.2 Postup při seřízení rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou akční veličinou:

1. Podle požadavků na regulační pochod seřídít regulační obvod bez použití pomocného

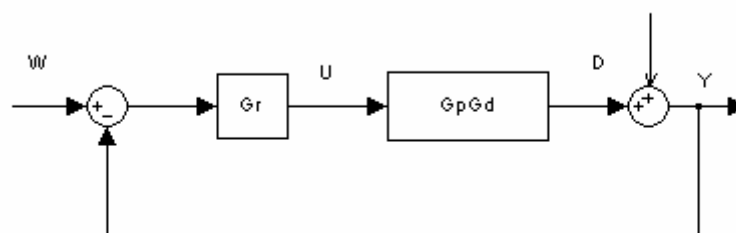
regulátoru, tj. musí se seřadit hlavní regulátor typu PI nebo PID (spojitý nebo diskretní) pro celou regulovanou soustavu.

2. Použít pomocný regulátor typu P nebo PD a pokud možno derivační časovou konstantou vykompenzovat největší časovou konstantu druhé části regulované soustavy.
3. Podle požadavků na regulační pochod znovu seřadit oba regulátory, tj. zvolit vhodné zesílení pomocného regulátoru a doladit seřízení hlavního regulátoru a získanou kvalitu regulačního pochodu simulačně ověřit.

4. OBVOD S VNITŘNÍM MODELEM

4.1 Vlastnosti a popis obvodu

Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu s uzavřenou strukturou je na obr. 4.1



obr. 4.1 Uzavřená struktura jednoduchého regulačního obvodu

Při regulaci nejrůznějších technologických procesů, a to především tepelných a dopravních, vzniká dopravní zpoždění, přičemž může vystupovat jako čisté nebo jako náhrada setrvačnosti vyššího řádu. Je-li dopravní zpoždění dominantní, tj. má-li zásadní vliv na vlastnosti regulované soustavy, proto musíme pro seřízení regulátorů s takovými regulovanými soustavami použít vhodné metody, jako např. metoda požadovaného modelu, nebo metoda násobného dominantního pólu. I přesto může být kvalita regulačního pochodu v jednoduchém regulačním pochodu nedostatečná. Vyplývá to následujících úvah:

Uvažujme, že máme regulovanou soustavu, jejíž přenos obsahuje stabilní proporcionální invertovatelnou část s přenosem G_p a stabilní proporcionální neinvertovatelnou část G_D , tj.

$$G_s = G_p G_D \quad (10)$$

Neinvertovatelnost části s přenosem G_D znamená, že nemůže být realizovaná stabilní inverze

$$\frac{1}{G_D} = G_D^{-1} \quad (11)$$

Dále pak budeme předpokládat, že neinvertovatelná část G_d reprezentuje dopravní zpoždění s přenosem, který pro diskrétní regulační obvody je ve tvaru

$$G_D(z) = z^{-\frac{Td}{T}} \quad (12)$$

(Pro jednoduchost se předpokládá, že dopravní zpoždění T_d je celým násobkem vzorkovací periody T) a pro spojitý regulační obvody

$$G_D(s) = e^{-Tds} \quad (13)$$

Cílem syntézy jednoduchého regulačního obvodu, který je na obr.1.3 je navrhnout vhodný regulátor s přenosem G_r a seřídit ho tak, aby pro přenos řízení G_{wy} a pro přenos poruchy G_{dy} platilo

$$G_{wy} \rightarrow G_{dy} = 1 - G_{wy} \rightarrow 0 \quad (14)$$

Tyto podmínky jsou příliš idealizované. Je třeba si uvědomit, že přenosy jsou obecně komplexní funkce komplexních proměnných, a proto při existenci dopravního zpoždění G_d tyto podmínky z důvodu fyzikální realizovatelnosti, budou mít tvar

$$G_{wy} \rightarrow G_D, G_{dy} = 1 - G_{wy} \rightarrow 1 - G_D \quad (15)$$

Je zřejmé, že musí být splněny i další podmínky týkající se stability a požadované kvality regulačního pochodu.

Z uvedených vztahů vyplývá, že pro poruchovou veličinu d působící na výstupu regulované soustavy zajištěním vhodných vlastností přenosu řízení G_{wy} budou zajištěni i vhodné vlastnosti přenosu poruchy G_{dy} . Proto dále budeme uvažovat pouze přenos řízení G_{wy} .

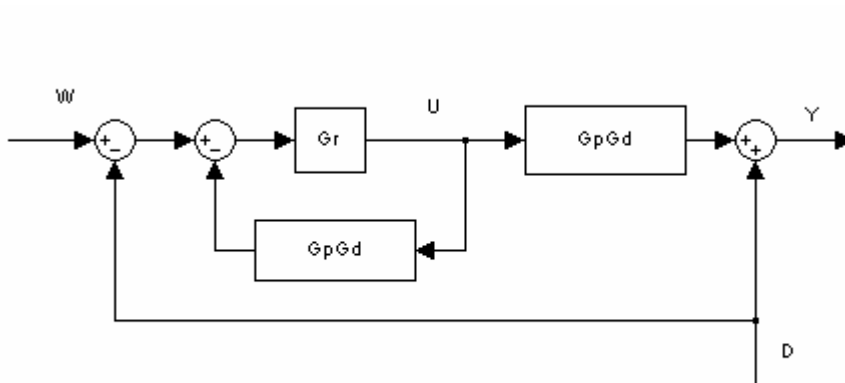
Na základě obr. 4.1 je zřejmé, že pro

$$|G_R| \rightarrow \infty \quad (16)$$

platí

$$G_{wy} = \frac{G_R G_P G_D}{1 + G_R G_P G_D} = \frac{G_P G_D}{\frac{1}{G_R} + G_P G_D} \rightarrow 1 \quad (17)$$

Podmínku (16) můžeme u konvenčních regulátorů zajistit vhodnou kombinací proporcionální, integrační (sumační), derivační (diferenční) složky.



obr. 4.2 Ekvivalentní otevřená struktura jednoduchého regulačního obvodu

Ze schématu uzavřené struktury jednoduchého regulačního obvodu na obr. 4.2 přímo nevyplývají problémy s dopravním zpožděním, viz (14) a (17)

Proto je vhodné schéma na obr. 4.1 upravit na ekvivalentní otevřenou (polouzavřenou) strukturu jednoduchého regulačního obvodu v souladu s obr. 4.2. Na základě tohoto schématu lze psát

$$G_{wy} = G_{wu} G_P G_D \quad (18)$$

kde

$$G_{wu} = \frac{U}{W} = \frac{G_R}{1 + G_R G_P G_D} = \frac{1}{\frac{1}{G_R} + G_P G_D} \quad (19)$$

je přenos mezi žádanou w a akční u veličinou.

Jestliže přenos regulované soustavy neobsahuje dopravní zpoždění, tj.

$$G_D = 1 \Rightarrow G_S = G_P \quad (20)$$

pak splnění (14) pro (16) je docela snadné. Pro (16) a (20) se z (19)

dostane

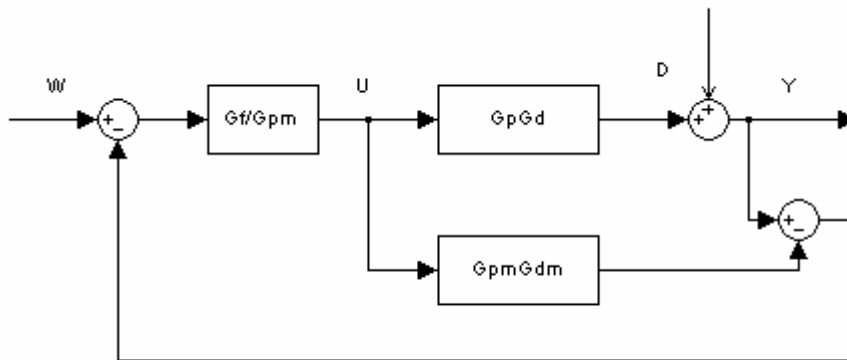
$$G_{wu} \rightarrow \frac{1}{G_P} = G_P^{-1} \quad (21)$$

a tedy v souladu se vztahem (18) budou platit vztahy (14).

Ze vztahu (17) je zřejmé, že je realizována inverze zpětné vazby, to znamená, že inverze přenosu $G_S = G_P$, který reprezentuje vlastnosti skutečné regulované soustavy. Jelikož je přenos regulované soustavy v tomto případě invertovatelný, potom modul přenosu regulátoru $|G_R|$ může mít velmi vysokou hodnotu, a tedy inverze (17) může být v široké oblasti pracovních frekvencí realizována poměrně přesně. Z tohoto důvodu jednoduchý regulační obvod pro stabilní invertovatelnou proporcionální regulovanou soustavu (to znamená s minimální fází a bez dopravního zpoždění) při správně seřízeném regulátoru může zajistit dostatečnou kvalitu regulačního pochodu.

Obsahuje-li přenos regulované soustavy dopravní zpoždění, tj. $G_D \neq 1$, pak ze vztahu (15) je zřejmé, že z důvodu neinvertovatelnosti dopravního zpoždění není možné splnit podmínku dostatečně vysoké hodnoty modulu přenosu regulátoru (12), a proto také kvalita

regulačního pochodu v případě dominantního dopravního zpoždění a použití konvenčních regulátorů bude nízká. Hlavní problém při regulaci soustav s dopravním zpožděním spočívá v tom, že dopravní zpoždění G_D se vyskytuje ve zpětné vazbě, viz obr. 4.2, a tudíž nemůže být realizován přenos (17). Proto se musíme snažit toto dopravní zpoždění (obecně neinvertovatelnou část přenosu regulované soustavy) ze zpětné vazby odstranit.



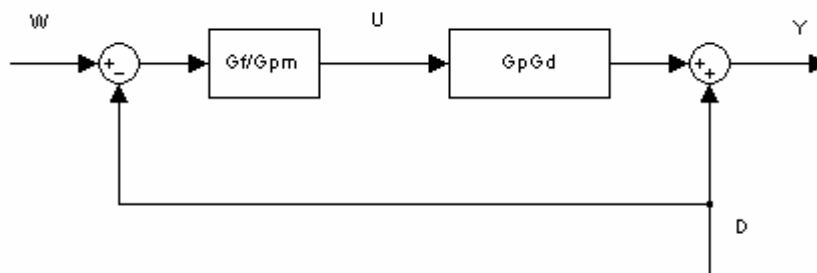
obr. 4.3 Rozvětvený regulační obvod s vnitřním modelem

Podstatného zvýšení kvality regulačního pochodu lze dosáhnout např. použitím rozvětveného regulačního obvodu s vnitřním modelem (obr. 4.3), kde G_{PM} je přenos modelu proporcionální invertovatelné části G_P , G_{DM} je přenos modelu proporcionální neinvertovatelné části G_D , tj. dopravního zpoždění, a G_F je přenos vhodně zvoleného filtru typu dolní propusti. Filtr G_F zajišťuje fyzikální realizovatelnost výrazu $\frac{G_F}{G_{PM}}$.

Při ideální shodě modelu $G_{PM}G_{DM}$ s přenosem skutečně regulované soustavy $G_P G_D$, tj.

$$G_{PM} = G_P, G_{DM} = G_D \quad (22)$$

Schéma, které se nachází na obr. 4.3, může být nahrazeno schématem na obr. 4.4.



obr. 4.4 Otevřená struktura rozvětveného regulačního obvodu s vnitřním modelem

Ze srovnání obr. 4.3 a obr. 4.4 je zřejmé že rozvětvení u regulačního obvodu vnitřním modelem slouží především k identifikaci poruchy.

Pro schéma na obr. 4.4 platí

$$G_{wu} = \frac{G_F}{G_P}, G_{wy} = G_F G_D \quad (23)$$

Ze srovnání obr. 4.4 a obr. 4.2 a také prvního vztahu (19) se vztahem (17) vyplývá, že u rozvětveného regulačního obvodu s vnitřním modelem se inverze invertovatelné části G_P přenosu regulované soustavy realizuje přímo, a nikoliv pomocí zpětné vazby (tím odpadl problém odstranění dopravního zpoždění G_D ze zpětné vazby, viz obr. 4.2) a fyzikální realizovatelnost inverze je zajišťována vhodným filtrem G_F . Filtér s přenosem G_F v souladu se vztahem na pravé straně (19) určuje také v případě splnění podmínek shody modelu se skutečnou regulovanou soustavou na obr. 4.1 výsledné vlastnosti regulačního obvodu s vnitřním modelem.

Nebudou-li splněny podmínky shody modelu se skutečnou regulovanou soustavou na obr. 4.1, pak nebudou platit vztahy (18), ale budou platit vztahy podle obr. 4.3

$$G_{wu} = \frac{G_F}{G_{PM} + G_F (G_P G_D - G_{PM} G_{DM})} \quad (24)$$

$$G_{wy} = \frac{G_F G_P G_D}{G_{PM} + G_F (G_P G_D - G_{PM} G_{DM})}$$

Z obou posledních vztahů je zřejmé, že vhodnou volbou filtru lze rovněž potlačit (zejména při vyšších frekvencích) nepříznivý vliv nepřesností modelu regulované soustavy.

Do určité míry nevýhodou rozvětveného regulačního obvodu s vnitřním modelem je, že musí být realizován model regulované soustavy, inverze invertovatelné části jejího přenosu a filtr, tzn. že nemůže být použit konvenční regulátor.

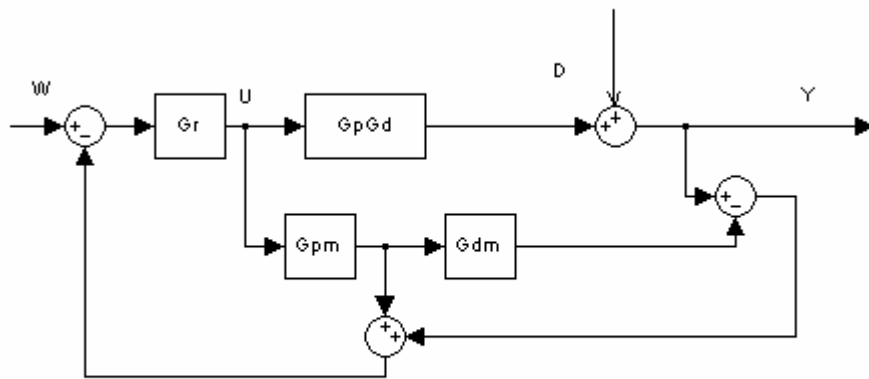
4.2 Postup při seřízení rozvětveného regulačního obvodu s vnitřním modelem

1. Realizovat vnitřní model na základě nominálních vlastností regulované soustavy.
2. Určit inverzi G_P^{-1} invertovatelné části přenosu regulované soustavy.
3. Fyzikální realizovatelnost inverze G_P^{-1} zajistit vhodnou volbou filtru G_F , který musí rovněž uvažovat omezení na akční veličinu.

5. OBVOD S KOMPENZACÍ DOPRAVNÍHO ZPOŽDĚNÍ- SMITHŮV PREDIKTOR

5.1 Vlastnosti a popis obvodu

Další možností, jak zlepšit kvalitu regulačního pochodu při regulaci soustav s dopravním zpožděním, je použití Smithova prediktoru (predikčního regulátoru), viz obr. 5.1.



obr. 5.1 Rozvětvený regulační obvod se Smithovým prediktorem

Rovněž i v tomto případě Smithův predikátor obsahuje vnitřní model a také se předpokládá, že regulátor s přenosem G_R je konvenční a že přenos regulované soustavy sestává ze stabilní proporcionální invertovatelné části s přenosem G_P a ze stabilní proporcionální neinvertovatelné části s přenosem G_D , které reprezentuje dopravní zpoždění.

V souladu s obr. 5.1 můžeme psát pro přenosy žádané veličiny w regulačním obvodem

$$G_{wu} = \frac{G_R}{1 + G_R G_{PM} + G_R G_P G_D - G_R G_{PM} G_{DM}} = \frac{1}{\frac{1}{G_R} + G_{PM} + G_P G_D - G_{PM} G_{DM}},$$

$$G_{wy} = G_{wu} G_P G_D \quad (25)$$

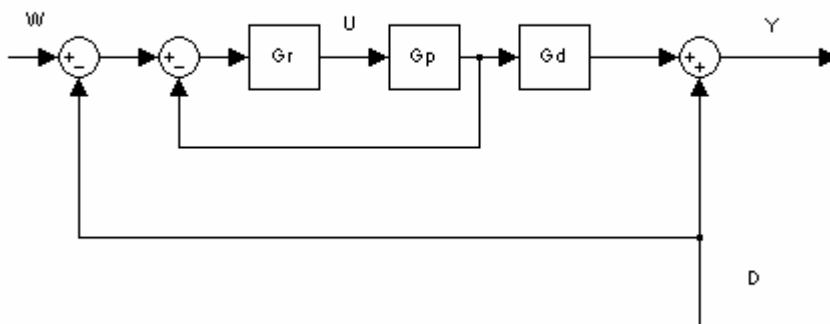
Z těchto vztahů je zřejmé, že při splnění podmínky dostatečně velkého modelu regulátoru, tj. $|G_R| \rightarrow \infty$ bude platit

$$G_{wu} \rightarrow \frac{1}{G_{PM} + G_P G_D - G_{PM} G_{DM}}, G_{wy} \rightarrow \frac{G_P G_D}{G_{PM} + G_P G_D - G_{PM} G_{DM}} \quad (26)$$

V případě ideální shody vnitřního modelu s přenosem soustavy ze vztahů (26) vyplývá, že

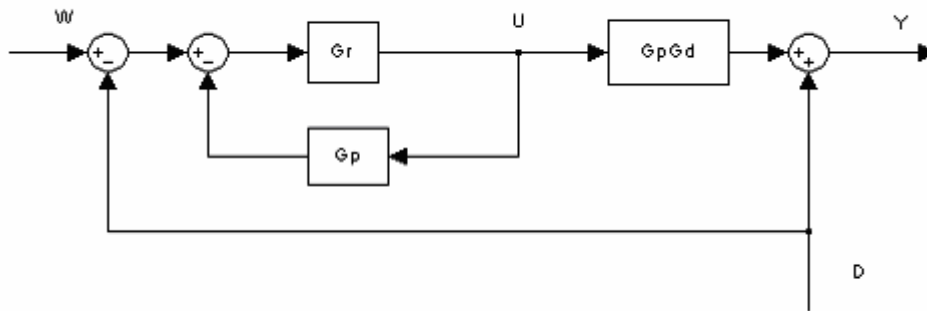
$$G_{wu} \rightarrow \frac{1}{G_P} \quad (27)$$

$$G_{wy} \rightarrow G_D \quad (28)$$



obr. 5.2 Uzavřená struktura regulačního obvodu se Smithovým prediktorem

V tomto případě, tj. v případě platnosti podmínky (18), rozvětvený regulační obvod se Smithovým prediktorem na obr. 5.1 lze zastoupit uzavřenou strukturou na obr. 5.2 nebo ekvivalentní (polouzavřenou) strukturou na obr. 5.3.



obr. 5.3 Ekvivalentní otevřená struktura regulačního obvodu se Smithovým prediktorem

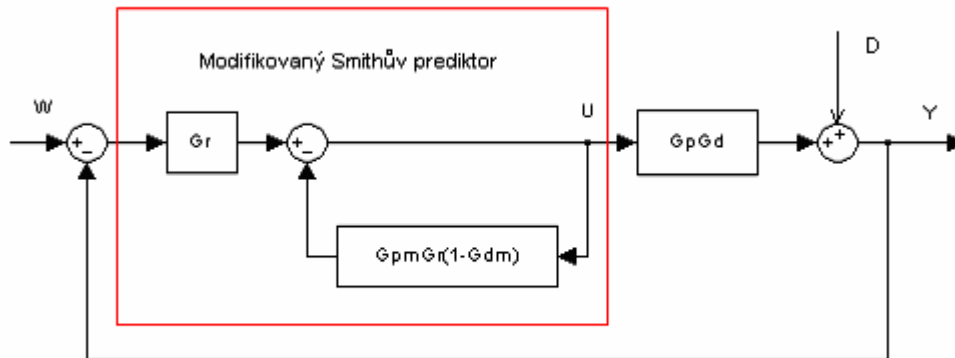
Ze srovnání obr. 5.1 a obr. 4.1 vyplývá, že rozšíření rozvětvení o jednu vazbu (za přenosem G_{PM}) umožnilo odstranit neinvertovatelné dopravní zpoždění ze zpětné vazby (srovnejme obr. 5.3 a obr. 4.2).

Toto je velmi důležité, protože při splnění podmínky (18) lze na rozvětvený regulační obvod se Smithovým prediktorem pohlížet jako na jednoduchý regulační obvod (obr. 5.2) s konvenčním regulátorem, tj. pro návrh regulátoru a jeho následné seřízení mohou být použity všechny postupy a metody jako pro jednoduché regulační obvody bez dopravního zpoždění.

5.2 Postup při seřízení rozvětveného regulačního obvodu se Smithovým prediktorem:

1. Realizovat vnitřní model na základě nominálních vlastností regulované soustavy.
2. Pro proporcionální část G_p musíme zvolit vhodný konvenční regulátor G_R , nejčastěji s integrační (sumační) složkou, a seřít ho libovolnou metodou.

Mezi nevýhody uvedeného Smithova prediktoru patří, že nemůže být realizován jako univerzální. Schéma rozvětveného regulačního obvodu se Smithovým prediktorem na obr. 5.1 lze upravit v souladu s obr. 5.4.



obr. 5.4 Rozvětvený regulační obvod s modifikovaným Smithovým prediktorem

V případě ideální shody modelu $G_{PM}G_{DM}$ s přenosem skutečné regulované soustavy $G_P G_D$ platí výraz

$$G_{PM}G_R = G_P G_R = G_0^* \quad (29)$$

vyjadřuje v podstatě požadovaný přenos otevřeného regulačního obvodu bez dopravního zpoždění. Např. v nejjednodušším spojitém případě, pro požadovaný přenos otevřeného regulačního obvodu

$$G_0^* = \frac{1}{T_w s} \Rightarrow G_{wy}(s) = \frac{1}{T_w s + 1} e^{-T_d s} \quad (30)$$

se obdrží v souladu s obr. 5.4 přenos modifikovaného Smithova prediktoru ve tvaru

$$G_{RS}(s) = G_R(s) \frac{1}{1 + \frac{1}{T_w s} (1 - e^{-T_d s})} \quad (31)$$

kde G_R je přenos konvenčního regulátoru doporučeného pro danou regulovanou soustavu v souladu s tab. 5.1

T_w - časová konstanta uzavřeného regulačního obvodu,

T_d - dopravní zpoždění stejné jako u přenosu dané regulované soustavy.

Tab. 5.1 Doporučené typy konvenčních regulátorů a hodnoty jejich stavitelných parametrů pro modifikovaný Smithův prediktor

REGULOVANÁ SOUSTAVA -Přenos	REGULÁTOR			
	TYP	r_0^*	T_1^*	T_D^*
$\frac{k}{s} e^{-T_d s}$	P	$\frac{1}{kT_w}$	-	-
$\frac{k}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{T_i^*}{kT_w}$	T_1	-
$\frac{k}{s(T_1 s + 1)} e^{-T_d s}$	PD	$\frac{1}{kT_w}$	-	T_1
$\frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s}, T_1 \geq T_2$	PID	$\frac{T_i^*}{kT_w}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$
$\frac{k}{T_0^2 s^2 + 2\xi_0 T_0 s + 1} e^{-T_d s}, 0.5 > \xi_0 \leq 1$	PID	$\frac{T_i^*}{kT_w}$	$2\xi_0 T_0$	$\frac{T_0}{2\xi_0}$

Časová konstanta T_w musí být zvolena s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotu zesílení regulátoru $r_{0\max}$.

Z vztahu (23) vyplývá, že modifikovaný Smithův prediktor se skládá z konvenčního regulátoru a nekonvenční části se dvěma dalšími stavitelnými parametry T_d a T_w a že skutečně může být realizován jako univerzální regulátor.

5.3 Postup při seřízení rozvětveného regulačního obvodu s modifikovaným Smithovým prediktorem:

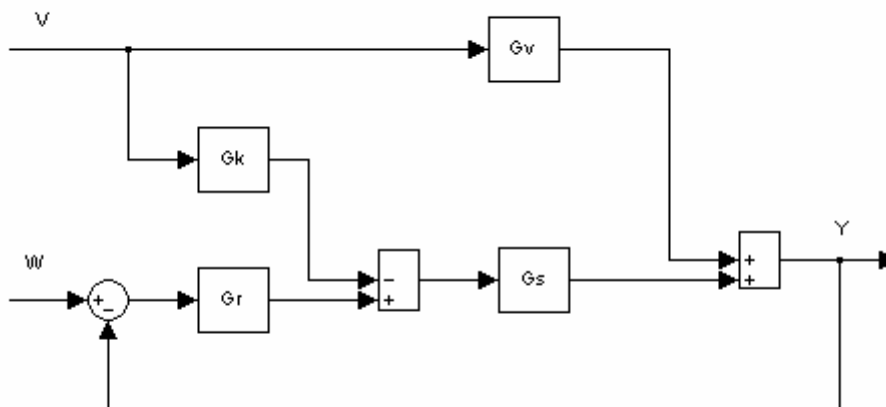
1. Upravit přenos regulované soustavy na tvar v souladu s tab. 5.1.
2. Použít doporučený konvenční regulátor a seřídit ho v souladu s tab. 5.1.
3. Sériově s konvenčním regulátorem použít nekonvenční část, nastavit u ní dopravní zpoždění T_d stejné jako u regulované soustavy a časovou konstantu T_w s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotu zesílení konvenčního regulátoru $r_{0\max}$.

6. OBVOD S MĚŘENÍM PORUCHOVÉ VELIČINY

6.1 Vlastnosti a popis obvodu

Pokud lze měřit poruchovou veličinu, potom můžeme kvalitu regulačního pochodu při jejím působení podstatně zvýšit použitím rozvětveného regulačního obvodu s měřením poruchové veličiny (s kompenzací poruchové veličiny), jehož blokové schéma je na obr. 6.1. Je uvažována pouze jedna poruchová veličina v , protože volbou přenosu $G_v=1$ poruchová veličina bude působit na výstupu regulované soustavy (tj. $v=d$) a volbou $G_v=G_s$ poruchová veličina v bude působit na vstupu regulované soustavy. Je tedy zřejmé, že vhodnou volbou G_v lze uvažovat takové místo působení poruchové veličiny, které odpovídá danému konkrétnímu případu.

Rozvětvený regulační obvod s měřením poruchové veličiny obsahuje tzv. kompenzátor (často se nesprávně nazývá regulátor) s přenosem G_k , který na základě měřené poruchové veličiny v vytváří „protipůsobení“ kompenzující vliv na regulovanou veličinu y .



obr. 6.1 Rozvětvený regulační obvod s měřením poruchové veličiny

V souladu s obr. 6.1 můžeme psát

$$G_{vy} = \frac{G_R G_S}{1 + G_R G_S} = \frac{1}{\frac{1}{G_R G_S} + 1}, G_{vy} = \frac{G_v - G_K G_S}{1 + G_R G_S} = (1 - G_{vy})(G_v - G_K G_S) \quad (32)$$

Z obou přenosů je zřejmé, že „rozvětvení“ s měřenou poruchovou veličinou nemá žádný vliv na přenos řízení a u přenosu poruchy ovlivňuje pouze jeho čítenel, tj. rozvětvený regulační obvod s měřenou poruchovou veličinou se z hlediska sledování žádané veličiny w chová stejně jako jednoduchý regulační obvod. Z toho vyplývá, že použití kompenzátoru nemá vliv na základní dynamické vlastnosti daného rozvětveného regulačního obvodu, tj. nemá vliv na jeho stabilitu (žádná část přenosu kompenzátoru G_K nevystupuje v charakteristickém polynomu).

Naproti tomu kompenzátor výrazným způsobem může potlačit vliv poruchové veličiny v na regulovanou veličinu y , protože platí

$$G_K \rightarrow \frac{G_v}{G_S} \Rightarrow G_v - G_K G_S \rightarrow 0 \Rightarrow G_{vy} \rightarrow 0 \quad (33)$$

Kdyby platila rovnost, tj.

$$G_K = \frac{G_v}{G_S} \Rightarrow G_v - G_K G_S = 0 \Rightarrow G_{vy} = 0 \quad (34)$$

pak poruchová veličina v by neměla žádný vliv na daný rozvětvený regulační obvod. Této části se říká (plná) invariantnost vzhledem k poruchové veličině v . Taková plná invariantnost je většinou prakticky nerealizovatelná. Je to dáno tím, že každá reálná regulovaná soustava obsahuje setrvačnosti, popř. dopravní zpoždění. Inverze přenosových vlastností regulované soustavy v tom případě znamená realizovat fyzikálně nerealizovatelnou derivační činnost prvního i vyšších řádů, popř. prognózu (předstih).

Většinou se realizuje částečná invariantnost rozvětveného regulačního obvodu s měřenou poruchovou veličinou, a to dynamická nebo pouze v ustáleném stavu. Invariantnost vzhledem k poruchové veličině v v ustáleném stavu je pro spojitě, popř. diskrétní regulační obvody dána podmínkami

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_K(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{G_v(s)}{G_S(s)} \quad (35)$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} G_K(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{G_v(z)}{G_S(z)} \quad (36)$$

I v tomto případě použití kompenzátoru může podstatným způsobem zlepšit potlačení měřené poruchové veličiny v . Kompenzátor totiž působí rychle a případné nedokonalé potlačení poruchové veličiny v dokončí regulátor pomaleji, ale zato důkladněji, protože pokud je správně seřízen, platí

$$|G_R G_S| \rightarrow \infty \Rightarrow G_{wy} \rightarrow 1 \Rightarrow G_{vy} \rightarrow 0 \quad (37)$$

tzn. že kompenzátor i regulátor se snaží o to, aby platilo

$$G_{vy} \rightarrow 0 \quad (38)$$

Pokud pro řízení není použit číslicový počítač, pak ve funkci kompenzátoru může často pracovat regulátor typu P či PD.

Rozvětvené regulační obvody s měřením poruchové veličiny se často objevují u regulací teploty budov. Regulaci lze výrazně zlepšit měřením venkovní teploty, jejíž změny jsou hlavní poruchou. Dále si tyto obvody našly uplatnění v chemickém průmyslu a všude tam kde lze měřit poruchové veličiny.

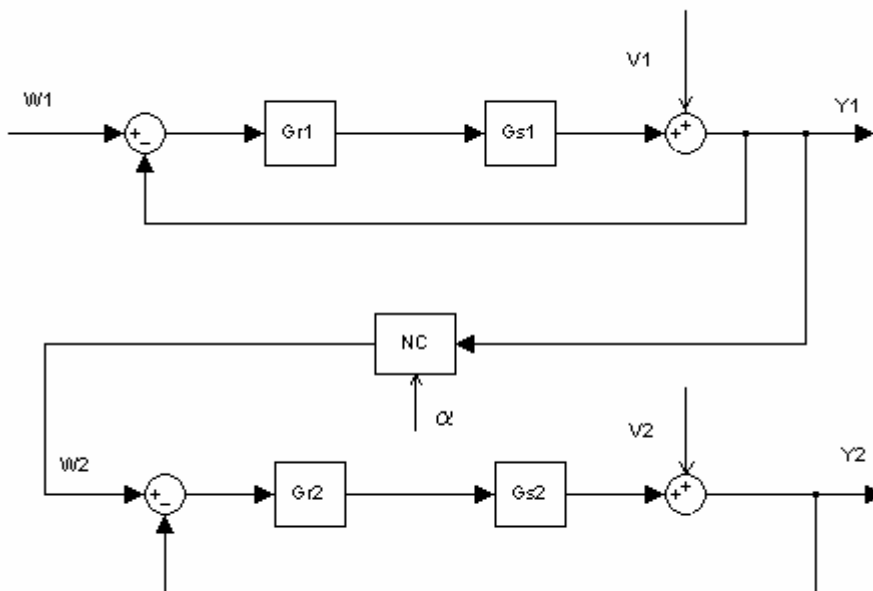
5.3 Postup při seřízení rozvětveného regulačního obvodu s měřenou poruchovou veličinou:

1. Seřídí libovolnou metodou regulační obvod.
2. Seřídí kompenzátor tak, aby alespoň v ustáleném stavu zajistit invariantnost vzhledem k měřené poruchové veličině.

7. OBVOD POMĚROVÉ REGULACE

7.1 Vlastnosti a popis obvodu

Mezi rozvětvené regulační obvody se rovněž zařazuje poměrová regulace, jejíž princip spočívá v udržování požadovaného poměru α mezi dvěma veličinami, nejčastěji průtoky. Většinou se poměrová regulace realizuje podle obr. 7.1



obr. 7.1 Regulační obvod s násobícím členem použitým na hlavní regulovanou veličinu y_1

První hlavní regulační obvod se z regulované soustavy s přenosem G_{S1} a regulátoru s přenosem G_{R1} , jehož úkolem je na základě hlavní žádané veličiny w_1 zajistit hlavní požadovanou regulovanou veličinu y_1 . Druhý regulační obvod se skládá z regulované soustavy s přenosem G_{S2} a z regulátoru s přenosem G_{R2} . Úkolem druhého regulačního obvodu je udržovat regulovanou veličinu y_2 na takové hodnotě, aby platilo

$$\frac{y_2}{y_1} \rightarrow \alpha \quad (39)$$

Toho je možné dosáhnout, pokud druhá žádaná veličina w_2 bude dána vztahem

$$w_2 = \alpha y_1 \quad (40)$$

tj. změřená hlavní regulovaná veličina y_1 je v násobícím členu (NČ) násobena požadovaným poměrem α .

Ve vztazích (39) a (40) se předpokládá, že požadovaný poměr α je konstantní. Obecně požadovaný poměr α může být rovněž časovou funkcí. Např. při spalování plynu v ohřívací peci je třeba udržovat takový poměr α průtoku vzduchu y_2 k průtoku plynu y_1 (spalovací poměr), aby spalování probíhalo s maximální účinností. Je zřejmé, že při nedostatku vzduchu spalování bude nedokonalé a při přebytku vzduchu dojde k ochlazování. V tomto případě hlavní (první) regulační obvod udržuje průtok plynu y_1 na hodnotě, která zajišťuje požadovanou teplotu v prostředí pece a druhý regulační obvod udržuje průtok vzduchu y_2 tak, aby platil vztah (39). Vzhledem k tomu, že optimální spalovací poměr závisí na výhřevnosti plynu, velikosti a druhu vsázky v peci atd., je vhodné jej určovat pomocí extrémního regulátoru. Extremální regulátor je na základě maximalizace teploty spalování (maximální účinnost spalování nastává přibližně při maximální teplotě spalování), popř. zjišťuje a udržuje optimální hodnotu spalovacího poměru α .

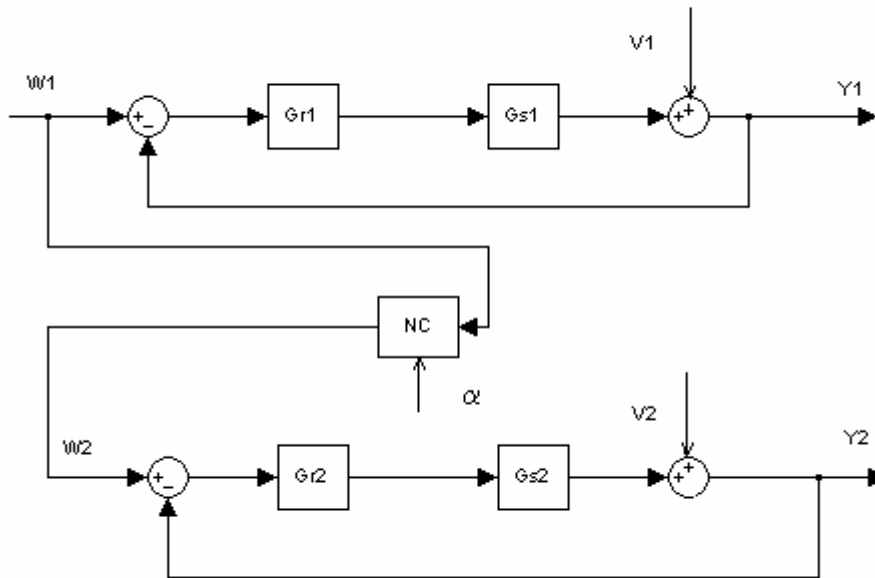
Z obr. 7.1 a ze vztahu (40) vyplývá, že druhý regulační obvod zajišťuje cíl regulace ve tvaru

$$y_2 \rightarrow \alpha y_1 \quad (41)$$

Pokud ve druhém regulačním obvodu regulátor G_{R2} zajistí stupeň astatismu $q=1$ (tj. regulační smyčka bude obsahovat integrační (sumační) člen z důvodu nulové trvalé regulační odchylky), pak v ustáleném stavu vztah (41) bude splněn jako rovnost. V přechodných stavech dynamika druhého regulačního obvodu způsobí zpoždění regulované veličiny y_2 , a proto dochází k jejímu „nedostatku“.

Problém zpoždění regulované veličiny y_2 (tj. jejího „nedostatku“) v přechodných stavech lze řešit použitím poměrové regulace v souladu s obr. 7.2, kde pro určení druhé žádané veličiny w_2 je využita hlavní žádaná veličina w_1 dle vztahu

$$w_2 = \alpha w_1 \quad (42)$$



obr. 7.2 Regulační obvod s násobícím členem použitým na hlavní žádanou veličinu w_1

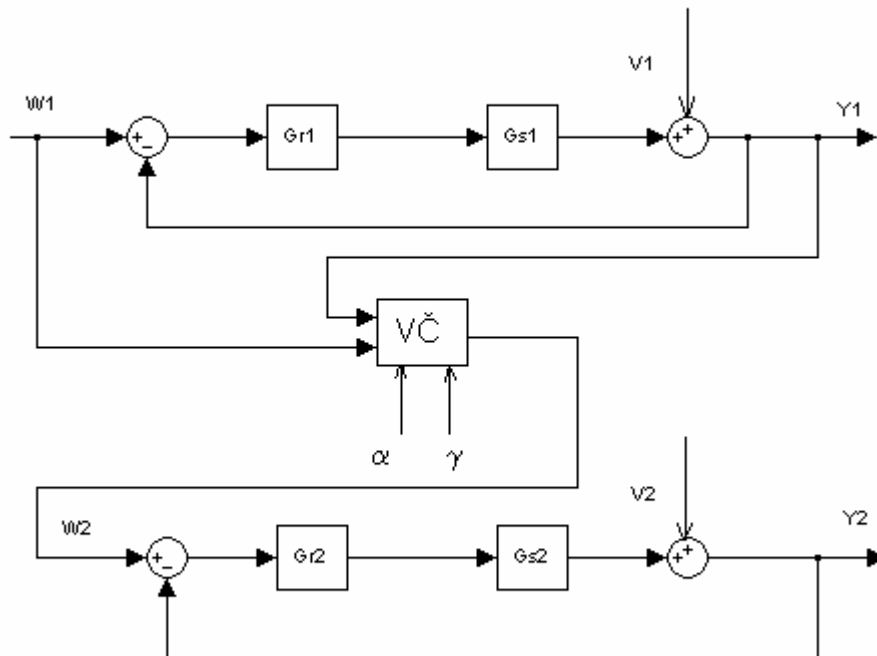
V tomto případě je žádoucí, aby regulátor G_{R1} zajistil u prvního regulačního obvodu rovněž stupeň astatismu $q=1$ (tj. aby první regulační smyčka také obsahovala integrační (sumační) člen). Druhý regulační obvod nyní zajišťuje cíl regulace

$$y_2 \rightarrow \alpha w_1 \quad (43)$$

První hlavní regulační obvod je obvykle pomalejší než druhý regulační obvod, a proto v tomto případě dochází ke zpoždění hlavní regulované veličiny y_1 , tj. dochází k „přebytku“ regulované veličiny y_2 . Tento problém lze částečně řešit takovým seřízením druhého regulačního obvodu, aby jeho dynamika byla pomalejší, tj. přibližně stejná jako dynamika prvního regulačního obvodu.

Výhoda poměrové regulace na obr. 7.2 je rovněž v tom, že rychleji reaguje na změny hlavní žádané veličiny w_1 . Její velkou nevýhodou je, že nedovede reagovat na poruchovou veličinu v_1 .

Výhod obou řešení na obr. 7.1 i na obr. 7.2 využívá poměrová regulace na obr. 7.3 s výpočetním členem (VČ), který určuje druhou žádanou veličinu w_2



obr. 7.3 Regulační obvod s výpočetním členem

$$w_2 = \alpha[\gamma w_1 + (1 - \gamma)y_1] \quad (44)$$

kde γ je váha určující vliv w_1 a y_1 na w_2

Ze vztahu (44) je zřejmé, že pro $\gamma=0$ se obdrží vztah (40) a poměrová regulace na obr. 7.1 a pro $\gamma=1$ se dostane vztah (42) a poměrová regulace na obr. 7.2. Použití výpočetního členu (44) umožnilo oba přístupy vhodně kombinovat. Pro volbu váhy γ se doporučuje použití následujícího vztahu

$$\gamma \approx \frac{T_{w2}}{T_{w1}} \quad (45)$$

kde T_{w1} , popř. T_{w2} , je náhradní časová konstanta prvního, popř. druhého regulačního obvodu.

7.2 Postup při seřízení rozvětveného obvodu poměrové regulace

1. Zvolit dle požadavků vhodný obvod poměrové regulace, viz obr. 7.1,2,3.
2. Pro poměrovou regulaci na obr. 7.1 zvolit regulátor G_{R2} , který zajistí druhému regulačnímu obvodu stupeň astatismu $q=1$ a dostatečnou rychlost, pro poměrovou regulaci na obr. 7.2,3 zvolit regulátory G_{R1} a G_{R2} , které zajistí oběma regulačním obvodům stupeň astatismu $q=1$.
3. Pro poměrovou regulaci na obr. 7.2 druhý regulační obvod seřídit tak, aby jeho dynamika byla přibližně shodná s dynamikou seřízeného prvního regulačního obvodu; pro poměrovou regulaci na obr. 7.3 oba regulátory seřídit a zvolit počáteční hodnotu váhy γ v souladu se vztahem (45) a pak ji případně experimentálně (simulačně) upravit.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

Příklad 1

Obvod se Smithovým prediktorem

Pro tento obvod podle obr. 5.2 byly zadány přenosy:

$$1) G_P(s) = \frac{2}{(6s+1)(3s+1)}$$

$$2) G_D(s) = e^{-20s}$$

Jako regulátor byl podle [1] v obr.5.2 zvolen PI regulátor s nastavením:

(daný regulátor byl seřízen metodou požadovaného modelu)

A)

$$r_0=0.25$$

$$T_I = 4.16 \cdot 10^{-2}$$

Nyní provedeme experimentální nastavení PI regulatoru:

B)

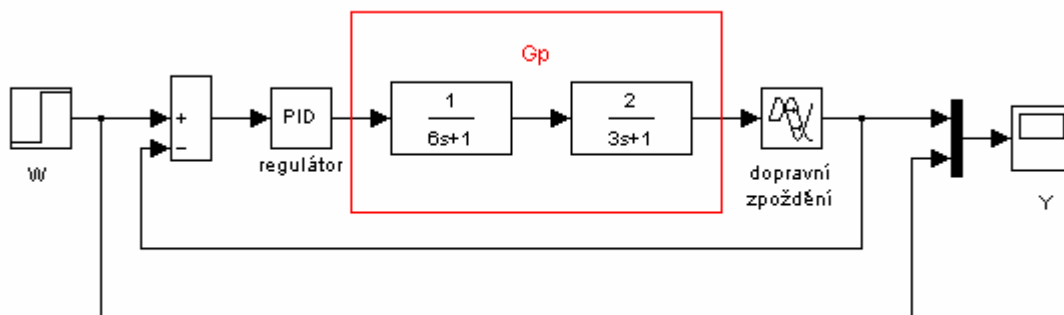
$$r_1=0.35$$

$$T_I=0.08166$$

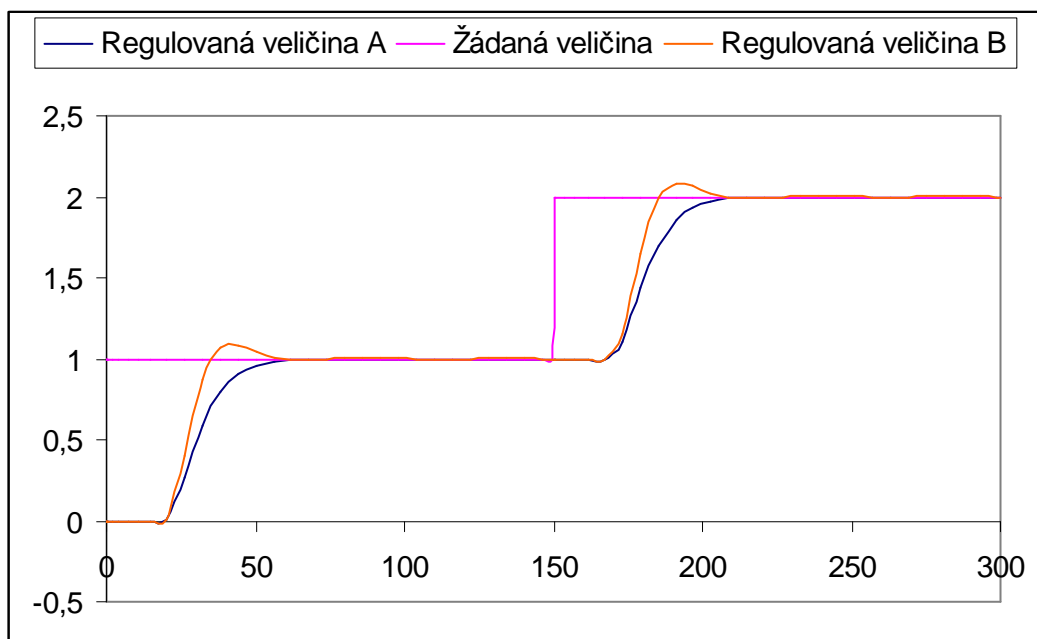
Zde platí podmínka:

$$G_P(s) = G_{PM}(s); G_D(s) = G_{DM}(s)$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 7.4 a je znázorněn na obr. 7.5



Obr. 7.4 Simulační schéma uzavřené struktury regulačního obvodu se Smithovým prediktorem



Obr. 7.5 Odezvy rozvětveného regulačního obvodu se Smithovým prediktorem

Příklad 1.1

Pro obvod podle obrázku 5.1 byly zvoleny přenosy:

$$1) G_P(s) = \frac{1}{s^3 + s^2}$$

$$2) G_D(s) = e^{-3s}$$

Zde platí podmínka:

$$G_P(s) = G_{PM}(s); G_D(s) = G_{DM}(s)$$

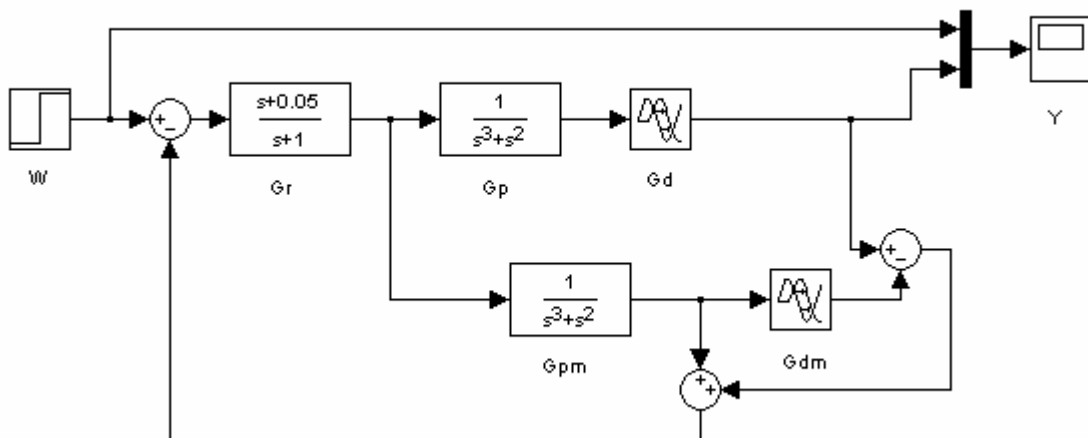
Jako regulátor byl v obr. 5.2 použit PI regulátor, jehož přenos je následující:

A)

$$G_R(s) = \frac{s + 0.05}{s + 1}$$

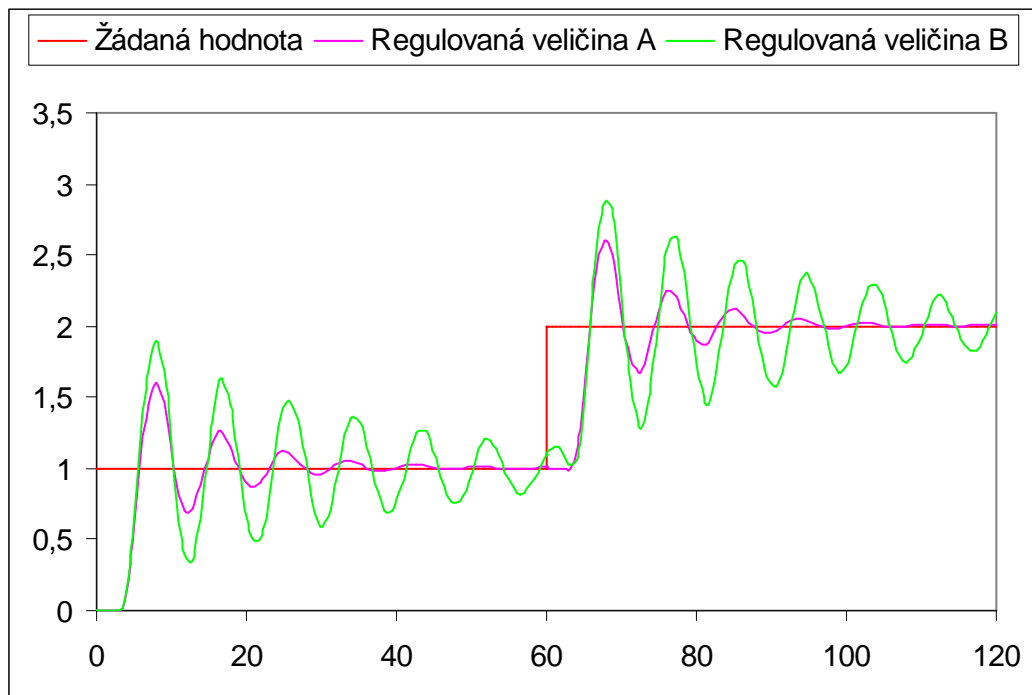
B)

$$G_R = \frac{s + 0.1875}{s + 1}$$



Obr. 7.6 Simulační schéma rozvětveného reg. obvodu se Smithovým prediktorem

Použité simulační schéma je na obr. 7.6 a regulační pochod je znázorněn na obr. 7.7



Obr. 7.7 Odezvy rozvětveného reg. obvodu se Smithovým prediktorem dle př. 1.1

Závěr:

V příkladu 1 u regulované veličiny A dojde k ustálení bez překmitu což je požadováno. U experimentálního nastavení regulované veličiny B došlo k rychlejšímu dosažení žádané veličiny, ale došlo k nežádoucímu překmitu. U př. 1.1 regulované veličiny kmitají v případě A i B, i když v případě A dojde k ustálení, tak je to pro praxi nevhodné.

Příklad 2

Obvod s pomocnou regulovanou veličinou

Pro tento obvod podle obr. 2.1 byly zadány přenosy:

$$1) G_{S1}(s) = \frac{2}{s}$$

$$2) G_{S2}(s) = \frac{1}{5s+1} e^{-5s}$$

Jako regulátory byly podle [1] v obr.2.1 použity P a PI regulátory s nastavením:

(dané regulátory byly seřizeny metodou požadovaného modelu)

A)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=5$$

Regulátor G_{R2}

$$r_{02}=0.368$$

$$T_I=0.738$$

Nyní provedeme experimentální nastavení PI regulátoru:

B)

Regulátor G_{R1}

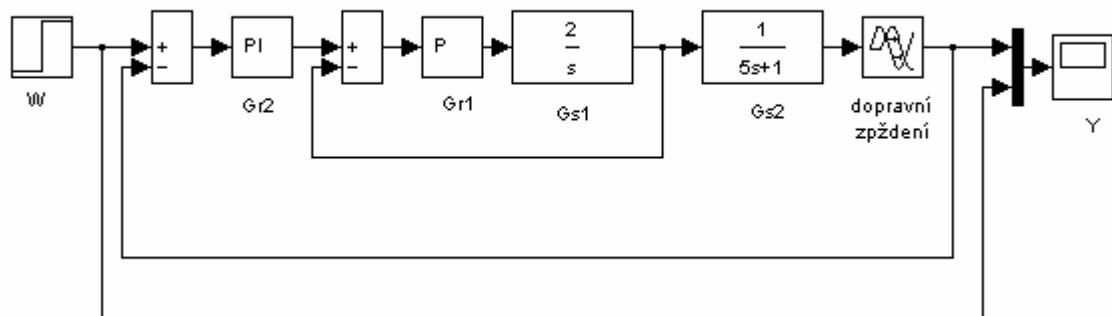
$$r_{01}=0.5$$

Regulátor G_{R2}

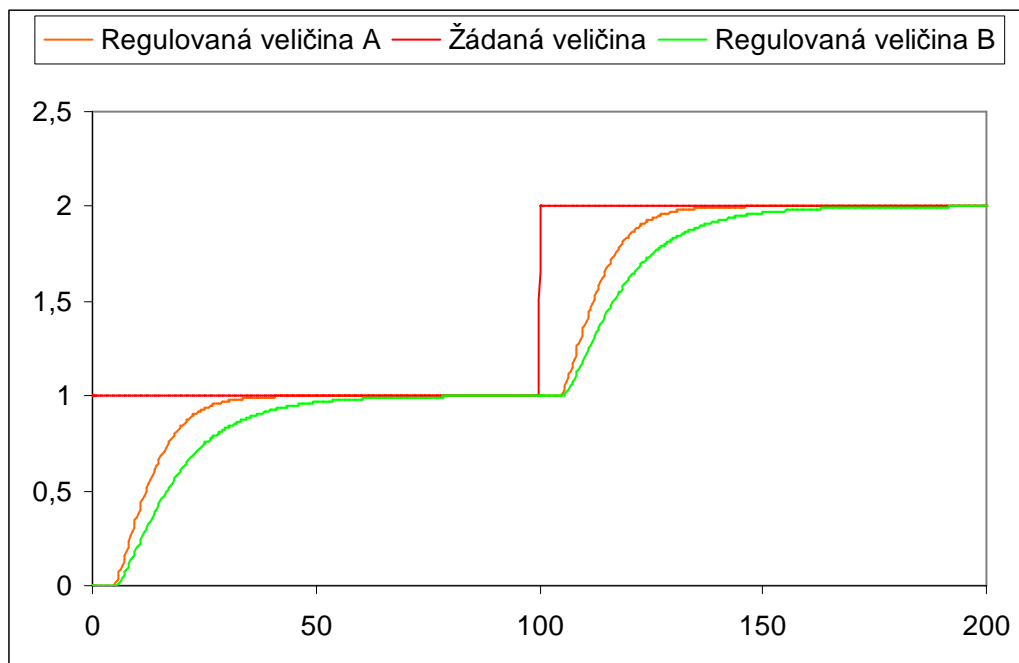
$$r_{02}=0.25$$

$$T_I=0.05$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 7.8 a je znázorněn na obr. 7.9



Obr. 7.8 Simulační schéma rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou



Obr. 7.9 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s pomocnou regulovanou veličinou

Příklad 2.1

Pro daný obvod podle obr. 2.1 byly zadány přenosy:

$$1) G_{s1}(s) = \frac{5}{s}$$

$$2) G_{s2}(s) = \frac{3.3}{4.8s + 1} e^{-5s}$$

Jako regulátory byly v obr.2.1 použity P a PI regulátory s nastavením:

(dané regulátory byly seřízeny metodou požadovaného modelu)

A)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=1.92$$

Regulátor G_{R2}

$$r_{02}=0.11$$

$$T_I=0.0229$$

Nyní provedeme experimentální nastavení PI regulátoru:

B)

Regulátor G_{R1}

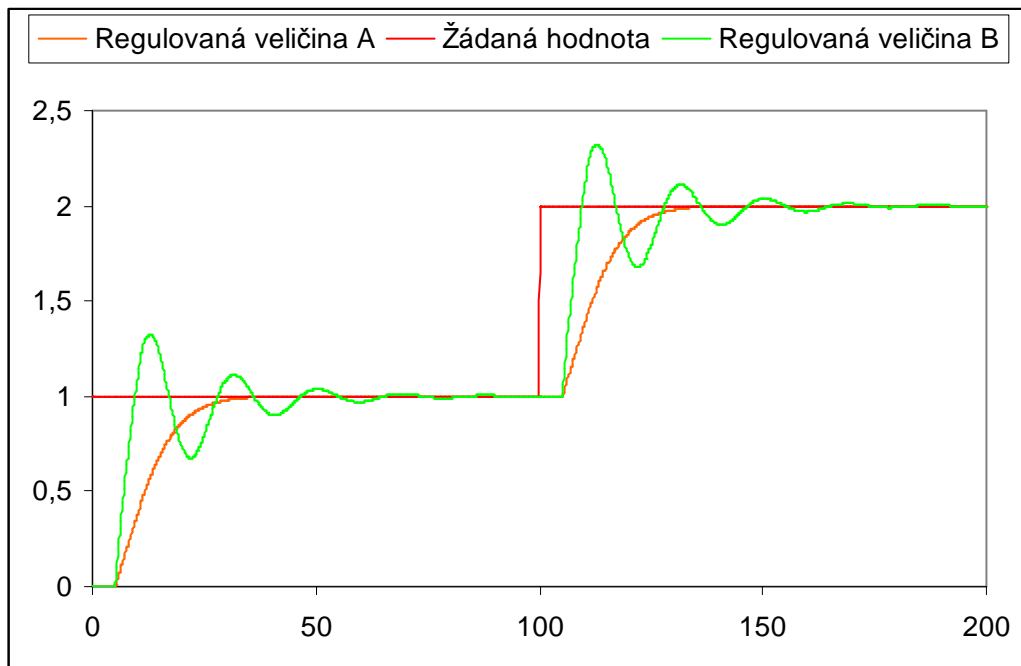
$$r_{01}=3.6$$

Regulátor G_{R2}

$$r_{02}=0.396$$

$$T_I=0.0387$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 7.8 a je znázorněn na obr. 8.0



Obr. 8.0 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s pomocnou reg. veličinou dle př. 2.1

Závěr:

U př.1 dojde k ustálení regulované veličiny A i B bez překmitu, což je vhodné, i když případ B má pomalejší dobu náběhu. U př. 2.1 je regulovaná veličina A opět nekmitající, což je dáno vhodným nastavením stavitelných parametrů regulátorů. V případě B již nastavení nebylo tak šťastné, když se nám podařilo získat kmitavý průběh.

Příklad 3

Obvod s pomocnou akční veličinou

Pro tento obvod podle obr. 3.1 byly zadány přenosy:

$$1) G_{s1}(s) = \frac{1}{5s+1} e^{-4s}$$

$$2) G_{s2}(s) = \frac{2}{2s+1}$$

Jako regulátory byly podle [1] v obr.3.1 použity PID a PI regulátory s nastavením:

(dané regulátory byly seřizeny metodou požadovaného modelu)

A)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=4$$

$$T_I= 0.0514$$

$$T_D= 0.5148$$

Regulátor G_{R2}

$$r_{02}=4$$

$$T_I=2$$

Nyní provedeme experimentální nastavení PI regulátoru:

B)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=0.36$$

$$T_I= 0.5$$

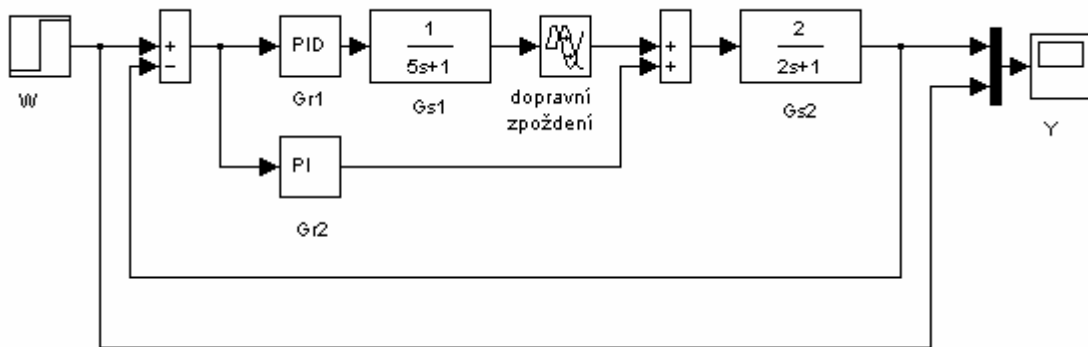
$$T_D= 0.05$$

Regulátor G_{R2}

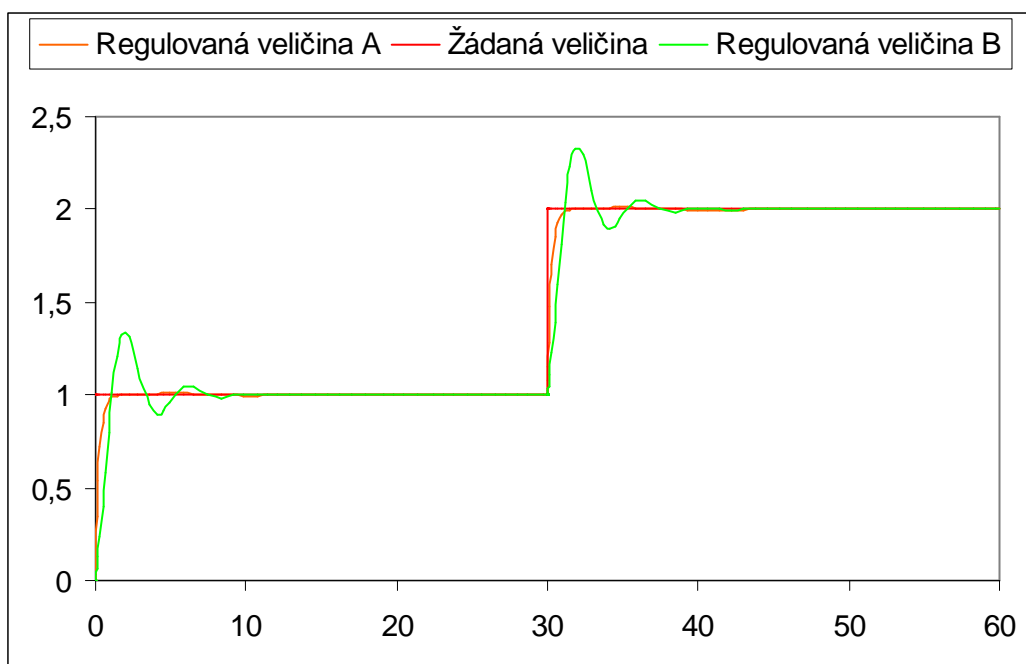
$$r_{02}=0.54$$

$$T_I=2.265$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 8.1 a je znázorněn na obr. 8.2



Obr. 8.1 Simulační schéma rozvětveného regulačního obvodu s pomocnou akční vel.



Obr. 8.2 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s pomocnou akční veličinou

Příklad 3.1

Pro daný obvod podle obr. 3.1 byly zadány přenosy:

$$1) G_{s1}(s) = \frac{1.5}{4s+1} e^{-4s}$$

$$2) G_{s2}(s) = \frac{2.5}{2.3s+1}$$

Jako regulátory byly v obr. 3.1 použity PID a PI regulátory s nastavením:

(dané regulátory byly seřizeny metodou požadovaného modelu pro překmit $k=5\%$)

A)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=0.592$$

$$T_I=0.094$$

$$T_D=0.864$$

Regulátor G_{R2}

$$r_{02}=4$$

$$T_I=8$$

Nyní provedeme experimentální nastavení PI regulátoru:

B)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=4$$

$$T_I=0.15$$

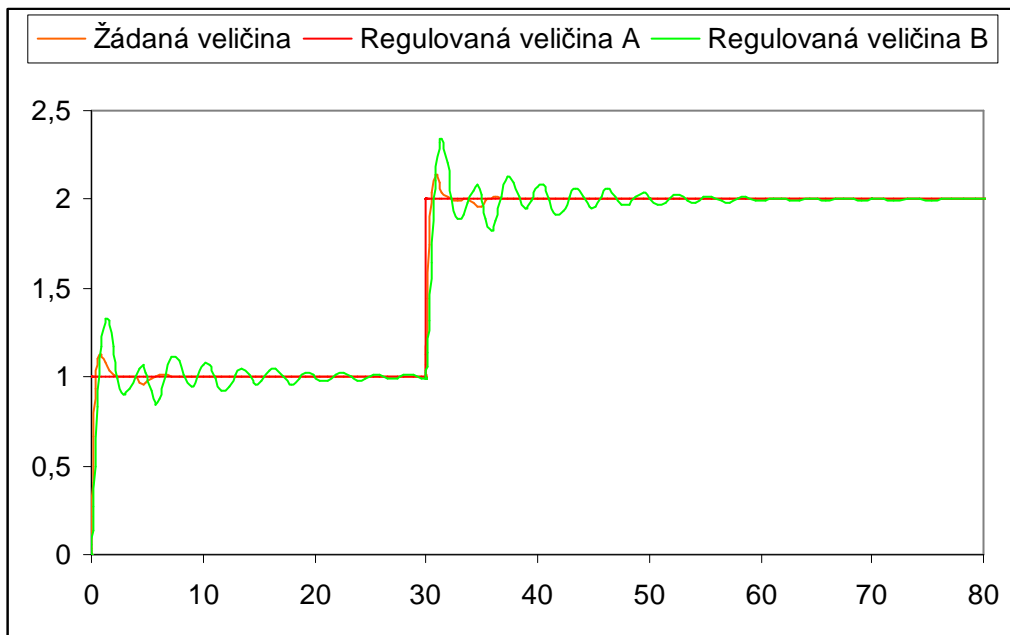
$$T_D=0.275$$

Regulátor G_{R2}

$$r_{02}=1$$

$$T_I=4$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 8.1 a je znázorněn na obr. 8.3



Obr. 8.3 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s pomocnou akční veličinou dle př. 3.1

Závěr:

U př.3 dojde velmi brzy k ustálení regulované veličiny A, což je z hlediska praxe velmi důležité regulovaná veličina B překmitla. U př. 3.1 byly regulátory nastavovány pro překmit $k=5\%$. V případě A dojde k danému překmitu, ale velmi brzy se ustálí. V případě B dojde k rozkmitání a v dané časové oblasti se vůbec neustálí, což je nevyhovující.

Příklad 4

Obvod s měřením poruchové veličiny

Pro tento obvod podle obr. 6.1 byly zadány přenosy:

$$1) G_{S1}(s) = \frac{2}{5s + 1}$$

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

Jako regulátory byly podle [1] v obr.6.1 použity PID a PD regulátory s nastavením:

(dané regulátory byly seřízeny metodou požadovaného modelu, pro požadovaný překmit $k=10\%$)

A)

Regulátor G_{R1}

$$r_{0I}=0.194$$

$$T_I= 0.02425s$$

$$T_D= 0.36375$$

Nastavení kompenzátoru

$$r_{0K}=0.5$$

$$T_{DK}=5s$$

Nyní provedeme experimentální nastavení PI regulátoru:

B)

Regulátor G_{R1}

$$r_{0I}=0.36$$

$$T_I= 0.5$$

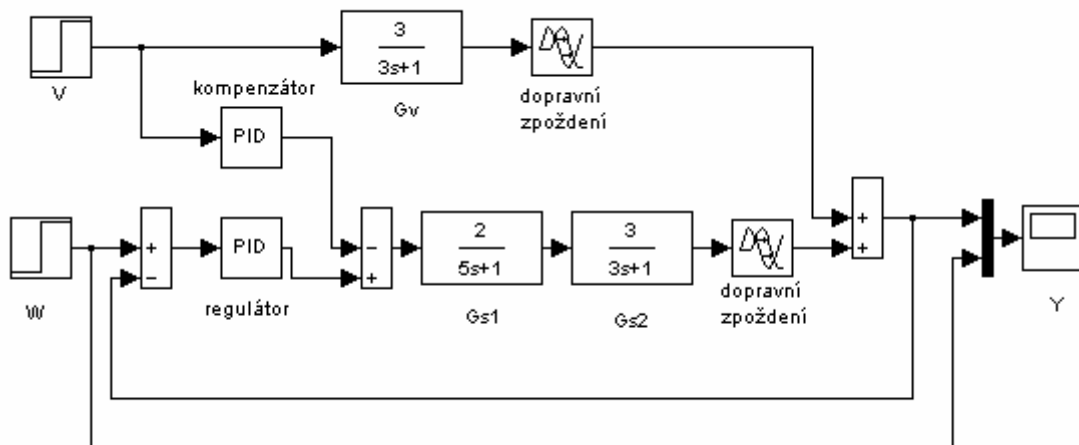
$$T_D= 0.05$$

Kompenzátor

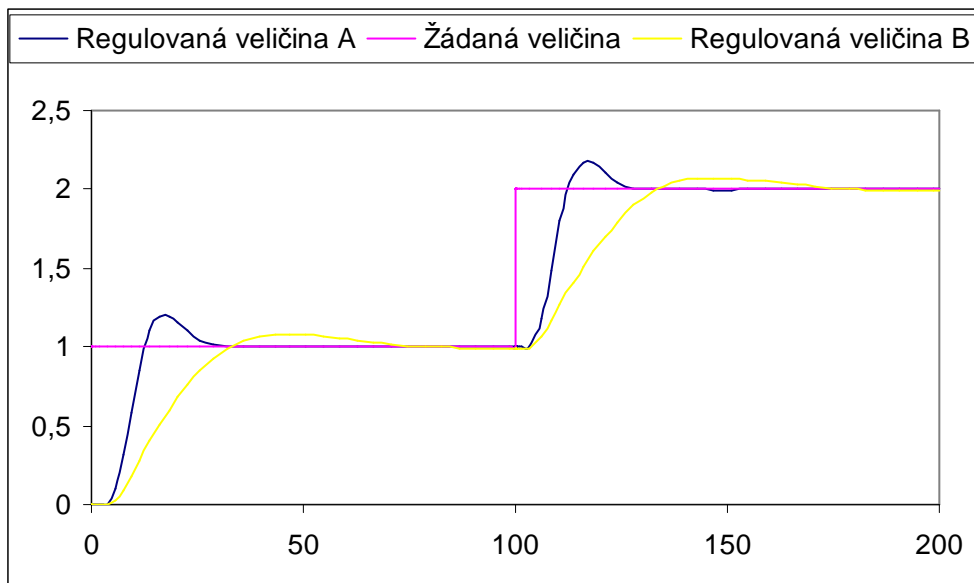
$$r_{0K}=0.54$$

$$T_{DK}=2.265$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 8.4 a je znázorněn na obr. 8.5



Obr. 8.4 Simulační schéma rozvětveného regulačního obvodu s měřením poruchové vel.



Obr. 8.5 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s měřením poruchové veličiny

Příklad 4.1

Pro daný obvod podle obr. 6.1 byly zadány přenosy:

$$1) G_{s1}(s) = \frac{3}{2.5s + 1}$$

$$2) G_{s2}(s) = \frac{4}{1.875s + 1} e^{-4s}$$

Jako regulátory byly v obr.5.2 použity PID a PD regulátory s nastavením:

(dané regulátory byly seřízeny metodou požadovaného modelu, pro požadovaný překmit $k=0\%$)

A)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=0.0335$$

$$T_I= 0.00766s$$

$$T_D= 0.0335s$$

Nastavení kompenzátoru

$$r_{0K}=0.4$$

$$T_{DK}=2.5s$$

Nyní provedeme experimentální nastavení PI regulátoru:

B)

Regulátor G_{R1}

$$r_{01}=0.001535$$

$$T_I= 0.085$$

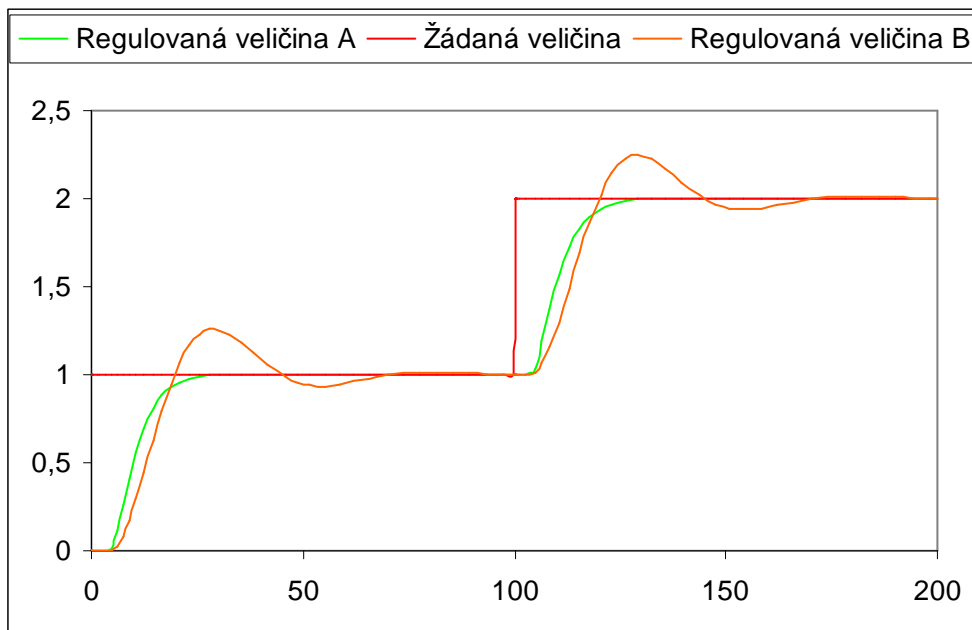
$$T_D= 0.0421$$

Kompenzátor

$$r_{0K}=0.4$$

$$T_{DK}=2.5s$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 8.4 a je znázorněn na obr. 8.6



Obr. 8.6 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s měřením poruchové vel. dle př. 4.1

Závěr:

U př. 4 jsme nastavili překmit 10%, což je zřejmé i u průběhů. V případě A však dojde k rychlému ustálení regulované veličiny. V případě B se ukázalo nevhodné nastavení regulátorů, protože uvedený průběh je kmitavý. U př. 4.1 je nastaveno $k=0$, což je zřejmé i z průběhů A. Případ B už je kmitavý, ale dojde k jeho ustálení.

Příklad 5

Obvod s vnitřním modelem

Pro tento obvod podle obr. 4.3 byly zadány přenosy:

$$1) G_p(s) = \frac{2}{(6s+1)(3s+1)}$$

$$2) G_D(s) = e^{-3s}$$

Zde platí podmínka:

$$G_p(s) = G_{PM}(s); G_D(s) = G_{DM}(s)$$

Vnitřní model využívá nominální parametry přenosu jako regulovaná soustava:

A)

$$G_P(s) = \frac{2}{(6s+1)(3s+1)}$$

 Jako vyhovující se ukázala hodnota filtrační časové konstanty $T_F=2.5s$

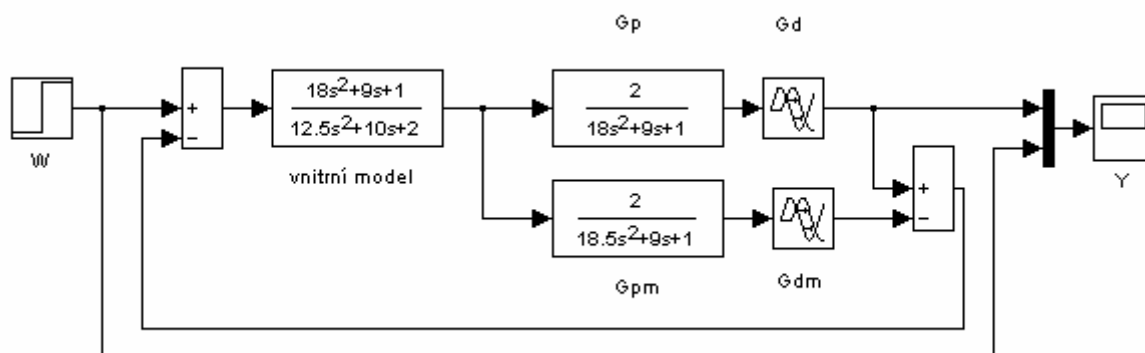
$$G_F = \frac{1}{(2.5s+1)^2}$$

B)

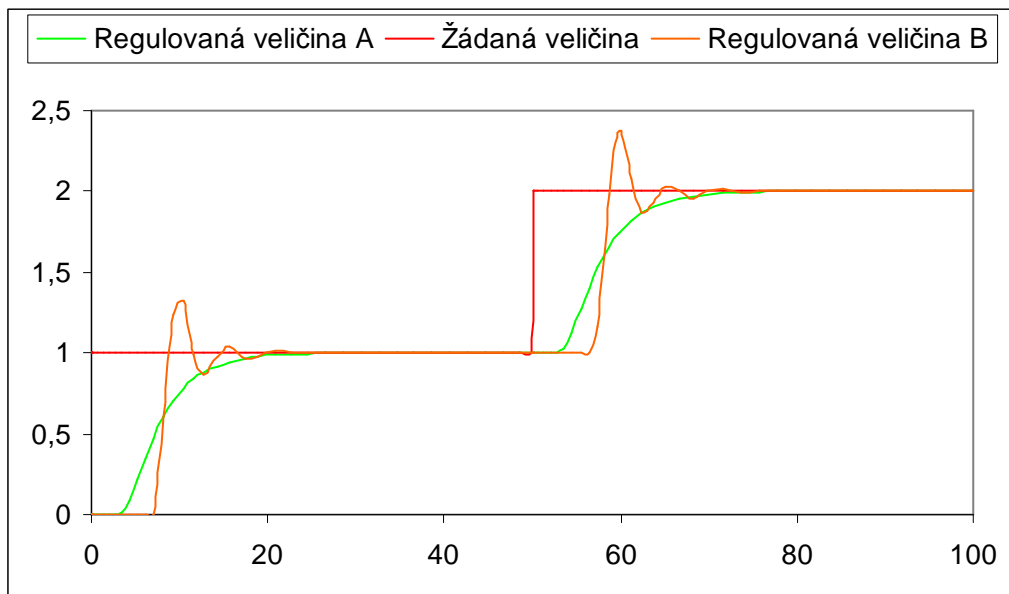
$$G_P(s) = \frac{2}{(6s+1)(3s+1)}$$

$$G_F = \frac{1}{(5s+1)^2}$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 8.7 a je znázorněn na obr. 7.8



Obr. 8.7 Simulační schéma rozvětveného regulačního obvodu s vnitřním modelem



Obr. 8.8 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s vnitřním modelem

Příklad 5.1

Pro daný obvod podle obr. 4.3 byly zadány přenosy:

$$1) G_P(s) = \frac{1}{(s+4)}$$

$$2) G_D(s) = e^{-5s}$$

Zde platí podmínka:

$$G_P(s) = G_{PM}(s); G_D(s) = G_{DM}(s)$$

Vnitřní model využívá nominální parametry přenosu jako regulovaná soustava:

A)

$$G_P(s) = \frac{1}{(s+4)}$$

Jako vyhovující se ukázala hodnota filtrační časové konstanty $T_F=2.5s$

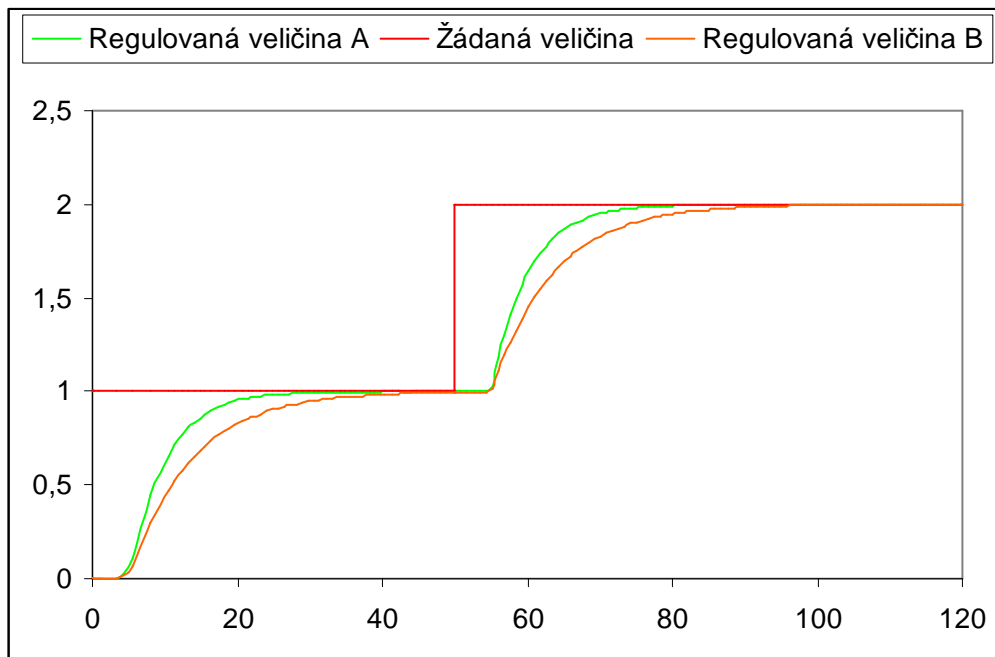
$$G_F = \frac{1}{(5s+1)}$$

B)

$$G_P(s) = \frac{1}{(s+4)}$$

$$G_F = \frac{1}{(8.5s+1)^2}$$

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 8.7 a je znázorněn na obr. 8.9



Obr. 8.9 Odezvy rozvětveného reg. obvodu s vnitřním modelem dle př. 5.1

Závěr:

U př. 5 se průběh A ustálí bez překmitu. V případě B je dojde velmi rychle k dosažení žádané veličiny a i když se ustálí tak je kmitavý. V př. 5.1 dojde k dosažení žádané veličiny A i B bez překmitu, i když v případě B později, což je dáno nastavením filtrační časové konstanty.

Příklad 6

Obvod poměrové regulace

Pro tento obvod podle obr. 7.3 byly zadány přenosy:

$$1) G_{s1}(s) = \frac{1}{(12s + 1)^2}$$

$$2) G_{s2}(s) = \frac{1}{(2s + 1)^2}$$

Jako regulátory byly podle [1] v obr.5.2 použity dva PI regulátory s nastavením:

(dané regulátory byly seřizeny metodou požadovaného modelu, pro požadovaný překmit $k=0\%$)

A)

Regulátor G_{R1}

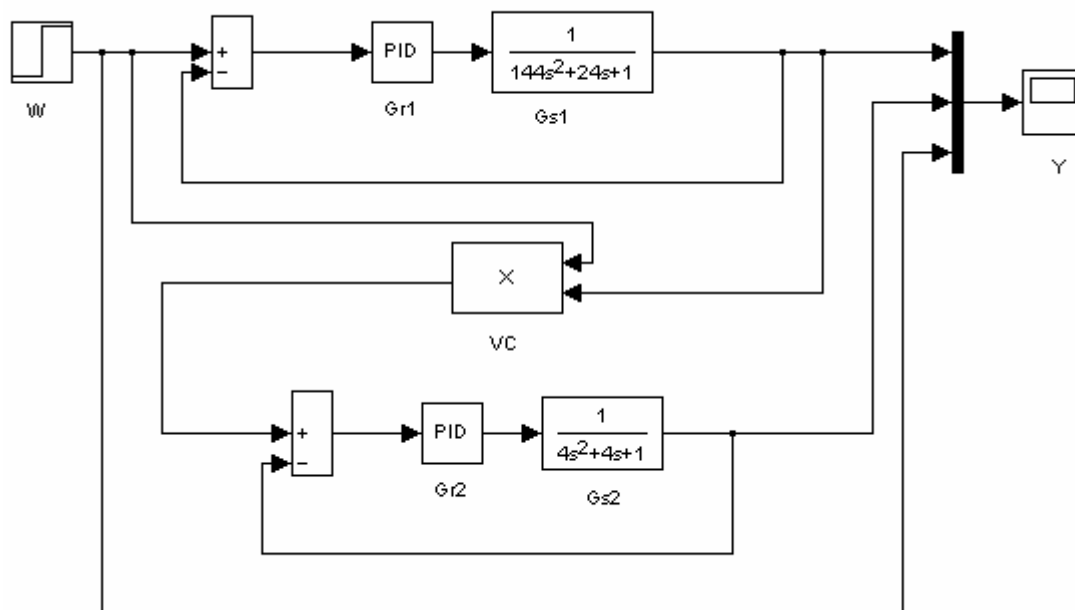
$$r_{01}=0.025$$

$$T_{I1}= 0.0208s$$

Regulátor G_{R2}

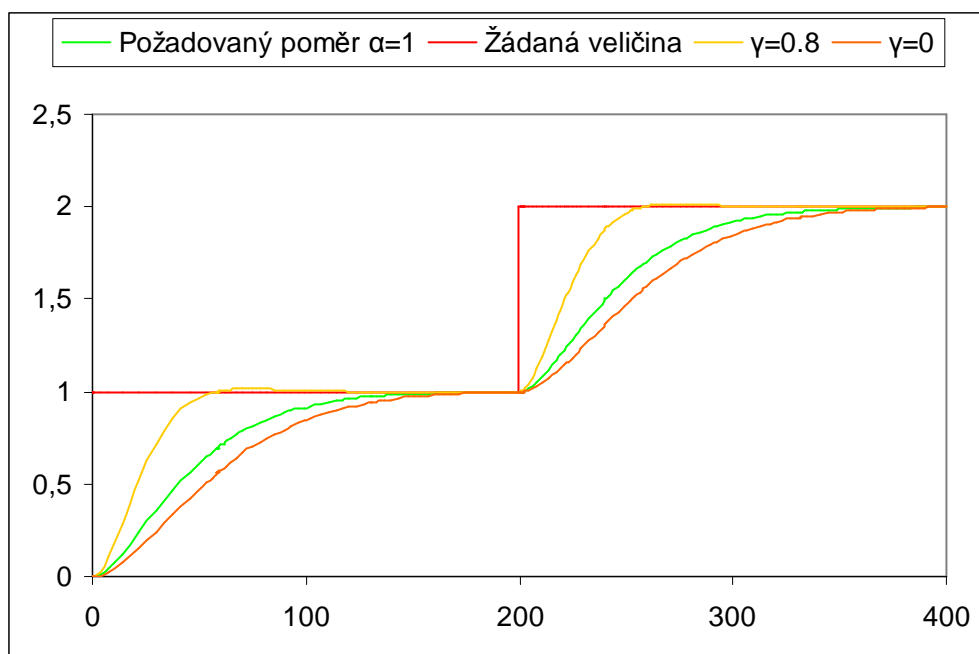
$$r_{02}=0.25$$

$$T_{I2}= 0.125s$$



Obr. 9.0 Simulační schéma rozvětveného regulačního obvodu poměrové regulace

Regulační pochod byl proveden podle schématu na obr. 9.0 a je znázorněn na obr. 9.1



Obr. 9.1 Odezvy rozvětveného reg. obvodu poměrové regulace

Závěr:

Průběhy odezev regulovaných veličin pro jednotkovou skokovou změnu polohy žádané veličiny w_1 a $\alpha=1$, to bylo zvoleno z důvodu snadnějšího srovnání, protože v tomto případě průběh $y_2(t)$ by se měl shodovat s průběhem $y_1(t)$. Pro ukázkou byly zvoleny různé hodnoty váhy γ .

ZÁVĚR

Práce se zabývá obvody se složitější strukturou, jejich vysvětlením a ilustračním ověřením. Metodika má sloužit ke studijní podpoře předmětu Teorie automatického řízení v bakalářském stupni. Bylo vybráno několik struktur obvodů, které jsou známy z běžné literatury. Jedná se o obvod s měřením poruchy, s pomocnou akční veličinou, s pomocnou regulovanou veličinou, s kompenzací dopravního zpoždění, s vnitřním modelem a obvod poměrové regulace. Obvod s měřením poruchy je vhodný v případech, kdy existuje měřitelná, ale neovlivnitelná veličina, která má na regulovanou veličinu významný vliv. Obvod s kompenzací dopravního zpoždění lze použít tam, kde je potřeba zlepšit kvalitu regulačního pochodu při regulaci soustav s dopravním zpožděním. Obvod s vnitřním modelem se využívá v různých technologických procesech, především v tepelných nebo dopravních, kde se vyskytuje dopravní zpoždění. Obvod s pomocnou akční veličinou je typický tím, že na soustavu působí další akční veličina. Do obvodů s pomocnou regulovanou veličinou přivádíme ve vhodném místě regulované soustavy pomocnou regulovanou veličinu, podmínkou však musí být, že se dá měřit. Obvody poměrové regulace jsou v technologické praxi velmi užitečné, dokážou udržovat požadovaný poměr mezi dvěma veličinami, např. při míchaní směsí nebo udržování požadovaných stechiometrických poměrů plynů.

U každého typu obvodu práce uvádí stručný teoretický a metodický návod. Na ilustrativním příkladu je vysvětlena syntéza a funkčnost obvodu je ověřena v simulaci, která je implementována v prostředí Simulink.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kubík, S. a kol. Teorie automatického řízení I, II. SNTL Alfa, Praha 1982.
- [2] Šulc, B., Vítečková, M.: Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. ČVUT Praha, 2004
- [3] Levine, W. S.: The control handbook. IEEE Press. Boca Raton, 1996.
- [4] Kuo, B.C.: Automatic control systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995.
- [5] Švarc, I.: AUTOMATIZACE Automatické řízení, VUT v Brně, 2002

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A SKRATEK

$G_{w,y}$ - přenos řízení

$G(s)$ - přenos soustavy

$G_R(s)$ - přenos regulátoru

P - proporcionální složka regulátoru

I - integrační složka regulátoru

D - derivační složka regulátoru

T_I - integrační časová konstanta regulátoru

T_D - derivační časová konstanta regulátoru

r_0 - proporcionální konstanta regulátoru

r_{-1} - integrační konstanta regulátoru

r_1 - derivační konstanta regulátoru

w - řídicí veličina

d,v - poruchová veličina

e - regulační odchylka

y - výstupní veličina

NČ - násobící člen

VČ - výpočetní člen

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1 Základní regulační obvod.....	10
obr. 2.1 Rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou.....	11
obr. 3.1 Rozvětvený regulační obvod s pomocnou akční veličinou.....	13
obr. 4.1 Uzavřená struktura jednoduchého regulačního obvodu.....	16
obr. 4.2 Ekvivalentní otevřená struktura jednoduchého regulačního obvodu.....	18
obr. 4.3 Rozvětvený regulační obvod s vnitřním modelem.....	20
obr. 4.4 Otevřená struktura rozvětveného reg. obvodu s vnitřním modelem.....	21
obr. 5.1 Rozvětvený regulační obvod se Smithovým prediktorem.....	23
obr. 5.2 Uzavřená struktura reg. obvodu se Smithovým prediktorem.....	24
obr. 5.3 Ekvivalentní otevřená struktura reg. obvodu se Smithovým prediktorem.....	25
obr. 5.4 Rozvětvený reg. obvod s modifikovaným Smithovým prediktorem.....	26
obr. 6.1 Rozvětvený reg. obvod s měřením poruchové veličiny.....	29
obr. 7.1 Regulační obvod s násobícím členem použitým na hlavní reg. veličinu y_1	32
obr. 7.2 Regulační obvod s násobícím členem použitým na hlavní žádanou vel. w_1	34
obr. 7.3 Regulační obvod s výpočetním členem.....	35
Obr. 7.4 Simulační schéma uzavřené struktury reg. obvodu se Smithovým prediktorem.....	39
Obr. 7.5 Odezvy rozvětveného reg. obvodu se Smithovým prediktorem.....	39
Obr. 7.6 Simulační schéma rozvětveného reg. Obv. se Smithovým prediktorem.....	40
Obr. 7.7 Odezvy rozvětveného reg. obv. se Smithovým prediktorem dle př. 1.1.....	41
Obr. 7.8 Simulační schéma rozvětveného reg. obvodu s pomocnou reg. regulovanou veličinou.....	43
Obr. 7.9 Odezvy rozvětveného reg. obv. s pomocnou regulovanou veličinou.....	43
Obr. 8.0 Odezvy rozvětveného reg. obv. s pomocnou reg. veličinou dle př. 2.1.....	45
Obr. 8.1 Simulační schéma rozvětveného reg. obvodu s pomocnou akční vel.....	47

Obr. 8.2 Odezvy rozvětveného reg. obv. s pomocnou akční veličinou.....	47
Obr. 8.3 Odezvy rozvětveného reg. obv. s pomocnou akční veličinou dle př. 3.1.....	49
Obr. 8.4 Simulační schéma rozvětveného reg. obvodu s měřením poruchové vel.....	51
Obr. 8.5 Odezvy rozvětveného reg. obv. s měřením poruchové veličiny.....	51
Obr. 8.6 Odezvy rozvětveného reg. obv. s měřením poruchové vel. dle př. 4.1.....	53
Obr. 8.7 Simulační schéma rozvětveného reg. obvodu s vnitřním modelem.....	54
Obr. 8.8 Odezvy rozvětveného reg. obv. s vnitřním modelem.....	55
Obr. 8.9 Odezvy rozvětveného reg. obv. s vnitřním modelem dle př. 5.1.....	56
Obr. 9.0 Simulační schéma rozvětveného reg. obvodu poměrové regulace.....	58
Obr. 9.1 Odezvy rozvětveného reg. obvodu poměrové regulace.....	58

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1 Doporučené typy konvenčních regulátorů a hodnoty jejich stavitelných parametrů pro modifikovaný Smithův prediktor.....	27
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

P1: CD-ROM obsahující práci ve formátu PDF a DOC