

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23-40-3

Automatizované systémy řízení výrobních procesů ve strojírenství

Katedra technické kybernetiky

NÁVRH VHODNÉ TŘISIGNÁLOVÉ AUTOMATICKÉ  
REGULACE HLADINY V BUBNU KOTLE

Petr K u č e r a

Vedoucí práce: Ing Jiří Svoboda KTK VŠST Liberec

KTK ASŘ SF-028

Rozsah práce a příloh :

Počet stran : 54

Počet obrázků: 19

Počet tabulek: 10

Počet příloh : 4

V Děčíně, dne 4. června 1982.

Vysoká škola: **VŠST Liberec**      Fakulta: **strojn**  
Katedra: **technické kybernetiky**      Školní rok: **1981/82**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

**s. Petra Kučera**

pro .....  
obor **automatizované systémy řízení výrobních procesů**  
**ve strojírenství**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Návrh vhodné třísignálové automatické regulace**  
**hladiny v bubnu kotle**

Zásady pro vypracování:

- 1) Prostudujte odbornou literaturu a firemní dokumentaci týkající se zadaného problému.
- 2) Popište a zhodnoťte stávající způsob automatické regulace hladiny v bubnu kotle.
- 3) Navrhněte vhodnou třísignálovou automatickou regulaci hladiny.
- 4) Podle možností odzkoušejte navržený regulační obvod na modelu a v případě, že bude k dispozici potřebné regulační přístroje, i v praxi.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5  
PSČ 461 17

Autorské právo se řídí směrnicí  
MŠK pro státní záv. zkoušky č. j. 31  
727/62-III/2 ze dne 13. července  
1962-Věstník MŠK XVIII, sešit 24 ze  
dne 31. 8. 1962 § 17 aut. z. č. 115/53 Sb.

V 169/82 S

Rozsah grafických prací: **schémata regulace**

Rozsah průvodní zprávy: **40 - 50 stran**

Seznam odborné literatury:

1. Zikeš, P.: **Praktické úlohy z automatické regulace I; skripta VŠST, Liberec 1975.**
2. Vejvoda, J.: **Pneumatická regulace; SNTL Praha 1973.**
3. **Časopisy Měření a regulace, firemní přístrojová dokumentace ZPA, Tizpribor Moskva, VEB Reglerwerk Dresden.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Svoboda**

Datum zadání diplomové práce: **15.9.1981**

Termín odevzdání diplomové práce: **4.6.1982**



*Alaxin*  
**Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc.**

Vedoucí katedry

*Stříž*  
**Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc.**

Děkan

v **Liberci** dne **10.9.** 81  
..... 10.....

" Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou  
práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury."

*Petr Hlavica*

---

V Děčíně, dne 4. června 1962.

## O b s a h

1.	Úvod .....	5
2.	Parní kotel z hlediska regulace .....	8
2.1.	Regulace napájení parních kotlů .....	11
3.	Popis závođu .....	14
4.	Popis stávajícího způsobu regulace .....	15
5.	Návrh regulace napájení .....	16
5.1.	Identifikace soustavy .....	16
5.1.1.	Určení přenosu hladina/voda .....	18
5.1.1.1.	Měření přechodových charakteristik .....	18
5.1.1.2.	Vyhodnocení naměřených charakteristik .....	19
5.1.2.	Určení přenosu hladina/pára .....	22
5.1.2.1.	Měření přechodových charakteristik .....	22
5.1.2.2.	Vyhodnocení naměřených charakteristik .....	24
5.1.3.	Shrnutí výsledků identifikace .....	26
5.2.	Regulace napájení .....	28
5.2.1.	Popis navrženého schématu regulace .....	28
5.2.2.	Volba typů regulátorů - seřízení .....	30
5.2.2.1.	Odvození vztahů pro výpočet regulátoru .....	30
5.2.2.2.	Seřízení regulátoru $R_2$ .....	32
5.2.2.3.	Seřízení regulátoru $R_1$ .....	36
5.2.2.4.	Kontrola stability .....	38
5.3.	Měření průtoku páry .....	40
5.3.1.	Návrh zlepšení přesnosti měření .....	40
5.3.2.	Napájecí zdroje .....	42
5.3.3.	Celkové schéma měření průtoku páry .....	42
5.4.	Problém invariantnosti .....	44
6.	Odzkoušení regulace na modelu .....	45
6.1.	Modelování soustav .....	45
6.1.1.	Modelování soustavy $S_1$ .....	46
6.1.2.	Modelování soustavy $S_2$ .....	47
6.2.	Regulační obvod na modelu .....	48
7.	Zapojení regulace v praxi .....	51
	Použitá literatura .....	53
	Seznam příloh .....	54

Použité zkratky a symboly:

$p$	... Laplaceův operátor
$t$	... čas
$Q_P$	... průtok páry [t/h]
$Q_V$	... průtok vody [t/h]
$h$	... výška hladiny v bubnu
$H/p/$	... Laplaceův obraz hladiny
$S_1/p/$	... přenos hladina/voda
$S_2/p/$	... přenos hladina/pára
$R_1/p/$	... regulátor velké smyčky
$R_2/p/$	... regulátor malé smyčky
$K$	... člen zajišťující invariantnost vůči poruše na $Q_P$
$\alpha$	... přenos rychlost změny hladiny/voda
$\beta$	... přenos rychlost změny hladiny/pára
$T_D$	... dopravní zpoždění
$T$	... časová konstanta příslušného přenosu
$T_I$	... integrační konstanta příslušného regulátoru
$T_D$	... derivační konstanta příslušného regulátoru
$P$	... proporcionální zesílení příslušného regulátoru
$SJ$	... strojová jednotka

## 1. Ú v o d

Jedním z nejvýraznějších faktorů současné vědeckotechnické revoluce je co nejširší uplatnění výsledků vědy do technické praxe. Velmi široce se uplatňuje teorie řízení, která se rozvinula po druhé světové válce a zvláště její část - automatická regulace.

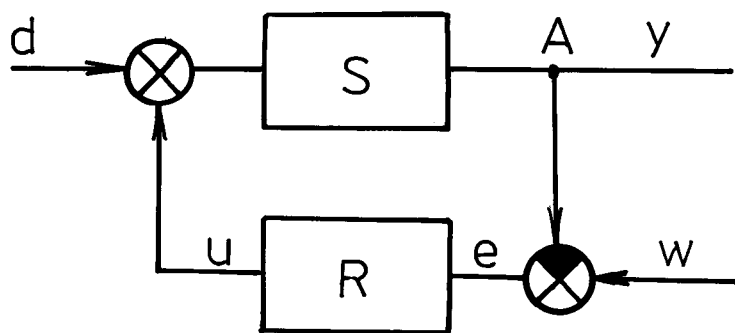
Dle hlavních směrů hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR na léta 1981 - 85 je nutno důsledně prosadit kurs na růst efektivnosti a kvality veškeré práce cestou vyšší účinnosti výrobních prostředků na základě urychlení a maximálního využití vědeckotechnického rozvoje. Ve všech odvětvích národního hospodářství je nutno racionálně využívat všechny druhy paliv, energie, materiálů a surovin, jakož i všechny existující základní fondy a pracovní síly. Zvláště v energetice je nutno dbát na co největší využití stávajících zařízení, dále dbát na to, aby pracovala v optimálních režimech. Důležitým prostředkem k dosažení tohoto cíle je automatická regulace. Odstraňuje jednotvárnou, ale přesto na pozornost náročnou a tedy unavující práci, šetří pracovní síly a dovoluje i lépe řídit dané zařízení.

Automatickou regulací rozumíme řízení, které provádí bez zásahu člověka automatickou kontrolu výsledku. Jde nám většinou o to, aby výstupní veličina ze systému / obecně

vektor regulovaných veličin/ zůstala na nějaké nové stanovené hodnotě, nebo se měnila podle stanoveného průběhu / pak se jedná o tak zvanou regulaci vlečnou/, i když do regulované soustavy vstupují poruchy. Tato zařízení pracují na principu zpětné vazby.

Základní schéma regulačního obvodu je možno schematicky naznačit takto:

Obr. 1



kde:  $d$  - značí poruchu vstupující do soustavy

$y$  - značí regulovanou veličinu

$u$  - akční veličina

$w$  - žádaná hodnota

$e$  - regulační odchylka

$S$  - regulovaná soustava

$R$  - regulátor

V bodě  $A$  je změřen stav soustavy a převeden na unifikovaný signál. Ten je porovnáván s žádanou hodnotou a vzniklý signál je zaveden do regulátoru. Regulátor podle polarity, velikosti, případně i rychlosti změny regulační odchylky provede zásah na vstupu do soustavy.

Toto, dnes už klasické schéma, představuje po správném seřízení regulátoru velmi spolehlivý automat. Problém zde může být velké dopravní zpoždění, nelinearita, případně se může jednat o tzv. soustavu s neminimální fází. Potom se může



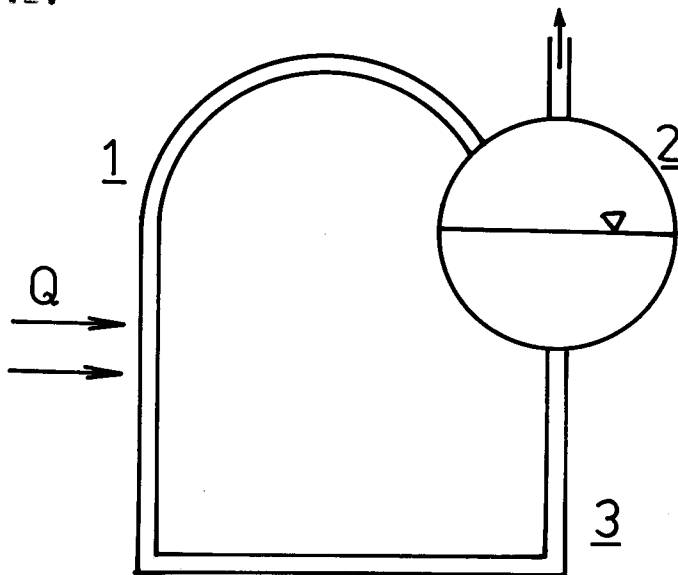
stát, že automatickou regulaci dle výše uvedeného schématu nelze realizovat v požadované kvalitě, v krajním případě vůbec. Proto byly vyvinuty různé obměny pro zlepšení vlastností regulace. Jednou z cest je použití více signálů pro regulaci.

## 2. Parní kotel z hlediska regulace

Vývoj novodobého kotle začíná v 17. stol. vlivem vynálezu kondenzačního parního stroje. O sto let později je však jeho konstrukční zdokonalování zanedbáváno. Jeho konstrukce zůstává poměrně dlouhou dobu jen ve vleku vývoje parních strojů a turbin. Konstruktoři se v té době zajímají spíše o nově vznikající obory, jako byly na př. obory rotačních strojů a elektrotechnika. Tyto technické disciplíny se zdály atraktivnější, než "pouhé" odpařování vody v kotli. Princip parního kotle je v podstatě jednoduchý. Voda je ohřívána ve varných trubkách /1/, proudí do kotelního bubnu /2/, kde se odpařuje. Neodpařená voda je vracena spádovými trubkami /3/ a znovu ohřívána. Napáječka musí do kotle dodat tolik vody, kolik se jí odpařilo. Oběh kotelní vody může být přirozený - je způsoben vývinem parních bublin ve varných trubkách, nebo nucený - pak je oběh způsoben prací čerpadla.

Oběhová smyčka vodotrubného kotle je na obr. 2.

Obr. 2.



Různou kombinací tří složek - kotelního bubnu, verných a spádových trubek vznikají poměrně složité a zděravě různorodé kombinace, které vzbuzují mylné představy o zásadním zdokonalení konstrukce. Jedním z hlavních důvodů, který bránil uvádění technických novinek do provozu, byla značná cena a velikost parního kotle a tedy i velké náklady na pokusy v širším měřítku. Rovněž snadná regulovatelnost - podmínka, která je u ostatních zařízení považována za velmi důležitou, byla konstrukcí dlouho opomíjena. Redukovala se na zvýšení bezpečnosti provozu parního kotle. Přesto se exploze parních kotlů vyskytovaly ještě začátkem tohoto století.

S výstavbou nových a modernizací starších zařízení je dnes nerozlučně spjato zavádění automatizační techniky. U parních kotlů se zde střetáváme s faktem, že regulovatelnost nevyhovuje často ani mírným provozním požadavkům.

Kotelní regulace je v podstatě regulace množství. Do regulačního pochodu však vstupují různé rušivé vlivy, jimiž jsou na př. akumulace tepelné energie v kotli, různá dopravní zpoždění dosahující někdy poměrně vysokých hodnot. Při prudkých změnách výkonu není možné udržet rovnovážný stav ani v případě, že zachováme podmínku rovnosti energie přiváděné a energie odváděné. Je to způsobeno tím, že se při zvětšování výkonu zvětšuje rovněž množství akumulovaného tepla. Analogicky při zmenšování výkonu se množství akumulovaného tepla zmenšuje.

U kotelního agregátu se teplo akumuluje:

- ve vodním obsahu kotle
- v oceli kotelních trubek
- v trubkách přehříváku páry
- v obezdívce kotle

Největší množství akumulovaného tepla je ve vodním obsahu, protože ten představuje největší z ohříváných hmot. Navíc voda má také největší měrné teplo.

Tyto okolnosti jsou potom velkým problémem při zavádění komplexní automatizace provozu parního kotle. K dosažení komplexní automatizace je nutné regulovat tyto parametry:

- výšku hladiny v kotelním bubnu
- množství paliva
- množství spalovacího vzduchu
- podtlak v topeništi
- teplotu páry

Je třeba zdůraznit, že není tak velkým problémem regulovat kotel při stejnoměrném zatížení, nebo při nepříliš rychlých změnách výkonu. Skutečné problémy nastávají při častých a prudých skocích na odběru páry. Dle provozních zkušeností je však třeba požadovat dobrou regulovatelnost i při těchto režimech. Kotel musí pružně reagovat na potřeby odběratelů. Pojem tak zvaného kotle pro základní zatížení je proto odmítán.

Kdyby nebylo změn akumulované energie a dopravních zpoždění, bylo by v podstatě možno regulovat palivo, spalovací vzduch a kondenzát ke chlazení páry přímo podle odběru páry z kotle. Rovněž k regulaci stavu hladiny by úplně postačoval signál od její výšky. Za předpokladu dostatečně přesného měření a velké rychlosti regulace bychom dosáhli i při velkých změnách výkonu velmi stabilního regulačního pochodu, který by do nového rovnovážného stavu přecházel aperiodicky. Jelikož však tyto jevy v praxi nastávají, je nutno hledat takové schéma regulace, které by zmenšilo vliv akumulované energie a dopravního zpoždění na únosnou míru.

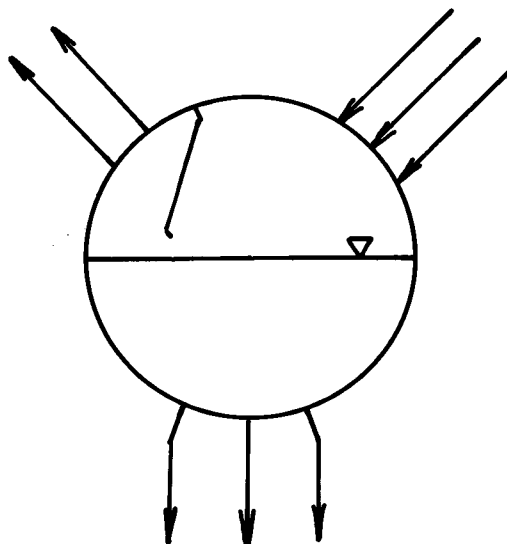
Z předchozího plyne, že parní kotel tvoří regulovanou soustavu, kde se reguluje víc parametrů, které na sebe vzájemně působí. Někdy však nelze použít jako řídicí signál pro regulaci přímo veličinu regulovanou. Je tedy nutno zvolit nové schéma regulace, většinou s použitím více signálů. To však předpokládá značnou znalost dynamiky regulovaného zařízení i použité regulační techniky.

### 2.1. Regulace napájení parních kotlů

Rozdíl mezi množstvím přiváděné vody a množstvím odváděné páry se projevuje poklesem, případně vzrůstem hladiny v bubnu a to tím větším, čím jsou změny na odběru rychlejší a častější. Účelem regulace je udržet hladinu ve výšce dané konstrukcí kotle. Je známo, že výška hladiny v bubnu ovlivňuje čistotu vyráběné páry. Je nutno si uvědomit, že čím bude výška hladiny v bubnu větší, tím se bude zvětšovat přestřik solí z vodního obsahu do páry. Tento negativní jev se projevuje zvláště u vysokotlakých kotlů.

Přestřik i prudké rozdíly ve stavu hladiny je možno snížit již pomocí vhodného zaústění varných trubek do bubnu. Jedno z takových řešení je naznačeno na obr. 3.

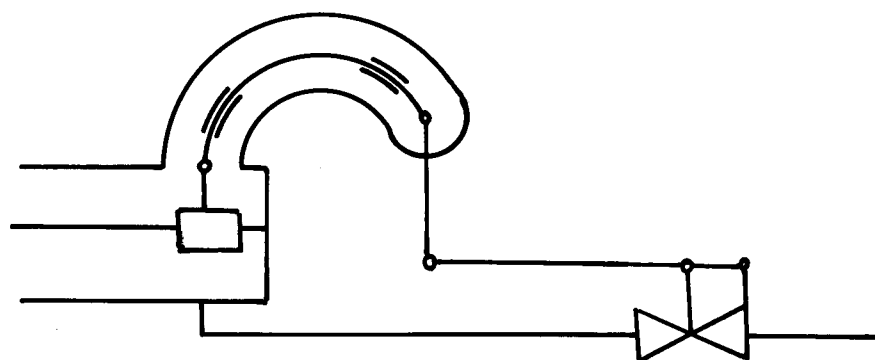
Obr. 3.



Poměrně dokonalé řešení je pomocí cyklonkové vestavby. Umožňuje umístit varné trubky pod hladinou vody v bubnu, protože se pára odloučí v cyklonkové vestavbě. Z toho plyne, že hladina nekolísá ani při velkých změnách výkonu kotle. Někdy je možné použít pro regulaci jenom jednoduchý regulátor.

Kotelní buben tvoří astatickou soustavu. Výstupní veličinou je zde hladina vody. Tu lze poměrně snadno měřit a navíc je možno pro regulaci získat poměrně velké přestavné síly. Tento fakt vedl k různým konstrukcím přímých jednoimpulzních regulátorů. Jedna z takových konstrukcí je plovákový regulátor typu Hanemann /obr.4/.

Obr.4.



Funkce je zřejmá z obrázku. Změna hladiny způsobí pohyb plováku, který je pomocí táhel přenesen na kuželku napájecího ventilu. Nevýhodou tohoto systému je poměrně dlouhý spojovací článek mezi měřícím ústrojím a napájecím ventilem. Další, velmi podstatná nevýhoda je v obtížném ručním zásahu do regulace. Principiální nevýhoda těchto jednoduchých zařízení však plyne především z vlastního průběhu regulované veličiny. Zvýší-li se na př. odběr páry, zmenší se tlak v bubnu a paroplynová směs zvětší svůj objem. Na vodoznaku potom můžeme sledovat, že hladina v bubnu zůstává na stejné úrovni nebo dokonce roste. Kotelní buben se tedy může chovat jako astatická soustava s dopravním zpožděním, případně jako astatická sou -

stava s neminimální fází. Je to jev sice snadno vysvětlitelný, ale jednoimpulzní regulátor nemá žádnou možnost "poznat chybnost" svého zásahu. Přejížděním stoupanutím hladiny přivře napájecí ventil a tím ještě zvětší nerovnováhu mezi množstvím páry a množstvím vody. V prvním okamžiku má tedy regulace vyloženě nestabilní charakter. Proto tedy regulátory nedokáží udržet hladinu při rychlých změnách výkonu v přípustných mezích.

Vzhledem k této zvláštnosti je nutno zdokonalit regulaci napájení. Byly konstruovány nejprve dvouimpulzní regulátory, kde byl brán signál od množství páry a od výšky hladiny. Další zlepšení je takzvaná třísignálová regulace napájení, kdy je využíván navíc ještě signál od množství napájecí vody. Tímto způsobem regulace se zabývá tato diplomová práce.

### 3. Popis závodu

Teplárna Liberec - závod Severočeských elektráren koncernového podniku Komořany zásobuje teplem asi 10 500 bytových jednotek a přibližně 50 průmyslových podniků a provozoven. Poměr dodávky tepla do průmyslu a do bytovek je asi 1:1.

V teplárně jsou instalovány dva kotle. Kotel  $K_2$  o výkonu 60 MW zahájil provoz v roce 1976 a kotel  $K_1$  o výkonu 110 MW, který zahájil provoz v roce 1977. Na kotel  $K_1$  je napojena protitlaká turbína o výkonu 12 MW. Oba kotle mají pneumatickou regulaci. Jedná se o kotle bez vyzdívky, v kterých se spaluje topný olej TM ČSN 657991. Maximální denní spotřeba oleje je 360 t. Spotřeba v zimním období je asi 260 t. Kotle jsou napájeny vodou z lužické Nisy, která prochází úpravou v demineralizačních stanicích.

V zásobování teplem se projevují velké rozdíly mezi maximální a minimální dodávkou, zejména v přechodném období. V těchto obdobích dochází k velkým nárůstům výkonu, hlavně mezi 4. až 10. hodinou, kdy výkony kotlů stoupají k maximu. Jelikož provoz velkého kotle je částečně stabilizován turbínou, promítají se rozdíly zatížení hlavně do provozu menšího kotle. Tento bývá v nočních hodinách často odstavován. V té době, kdy kolísá prudce výkon, se nelze na automatiku plně spolehnout a do regulace bývá nutno zasáhnout ručně.



#### 4. Popis stávajícího způsobu regulace

V dalším bude popisována regulace kotle  $K_2$ . Regulace napájení tohoto kotle je tématem této diplomové práce. Celkové schéma regulace je uvedeno v příloze 1. Na tomto kotli jsou regulovány automaticky následující parametry:

- hladina vody v kotelním bubnu
- teplota páry
- množství spalovacího vzduchu
- teplota spalovacího vzduchu
- množství paliva
- podtlak v topeništi

Ne všechny tyto regulace však plní svůj účel v plném rozsahu. Regulace napájení patří mezi nespolehlivé regulační obvody. Hladina vody je měřena pomocí přístroje ZBPADIF22. Signál o stavu hladiny je zaveden do regulátoru typu PI s nastaveným  $\delta = 70\%$  a  $T_I = 5,5$  min. Ten vysílá akční veličinu na regulační ventil. Je použit ventil s lineární charakteristikou. Ventil je zálohován ventilem v paralelní větvi. V případě poruchy se provede přepnutí přepínačem tahu. Celý obvod je doplněn ukazovacími a registračními přístroji. Vzájemné propojení je patrné z přílohy 1. Jedná se o přístroje ZPA s výjimkou registračního přístroje PV 4.3P a regulátoru PR 3.21 PCL, které jsou sovětské výroby. Regulace je tedy jednosignálová. Funguje dobře jen při ustáleném chodu kotle nebo při pomalých změnách výkonu. V provozu se však vyskytují velké a rychlé změny. Při těchto režimech se nelze na automatiku plně spolehnout a trvalá kontrola stavu hladiny zvyšuje nároky na obsluhu.

## 5. Návrh regulace napájení

### 5.1. Identifikace soustavy

Abychom mohli navrhnout regulátor k danému systému, musíme nejprve alespoň přibližně znát jeho chování. Toto chování plně popisuje na př. přechodová charakteristika.

Identifikací rozumíme zjišťování vlastností systému a jejich exaktní popis přechodovou, případně impulzní charakteristikou, kořeny diferenciální rovnice a pod. Jednotlivá vyjádření jsou úplná a lze mezi nimi nalézt jednoduchý vztah. Existují tři skupiny metod identifikace.

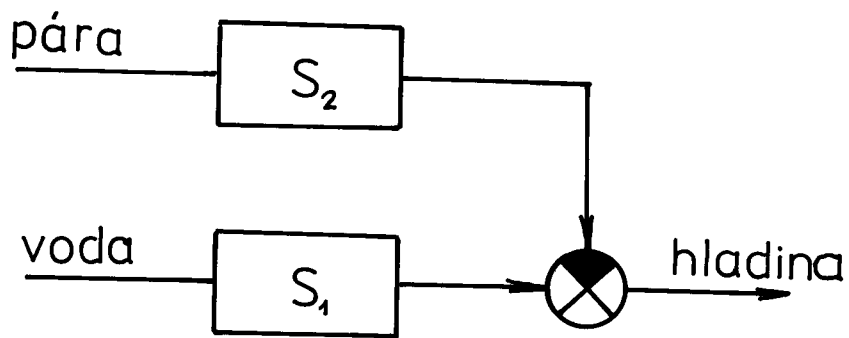
První metodou je určení koeficientů přenosu matematickým rozbořem - tato metoda je pro daný úkol málo vhodná. Další metody jsou deterministické a statistické. Při statistických metodách je proces identifikace pojímán jako náhodný proces. Podmínkou je zde velké množství údajů.

Pro identifikaci týkající se problému zadaného diplomovou prací bylo užito deterministického způsobu a to z důvodu snadného měření. Zařízení nemůže běžet dlouho bez regulace a je tedy problém zaopatření potřebného počtu dat, proto nebylo použito některé ze statistických metod.

Je nutno předeslat, že parní kotel je nelineární soustava. Jeho přechodové charakteristiky se mění se zatížením dost značně, proto je nutno brát naměřené veličiny za správné jen v tom režimu, v kterém byly naměřeny.

Parní buben je možno znázornit dle obr.5.

Obr.5



Je to zřejmo z následujícího rozboru. Změna hladiny je úměrná přítoku vody a odtoku páry dle vztahu

$$k \frac{dh}{dt} = Q_V - Q_P \quad (1)$$

kde :  $\frac{dh}{dt}$  . . . změna hladiny

$Q_V$  . . . přítok vody

$Q_P$  . . . odběr páry

$k$  . . . koeficient závislý na charakteristice bubnu

Převědeme-li vztah do Laplaceovy transformace, získáváme

$$pH/p/ = \alpha Q_V/p/ + \beta Q_P/p/ \quad (2)$$

$$H/p/ = S_1/p/Q_V/p/ + S_2/p/Q_P/p/ \quad (3)$$

Je tedy nutno určit přenos  $S_1/p/$ , což značí odezvu hladiny na změnu napájecí vody a přenos  $S_2/p/$ , což značí odezvu hladiny na změnu odebírané páry.

$$S_1/p/ = \frac{H/p/}{Q_V/p/} \quad (4)$$

$$S_2/p/ = \frac{H/p/}{Q_P/p/} \quad (5)$$

Při měření je proveden skok na jedné veličině a druhá je udržována konstantní. Měření se provádí při vypnuté regulaci. Čísla měření uváděná v tabulkách souhlasí s čísly měření psanými na registračním papíře.

### 5.1.1. Určení přenosu hladina/voda

K určování přenosu  $S_1$  bylo s výhodou využito snadného měření jak stavu hladiny, tak průtoku napájecí vody a možnosti snadné realizace skoku na vstupu do soustavy.

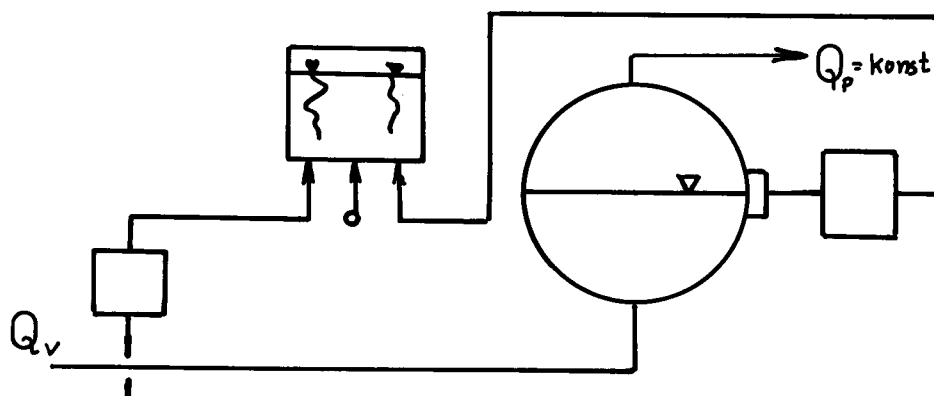
Z uvedeného již důvodu nelinearity soustavy byly určeny přenosy pro tři druhy zatížení kotle:

malý . . . . .	20 t/h
střední. . . . .	50 t/h
velký . . . . .	70 t/h

#### 5.1.1.1. Měření přechodových charakteristik

Bylo použito dvoukřivkového zapisovacího přístroje. Záznam je přiložen v příloze. Na zelené pisátko byl připojen signál od napájecí vody, na červené signál o stavu hladiny. Schéma měření je patrné dle obr.6.

Obr.6

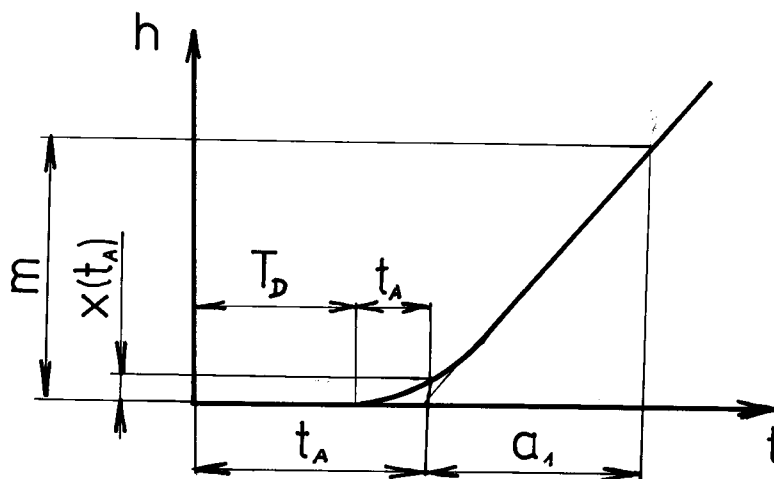


Jednotkový skok byl realizován ruční změnou polohy napájecího ventilu. Jeho velikost je 10% výkonu. Záznamová rychlost je 10 mm/min. U skoku je vždy zapsán odběr páry v t/h.

### 5.1.1.2. Vyhodnocení naměřených

#### charakteristik

Jde o přechodové charakteristiky astatické vyššího řádu s do-  
pravním zpožděním. Při vyhodnocování byly odměřeny údaje dle  
Obr. 7.



Odměřené hodnoty jsou sestaveny v následující tabulce:

Tab.1

Měř	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t/h$	20	25	30	32	48	50	50	50	50	70	70	70
$t_A$ [mm]	21	19	13,5	12,3	10	8,3	13	11	7,2	6		8
$m$ [mm]	12	8,5	12	13,2	17	18	20,8	26	16,8	21		16,2
$a_1$ [mm]	16	12	12,5	36,3	17	25	23	32	19	24		18,8
$x(t_A)$ [mm]	1,1	1	1,1	1	2	1,5	1	1	1,1	1		1,5

V měření č.11 nebyla dodržena podmínka ustáleného stavu před skokem a nebude proto uvažováno. Aproximace soustavou vyššího řádu je provedena dle lit [5]. Dle této literatury platí vztahy:

$$F/p/ = \frac{k}{p/T_{p+1}/n} \quad (6)$$

$$k = \frac{m}{a_1} \quad (7)$$

$$t_A = nT \quad (8)$$

$$x/t_A/ = kt_A e^{-n} \frac{n^{n-1}}{(n-1)!} \quad (9)$$

$$\text{Poměr } A = \frac{x/t_A/}{K t_A} \quad (10)$$

je funkcí pouze řádu  $n$  a lze ho použít k určení řádu aproximační soustavy dle tabulky

Tab.2

n	1	2	3	4	5	6
A	0,368	0,271	0,224	0,195	0,175	0,161

Pro jednotlivá měření bylo tedy určeno:

Tab.3

Mef	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0,07	0,074	0,085	0,154	0,2	0,25	0,085	0,11	0,173	0,19		0,22
k	0,75	0,708	0,96	0,529	1	0,72	0,904	0,813	0,884	0,875		0,861
n	33	28	20	6	4	3			5	4		3
$T_{cm}$	0,064	0,068	0,068	0,205	0,2	0,277			0,144	0,15		0,26

Měření 7 a 8 dává velmi vychýlené hodnoty, proto nebylo dále uvažováno. Pro malý odběr dosahuje aproximační přechodová charakteristika extrémně vysokých řádů a tab. 2 byla proto dle vzorců (9) a (10) z kterých plyne:

$$A = e^{-n} \frac{n^{n-1}}{n-1!} \quad \text{dopočítána.}$$

Tab. 4

<i>n</i>	20	25	28	30	33
<i>A</i>	0,0888	0,0795	0,075	0,0726	0,0693

Červeně psané hodnoty jsou v tab. 3 doplněny pomocí tab. 4. Výsledné aproximační přenosy jsou určeny zprůměrováním jednotlivých měření a jejich koeficienty jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5

VÝKON [t/h]	<i>n</i>	<i>T</i> [min]	POUŽITÁ MĚŘENÍ
MALÝ 20	27	0,0663	1,2,3
VELKÝ 70	3	0,208	10,12
STŘEDNÍ 50	4	0,207	5,6,9

$$k = 0,868$$

Jednotlivé přechodové charakteristiky jsou nakresleny v příloze č. 2. Aproximace ve vztahu 10 je prakticky možná jen u velkého a středního zatížení. U malého zatížení je velké dopravní zpoždění a v důsledku toho dosahuje řád aproximačního přenosu velmi vysokých hodnot, nepraktických ani pro potřeby modelování, ani pro potřeby výpočtu seřízení regulátoru. Proto tento přenos byl aproximován soustavou typu:

$$F/p/ = \frac{e^{-T_D p} k}{p/Tp+1/n} \quad (11)$$

kde dopravní zpoždění  $T_D$  je voleno dle obr. 7, tedy až do bodu, ve kterém první derivace přechodové funkce přestává být nulová. Dále je přenos aproximován jako v předchozím případě.

$$T_D = 1,18 \text{ min.}$$

$$x/t_A/ = 1$$

$$t_A = 5$$

$$a_1 = 50$$

$$n = 36$$

Po dosazení do vztahů (7),(8),(10) a pomocí tab. 2 byly určeny konstanty přenosu:

$$k = 0,72$$

$$T = 0,25 \text{ min}$$

$$n = 2$$

### 5.1.2. Určení přenosu hladina/pára

Tento přenos podobně jako předcházející byl získán pomocí naměřených přechodových charakteristik. Přenosy byly opět měřeny v různých režimech výkonu. Tyto druhy zatížení jsou uvedeny v předcházející kapitole.

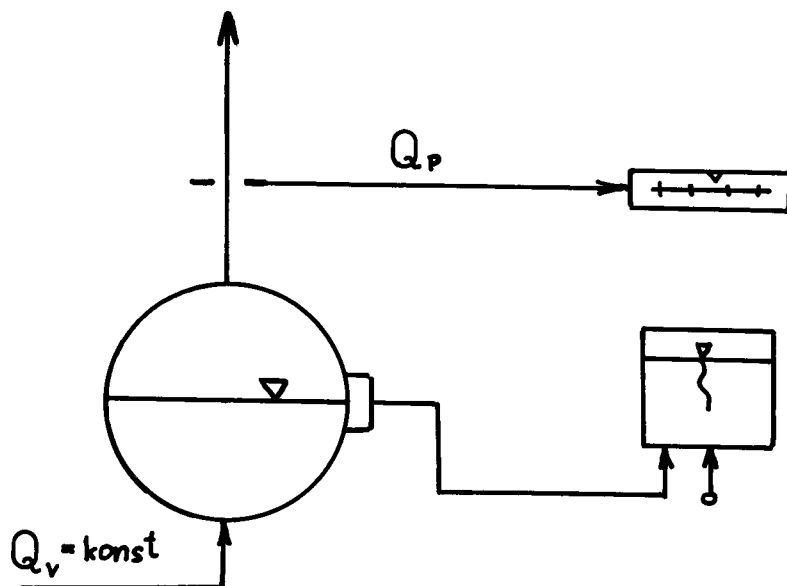
#### 5.1.2.1. Měření přechodových charakteristik

U tohoto měření nebyl k dispozici dvoukřivkový zapsovací přístroj jako u předešlého měření. Byl tedy použit jednokřivkový. Skoková změna byla kontrolována na měřících přístrojích ve velině a okamžik provedení skoku byl vždy v záznamu označen.

Schéma měření je na obr. č. 8.



Obr. 8

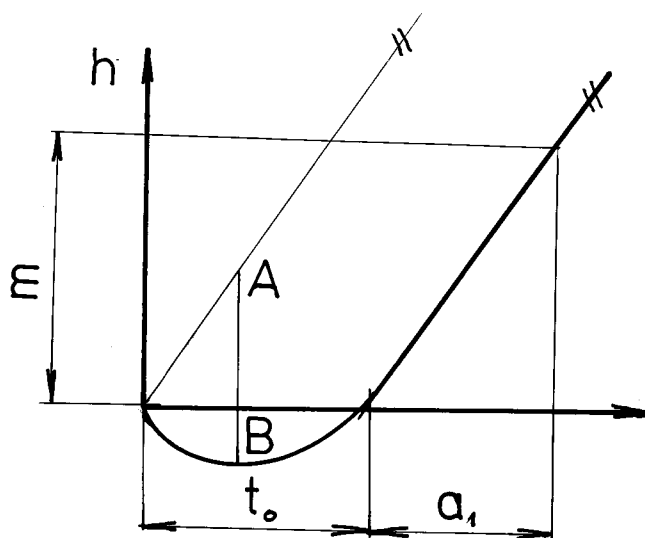


U tohoto měření není přímo možnost realizace skoku na odběru páry, jelikož tento závisí na požadavcích odběratelů. Skok byl tedy realizován změnou množství paliva na hořácích tak, že se projevil poklesem / vzrůstem / množství páry o 10 t/h. Tímto způsobem je měření možno provést z důvodů malého množství akumulovaného tepla ve vlastním kotli. Jak již bylo uvedeno, jedná se o kotel vytápěný mazutem, který nemá vzdívku, jež by teplo akumulovala. Změna výkonu na hořácích se projeví na množství páry tak malým zpožděním, že je lze proti časovým konstantám soustavy zanedbat. Tento způsob provedení skoku navíc činí měření objektivnějším. Když totiž při skutečném provozu na př. poklesne odběr páry, je automatickou okamžitě zmenšen přítok paliva na hořáky. Tyto dva vlivy působí tedy na změnu hladiny současně. Z tohoto důvodu by bylo nepřesností snažit se o skok na odběru páry <sup>při</sup> konstantním výkonu hořáků.

### 5.1.2.2. Vyhodnocení naměřených charakteristik

Ze záznamů je patrné, že se jedná o astatickou soustavu s ne-  
 minimální fází. Ze záznamů byly odměřeny údaje dle obr. 9 .

Obr. 9



Odměřené hodnoty jsou sestaveny v tab. 6.

Tab. 6

Měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t/h$	50	66	60	50	50	50	74	30	70
$m$ [mm]	10,5	11,8		23	12,5	21	26	21	18,5
$a_1$ [mm]	10	7,3		20	11	20	23	20	15
$AB$ [mm]	13	31,5		26	18,5	24	18	15	23
$t_0$ [mm]	17	25		26	25	28	24	32	24

Pozn.: U měření č. 8 nebyla dodržena podmínka jednotkového skoku. Při tomto malém výkonu se tento požadavek obtížně splňuje. Proto byl proveden skok o 5 t/h a hodnoty  $m$  a  $AB$  byly vynásobeny dvěma.

Měření č. 3 se velmi liší od ostatních a je tedy zřejmě zatíženo velkou chybou. Z tohoto důvodu nebylo uvažováno.

Aproximace přechodové charakteristiky byla opět provedena dle lit.[5].

Aproximační přenos je:

$$F/p/ = \frac{k/1-ap/}{p/Tp+1/} \quad (12)$$

Že se jedná o přenos soustavy s neminimální fází je zřejmo z toho, že čitatel má kořen v pravé polorovině komplexní roviny.

Ke stanovení koeficientu přenosu bylo užito následujících vztahů:

$$a = \frac{AB}{k} \quad (13)$$

$$T = t_0 - a \quad (14)$$

$$k = \frac{m}{a} \quad (15)$$

Vypočítané hodnoty jsou v tab.7.

Tab.7

$M\bar{\sigma}F$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k$	1,05	1,62		1,15	1,14	1,05	1,13	1,05	1,23
$a$	12,4	19,4		22,6	16,2	22,8	15,9	28,6	18,7
$T[\text{min}]$	4,6	5,6		3,4	8,8	5,2	8,1	3,4	5,3

Z naměřených charakteristik je patrné, že se tyto se změnou výkonu kotle téměř nemění. Proto je pro tuto soustavu zvolena jedna aproximace pro celý rozsah výkonu. Její konstanty jsou určeny jako aritmetický průměr všech hodnot.

$$a = 19,6$$

$$T = 5,55 \text{ min.}$$

$$k = 1,18$$

### 5.1.3. Shrnutí výsledků identifikace

Při shrnutí výsledků je nutno se zmínit o tom, proč vyšlo zesílení soustav /k/ odlišné. Průtok páry je měřen pomocí clonky. Je zde vyhodnocena tlaková diference. Tento způsob měření však dává dobré výsledky jen při takovém provozním tlaku, na který byla clonka počítána. Během měření však tento tlak kolísal. Měřicí přístroje tedy ukazovaly jiný průtok páry, než ve skutečnosti byl. Provedením skoku dle těchto přístrojů nebyla tedy ve skutečnosti změna odběru páry přesně 10 t/h. Z toho plyne důvod, proč se ustálený stav obou soustav nerovná, jak by tomu mělo být z logických důvodů.

Pozn.: Ustáleným stavem se zde myslí dosažení rovnoměrného

$$\text{vzrůstu hladiny, tedy } \frac{d^i h}{dt^i} = 0 \text{ pro } i \geq 2$$

Jelikož ostatní koeficienty přenosu na k nezáleží, je i pro přenos hladina/pára bráno zesílení soustavy vyhodnocené u přenosu hladina/voda, tedy  $k = 0,868$ .

Dále je nutno převést vyhodnocené konstanty na základní jednotky soustavy SI. Časové konstanty jsou v předchozích tabulkách uváděny v minutách. Převod je tedy triviální. Zesílení k je poměr přírůstku hladiny ke přírůstku času v ustáleném stavu. Tyto hodnoty byly odměřeny ze záznamu v milimetrech. Měřítka pro čas je 10min = 60 s

Měřítka pro hladinu je 24mm = 0,1m

Zesílení je tedy přepočteno

$$k_{SI} = \frac{k}{24 \cdot 60}$$

Zesílení v m/s je pak

$$k_{SI} = 6,03 \cdot 10^{-4}$$

V dalším jsou přehledně uvedeny přenosy jednotlivých soustav.

Soustava hladina/voda:

$$S_1 = \frac{ke^{-T_D p}}{p/T_1 p + 1/n}$$

Pro jednotlivé výkony jsou konstanty přenosu uvedeny v následující tabulce.

Tab.8

VÝKON [t/h]	n	T <sub>1</sub> [s]	T <sub>D</sub> [s]
20	2	15	70,8
50	4	12,42	0
70	3	12,48	0

Soustava hladina/pára:

$$S_2 = \frac{k / 1 - ap/}{p / T_2 + 1/}$$

$$a = 19,6$$

$$T_2 = 333 \text{ s}$$

## 5.2. Regulace napájení

Máme-li dodržet podmínku stálé úrovně hladiny, je nutno zachovat rovnost množství přiváděné vody a odváděné páry. Teoreticky by bylo možné udržet hladinu na stálé výši jen udržováním rovnosti těchto dvou množství. Ve skutečnosti je však nutno přihlédnout k dalším vlivům, jako je na příklad odluh / ten se u daného zařízení pohybuje v rozmezí 1 + 2 t/h/. Dále se do regulace negativně promítají nepřesnosti měření průtoku, hlavně průtoku páry. Proto je nutno do regulátoru zavádět jako korekční veličinu signál o skutečné výšce hladiny.

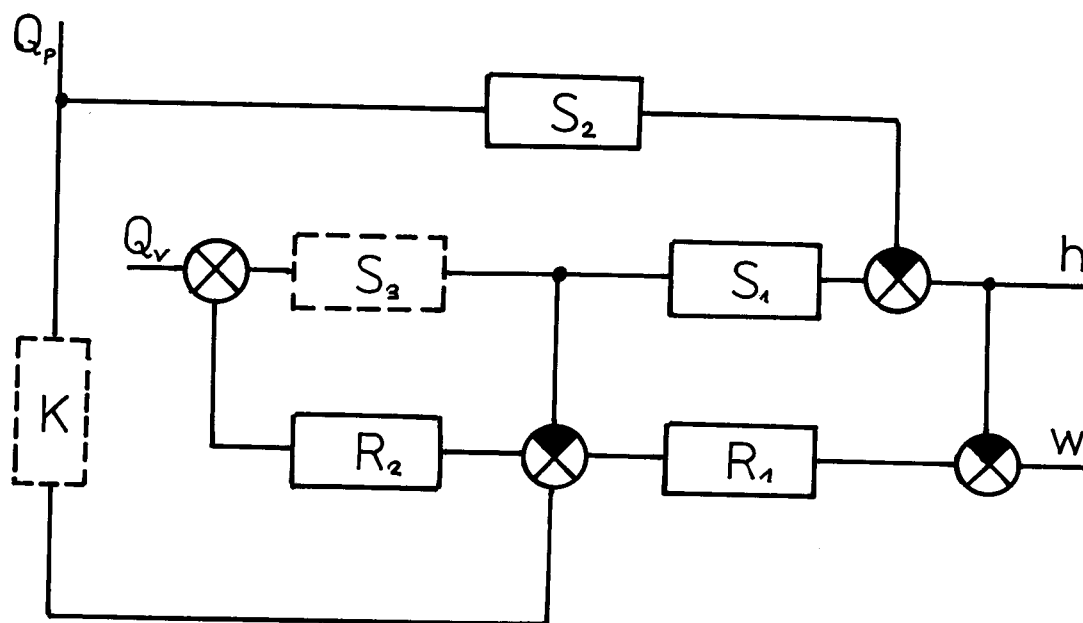
### 5.2.1. Popis navrženého schématu regulace

Navržené schéma je pojato jako kaskádní. Sestává se ze dvou regulačních smyček - malé a velké. Malá smyčka udržuje rovnost signálů od průtoku páry a od průtoku napájecí vody. Tato smyčka je velmi rychlá a zajišťuje okamžité přizpůsobení průtoku vody změněnému průtoku páry. Velká smyčka odebírá řídicí signál od stavu hladiny a tuto udržuje na stálé výši. Typy regulátorů a jejich seřízení je uvedeno v další kapitole.

Regulační obvod je sestaven z pneumatického stavebnicového systému. Pro pneumatickou regulaci mluví její relativně nízká cena, provozní bezpečnost a spolehlivost. Rovněž v této regulaci potřebný akční člen - regulační ventil - je velice výhodný z důvodu velké přestavné síly a velké rychlosti. V neposlední řadě mluví pro pneumatickou regulaci samozřejmě okolnost, že celá regulace kotle je řešena jako pneumatická a ani regulace napájení by tedy neměla činit výjimku.

Je zde však použito elektrického korektoru měření množství páry a je tedy nutný elektro-pneumatický převodník. Tato zvláštnost je podmíněna nutností přesného měření množství páry. Tento požadavek nelze zajistit jenom pomocí běžně dostupných pneumatických přístrojů.

Obr.10 Blokové schéma regulace napájení



Regulátor  $R_1$  udržuje stálou úroveň hladiny,  $R_2$  rovnost signálů voda/pára. Člen  $K$  je v obvodu navržen pro případnou invariantnost soustavy na poruchu na průtoku páry. Soustava  $S_3$  určuje odezvu změny průtoku vody na změně zdvihu regulačního ventilu. V regulaci je použit regulační ventil s lineární charakteristikou a navíc se jedná o průtok vody, tedy nestlačitelného prostředí, proto je v dalších výpočtech přenos soustavy  $S_2$  roven 1. Průtok vody musí být v celém potrubí vždy stejný. Toto regulační schéma je dále doplněno o ukazovací a zapisovací přístroje, dále je zde ponechána možnost ručního ovládní. Celkové schéma regulace napájení je popsáno v kapitole 7.

### 5.2.2. Volba typu regulátorů - seřízení

Pro výpočet seřízení regulátorů bylo použito kritéria optimálního modulu regulačního pochodu uvedeného v lit. [7]. Kriterium optimálního modulu nezahrnuje podmínku stability, tuto je tedy nutno kontrolovat dodatečně. Napřed bude seřizena menší, pak větší smyčka.

#### 5.2.2.1. Odvození vztahů pro výpočet regulátoru

Tato kapitola se zabývá odvozením rovnic potřebných pro seřízení velké smyčky. Výpočet seřízení malé smyčky vzhledem ke své jednoduchosti je celý uveden v příslušné kapitole. Dle uvedené již literatury je nutno splnit podmínku:

$$\left[ \frac{\sum_{\alpha=0}^k (-1)^\alpha \binom{k}{\alpha} M(p)^{k-\alpha} M(p)^\alpha}{\sum_{\alpha=0}^k (-1)^\alpha \binom{k}{\alpha} N(p)^{k-\alpha} N(p)^\alpha} \right]_{p=0} = \frac{a_0^2}{b_0^2} \quad (16)$$

$$Y/p/ = \frac{M/p/}{N/p/} \quad (17)$$

Kde  $Y/p/$  je Laplaceův obraz výstupní veličiny z regulačního obvodu.  $M/p/$  je polynom typu:

$$b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0 \quad (18)$$

$N/p/$  je polynom typu:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 \quad (19)$$

$$n > m$$

$k = 2r$  kde  $r$  je počet volitelných konstant regulátoru.

Je-li třeba určit  $r$  konstant regulátoru, sestavíme pomocí vztahu (16)  $r$  podmínkových rovnic pro  $k = 2, 4, \dots, 2r$



Zároveň musí být splněn vztah:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y/t/ = \lim_{p \rightarrow 0} pY/p/ = 0 \quad (20)$$

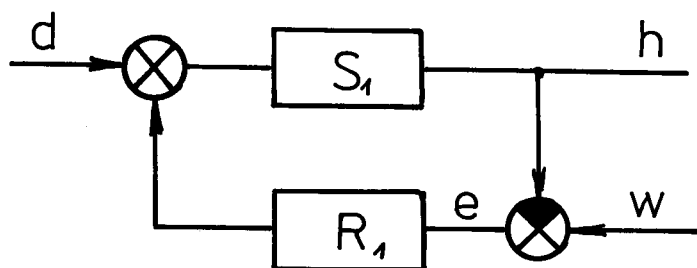
Ve výpočtech seřízení regulátoru v této práci byl za vstupní signál brán jednotkový impulz na regulační odchylce. Protože jeho obraz je 1, je možno psát:

$$Y/p/ = F_{e_1/h} /p/ \quad (21)$$

a pro výpočet seřízení použít místo obrazu výstupní veličiny přímo přenos  $F_{e_1/h} /p/$ .

V našem případě je nutno seříditi regulační obvod dle obr.11.

Obr.11



kde  $S_1$  je typu  $S_1/p/ = \frac{ke^{-T_D p}}{p/T_p + 1/n}$  (22)

a  $R_1 = r_0 + r_1 p$  (23)

Přenos hladina/regulační odchylka je tedy:

$$F_{e_1/h} = \frac{R_1 S_1}{1 + R_1 S_1} \quad (24)$$

Po dosazení vztahů (22) a (23) do vztahu (24) a substitucí

$$\begin{aligned} \bar{r}_0 &= k r_0 \\ \bar{r}_1 &= k r_1 \end{aligned} \quad (25)$$

dostáváme pro výsledný přenos :

$$F_{e_1/h} = \frac{\bar{r}_1 p + \bar{r}_0}{p/T_p + 1/n e^{T_D p} + \bar{r}_1 p + \bar{r}_0} \quad (26)$$

Hodnoty  $n, T, T_D$  pro jednotlivé výkony kotle jsou uvedeny v kapitole 5.1.3., v tab.8.

Provedeme-li derivace potřebné pro dosazení do vztahu (16) dostáváme pro  $p = 0$

$$\begin{aligned}
 M^0/p/ &= \bar{r}_0 \\
 M^1/p/ &= \bar{r}_1 \\
 M^2/p/ &= \dots = M^4/p/ = 0 \\
 N^0/p/ &= \bar{r}_0 \\
 N^1/p/ &= 1 + \bar{r}_1 \\
 N^2/p/ &= 2nT \\
 N^3/p/ &= 3n/n-1/T^2 \\
 N^4/p/ &= 4n/n-1/ /n-2/T^3
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

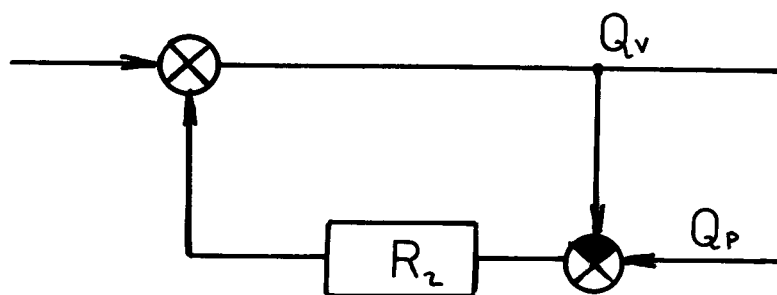
Vztahy (27) platí pro výkony 50 a 70 t/h. Pro výkon 20 t/h je nutno změnit vztahy pro  $N^2/p/, N^3/p/$  a  $N^4/p/$  následovně:

$$\begin{aligned}
 N^2/p/ &= 4T + 2T_D = A \\
 N^3/p/ &= 6T^2 + 12TT_D + 3T_D^2 = B \\
 N^4/p/ &= 24T^2T_D + 24T_D^2T + 4T_D^3 = C
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

#### 5.2.2.2. Seřízení regulátoru $R_2$

Tento regulátor má zajišťovat stálou rovnost při -  
váděné vody a odváděné páry. Regulační odchylka  $e = Q_P - Q_V$  je  
přímo množství, o které musí regulátor  $R_2$  do soustavy  $S_1$  dodat  
více, než bylo doposud, aby byla výše uvedená podmínka zachována.  
Přechodový děj musí proběhnout v co nejkratší době.

Obr.12 Malá regulační smyčka



Pro tuto smyčku byl navržen regulátor typu I.V idealizovaném případě byly uvažovány přenosy všech částí smyčky jednotkové.

Přenos smyčky je: 
$$F_{e_2/Q_V} = \frac{R_2}{1 + R_2} \quad (29)$$

po dosazení  $R_2 = \frac{1}{T_I p}$  dostáváme vztah:

$$F_{e_2/Q_V} = \frac{1}{T_I p + 1} \quad (30)$$

Laplaceův obraz odezvy výstupní veličiny na jednotkový skok je:

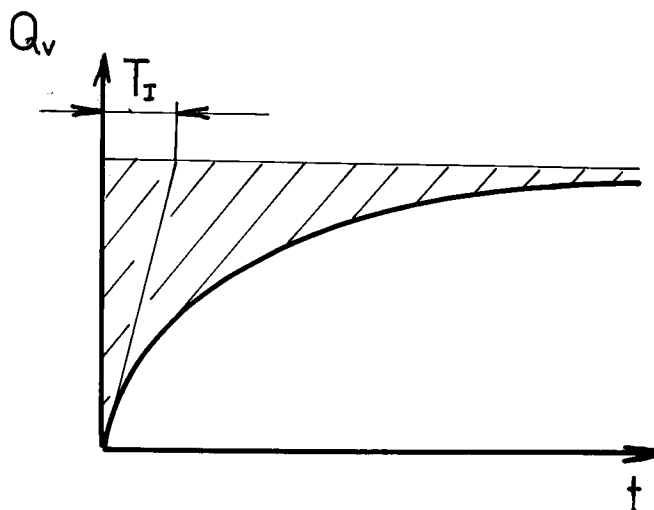
$$Q_V/p/ = \frac{1}{T_I p + 1} \cdot \frac{1}{p} \quad (31)$$

Odezva malé smyčky na jednotkový skok má tvar

$$f/t/ = 1 - e^{-\frac{t}{T_I}} \quad (32)$$

Je naznačen na obr.

Obr.13



Regulační pochod bude aperiodický. Regulace bude tím kvalitnější, čím bude integrační konstanta  $T_I$  menší.

V praxi však obecně nemusí být všechny přenosy v malé smyčce jednotkové. Určité malé odchylky od tohoto zidealizovaného pojetí bude mít zejména spojovací vedení. Zpoždění regulačního ventilu, rovněž vodního potrubí je zanedbatelné. Regulátor není v praxi úplně ideální. Všechny tyto vlivy byly shrnuty tím způsobem, že všechny přenosy byly brány jako jednotkové a regulátor byl uvažován se zpožděním prvního řádu. Jeho přenos je tedy:

$$R_2/p/ = \frac{1}{T_I p / T p + 1/}$$

Po dosazení do vztahu (29) a po úpravě dostáváme:

$$F_{e_2/Q_V} = \frac{1}{T_I T p^2 + T_I p + 1} \quad (33)$$

Podle postupu uvedeného v kapitole 5.2.2.1. dostáváme:

$$\begin{aligned} M^0/p/ &= 1 \\ M^1/p/ &= M^2/p/ = 0 \\ N^0/p/ &= 1 \\ N^1/p/ &= T_I \\ N^2/p/ &= 2T_I T \end{aligned}$$

Po dosazení těchto vztahů do rovnice (16) získáváme pro  $k = 2r = 2$  podmínkovou rovnici:

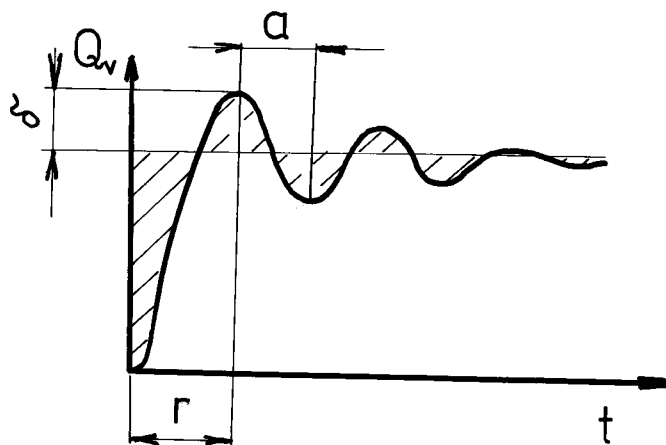
$$2T_I T - T_I^2 = 0 \quad (34)$$

ze které plyne

$$T_I = 2T \quad (35)$$

Integrační konstanta je tedy i v tomto případě velmi malá. Odezva malé smyčky na jednotkový skok má v tomto případě tvar

dle obr.14



Dle lit [8] je 
$$\delta = e^{-\frac{T\delta}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (36)$$

$$a = \frac{1}{T} \sqrt{1-\xi^2} \quad (37)$$

$$r = T \frac{\pi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (38)$$

kde  $\xi$  se získá převedením charakteristického polynomu rovnice (33) do tvaru

$$a^2 p^2 + 2\xi a p + 1 \quad (39)$$

tedy vychází

$$\xi = \frac{T_I}{2\sqrt{T_I T}} \quad (40)$$

po dosazení do vztahu (35) vychází  $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$

Po dosazení za  $\xi$  do vztahů (36), (37), (38) dostáváme:

$$\delta = 0,043$$

$$a = \frac{\sqrt{2}}{2T}$$

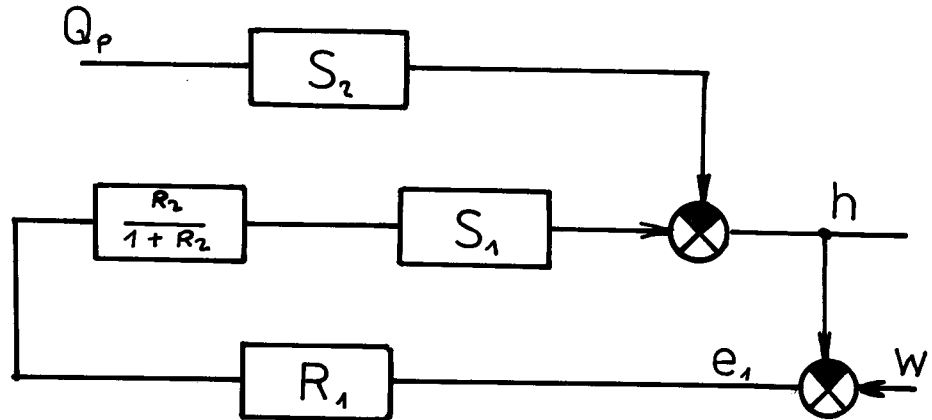
$$r = 5,8T$$

Maximální překývnutí se tedy rovná 4,3%, což je zanedbatelně málo a na výstupu zesoustavy  $S_1$  se vůbec neprojeví. Lineární regulační plocha vyšrafovaná na obr.13a obr.14 je u ideálního i neideálního regulátoru velmi malá. Závěrem lze říci, že použití regulátoru typu I u malé smyčky je plně oprávněné.

### 5.2.2.3. Seřízení regulátoru $R_1$

Obr.10 na str.29 je možno upravit následovně:

Obr.15



Časová konstanta regulátoru  $R_2$  bude proti soustavě  $S_1$  velice malá a ve výpočtech nebude přenos  $\frac{R_2}{1+R_2}$  dále uvažován. Toto zjednodušení je možno provést, neboť ve skutečném provozu bude stejně nutno konstanty regulátorů přesně doladit a vypočtené hodnoty seřízení je nutno brát jako první přiblížení ke skutečným optimálním hodnotám.

S přihlédnutím k tomu, že soustavy  $S_1$  i  $S_2$  jsou astatické a tudíž již obsahují integrační složku, byl volen regulátor typu PD s přenosem:

$$R_1/p/ = r_0 + r_1 p \quad (41)$$

Dosazením vztahů (27) a (28) do rovnice (16) dostáváme pro jednotlivá zatížení kotle následující podmínkové rovnice:

pro výkon 20 t/h:

$$\frac{-\bar{r}_1}{A\bar{r}_0 - \sqrt{1 + \bar{r}_1^2}} = 1 \quad (42)$$

$$\bar{r}_0 C - 4/1 + \bar{r}_1 / B + 3A^2 = 0$$

pro výkon 50 t/h:

$$\frac{-\bar{r}_1^2}{8T\bar{r}_0 - \sqrt{1+\bar{r}_1}/^2} = 1 \quad (44)$$

$$96T^3\bar{r}_0 - 144T^2/\sqrt{1+\bar{r}_1}/ + 192T^2 = 0$$

pro výkon 70 t/h:

$$\frac{-\bar{r}_1^2}{6T\bar{r}_0 - \sqrt{1+\bar{r}_1}/^2} = 1 \quad (45)$$

$$24T^3\bar{r}_0 - 72T^2/\sqrt{1+\bar{r}_1}/ + 108T^2 = 0$$

Řešením těchto soustav a přihládnutím k substituci (25) dostáváme pro jednotlivé výkony kotle konstanty regulátoru dle tab.9

VÝKON [t/h]	$r_0$	$r_1$
20	13	481
50	33	829
70	50	1658

Upravíme-li vztah (41) do tvaru

$$R_2 = P / \sqrt{1+T_D p} \quad (46)$$

dostáváme po dosazení skutečných hodnot  $T, T_D, k, n$  uvedených v kapitole 5.1.3. číselné výsledky

Tab.10

VÝKON [t/h]	P	$\delta$ [%]	$T_D$ [s]
20	13	7,7	37
50	33	3	25
70	50	2	33

### 5.2.2.4. Kontrola stability

Stabilita obvodu je kontrolována pomocí Hurwitzova kritéria. Soustava je stabilní, splňuje-li tyto podmínky:

1/všechny koeficienty charakteristického polynomu

musí mít stejné znaménko a nesmí být nulové

2/všechny hlavní determinanty  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$  sestavené

z koeficientů charakteristického polynomu mu-

sí být kladné

Hurwitzův determinant pro charakteristickou rovnicí tvaru

$$N/p/ = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 \quad (47)$$

má tvar

$$\Delta_n = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_4 & a_2 & a_0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Dosadíme-li spočtené konstanty regulátorů a příslušné  $n$ , a  $T$  do rovnice (26), dostáváme po roznásobení:

pro 50 t/h

$$N/p/ = 23\,800p^5 + 7\,660p^4 + 925p^3 + 50p^2 + 1,5p + 0,02 \quad (49)$$

pro 70 t/h

$$N/p/ = 1944p^4 + 467p^3 + 37,5p^2 + 2p + 0,03 \quad (50)$$

Determinanty byly počítány pomocí kalkulátoru TI-58 a všechny vyšly kladné. Soustava je tedy stabilní.



pro 20 t/h

Vzhledem k tomu, že v tomto případě obsahuje obvod dopravní zpoždění, byla stabilita kontrolována pomocí Michajlova kritéria. Po dosazení za  $T_D, T, e, \bar{r}_1$  a  $\bar{r}_0$  do vztahu (26), získáme charakteristickou rovnici tvaru:

$$p/15p+1/2 + /0,29p+0,00784/e^{-77,8p} \quad (51)$$

Dosadíme-li do rovnice (51) za  $p=i\omega$ , dostáváme po úpravě

$$N/i\omega / = -30\omega^2 - i/225\omega^3 - \omega / + /0,00784 + i\omega 0,29 / e^{-70,8i\omega} \quad (52)$$

Dosazením za  $\omega$  hodnoty z intervalu  $\langle 0; \infty \rangle$  získáváme určité hodnoty vektoru  $N/i\omega /$ . Soustava je stabilní, jsou-li splněny následující podmínky:

- 1/  $N/i\omega /$  pro  $\omega = 0$  začíná na reálné ose
- 2/ S  $\omega \rightarrow \infty$  musí  $N/i\omega /$  projít v kladném smyslu tolik kvadrantů, kolikátého je řádu. Kladný směr je směr proti pohybu hodinových ručiček.

Po dosazení hodnot  $\omega$  v určitých bodech je vidět, že průběh vektoru  $N/i\omega /$  splňuje uvedené podmínky a soustava je tedy stabilní.

### 5.3. Měření průtoku páry

Pro navržený způsob regulace napájení je nutno přesně měřit hmotnostní průtok páry. Na daném zařízení se tento průtok měří pomocí kruhové clonky, zabudované do parovodu. Jako přístroj, který vyhodnocuje snímanou tlakovou diferenci je použit průtokoměr ZEPADIF. Tento vysílá informaci o průtoku dle vztahu:  $Q = k\sqrt{\gamma\Delta p}$

Tento vztah platí však přesně pouze pro kapaliny. U plynů a par je třeba tento vztah upravit na tvar:

$$Q = k/T, p, R_e / \sqrt{\gamma\Delta p}$$

kde  $T$  . . . teplota

$p$  . . . tlak

$R_e$  . . . Reynoldsovo číslo

Měříme-li tedy pomocí přístroje ZEPADIF průtok páry, je možno se na výsledek měření spolehnout jen v určitém pásmu tlaků a teplot, na které byla clonka navržena. Konkrétně v teplárně Liberec jsou tyto jmenovité parametry  $T = 235^\circ\text{C}$  a  $p = 1,3\text{MPa}$ . Teplota je regulována vstřikem kondensátu a její výše je přibližně konstantní. Tlak se však s výkonem velmi mění a někdy klesá až na  $0,6\text{MPa}$ . Tímto je způsobena chyba v měření až 60%, což činí toto měření pro potřeby regulace nepoužitelným.

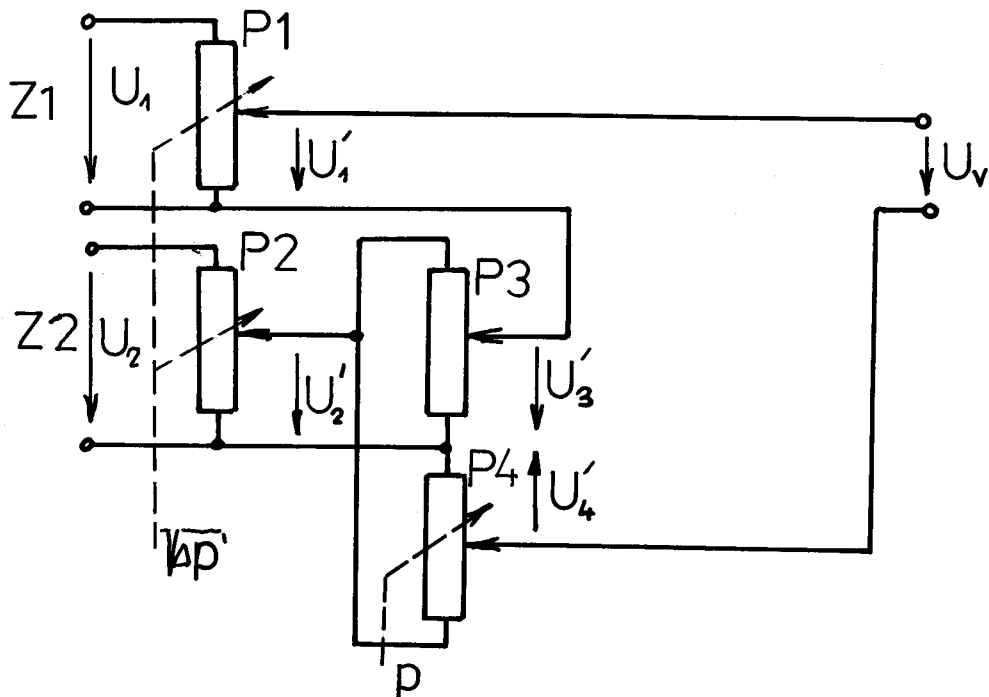
#### 5.3.1. Návrh zlepšení přesnosti měření

Přesnost měření je možno zlepšit použitím měřiče průtoku, který má vestavěnou korekci na změnu tlaku. Tyto přístroje vyrábí firma Hartmann-Braun, ale nejsou bohužel běžně dostupné. Další cesta je návrh korektoru měření taková, která tuto korekci zajistí. Dále popisovaná úprava vychází z práce Pa-

vla Pátka, který se tímto problémem zabýval.

Při tomto způsobu měření je využito klasického způsobu měření tlakové difference. Dále je měřen tlak před clonou, kterážto veličina je brána jako korigující. Diferenční manometr je spojen s dvojitým odporovým vysílačem. Manometr na měření absolutního tlaku je spojen s jednoduchým odporovým vysílačem. Princip je zřejmý z následujícího schématu.

Obr.16



Potenciometry  $P_1, P_2$  jsou napájeny ze stabilizovaných zdrojů. Jsou zapojeny jako vysílače tlakové difference. Potenciometry  $P_3, P_4$  jsou zapojeny jako kompenzační člen. Potenciometr  $P_3$  je nastaven na poloviční hodnotu. Je-li v potrubí jmenovitý tlak, je tak nastaven i  $P_4$ . Při změně tlaku dojde k rozvíšení  $P_4$  a na kompenzačním členu se objeví + nebo - napětí odpovídající chybě měření na daném rozsahu. Výstupní napětí se mění dle vztahu

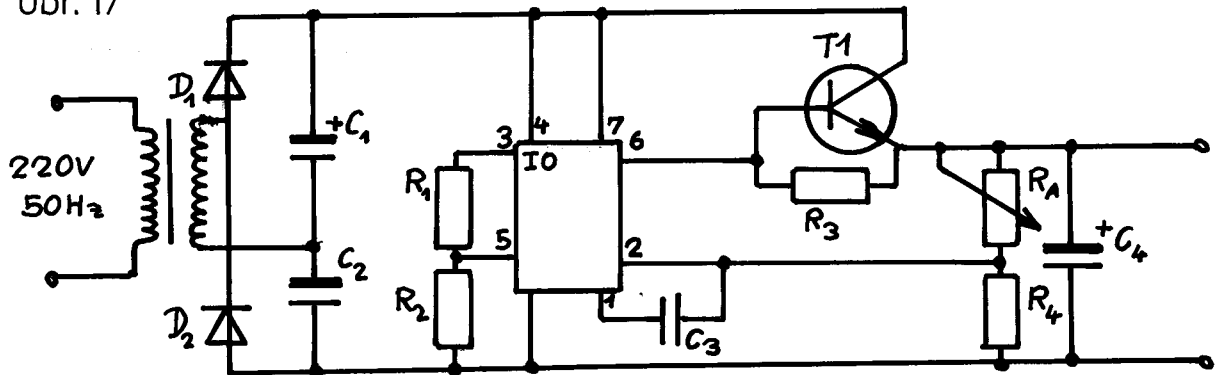
$$U_V = U_1 / 1 - \alpha_1 / + U_2 / 1 - \alpha_2 / \alpha_4 - \alpha_3 /$$

### 5.3.2. Napájecí zdroje

Jsou určeny k napájení potenciometrů  $P_1$  a  $P_2$ . Výstupní napětí je možno regulovat trimrem  $R_1$ .

Schéma zdrojů:

Obr. 17

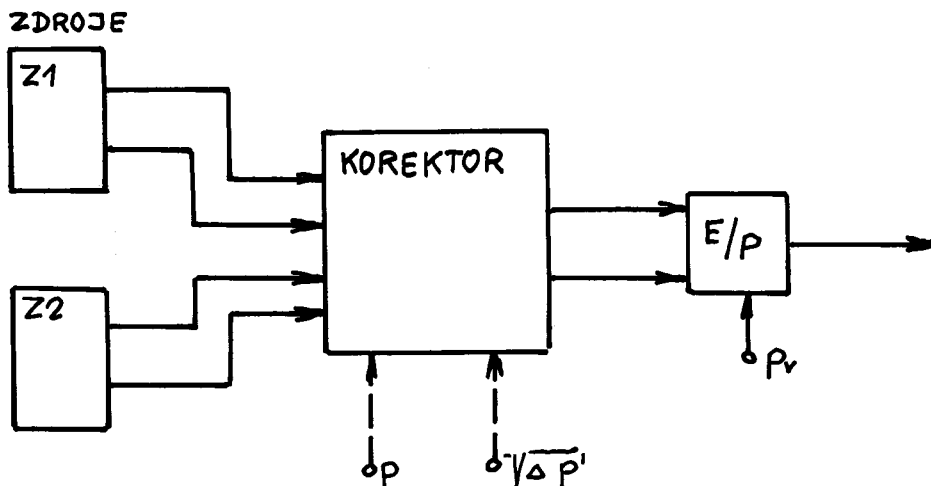


Použité součástky:

IO	... MAA 723H	$R_A$	... 100k
T1	... KU611	$R_1$	... 4k7
$D_1, D_2$	... KY 130/80	$R_2$	... 3k6
$C_3$	... 100	$R_3$	... 220
$C_4$	... 63/35V	$R_4$	... 1k2

### 5.3.3. Celkové schéma měření průtoku páry

Obr. 18



Zdroje a korektor byly popsány v předchozím textu. Údaj  $p$  se odebírá z odmocňovací vačky přístroje ZEPADIF. Signál  $p$  z vysílače tlaku. Jako elektropneumatický převodník je použit výrobek ZPA typové číslo 05511. Jeho vstupní odpor je  $2,5 \text{ k}\Omega$  a převádí proudový signál  $0 + 4 \text{ mA}$  na výstupní tlak  $20 + 100 \text{ kPa}$ . Plný rozsah, který bude  $0 + 100 \text{ t/h}$  musí být stejný, jako rozsah průtoku napájecí vody. Maximální výkon kotle je  $75 \text{ t/h}$ , tomu tedy odpor  $Z_1$  vstupní proud  $3 \text{ mA}$ . Potřebné napětí zdroje  $Z_1$  je tedy dle Ohmova zákona  $7,5 \text{ V}$ , s ohledem na možné malé přetížení kotle volím  $U_{Z_1} = 8 \text{ V}$ . Napětí  $U_{Z_2}$  je nutno nastavit tak, aby korekce co nejlépe plnila svůj účel. Při realizaci korektoru je ho třeba přesně nastavit.

Tento způsob měření je možný na základě měření charakteristik závislosti chyby měření průtoku na tlaku před clonou a na průtoku páry. Chyba byla vyhodnocována na základě přesného zjištění měrného objemu páry v závislosti na tlaku a teplotě. Měření je zatíženo těmito chybami:

- neuvažováním změny teploty
- linearizací charakteristik závislosti chyby
- chybou diferenčního manometru
- chybou manometru

#### 5.4. Problém invariantnosti

Ideální by bylo, kdyby soustava byla invariantní vůči poruše na vstupu páry. Pro zajištění tohoto požadavku je nutné splnit podmínku :

$$F_{Q_P/h} = 0 \quad (53)$$

Dle obr. 10 na str. 29 platí:

$$F_{Q_P/h} = \frac{1}{1+S_1R_1} \cdot \frac{R_2}{1+R_2} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{R_2}{1+R_2} \cdot \frac{S_1-S_2}{1} \quad (54)$$

Splnění podmínky (54) je možno zajistit když:

$$K \frac{R_2}{1+R_2} S_1 - S_2 = 0 \quad (55)$$

Z toho plyne pro korekční člen přenos:

$$K = \frac{S_2 / 1 + R_2 /}{S_1 R_2} \quad (56)$$

Po dosazení přenosů  $S_1$  a  $S_2$  do vztahu (56) však vychází řád čitatele vyšší než řád jmenovatele. Z toho důvodu je realizace korekčního členu nemožná.

## 6. Odzkoušení regulace na modelu.

Regulační obvod byl namodelován a odzkoušen na analogovém počítači MEDA - 42HA. Nebyla odzkoušena regulační smyčka pro zatížení 20 t/h pro nemožnost vyhovující realizace dopravního zpoždění na analogovém počítači. Rovněž bylo nutno zavést určité změny, na které bude upozorněno dále v textu.

Pro modelování bylo zvoleno časové měřítko 10. Proces byl na počítači tedy desetkrát zrychlen. Pro množství vody a množství páry bylo zvoleno měřítko 100 t/h = 1 SJ. Pro hladinu byla zvolena norma  $N_h = 0,25$ . Unifikovaný signál na počítači je tedy využíván ze stejné části jako unifikovaný signál pneumatický ve skutečném provozu. Tento fakt je důležitý z důvodu nutnosti sčítat tyto dva signály a tímto způsobem se nejspíše zajistí váhy odpovídající skutečnosti. Přečhodové charakteristiky jednotlivých soustav, rovněž průběhy regulačních pochodů jsou přiloženy v příloze 3.

Měřítká záznamů jsou:

- pro přečhodové charakteristiky -pro svislou osu 100mV/mm
  - pro časovou osu 5s/cm
- pro regulační pochod
  - pro svislou osu 20mV/mm
  - pro časovou osu 5s/cm

### 6.1. Modelování soustav

Soustavy byly modelovány tím způsobem, že příslušný přenos byl převeden na diferenciální rovnici a podle ní běžným způsobem navrženo programové schéma. Jednotlivá programová schémata jsou přiložena v příloze 3.

### 6.1.1. Modelování soustavy $S_1$

Přenos soustavy je:

$$\frac{Y/p/}{U/p/} = \frac{k e^{-T_D p}}{p/T_p + 1/n} \quad (57)$$

Provedeme-li roznásobení, získáváme pro tuto soustavu po zpětné Laplaceově transformaci diferenciální rovnici typu:

$$a_i (\ddot{y})^i = ku/t - T_D / \quad (58)$$

kde konstanty  $a_i$  jsou závislé na časové konstantě  $T$ . Po dosazení za  $T, T_D, n, k$ , časové transformaci a dosazení  $y = 0,25 \bar{y}$  získáváme strojové rovnice:

pro 70 t/h

$$0,1944y^4 + 0,467y^3 + 0,374y^2 + 0,1y^1 = 2,412 \cdot 10^{-3}u \quad (59)$$

pro 50 t/h

$$0,238y^5 + 0,766y^4 + 0,925y^3 + 0,5y^2 + 0,1y^1 = 2,412 \cdot 10^{-3}u \quad (60)$$

pro 20 t/h

$$0,225y^3 + 0,3y^2 + 0,1y^1 = 2,412 \cdot 10^{-3}u/t - T_D / \quad (61)$$

Rovnice (59) až (61) byly dále upraveny na tvar vhodný pro naprogramování metodou snižování řádu derivece.

pro 70 t/h

$$y^4 = 0,124u - 2,4y^3 - 1,92y^2 - 0,514y^1 \quad (62)$$

pro 50 t/h

$$y^5 = 0,101u - 3,22y^4 - 3,88y^3 - 2,1y^2 - 0,42y \quad (63)$$



pro 20 t/h

$$y^3 = 0,107u/t - T_D/ - 1,33y^2 - 0,44y^1 \quad (64)$$

Dopravní zpoždění lze pro tento případ aproximovat pomocí Padeho rozvoje dle lit. [8]. Přenos členu zajišťujícího dopravní zpoždění je:

$$\frac{Y}{U} = \frac{12 - 6pT_D + p^2T_D^2}{12 + 6pT_D + p^2T_D^2} \quad (65)$$

Z rovnice (65) získáme diferenciální rovnici tvaru:

$$T_D^2 y^2 + 6T_D y^1 + 12y = 12u - 6T_D u^1 + T_D^2 u^2 \quad (66)$$

Úpravou pro naprogramování metodou postupné integrace získáváme:

$$y = \frac{12}{T^2} / \iint u - \iint y / - \frac{6}{T} / \int y + \int u / + u \quad (67)$$

### 6.1.2. Modelování soustavy S<sub>2</sub>

Přenos soustavy je:

$$\frac{Y/p/}{U/p/} = \frac{k/1 - ap/}{p/Tp + 1/} \quad (68)$$

Dosazením konstant přenosu, provedením časové transformace a dosazením  $y = 0,25\bar{y}$  dostáváme:

$$3,33y^2 + 0,1y^1 = 2,412 \cdot 10^{-3}/u - 1,96u^1 \quad (69)$$

Úpravou pro naprogramování metodou postupné integrace získáváme:

$$y = 7,24 \cdot 10^{-3} / \iint u - 1,96 \int u / - 0,03 \int y \quad (70)$$

## 6.2. Regulační obvod na modelu

Před sestavováním modelu regulačního obvodu je nutno programové schéma obou soustav upravit. Jedná se o astatické soustavy a jejich výstup nemůže klesat, nemění-li se znaménko vstupu. Docházelo by tedy k zahlcení integrátorů. Z toho důvodu byla provedena substituce:

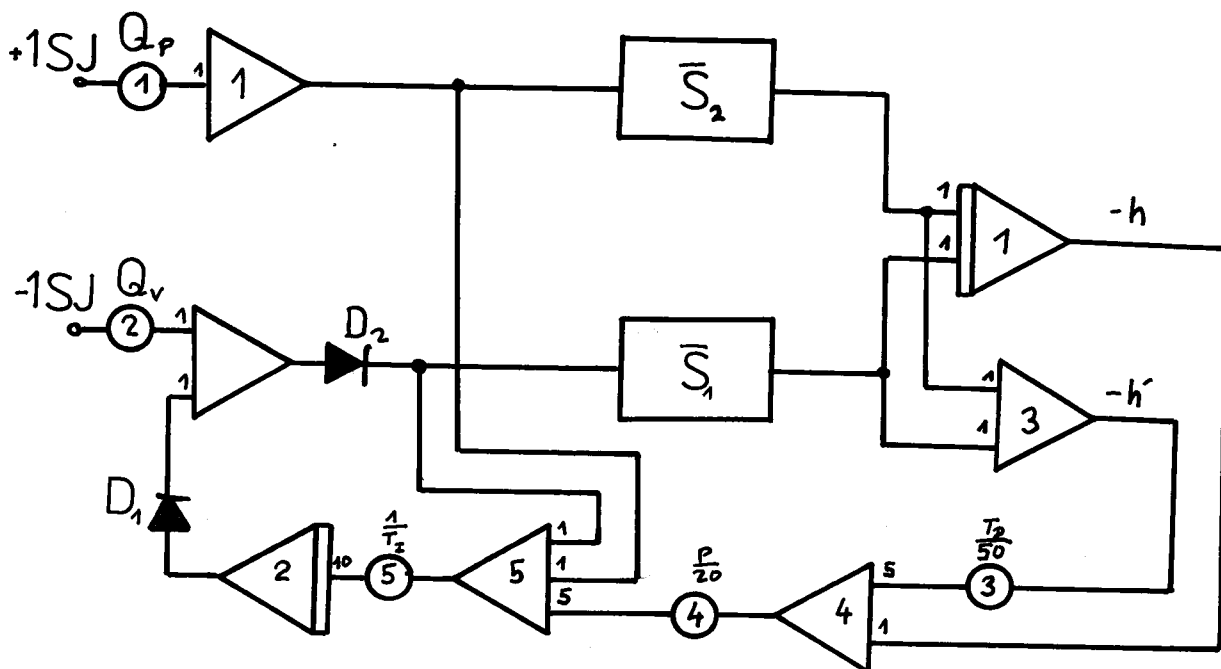
$$\bar{y} = y^1 \quad [71]$$

Tím získáme z astatických soustav  $S_1, S_2$  soustavy statické  $\bar{S}_1, \bar{S}_2$  a integraci provedeme pro rozdíl výstupů těchto soustav. Tento rozdíl již mění znaménko a společný integrátor se již při dobré funkci regulace nezahltí. U soustavy  $S_1$  má tato substituce za následek pouhé odtržení posledního integrátoru. U soustavy  $S_2$  má substituce [71] za následek změnu rovnice [70] na :

$$\bar{y} = 7,24 \cdot 10^{-3} / s u - 1,96 u / - 0,03 \int y \quad [72]$$

Regulační obvod byl sestaven analogicky k obr.10 a je nakreslen na následujícím obrázku.

Obr.19



Soustavu  $\bar{S}_1$  je nutno podle toho, které zatížení bude modelováno upravit invertorem tak, aby měla kladné zesílení.

Struktura regulátorů, rovněž význam jednotlivých potenciometrů je patrný z obr. 19. Invertor 2 modeluje regulační ventil. Při regulaci je na potenciometru 2 nastavena hodnota 0,8, což odpovídá maximálnímu průtoku vody. Dále je výstup z invertoru 2 ovlivněn akční veličinou vycházející z integrátoru 2. Jelikož ve skutečnosti je přítok do soustavy omezený, jsou v obvodu zařazeny diody  $D_1$  a  $D_2$ . Obě propouští jen kladný signál. Diody  $D_1$  zabezpečuje, aby na výstupu z invertoru 2 nebylo větší napětí než 8V. Diody  $D_2$  zajišťuje, aby vstup do soustavy  $\bar{S}_1$  byl vždy kladný.

Při nastavování konstant regulátorů je nutno při -  
hlížet k časové transformaci a normě hladiny následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} \text{regulátor } R_1 : \quad P_{\text{Mod}} &= \frac{P}{4} \\ & T_{\text{DMod}} = \frac{T_D}{10} \\ \text{regulátor } R_2 : \quad T_{\text{IMod}} &= \frac{T_I}{10} \end{aligned} \quad [73]$$

Byly nastaveny nejprve vypočtené hodnoty seřízení. Vlivem velkého proporcionálního zesílení však docházelo k zahlcování operačních zesilovačů, které obvod rozkmitávaly. Je možno předpokládat, že tento jev v praxi nastávat nebude. Model byl tedy odzkoušen se seřízením:

$$\begin{aligned} \text{regulátor } R_1 : \quad P &= 8 \\ & T_D = 45 \text{ s} \end{aligned}$$

regulátor  $R_2$ :

Bylo ověřeno, že čím menší  $T_I$ , tím bude regulační pochod lepší. Byla nastavena integrační konstanta  $T_I = 1s$ .

Nebylo možné odzkoušet regulační obvod pro výkon 20 t/h. Blok dopravního zpoždění funguje uspokojivě jen v případě, je-li na jeho vstupu jednotkový skok. Přivedeme-li na vstup obecně proměnný signál, obvod značně kmitá.

Závěrem lze říci, že navržený způsob regulace udrží hladinu v požadovaných mezích. V praxi stačí, pokud se hladina pohybuje v rozmezí  $\pm 5cm$ . Ze záznamu regulačního pochodu je patrné, že největší výkyv hladiny na modelu je zhruba 1cm.

## 7. Zapojení regulace v praxi

Navržené zapojení plně využívá stávajících ukezo-  
vacích a zapisovacích přístrojů. Celkové schéma zapojení a  
rozpis jednotlivých prvků je uveden v příloze 4. Při zapoje-  
vání je nutno mít na zřeteli tu zvláštnost pneumatické regu-  
lace, že unifikovaný signál leží v intervalu od 20 do 100 kPa  
a tudíž nemá zápornou hodnotu. Nula se tedy musí volit někde  
uprostřed rozsahu. Jako "nula" byla zvolena hodnota 60 kPa.  
Tuto hodnotu je nutno na regulátoru nastavit. Protože však na  
vstupu regulátoru  $R_2$  v případě, že  $h = 0$  a  $h^1 = 0$  má být hod-  
nota  $Q_p - Q_v$ , je nutno pomocí šroubu na sčítacím členu tuto  
hodnotu opět odečíst.

Při uvádění do provozu je nutno dbát na co nejpřes-  
nější seřízení vysílačů průtoku vody a páry a na jejich vzá-  
jemném sladění. Při stejném průtoku vody a páry musí oba vysí-  
lat stejnou hodnotu unifikovaného signálu. Tuto podmínku je  
nutno splnit v celém rozsahu. Jakost regulace je na tomto fa-  
ktoru velmi závislá.

Při nastavování konstant regulátorů v praxi doporu-  
čují napřed nastavit hodnoty odzkoušené na modelu, tedy  $\delta = 12,5\%$   
a  $T_D = 45s$  a v případě správné funkce hodnoty vypočtené. Pro-  
tože bylo seřízení počítáno pro tři druhy zatížení, doporučují  
nastavit vypočtené hodnoty pro zatížení 20 t/h. Vzhledem k do-  
pravnímu zpoždění je tento případ z hlediska regulace nejob-  
tížnější. Integrační konstantu regulátoru  $R_1$  je třeba nastá-  
vit na co nejmenší hodnotu.

Regulace nebyla odzkoušena v provozu. Z časových dů-

vodů nebylo možné realizovat korektor měření průtoku páry. Jak již bylo uvedeno, závisí jakost regulace na přesnosti měření průtoku páry a bez vysílače vybaveného korekcí na změnu tlaku nemá smysl regulaci v praxi zkoušet.

Závěrem bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Svobodovi, Ing. Františku Zikešovi a všem pracovníkům teplárny Liberec za cenné rady a připomínky, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

Použitá literatura:

- [1] F.Zikeš : Praktické úlohy z automatické regulace I  
skripta VŠST Liberec 1975
- [2] J.Vejvoda : Pneumatická regulace; SNTL Praha 1966
- [3] L.Bobal a kol. : Regulace parních kotlů  
SNTL Praha 1957
- [4] Strejce, Balda, Krampera : Regulace v průmyslové aplikaci  
SNTL Praha 1958
- [5] Švec, Kotek a kol.: Teorie automatizovaného řízení  
SNTL Praha 1969
- [6] O.Švula : Speciální problémy regulace  
skripta ČVÚT Praha 1956
- [7] V.Strejce : O možnostech vyššího využití teorie  
regulace v praxi  
Práce 1958
- [8] J.Švec : Příručka automatizační a výpočetní  
techniky  
SNTL Praha 1974
- [9] V.Strejce : Návrhy regulací v chemii a jiných oborech  
SNTL Praha 1953

Seznam příloh:

- Příloha 1 : Stávající stav regulace parního kotle
- Příloha 2 : Záznamy identifikace
- Příloha 3 : Modelování - programové schémata
- přechodové charakteristiky soustav
  - regulační pochody
- Příloha 4 : Celkové schéma navrhované regulace napájení