

Simulace automatického řízení bloku kotel – turbína – generátor v ostrovním provozu

Simulation of automatic of unit pool drum – turbine – generator
in solitary operation

Lukáš Krajča

Bakalářská práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Lukáš KRAJČA
Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Automatické řízení a informatika

Téma práce: Simulace automatického řízení bloku kotel – turbina
– generátor v ostrovním provozu

Zásady pro vypracování:

1. Pro simulaci využijte MATLAB – Simulinku
2. Vyšetřete chování regulované soustavy na vstupy: Akční veličiny – změna paliva, změny odebíraného elektrického výkonu
3. Navrhnete jednorozměrový regulační obvod a zvolte různé typy regulátorů
Nalezněte optimální seřízení jednotlivých zvolených typů regulátorů
4. Zhodnoťte kvalitu regulačních obvodů s jednotlivými typy regulátorů
5. Navrhnete rozvětvené jednorozměrové regulační obvody a vyšetřete průběhy regulačních pochodů
6. Zhodnoťte kvalitu jednorozměrového regulačního obvodu s nejlepším typem a seřízením regulátoru a srovnajte s průběhem nejvhodnějšího jednorozměrového regulačního obvodu

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Balátě, J. (1987): Dynamika a regulace parních kotlů (skriptum), VUT v Brně - Fakulta strojní, ES VUT Brno,
2. Balátě, J. (2003): Automatické řízení, BEN - technická literatura, Praha, ISBN 80-7300-020-2,
3. Balda, M., Hanuš, B. (1986): Základy technické kybernetiky, SNTL/ALFA, Praha,
4. Hanuš, B., Olehla, M., Modrlák, O. (2000): Číslicová regulace technologických procesů. Algoritmy, matematicko-fyzikální analýza, identifikace, adaptace. ISBN 80-214-1460-XY, VUT/UM, Brno
5. Dušek, F. (2000) MATLAB a SIMULINK - úvod do používání (skriptum), Univerzita Pardubice, ISBN 80-7194-273-1
6. Eliáš, J. (2004): Simulace regulace výkonu elektrárenského bloku kotel - turbína - generátor, bakalářská práce, FT UTB Zlín

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jaroslav Balátě, DrSc.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

22. února 2008

Termín odevzdání bakalářské práce:

6. června 2008

Ve Zlíně dne 22. února 2008

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je jednoduchá simulace automatického řízení bloku kotel – turbína – generátor v ostrovním provozu pomocí softwaru MATLAB – SIMULINK. Vyšetřují se odezvy regulované soustavy při změně akční veličiny (změně paliva) a změně odebíraného elektrického výkonu. Navrhuje se jednorozměrový regulační obvod, volí se různé typy regulátorů a porovnáváme kvalitu regulace.

Klíčová slova: kotel, turbína, generátor, regulátor, regulační obvod

ABSTRACT

The purpose of this bachelor thesis is a simple simulation of automatic control of unit pool drum - turbine - generator, in solitary operation served by MATLAB - SIMULINK software. Responses of controlled assembly during the change of actuating variable (change of fuel) and change of electric output, are investigated. We design single-dimensional control circuit, select various types of regulators and compare the regulation quality.

Keywords: drum, turbine, generator, regulator, control circuit

Zde bych chtěl poděkovat Prof., Ing. Jaroslavu Balátěmu, DrSc. za odborné vedení, cenné rady a ochotu při spolupráci na této práci. Moje poděkování dále patří také Ing. Karlu Perůtkovi, Ph. D. za pomoc při práci s programem MATLAB – SIMULINK.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

OBSAH

ÚVOD.....	8
TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1 REGULOVANÁ SOUSTAVA	10
1.1 <i>Proporcionální regulované soustavy</i>	12
1.2 <i>Regulátory</i>	12
Podle průběhu výstupní veličiny můžeme regulátory dělit na spojité a nespojitě. U spojitých regulátorů jsou všechny veličiny spojité v čase. V nespojitém regulátoru je některý člen pracující nespojitě. My se budeme dále zabývat spojitými regulátory.	13
1.2.1 Dynamické vlastnosti spojitých regulátorů.....	13
1.2.2 Stavitelné parametry regulátorů.....	14
1.2.3 Charakteristika činnosti spojitých regulátorů	16
1.2.4 Volba struktury regulátoru	17
1.2 <i>Regulační obvod</i>	18
1.3 <i>Stabilita regulačního obvodu</i>	22
1.4 <i>Kritérium jakosti regulace podle funkcionálu odchylky (integrálního kritéria)</i>	25
1.5 <i>Metody seřízení regulátorů</i>	27
1.5.1 Metody seřízení regulátorů (metoda Ziegler – Nicholsova)	27
1.5.2 Metoda čtvrtinového tlumení	29
1.5.3 Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy	31
1.6 <i>Rozvětvené jednorozměrové regulační obvody</i>	32
1.6.1 Regulační obvod s přiřazením poruchové veličiny.....	34
1.7 <i>Matlab – Simulink</i>	37
PRAKTICKÁ ČÁST	38
2 ZADANÝ MODEL ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU A JEHO POPIS	39
2.1 <i>Vyšetření chování regulované soustavy na vstupy</i>	41
2.1.1 Odezvy regulované soustavy na změnu akční veličiny – změnu paliva.....	41
2.1.2 Odezvy regulované soustavy na změnu odebíraného elektrického výkonu	43
3 NÁVRH JEDNOROZMĚROVÉHO REGULAČNÍHO OBVODU.....	45
3.1 <i>Návrh regulátoru pro udržení konstantního tlaku na výstupu z kotle</i>	45
3.1.1 Nastavení regulátoru metodou kritického tlumení (metoda Ziegler - Nicholsova).....	45
3.1.2 Nastavení regulátoru metodou čtvrtinového tlumení.....	47
3.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky	48
3.2 <i>Návrh regulátoru pro udržení konstantního tlaku na výstupu z druhého dílu přehříváku</i>	49
3.2.1 Nastavení regulátoru metodou kritického tlumení (metoda Ziegler - Nicholsova).....	49
3.2.2 Nastavení regulátoru metodou čtvrtinového tlumení.....	50
3.2.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky	51
3.3 <i>Návrh regulátoru pro udržení konstantního tlaku na výstupu z parovodu</i>	53
3.3.1 Nastavení regulátoru metodou kritického tlumení (metoda Ziegler - Nicholsova).....	53
3.3.2 Nastavení regulátoru metodou čtvrtinového tlumení.....	54

3.3.3	Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky	55
4	ZHODNOCENÍ KVALITY REGULAČNÍHO POCHODU	57
5	NÁVRH ROZVĚTVENÉHO JEDNOROZMĚROVÉHO REGULAČNÍHO OBVODU	58
5.1	<i>Rozvětvený jednoparametrový obvod s měřením poruchové veličiny</i>	58
6	ZHODNOCENÍ KVALITY NEROZVĚTVENÉHO JEDNOROZMĚROVÉHO REGULAČNÍHO OBVODU A ROZVĚTVENÉHO REGULAČNÍHO OBVODU	60
	ZÁVĚR	63
	CONCLUSION	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK	71
	SEZNAM PŘÍLOH	72

ÚVOD

Výroba elektřiny a páry v tepelné elektrárně probíhá v řadě technologických zařízení, z nichž kotel, turbína a elektrický generátor jsou považovány za hlavní technologická zařízení a procesy v nich probíhající za hlavní výrobní procesy. Automatizovaný provoz musí zajistit plynulou dodávku elektrické energie podle okamžité potřeby (tzn. rychlé přizpůsobení výkonu výrobních zařízení okamžitému požadavku). Z technických i ekonomických důvodů je u elektrárenských kotlů požadována vysoká přesnost regulace teploty páry.

Elektrárenský blok popisujeme pomocí blokového schématu. Ve schématu jsou znázorněny důležité části technologického procesu se základními parametry, které je popisují (např. přenosové funkce)

Na základě znalostí algebry blokových schémat je možné provést výpočet přenosu pro některou z výstupních veličin jako odezvu na některou ze vstupních veličin. V podstatě jde o stanovení náhradního schéma s výsledným celkovým přenosem určeným dílčími přenosy obsaženými v blokovém schéma celé regulované soustavy.

Z důvodů pracnosti klasického matematického řešení celkového přenosu se využívá programových prostředků, v našem případě Matlab – Simulinku, pomocí kterého modelujeme modely dílčích přenosů v zapojení odpovídajícím blokovému schéma. Na takto sestaveném modelu regulované soustavy lze snadno vyšetřovat její dynamické chování a rovněž si i ověřovat návrh vhodné struktury regulačního obvodu včetně optimálního seřízení regulátorů. Můžeme také simulovat poruchové a krizové stavy v obvodu, které by mohly v praxi nastat.

I. TEORETICKÁ ČÁST

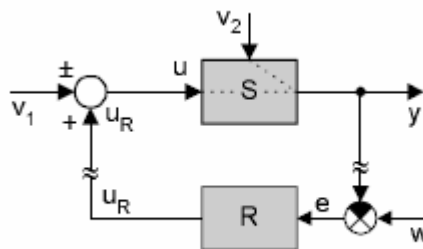
1 REGULOVANÁ SOUSTAVA

Rozlišujeme dva druhy řízení : ovládání a regulace. Princip systému ovládání je takový, že ovládací prvek je informován pouze o cíli , ale není informován o poruchách a stavu ovládaného prvku.

My se budeme dále zabývat pouze systémem regulace. Je to značně dokonalejší způsob řízení, než ovládání, protože regulující prvek dostává informace o regulovaném prvku a využije regulační odchylku tak, aby se výsledek regulace co nejvíce přibližoval požadovanému cíli.

Regulační pochod probíhá v regulačním obvodu, který vzniká připojením regulátoru k regulované soustavě (obr. 1.). Výstupní veličinou regulačního obvodu je regulovaná veličina $y(t)$, vstupními veličinami jsou poruchové veličiny $v_1(t)$, která působí na vstupu regulované soustavy a $v_2(t)$, která vstupuje do regulované soustavy v průběhu řízeného technologického procesu. Přenos soustavy $G_S(s)$ a přenos poruchy soustavy můžeme definovat z rovnice (1).

$$Y(s)=G_S(s)U_R(s)+G_{Sv_i}(s)V_i(s) \quad (1)$$



Obr. 1. Způsob základního zapojení
jednoduchého regulačního obvodu

S – regulovaná soustava

R – regulátor

y – regulovaná veličina

u – akční veličina

v_1, v_2 – poruchové veličiny

w – požadovaná hodnota

e – regulační odchylka ($e = w - y$)

Za předpokladu, že $v_i(t) = 0$, je přenos regulované soustavy

$$G_S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2)$$

Přenos poruchy, za předpokladu, že $u_R(t) = 0$ a $i = 1, 2, \dots$, je

$$G_{Sv_i}(s) = \frac{Y(s)}{V_i(s)} \quad (3)$$

Častým způsobem vyjadřování dynamických vlastností regulované soustavy je **lineární diferenciální rovnice** s konstantními koeficienty spolu se zadanými počátečními podmínkami, která pro n -tý řád setrvačnosti má tvar

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = u(t), \quad (4)$$

a z které pro nulové počáteční podmínky (celkem n počátečních podmínek)

$$y(0) = y'(0) = \dots = y^{(n-1)}(0) = 0 \quad (5)$$

a tvar vstupního signálu $u(t)$ můžeme použitím Laplaceovy transformace stanovit přenos regulované soustavy

$$G_S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}. \quad (6)$$

U regulovaných soustav je důležitým koeficientem tzv. součinitel autoregulace a_0 , který určuje, zda jde o regulovanou soustavu proporcionální nebo integrační, a to:

při $a_0 \neq 0$ - jedná se o proporcionální soustavu,

$a_0 = 0$ - jedná se o integrační soustavu.

1.1 Proporcionální regulované soustavy

Mají tu vlastnost, že po vychýlení z rovnovážného stavu jsou schopny teoreticky vždy dosáhnout nového rovnovážného stavu bez působení (připojení) regulátoru. Dynamické vlastnosti proporcionální regulované soustavy se setrvačností n -tého řádu vyjadřuje rov. (4) a přenos (6), který lze uvádět modifikovaně, např. ve tvarech

$$G_S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots} = \frac{\frac{1}{a_0}}{1 + \frac{a_1}{a_0}s + \frac{a_2}{a_0}s^2 + \dots} = \quad (7)$$

$$\frac{k_S}{1 + T_1s + T_2^2s^2 + \dots} = \dots = \frac{k_S}{(1 + T_a s)(1 + T_b s)},$$

kde

$\frac{1}{a_0} = k_S$ je tzv. zesílení regulované soustavy,

$T_1, T_2 [s]$ – konstanty regulované soustavy (mají rozměr času),

$T_a, T_b [s]$ – časové konstanty regulované soustavy se setrvačností 2. řádu v relaci s konstantami regulované soustavy T_1 a T_2 podle vztahů

$$T_1 = T_a + T_b; \quad T_2^2 = T_a T_b. \quad (8)$$

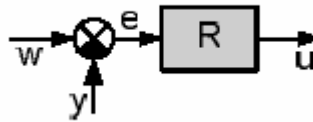
Z fyzikálně matematické analýzy vyplývá, že **regulované soustavy jako parní, vodní a plynové turbíny, pístové motory a stejnosměrné derivační elektromotory, vzhledem k řízení úhlové rychlosti, se chovají jako proporcionální soustava se setrvačností 1. řádu.**

1.2 Regulátory

Regulátorem je nazýváno zařízení v regulačním obvodu, kterým se uskutečňuje proces automatické regulace. Do regulátoru (řídícího systému) zahrnujeme obvykle – kromě regulované soustavy – všechny členy regulačního obvodu. Podstata regulátoru spočívá ve vyhodnocení regulační odchylky

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (9)$$

jako vstupního signálu, ve zpracování této odchylky podle zákona řízení, který je vlastní použitému regulátoru, a ve vytvoření výstupního signálu – akční veličiny $u_R(t)$ s cílem takovým, aby odchylka $e(t)$ byla eliminována zcela nebo byla co nejmenší.



Obr. 2. Zjednodušené blokové schéma regulátoru

Podle průběhu výstupní veličiny můžeme regulátory dělit na spojitě a nespojitě. U spojitých regulátorů jsou všechny veličiny spojitě v čase. V nespojitém regulátoru je některý člen pracující nespojitě. My se budeme dále zabývat spojitými regulátory.

1.2.1 Dynamické vlastnosti spojitých regulátorů

Při rozboru dynamických vlastností regulátoru se prakticky omezíme na dynamické vlastnosti ústředního členu. Použijeme-li značení z obr. 4, můžeme dynamické chování činnosti kombinovaného regulátoru, popsat lineární integrodiferenciální rovnicí

$$\dots + T_2^2 u''(t) + T_1 u'(t) + u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

kde $r_0 e(t)$ je proporcionální složka regulátoru,

$r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$ - integrační složka regulátoru,

$r_1 \frac{de(t)}{dt}$ - derivační složka regulátoru,

$\dots, T_2^2 u''(t), T_1 u'(t)$ - zpožďující členy regulátoru.

Jde o popis chování tzv. proporcionálně-integračně-derivačního regulátoru se zpožďujícími členy neboli skutečného PID regulátoru. Provedeme-li Laplaceovu transformaci, za předpokladu nulových počátečních podmínek, můžeme ji upravit na přenos skutečného PID regulátoru

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s}{1 + T_1 s + T_2^2 s^2 + \dots} = \frac{r_0 \left(1 + \frac{r_{-1}}{r_0} \frac{1}{s} + \frac{r_1}{r_0} s\right)}{1 + T_1 s + T_2^2 s^2 + \dots} = \frac{r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)}{1 + T_1 s + T_2^2 s^2 + \dots}, \quad (11)$$

kde r_0 je proporční konstanta regulátoru,

r_{-1} - integrační konstanta regulátoru,

r_1 - derivační konstanta regulátoru,

$r_0 = k_R$ - zesílení analogového regulátoru,

$T_I = \frac{r_0}{r_{-1}}$ - integrační časová konstanta regulátoru,

$T_D = \frac{r_1}{r_0}$ - derivační časová konstanta regulátoru.

Jestliže časové konstanty zpožďujících členů položíme rovné nule ($T_1=0$, $T_2=0$, ...), dostaneme pohybovou rovnici i přenos ideálního PID regulátoru

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt}, \quad (12)$$

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right), \quad (13)$$

A nyní podle toho, které z konstant r_0 , r_{-1} , r_1 položíme rovné nule, dostáváme základní druhy regulátorů: P regulátor, I regulátor, derivační složka se používá pouze u kombinovaných regulátorů (D regulátor by nic nevěděl o skutečné hodnotě regulační odchylky, neboť na vstupu je signál úměrný první derivaci $e -$ rychlosti odchylky) a kombinované regulátory: PD regulátor, PI regulátor a PID regulátor.

Tyto regulátory můžeme uvažovat jako ideální (bez zpožďujících členů), nebo jako skutečné (se zpožďujícími členy).

1.2.2 Stavitelné parametry regulátorů

Ve vztazích (10 a 11) jsme se setkali s konstantami regulátorů r_0 , r_{-1} , r_1 a časovými konstantami regulátorů T_I , T_D . U skutečných regulátorů se setkáváme se stavědly, kterými lze určovat vlivnost (váhu) jednotlivých složek spojitého regulátoru, a sice s

$P_p[\%]$ – pásmem proporcionality,

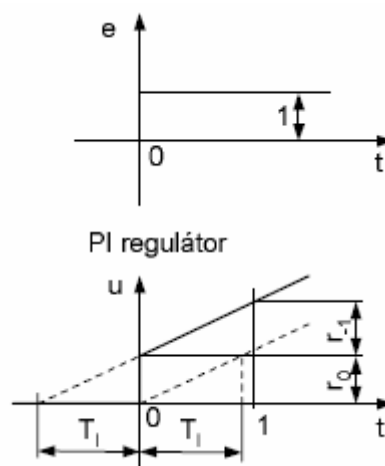
$$T_I = \frac{r_0}{r_{-1}} \text{ [s]} - \text{integrační časovou konstantou,}$$

$$T_D = \frac{r_1}{r_0} \text{ [s]} - \text{derivační časovou konstantou.}$$

Pásmo proporcionality určuje o jakou hodnotu, vyjádřenou v procentech, se musí změnit vstupní signál regulátoru, aby se akční člen přestavil z jedné krajní polohy do druhé.

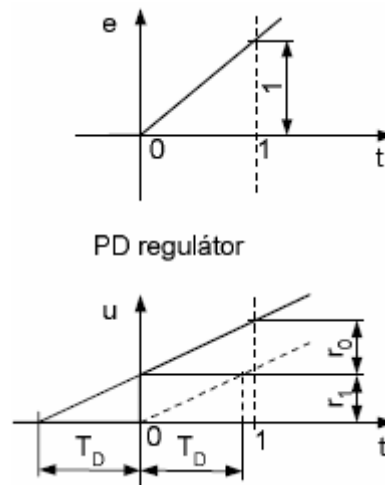
Integrační časovou konstantu určíme z přechodové charakteristiky PI regulátoru, tj. pro vstupní signál rovný jednotkovému skoku (obr. 3.). Integrační časová konstanta je čas, který by potřeboval čistě integrační regulátor, aby přestavil akční člen (výstupní signál) do polohy, které dosáhne PI regulátor v čase $t = 0$ vlivem své proporcionalní složky.

Derivační časovou konstantu určíme u PD regulátoru pro vstupní signál rovný jednotkové rychlosti (obr. 4.). Derivační časová konstanta je čas, který by potřeboval čistě proporcionalní regulátor, aby přestavil akční člen do polohy, které dosáhne PD regulátor v čase $t = 0$ vlivem své derivační složky.



Obr. 3. Přechodová charakteristika

PI regulátoru



Obr. 4. Odezva na jednotkovou rychlost
PD regulátoru

1.2.3 Charakteristika činnosti spojitých regulátorů

P regulátor – v uzavřeném regulačním obvodu pracuje s trvalou regulační odchylkou při regulaci proporcionálních regulovaných soustav. Má dobré stabilitní vlastnosti.

I regulátor – v uzavřeném regulačním obvodu pracuje pouze s přechodnou regulační odchylkou. Regulační pochod se ustálí tehdy, kdy regulační odchylka $e(t) = 0$. Nevyhoví podmínkám stability regulačního obvodu, když by měl regulovat integrační regulovanou soustavu, **proto I regulátor v praktické části nebudeme navrhovat.**

D – člen – není schopen samostatně fungovat jako regulátor připojený k regulované soustavě, protože vstupním signálem je derivace regulační odchylky a neví tedy nic o velikosti (hodnotě) odchylky $e(t)$. Připustí libovolně velkou ustálenou regulační odchylku. Jako člen v kombinovaném regulátoru zlepšuje stabilitní vlastnosti regulačního obvodu. Natáčí fázi amplitudové fázové charakteristiky v komplexní rovině o $+90^\circ$. Informuje regulátor o změně regulační odchylky.

PI regulátor – v uzavřeném regulačním obvodu odstraňuje trvalou regulační odchylku, kterou bychom měli při použití P regulátoru. Zlepšuje stabilitní vlastnosti vzhledem

k použití čistě I regulátoru. Pro určitá nastavení stavitelných parametrů regulátoru vyhovuje z hlediska stability i pro integrační regulované soustavy. V počátku regulačního pochodu převládá vliv proporcionální složky, s narůstajícím časem převládá vliv integrační složky.

PD regulátor – zlepšuje stabilitní vlastnosti regulačního obvodu ve srovnání s použitím čistě P regulátoru. Je tedy možné pracovat s vyšším zesílením regulátoru a tedy menší trvalou regulační odchylkou vzhledem k použití čistě P regulátoru při regulaci proporcionálních soustav. V počátku regulačního pochodu převládá vliv derivační složky, s narůstajícím časem převládá vliv proporcionální složky; regulátor pracuje s přechodným zvýšeným zesílením.

PID regulátor – v uzavřeném regulačním obvodu odstraňuje vlivem I složky trvalou regulační odchylku a vlivem D složky zlepšuje stabilitní vlastnosti regulačního obvodu. V počátku přechodového děje převládá derivační složka regulátoru, s narůstajícím časem převládá integrační složka regulátoru.

1.2.4 Volba struktury regulátoru

Dokonalý regulátor se širokými možnostmi nastavení jednotlivých nastavitelných parametrů zaručí sice jakostní průběh regulačního pochodu, je však nákladný, složitý a vyžaduje kvalifikované seřízení, aby byl využit. Na druhé straně se jednoduchý a levný regulátor snadno seřídí, avšak nesplní zase všechny požadavky na regulaci. Volba struktury neboli typu regulátoru je tedy do značné míry určena vlastnostmi regulované soustavy.

Typ regulátoru: Hodí se k regulaci soustav:

- I proporcionálních soustav se setrvačností 1. řádu, s malou časovou konstantou, bez dopravního zpoždění, při pomalých a malých změnách zatížení,

- P proporcionálních i integračních se setrvačností 1, řádu, se střední časovou

konstantou, popř. s menším dopravním zpožděním, při malých změnách zatížení, zanechává trvalou regulační odchylku při regulaci proporcionálních soustav,

PI proporcionálních i integračních se setrvačností vyššího řádu s libovolnými časovými konstantami, s velkým dopravním zpožděním, při velkých a pomalých změnách zatížení,

PD proporcionálních i integračních se setrvačností vyššího řádu se středními časovými konstantami, s velkým dopravním zpožděním při malých změnách zatížení, zanechává trvalou regulační odchylku,

PID proporcionálních i integračních se setrvačností vyššího řádu s libovolnými časovými konstantami i s delším dopravním zpožděním, při velkých a rychlých změnách zatížení.

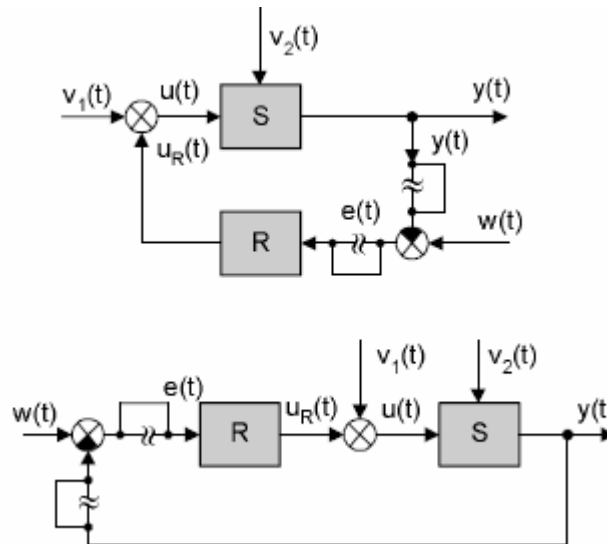
Všeobecně lze konstatovat, že u většiny běžných regulačních problémů se použije regulátorů P nebo PI a ve složitějších případech regulátorů PID. Ryze integračních regulátorů se používá málo. Rozhodnutí o tom, zda se zvolí regulátor P nebo PI, závisí zpravidla na přípustné trvalé regulační odchylce.

1.2 Regulační obvod

Regulační pochod probíhá v regulačním obvodu, který vzniká připojením regulátoru k regulované soustavě (Obr. 5.). Výstupní veličinou regulačního obvodu je regulovaná veličina $y(t)$, vstupními veličinami jsou poruchové veličiny, např. $v_1(t)$, která působí na vstupu regulované soustavy a $v_2(t)$, která vstupuje do regulované soustavy někde v průběhu řízeného technologického procesu, případně i na výstupu ze soustavy a žádaná veličina $w(t)$, jejíž rozdíl vzhledem k regulované veličině vytváří regulační odchylku $e(t)$ jako vstupní signál regulátoru:

$$e(t)=w(t)-y(t) \quad (14)$$

Z fyzikálního hlediska je zřejmé, že regulátor pracuje tak, aby zmenšoval, případně úplně odstranil regulační odchylku, tudíž jeho výstupní signál má opačné znaménko než signál vstupní.



Obr. 5. Způsoby základního zapojení jednoduchého regulačního obvodu

Respektuje se nepsaná dohoda, že přenos otevřeného regulačního obvodu má kladný smysl, jako v sérii řazené dva kladné členy – regulátor a regulovaná soustava (viz obr. 5 a rov. 15)

$$G_0(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = G_R(s)G_S(s) = \frac{M(s)}{N(s)}, \quad (15)$$

kde $M(s)$ je polynom čitatele přenosu,

$N(s)$ je polynom jmenovatele přenosu.

Pro uzavřený regulační obvod za předpokladu, že vstupní signály budou

$$v_1(t)=v_2(t)=0 \text{ a } w(t)=0, \quad (16)$$

tj., že na obvod nebude působit žádná veličina ani poruchy, bude platit

$$e(t)=-y(t) \quad (17)$$

a z toho

$$G_R(s)G_S(s) = -\frac{Y(s)}{E(s)} = -1, \quad (18)$$

takže dostáváme

$$1 + G_R(s)G_S(s) = 0 \quad (19)$$

Což je po úpravě tvar charakteristické rovnice k diferenciální rovnici uzavřeného regulačního obvodu bez působení žádané veličiny i poruch ve tvaru

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = 0. \quad (20)$$

Je to lineární homogenní diferenciální rovnice s konstantními koeficienty.

Uvažujeme-li uzavřený regulační obvod, u kterého nejsou splněny podmínky (16), pro jednoduchost uvažujme, že obvod má pouze jednu poruchovou veličinu, můžeme sestavit rovnice součtového a rozdílového uzlu

$$U(s) = V(s) + U_R(s), \quad (21)$$

$$E(s) = W(s) - Y(s),$$

a rovnice závislostí mezi výstupními a vstupními veličinami bloků

$$U_R(s) = G_R(s)E(s), \quad (22)$$

$$Y(s) = G_S(s)U(s).$$

Vyloučením všech veličin kromě vstupních a výstupních obdržíme Laplaceův obraz rovnice uzavřeného regulačního obvodu při působení poruchy a řízení

$$Y(s)[1 + G_R(s)G_S(s)] = G_S(s)V(s) + G_R(s)G_S(s)W(s), \quad (23)$$

z které pro podmínku, že $v(t)=0$, určíme

přenos řízení

$$G_W(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)}, \quad (24)$$

a pro podmínku, že $w(t)=0$, určíme zase

přenos poruchy

$$G_V(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)}. \quad (25)$$

Nyní můžeme definovat **cíl řízení**, který je zadán podmínkou, aby výstupní signál $y(t)$ byl roven (ideálním případě) žádanému signálu $w(t)$ bez ohledu na škodlivé působení poruchového signálu $v(t)$, tj. musí platit

$$y(t)=w(t). \quad (26)$$

Víme, že přenos, resp. Diferenciální rovnice regulované soustavy má pevně stanovené koeficienty na rozdíl od regulátoru, u kterého přenos, resp. diferenciální rovnice obsahuje některé ovlivnitelné koeficienty seřízením nastavitelných parametrů regulátoru.

Je zřejmé, že pro přenos regulátoru, jehož přenos bude $|G_R(s)| \gg 1$, cíl řízení (26) se naplní tehdy, bude-li přenos řízení (24) a přenos poruchy (25)

$$G_W(s)=1, \quad (27)$$

$$G_V(s)=0 \quad (28)$$

V některých případech se používají tzv. odchylkové přenosy, které lze rovněž odvodit z obr. 5. pro podmínku $w(t) \neq 0$:

odchylkový přenos řízení

$$G_{ew}(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{1}{1 + G_R(s)G_S(s)}, \quad (29)$$

odchylkový přenos poruchy

$$G_{ev}(s) = \frac{E(s)}{V(s)} = -\frac{G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)}. \quad (30)$$

Všechny čtyři odvozené přenosy (24. 25. 29. 30.) mají stejný jmenovatel. Dosadíme-li konkrétní přenosy $G_R(s)$ a $G_S(s)$, úpravou obdržíme tzv. charakteristický polynom. Položíme-li jej rovný nule, obdržíme **charakteristickou rovnici uzavřeného regulačního obvodu** bez působení řízení a poruch, viz rov. (14):

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0. \quad (31)$$

Homogenní lineární diferenciální rov. (20) i její charakteristická rov. (31) jsou určující pro řešení stability uzavřeného regulačního obvodu.

1.3 Stabilita regulačního obvodu

Regulační pochod v lineárních regulačních obvodech s konstantními parametry je popsán lineární diferenciální rovnicí obecně n-tého řádu

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = \quad (32)$$

$$= \begin{cases} b_m w^{(m)}(t) + \dots + b_1 w'(t) + b_0 w(t), \\ c_m v^{(m)}(t) + \dots + c_1 v'(t) + c_0 v(t), \end{cases}$$

kde $y(t)$ je regulovaná veličina, přičemž pravá strana lineární diferenciální rovnice je modifikována podle toho, která z veličin, tj. žádaná veličina $w(t)$ nebo poruchová veličina $v(t)$, regulační pochod vyvolala.

Označíme-li přenos lineárního regulačního obvodu (viz obr. 5) $G(s)$ a obecně vstupní signál $m(t)$, tj. $w(t)$, resp. $v(t)$, je Laplaceův obraz regulované veličiny (výstupní) $y(t)$ dán výrazem

$$Y(s) = G(s)M(s) + G_p(s), \quad (33)$$

Kde $G_p(s)$ je operátorem počátečních podmínek. Zpětnou transformací získáme časový průběh $y(t)$

$$y(t) = L^{-1}\{G(s)M(s) + G_p(s)\} = y_{part}(t) + y_{hom}(t), \quad (34)$$

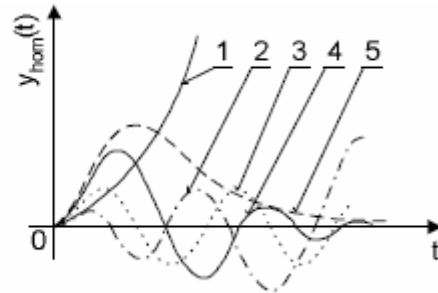
kde $y_{part}(t)$ je partikulární řešení nehomogenní diferenciální rov. (31), závislé na její pravé straně a je tedy vnucenou složkou regulované veličiny, kde $y_{hom}(t)$ je obecné řešení homogenní diferenciální rov. (31) a popisuje chování regulované veličiny po dobu přechodového děje. Je určeno počátečními podmínkami a počátečními hodnotami vstupního signálu $m(t)$. Charakter přechodové složky regulované veličiny je dán přenosem $G(s)$.

Regulační obvod je stabilní, jestliže se obecné řešení $y_{hom}(t)$ s rostoucím časem blíží k nule

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_{hom}(t) = 0, \quad (35)$$

tj. když se obvod ustálí. Typické průběhy $y_{hom}(t)$ jsou nakresleny na obr. 6.

- 1 – regulační pochod nestabilní aperiodický
- 2 – regulační pochod nestabilní kmitavý
- 3 – regulační pochod na hranici stability
- 4 – regulační pochod stabilní kmitavý
- 5 – regulační pochod stabilní a kmitavý

Obr. 6. Typické průběhy $y_{\text{hom}}(t)$

Konstantní koeficienty a_n, \dots, a_0 homogenní diferenciální rovnice jsou konstantami regulované soustavy a regulátoru. Je vhodné si uvědomit, že dynamické vlastnosti samotné regulované soustavy jsou dány konstrukcí technologického zařízení a vlastním technologickým procesem a nemůžeme je prakticky při seřizování regulačního obvodu měnit. Chování regulátoru můžeme v určitých mezích ovlivnit seřizováním nastavitelných parametrů regulátoru. Tím je možné také v určitých mezích ovlivnit hodnoty koeficientů a_0, \dots s cílem splnění podmínky (35).

Z uvedeného vyplývá, že rozhodující pro posouzení stability uzavřeného regulačního obvodu je homogenní lineární diferenciální rovnice

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = 0, \quad (36)$$

jejíž řešení je

$$y_{\text{hom}}(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{s_i t} \quad (37)$$

$$(i=1, 2, \dots, n),$$

kde $s_i = \alpha \pm j\omega$ jsou nenásobné kořeny charakteristické rovnice uzavřeného lineárního regulačního obvodu.

Kořeny s_i získáme řešením charakteristické rovnice (39) homogenní lineární diferenciální rov. (36), kterou získáme zavedením partikulárního řešení

$$y = e^{st}, \quad (38)$$

a která má potom tvar

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0. \quad (39)$$

Reálné kořeny $s_i = \alpha_i$ určují aperiodické složky řešení:

$$y_{\text{hom},i}(t) = C_i e^{\alpha_i t}. \quad (40)$$

Komplexně sdružené kořeny $s_{i,i+1} = \alpha_i \pm j\omega_i$ určují kmitavé složky řešení

$$y_{\text{hom},i,i+1}(t) = C_i e^{(+\alpha_i + j\omega_i)t} + C_{i+1} e^{(+\alpha_i - j\omega_i)t}. \quad (41)$$

Pokud $\alpha_i = 0$, tj. $s_{i,i+1} = \pm j\omega_i$, jde o kořeny ryze imaginární sdružené a určují kmitavě neutlumené složky řešení s konstantní amplitudou.

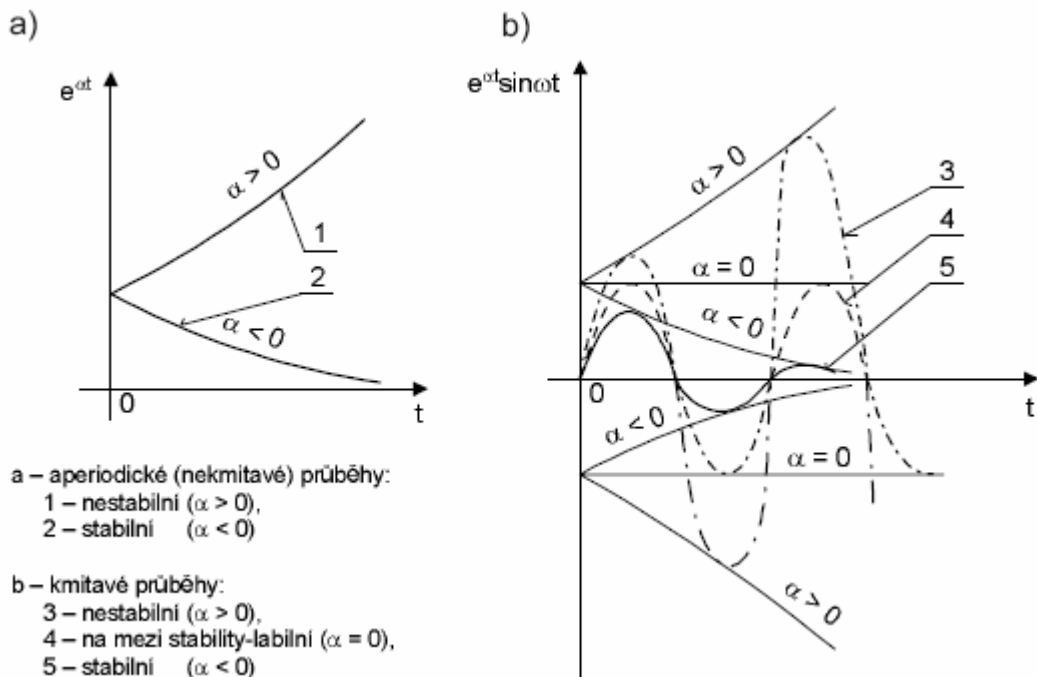
Pokud charakteristická rov. (39) má m násobný kořen s_1 , potom řešení rov. (36) lze psát ve tvaru

$$y_{\text{hom}}(t) = (C_{11} + C_{12}t + C_{13}t^2 + \dots + C_{1m}t^{m-1})e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} + \dots \quad (42)$$

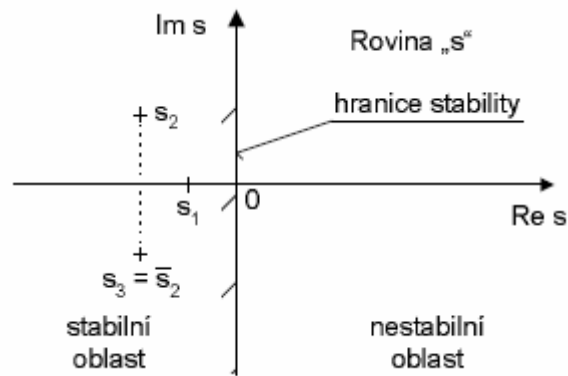
Průběhy složek řešení rov. (36) v závislosti na kořenech charakteristické rov. (39) jsou na obr. 9.

Odtud lze odvodit podmínku stability uzavřeného lineárního regulačního obvodu:

Nutnou a postačující podmínkou pro stabilitu uzavřeného lineárního regulačního obvodu je, aby všechny kořeny charakteristické rovnice obvodu měly zápornou reálnou část, čili aby ležely v levé polorovině komplexní roviny „s“ (obr. 8).



Obr. 7. Průběhy složek řešení rov. (36) v závislosti na kořenech charakteristické rov. (39)



Obr. 8. Rozložení kořenů charakteristické rovnice
v komplexní rovině „s“

Závěry, které lze provést z tvaru charakteristické rov. (39):

1. Nutnou, ale ne postačující podmínkou stability je, aby všechny koeficienty a_0, a_1, \dots charakteristické rovnice měly stejné znaménko a žádný z nich nesmí být roven nule. Počet koeficientů je $n+1$, je-li n stupeň charakteristické rovnice.
2. Je-li charakteristická rovnice 2. stupně a všechny tři koeficienty jsou stejného znaménka, je regulační obvod vždy stabilní bez ohledu na velikost koeficientů a_0, a_1, a_2 , (podmínka č. 1 se v tomto případě stává podmínkou postačující).
3. Je-li charakteristická rovnice třetího a vyššího stupně a všechny koeficienty mají stejné znaménko a jsou různé od nuly, stabilita regulačního obvodu je závislá na velikosti jednotlivých koeficientů a je nutné ji řešit, např. pomocí některého z kritérií stability.

1.4 Kritérium jakosti regulace podle funkcionálu odchylky (integrálního kritéria)

Uvažujeme regulační pochod způsobený změnou žádané hodnoty regulované veličiny, tj. $w(t) = \eta(t)$, $v(t) = 0$, či určitou poruchou, tj. $v(t) = \eta(t)$, $w(t) = 0$ (obr. 5), a stanovme časový integrál J , rov. (43. až 46.) regulačních odchylek (44.) regulované veličiny od její nové ustálené hodnoty

$$e(t) = y(t) - y(\infty) \quad (43)$$

podle vztahů:

- pro lineární regulační plochu

$$J_1 = \int_0^{\infty} [y(t) - y(\infty)] dt, \quad (44)$$

kteřá se hodí pro nekmitavý regulační pochod (obr. 5 – průběh $y_2(t)$).

Pro kmitavý regulační pochod (obr. 5 – $y_1(t)$) je třeba použít při výpočtu lineární regulační plochy absolutní hodnoty $|e(t)|$, tj.

$$J_1 = \int_0^{\infty} |y(t) - y(\infty)| dt, \quad (45)$$

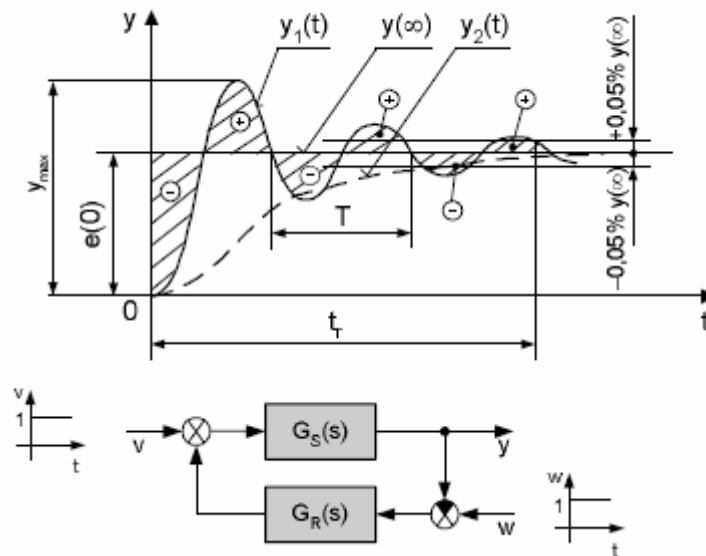
-pro kvadratickou regulační plochu

$$J_2 = \int_0^{\infty} [y(t) - y(\infty)]^2 dt, \quad (46)$$

kteřá je vhodná pro kmitavé regulační pochody.

POZNÁMKA: Pro regulační pochody bez trvalé regulační odchylky bude ve vztazích (44, 45, 46) $e(\infty) = 0$. Z obr. 6 vyplývá, že zvoleným způsobem označení má regulační odchylka $e(t)$ záporné znaménko. Integrál J_1 (viz rov. 44) považujeme za kladný.

Cílem úspěšnosti seřizování regulátorů a volby struktury regulátoru, nebo případně i struktury regulačního obvodu je, aby výše uvedené časové integrály – regulační plochy byly minimální.



Obr. 9. Regulační pochody kmitavé – $y_1(t)$ a aperiodické – $y_2(t)$ vyvolané změnou $w(t)$ nebo vznikem $v(t)$

Tento požadavek lze objasnit skutečností, že při regulačním pochodu dochází k výměně energie. Při záporné regulační odchylce má regulovaná soustava nedostatek energie (plochy označené záporným znaménkem), při přeregulování – kladné regulační odchylce (plochy označené kladným znaménkem) má regulovaná soustava přebytek energie a je třeba omezit příkon, aby spotřeba energie regulovanou soustavou byla větší a regulovaná veličina se přiblížila opět k hodnotě $y(\infty)$. Ideální průběh přechodového děje by byla skoková změna z hodnoty $y(0)$ na hodnotu $y(\infty)$, v tom případě bude $J_1 = 0$. Ve skutečnosti přechodový děj má tvar $y_1(t)$, resp. $y_2(t)$ (viz obr. 9.) a aby výměna energie byla co nejmenší, musí být regulační plocha minimální.

1.5 Metody seřízení regulátorů

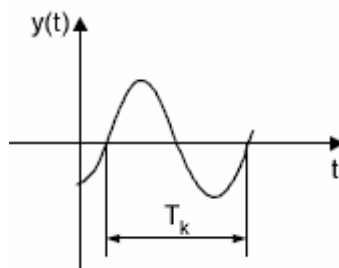
1.5.1 Metody seřízení regulátorů (metoda Ziegler – Nicholsova)

Jde o metodu uzavřené smyčky na mezi stability. Základní myšlenkou metody je přivést regulační obvod do tzv. kritického stavu, tj. na hranici stability, přičemž regulátor pracuje pouze s proporcionalní složkou a tedy integrační a derivační složka jsou vyřazeny nastavením

$T_I = \infty$ a $T_D = 0$, resp. $r_{-1} = 0$ a $r_1 = 0$.

Do kritického stavu obvod přivedeme postupným zvyšováním zesílení regulátoru k_R , resp. r_0 , až obvod začne kmitat s konstantní amplitudou. Zesílení regulátoru, při kterém k tomu došlo, nazýváme kritickým zesílením $k_R = k_{Rk}$, resp. $r_0 = r_{0k}$ a periodu kritických kmitů $T = T_k$. Tyto tzv. kritické hodnoty dosadíme do empirických vztahů pro použitý typ regulátoru a vypočítáme doporučené seřízení (viz tab. 1).

Uvedené doporučené hodnoty pro seřízení stavitelných parametrů regulátorů byly odvozeny i výpočtem.



Obr. 10. Určení T_K při r_{0k} resp. r_{-1k}

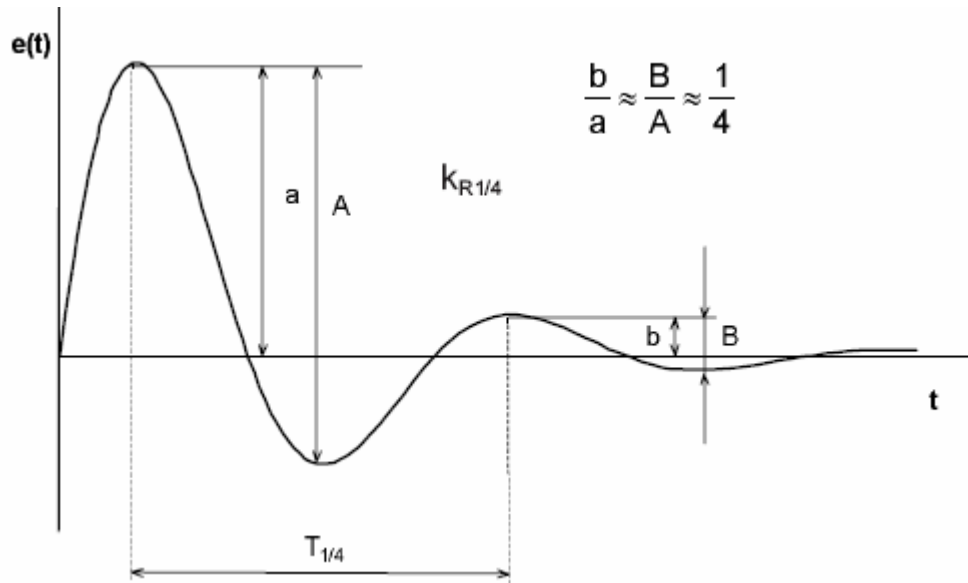
Tab. 1. Seřízení spojitého regulátoru z kritických hodnot regulátoru

Typ regulátoru	$G_R(s) = k_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$			$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$		
a) kmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx (20 \text{ až } 40) \%$						
	$k_R^* \equiv k_P^*$	T_I^*	T_D^*	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	0,5 k_{Pk}	-	-	0,5 r_{0k}	-	-
PI	0,45 k_{Pk}	$\frac{T_k}{1,2}$	-	0,45 r_{0k}	$\frac{0,45 r_{0k}}{T_k}$	-
PD	0,5 k_{Pk}	-	0,05 T_k	0,5 r_{0k}	-	0,02 $r_{0k} T_k$
PID	0,6 k_{Pk}	0,5 T_k	0,12 T_k	0,6 r_{0k}	$1,2 \frac{r_{0k}}{T_k}$	0,075 $r_{0k} T_k$
b) nekmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx 0 \%$						
P	0,25 k_{Pk}	-	-	0,25 r_{0k}	-	-
I	-	4 T_{Ik}	-	-	0,25 r_{-1k}	-

Výše popsaná Ziegler-Nicholsova metoda kritických parametrů pro uzavřené smyčky, na mezi stability má svoji modifikaci, metodu čtvrtinového tlumení, **tato metoda se používá z toho důvodu, že za provozu zařízení si nemůžeme dovolit rozkmitat obvod do kritického stavu.**

1.5.2 Metoda čtvrtinového tlumení

Metoda čtvrtinového tlumení je modifikace výše popsané Ziegler – Nicholsovy metody. Základní myšlenkou je přivést regulační, ve kterém opět působí regulátor pouze s proporcionalní složkou ($r_{-1} = 0, r_1 = 0$), změnou zesílení k_R na hodnotu $k_{R1/4}$, při které regulační pochod má průběh znázorněný na obr. 11.


 Obr. 11. Měření $T_{1/4}$ při $k_{R1/4}$

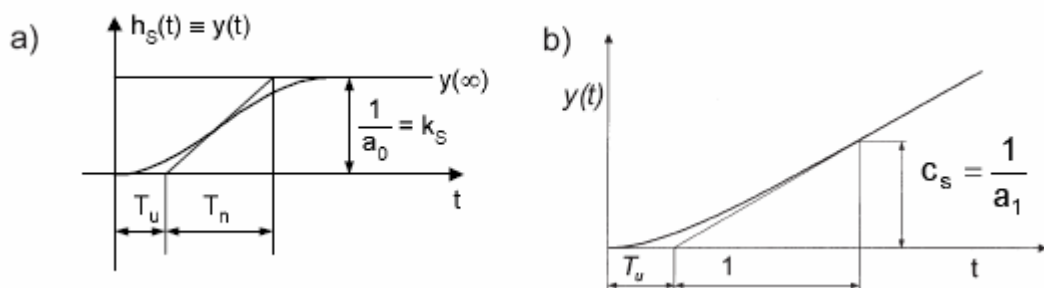
Při zesílení $k_{R1/4}$ lze odečíst dobu kmitu při tlumeném kmitání $T_{1/4}$. Doporučené hodnoty pro zesílení regulátoru jsou v tab. 2.

Tab. 2. Seřízení regulátoru z čtvrtinového tlumení

	$G_R(s) = k_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$		
	$k_R^* \equiv k_P^*$	T_I^*	T_D^*
P	$K_{P1/4}$	-	-
PI	$0,9 k_{P1/4}$	$T_{1/4}$	-
PID	$1,2 k_{P1/4}$	$T_{1/4}$	$0,25 T_{1/4}$

1.5.3 Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy

Je možné přímo volit jednoduché relace mezi přechodovou charakteristikou regulované soustavy a stavitelnými parametry regulátoru takové, aby regulační pochod byl blízký optimálnímu. Jde o metodu otevřené smyčky. Z odměřené přechodové charakteristiky (obr. 12.) regulované soustavy zjistíme dobu průtahu T_u , dobu náběhu T_n a činitel autoregulace $a_0 = 1/k_s$. Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 12. Přechodová charakteristika regulované soustavy: a) proporcionální, b) integrační

Tab. 3. Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	$k_R^* = r_0^*$	T_I^*	T_D^*
P	$\frac{T_n}{T_u} \cdot \frac{1}{k_s}$	-	-
PI	$0,9 \cdot \frac{T_n}{T_u} \cdot \frac{1}{k_s}$	$3,5 \cdot T_u$	
PD	$1,2 \cdot \frac{T_n}{T_u} \cdot \frac{1}{k_s}$	-	$0,25 \cdot T_u$
PID	$1,25 \cdot \frac{T_n}{T_u} \cdot \frac{1}{k_s}$	$2 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$

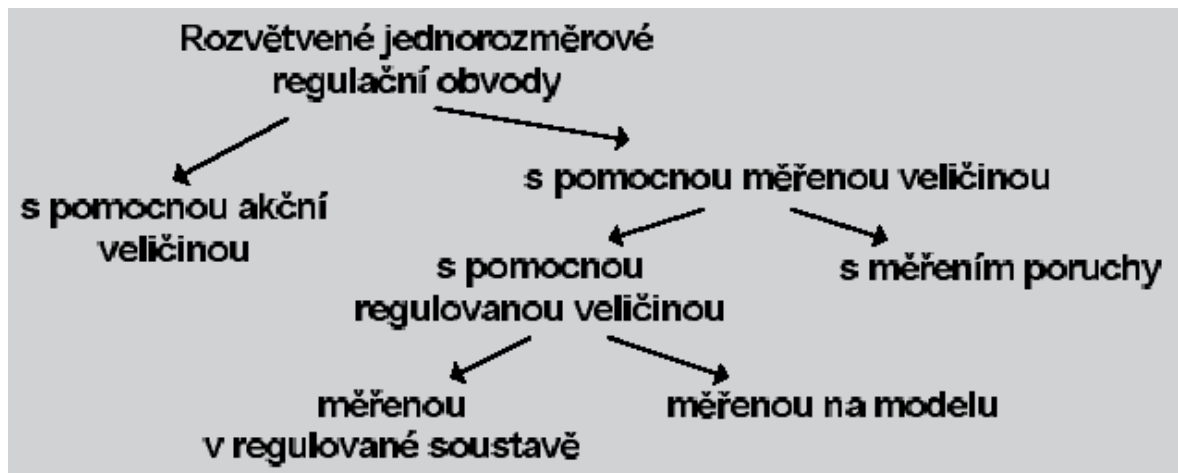
1.6 Rozvětvené jednorozměrové regulační obvody

Jednoduché jednorozměrové regulační obvody mohou splnit většinu běžných regulačních úkolů. Při vyšších požadavcích na přesnost a dynamiku samočinné regulace, hlavně u složitějších regulovaných soustav, jsou však jejich možnosti značně omezené.

S rostoucí složitostí (vyšším řádem setrvačnosti) regulované soustavy zvyšuje se i sklon k nestabilitě regulačního obvodu při rostoucím zesílení a při zkracování integrační časové konstanty regulátoru. Zhoršuje se i jakost regulačního pochodu. Použitím rozvětvených obvodů, tj. zavedením dalších proměnných do regulačního obvodu a tedy uspořádáním dalších smyček regulačního obvodu, se získají výhodnější dynamické i statické vlastnosti celého systému. Je vhodné zdůraznit, rozvětvených jednorozměrových obvodů je při průmyslových aplikacích řízení technologických procesů hojně využíváno.

Rozvětvené jednorozměrové regulační obvody jsou zvláštním případem mnohorozměrových regulačních obvodů. Využití jednorozměrových rozvětvených obvodů je však nesrovnatelně vyšší.

Způsoby rozvětvení jednorozměrových regulačních obvodů lze schematicky vyjádřit:



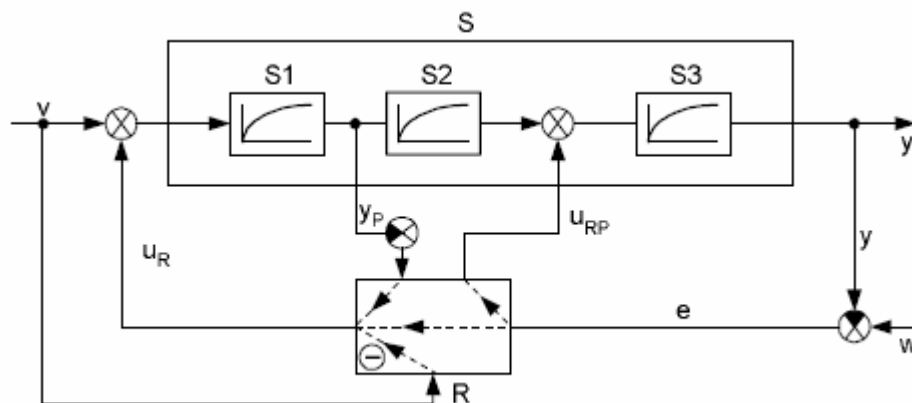
Obr. 13. Schéma rozvětvení jednorozměrových regulačních obvodů

Zavedení dalších proměnných do regulačního obvodu a uspořádání dalších smyček regulačního obvodu je principiálně znázorněno na obr. 14.

Jedná se o regulaci proporcionální regulované soustavy se setrvačností 3. řádu sestávající ze tří v sérii řazených členů se setrvačností 1. řádu – jednodukapacitních.

Pomocná regulovaná veličina y_P je zatížena kapacitním zpožděním členu S_1 a to je podstatně kratší, než kapacitní zpoždění regulované veličiny y , která je na výstupu celé regulované soustavy S . Pomocí S_1 a pomocného regulátoru je vytvořen pomocný regulační obvod, ve kterém regulační pochod probíhá rychleji než v původním regulačním obvodu. Pomocný obvod je citlivý na působení poruchové veličiny v na regulovanou soustavu. Snažíme se proto snímat y_P pokud možno blízko vstupu regulované soustavy, aby ji ovlivňovalo jen málo zpožďujících (kapacitních) členů, tj. co nejbližší k regulačnímu orgánu.

Regulační obvod s pomocnou akční veličinou u_{RP} je rovněž zřejmý z obr. 14. a je situován na výstupu regulované soustavy. Jeho vliv na průběh regulačního pochodu při vzniku poruchy v bude malý, ale změnu žádané veličiny w bude tento regulační obvod sledovat rychle.



Obr. 14. Principy rozvětvení jednorozměrového regulačního obvodu

Rozvětvený obvod s přiřazením poruchové veličiny v je rovněž znázorněn na obr. 14. Kompenzátor v tomto případě měří přímo poruchu. Vhodnými dynamickými vlastnostmi kompenzátoru – korekčního členu a seřízením jeho stavitelných parametrů lze docílit, že vliv poruchy v na regulovanou veličinu y bude odstraněn. V takovém případě říkáme, že obvod je invariantní vůči poruše v .

Při řešení složitějších regulačních obvodů se soustavami s nepříznivými dynamickými vlastnostmi se používá často několika druhů rozvětvení, čímž vzniká sdružený rozvětvený jednorozměrový regulační obvod.

1.6.1 Regulační obvod s přiřazením poruchové veličiny

Blokové schéma obvodu na obr. 15 znázorňuje, že akční veličina u_R nemusí vstupovat do regulované soustavy ve stejném místě jako poruchová veličina v a proto se ve schématu vyskytují dva samostatné členy SV a S s přenosy $G_{SV}(s)$ a $G_S(s)$.

Zajímá nás, jak se změní chování obvodu na obr. 14. při poruše ve srovnání s jednoduchým regulačním obvodem.

Pro určení přenosu poruchy lze psát rovnici v oblasti proměnné s při splnění podmínky, že $w = 0$:

$$Y(s) = G_{SV}(s)V(s) - G_S(s)[G_R(s)Y(s) + G_{KČ}(s)V(s)] \quad (47)$$

a z ní stanovíme vlastní přenos poruchy

$$G_V(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_{SV}(s) - G_S(s)G_{KČ}(s)}{1 + G_S(s)G_R(s)}. \quad (48)$$

Porovnáme-li výrazy pro přenos poruchy jednoduchého, rov. (43)

$$G_V(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_S(s)}{1 + G_0(s)}; \quad (49)$$

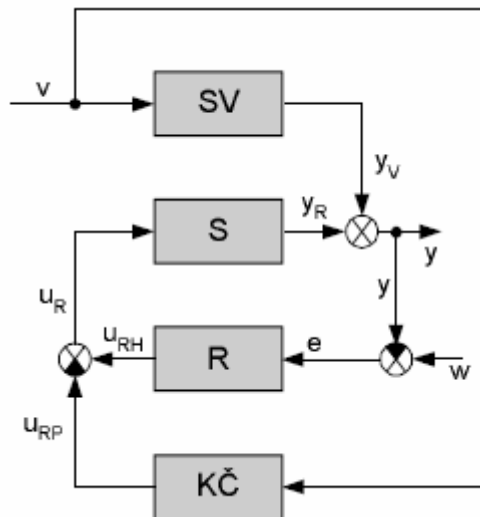
$$G_W(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)},$$

a rozvětveného, rov. (48) regulačního obvodu, vidíme, že čitatel vztahu (48) je rozšířen o záporný člen, který zmenšuje hodnotu přenosu poruchy a tím i odchylky při vzniku poruchy. Podaří-li se volit takový přenos korekčního členu $KČ$ tak, aby

$$G_{SV}(s) = G_S(s)G_{KČ}(s), \quad (50)$$

potom ve vztahu (48) bude $G_V(s)=0$. Tím likvidací poruchy v rozvětveném regulačním obvodu zajistí korekční člen bez činnosti regulátoru v hlavním obvodě.

Z uvedeného je patrné, že přiřazením poruchové veličiny lze podstatně zlepšit regulační pochod při poruše. V krajním případě lze tento pochod úplně vymezit – v takovém případě je obvod invariantní vůči poruše v .



Obr. 15. Blokové schéma jednorozměrového regulačního obvodu s přiřazením poruchové veličiny

Vhodnou úpravou vztahu (48) lze docílit, aby byl patrný vliv regulátoru v hlavním obvodu a vliv korekčního členu:

$$G_V(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = G_{SV}(s) - \frac{G_{SV}(s)}{1 + \frac{1}{G_S(s)G_R(s)}} - \frac{G_{KČ}(s)}{G_R(s) + \frac{1}{G_S(s)}}, \quad (51)$$

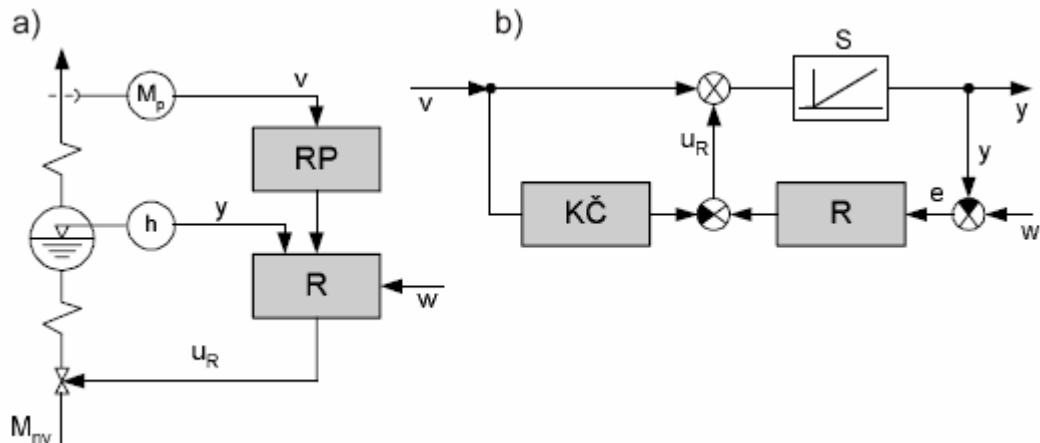
kde na pravé straně rovnice první člen představuje chování regulované soustavy $G_{SV}(s)$ bez regulátorů, druhý člen účinek regulátoru v hlavním obvodu $G_R(s)$ a třetí člen potom účinek korekčního členu $G_{KČ}(s)$.

Chování obvodu při řízení není třeba zvlášť odvozovat, protože z obr. 15. je zřejmé, že přenosy $G_{KČ}(s)$ $G_{SV}(s)$ nemají pro případ řízení význam a rozvětvený obvod se bude chovat stejně jako obvod jednoduchý.

Z jmenovatele přenosu (48) (položíme-li jej = 0, dostáváme charakteristickou rovnici uzavřeného regulačního obvodu) vyplývá, že rozvětvení s přiřazením poruchy nemá vliv na stabilitu obvodu a tento se chová jako obvod jednoduchý bez rozvětvení.

Pro aplikaci použijeme příklad řešení regulaci napájení bubnového kotle (viz obr. 16). Protože regulovaná soustava má vlastnosti integrační soustavy, **nelze pro regulaci v jednoduchém obvodu použít I regulátoru**. Při použití PI regulátoru, stejně jako PID

regulátoru, vznikají vlivem určité doby průtahu v soustavě větší odchylky. Přitom je u napájení tlumený kmitavý regulační pochod nežádoucí – kolísavý přítok napájecí vody narušuje tepelnou rovnováhu kotle a ovlivňuje tlak páry. Proto se používá P regulátoru, který však udržuje hladinu s trvalou regulační odchylkou. Přiřazením poruchové veličiny M_p lze trvalou regulační odchylku odstranit při zachování všech výhod stabilní regulace P regulátorem.



Obr. 16. Regulace napájení bubnového kotle s měřením poruchové veličiny v :

a) principiální schéma; b) blokové schéma

Shrnutí:

Uspořádáním dalších smyček uvnitř regulačního obvodu lze docílit zlepšení dynamických i statických vlastností regulačního obvodu s regulovanou soustavou se setrvačností vyššího řádu.

Společnou vlastností regulačních obvodů s pomocnou akční a s pomocnou regulovanou veličinou je zlepšení stability obvodu. Liší se chováním při změnách poruchové nebo žádané veličiny. Pomocnou regulovanou veličinou se především rychleji vyrovnává vliv změn poruchové veličiny, kdežto pomocnou akční veličinou se docílí přesnějšího sledování signálu žádané veličiny. Přiřazením poruchové veličiny se zřejmě nezmění průběh regulačního pochodu v regulačním obvodu. Proto zůstanou stabilita a vlastnosti při řízení stejné, jako když se poruchová veličina nemění. Chování při poruše se však podstatně změní, lze dosáhnout až invariantnosti vůči měřené poruše.

Vztahy platící pro jednoduchý obvod jsou obsaženy v rovnicích rozvětvených obvodů jako zvláštní případ. Vyplývají z nich, položíme-li pomocné veličiny rovny nule.

V této práci se dále budeme zabývat pouze rozvětveným jednorozměrovým obvodem s měřením poruchy.

1.7 Matlab – Simulink

Matlab (MATrix LABoratory = maticová laboratoř) je výkonné interaktivní prostředí pro vědecké výpočty. Spojuje technické výpočty, vizualizaci dat a programovací jazyk v jednom prostředí. Společně s množstvím dostupných modulů tak vytváří ideální prostředek pro inženýry, vědce, matematiky a učitele při řešení problémů z mnoha oblastí. Prostředí Matlabu je možné doplnit rozšiřujícími moduly – aplikačními knihovny (toolboxy). Nejznámější a největší z nich je Simulink. Je to program pro simulaci a modelování dynamických systémů, který pro řešení nelineárních diferenciálních rovnic využívá algoritmy z Matlabu. Modely dynamických soustav se vytvářejí interaktivně ve formě blokových schémat a propojení mezi nimi.

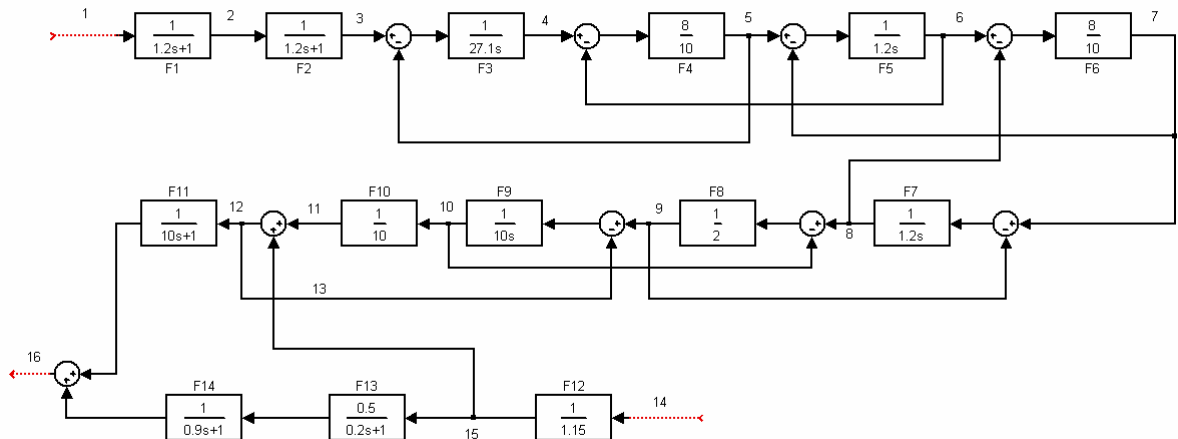
Simulink využívá Matlab pro modelování, simulaci a analýzu dynamických systémů v grafickém prostředí. Vnější popis systému spočívá ve vyjádření dynamických vlastností systému závislostí mezi jeho vstupem a výstupem. Systém samotný považujeme za černou skříňku, která má několik vstupů a výstupů. Obsah nás zpravidla nezajímá, předpokládáme však, že počáteční stav systému je nulový.

Vnitřní popis systému spočívá ve vyjádření dynamických vlastností systému závislostí mezi jeho vstupem a výstupem. Dovoluje respektovat stav systému a jeho strukturu. Je proto považován za dokonalejší popis systému než vnější popis.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 ZADANÝ MODEL ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU A JEHO POPIS

Simulace byly prováděny v programu MATLAB – SIMULINK 7.0.1



Obr. 17. Blokové schéma elektrárenského systému kotel – turbína – generátor

1. μ_U - Vstup akční veličiny – změny paliva
2. μ_S - Změna paliva převedená na teplo uvolněné hořením
3. λ_V - Virtuální výroba páry ve varném systému bez ovlivnění kolísavým tlakem
4. φ_B - Tlak v bubnu
5. λ_B - Hmotnostní tok na vstupu do bubnu, který je ovlivněn kolísáním tlaku v bubnu
6. φ_{k1} – Tlak na výstupu z prvního dílu přehříváku
7. λ_{k1} – Hmotnostní tok na výstupu z prvního dílu přehříváku
8. φ_{k2} – Tlak na výstupu z druhého dílu přehříváku
9. λ_{k2} – Hmotnostní tok na výstupu z druhého dílu přehříváku
10. φ_P – Tlak na výstupu z parovodu
11. λ_{T1} – Hmotnostní tok na výstupu z parovodu

12. λ_T – Výstup z parovodu na vstupu do turbíny ($\lambda_T = \lambda_P$)
13. λ_P – Hmotnostní tok na výstupu z parovodu
14. μ_R – Vstup změny odebíraného elektrického výkonu
15. λ_{T2} – Hmotnostní tok za regulačními ventily turbíny
16. φ_E – Výstup elektrického výkonu

Přenos a popis jednotlivých bloků:

$$F_1 = \frac{1}{1,2s + 1} \text{ - Příprava a doprava paliva (podavač bez dopravního zpoždění)}$$

$$F_2 = \frac{1}{1,2s + 1} \text{ - Virtuální výroba páry}$$

$$F_3 = \frac{1}{27,1s} \text{ - Přenos tlaku v bubnu (akumulace páry)}$$

$$F_4 = \frac{8}{10} \text{ - Hydraulický odpor v bubnu}$$

$$F_5 = \frac{1}{1,2s} \text{ - Akumulace páry v přehříváku}$$

$$F_6 = \frac{8}{10} \text{ - Hydraulický odpor v prvním dílu přehříváku}$$

$$F_7 = \frac{1}{1,2s} \text{ - Akumulace tepla v druhé části přehříváku}$$

$$F_8 = \frac{1}{2} \text{ - Hydraulický odpor parovodu}$$

$$F_9 = \frac{1}{10s} \text{ - Akumulace tepla v parovodní části}$$

$$F_{10} = \frac{1}{10} \text{ - Hydraulický odpor regulačních ventilů turbíny}$$

$$F_{11} = \frac{1}{10s + 1} \text{ - Výroba elektřiny prouděním páry v turbíně}$$

$$F_{12} = \frac{1}{1,15} - \text{Hydraulický odpor regulačních ventilů turbíny}$$

$$F_{13} = \frac{0,5}{0,2s + 1} - \text{Setrvačnost páry v prostoru regulačních ventilů}$$

$$F_{14} = \frac{1}{0,9s + 1}$$

Elektrárenskou soustavu můžeme rozdělit na čtyři části:

V první části je vstupní veličinou akční veličina μ_U , nebo porucha v přívodu paliva, vstupující do zařízení na stejném místě, jako akční veličina. Výstupní veličinou je teplo uvolněné hořením μ_S .

U výroby páry ve varném systému λ_V je vstupní veličinou množství tepla přestupujícího do teplosměnných ploch a výstupní veličinou tlak páry φ_{k1} a hmotnostní tok λ_{k2} na výstupu z druhého dílu přehříváku.

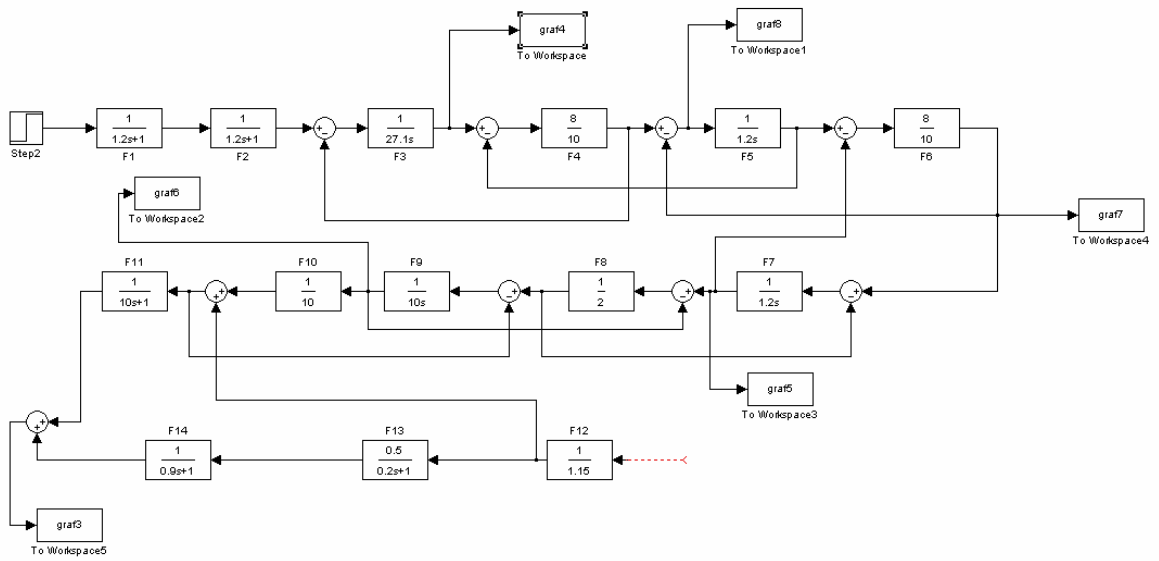
Za třetí část můžeme považovat dopravu páry, tzn. tlak na výstupu z parovodu φ_P , hmotnostní tok na výstupu z parovodu λ_{T1} a hmotnostní tok na výstupu z parovodu λ_P

A za čtvrtou výrobu elektrické energie, kde je vstupem výstup z parovodu na vstupu do turbíny λ_T a výstupem elektrický výkon generátoru φ_E , pracující paralelně s dalšími generátory v elektrizační soustavě.

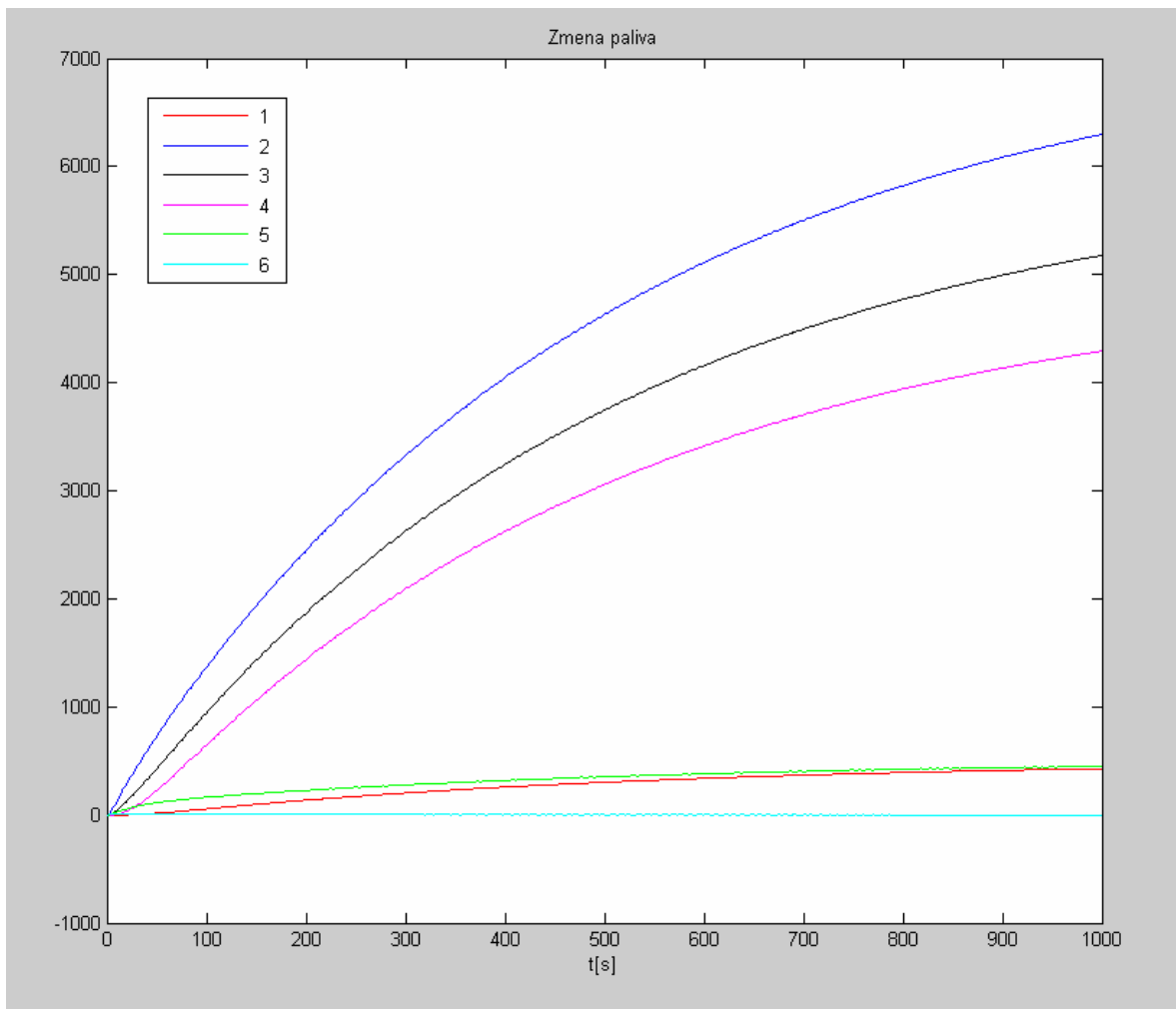
2.1 Vyšetření chování regulované soustavy na vstupy

2.1.1 Odezvy regulované soustavy na změnu akční veličiny – změnu paliva

Odezvy regulované soustavy na změnu akční veličiny jsme realizovali tak, že na vstup 1 byl připojen blok STEP a po spuštění simulace byly zaznamenávány změny měřených veličin. Velikost skoku byla zvolena 0,5.



Obr. 18. Způsob zapojení bloků pro simulaci změn akční veličiny

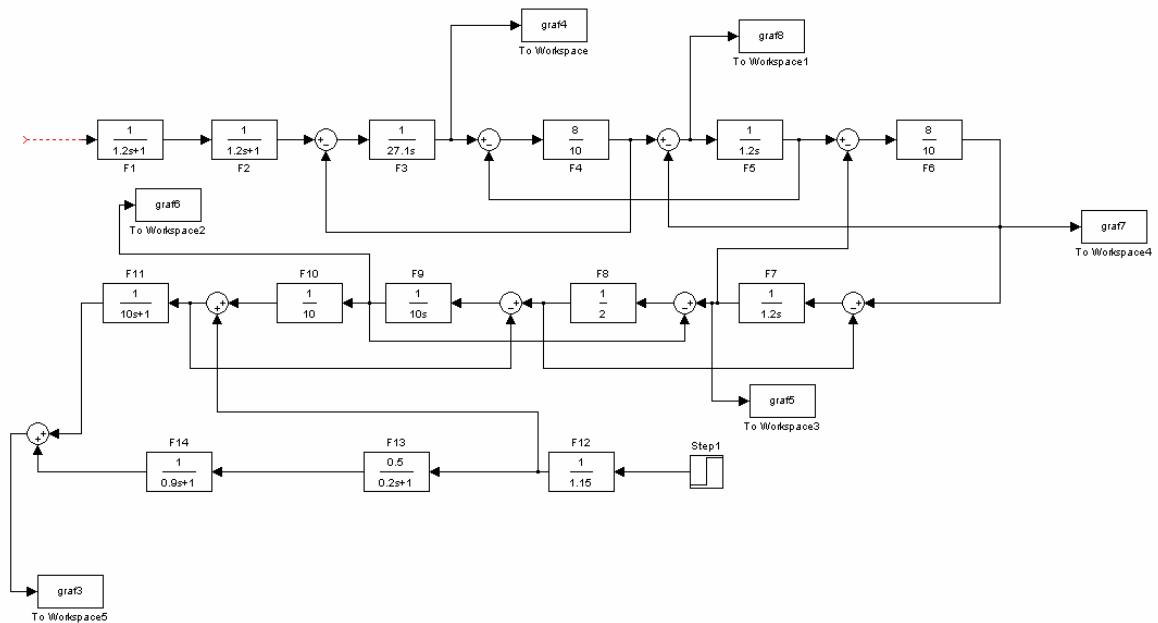


Obr. 19. Průběhy jednotlivých měřených veličin při změně paliva

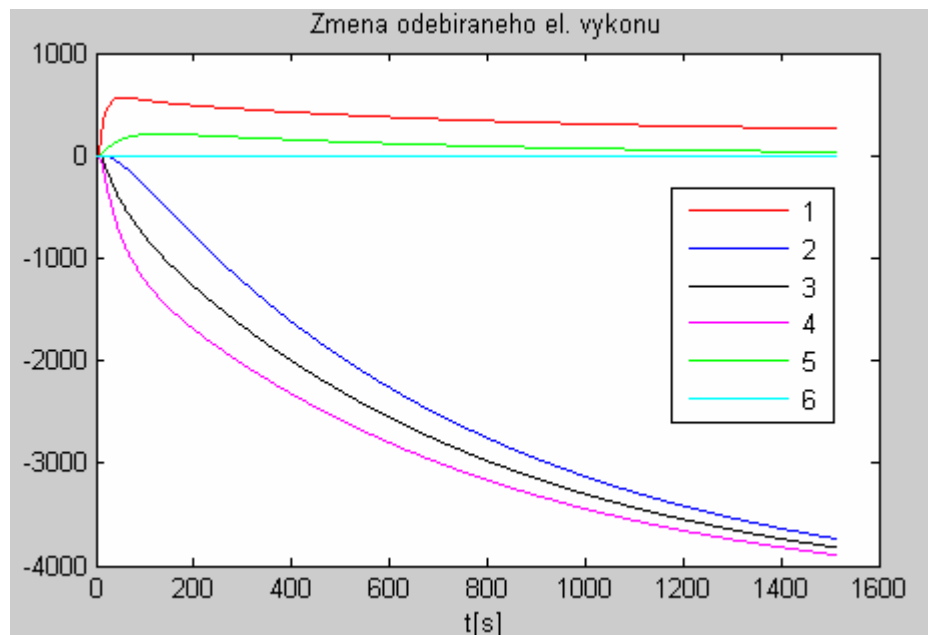
1 - φ_E [kW], 2 - φ_B [Pa], 3 - φ_{k2} [Pa], 4 - φ_P [Pa], 5 - λ_{k1} [kg/min], 6 - λ_B [kg/min]

2.1.2 Odezvy regulované soustavy na změnu odebíraného elektrického výkonu

Schéma zapojení je stejné, jako v předchozím případě, jenom blok STEP jsme tentokrát umístili jako vstup změny odebíraného elektrického výkonu. Velikost skoku je opět 0,5.



Obr. 20. Blok STEP, zapojený pro simulaci změn odebíraného elektrického výkonu



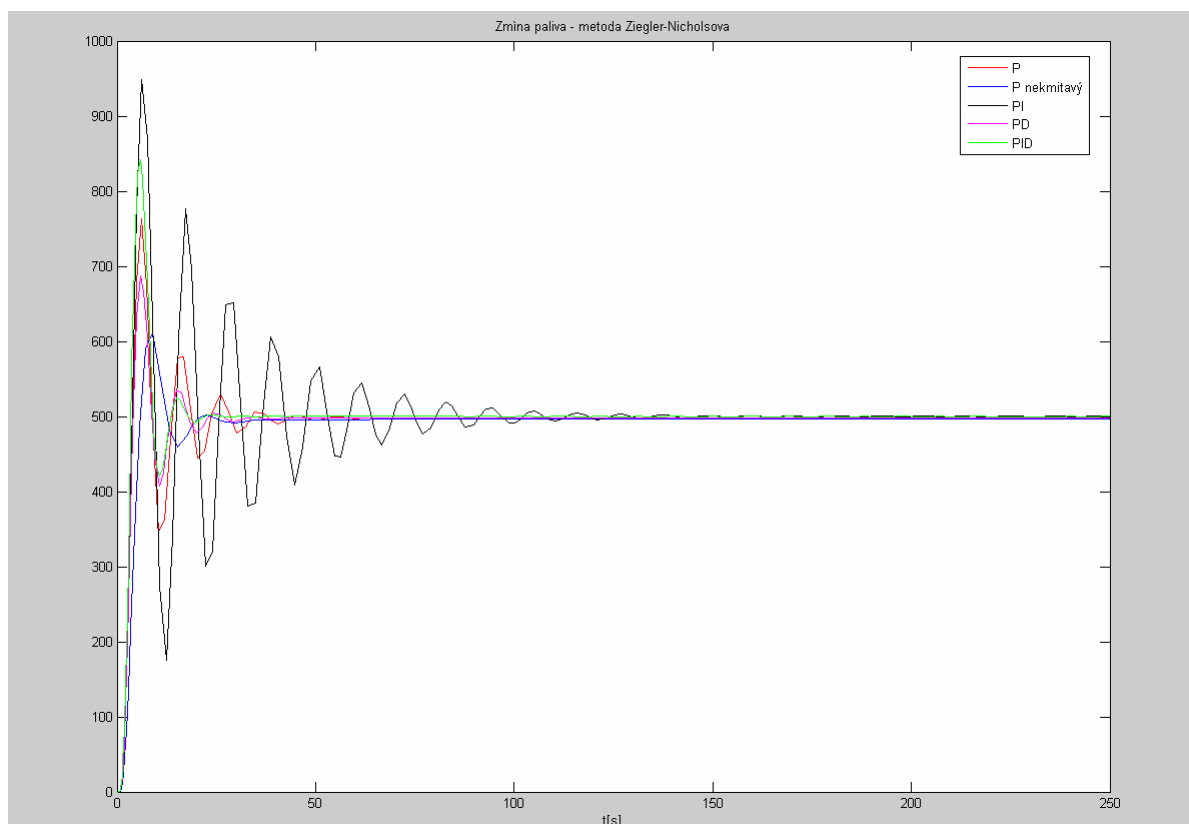
Obr. 21. Průběhy jednotlivých měřených veličin při změně odebíraného elektrického výkonu

1 - φ_E [kW], 2 - φ_B [Pa], 3 - φ_{k2} [Pa], 4 - φ_P [Pa], 5 - λ_{k1} [kg/min], 6 - λ_B [kg/min]

Model soustavy má vlastnosti proporcionální soustavy s vyšším řádem setrvačnosti. Tento model byl využit jako přijatelný pro případ, kdy výsledky z obou modelů teoreticky mají mít vlastnosti integračních soustav. Původní proporcionální soustavy 1.řádu mají vysoké zesílení a tudíž pro malé odchylky se blíží vlastnostem integračních soustav.

Tab. 4. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ regulátoru	$G_R(s) = r_0 + \frac{r-1}{s} + r_1 s$		
a) kmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx (20 \text{ až } 40) \%$			
	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	23,94	-	-
PI	21,546	3,447	-
PD	23,94	-	7,128
PID	28,728	7,661	26,933
b) nekmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx 0 \%$			
P	11,97	-	-


 Obr. 23. Průběhy výstupní veličiny φ_B s jednotlivými typy regulátorů

3.1.2 Nastavení regulátoru metodou čtvrtinového tlumení

Princip metody je popsán v teoretické části, viz str. 29.

Zde jsou naměřené parametry:

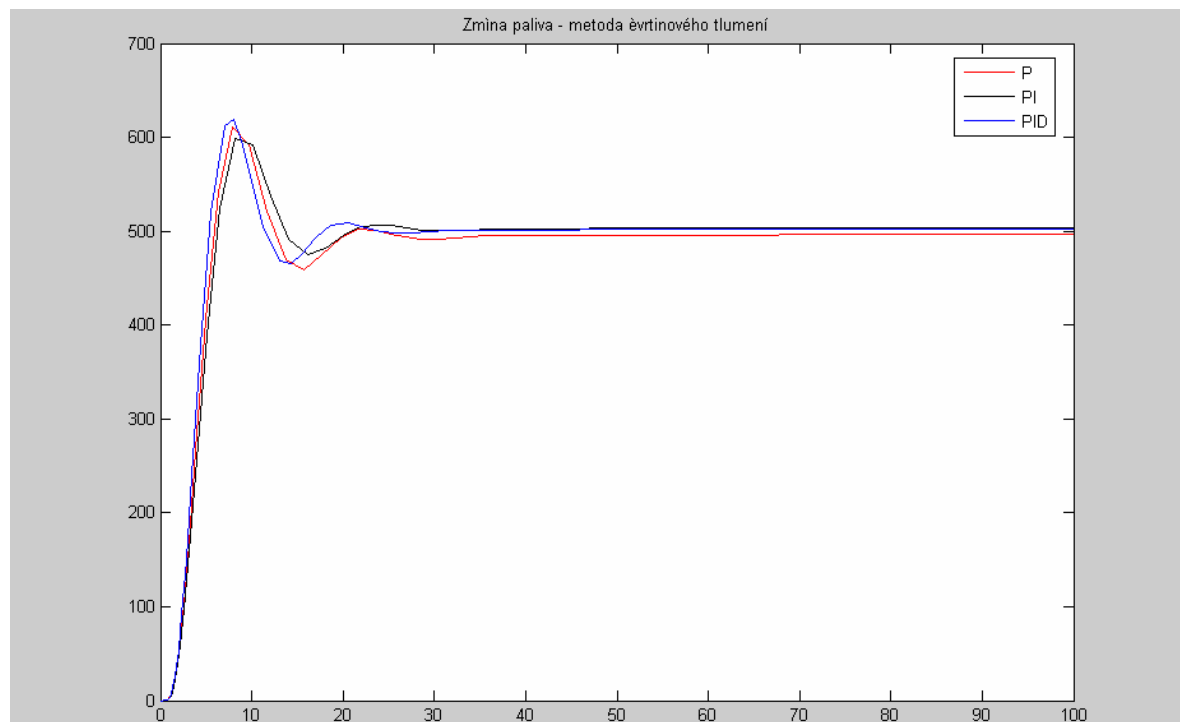
Kritické zesílení – $k_r = r_0 k = 11,97$

Perioda kritických kmitů – $T_k = 14s$

Podle tabulky 2 jsou vypočteny optimální parametry jednotlivých typů regulátorů. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	2,993	-	-
PI	2,694	3,5	-
PID	3,592	3,5	0,875



Obr. 24. Regulační průběhy výstupní veličiny φ_B s jednotlivými typy regulátorů

3.1.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

Princip této metody je popsán v teoretické části, viz str. 31.

Naměřené parametry jsou:

Doba průtahu - $T_u = 1,425$

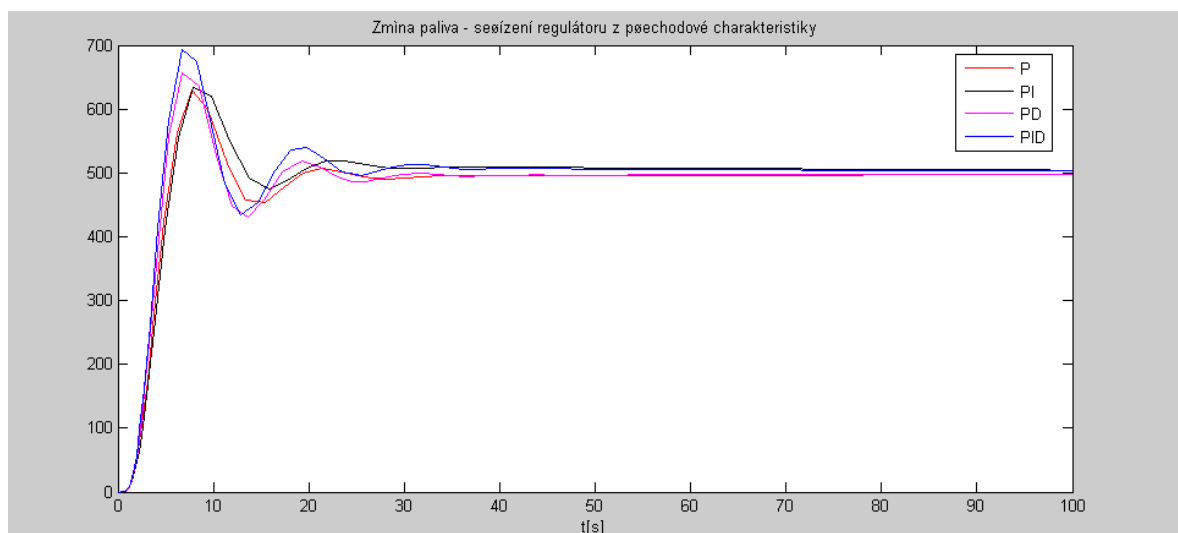
Doba náběhu - $T_n = 17,4$

Činitel autoregulace - $a_0 = 1/k_s = 1/0,935 = 1,0695$

Podle tabulky 3 jsme vypočetli optimální parametry jednotlivých typů regulátorů. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	13,059	-	-
PI	11,753	4,988	-
PD	15,671	-	0,356
PID	16,324	2,85	0,713



Obr. 25. Regulační průběhy výstupní veličiny φ_B s jednotlivými typy regulátorů

3.2 Návrh regulátoru pro udržení konstantního tlaku na výstupu z druhého dílu přehříváku

Jako další z možných jednorozměrových regulačních obvodů byl zvolen obvod pro regulaci konstantního tlaku na výstupu z druhého dílu přehříváku φ_{K2} . Byly navrhovány typy regulátorů P, PD, PI, PID metodou kritického tlumení, čtvrtinového tlumení a metodou přechodové charakteristiky.

3.2.1 Nastavení regulátoru metodou kritického tlumení (metoda Ziegler - Nicholsova)

Princip metody jsme si popsali v teoretické části, viz str. 27.

Naměřené parametry jsou:

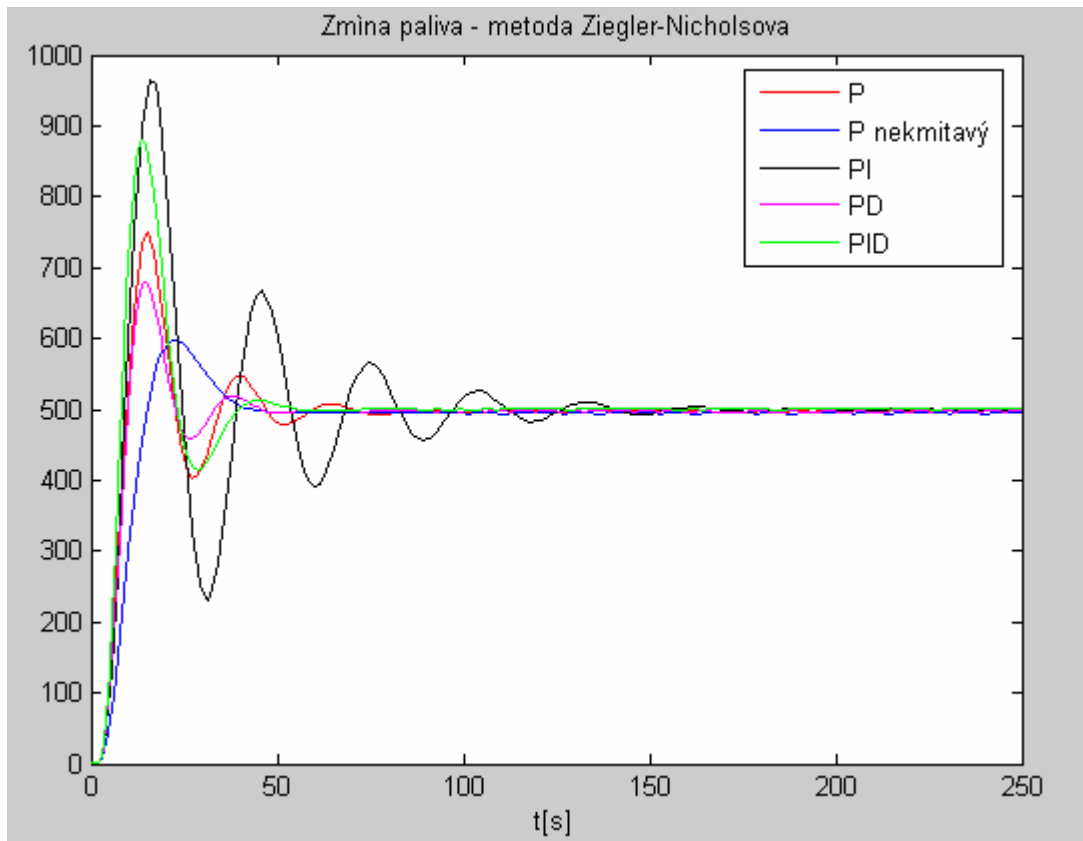
Kritické zesílení – $r_{0k} = 31,5$

Perioda kritických kmitů – $T_k = 18$

Podle vzorců v tabulce 1 jsou vypočteny optimální parametry jednotlivých typů regulátorů. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ regulátoru	$G_R(s) = r_0 + \frac{r-1}{s} + r_1 s$		
a) kmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx (20 \text{ až } 40) \%$			
	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	15,76	-	-
PI	14,175	0,945	-
PD	15,76	-	11,34
PID	18,9	2,1	42,525
b) nekmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx 0 \%$			
P	7,875	-	-



Obr. 26. Průběhy výstupní veličiny φ_{K2} s jednotlivými typy regulátorů

3.2.2 Nastavení regulátoru metodou čtvrtinového tlumení

Princip metody je popsán v teoretické části, viz str. 29.

Zde jsou naměřené parametry:

Kritické zesílení – $k_r = r_0k = 10,9$

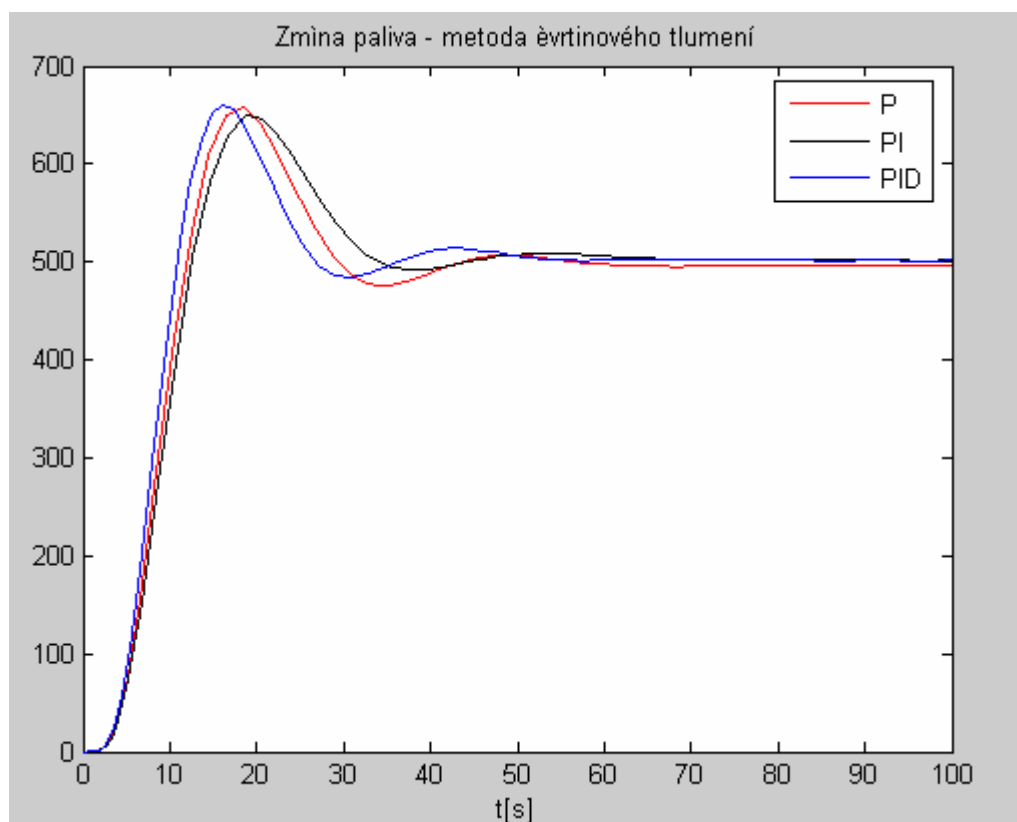
Perioda kritických kmitů – $T_k = 32s$

Podle tabulky 2 jsou vypočteny optimální parametry jednotlivých typů regulátorů.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	10,9	-	-
PI	9,81	32	-
PID	13,08	32	8

Obr. 27. Průběhy výstupní veličiny ϕ_{K2} s jednotlivými typy regulátorů

3.2.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

Princip této metody je popsán v teoretické části, viz str. 31.

Naměřené parametry jsou:

Doba průtahu - $T_u = 5,4$

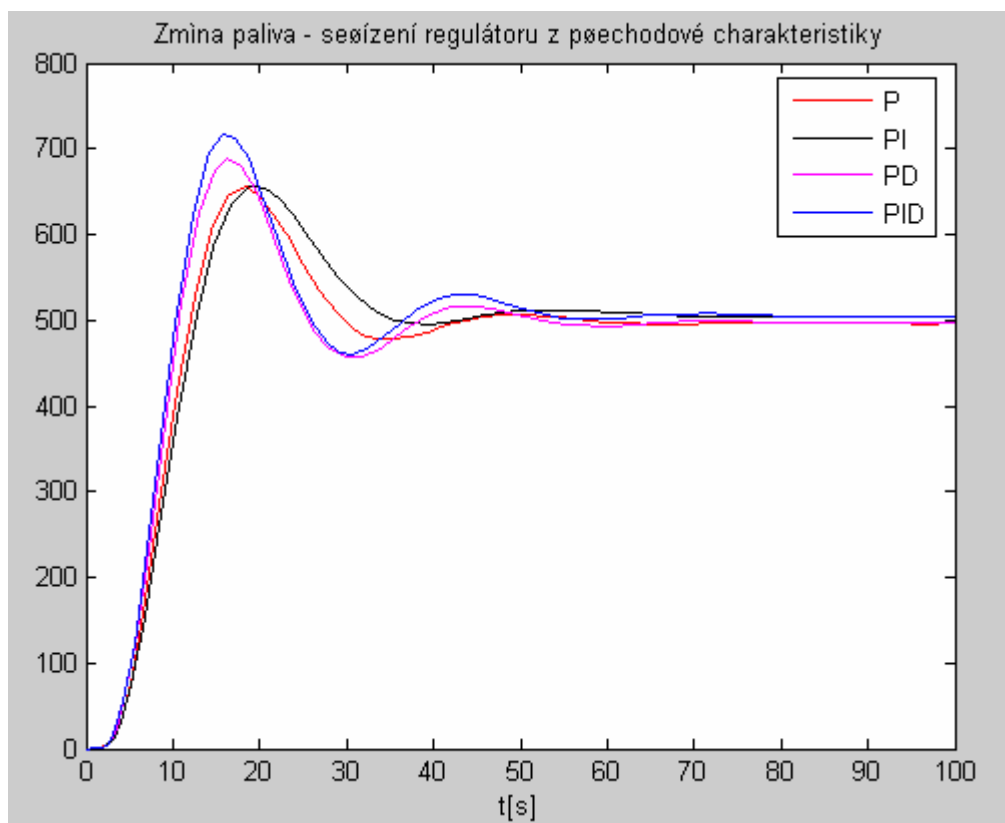
Doba náběhu - $T_n = 54$

Činitel autoregulace - $a_0 = 1/k_s = 1/0,926 = 1,08$

Podle tabulky 3 jsme vypočetli optimální parametry jednotlivých typů regulátorů. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	10,799	-	-
PI	9,719	18,9	-
PD	12,959	-	1,35
PID	13,499	10,8	2,7



Obr. 28. Průběhy výstupní veličiny ϕ_{K2} s jednotlivými typy regulátorů

3.3 Návrh regulátoru pro udržení konstantního tlaku na výstupu z parovodu

Jako třetí z možných jednorozměrových regulačních obvodů jsme si zvolili obvod pro regulaci konstantního tlaku na výstupu z parovodu φ_p . Byly navrhovány typy regulátorů: P, PD, PI, PID metodou kritického tlumení, metodou čtvrtinového tlumení a metodou z přechodové charakteristiky.

3.3.1 Nastavení regulátoru metodou kritického tlumení (metoda Ziegler - Nicholsova)

Princip metody jsme si popsali v teoretické části, viz str. 27.

Naměřené parametry jsou:

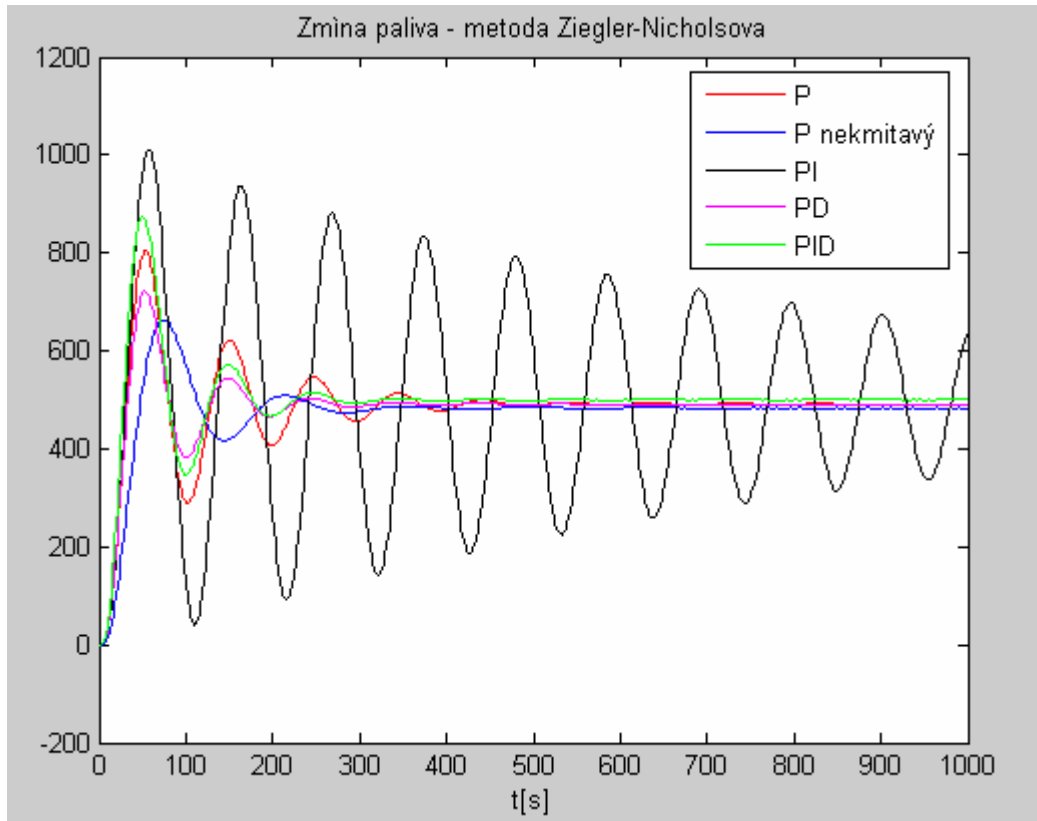
Kritické zesílení – $r_{0k} = 11,8$

Perioda kritických kmitů – $T_k = 70$

Podle vzorců v tabulce 1 jsou vypočteny optimální parametry jednotlivých typů regulátorů. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10.

Tab. 10. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ regulátoru	$G_R(s) = r_0 + \frac{r-1}{s} + r_1 s$		
a) kmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx (20 \text{ až } 40) \%$			
	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	5,9	-	-
PI	5,31	0,091	-
PD	5,9	-	16,52
PID	7,08	0,202	61,95
b) nekmitavý proces, tj. pro překmit $\kappa \approx 0 \%$			
P	2,95	-	-


 Obr. 29. Průběhy výstupní veličiny φ_p s jednotlivými typy regulátorů

3.3.2 Nastavení regulátoru metodou čtvrtinového tlumení

Princip metody je popsán v teoretické části, viz str. 29.

Zde jsou naměřené parametry:

Kritické zesílení – $k_r = r_0 k = 4,1$

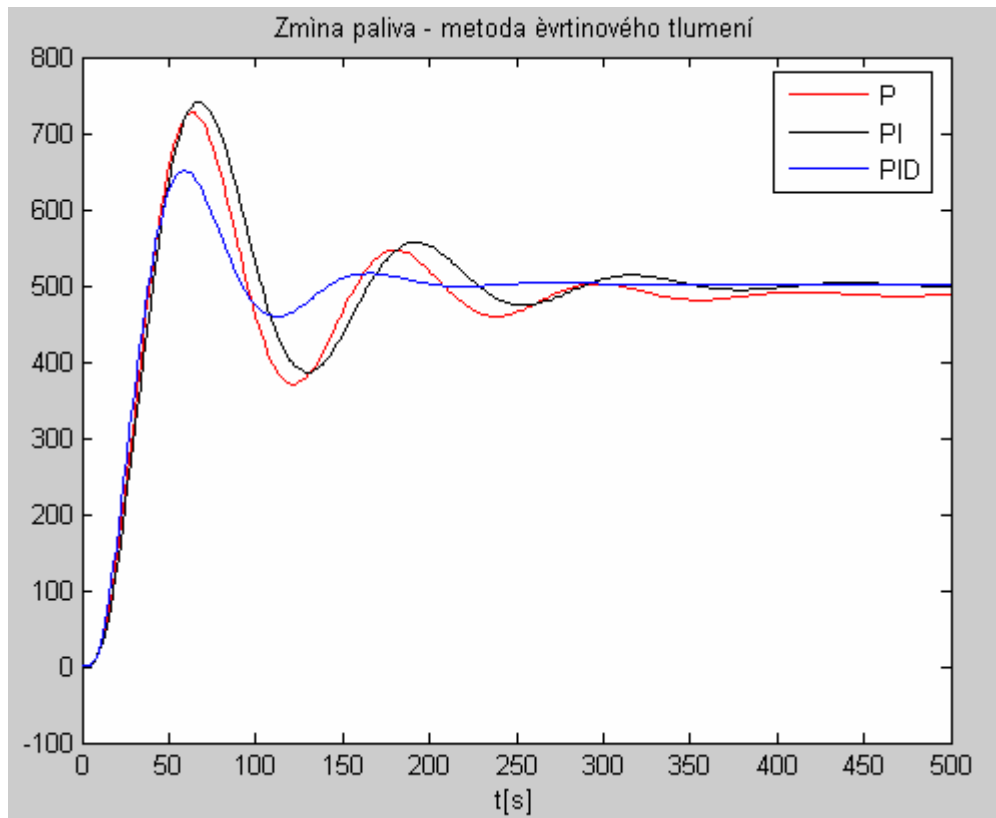
Perioda kritických kmitů – $T_k = 120s$

Podle tabulky 2 jsou vypočteny optimální parametry jednotlivých typů regulátorů.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.

Tab. 11. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	4,1	-	-
PI	3,69	120	-
PID	4,92	120	30



Obr. 30. Průběhy výstupní veličiny φ_p s jednotlivými typy regulátorů

3.3.3 Nastavení regulátoru z přechodové charakteristiky

Princip této metody je popsán v teoretické části, viz str. 31.

Naměřené parametry jsou:

Doba průtahu - $T_u = 17,33$

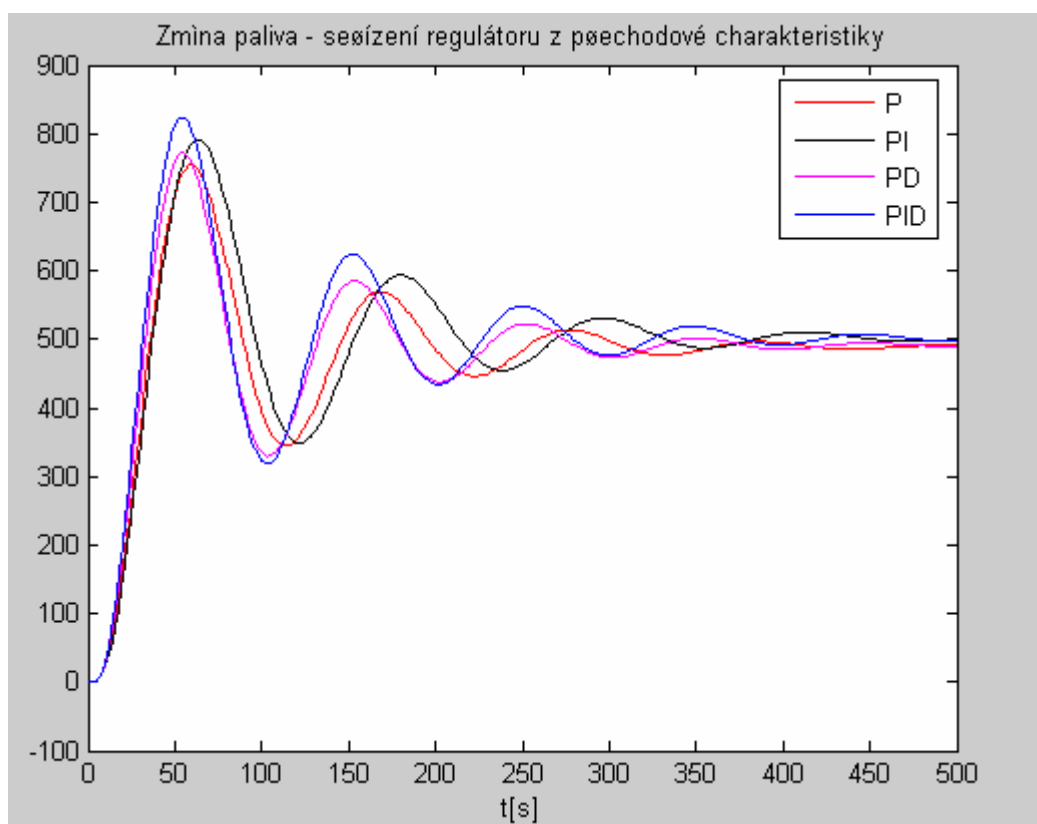
Doba náběhu - $T_n = 80$

Činitel autoregulace - $a_0 = 1/k_s = 1/0,984 = 1,0163$

Podle tabulky 3 jsme vypočetli optimální parametry jednotlivých typů regulátorů. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12.

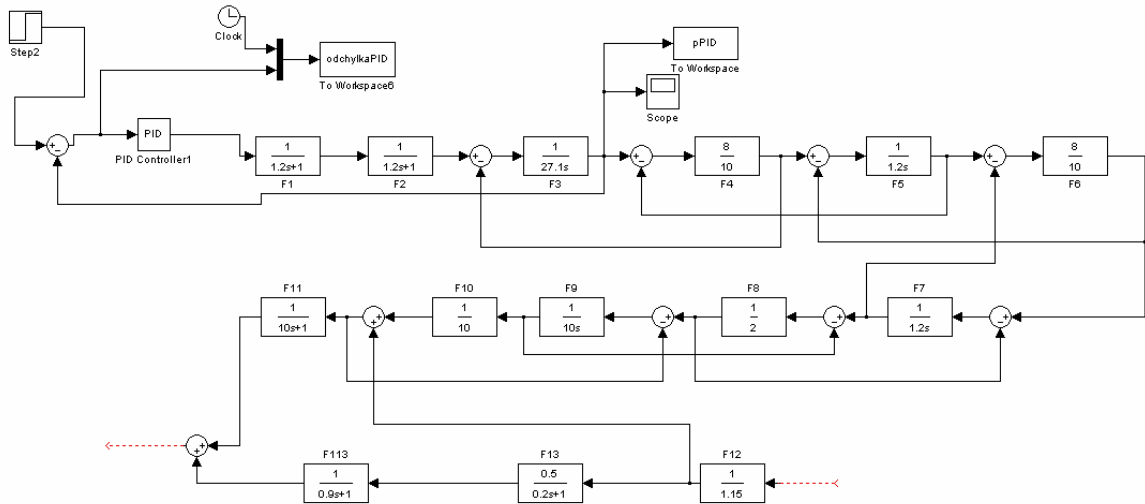
Tab. 12. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	r_0^*	r_{-1}^*	r_1^*
P	4,691	-	-
PI	4,222	60,655	-
PD	5,63	-	4,333
PID	5,864	34,66	8,665

Obr. 31. Průběhy výstupní veličiny φ_P s jednotlivými typy regulátorů

4 ZHODNOCENÍ KVALITY REGULAČNÍHO POCHODU

Kvalita regulace odpovídá ploše regulační odchylky, kterou určíme integrálním počtem (viz teoretická část, str. 25). K výpočtu v Simulinku jsme vytvořili následující zapojení.



Obr. 32. Schéma zapojení v Simulinku pro výpočet regulační plochy

Tab. 13. Výsledné hodnoty ploch regulačních odchylek u jednotlivých měření

	Plocha regulační odchylky φ_B			Plocha regulační odchylky φ_{K2}			Plocha regulační odchylky φ_P		
	Z-N	1/4	p.char.	Z-N	1/4	p.char.	Z-N	1/4	p.char.
P nekmit	1,8546			4,0937			1,5111		
P	1,8220	1,8546	1,7970	3,7745	3,6492	3,6555	1,8678	1,5605	1,6325
PI	3,9503	1,5198	1,5812	7,0591	3,0685	3,3488	6,3724	1,5478	1,7810
PD	1,4130		1,6987	3,0601		3,5345	1,2690		1,5997
PID	1,2212	1,3259	1,4737	3,5525	2,7527	3,3421	1,5039	1,6095	1,7705

Z tabulky vyplývá, že nevhodnější metodou pro návrh regulátoru je zde metoda čtvrtinového tlumení a nejkvalitnější regulaci vykonává regulátor PID.

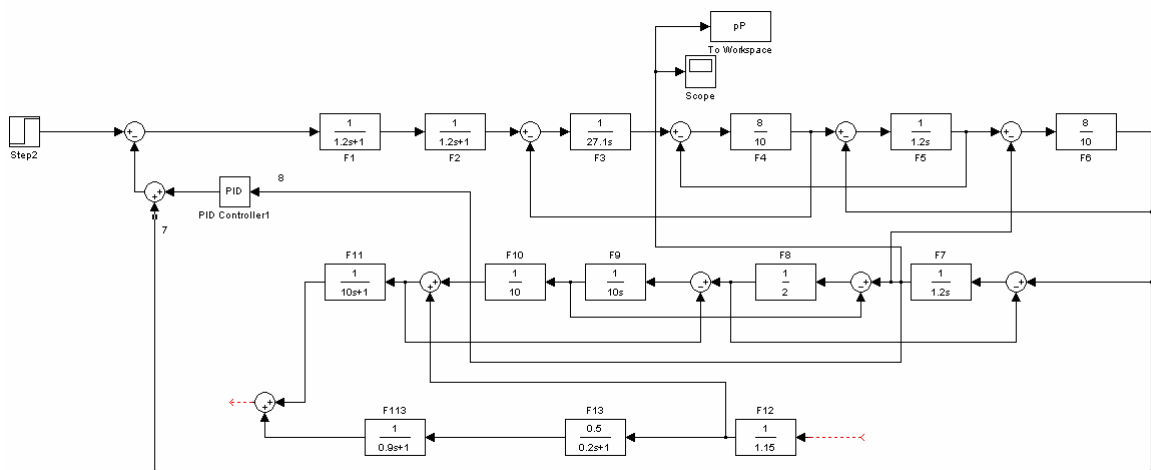
Jednoduchých regulačních obvodů se dnes používá u kotlů s plynným, nebo tekutým palivem, u kterých se prakticky nevyskytují poruchy v přívodu paliva.

5 NÁVRH ROZVĚTVENÉHO JEDNOROZMĚROVÉHO REGULAČNÍHO OBVODU

5.1 Rozvětvený jednoparametrový obvod s měřením poruchové veličiny

Regulační obvody s P nebo PD regulátory mají dobré stabilitní vlastnosti. Jejich nevýhodou je však trvalá regulační odchylka na konci regulačního pochodu. Z teorie rozvětvených jednoparametrových obvodů je známé, že měřením poruchové veličiny a jejím vhodným přiřazením do struktury regulačního obvodu, dále vhodným seřízením regulátoru, je možné zajistit invariantnost regulačního obvodu na příslušnou poruchovou veličinu.

Častou a velmi snadno měřitelnou poruchou je změna odebírané páry turbínou, tedy změna výkonu bloku viz obr. 33. U rozvětveného obvodu s měřením odběru páry turbínou lze docílit, že trvalá regulační odchylka při této poruše na konci regulačního pochodu bude rovna nule. Současně dojde ke zmenšení přechodové regulační odchylky, což je zapříčiněno signálem od množství páry, který přechodně původní poruchu zvětší. Odstranění trvalé regulační odchylky tlaku páry i při poruše ze strany paliva lze dosáhnout měřením této poruchy.

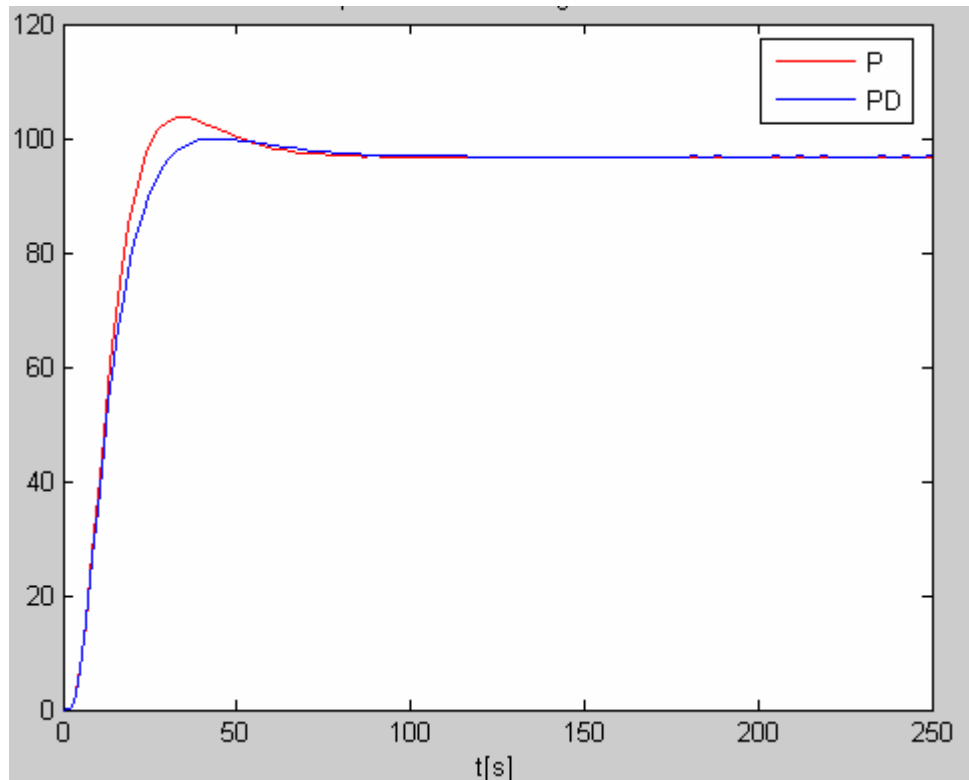


Obr. 33. Schéma zapojení rozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu s měřením poruchové veličiny

7- λ_{k1} hmotnostní tok na výstupu z prvního dílu přehříváku

8- ϕ_{k2} tlak na výstupu z druhého dílu přehříváku

Popsané regulační schéma v obou případech, tj. při použití P regulátoru nebo PD regulátoru zajišťuje udržování tlaku páry na výstupu z kotle bez trvalé regulační odchylky a je vhodné pro bloky regulující frekvenci, u kterých se současně vyskytují i poruchy v přívodu paliva.



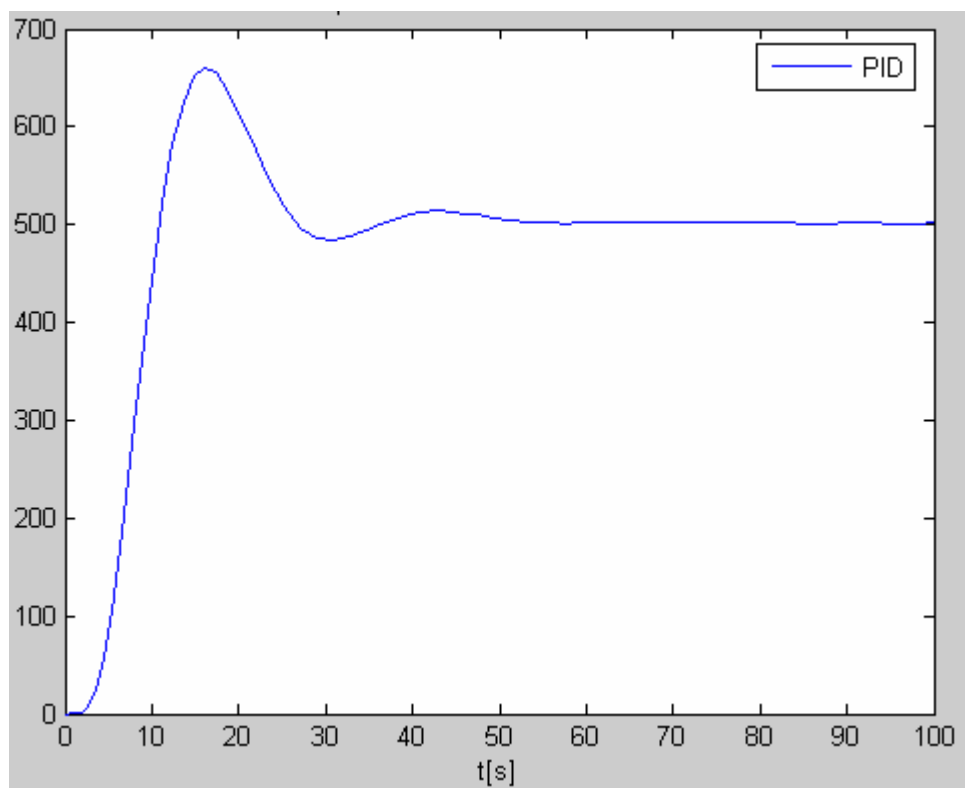
Obr. 34. Průběh veličiny φ_{k2} u rozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu s měřením poruchy

K nastavení stavitelných parametrů regulátorů byla jako základ použita metoda kritického zesílení (ZN), přesnějšího nastavení parametrů bylo však dosaženo pokusnými simulacemi.

6 ZHODNOCENÍ KVALITY NEROZVĚTVENÉHO JEDNOROZMĚROVÉHO REGULAČNÍHO OBVODU A ROZVĚTVENÉHO REGULAČNÍHO OBVODU

K posouzení kvality regulace bylo opět použito měření regulační plochy. U jednorozměrového nerozvětveného obvodu se podle regulační plochy jeví jako nejlepší regulátor PID navržený metodou čtvrtinového tlumení, u kterého je $\varphi_{k2} = 2,7527$.

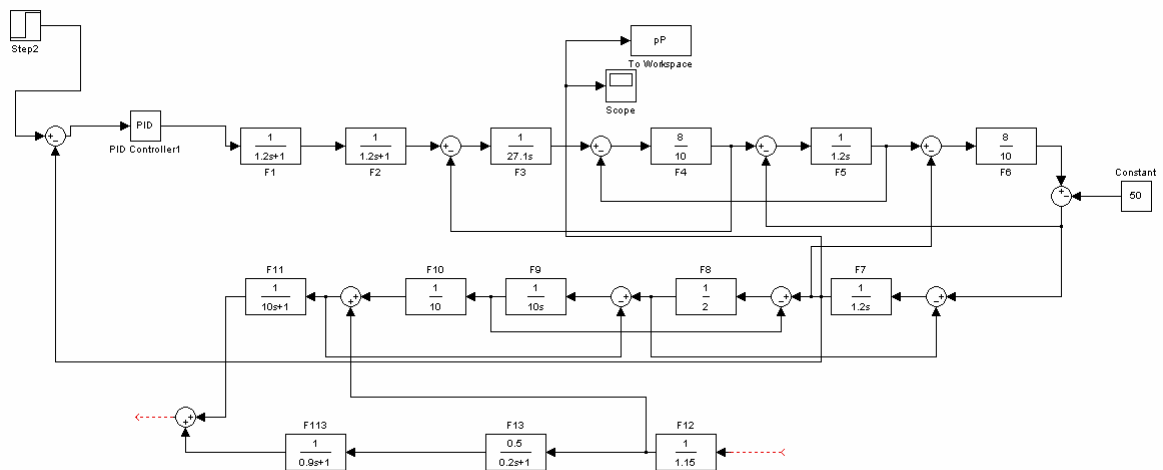
Plocha s regulátorem PD navrženým metodou Z-N a částečně pokusně u rozvětveného regulačního obvodu při regulaci $\varphi_{k2} = 2,3611$



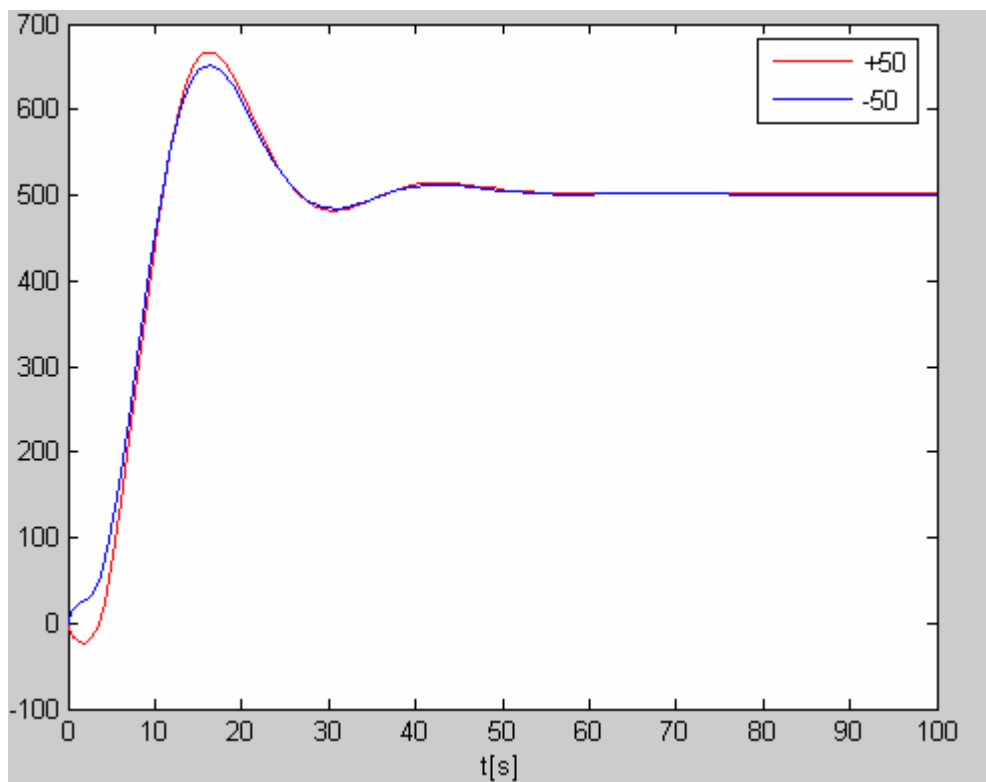
Obr. 35. Průběh veličiny φ_{k2} u nejlepšího nerozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu

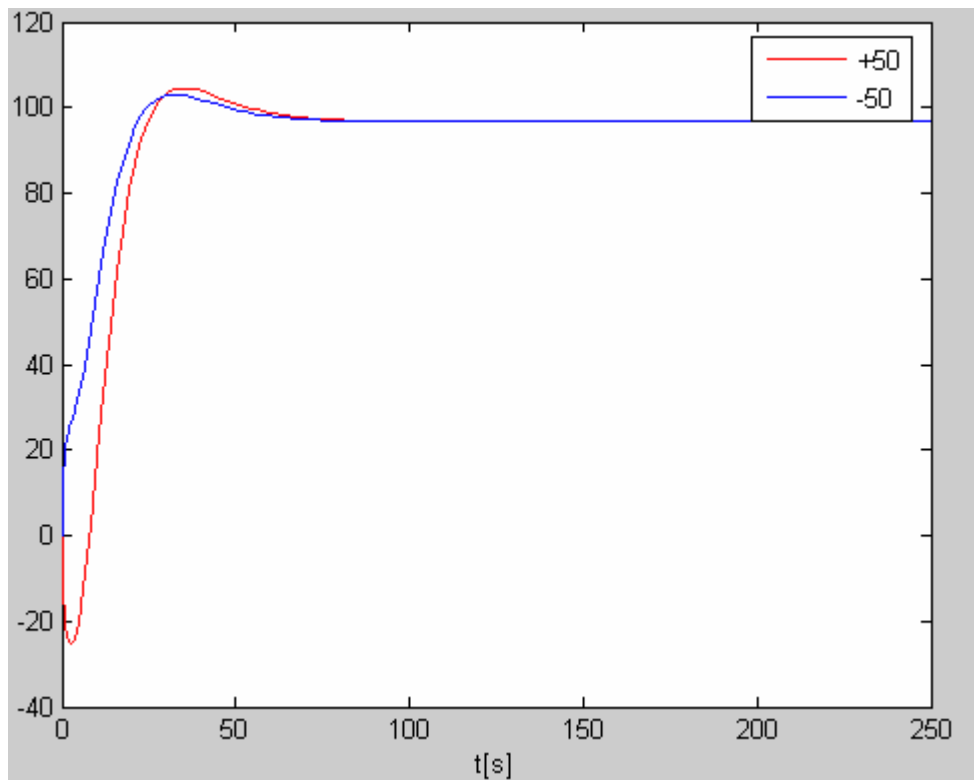
Z výsledků je patrné, že větší plochu regulační odchylky má PID regulátor u nerozvětveného regulačního obvodu, jeho nevýhodou je zároveň i fakt, že reguluje s překmitem, což může být nežádoucí.

Pro posouzení regulačních pochodů s poruchou zařadíme mezi bloky F6 a F7 blok Constant s hodnotou +50 a následně -50



Obr. 36. Způsob zapojení poruchy do obvodu


 Obr. 37. Průběh veličiny φ_{k2} u nerozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu při zavedení poruchy



Obr. 38. Průběh veličiny φ_{k2} u rozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu s měřením poruchy při zavedení poruchy

Rozvětvený regulační obvod má tu výhodu, že s použitím jednoduššího regulátoru (P, PD) je schopen regulovat bez trvalé regulační odchylky.

ZÁVĚR

Teoretická část této práce shrnuje nejdůležitější vlastnosti regulované soustavy, které souvisí s návrhem a seřizováním regulátorů pro elektrárenskou soustavu. Poskytuje i vysvětlení základních pojmů a principů regulované soustavy.

V praktické části se nejprve zabýváme popisem a vlastnostmi zadané elektrárenské soustavy, jsou zde rozebrány funkce jednotlivých bloků a přenosy. První využití simulinku bylo pro odezvu regulované soustavy na změnu akční veličiny – změnu paliva, dále pro odezvu regulované soustavy na změnu odebíraného elektrického výkonu. Zobrazené průběhy jsou pro kratší časy, řádově stovky sekund a odpovídají víceméně integrační soustavě. Pokud bychom zobrazili průběhy pro delší časové úseky, uplatnil by se vliv množství zpětných vazeb, které způsobují stabilizování měřených veličin.

V další části navrhuji jednorozměrový regulační obvod pro udržení konstantního tlaku na výstupu z kotle a volím různé typy regulátorů. K seřízení regulátorů jsem použil metody: kritického tlumení (ziegler – nicholsovu), z přechodové charakteristiky a čtvrtinového tlumení. O všech těchto metodách hovoří také teoretická část. Kvalita regulačního pochodu je pak zjištěna pomocí programu, který počítá regulační plochu s jednotlivými typy regulátorů a seřizování. V průměru nejmenší regulační plocha a z toho vyplývá nejkvalitnější regulace, byla při použití regulátoru PID. Jako nejlepší metoda pro návrh regulátoru se zde jeví metoda čtvrtinového tlumení.

Dalším úkolem byl návrh jednorozměrového regulačního obvodu, vyšetření regulačních pochodů a zhodnocení kvality jednorozměrového regulačního obvodu s nejlepším typem a seřizováním regulátoru a srovnání s průběhem nejvhodnějšího jednorozměrového regulačního obvodu. Menší regulační plocha vyšla u nerozvětveného regulačního obvodu, ale jeho nevýhodou je kmitavý regulační pochod. Výhodou rozvětveného regulačního pochodu je to, že umožňuje s použitím P regulátoru udržovat konstantní úroveň výstupní veličiny bez regulační odchylky a je schopný dobře reagovat na vstupní poruchy.

CONCLUSION

Theoretical part of this thesis summarizes the most important characteristics of controlled assembly, which relate to design and adjustment of regulators for power systems. It is explaining the basic facts and principles of regulated assembly.

The practical part is at first a description and lists characteristics of requested power system, we analyse functions of individual blocks and transmissions. The first use of the simulink software was to have feedback from the controlled assembly on changing the actuating variable – change of fuel, then for having feedback on a change of electric output. The processes featured are displaying shorter time lapses, centesimals of seconds, and are more or less correspondent to integration assembly. Should we have presented processes for longer time lapses, the influence of the numerous feedbacks causing stabilization of measured quantities would be applied.

In the next part I scheme single-dimensional control circuit for maintaining constant pressure on the drum output and chose different types of regulators. For regulator adjustment I used following methods: critical subdue method (zielger-nichols), characteristic transitions method and quater-subdue method. The theoretical part mentions all those methods. The quality of regulation process is determined by a program calculating the controlled area with individual types of regulators and their adjustments. The smallest controlled area – and the best quality regulation – was achieved with PID regulator. The best method for regulator design is at this case the quater-subdue method.

The next task was to design a single-dimension control circuit, to analyse regulation processes and to evaluate the quality of the single-dimension control circuit with the best type and adjustment of regulator, as well as to compare the most suitable circuit. With unbranched circuit we had smaller regulation area, but in this case the disadvantage is an oscillatory regulation process. The advantage of a branched circuit is the possibility to keep constant level on output quantity using regulator P, without regulation deviation, and it is well reacting to input defects.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Balátě, J. (1987): Dynamika a regulace parních kotlů (skriptum), VUT v Brně – Fakulta strojní, ES VUT Brno,
- [2] Balátě, J. (2003): Automatické řízení, BEN – technická literatura, Praha, ISBN 80-7300-020-2,
- [3] Balda, M. Hanuš, B. (1986): Základy technické kybernetiky, SNTL/ALFA, Praha,
- [4] Hanuš, B., Olehla, M., Modrlák, O. (2000): Číslicová regulace technologických procesů. Algoritmy, matematicko – fyzikální analýza, identifikace, adaptace. ISBN 80-214-1460-XY, VUT/UM, Brno
- [5] Dušek, F. (2000) MATLAB a SIMULINK – úvod do používání (skriptum), Univerzita Pardubice, ISBN 80-7194-273-1
- [6] Eliáš, J. (2004): Simulace regulace výkonu elektrárenského bloku kotel – turbína – generátor, bakalářská práce, FT UTB Zlín

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Stavová matice systému
B	Vstupní matice systému
C	Výstupní matice systému
D	Výstupní matice řízení
e	Regulační odchylka
G	Přenosová funkce
G_R	Přenos regulátoru
G_S	Přenos regulované soustavy
G_V	Přenos poruchy
G_W	Přenos řízení
I	Jednotková matice
k_P, k_R	Zesílení analogového regulátoru
r₀	
k_{Pk}, k_{Rk}	Kritické zesílení analogového regulátoru
r_{0k}	
K	Matice korekce výstupu u stavového regulátoru
P	Proporcionální složka u regulátoru, proporcionální regulátor
PD	Proporcionálně derivační analogový regulátor
PI	Proporcionálně integrační analogový regulátor
PID	Proporcionálně integračně derivační analogový regulátor
r₀, k_P	Proporcionální konstanta analogového regulátoru
r₁, k_I	Integrační konstanta analogového regulátoru
R	Matice stavového regulátoru
R	Regulátor (řídící systém)

S	Regulovaná soustava (řízený systém)
T	Perioda
T_D	Derivační časová konstanta
T_I	Integrační časová konstanta
T_K	Kritická perioda
T_n	Doba náběhu
T_u	Doba průtahu
u	Akční veličina
v	Poruchová veličina
w	Žádaná veličina
x	Stavová veličina
\mathbf{x}	Vektor stavových veličin
y	Regulovaná, výstupní veličina
ZN	Ziegler – Nichols
μ_U	Vstup akční veličiny – změny paliva
μ_S	Změna paliva převedená na teplo uvolněné hořením
λ_V	Virtuelní výroba páry ve varném systému bez ovlivnění kolísavým tlakem
φ_B	Tlak v bubnu
λ_B	Hmotnostní tok na vstupu do bubnu, který je ovlivněn kolísáním tlaku v bubnu
φ_{k1}	Tlak na výstupu z prvního dílu přehříváku
λ_{k1}	Hmotnostní tok na výstupu z prvního dílu přehříváku
φ_{k2}	Tlak na výstupu z druhého dílu přehříváku
λ_{k2}	Hmotnostní tok na výstupu z druhého dílu přehříváku
φ_P	Tlak na výstupu z parovodu
λ_{T1}	Hmotnostní tok na výstupu z parovodu

λ_T	Výstup z parovodu na vstupu do turbíny ($\lambda_T = \lambda_P$)
λ_P	Hmotnostní tok na výstupu z parovodu
μ_R	Vstup změny odebíraného elektrického výkonu
λ_{T2}	Hmotnostní tok za regulačními ventily turbíny
φ_E	Výstup elektrického výkonu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Způsob základního zapojení jednoduchého reg. obvodu	10
Obrázek 2. Zjednodušené blokové schéma regulátoru	13
Obrázek 3. Přechodová charakteristika PI regulátoru.....	15
Obrázek 4. Odezva na jednotkovou rychlost PD regulátoru.....	16
Obrázek 5. Způsoby základního zapojení jednoduchého reg. obvodu.....	19
Obrázek 6. Typické průběhy $y_{\text{hom}}(t)$	23
Obrázek 7. Průběhy složek řešení rov. (36) v závislosti na kořenech charakteristické rov. (39)	24
Obrázek 8. Rozložení kořenů charakteristické rovnice v komplexní rovině „s“	25
Obrázek 9. Regulační pochody kmitavé – $y_1(t)$ a aperiodické – $y_2(t)$ vyvolané změnou $w(t)$ nebo vznikem $v(t)$	27
Obrázek 10. Určení T_K při r_{0k} resp. r_{-1k}	28
Obrázek 11. Měření $T_{1/4}$ při $k_{R1/4}$	30
Obrázek 12. Přechodová charakteristika regulované soustavy: a) proporcionální, b) integrační	31
Obrázek 13. Schéma rozvětvení jednorozměrových regulačních obvodů	32
Obrázek 14. Principy rozvětvení jednorozměrového regulačního obvodu.....	33
Obrázek 15. Blokové schéma jednorozměrového regulačního obvodu.....	35
Obrázek 16. Regulace napájení bubnového kotle s měřením poruchové veličiny v :	36
Obrázek 17. Blokové schéma elektrárenské soustavy kotel – turbína – generátor	39
Obrázek 18. Způsob zapojení bloků pro simulaci změn akční veličiny	42
Obrázek 19. Průběhy jednotlivých měřených veličin při změně paliva.....	42
Obrázek 20. Blok STEP, zapojený pro simulaci změn odebíraného el. výkonu	43
Obrázek 21. Průběhy jednotlivých měřených veličin při změně odebíraného elektrického výkonu	43
Obrázek 22. Zapojení regulátoru a bloků STEP a SCOPE při regulaci tlaku na výstupu z kotle.....	45
Obrázek 23. Průběhy výstupní veličiny φ_B s jednotlivými typy regulátorů	46
Obrázek 24. Regulační průběhy výstupní veličiny φ_B s jednotlivými typy regulátorů	47
Obrázek 25. Regulační průběhy výstupní veličiny φ_B s jednotlivými typy regulátorů	48
Obrázek 26. Průběhy výstupní veličiny φ_{K2} s jednotlivými typy regulátorů.....	50

Obrázek 27. Průběhy výstupní veličiny φ_{K2} s jednotlivými typy regulátorů.....	51
Obrázek 28. Průběhy výstupní veličiny φ_{K2} s jednotlivými typy regulátorů.....	52
Obrázek 29. Průběhy výstupní veličiny φ_P s jednotlivými typy regulátorů	54
Obrázek 30. Průběhy výstupní veličiny φ_P s jednotlivými typy regulátorů	55
Obrázek 31. Průběhy výstupní veličiny φ_P s jednotlivými typy regulátorů	56
Obrázek 32. Schéma zapojení v Simulinku pro výpočet regulační plochy.....	57
Obrázek 33. Schéma zapojení rozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu s měřením poruchové veličiny.....	58
Obrázek 34. Průběh veličiny φ_{k2} u rozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu s měřením poruchy	59
Obrázek 35. Průběh veličiny φ_{k2} u nejlepšího nerozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu	60
Obrázek 36. Způsob zapojení poruchy do obvodu	61
Obrázek 37. Průběh veličiny φ_{k2} u nerozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu při zavedení poruchy	61
Obrázek 38. Průběh veličiny φ_{k2} u rozvětveného jednorozměrového regulačního obvodu s měřením poruchy při zavedení poruchy.....	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Seřízení spojitého regulátoru z kritických hodnot regulátoru	29
Tabulka 2. Seřízení regulátoru z čtvrtinového tlumení.....	30
Tabulka 3. Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	31
Tabulka 4. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	46
Tabulka 5. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	47
Tabulka 6. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	48
Tabulka 7. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	49
Tabulka 8. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	51
Tabulka 9. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	52
Tabulka 10. Vypočtené optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	53
Tabulka 11. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	54
Tabulka 12. Vypočítané optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	56
Tabulka 13. Výsledné hodnoty ploch regulačních odchylek u jednotlivých měření	57

SEZNAM PŘÍLOH

P1: DVD obsahující simulovaný model elektrárenského bloku a modely pro simulaci jednotlivých zadání v MATLAB – Simulinku.