Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Provoz a regulace energetických zařízení

(skripta, návody do cvičení)

Štefan Kočiš
Michal Stáňa
Ladislav Vilimec

Určeno pro projekt:

Název: **Inovace studijních programů strojních oborů jako odezva na kvalitativní požadavky průmyslu**

Číslo: CZ.04.1.03/3.2.15.3/0414
Operační program Rozvoj lidských zdrojů, Opatření 3.2
Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava
Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

Ostrava 2007

PROVOZ A REGULACE ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

KAPITOLA 1 **STRUKTURA ZNAČENÍ STROJNÍ TECHNOLOGIE Z POHLEDU TVORBY SKŘ**

KAPITOLA 2 **MĚŘENÍ PRŮTOKU**

KAPITOLA 3 **SKRIPTA: ŘÍZENÍ A REGULACE ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ**

Studijní opora

PROVOZ A REGULACE ENERGETICKÝCH ZAŘIZENÍ

Kapitola 1

Struktura značení strojní technologie z pohledu tvorby SKŘ

Garant oboru:
doc. Ing. Ladislav Vilimec

Vypracoval: Ing. Štefan Kočiš
IVITAS, a.s.

Obsah

1 STRUKTURA ZNAČENÍ STROJNÍ TECHNOLOGIE Z POHLEDU TVORBY SKŘ 2

1.1 ÚVOD 2
1.2 ÚČEL A OBLASTI POUŽITÍ KÓDU KKS 3
1.2.1 Oblast působnosti KKS 3
1.2.2 Shoda v projektech 3
1.2.3 Řešení neshod 3
1.2.4 Výhody a možnosti KKS 3
1.3 ZNAČENÍ ZAŘÍZENÍ METODOU KKS 4
1.3.1 Jednotné značení technologie (metodika KKS) 4
1.3.2 Architektura označení KKS 4
1.3.2.1 systém KKS – pozice F0 5
1.3.2.2 systém KKS – třídící část - pozice F1F2F3 5
1.3.2.3 systém KKS – čítací část - pozice FN 6
1.3.2.4 Agregát – třídění - pozice A1A2 6
1.3.2.5 Stupeň 2 Agregát – čítání - pozice AN 6
1.3.2.6 Agregát – přídavný znak - pozice A3 7
1.3.2.7 Komponenty – třídění - pozice B1B2 7
1.3.2.8 Komponenty – čítání - pozice BN 7
1.3.2.9 Příklady označení 8
1.4 ZNAČENÍ PŘÍSTROJŮ 9
1.4.1 Přístroj 9
1.4.2 Písmenný kód 9
1.4.2.1 Rozlišovací písmena 9
1.4.2.2 Značky pro různé umístění přístrojů v technologii 11
1.4.2.3 Popis označení „ bubliny“ obvodu MaŘ 12
1.4.2.4 Příklad– Regulace hladiny zobrazená na panelu se signalizaci dvou minim 12
1.4.3 Schématické značky 13
1.4.4 Typy čar 14
1.5 ZÁVĚR 14
1.6 LITERATURA 15
1.7 PŘÍLOHY 15

1 Struktura značení strojní technologie z pohledu tvorby SKŘ

1.1 Úvod

S rozvojem a uplatňováním automatizovaných systémů řízení, údržbových i technologických procesů v energetických výrobnách vyniká daleko více než v minulosti potřeba přesné identifikace a dokonale dokumentace zařízení a objektů. Aby bylo možno tyto činnosti racionálně zajistit, je nezbytné vytvořit a udržovat číselný kód zařízení optimálně jednotný pro energetické výrobny.

V současné době je v energetických výrobnách využíváno více různých číselných systémů kódování zařízení a objektů. Tyto systémy jsou většinou nejednotné. Snaha o sjednocení označení zařízení a objektů výroben vyústila v požadavek k optimální metodě jednotného označení s respektováním standardů v EU - tj. na komplexnější značení uznávané v mezinárodním styku. Potřeba přesné identifikace předmětů je předepsána evropskými i našimi platnými technickými normami.

Je vybrán systém jednotného značení (KKS), používaný v západoevropské energetice, jehož struktura a logika členění vycházejí z norem DIN, dnes již EN, ISO apod. KKS kód je uznán jako technické pravidlo při identifikaci zařízení v energetice.

Cílem této kapitoly je seznámit studující s metodikou tvorby značení a strukturou tvorby KKS v energetických výrobnách a jiných provozních objektech.

1.2 Účel a oblasti použití kódu KKS

1.2.1 Oblast působnosti KKS

Elektrárenským a energetickým kódovacím systémem KKS jsou označována zařízení a jejich části, přístroje všech druhů podle jejich funkce včetně jejich umístění v objektech a polohy ve skříních

Označení zařízení je následně využíváno při všech činnostech v elektrárně od plánování investic, odpisování, provozu, údržbě - což přináší podstatné organizační i ekonomické zefektivnění těchto činností.

1.2.2 Shoda v projektech

Ve směrnicích KKS nemohou být zakotvena všechna pravidla a ustanovení nutná pro realizací všech druhů projektů. Existují ne zcela jasně definované detaily při označování v projektech dodavatelů, při plánování, nebo již uskutečněných realizací, které musí být před zahájením projektů řešeny dohodami. Jde především o oblasti změn a doplňků kódů KKS, při zachování trendů – systém čítání resp. jeho směru, jednotných zásad při technologickém označování, míst vestaveb a instalací, vymezení horizontů atd.

V provozech jsou možnosti označení zařízení, které v metodice nejsou uvedeny ani naznačeny. Řešení označení se provádí individuálním způsobem, výsledky shod se promítají k ostatním uživatelům pomocí změnových řízení metodiky a kódových tabulek.

1.2.3 Řešení neshod

Při označení zařízení, v před projektové přípravě, při realizací projektu a jiných činnosti, kde se pracuje a dochází ke změnám v dokumentací musí být řešeny neshody. Pro metodiku KKS to představuje pravidelné provádění revizí vlastní metodiky a kódových tabulek tak, aby splňovaly ČSN a odpovídaly potřebám provozu.

1.2.4 Výhody a možnosti KKS

- Standardní identifikace zařízení v zemích EU
- Nezávislý systém identifikace zařízení na změnách v normách.
- Jednotné označení pro všechny typy energetických celků a případné výrobní celky přímo nesouvisející s daným celkem
- Dostatečnou rezervu a kapacitu k označování všech systémů a jejich komponent včetně objektů staveb a možnosti srozumitelného rozčlenění
- Dostatečnou možnosti rozšíření pro nové a jiné technologie (konzultace se zahraničním partnerem pro udržení jednotnosti značení v EU)
- Jednotné a společné použití pro strojní a stavební techniku, elektrotechniku a řídící techniku současně s označením podle funkce technologie, místa vestavby (skříně elektro a řízení) a instalace zařízení na stavbách a objektech.
- Nezávislé kódování na úředním jazyku a zvyklostech dodavatelů vedoucích k zajištění mezinárodní použitelnosti
- Vhodné pro zpracování dat v PC, včetně práce s dokumentací

1.3 Značení zařízení metodou KKS

1.3.1 Jednotné značení technologie (metodika KKS)

KKS (Kraftwerk-Kennzeichensystem) je jednotný identifikační systém elektrárenského zařízení. Vznikl v 60. letech minulého století v Německu a vzal si za cíl vytvořit jednoznačné a univerzální značení pro elektrárenské celky. Jeho výhodou je jednotné použití pro stavební i strojní zařízení, elektrotechnologii, instrumentaci a řídící systém. Pomocí kódu KKS lze určit umístění veškerých zařízení v areálu elektrárny. Každá součást si nese svůj kód od projektu, přes výrobu až do provozu elektrárny a je tímto kódem jednoznačně určena a zařazena. Neexistuje více než jedno zařízení, ovládací skříň nebo signál v řídícím systému o stejném kódu KKS.

V České republice je využívána metodika KKS-ČEZ, a.s. vytvořená na základě německých norem (DIN) tak, aby respektovala podmínky v elektrárenské společnosti ČEZ..).

Technologické označování kóduje systémy, zařízení, části zařízení a přístroje, nebo zařízení související s technologií výrobníího procesu podle jeho funkce, kterou vykoná v procesech elektrárny – na stavbách, v technologií, v elektrotechnice i v řízení.

1.3.2 Architektura označení KKS

KKS má čtyři stupně podrobnosti označení

0. stupeň – celek zařízení
1. stupeň – systém
2. stupeň - agregát
3. stupeň - komponenta

Každý stupeň sestává z několika znaků (písmen a čísel).

Stupeň podrobnosti	ČEZ	Stupeň 0	Stupeň 1					Stupeň 2				Stupeň 3		
Popis datové pozice	Elektrárna	Výrobní jednotka	Celek zařízení (skupina)	Systém KKS (funkce celku a zařízení)					Agregát KKS				Komponenta KKS		
Znak datové pozice	E	J	G	F0	F1	F2	F3	FN	A1	A2	AN	A3	B1	B2	BN
Typ datové pozice	NN	N	A	N	A	A	A	NN	A	A	NNN	A	A	A	NN

A = alfabetický znak (mimo znaků I a O)
N = numerický znak

Obr. 1 *Architektura kódu KKS*

Pro obnovené zdroje se ještě před 0. stupeň udává číselné označení elektrárny a výrobní jednotky. Například pro elektrárnu Prunéřov II. platí označení **18 2**, dále by pak následoval celek zařízení, systém, atd.

1.3.2.1 systém KKS – pozice F0

U zařízení platí pozice F0 jen pro systém nebo zařízení, které je klasifikováno v následujících písemných (alfabetických) údajích. Existuje-li v klasifikaci systému (**F1 F2 F3)** více stejných nebo stejnorodých systému a zařízení, pak budou tyto průběžně číslovány v **F0.**

Není-li to tento případ, může se F0 vynechat.

1.3.2.2 systém KKS – třídící část - pozice F1F2F3

Referenční znak datových míst F1F2F3

- třídění systémů a zařízení odpovídající kódům KKS

F1	POPIS	Změna	Poznámka
A	Zařízení připojená na síť a rozvodna zařízení		
B	Odvod energie a napájení vlastní spotřeby		
C	Zařízení řídící techniky (členění podle řídících funkcí		
D	Zařízení řídící techniky (Použit jen tehdy, pokud funkční kód „CM“ až „CT“ k označení nepostačují		
E	Konveční zásobování palivem a odstraňování zbytků spalování (odstruskování, odpopílkování)		
F	Manipulace s jadernými díly		
G	Zásobování vodou a likvidace odpadních vod		
H	Konveční výroba tepla (i odsiřovací jednotky		
J	Jaderna výroba tepla		
K	Jaderna pomocná zařízení		
L	Pární, vodní, plynové okruhy		
M	Hlavní soustrojí		
N	Příprava technologické energie pro cizí spotřebiče (např. horkovod)		
P	Zařízení chladící vody		
Q	Pomocná zařízení (najížděcí kotelna, kompresory, odběry, odběry vzorků		
R	Výroba a úprava plynů		
S	Vedlejší zařízení (výtahy, klimat., protipožární sys.)		
U	Stavební objekty (pozemky, budovy, inženýrské sítě)		
W	Solární zařízení		
X	Velkostroje (ne hlavní soustrojí		
Z	Provozní a obchodní vybavení, monitorování objektu		

Rozčlenění na datových pozicích F2 a F3 je obsahem kódových tabulek systému KKS.

Příklad:

L oběh páry, vody plynu (datová pozice F1)
LA systém pitné vody (datová pozice F2 doplněna z kódových tab.)
LB parní systém
LC systém kondenzátů
LD čištění kondenzátů
…….
LAA skladování, odplynování (datová pozice F3 doplněná z kódových tab.)
od vstupu odplyňovače případně nádrže do výstupu z nádrže včetně zahřívacího zařízení

1.3.2.3 systém KKS – čítací část - pozice FN

Referenční znak datového místa FN

- počítající rozčlenění systému a zařízení do systémových úseků, dílčích systémů, respektive dílčích zařízení

Počítání začíná vždy od počátku alfabetické řady znaků, jestliže je jedna z předchozích částí referenčního znaku změněna. Nevýznamné nuly musí být v datové pozici zapisovány.

1.3.2.4 Agregát – třídění - pozice A1A2

Referenční znak datových míst A1A2

- Třídění agregátů, přístrojů, el. zařízení a zařízení řídící techniky v souladu s kódy KKS

Rozlišovací znaky a označení hlavních skupin A1 z kódů agregátu:

A1	POPIS	Změna	Poznámka
A	Agregáty		
B	Agregáty – díly		
C	Přímé měřicí okruhy		
D	Regulační okruhy		
E	Zpracování měřených hodnot, signálů, řízení		
F	Nepřímé měřící okruhy		
G	Elektrotechnická zařízení, stavební rozvaděče		
H	Konstrukční skupiny hlavních soustrojí a velkostrojů		

Rozčlenění na datové pozici **A2** je obsahem kódových tabulek

1.3.2.5 Stupeň 2 Agregát – čítání - pozice AN

Referenční znak datového místa AN

- Počítaní agregátů, přístrojů, el.zařízení a zřízení řídící techniky

1.3.2.6 Agregát – přídavný znak - pozice A3

Přídavný referenční znak na datovém místě A3

- Přídavný referenční znak agregátu

Přídavné označení se používá k počítání pro

- Rozlišení druhu pohonu u armatur
- Elektrotechnické napájení z více strán
- Několik měřících obvodů s jedním snímačem měřených hodnot
- Vícenásobné pohony
- Analýza obsahu látek u měřících obvodů

Přídavný referenční (dodatečná specifikace) znak není náhradním referenčním znakem (ani náhradní specifikací) pro komponenty označené ve stupni 3.

1.3.2.7 Komponenty – třídění - pozice B1B2

Referenční znak datových míst B1B2

- Třídění komponent, signálů KKS v souladu s kódy KKS

Rozlišovací znaky a označení hlavních skupin B1 pro komponenty z kódových tabulek pro signály a použití signálů:

B1	POPIS	Změna	Poznámka
K	Strojně – technické komponenty		
M	Strojně technické komponenty		
Q	Komponenty řídící techniky (ne elektrotechnické)		
-	Elektrotechnické komponenty (podle DIN 40719 část 2)		
X	Ovládací signály		
Y	Zpětná vazba – signály z procesu		
Z	Kombinované signály		

Rozčlenění pro datovou pozicí **B2** – komponenty je obsahem kódových tabulek. Rozčlenění pro signály a jejich užití není stanoveno s všeobecnou platnosti, protože je závislé od realizace zařízení pro řídící techniku.

1.3.2.8 Komponenty – čítání - pozice BN

Referenční znak datového místa BN

Počítání komponent, signálů

1.3.2.9 Příklady označení

Označení impulsního pojišťovacího ventilu na přihřáté páře prvního bloku elektrárny zní takto:

A 1LBB01 AA201B

A – (stupeň 0) označuje výrobní jednotku, v tomto případě blok A.
1LBB01 – (stupeň 1) označení systému přihřáté páry.
AA201B – (stupeň 2) armatura s pojistnou funkcí a pořadovým číslem 1 (první na potrubní trase). Písmeno B udává, že daná armatura je vybavena pneumatickým pohonem.

Označení na úrovni komponenty (3. stupně podrobnosti) v tomto případě není využito.

Měření NOx ve spalinovém kanále téhož bloku:

A 1HNA10 CQ001D

1HNA10 označuje systém spalinových kanálů. **CQ** udává, že se jedná o měření kvalitativní veličiny a písmeno **D** na konci specifikuje druh měřené látky (prach).

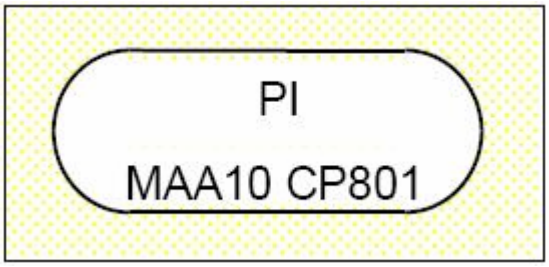
1.4 Značení přístrojů

1.4.1 Přístroj

Značka přístroje sestává z těchto části

- Vodorovně kreslený ovál, jehož delší osa se rovná asi 2xdélceosy kratší, který se kreslí tenkou čárou
- Písemného kódu, vyjadřujícího měřenou veličinu a funkci obvodu

Dále je možno do značky vepsat pořadové číslo (KKS)



1.4.2 Písmenný kód

1.4.2.1 Rozlišovací písmena

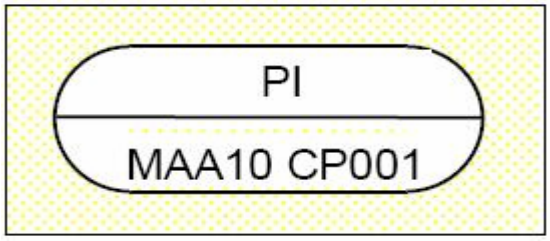
Účel přístroje se označuje písmenným kódem, který je vepsán do oválu označující funkcí obvodu. Písmenný kód je vytvořen takto:

- První písmeno označuje měřenou nebo řízenou veličinu. Písmeno podle sloupce 2 v tabulce 1 V případě potřeby je připojené doplňkové písmeno podle sloupce 3 tabulky 1
- Další písmena se vyberou podle sloupce 4 tabulky 1.

Jestliže se v písmenném kódu vyskytně kromě písmene dvě nebo více dalších písmen, musí být písmena seřazena po sobě v pořadí (**I R C T Q S Z A).** (Tato podmínka se nevztahuje na doplňková písmena uvedená ve sloupci 3). Písmeno **I** se může vynechat, jedná-li se o zapisovač vybavený indikací měřené hodnoty.

Pokud je potřebné označit MAXIMUM nebo MINIMUM, použijí se rozlišovací písmena **H** nebo **L** , která jsou vyznačena vedle značky přístroje (viz tabulka 2)

Písmena se píší vpravo a to tak, že **H** se píše od vodorovné osy nahoru a **L** zase dolů-



Tabulka 1. Písemný kód pro označení funkcí přístrojů (ČSN ISO 3511-1,2)

1	2	3	4
	Měřená nebo řízena veličina	**Přídavné písmeno**	**Zobrazovací nebo výstupní funkce**
A			Signalizace
B			Indikace stavu)např. motor v chodu
C			Regulace
D	Hustota	Rozdíl	
E	Všechny elektrické veličiny		Čidlo, snímač
F	Průtok	Poměr	
G	Měření, poloha nebo délka		
H	Ruční ovládání (ruční spouštění)		
I			Ukazování
J		Snímání	
K	Čas nebo časový program		
L	Hladina		
M	Vlhkost		
N	Volitelná uživatelem		Volitelná uživatelem
O	Volitelná uživatelem		
P	Tlak nebo vakuum		Zkušební přípojka
Q	Kvalita (analýza, vodivost, pH)	Integrace nebo sečítání	Integrování nebo Sumace
R	Radioaktivní zaření (intenzita osv.)		Zapisování
S	Rychlost nebo frekvence		Spínání
T	Teplota		Vysílání
U	Několik veličin		Vícefunkční jednotka
V	Viskozita		Ventil, hradítko, žaluzie, akční člen
W	Tíhová síla nebo síla		Jiná korekční jednotka
X	Tok neutronů (měření výkonu reakt)		Jiné funkce (např. zobrazení)
Y	Chvění, Prodloužení, Roztažnost		Matematický člen, relé
Z			Nouzové nebo zabbezpečov.funkce

Velká písmena jsou předepsána pro označování měřené nebo řízené veličiny a na dalších místech v písmenném kódu se používají na označení sdělovací nebo výstupní funkce.
Malá písmena se používají jako přídavná písmena místo velkých písmen v případě, že je tento způsob označení srozumitelnější

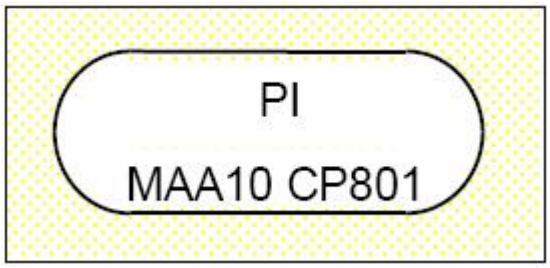
Písmeno **Z** – Nouzová nebo zabezpečovací funkce se použije, jedná-li se o havarijní zásah, např. odstavení zařízení, vypnutí, apod..
Písmeno **S –** Spínání se použije např. pro zap. A vyp. čerpadla od úrovní hladin,,
Písmeno **J** – Snímání vyjadřuje automatické cyklické snímání hodnoty měř. veličin

Tabulka2 Písmenný kód pro označení MAXIMA, MINIMA

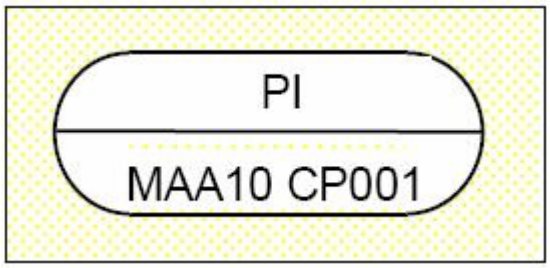
Písmenný kód	Typ použití			
	Měřená veličina	**Ventil**	**Motor**	**Ostatní**
H	MAXIMUM	Otevřen	Běží	Zapnout
L	MINIMUM	Zavřen	Porucha	Vypnout
HH	Druhé MAXIMUM			
LL	Druhé MINIMUM			
HHH	Třetí MAXIMUM			
LLL	Třetí MINIMUM			

1.4.2.2 Značky pro různé umístění přístrojů v technologii

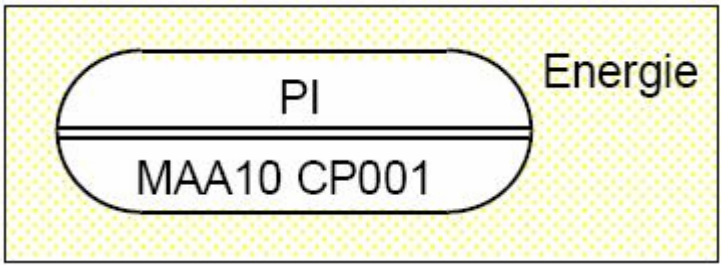
Přístroj umístěny v provozu (informace o měřené veličině je přístupná pouze v provozu)



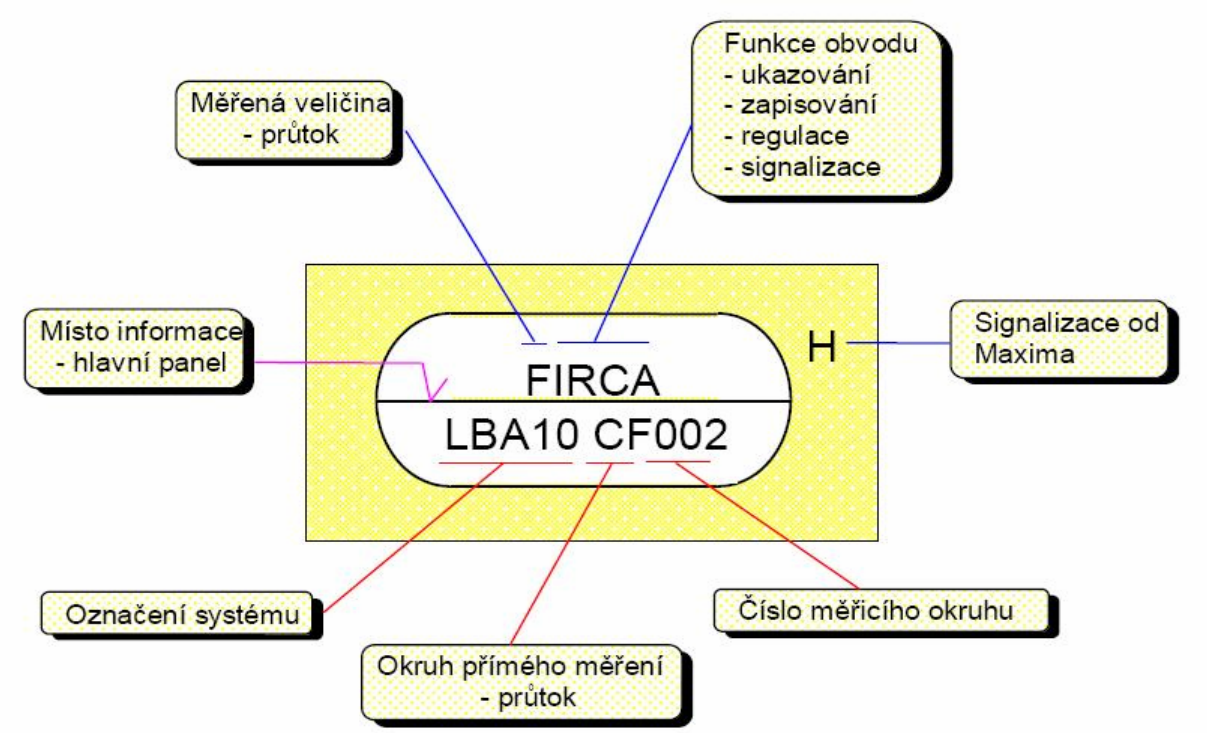
Přístroj umístěny na panelu nebo obrazovce operátora (operátor má informaci o měřené veličině na panelu nebo obrazovce řídícího systému.



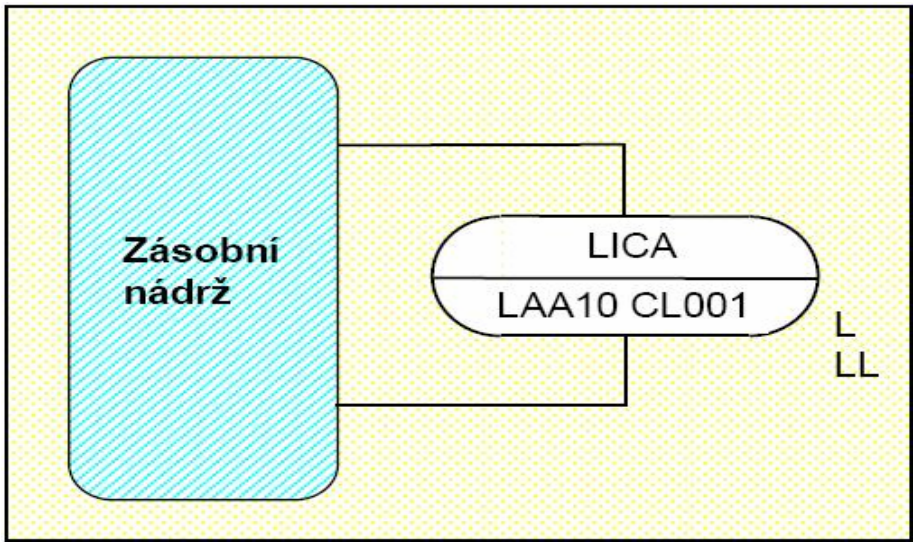
Přístroj umístěny na místním ovládacím panelu (informace o měřené veličině je přístupná na místním ovládacím panelu).



1.4.2.3 Popis označení „ bubliny“ obvodu MaŘ



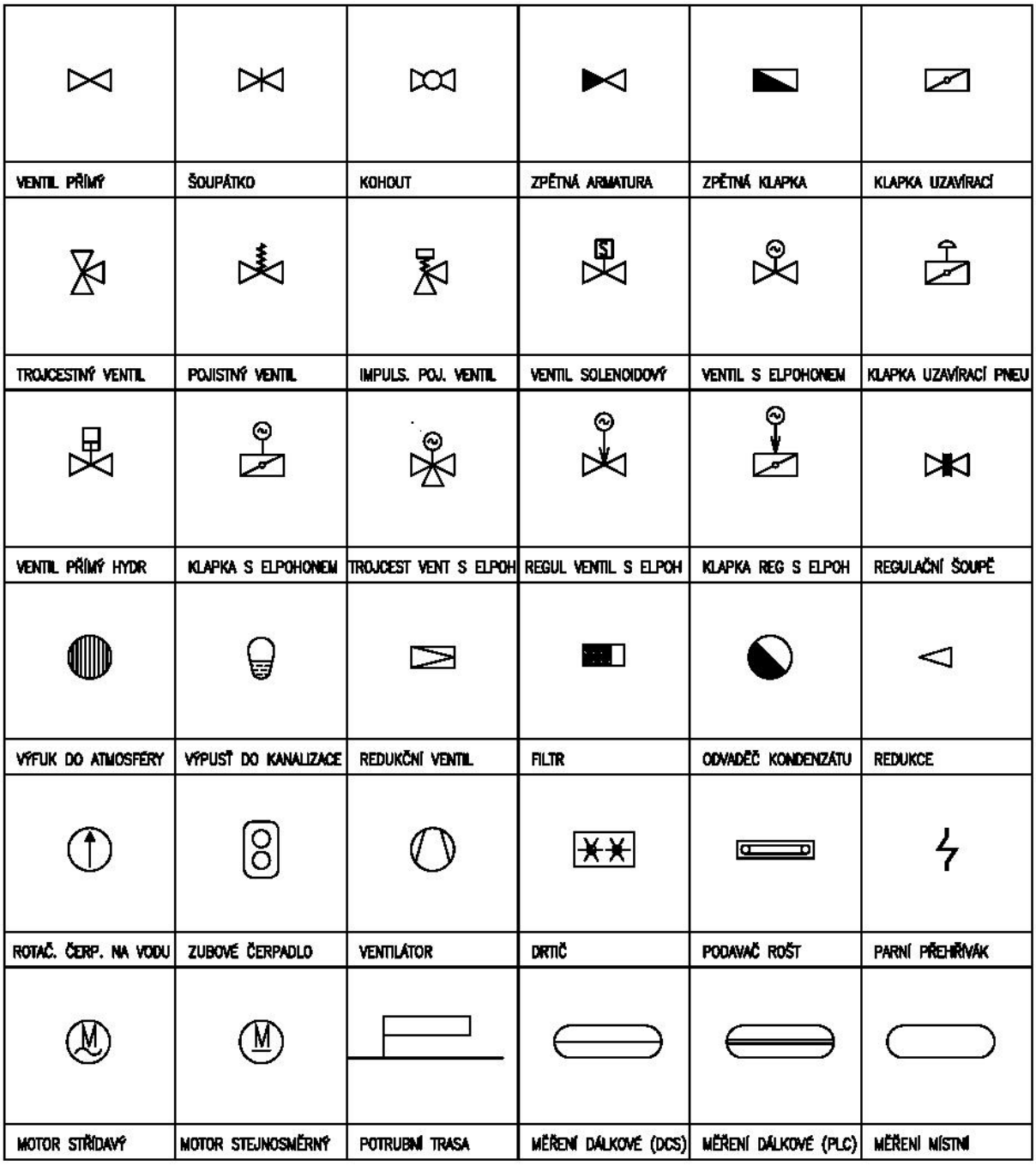
1.4.2.4 Příklad– Regulace hladiny zobrazená na panelu se signalizaci dvou minim



Přístroj se dvěma přípojkami, např. přístroj s vnější plovákovou komorou

1.4.3 Schématické značky

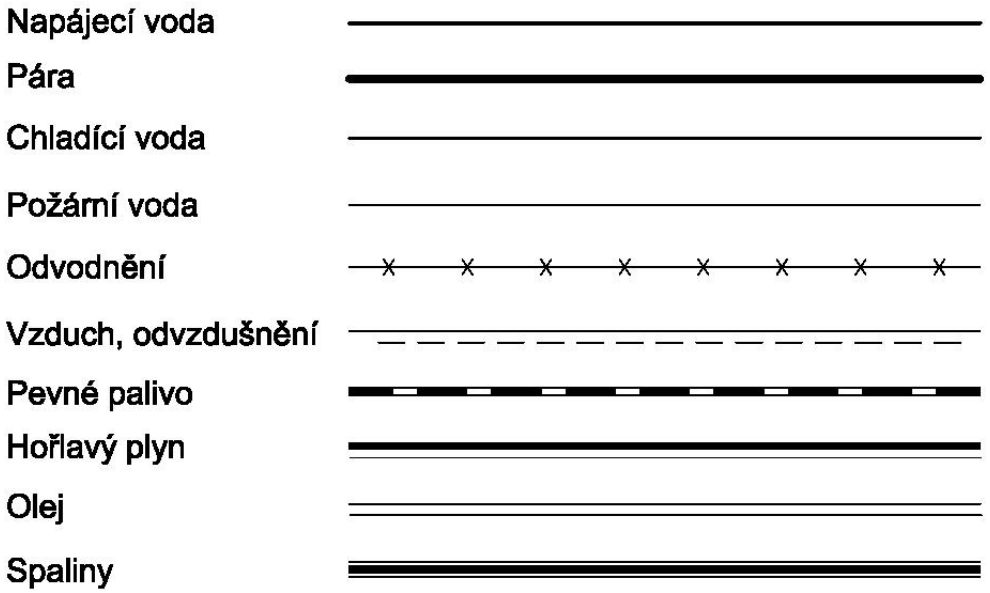
Základní schématické značky nejčastěji využívané při tvorbě technologických schémat parních kotlů jsou uvedeny na obrázku 1. Jako rozsáhlejší zdroj může posloužit například norma ČSN ISO 14617, kde je všeobecný přehled schématických značek používaných ve schématech.



Obr. 1. *Přehled základních schématických značek*

1.4.4 Typy čar

Druh dopravovaného média je ve schématech znázorněn typem čáry. Dochází tak ke značnému zpřehlednění, kdy například okamžitě rozpoznáme, zda se od parního potrubí oddělilo potrubí odvzdušňovací, odvodňovací nebo impulsní. Základní typy čar používané v technologických schématech kotle jsou na následujícím obrázku.



Obr. 2. *Typy čar*

1.5 Závěr

Jak již bylo nastíněno výše, technologická schémata kotlů v dnešní době neslouží pouze ke zjednodušenému zobrazení technologie. Slouží jako základní podklady pro označování kódem KKS. Díky tomu a ve spojení s výpočetní technikou dostávají schémata novou dimenzi využití. Každá schématická značka v sobě nese spoustu informací, které jsou, pro přehlednost, ve výkresovém prostoru skryty. Značky armatur si v atributech bloků nesou informace například o výpočtových parametrech, hmotnosti, typu připojení, výrobci i umístění na technologii. Stejně tak značky potrubních tras, měřících míst, elektrospotřebičů a strojního zařízení v sobě ukrývají veškeré důležité informace. Tyto údaje slouží už při vzniku projektu, pro spravování databází jednotlivých součástí technologie. Provozovatel pak ocení možnost propojení registru zařízení s přehlednými technologickými schématy.

1.6 Literatura

[1] KKS Kraftwerk - Kennzeichensystem Teil B1-B3 - 1988
Richtlinien 1988 Teil B4 - 1993

[2] KKS Kraftwerk - Kennzeichensystem 9/1991
Richtlinien
Funktion, Aggregat, Betrieb - Schlussel 1989

[3] SMEJKAL, J. *Systém jednotného značení elektráren ČEZ, a.s. kódem KKS*, 2002.

[4] ČSN ISO 14617

[5] ČSN 01 3107

[5] ČSN EN 10628

1.7 Přílohy

7.1 Příloha 1- KKS_MaR.xls
7.2 *Příloha 2- KKS_Elektro.xls*
7.3 *Příloha 3- KKS_Stavební.xls*

Studijní opora

PROVOZ A REGULACE ENERGETICKÝCH ZAŘIZENÍ

Kapitola 2

Měření průtoku

Garant oboru:
doc. Ing. Ladislav Vilimec

Vypracoval: Ing. Michal Stáňa

VŠB-TU Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Obsah

OBSAH 1

2. ÚVOD 2

2.1 SEZNAM ZNAČENÍ 2
2.2 ROZDĚLENÍ PRŮTOKOMĚRŮ 4
2.3 OBLAST POUŽITÍ 5
2.4 TYPICKÉ PŘESNOSTI A MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÉ HODNOTY TLAKŮ A TEPLOT 6
2.5 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ ZÁKONY 6
2.6 ŠKRTÍCÍ ORGÁNY 7
2.6.1 Clony 7
2.6.2 Dýzy 9
2.6.3 Venturiho trubice 11
2.6.4 Provedení odběrů tlaků 12
2.6.5 Odvození základního vztahu 12
2.6.6 Součinitel průtoku C 14
2.6.7 Součinitel expanze ε_1 15
2.6.8 Trvalá tlaková ztráta 16
2.6.9 Stanovení nejistoty 16
2.6.10 Příklad 2.1 18
2.7 SEZNAM LITERATURY 20

2. Úvod

Hlavními důvody pro měření průtoku v energetice jsou zejména požadavky na regulaci, bilanční technicko-ekonomické hodnocení a fakturační měření.

2.1 Seznam značení

Symbol	Veličina	Jednotky
C	součinitel průtoku	[-]
d	průměr otvoru škrtícího orgánu	[m]
D	vnitřní průměr potrubí	[m]
g	gravitační zrychlení	$[m^2.s^{-1}]$
h	výška středu průřezu potrubí	[m]
i	entalpie	$[J.kg^{-1}]$
l	vzd. od škrtícího orgánu	[mm]
$\mathbf{m_d}$	hmotnostní výkonnost, hmotnostní průtok	$[kg.s^{-1}]$
n	počet měření	[-]
p	absolutní statický tlak	[Pa]
$\mathbf{p_d}$	diferenční tlak	[Pa]
$\mathbf{q_m}$	hmotnostní průtok	$[kg.s^{-1}]$
$\mathbf{q_V}$	objemový průtok	$[m^3.s^{-1}]$
$\mathbf{Re_D}$	Reynoldsovo číslo vztažené k D	[-]
$\mathbf{s_x}$	odhad směrodatné odchylky	[1])
T	termodynamická teplota	[K]
t	teplota	[°C]
u	měrná vnitřní energie	$[J.kg^{-1}]$
v	rychlost proudění	$[m.s^{-1}]$

β	poměr průměrů	[-]
$\Delta\mathbf{p}$	diferenční tlak	[Pa]
$\Delta\bar{\omega}$	trvalá tlaková ztráta	[Pa]
δ	absolutní nejistota	[1])
ε	součinitel expanze	[-]
η	dynamická viskozita	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$
κ	izoentropický exponent	[-]
$\lambda(t)$	součinitel teplotní roztažnosti	$[K^{-1}]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2.s^{-1}]$
ρ	hustota tekutiny	$[kg.m^{-3}]$
ζ	Sutherlandova konstanta	[K]

Index	Význam
1	před škrtícím orgánem
2	za škrtícím orgánem
20	při teplotě 20°C
ap	admisní pára
d	vztaženo k d
D	vztaženo k D
jm	jmenovitý
max	maximální
min	minimální
NV	napájecí voda
sk	skutečný
t	při teplotě t
vyp	vypočtené
‘	od zadní strany

[1]) Jednotky jsou stejné jako jednotky příslušné veličiny

2.2 Rozdělení průtokoměrů

Nejznámější a nejpoužívanější průtokoměry jsou uvedeny v Tab. 2.2.1.

Tab. 2.1.1 *Rozdělení průtokoměrů z hlediska principu činnosti*

	nejběžnější provedení	**princip činnosti**
škrtící orgány	clony dýzy, venturiho trubice	zmenšením průtočného průřezu dojde na základě (2.5.2) ke zvýšení rychlosti
rychlostní sondy	Pitotova trubice, Prandtlova sonda, Annubar, Itabar	čím rychleji tekutina proudí, tím větší dynamický tlak tlačí na překážku v proudění, viz. (2.5.3)
plováčkové průtokoměry	rotametr	rovnováha sil na plováček (tíhová síla dolů, síla vyvolaná dynamickým tlakem nahoru) v rozšiřující se trubici
turbínové průtokoměry	turbínkový průtokoměr, vrtulkový průtokoměr	čím rychleji tekutina proudí, tím rychleji roztáčí lopatky
objemové průtokoměry	bubnový průtokoměr kondenzátu, mokrý plynoměr, suchý plynoměr	periodické, nebo kontinuální, naplňování a vyprazdňování pracovního prostoru s přesně definovaným objemem
deformační průtokoměry	terčíkový průtokoměr	čím rychleji tekutina proudí, tím větší dynamický tlak tlačí na překážku v proudění, viz. (2.5.3)
ultrazvukové průtokoměry	přímé impulzní, zpětnovazební, Dopplerovy	změna rychlosti, nebo frekvence ultrazvukového signálu průtokem tekutiny
indukční průtokoměry		při pohybu vodivé tekutiny v magnetickém poli vzniká na měřicích elektrodách el. napětí
Coriolisovy průtokoměry	s přímou trubicí, se zakřivenou trubicí	čím větší hmotnostní průtok tím větší působení Coriolisovy síly v neinerciální vztažné soustavě (rotující, nebo kmitající trubici)
směšovací průtokoměry		doba postupu vstřiknuté značkovací látky, nebo zřeďování vstřikované značkovací látky
vírové průtokoměry		frekvence tvorby vírů za obtékaným tělesem je přímo úměrná rychlosti proudění

2.3 Oblast použití

V Tab. 2.3.1. jsou uvedeny vhodné a nevhodné oblasti použití nejběžnějších typů průtokoměrů.

Tab. 2.3.1 *Rozdělení průtokoměrů z hlediska oblasti použití*

	vhodné	**nevhodné**
škrtící orgány	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny, vysoké tlaky a teploty, velká potrubí	směs plyn kapalina, otevřené kanály, malé rychlosti,
rychlostní sondy	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny, otevřené kanály	směs plyn kapalina. vysoké teploty, znečištěné tekutiny, malé rychlosti
plováčkové průtokoměry	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny	směs plyn kapalina, znečištěné tekutiny, velké kanály, vysoké teploty
turbínové průtokoměry	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny,	směs plyn kapalina, znečištěné tekutiny, vysoké teploty
objemové průtokoměry	malé průtoky	znečištěné tekutiny, směs plyn kapalina, vysoké teploty
deformační průtokoměry	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny, otevřené kanály	velká potrubí, vysoké teploty, směs plyn kapalina
ultrazvukové průtokoměry	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny, vysoké tlaky a teploty, velká potrubí, agresivní kapaliny	směs plyn kapalina
indukční průtokoměry	čisté kapaliny, velká potrubí	nevodivé kapaliny, vysoké teploty, plyny,
Coriolisovy průtokoměry	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny, agresivní kapaliny	velká potrubí
směšovací průtokoměry	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, otevřené kanály, velká potrubí	potraviny
vírové průtokoměry	čisté kapaliny, nevodivé kapaliny, plyny	velká potrubí, otevřené kanály

2.4 Typické přesnosti a maximální přípustné hodnoty tlaků a teplot

V Tab. 2.4.1. jsou uvedeny typické hodnoty přesnosti a maximální přípustné hodnoty tlaků a teplot pro nejběžnější typy průtokoměrů.

Tab. 2.4.1 *Typické přesnosti*

	Typická přesnost	**Max. tlak [MPa]**	**Max. teplota [°C]**
škrtící orgány	0,6 ÷ 2 % z rozsahu	50	1000
rychlostní sondy	2 ÷ 5 % z měřené hodnoty	50	800 (nechlazené)
plováčkové průtokoměry	2 % z rozsahu	10	450
turbínové průtokoměry	0,1 ÷ 2 % z měřené hodnoty	200	450
objemové průtokoměry	0,2 ÷ 2 %	0,5	200
deformační průtokoměry	< 0,1 ÷ 1 %	5	250
ultrazvukové průtokoměry	0,5 % z měřené hodnoty ÷ 2 % z rozsahu	20	200
indukční průtokoměry	0,2 ÷ 1 z měřené hodnoty	15	250
Coriolisovy průtokoměry	0,1 ÷ 0,5 % z měřené hodnoty	40	400
směšovací průtokoměry	1 ÷ 2 % z měřené hodnoty	-	-
vírové průtokoměry	0,5 ÷ 1 % z měřené hodnoty	25	450

2.5 Základní fyzikální zákony

Rovnice kontinuity, neboli zákon zachování hmoty (kolik kg tekutiny vteče dovnitř, tolik vyteče ven):

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \qquad [kg \cdot s^{-1}] \qquad (2.5.1)$$

$$S_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot \rho_2 \cdot v_2 \qquad [kg \cdot s^{-1}] \qquad (2.5.2)$$

Definice dynamického tlaku (čím rychleji tekutina proudí, tím větší dynamický tlak tlačí na překážku v proudění):

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \qquad [Pa] \qquad (2.5.3)$$

Bernoulliho rovnice (což je zjednodušená forma zákona zachování energie - jsou uvažovány pouze ty změny energie, které se nejčastěji týkají proudící tekutiny:

$$\frac{p_1}{\rho_1}+\frac{v_1^2}{2}+g\cdot h_1+u_1=\frac{p_2}{\rho_2}+\frac{v_2^2}{2}+g\cdot h_2+u_2 \qquad [kJ\cdot kg^{-1}] \qquad (2.5.4)$$

2.6 Škrtící orgány

Zřejmě nejčastěji se v energetice pro měření průtoku používají tzv. škrtící orgány (někdy bývají označovány také jako primární prvky). Princip činnosti spočívá ve zmenšení (seškrcení) průtočného průřezu následkem čehož dojde na základě rovnice kontinuity (4.5.2) ke zvýšení rychlosti. Stoupne-li rychlost, naroste kinetická energie a jelikož je celkový součet všech energií konstantní (což popisuje zákon zachování energie – pro proudící tekutiny uváděný ve formě Bernoulliho rovnice – 4.5.4) klesne energie tlaková, neboli dojde ke snížení statického tlaku. Z poklesu statického tlaku lze pak odvodit rychlost proudění a průtok.

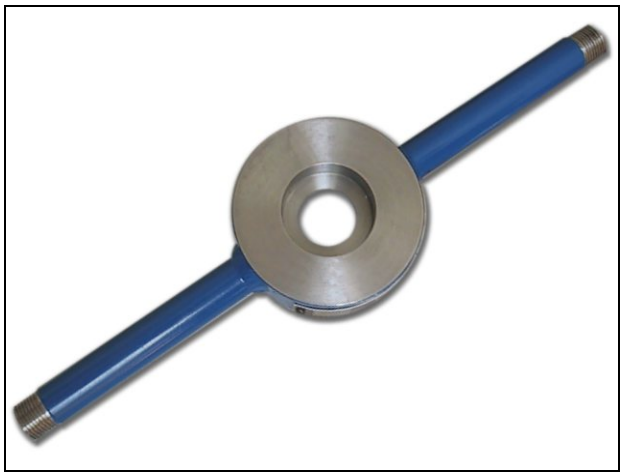
Základní a nejpodstatnější zásady pro návrh a instalaci škrtících orgánů jsou uvedeny v normě *ČSN ISO 5167-1: Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku – Část 1: Clony, dýzy a Venturiho trubice vložené do zcela vyplněného potrubí kruhového průřezu* v aktuálním znění z roku 1998.

V této normě jsou uvedeny normativní požadavky na provedení, umístění a instalaci škrtících orgánů, požadavky na provedení odběrů tlaků a rovněž vztahy pro výpočet součinitele průtoku **C** a trvalé tlakové ztráty pro tyto provedení škrtících orgánů:

- clona (Obr. 2.6.1.1, Obr. 2.6.1.2, Obr. 2.6.1.3, Obr. 2.6.1.4, Obr. 2.6.1.5)
- dýza ISA1932 (Obr. 2.6.2.1, Obr. 2.6.2.2, Obr. 2.6.2.3)
- dýza s dlouhým poloměrem
- Venturiho trubice (Obr. 2.6.3.1, Obr. 2.6.3.2)
- Venturiho dýza (Obr. 2.6.3.3)

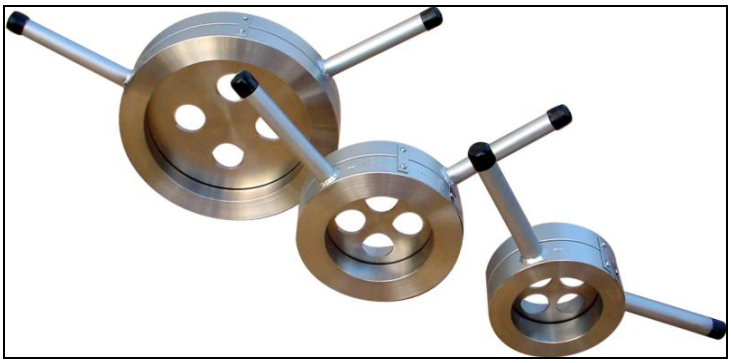
2.6.1 Clony

Nejčastějším provedením škrtícího orgánu jsou clony a to zejména dle ČSN ISO 5167 normalizované **clony centrické** (s kruhovým otvorem v ose potrubí – Obr. 4.6.1.1) používané pro měření průtoku širokého spektra pracovních látek. Clonové kotouče se vyrábějí nejčastěji z nerezových ocelí. Centrickou clonu lze umístit jak vodorovně tak svisle.



Obr. 2.6.1.1 *Centrická clona s bodovými odběry tlakové diference* [2.2]

Kromě clony centrické existuje a vyrábí se i celé řada speciálních clon. Např. **clony víceotvorové** (Obr. 2.6.1.2) vyžadující menší délku přímého úseku potrubí (2D před a 3D za).



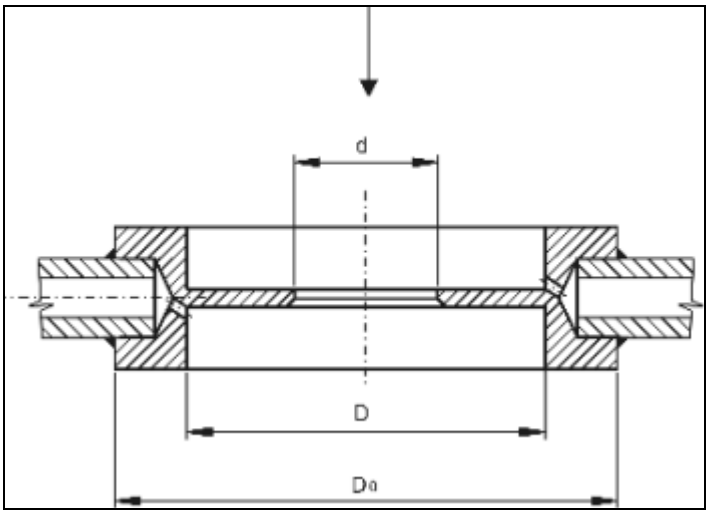
Obr. 4.6.1.2 *Víceotvorové clony* [2.2]

Pro měření znečištěných tekutin se používají excentrické clony (Obr. 2.6.1.3) umožňující proudění nečistot obsažených v tekutině. Z tohoto důvodu se excentrické clony umísťují do vodorovných, eventuálně šikmých úseků potrubí.

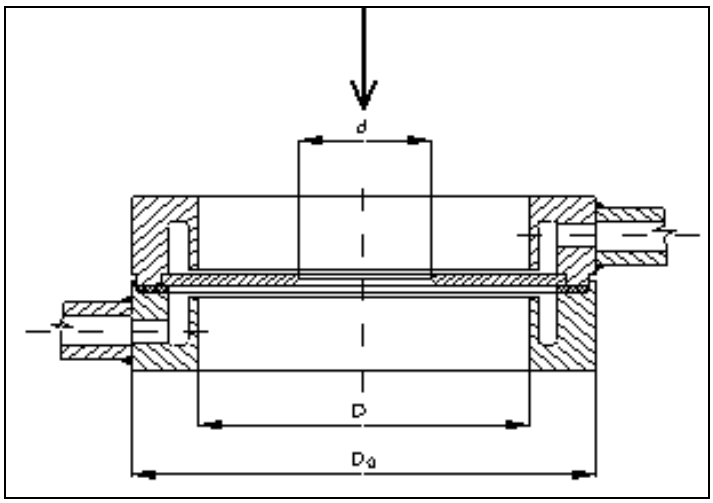
Obr. 2.6.1.3 *Excentrické clonové kotouče* [2.2]

Dále existuje několik dalších speciálních provedení clon, např. **přestavitelná segmentová clona** používaná např. pro předávací stanice plynu umožňující měnit rozsah měřených průtoků změnou průtočného průřezu za provozu (změnou hloubky zasunutí segmentu) dále **clona kuželová** (dřívější označení kónická) pro měření viskózních tekutin (oleje), což je obdoba klasické clony s tím rozdílem, že vstup měřicího otvoru je kuželovitě zkosen nebo **clona čtvrtkruhová** (dřívější označení Koenneckova) rovněž pro měření viskózních tekutin, obdoba klasické clony, vstup měřicího otvoru má zaoblení ve tvaru čtvrtkružnice.

Nejběžnější způsoby provedení odběrů tlaků jsou patrné z Obr. 2.6.1.4 a Obr. 2.6.1.5



Obr. 2.6.1.4 *Schéma centrické clony bodovými odběry tlakové diference* [2.2]

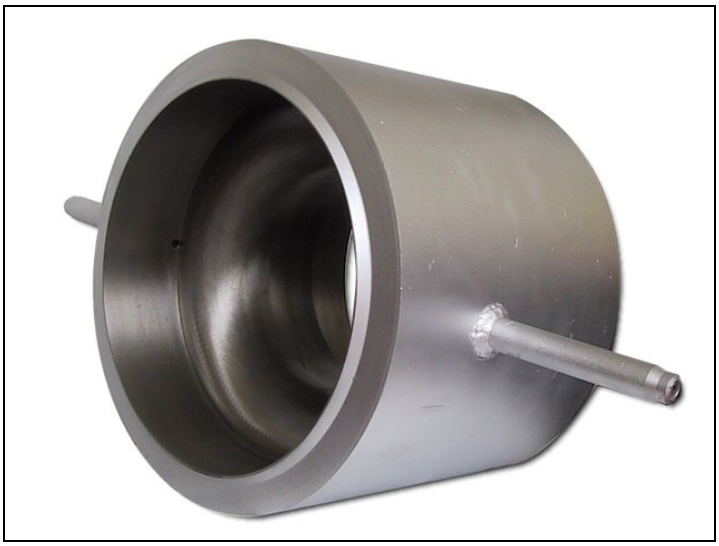


Obr. 2.6.1.5 *Schéma centrické clony s komorovými odběry tlakové diference* [2.2]

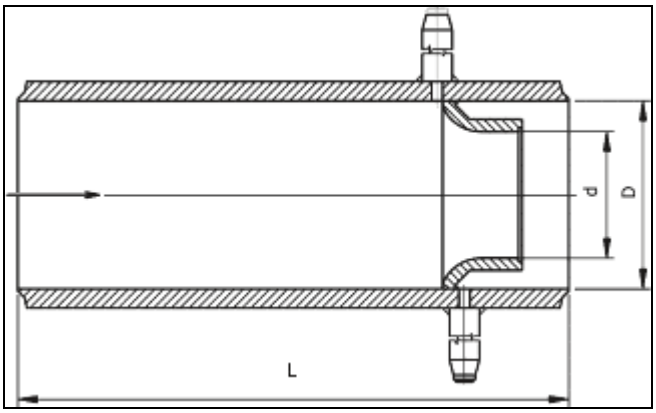
2.6.2 Dýzy

Dýzy (Obr. 2.6.2.1) jsou díky své konstrukci odolnější vůči dlouhodobému namáhání teplotou a tlakem. Často se používají pro měření průtoku napájecí vody do kotle a admisní páry z kotle. Nejčastější provedení odběrů tlaků je na Obr. 2.6.2.2, Obr. 2.6.2.3). V normě ČSN ISO 5167 jsou uvedeny dvě konstrukční provedení dýz a sice:

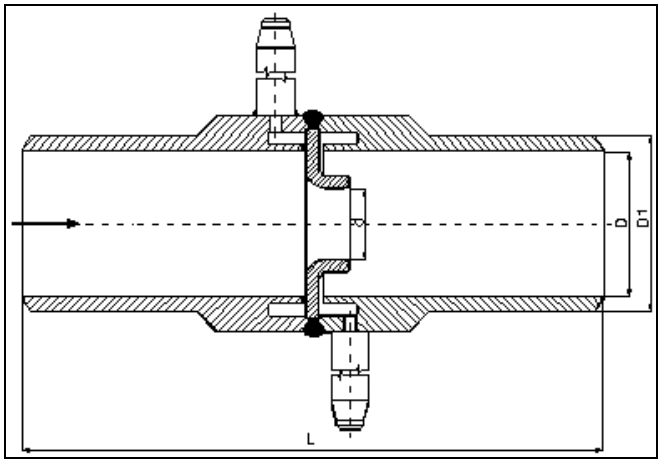
- dýza ISA 1932 (Obr. 2.6.2.1, Obr. 2.6.2.2, Obr. 2.6.2.3)
- dýza s dlouhým poloměrem



Obr. 2.6.2.1 *Dýza ISA 1932 ve vevařovaném provedení s bodovými odběry tlakové diference* [2.2]



Obr. 2.6.2.2 *Schéma dýzy ISA 1932 ve vevařovaném provedení s bodovými odběry tlakové diference* [2.2]

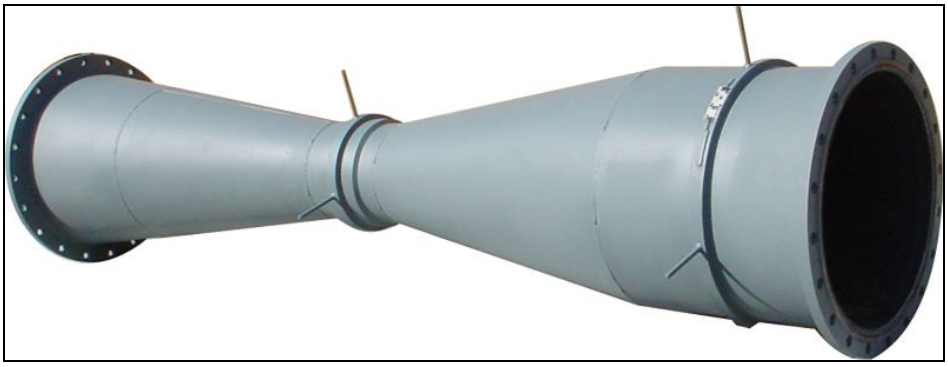


Obr. 2.6.2.3 *Schéma dýzy ISA 1932 ve vevařovaném provedení s komorovými odběry tlakové diference* [2.2]

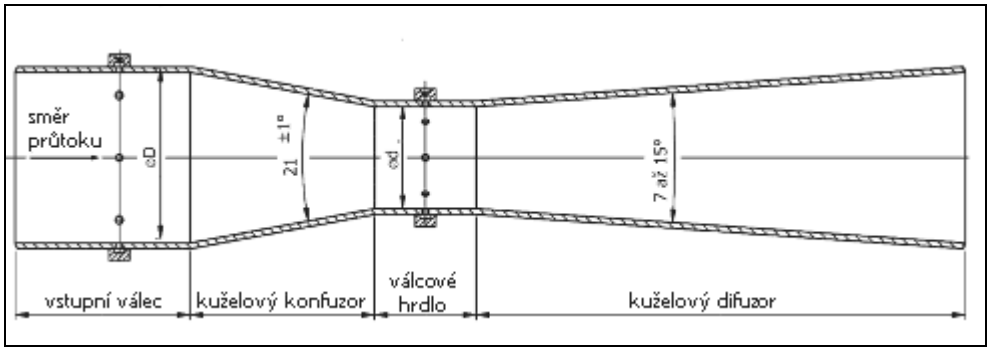
2.6.3 Venturiho trubice

ČSN ISO 5167 uvádí dvě konstrukční provedení Venturiho trubic:
- klasická Venturiho trubice (Obr. 2.6.3.1 a Obr. 2.6.3.2)
- Venturiho dýza (Obr. 2.6.3.3)

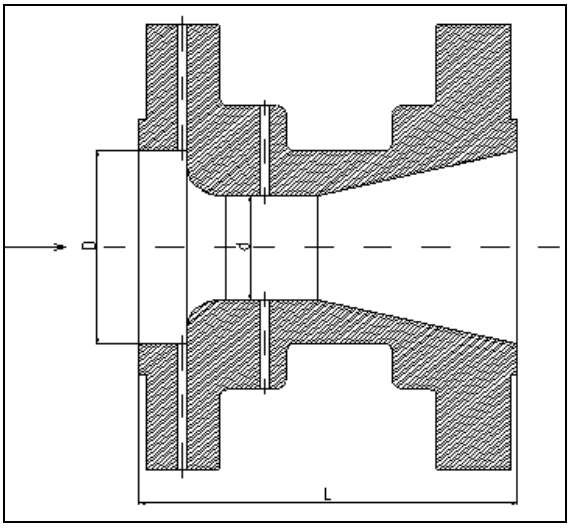
Klasické Venturiho trubice mají ze všech uvedených škrtících orgánů nejmenší trvalou tlakovou ztrátu. V energetice jsou velice často používané pro měření průtoku spalovacího vzduchu.



Obr. 2.6.3.1 *Venturiho trubice* [2.2]



Obr. 2.6.3.2 *Schéma Venturiho trubice* [2.2]



Obr. 2.6.3.3 *Schéma Venturiho dýzy* [2.2]

2.6.4 Provedení odběrů tlaků

Nejběžnější způsoby provedení odběrů tlaků před a za uvedenými škrtícími orgány jsou uvedeny v následujícím přehledu. Tlaky jsou tzv. impulsním potrubním svedeny do snímače tlakové diference. Pro určení hustoty protékající tekutiny se upřednostňuje statický tlak před škrtícím orgánem.

Clony
- Odběr tlaku ve vzdálenosti D před a D/2 za clonovou deskou. Přičemž obě vzdálenosti jsou měřeny od přední strany clonové desky.
- Přírubové odběry ve vzdálenosti 25,4 mm před (měřeno od přední strany clonové desky) a 25,4 mm (1 palec) za škrtícím orgánem (měřeno od zadní strany clonové desky).
- Koutové odběry, kde odběrové otvory přesně lícují s čelní, resp. zadní stranou clonové desky. Koutové odběry se navíc provádějí ve dvou variantách:
    - koutové bodové (Obr. 2.6.1.1, Obr. 2.6.1.2, Obr. 2.6.1.4)
    - koutové komorové (Obr. 2.6.1.5).

Dýzy
- Před dýzou se musí použít koutové odběry tlaku (Obr. 2.6.2.2, Obr. 2.6.2.3).

Venturiho trubice
- Před Venturiho trubicí i v hrdle musí být samostatné odběry ve stěně potrubí, propojené prstencovými komorami.
- Pro měření tlaku před Venturiho trubicí musí být použity minimální 4 odběry.
- Pro měření tlaku v hrdle Venturiho trubice musí být použity minimální 4 odběry.
  (Obr. 2.6.3.1, Obr. 2.6.3.2)

Venturiho dýzy
- Před Venturiho dýzou musí být odběry koutové (ať už bodové nebo komorové).
- V hrdle musí být alespoň 4 samostatné odběry spojené do prstencové komory. V hrdle nesmí být použita štěrbina.
  (Obr. 2.6.3.3)

2.6.5 Odvození základního vztahu

Odvození základního vztahu pro měření průtoku tekutin pomocí škrtících orgánů vychází ze zákona zachování energie pro proudící tekutiny - Bernoulliho rovnice (2.5.4), kde průřez 1 je ve vzdálenosti předepsané normou před přední stranou škrtícího orgánu, tam kde se ještě neprojevuje vliv zúžení potrubí a průřez 2 je ve vzdálenosti předepsané normou za zadní stranou škrtícího orgánu, tam kde se ještě neprojevuje obnova statického tlaku. Přičemž jak je v ČSN ISO 5167-1 uvedeno je uvažována změna vratná adiabatická, tedy izoentropická.

Neuvažuje se změna potenciální energie a členy popisující potenciální energii z rovnice (2.5.4) vypadnou. Jak bylo uvedeno děj se považuje za izoentropický a měrná vnitřní energie se považuje za konstantní.

Při odvození základního vztahu se hustota považuje za konstantní a vliv změny tlaku na změnu hustoty se posléze zohledňuje pomocí součinitele expanze **ε**. Aplikací uvedených předpokladů na (2.5.4) a po úpravě:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{p_1 - p_2}{\rho_1} \qquad (2.6.5.1)$$

Z rovnice kontinuity pro stacionární proudění:

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \qquad (2.6.5.2)$$

kde se hustota opět považuje za konstantní. Odtud se rychlost v průřezu 1 vypočte :

$$v_1 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot v_2 \qquad (2.6.5.3)$$

po dosazení (2.6.5.3) do (2.6.5.2):

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \qquad (2.6.5.4)$$

kde **Δp** se nazývá diferenční tlak a platí:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \qquad (2.6.5.5)$$

a poměr průměru škrtícího orgánu a vnitřního průměru potrubí se označuje **β**:

$$\beta = \frac{d}{D} \qquad (2.6.5.6)$$

zlomek:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \qquad (2.6.5.7)$$

bývá někdy označován **E**.

Je-li tedy hustota považována za konstantní a rovna ρ_1 určím teoretický hmotnostní průtok škrtícím orgánem o průměru **d** ze vztahu:

$$q_{m,t} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \rho_1 \cdot v_2 \qquad (2.6.5.8)$$

Skutečný hmotnostní průtok se potom vypočte ze vztahu:

$$q_m = C \cdot \varepsilon_1 \cdot q_{m,t} \tag{2.6.5.9}$$

neboli:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1} \tag{2.6.5.10}$$

kde **C** je součinitel průtoku (více v kapitole 2.6.6) a ε_1 expanzní součinitel (více v kapitole 2.6.7

2.6.6 Součinitel průtoku C

Součinitelem průtoku **C** jsou zohledněny vlastnosti neideální tekutiny a materiálu škrtícího orgánu. Skutečný průtok tekutiny bude menší, než by odpovídalo rovnici (2.6.5.8). Výpočet součinitele který toto zohledňuje se liší dle provedení škrtícího orgánu. Nyní platná aktualizaci normy ČSN ISO 5167 z roku 1998 předepisuje pro stanovení **C** pro clony použití Reader – Harris/Gallagherovy rovnice:

$$\begin{aligned} C = {} & 0{,}5961 + 0{,}0261 \cdot \beta^2 - 0{,}316 \cdot \beta^2 + 0{,}000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0{,}7} + \\ & + \left(0{,}0188 + 0{,}0063 \cdot A\right) \cdot \beta^{3{,}5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0{,}3} + \\ & + \left(0{,}043 + 0{,}80 \cdot e^{-10 \cdot L_1} - 0{,}123 \cdot e^{-7 \cdot L1}\right) \cdot \left(1 - 0{,}11 \cdot A\right) \cdot \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - \\ & - 0{,}031 \cdot \left(M'_2 - 0{,}8 \cdot M'^{1{,}1}_2 \right) \cdot \beta^{1{,}3} \end{aligned} \tag{2.6.6.1}$$

V případě, že D<71,12 mm, měl by být přičten k výše uvedené rovnici následující výraz:

$$+0{,}011 \cdot \left(0{,}75 - \beta\right) \cdot \left(2{,}8 - \frac{D}{25{,}4} \right) \tag{2.6.6.2}$$

kde **D** je vyjádřen v mm a $\mathbf{Re_D}$ je Reynoldsovo číslo vztažené k **D**.

Přičemž:

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0{,}8} \tag{2.6.6.3}$$

$$M'_2 = \frac{2L'_2}{1-\beta} \qquad (2.6.6.4)$$

kde:

$$L_1 = \frac{l_1}{D} \qquad (2.6.6.5)$$

je podíl vzdálenosti předního odběru tlaku od přední strany clonové desky a průměru potrubí

$$L'_2 = \frac{l'_2}{D} \qquad (2.6.6.6)$$

je podíl vzdálenosti zadního odběru tlaku od zadní strany clonové desky a průměru potrubí. (L'_2 označuje poměrnou vzdálenost od zadní strany, kdežto L_2 by označovala poměrnou vzdálenost od přední strany).

Jsou-li relativní vzdálenosti odběrů tlaku v souladu s požadavky v uvedenými v kapitole 8.2.1.2, 8.2.1.3 nebo 8.2.2 citované normy ČSN ISO 5167-1, použijí se v této rovnici následující hodnoty L_1 a L_2:

- pro koutové odběry:

$L_1 = L'_2 = 0$

- pro odběry ve vzdálenosti D a D/2:

$L_1 = 1$
$L'_2 = 0{,}47$

- pro přírubové odběry:

$L_1 = L'_2 = 25{,}4/D$

kde D je vyjádřen v milimetrech.

2.6.7 Součinitel expanze ε_1

Norma ČSN ISO 5167 uvádí v případě je-li $p_2/p_1 \geq 0{,}75$ pro stanovení součinitele expanze empirický vzorec:

$$\varepsilon_1 = 1 - \left(0{,}41 + 0{,}35 \cdot \beta^4\right) \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} \qquad (2.6.7.1)$$

Index 1 znamená, že se součinitel expanze vztahuje k hodnotám v průřezu 1, pro průřez 2 platí dle [2.1]:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cdot \sqrt{1 + \Delta p / p_2} \qquad (2.6.7.2)$$

Pro nestlačitelné kapaliny je $\varepsilon = 1$.

2.6.8 Trvalá tlaková ztráta

Norma ČSN ISO 5167 uvádí pro výpočet trvalé tlakové ztráty následující vztahy.

Clona, dýza s dlouhým poloměrem, dýza ISA 1932

$$\Delta\bar{\omega} = \frac{\sqrt{1-\beta^4} - C \cdot \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4} + C \cdot \beta^2} \cdot \Delta p \qquad (2.6.8.1)$$

Venturiho trubice, Venturiho dýza

Pro Venturiho trubice a Venturiho dýzy se uvádí tlaková ztráta v rozmezí 5 ÷ 20 % z hodnoty Δp.

2.6.9 Stanovení nejistoty

Norma ČSN ISO 5167 definuje nejistotu jako rozmezí hodnot v němž leží měřená hodnota s pravděpodobností 95%. Pro stanovení nejistoty hmotnostní průtoku uvádí tato norma praktický pracovní vzorec:

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1}\right)^2 + \left(\frac{2\beta}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta D^2}{D}\right) + \\ + \left(\frac{2}{1-\beta}\right)^2 \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}\right)^2 \end{array} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.6.9.1)$$

kde δ je absolutní chyba dané veličiny v základních jednotkách této veličiny, přičemž hodnoty $\delta C/C$ a $\delta\varepsilon_1/\varepsilon_1$ musí být určeny dle vztahů (2.4.8.2) a (2.4.8.3) předepsaných zmiňovanou normou, neboť již samotné použití výše uvedených vztahů zanáší do měření určitou nejistotou, jelikož ani vzorce a koeficienty použité ve vzorcích pro stanovení **C** a ε nelze určit naprosto přesně.

$$\frac{\delta C}{C} = (1{,}2 + 1{,}8 \cdot \beta^4) \qquad (2.6.9.2)$$

$$\frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \left(4 + 100 \cdot \beta^8\right) \cdot \frac{\Delta p}{p_1} \qquad (2.6.9.3)$$

kde výsledné nejistoty **C** a ε jsou v %.

2.6.10 Příklad 2.1

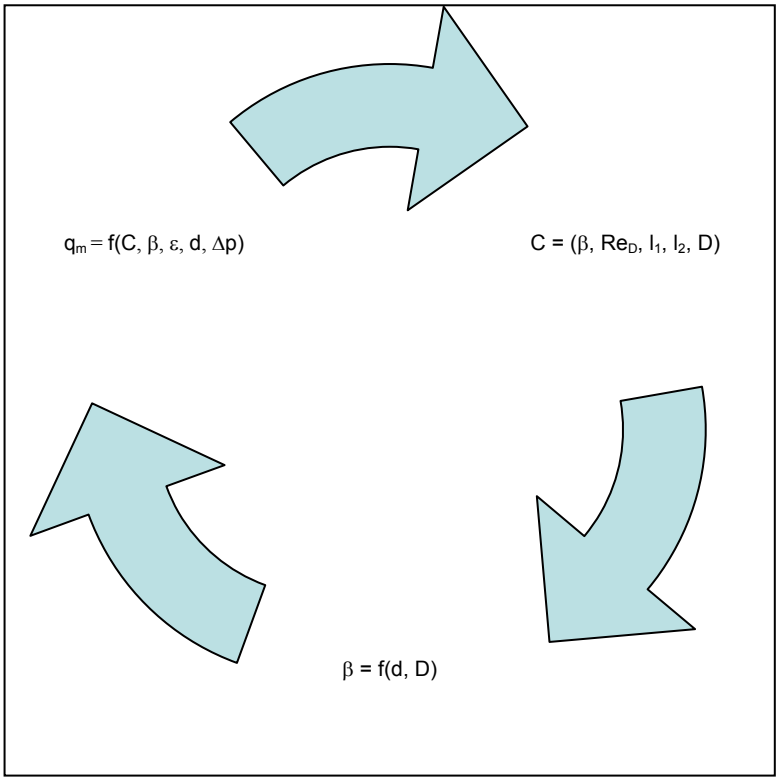
Navrhněte průměr potrubí a clony pro měření průtoku napájecí vody a pro měření průtoku admisní páry.

Použijte centrické normované clony s koutovými odběry dle ČSN ISO 5167-1.

Tab. 2.6.10.1 *Zadané hodnoty pro návrh clon a potrubí*

Jmenovitý výkon	P_{jm}	$[t \cdot h^{-1}]$	80
Regulační rozsah		$[\% P_{jm}]$	40 ÷ 105
Teplota napájecí vody	t_{NV}	[°C]	105
Tlak napájecí vody – relativní	p_{NV}	[MPa]	5
Teplota admisní páry	t_{ap}	[°C]	445
Tlak admisní páry – relativní	p_{ap}	[MPa]	3,7
Doporučená rychlost napájecí vody v potrubí	v_{NV}	$[m \cdot s^{-1}]$	1 ÷ 3
Doporučená rychlost admisní páry v potrubí	v_{ap}	$[m \cdot s^{-1}]$	30 ÷ 60
Součinitel teplotní roztažnosti materiálu potrubí		$[K^{-1}]$	1,3802E-05
Součinitel teplotní roztažnosti materiálu clony		$[K^{-1}]$	1,3391E-05

Z Obr. 2.6.10.1 je patrný postup iteračního výpočtu pro výpočet průměrů potrubí a clon. Průměry potrubí jsou z katalogu dodavatele ocelových bezešvých trubek pro odpovídající tlaky. (Pozor: Jmenovitá světlost není totéž co vnitřní průměr!). Výpočet je vhodné provádět např. pomocí software EES (Engineering Equation Solver), který má zabudované i knihovny pro určení termodynamických vlastností látek jako např. IAPWS-IF97 (International Association for the Properties of Water and Steam) a umožňuje iterační výpočty. Při výpočtu je postupováno dle vztahů (2.6.5.10), (2.6.6.1), (2.6.6.3), (2.6.6.4), (2.6.7.1), (2.6.8.1). Vypočtené hodnoty včetně mezivýpočtů jsou uvedené v Tab. 2.6.10.2



Obr. 2.6.10.1 *Vzájemná závislost jednotlivých veličin při návrhu clony*

***Tab. 2.6.10.2** Tabulka zadaných a vypočtených hodnot*

		NV	ap
p_{amb}	[kPa]	**100,00**	**100,00**
$q_{m,jm}$	[t·h^{-1}]	**80,00**	**80,00**
	[kg·s^{-1}]	22,22	22,22
$q_{m,max}$	[t·h^{-1}]	84,00	84,00
	[kg·s^{-1}]	23,33	23,33
$q_{m,min}$	[t·h^{-1}]	32,00	32,00
	[kg·s^{-1}]	8,89	8,89
t	[°C]	**105,00**	**445,00**
	[K]	378,15	718,15
přetlak	[MPa]	**5,00**	**3,70**
tlak absolutní	[MPa]	5,10	3,80
	[bar]	51,00	38,00
v_{max}	[m·s^{-1}]	**2,00**	**50,00**
$q_{V,jmen}$	[m^3·s^{-1}]	0,023219	1,861325
$q_{V,max}$	[m^3·s^{-1}]	0,024380	1,954391
$q_{V,min}$	[m^3·s^{-1}]	0,009288	0,744530
$S_{t\ vyp}$	[m^2]	0,012190	0,039088
$D_{t\ vyp}$	[m]	0,124583	0,223088
	[mm]	124,583	223,088
součinitel teplotní roztažnosti potrubí	[K^{-1}]	**1,380E-05**	**1,380E-05**
Δt od 20°C	[°C]	85,00	425,00
$D_{20°C}$ vypočtené	[m]	0,124437	0,221787
	[mm]	124,437	221,787
$D_{20°C}$ z katalogu výrobce	[mm]	**122,000**	**207,000**
	[m]	0,122	0,207
D_t	[mm]	122,143	208,214
	[m]	0,122143	0,208214
$S_{t\ sk}$	[m^2]	0,0117	0,0340
$v_{jmen\ sk}$	[m·s^{-1}]	1,98	54,67
$v_{max\ sk}$	[m·s^{-1}]	2,08	57,40
$v_{min\ sk}$	[m·s^{-1}]	0,79	21,87
$Re_{D\ jmen\ sk}$	[-]	861 361	5 163 628
$Re_{D\ max\ sk}$	[-]	904 430	5 421 810
$Re_{D\ min\ sk}$	[-]	344 545	2 065 451
ρ	[kg/m^3]	957,06	11,94
μ	[Pa·s]	2,689E-04	2,632E-05
ν	[m^2·s^{-1}]	2,810E-07	2,204E-06
i	[kJ·kg^{-1}]	443,90	3322,26
c_p	[kJ·kg^{-1}·K^{-1}]		2,30
c_v	[kJ·kg^{-1}·K^{-1}]		1,72
κ	[-]		1,34
Δp_{dif}	[Pa]	**80 000,00**	**80 000,00**
A pro C	[-]	0,0260	0,0090
β_t	[-]	**0,4982**	**0,7941**
ε_1	[-]	1,000	0,991
L_1 pro kout. odběr	[-]	0	0
L_2 pro kout. odběr	[-]	0	0
M'$_2$ pro kout. odběr	[-]	0	0
C	[-]	0,5983	0,5863
E	[-]	1,0323	1,2884
S_{clony}	[-]	0,0029	0,0215
$d_{clony\ t}$	[m]	0,060846	0,165338
	[mm]	60,846	165,338
součinitel teplotní roztažnosti clony	[K^{-1}]	**1,339E-05**	**1,339E-05**
$d_{clony\ 20°C}$	[m]	0,060777	0,164402
	[mm]	**60,777**	**164,402**
$\Delta\ \omega$	[Pa]	**58 737**	**28 377**

2.7 Seznam literatury

[2.1] ČSN ISO 5167-1: Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku – Část 1: Clony, dýzy a Venturiho trubice vložené do zcela vyplněného potrubí kruhového průřezu, 1998
[2.2] www.mattech.cz , Webové stránky firmy MATTECH, s.r.o

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

ŘÍZENÍ A REGULACE ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Ladislav Vilimec

OSTRAVA

Skripta Řízení a regulace energetických zařízení jsou určena studentům oboru Energetické stroje a zařízení na Katedře energetiky, Fakulty strojní VŠB – TU Ostrava, zejména však studentům specializace Stavba parních kotlů a tepelných zařízení.

Recenzent: Doc. Ing. Vratislav Fibinger, VŠB-TU Ostrava
Ing. Štefan Kočis, IVITAS a.s. Ostrava
© Ladislav Vilimec, 2007
ISBN …..

OBSAH

OBSAH ... **3**

ZÁKLADNÍ OZNAČENÍ, SYMBOLY A VELIČINY. ... **5**

PŘEDMLUVA ... **10**

1. ÚVOD ... **11**

2. AUTOMATIZOVANÉ SYSTÉMY ŘÍZENÍ (ASŘ) V ENERGETICE ... **15**

2.1 HLAVNÍ CÍLE ŘÍZENÍ ... 15
2.2 DECENTRALIZOVANÝ SYSTÉM ŘÍZENÍ ... 16
2.3 HIERARCHICKÁ STRUKTURA ASŘ ... 16
2.4 AUTOMATIZAČNÍ PROSTŘEDKY ... 18

3. REGULOVANÁ SOUSTAVA, REGULAČNÍ OBVOD ... **22**

3.1 ZÁKLADY DYNAMIKY REGULOVANÝCH SOUSTAV A REGULAČNÍCH OBVODŮ ... 27

4. REGULACE PARNÍCH KOTLŮ ... **40**

4.1 REGULACE VÝKONU KOTLE ... 43
4.1.1 Dynamika výparníku parních kotlů ... *46*
4.1.1.1 Dynamika výparníku s přirozenou cirkulací (bubnový kotel) ... *48*
4.1.1.2 Dynamika výparníku průtočného (průtočné kotle) ... *52*
4.1.2 Základní způsoby regulace výkonu parních kotlů ... *60*
4.1.2.1 Regulace výkonu kotle s roštovým ohništěm ... *69*
4.1.2.2 Regulace výkonu kotlů pracujících do společné sítě ... *70*
4.1.2.3 Regulace mlecích okruhů s přímým foukáním ... *71*
4.2 REGULACE TEPLOTY PÁRY ... 81
4.2.1. Dynamika přehříváku parního kotle ... *83*
4.2.2 Základní způsoby regulace teploty páry ... *96*
4.2.2.1 Regulace teploty páry změnou poměru tepelného příkonu do ... *98*
4.2.2.2 Regulace přenosem tepla z oblasti přehříváku do výparníku ... *102*
4.2.3 Základní způsoby regulace teploty přihřívané páry ... *114*
4.2.3.1 Regulace teploty přihřívané páry obtokem spalin ... *116*
4.2.3.2 Regulace teploty přihřívané páry výměníkem tepla mezi vysokotlakou a nízkotlakou párou ... *118*
4.2.3.3 Regulace teploty přihřívané páry výměníkem tepla triflux. ... *122*
4.2.3.4 Regulace teploty přihřívané páry vstřikem napájecí vody ... *124*
4.2.4 Závěrečná doporučení k regulaci teploty páry ... *127*
4.3 REGULACE NAPÁJENÍ ... 128
4.3.1 Regulace napájení kotlů s přirozenou cirkulací ... *128*
4.3.1.1 Dynamika hladiny v bubnu parního kotle ... *130*
4.3.1.2 Základní způsoby regulace napájení u kotlů s přirozenou cirkulací ... *134*
4.3.2 Regulace napájení kotlů průtočných ... *140*
4.3.2.1 Základní způsoby regulace napájení průtočných kotlů ... *146*
4.3.2.1.1 Regulace průtočných kotlů s pohyblivým koncem odpařování ... *147*
4.3.2.1.2 Regulace průtočných kotlů s pevným koncem odpařování ... *153*
4.3.3 Závěrečná doporučení k regulaci napájení ... *157*
4.4 REGULACE SPALOVÁNÍ ... 160
4.4.1 Dynamické vlastnosti spalovacích zařízení ... *163*
4.4.2 Základní způsoby regulace množství spalovacího vzduchu ... *167*
4.4.2.1 Regulace množství (přebytku)spalovacího vzduchu metodou palivo-vzduch ... *171*
4.4.2.2 Regulace množství (přebytku) spalovacího vzduchu metodou pára-vzduch ... *172*
4.4.2.3 Regulace množství spalovacího vzduchu u kotlů s roštovým ohništěm. ... *174*
4.5 REGULACE PODTLAKU V KOTLI ... 176
4.6 REGULACE TEPLOTY SPALIN ZA KOTLEM ... 178
4.6.1 Regulace výstupní teploty spalin u kotle bez spalinového ohříváku vzduchu ... *181*
4.6.2 Regulace výstupní teploty spalin u kotle se spalinovým ohřívákem vzduchu ... *182*

5. REGULACE ČINNÉHO VÝKONU ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU ... **190**

5.1 REGULACE NA KONSTANTNÍ TLAK PÁRY ZA KOTLEM (KLASICKÁ REGULACE) ... 195

5.2 REGULACE PŘEDTLAKOVÁ 197
5.3 REGULACE S KLOUZAVÝM TLAKEM PÁRY 199
5.4 REGULACE S MODIFIKOVANÝM (ŘÍZENÝM) KLOUZAVÝM TLAKEM PÁRY– ŽÁDANÁ HODNOTA TLAKU PÁRY SE ŘÍDÍ PODLE VÝKONU. 200
5.5 OBECNÁ STRUKTURA REGULACE ČINNÉHO VÝKONU ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ 202

6. REGULACE HORKOVODNÍCH KOTLŮ 204

7. REGULACE VÝKONU PARNÍCH TURBÍN 206

7.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ REGULÁTORŮ TURBÍN 207
7.1.1 Regulace výkonu protitlaké turbíny 207
7.1.2 Regulace výkonu kondenzační turbíny s regulovaným odběrem tepla 208

8. REGULACE PŘEPOUŠTĚCÍCH A REDUKČNÍCH STANIC 209

9. DISKRÉTNÍ SYSTÉMY ŘÍZENÍ 212

10. STAVOVÁ TEORIE ŘÍZENÍ [4], [54], [62] 215

11. ZÁKLADNÍ NÁZVOSLOVÍ 219

12. LITERATURA 222

ZÁKLADNÍ OZNAČENÍ, SYMBOLY A VELIČINY.

AČ – akční člen
ASŘ – automatizovaný systém řízení
AO – autonomní ochrany
BUS – sběrnice
D – derivační regulátor
DMS – digitální měřící systém
EKO – ohřívák vody
G – přenosová funkce
$G_{(s)}$ – přenos v L - transformaci
$G_{R(s)}$ – přenos regulátoru
$G_{S(s)}$ – přenos akční veličiny v soustavě
$G_{SVs)}$ – přenos poruchové veličiny v soustavě
HK – horkovodní kotel
HRSG – spalinový kotel (Heat Recovery Steam Generator)
CH – vstřikový chladič
CHČ – chladící čerpadlo
CHP – chladič páry
CHV – chladící věž
ΔI_{OV} – přírůstek entalpie na ohříváku vody
ΔI_{PR} – přírůstek entalpie na přehříváku
ΔI_{V} – přírůstek entalpie na ohříváku vody
K – kotel
Ko – kondensátor
K_V – akumulační konstanta výparníku
KČ – kondensátní čerpadlo
KHV – klapka horkého vzduchu
KO – kompresor, komplexní ochrany
KSV – klapka studeného vzduchu
KT – kondensační turbína
KTO – kondenzační turbína odběrová
KV – kouřový ventilátor
L – operátor přímé Laplaceovy transformace
L_{DO} – dohřívací úsek varnice
L_{MIN} – minimální délka vstřiku
L_{OD} – odpařovací úsek varnice
L_{PR} – přehřívací úsek varnice
L_V – otápěná délka varnice, délka výparníku
LUVO – spalinový ohřívák vzduchu
M_1 ; M_2 – množství páry před a za vstřikem
$M_{1(0)}$ – vstupní průtok ohřívaného média (páry), množství páry před vstřikem
$M_{1(L)}$ – výstupní průtok ohřívaného média (páry), množství páry za vstřikem
$M_{2(0)}$ –vstupní průtok topného média (spalin)
$M_{2(L)}$ – výstupní průtok topného média (spalin)
M_a – množství páry uvolněné nebo zkondensované v důsledku změny tlaku ve výparníku
M_o – množství odluhu, množství páry v obtoku
M_{EKO} – množství vody přes ohřívák vody

M_K – množství vody na výstupu z kotle
M_{NV} – množství napájecí vody
M_P – okamžité množství páry dodávané kotlem
M_{PQ} – sytá pára vyrobená ve výparníku,
M_{PV} – množství přivedeného paliva, množství páry z výparníku
M_{PVa} – akumulované množství prášku ve mlýně
M_{PV1} – množství přiváděného uhlí do mlýna
M_{PV2} – množství odváděného uhelného prášku z mlýna
ΔM_{PQ} – změna množství vyrobené páry ve výparníku
M_{PS} – množství páry odebírané spotřebičem
ΔM_{PS} – změna množství odebírané páry spotřebičem
M_{RK} – množství recirkulované vody na výstupu z kotle
M_{RS} – množství recirkulované vody před spotřebič
M_S – změna ventilace mlýna, množství vody před spotřebičem
M_V – množství vstřikované vody
M_{VS} – množství vstřikované vody
M_{VZ} – množství spalovacího vzduchu, množství vzduchu do mlýna
M_{SP} – množství spalin
$M_{T(0)}$ – průtok VT páry přes triflux
MČ – měřící člen
MP1,2 – vstupní a výstupní díl přihříváku páry (mezipřehřívák, NT pára)
MV – mlýnský ventilátor
NČ – napájecí čerpadlo
NN – napájecí nádrž
NT – nízkotlaký díl turbíny
NTO – nízkotlaký ohřívák vody
NV – napájecí voda
O – obrazovka
OJ – ovládací jednotka
OJFS – ovládací jednotka funkčních skupin
OV – ohřívák vody
P – palivo, výkon, proporcionální přenos, proporcionální regulátor
P_e – elektrický výkon bloku
P_{jm} – jmenovitý elektrický výkon bloku
$P_{SŽ}$ – požadovaný výkon soustavy
PB – parní buben
PD – proporcionálně – derivační přenos
PI – proporcionálně – integrační regulátor
PID – proporcionálně – integračně – derivační regulátor
POV – parní ohřívák vzduchu
PR – přehřívák páry
PT – protitlaková turbína, plynová turbína
Q_a – akumulovaná energie (teplo)
Q_C – celkové teplo přivedené do kotle
Q_K – teplo přivedené do přehříváku
$Q_{PŘ}$ – množství přivedeného tepla do kotle, přivedené teplo do varnice, teplo předané z topného média do ohřívaného
Q_S – teplo přivedené do výparníku vč. ohříváku vody
R – regulátor
R_t – regulátor teploty primární směsi

R_{OPT} – optimalizační regulátor
R_P – regulátor tlaku
R_V – regulátor výkonu
R_{VZ} – regulátor množství vzduchu
RČ – recirkulační čerpadlo
RN – regulátor napájení
RP – regulátor průtoku
RS – redukční stanice, regulační systém, regulovaná soustava
RVNT – regulační ventil nízkotlaké části turbíny
RVS – regulační ventil vstřiku
RVV – regulační vzduchový ventilátor
RVST – regulační ventil vstřiku Triflux
S – spotřebič tepla, soustava
S_e – separátor
S_T – statika primární regulace
SK – spalovací komora
SK – směšovací kus
T – tiskárna
T_1;T_2 – teplota páry před a za vstřikem
$T_{1(0)}$ – vstupní teplota ohřívaného média (páry),teplota páry před vstřikem
$T_{1(L)}$ – výstupní teplota ohřívaného média (páry), teplota páry za vstřikem
$T_{2(0)}$ – vstupní teplota topného média (spalin)
$T_{2(L)}$ – výstupní teplota topného média (spalin)
T_d – dopravní zpoždění
T_m – časová konstanta mlýna
T_n – doba náběhu
T_p – doba přechodu
T_s – teplota stěny
T_u – doba průtahu
T_{NV} – teplota napájecí vody
T_P – teplota výstupní páry
T_V – časová konstanta výparníku, teplota vstřikované vody
T_{VS} – množství vstřikované vody
TG – turbogenerátor
TRV – trojcestný regulační ventil
+ΔU – malé kladné napětí
UOJ – ústřední ovládací jednotka
UP – ústřední paměť
V – výparník
V_P – objem parního prostoru bubnu
V_{SP} – objem části výparníku zaplněný sytou parou
V_{VO} – objem části výparníku zaplněný vodou
V_{VZt} – teoretické objemové množství vzduchu pro spálení 1kg paliva
$V_Ž$ – objem kovových částí výparníku
VK – videokopírka
VS – regulační vstřik, vstřik
VST – vstřik před triflux
VT – vysokotlaký díl turbíny
VTO – vysokotlaký ohřívák vody
VV – vzduchový ventilátor

$Y_{(S)}$ – obraz funkce výstupního signálu v L. transformaci
ΔY_T – otevření regulačního ventilu turbíny
Z – statické zesílení
ZSB – zabezpečovací systém bloku
ZSU – zásobník surového uhlí
ZT – zápis trendů, zavodňovací trubky, závěsné trubky

a – pomocná regulovaná veličina výparníku
$a_o;a_{1;}$ – kořeny diferenciální rovnice lineární soustavy 1. řádu
d – průměr varnice
f_{jm} – jmenovitá frekvence v síti
h – výška hladiny v bubnu, výška vrstvy uhlí
i_{nv} – entalpie napájecí vody
i_p – entalpie páry
m´ – obsah vody ve výparníku
m´´ – hmotnost veškeré páry ve výparníku (varnice i parní buben)
m_s – hmotnost té části výparníku, z níž se při změně tlaku předává teplo do pracovního média
n – otáčky podavače, otáčky roštu
n_p – otáčky podavače
n_m – otáčky mlýna
Δp – tlaková diference mezi vstupem spalin a výstupem primární směsi u ventil. mlýna, diference kroužkového mlýna
p_b – tlak páry v bubnu
p_o – podtlak v ohništi
p_p – tlak páry za kotlem
$p_{pž}$ – požadovaný tlak
p_s – tlak páry v síti
q – tepelný tok z vnitřního povrchu trubky do média
r – výparné teplo
s – komplexní proměnná
$\Delta t_{1;2}$ – provozní odchylka
t_{EKO} – teplota nap. vody před EKO
t_{EO} – teplota spalin za EKO
t_{hav}^{max} – havarijní max. teplota směsi
t_{hav}^{min} – havarní min. teplota směsi
t_k – teplota spalin za kotlem
t_{ko} – teplota před komínem, teplota kondensace
t_{nv} – teplota napájecí vody
t_{ok} – teplota na konci ohniště
t_p – teplota páry za kotlem
t_{pr} – teplota přehřáté páry na výstupu z výparníku
t_{RB} – kyselý rosný bod spalin
t_{sm} – teplota primární směsi
t_{st} – teplota stěny poslední teplosměnné plochy
w – rychlost posuvu podavače uhlí
x_v – obsah páry na výstupu z výparníku

α – přebytek spalovacího vzduchu ve spalinách
α_e – ekonomický přebytek vzduchu
α_{opt} – optimální přebytek vzduchu
η_k – účinnost kotle
ξ_c – ztráta nedopalem
ξ_k – komínová ztráta
ξ_{vs} – vlastní spotřeba el. energie
$\Delta\tau_{max}$ – doba převýšení teploty
τ_r – čas připojení regulačního obvodu
τ_s – doba setrvání na vyšší teplotě

PŘEDMLUVA

V těchto skriptech získá posluchač základní informace především o dynamických vlastnostech a základních regulačních obvodech parních kotlů a některých dalších tepelných zařízení používaných v elektrárnách a teplárnách, která s provozem kotlů bezprostředně souvisí.

V úvodních kapitolách jsou uvedeny alespoň ty nejzákladnější informace o hlavních cílech řízení, obecné informace o dynamice regulovaných soustav, jakož i jejich znázornění pomocí principiálních (funkčních) schémat.

V dalších kapitolách jsou pak popsány možné použitelné alternativy řešení hlavních regulačních obvodů – výhradně však z pohledu projektanta energetického zařízení – a u každého způsobu regulace jsou v úvodu analyzovány i základní dynamické vlastnosti regulované soustavy.

Návrh energetického zařízení, např. parního kotle, nelze redukovat jen na technicky správnou aplikaci vědeckých poznatků z oblasti spalování fosilních či alternativních paliv, teorie proudění nebo přenosu tepla a hmoty, případně materiálového inženýrství.

Inženýrsky správnou aplikaci výsledků výše uvedených vědeckých i dalších disciplín lze z pohledu komplexního návrhu energetického zařízení chápat jako „pouze nutný“ předpoklad pro správné dimenzování zařízení (např. kotle) podle zadaných požadavků a parametrů.

Parní kotel, jakožto součást elektrárenského bloku nebo výrobního zařízení teplárny či energetického zdroje pro využití primární energie alternativních paliv, musí mít vlastnosti, které mu umožní dosáhnout očekávaný vysoce spolehlivý a bezpečný provoz i kvalitu dodávané energie – a je proto vybaven odpovídajícím systémem řízení a regulace.

U tak složitého zařízení, jakým energetický blok (resp. parní kotel) bezesporu je, nepřekvapuje, že základní představa o použitých systémech regulace a koncepci řízení musí být formulována současně s návrhem technologického zařízení.

Je proto nezbytné, aby projektant energetického zařízení měl i potřebné minimální znalosti z oboru regulace a řízení a mohl spolupracovat s dodavatelem těchto zařízení.

Snahou autora těchto skript bylo poskytnout posluchačům právě takové informace, které by tuto spolupráci umožnily.

Podrobnější informace o kreslení schémat a o struktuře značení najde čtenář na portálu VŠB-TU pod názvem Studijní opora, Konstruování v oboru, Kap. 1, Technologická schémata kotle a Studijní opora, Provoz a regulace energetických zařízení, Kap. 1, Struktura značení strojní technologie z pohledu tvorby SKŘ.

Význam použitých symbolů a indexů je uveden především u příslušných obrázků a rovnic, což při značném počtu a různorodosti použitých literárních pramenů by mělo napomoci ke snadnější orientaci v textu.

Děkuji rovněž svým spolupracovníkům Ing. Pavlu Milčákovi a Ing. Jiřímu Tomčalovi za pomoc při zhotovení obrázků a konečné úpravě skript.

1. ÚVOD

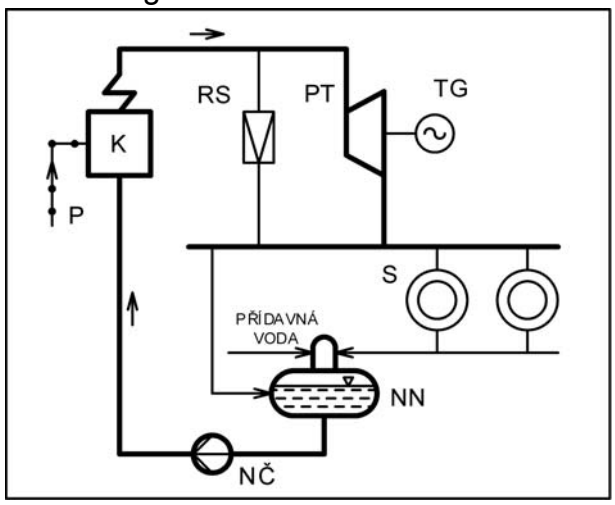
Teplo a elektřina se z fosilních paliv vyrábí ve výtopnách (teplo), teplárnách (teplo a el. energie) a v elektrárnách (el. energie).

Moderní teplárny a elektrárny dnes – vzhledem k požadavkům jako jsou: vysoké provozní parametry, odpovídající bezpečnost a provozní spolehlivost a v neposlední řadě i splnění norem či zásad pro ochranu životního prostředí – představují velmi složité systémy.

Tak např. u elektrárenského bloku o výkonu 500 MW se průběžně sleduje cca 3000 provozních veličin, provozuje se asi 200 regulačních obvodů a ovládá se cca 1400 pohonů různých zařízení a armatur.

Dnes se navíc očekává, že energetické zdroje budou navrženy pro spalování více druhů paliv, případně pro přídavné spalování alternativních paliv spolu s uhlím jako hlavním palivem. Ve stále větší míře se uplatňují požadavky na časté a rychlé najíždění energetických zdrojů, jejich vybavení diagnostickým systémem a provozní optimalizací.

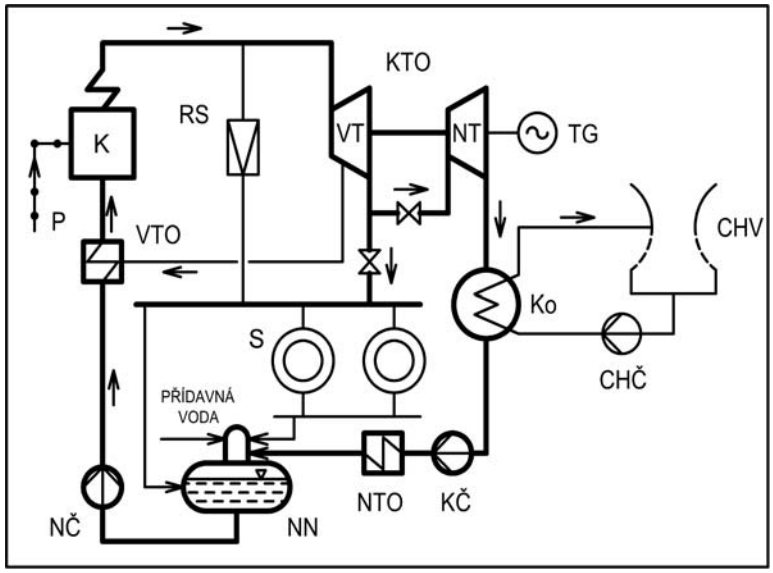
Pro představu o rozsahu řízených systémů je na **obr. 1.1** uvedeno zjednodušené základní schéma teplárny s parní protitlakou turbínou.



P – palivo K – kotel RS – redukční stanice TG – turbogenerátor
PT – protitlaká turbína S – spotřebič NČ – napájecí čerpadlo
NN – napájecí nádrž

Obr. 1.1 *Teplárna s protitlakou turbínou*

Pára z kotle ***K*** v němž se spaluje fosilní palivo P se vede na parní protitlakou turbínu ***PT***, jejíž výstup je připojen na parní síť, z níž jsou napájeny spotřebiče tepla ***S***. Kondenzát se shromažďuje v napájecí nádrži ***NN***, kde probíhá termické odplynění přídavné napájecí vody a napájecí voda se napájecím čerpadlem ***NČ*** dopravuje do parního kotle. Pro najíždění a odstavování je zdroj vybaven redukční stanicí ***RS***, přes níž lze zajistit dodávku tepla do spotřebičů ***S*** i při poruše turbíny ***PT***.

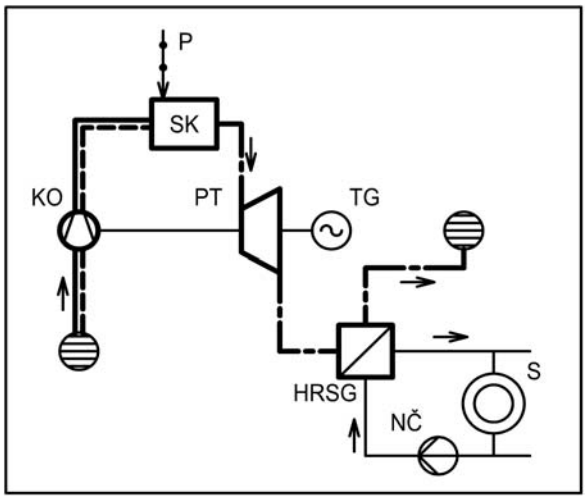


KTO- kondenzační turbína odběrová VT – vysokotlaký díl turbíny
NT – nízkotlaký díl turbíny CHV – chladící věž Ko – kondenzátor
CHČ – chladící čerpadlo VTO – vysokotlaký ohřívák
NTO – nízkotlaký ohřívák KČ – kondenzátní čerpadlo

Obr. 1.2 *Teplárna s kondenzační odběrovou turbínou*

Zjednodušené schéma teplárny s kondenzační odběrovou turbínou je

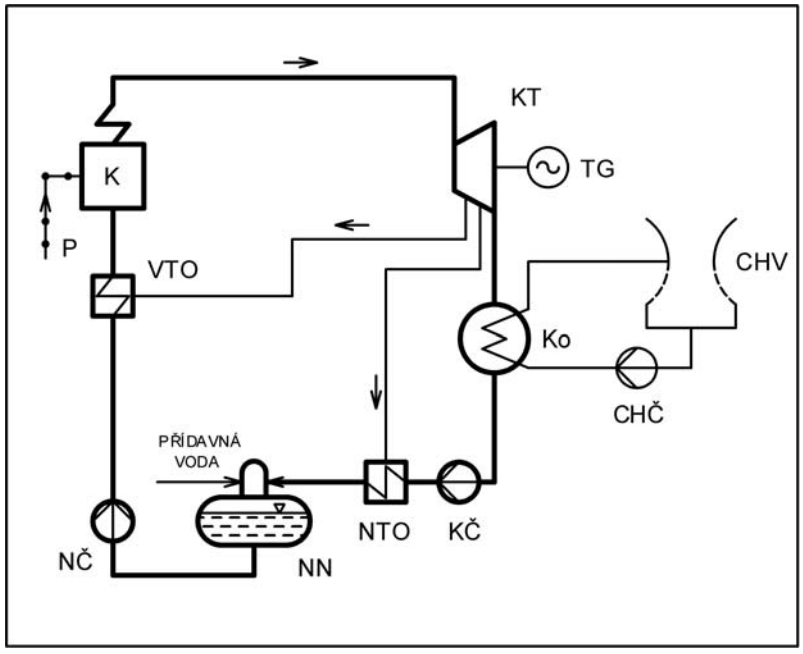
uvedeno na **obr. 1.2**. Pára po průchodu vysokotlakým dílem kondenzační turbíny odběrové ***KTO*** se může rozdělit tak, že část jde do parní sítě pro napájení spotřebičů tepla ***S*** a zbývající část proudí přes nízkotlaký díl *NT* kondenzační turbíny do kondenzátoru ***Ko***, kde se zkondenzuje chladící vodou, jejíž cirkulaci mezi kondenzátorem ***Ko*** a chladící věží ***CHV*** zajišťuje chladící čerpalo ***CHČ***. Kondenzát pak do napájecí nádrže ***NN*** dopravuje kondenzátní čerpadlo ***KČ*** přes nízkotlaké ohříváky vody ***NTO***. Napájecí voda se pak napájecím čerpadlem ***NČ*** dopravuje přes vysokotlaké ohříváky ***VTO*** do kotle.



SK- spalovací komora P – palivo (plyn) KO – kompresor
PT –plynová turbína HRSG – kotel na odpadní teplo

Obr. 1.3 *Teplárna se spalovací turbínou*

Na **obr. 1.3** je uvedeno zjednodušené schéma teplárny se spalovací turbínou. Ve spalovací komoře ***SK***, do níž spalovací vzduch dodává kompresor ***KO***, se spaluje např. plyn ***P*** a vzniklé spaliny proudí přes plynovou turbínu ***PT*** do spalinového kotle ***HRSG*** (Heat Recovery Steam Generator), kde předají teplo páře nebo vodě, která zajišťuje dodávku tepla do spotřebiče ***S***. Ochlazenou oběhovou vodu nebo kondenzát zpět do spalinového kotle dopravuje např. napájecí čerpadlo ***NČ***.



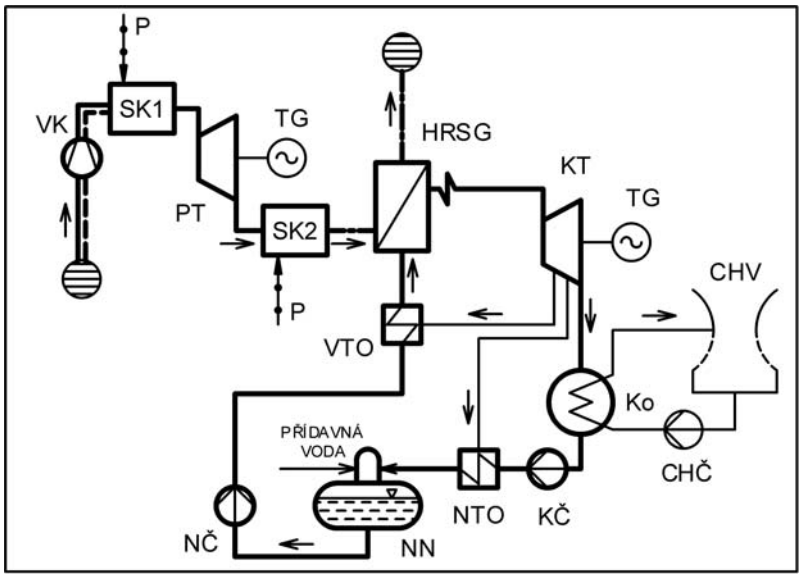
KT- kondenzační turbína CHV – chladící věž Ko – kondenzátor CHČ – chladící čerpadlo
VTO – vysokotlaký ohřívák NTO – nízkotlaký ohřívák KČ – kondenzátní čerpadlo

Obr. 1.4 *Kondenzační elektrárna*

Zjednodušené schéma kondenzační elektrárny je znázorněno na **obr. 1.4**. V tomto případě se dodává jen elektrická energie, dodávka tepla se nezajišťuje.

Na posledním zjednodušeném schématu na **obr. 1.5** je znázorněno zapojení paroplynové elektrárny. Spaliny po expanzi ve spalovací turbíně ***PT*** se ve spalovací komoře ***SK2*** přitápí plynem ***P*** a to alespoň do výkonu, který odpovídá přebytečnému kyslíku ve spalinách ze spalovací turbíny ***PT***. V parním kotli ***HRSG*** se pak vyrábí vysokotlaká pára, která se vede na kondenzační turbínu ***KT***.

Uvedená schémata energetických zdrojů jsou značně zjednodušená a neumožňují si učinit reálnou představu o počtu měřených veličin a řízených strojů a zařízení. Nicméně umožňují – při troše představivosti – si udělat názor na složitost provozování (řízení) teplárny a elektrárny.

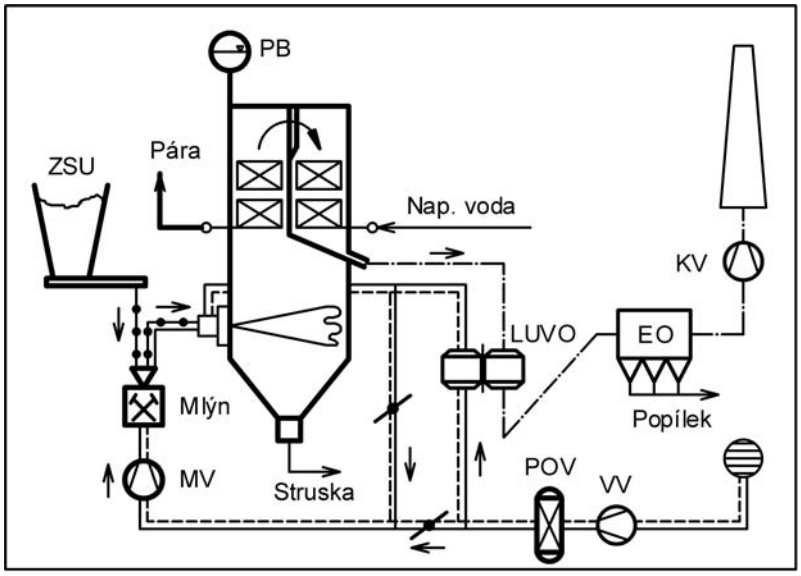


VK – vzduchový kompresor SK1, SK2 – spalovací komora

Obr. 1.5 *Paroplynová elektrárna*

Pro doplnění této představy je na **obr. 1.6** uvedeno zjednodušené schéma kotelny s parním kotlem se základním příslušenstvím na spalování uhlí. Uhlí ze zásobníku surového uhlí ***ZSU*** se suší a mele ve mlýně a pneumaticky se dopravuje do hořáků kotle.

Spalovací vzduch se vzduchovým ventilátorem ***VV*** dopravuje nejdříve přes parní ohřívák vzduchu ***POV***, kde se ohřeje např. na 60°C. Pak se rozdělí a část se dopravuje mlýnským ventilátorem ***MV*** jako primární vzduch do mlýna, zbytek se vede přes spalinový ohřívák vzduchu ***LUVO*** jako sekundární vzduch do hořáků kotle.



ZSU – zásobník surového uhlí PB – parní buben MV – mlýnský ventilátor
LUVO – ohřívák vzduchu EO – elektrostatický odlučovač KV – kouřový ventilátor
POV – parní ohřívák vzduchu VV – vzduchový ventilátor

Obr. 1.6 *Schéma kotelny s parním kotlem na spalování* uhlí

Spaliny se z kotle odsávají kouřovým ventilátorem ***KV*** do komína. Kotel je s přirozenou cirkulací vody ve výparníku. Napájecí voda se přivádí přes ohřívák vody (ekonomizér) do parního bubnu ***PB***, stěny spalovací komory jsou zapojeny jako výparník kotle. Pára se na požadovanou teplotu přehřívá ve vícestupňovém přehříváku, jehož jednotlivé části jsou umístěny ve spalinovém kanálu kotle.

Návrh regulace a ASŘ představuje řadu úloh, které lze řešit vícero způsoby. Není možné uvést obecně platnou metodu jejich navrhování, protože složitost

problémů a náročnost jejich řešení činí z návrhu záležitost zkušenosti, která je daná znalostí aplikace teoretických a praktických principů.

Tak např. při návrhu regulace se doporučuje [7] respektovat některé zásady, jako např. jsou:

a) návrh regulačního obvodu lze řešit různými způsoby, které se mohou lišit. Je to dáno tím, že je vždy více veličin neznámých než daných.
b) nejčastější metoda řešení spočívá v extrapolaci z realizovaných a vyzkoušených řešení
c) jakmile se přijme nějaký princip řešení musí se souhrn požadovaných technických vlastností převést do „řeči“ regulačního obvodu nebo ASŘ. Tato etapa řešení patří mezi nejobtížnější a **nutně vyžaduje úzkou spolupráci projektanta regulace** a **ASŘ** se zadavatelem – v tomto případě **s projektantem energetického zařízení**, který musí své požadavky formulovat tak, aby mohly být vyjádřeny ve formě kritérií pro činnost regulace a ASŘ.
d) při vlastním návrhu se musí mít na zřeteli, že regulační obvod (stejně jako řídící systém) tvoří celek, tzn. každý jeho prvek se musí posuzovat z hlediska celkové činnosti.

Při tvorbě ASŘ a jeho uvádění do provozu u výše uvedených systémů se dodavatel setká s celou řadou problémů, které lze rozdělit do několika oblastí. Tak např.:

- při návrhu ASŘ se pro dosažení optimálního efektu řízení a regulace předpokládá znalost souvislostí mezi konstrukčním provedením řízené (regulované) soustavy a jejími dynamickými vlastnostmi. Řešením těchto otázek se zabývá zejména konstruktér zařízení. Znalost dynamických vlastností soustav má však širší uplatnění – umožňuje např. rozbor vzniklých poruchových stavů a zpětně pak optimalizovat konstrukční provedení zařízení.

  Zjišťujeme-li dynamické vlastnosti dané soustavy, tak mluvíme o **identifikaci soustavy**.

- při syntéze ASŘ se musí vycházet z optimálního návrhu celkové koncepce řízení. Navrhuje se **optimální struktura** (vazba mezi regulovanou soustavou a regulátorem), volí se vhodné algoritmy a technické prostředky.

- v konečné fázi (po montáži technologického zařízení a ASŘ) se musí celý systém seřídit tak, aby se dosáhla **požadovaná kvalita řízení a regulace** dle kontraktu.

Ve skriptech jsou uvedeny jen základy dynamiky soustav a základní dynamické vlastnosti hlavních popisovaných soustav, stejně tak jako základní poznatky z oblasti návrhu struktury ASŘ, algoritmů a technických prostředků. Skripta jsou zaměřena především na **popis a problematiku řízení základních procesů u energetických zařízení z pohledu projektanta a konstruktéra energetických zařízení** a měla by posluchačům tohoto oboru umožnit potřebnou orientaci při nasazení moderních systémů ASŘ v energetice – alespoň ve smyslu výše uvedených bodů a) až d), především ale bodu c).

2. AUTOMATIZOVANÉ SYSTÉMY ŘÍZENÍ (ASŘ) V ENERGETICE

Provozovat tak komplikované systémy jakými jsou teplárny a elektrárny znamená, zjednodušeně řečeno, řídit jejich provoz tak, aby výroba tepla a elektřiny byla **ekonomická** (tedy provozní náklady byly optimální) a provoz jednotlivých zařízení a teplárny či elektrárny jako celku byl **spolehlivý** (dodávka tepla a elektřiny) a **bezpečný** (havárie – zničení zařízení, vliv provozu na životní prostředí, bezpečnost a zdraví obsluhy atd.).

Takto chápaný provoz tepláren a elektráren je dnes nemyslitelný bez odpovídajícího automatizovaného systému řízení (ASŘ), neboť vzhledem k množství zpracovávaných informací by nebylo možné zaručit zejména spolehlivý a bezpečný provoz systému.

Řízení technologických zařízení se někdy definuje jako působení na regulovatelné parametry řízeného systému (vstupní veličiny) s cílem dosáhnout optimálního přizpůsobení systému (a jeho výstupních parametrů) proměnlivým vnějším podmínkám.

2.1 HLAVNÍ CÍLE ŘÍZENÍ

Abychom mohli definovat hlavní cíle řízení rozdělíme pro tento účel řízení do pěti hlavních činností. Jsou to:

a) **Sběr a zpracování dat.** Tato část ASŘ zajišťuje měření veličin, kalibraci měřících prvků, uložení naměřených dat do paměti, zápis provozního a poruchového protokolu a kontrolu, zda naměřené hodnoty nevybočují z pásma normálního provozu (testování). Některá zařízení zajišťující tuto činnost (v souvislosti s požadovanou vysokou spolehlivostí) bývají provedena jako redundantní (zdvojená).

b) **Ochrana zařízení při mimořádných stavech**. Tato část ASŘ se nazývá zabezpečovací systém bloku (ZSB). Jeho úkolem je zabránit poruchám zařízení, případně neplánovaným odstávkám (výpadky výkonu), nebo snížení výkonu. Od ZSB se očekává především maximální provozní spolehlivost a rychlý zásah.

c) **Udržování vybraných provozních parametrů** na požadované úrovni. Tato část ASŘ se nazývá regulační systém (RS). Tento je v činnosti při provozu v regulačním rozsahu. (Základní „normální“ provozní režim.)

   Při najíždění a odstavování (tedy při mimořádných stavech) a provozních režimech s výkonem nižším než je spodní hranice regulačního rozsahu není RS v provozu nebo se struktura regulace přepíná na režim při daném mimořádném stavu (např. regulace při najíždění, odstavování atd.).

d) **Řízení provozu při mimořádných stavech.** Jedná se o nestandardní provoz zařízení. Především je to najíždění a odstavování zařízení a různé poruchové provozní stavy.

   Tyto činnosti v rámci ASŘ zajišťují „logické automaty“, což jsou ty části ASŘ, které jsou schopné realizovat logické funkce (postup, sled operací).

e) **Optimalizace.** Jedná se zejména o různé optimalizační výpočty, bilanční a ekonomické výpočty, případně výpočty zbytkové životnosti apod.

Při aplikaci ASŘ u jednotlivých konkrétních energetických zdrojů nemusí být nutně realizovány všechny uvedené činnosti v bodech a) až e).

Lze očekávat, že u všech aplikací se budou realizovat činnosti: „sběr a zpracování dat“, jakož i „ochrana zařízení při mimořádných stavech“, eventuálně „optimalizace“.

Funkci „udržování vybraných provozních parametrů“ lze realizovat případně i pomocí klasických analogových obvodů, a činnosti při „řízení provozu v mimořádných stavech“ je možné omezit jen na některé z mimořádných stavů nebo lze tyto činnosti zajišťovat jen částečně. V rámci ASŘ nezajišťované činnosti pak musí zajistit operátor.

Z pohledu investora se uplatňuje jiný požadavek na úroveň ASŘ v případě výstavby zcela nového energetického zdroje a v případě rozšíření (rekonstrukce) stávajícího energetického zdroje o novou jednotku. V posledním případě se někdy úroveň ASŘ přizpůsobuje úrovni stávajícího systému řízení, případně s mírnou modernizací.

2.2 DECENTRALIZOVANÝ SYSTÉM ŘÍZENÍ

Dnes nasazované systémy automatizovaného řízení v energetice jsou výsledkem určitého vývoje, jehož současnou vývojovou etapu představuje **decentralizované řízení** (distribuovaný systém). V tomto případě je celý řídící systém rozdělen do více subsystémů, u nichž jsou pomocí mikroprocesorů řízeny jednotlivé funkční skupiny a prvky. Zjednodušené schéma decentralizovaného řízení je na **obr. 2.1**.

Ústřední řídící počítač dostává z těchto subsystémů pouze nejdůležitější informace pro řízení bloku jako celku. (Sníží se tak výrazně počet vstupů a výstupů centrálního počítače, počítač je jednodušší a lacinější.) Pro zvýšení provozní spolehlivosti ASŘ se důležité části řídícího systému zdvojují – jsou redundantní.

Spojení mezi jednotlivými prvky ASŘ je provedeno pomocí sběrnice (bus), která (pro zajištění spolehlivosti) se provádí zdvojená a u moderních systémů je provedena z optických vláken. Informace mezi jednotlivými prvky a úrovněmi ASŘ se předávají výhradně číslicovou formou s příslušnou adresou.

2.3 HIERARCHICKÁ STRUKTURA ASŘ

Pro současné automatizované systémy řízení používané pro řízení energetických bloků je charakteristická jejich hierarchická struktura.

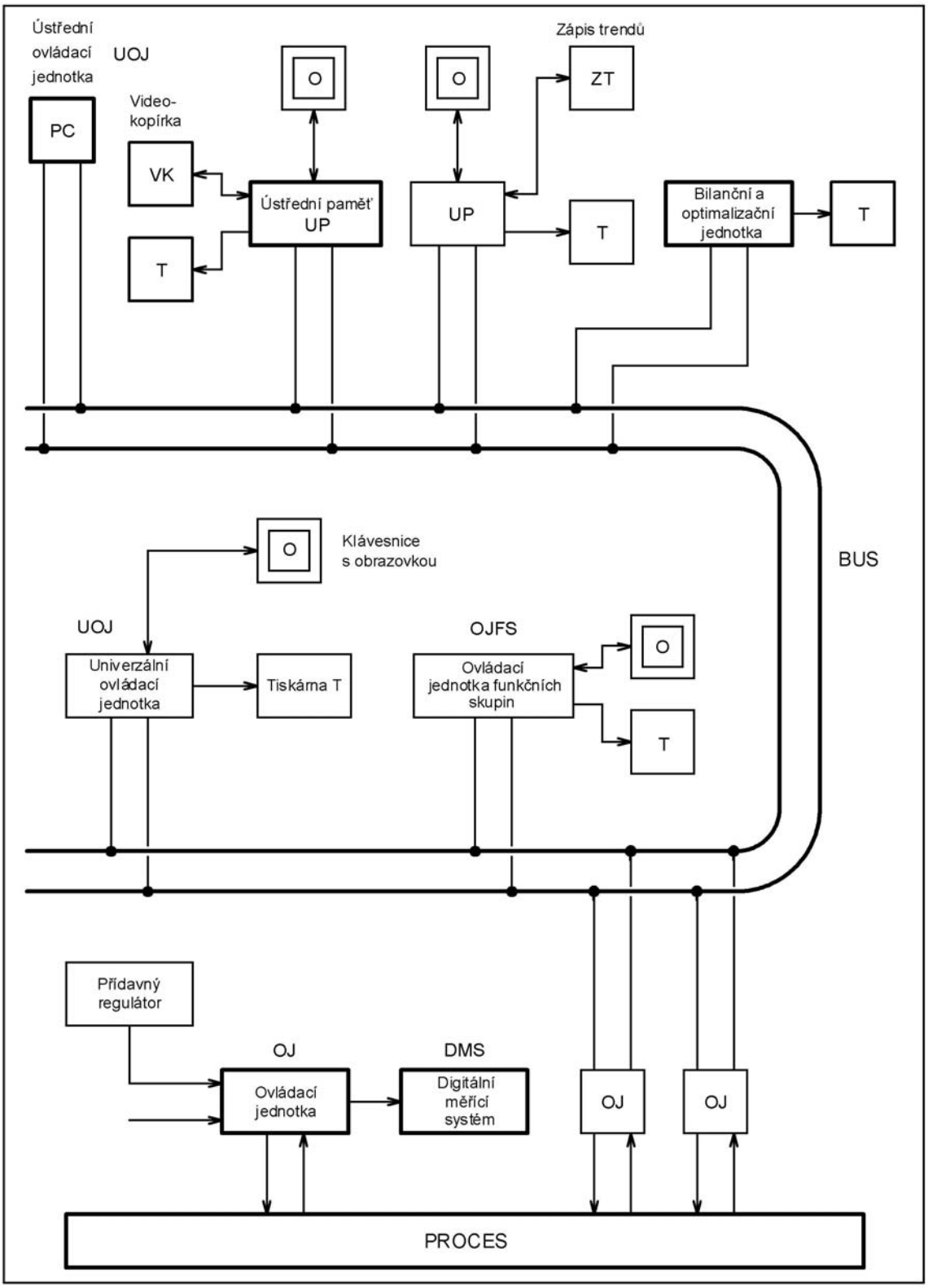
Dělení do hierarchických úrovní umožňuje:

- decentralizaci celého systému
- postupné nasazování automatizačních prostředků (podle stavu techniky a technologie)
- snížit počet informačních vazeb

Počet hierarchických úrovní řídícího systému bývá různý a závisí na struktuře a složitosti technologického zařízení.

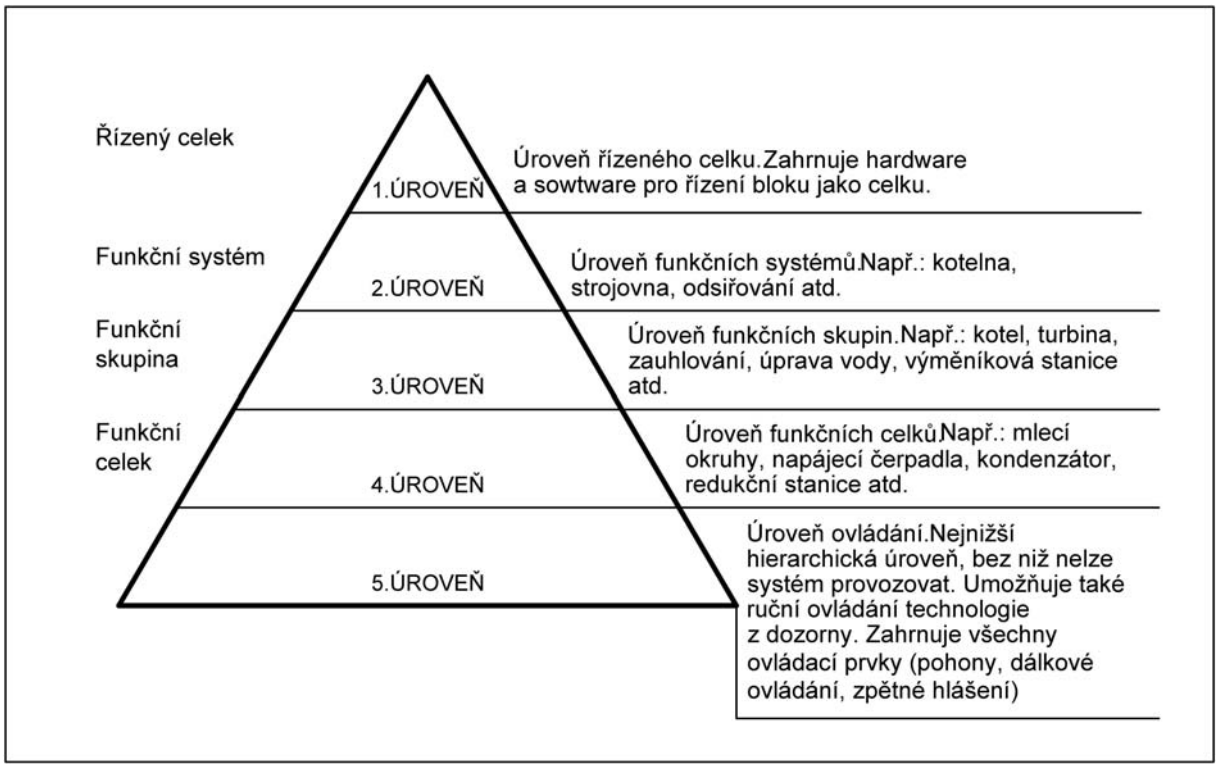
U velkých elektrárenských bloků mají ASŘ 4 až 5 úrovní; první úroveň je nejvyšší úroveň (řízeného celku) a zahrnuje hardware a software pro řízení bloku.

Příklad možné hierarchické struktury je znázorněn na **obr. 2.2**.



UOJ – ústřední ovládací jednotka OJFS – ovládací jednotka funkčních skupin VK – videokopírka UP – ústřední paměť
O – klávesnice s obrazovkou OJ – ovládací jednotka ZT – zápis trendů DMS – digitální měřící systém
T – tiskárna BUS - sběrnice

Obr. 2.1 *Decentralizované řízení*



Obr. 2.2 *Příklad hierarchické struktury ASŘ u elektrárenských bloků*

Nejnižší hiearchická úroveň je úroveň ovládací, která zahrnuje všechny ovládací prvky (pohony, dálkové ovládání, zpětné hlášení) a je základní a nejrozsáhlejší částí řídícího systému, bez níž nelze blok provozovat. Umožňuje i ruční individuální ovládání technologie z dozorny.

2.4 AUTOMATIZAČNÍ PROSTŘEDKY

Základní automatizační prostředky pro nasazení ASŘ pro řízení energetických bloků lze podle způsobu jejich činnosti rozdělit na prostředky pro:

- spojité řízení technologie
- diskrétní řízení technologie
- zabezpečovací systém bloku (ZSB)

a) Spojité řízení technologie

Toto je tzv. analogová část řídícího systému. Obvykle jsou to klasické regulační obvody pracující se spojitými signály a s algoritmem P, PI, PID. Postupně s vývojem ASŘ přebíraly jejich funkci číslicové regulátory, takže dnes u nejmodernějších ASŘ pracují analogově pouze některé měřící členy a některé ukazovací a registrační přístroje.

b) Diskrétní řízení technologie

Do této skupiny můžeme zařadit:

b1) Prostředky číslicového řízení

To jsou především: Převodníky a číslicové počítače s pomocným vybavením, jako jsou např. samostatné číslicové regulátory.

b2) Logické automaty

Tyto se používají k řízení všech nespojitých operací, jako jsou činnosti při poruchách, při najíždění a odstavování atd. (tzv. sekvenční automaty) . Dále k dálkovému ovládání a k blokování chybných manipulací (tzv. blokády). Logické automaty jsou vlastně řídící obvody, které pracují s logickými dvouhodnotovými veličinami. Pracují buď:

- **s kombinační logikou** – v tomto případě jsou výstupní signály automatu určeny pouze okamžitou kombinací vstupních signálů
- **sekvenční (sledovou) logikou** – v tomto případě záleží i na předchozích kombinacích vstupních signálů nebo na jejich vzájemném časovém sledu.

Logické automaty pracují podle algoritmů, které jsou naprogramovány v řídící logice. Logické automaty byly v počátku realizovány pomocí relé (malá spolehlivost, velké rozměry, velká vlastní spotřeba energie), vývoj dále pokračoval přes bezkontaktní spínací prvky (diody, tranzistory, integrované obvody) až k realizaci ve formě software u dnešních ASŘ.

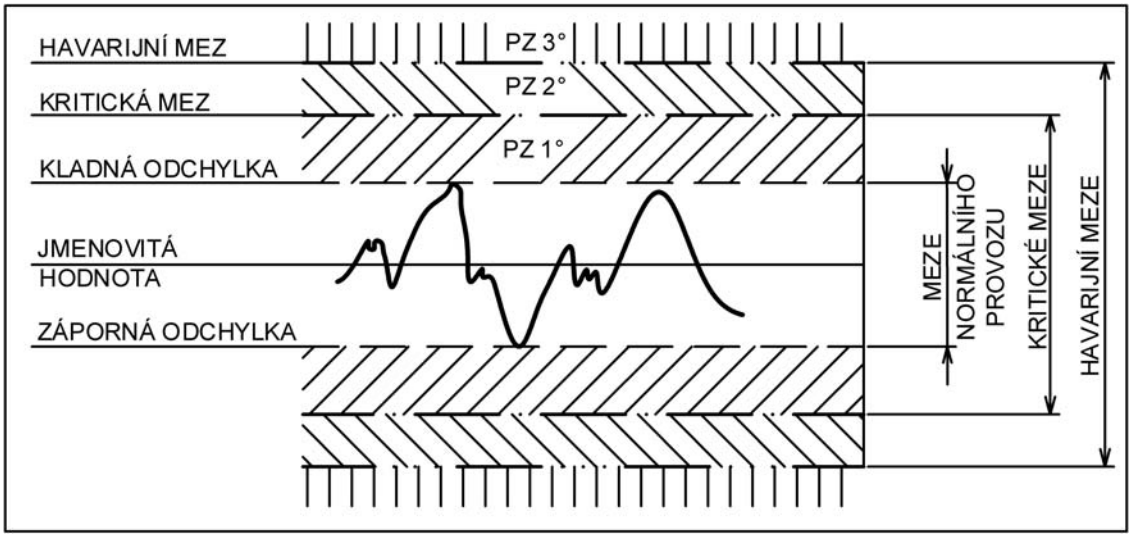
c) Zabezpečovací systém bloku (ZSB)

U každého provozovaného zařízení (i když je jeho provoz automatizován) může dojít k nebezpečným situacím ať již v důsledku poruch na zařízení (např. výpadek napáječky, ventilátoru), nebo vlivem mimořádné změny některé vstupní veličiny (např. výrazný pokles výhřevnosti spalovaného uhlí).

V takových situacích se musí provést okamžité zásahy, které zabrání havárii zařízení nebo nežádoucím provozním stavům. Je třeba si uvědomit, že energetická zařízení, a velké elektrárenské bloky zvlášť, se vyznačují velkými toky energie a celou řadou zařízení s velkou akumulací energie, což nebezpečí vzniku havárie zařízení nebo jejich částí zvyšuje. Rovněž každé neplánované (havarijní) odstavení bloku nebo neplánované (vynucené) výrazné snížení okamžitého provozního výkonu bloku (otevření pojišťovacích ventilů) představuje pro provozovatele značné ekonomické ztráty. Aby se počet havarijních (neplánovaných) odstávek bloku omezil na minimum, je činnost ZSB rozdělena do několika kroků. Jsou to:

- prevence nežádoucího stavu (blokády)
- signalizace nežádoucího stavu (poruchová signalizace)
- opatření k odstranění příčiny nežádoucího stavu – resp. následků takového stavu
- řízené snížení výkonu nebo odstavení bloku.

Pro správný návrh ZSB se musí proto nejdříve stanovit kriteria jeho zásahu. Tak např. podle směrnic ČEZ a. s. [4] se rozlišují následující pásma funkce ZSB – aplikace na teplotu výstupní páry je naznačena na **obr. 2.3**.



Obr. 2.3 *Funkce zabezpečovacího systému bloku (ZSB)*

c1) Pásmo normálního provozu

Toto je definováno kladnou a zápornou přípustnou odchylkou zabezpečované veličiny od její jmenovité hodnoty. (Např. teplota páry 540°C; +4 K; -8 K). Pokud se zabezpečovaná veličina pohybuje v tomto pásmu, ZSB se neaktivuje. Pásmo normálního provozu je v obou směrech ohraničeno mezemi normálního provozu.

c2) Pásmo zabezpečení 1. stupně (PZ 1°)

Toto je definováno překročením meze normálního provozu. Pokud se hodnota zabezpečované veličiny dostane do tohoto pásma, ZSB se aktivuje a signalizuje překročení meze normálního provozu. Toto pásmo je na vnějších stranách ohraničeno tzv. kritickou mezí.

c3) Pásmo zabezpečení 2. stupně (PZ 2°)

Toto je definováno překročením kritické meze. Při jejím překročení se aktivuje pojistné zařízení, případně se uvádí do provozu záložní zařízení atd. – pokud jsou pro zabezpečovanou mez tato zařízení předepsána. (V případě teploty přihřívané páry to může být např. havarijní vstřik.)

Pásmo zabezpečení 2. stupně je na vnějších stranách ohraničeno tzv. havarijní mezí.

c4) Pásmo zabezpečení 3. stupně (PZ 3°)

Toto je definováno překročením havarijní meze. Při překročení této meze se uvádějí do provozu všechna pojistná zařízení (pokud jsou pro zabezpečovanou veličinu předepsána), případně se snižuje výkon bloku nebo se blok odstavuje. (Toto je i v případě, kdy je zabezpečovanou veličinou teplota páry.)

Aby ZSB mohl plnit požadovanou funkci, musí splňovat několik základních požadavků, zejména pak:

- musí mít **prioritu** v ovládání příslušných zařízení před ostatními regulačními a řídícími systémy (tedy i před ručním zásahem operátora)
- musí mít **vysokou provozní spolehlivost**. Ta je zajištěna vlastním a nezávislým zdrojem energie a instalací vlastního měřícího systému s co

nejjednodušší strukturou a konstrukcí se zajištěnou verifikací (kontrola reprezentativnosti a reprodukovatelnosti měření), dostatečnou redundancí (zdvojením) důležitých informací a s vyloučením driftu nuly (posunu nuly)

- musí mít **vysokou rychlost zásahu,** tedy co nejjednodušší a nejméně omezované zpracování informace.

Pro zajištění požadované činnosti musí být ZSB vybaven odpovídajícími prostředky, které lze podle způsobu jejich činnosti, rozdělit do tří skupin. Jsou to:

- **poruchová signalizace**
  Tato představuje samostatný subsystém, který akusticky a opticky předává obsluze informaci o překročení poruchových mezí. Součástí systému je i tiskárna poruchového protokolu.
- **autonomní ochrany (AO)**
  Je to zařízení nezávislé na řídícím systému a je neovlivnitelné zásahem obsluhy. Má lokální charakter, je obvykle situováno na 5. úrovni řízení. Zásahy AO obvykle nezpůsobují snížení výkonu bloku, ale u jednotlivých zařízení bloku vedou přímo k jejich odstavení. (Např. se odstaví mlýn, u něhož došlo k překročení havarijní meze některé zabezpečované veličiny.)
- **komplexní ochrany (KO)**
  Tyto tvoří nadřazený systém, jak pro AO, tak i pro logické automaty, který má před nimi prioritu v zásahu. Komplexní ochrany pracují na vyšších hierarchických úrovních, mohou tedy snížit výkon bloku nebo blok odstavit. Často jsou komplexní ochrany realizovány pouze ve formě software.

3. REGULOVANÁ SOUSTAVA, REGULAČNÍ OBVOD

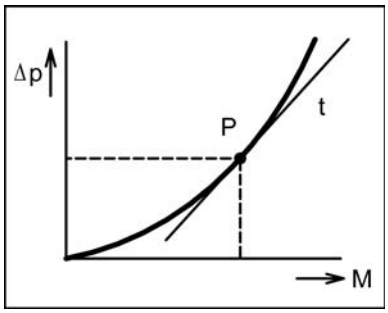
Podstatou technologického procesu u energetických zařízení je transformace a přenos energie a hmoty. Tyto se uskutečňují v regulované (řízené) soustavě, např. kotel, turbína, která je objektem regulace (řízení).

Regulované soustavy mohou být lineární (v praxi se vyskytují málo) i nelineární – tyto se v praxi vyskytují mnohem častěji.

Lineární soustavy jsou ty, jejichž chování lze popsat lineárními diferenciálními rovnicemi. Jejich charakteristickým znakem je platnost principu superpozice. (Tzn., že např. při zdvojnásobení velikosti vstupního signálu se také zdvojnásobí velikost odezvy.) Statická charakteristika takové soustavy je lineární, přímková.

U nelineárních soustav je jejich chování popsáno soustavou nelineárních rovnic a neplatí u nich princip superposice. Stabilita nelineárních soustav pak závisí nejen na parametrech soustavy, ale také na budícím signálu a na počátečních podmínkách soustavy.

Pro praktické řešení regulačních úloh pak mají někdy značný význam tzv. linearizovatelné soustavy. Cílem regulace je udržovat velikost **regulované veličiny** co nejblíže žádané hodnotě. Stačí proto vyšetřovat danou soustavu jen v nejbližším okolí regulovaného provozního bodu, viz **obr. 3.1**.



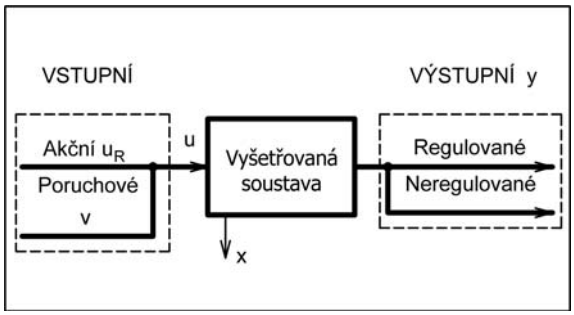
Obr. 3.1 *Linearizace soustavy*

Jestliže můžeme v okolí tohoto bodu nahradit nelineární charakteristiku soustavy přímkou (tedy lineární charakteristikou) aniž tím vznikne větší chyba, pak můžeme považovat původní nelineární soustavu za linearizovatelnou.

Např. tlaková ztráta při průtoku potrubím je určena vztahem $\Delta p=K.M^2$. V okolí pracovního bodu P můžeme kvadratickou závislost nahradit lineární tak, že v pracovním bodě sestrojíme tečnu – její rovnice pak představuje lineární náhradu původní charakteristiky.

U každé regulované (řízené) soustavy se musí definovat veličiny charakterizující stav a průběh procesu.

Rozlišujeme: (viz **obr. 3.2**)



Obr. 3.2 *Veličiny vyšetřované soustavy*

- **Vstupní veličiny *u***
  Tyto ovlivňují stav a průběh procesu ve vyšetřované soustavě.
  Obvykle se dělí na:
  - **akční** u_R , pomocí nich se proces záměrně ovlivňuje tak, aby měl požadovaný průběh. (Např. množství paliva při regulaci tlaku).
  - **poruchové *v***, které proces ovlivňují nežádaně a obvykle negativně. Např. změna výhřevnosti paliva. (Porucha – je v teorii řízení, v širším slova smyslu, definována jako každá vstupní změna, která soustavu vychýlí z rovnovážného stavu.)

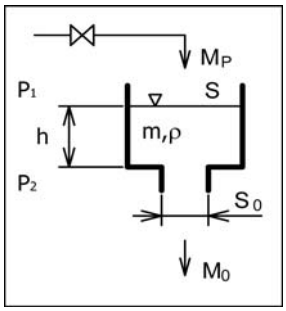
Poruchy vstupující do soustavy se někdy rozlišují na:

- ***vnitřní*** - tj. poruchy vstupující do soustavy jako nežádoucí změny akčních veličin (např. změna výhřevnosti při regulaci tlaku, dále viz též kap. 4.1, bod c)
- ***vnější*** - tj. poruchy, které vstupují do soustavy jako změny těch vstupních veličin, které se nepoužívají jako akční veličiny. Např. změna teploty napájecí vody (při výpadku regeneračních ohříváků) při regulaci hladiny v bubnu, dále viz též kap. 4.1, bod c)
- **stavové veličiny *x,*** jsou vnitřní veličiny soustavy (ani vstupní, ani výstupní) charakterizující stav soustavy a mohou být:
  - pouze funkcí času (nikoliv prostorových souřadnic) – v případě soustav se soustředěnými parametry. Příkladem takové soustavy je např. zásobník tlakového vzduchu. Ve všech místech takového zásobníku je tlak vzduchu stejný (zanedbáme-li vliv statického tlaku) a je funkcí pouze jedné proměnné – času.
  - funkcí času i prostorových souřadnic – v případě soustav s rozloženými parametry. Např. při průtoku látek potrubím je tlak látek závislý jak na čase, tak i na měřeném místě.
- **výstupní veličiny *y,*** se dělí na:
  - regulované (řízené), např. tlak páry
  - neregulované (neřízené), např. množství spalin.

Regulovaná soustava je vymezena místem působení vstupních veličin a místem měření výstupních veličin. Přísluší k ní ty části zařízení, jejichž stavové veličiny jsou buď ovlivňovány vstupními veličinami a/nebo samy ovlivňují výstupní veličiny.

Vstupní, výstupní a stavové veličiny se musí definovat pro každý vyšetřovaný případ samostatně, obecně se u soustavy uvažuje vždy větší počet těchto veličin.

Pro názornost je definice veličin ukázána na jednoduchém příkladu průtoku vody nádrží dle **obr. 3.3**.



Mp – přítok vody Mo – odtok vody
h - výška hladiny S – plocha hladiny
So – průřez výtokového tvoru
m – množství vody v nádrži (akumulace)
ρ – hustota vody p1, p2 – tlak okolí

Obr. 3.3 *Průtok vody nádrží [4]*

Voda z nádrže odtéká samovolně otvorem ve dnu. Při porušení rovnováhy přítoku a odtoku dojde ke změně akumulace vody ***m*** v nádrži podle vztahu

$$M_p - M_o = \frac{dm}{dt} \qquad \text{[kg/s]}, \qquad (3\text{-}1)$$

přičemž pro rovnovážný stav platí rovnice

$$M_p = M_o = M \qquad \text{[kg/s]} \qquad (3\text{-}2)$$

Dále platí

$$m = S.h.\rho \qquad \text{[kg]} \qquad (3\text{-}3)$$

a $M_o = \mu.S_o.\rho.\sqrt{2hg}$ [kg/s] (3-4)

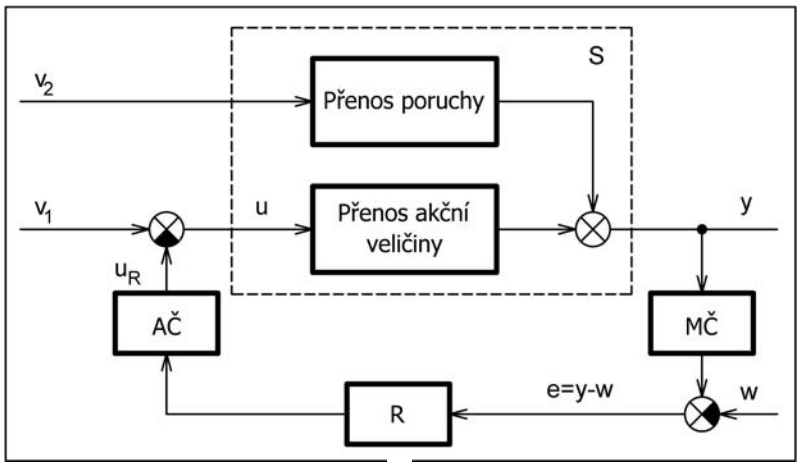
kde: μ je výtokový součinitel [1]

Předpokládáme-li, že plocha hladiny ***S*** je v oblasti výšky ***h*** konstantní a konstantní že je i hustota ρ i průřez S_o výtokového otvoru, pak **proměnné** veličiny jsou: M_P, M_o, ***h***, ***m***. Jestliže **vstupní** veličinou je množství přiváděné vody M_p, tak ostatní veličiny M_o, ***h, m*** jsou buď **výstupní** nebo **stavové**. Jestliže chceme vyšetřovat dynamiku hladiny ***h*** při změně přítoku vody M_p, pak hladina ***h*** je výstupní veličina a stavové veličiny jsou M_o, ***m*** . Pokud budeme vyšetřovat změnu výtoku z nádrže M_o, pak výtok M_o bude veličinou výstupní a stavové veličiny budou ***h, m.***

Připojením regulátoru (řídícího systému) k regulované (řízené) soustavě vznikne **regulační (řídící) obvod**.

Schématicky je regulační obvod znázorněn na **obr. 3.4**.

Obecně má akční veličina v soustavě ***S*** jiný přenos na regulovanou veličinu ***y*** než porucha ***v*** a proto je soustava definována dvěma přenosy (viz též kap. 3.1.1, **obr. 3.19**). Na **obr. 3.4** je znázorněno **zpětnovazebné řízení**.



v – poruchová veličina u – vstupní veličina u_R – akční veličina
y – výstupní veličina w – žádaná hodnota e –regulační odchylka
S – soustava R – regulátor AČ – akční člen MČ – měřící člen

Obr. 3.4 *Regulační (řídící) obvod*

Regulovaná veličina ***y*** se měří měřícím členem MČ, který se skládá z měřícího prvku (čidla) a z vysílače signálu. Skutečná hodnota regulované veličiny (z MČ) se v sumačním (porovnávacím) členu porovnává se žádanou hodnotou ***w*** této veličiny (řídící veličinou). Rozdíl skutečné a žádané hodnoty regulované veličiny se nazývá **regulační odchylka** (e = y – w, černý segment v sumačním členu určuje veličinu vstupující se záporným znaménkem, v tomto případě žádanou hodnotu ***w.***)

Podle toho, zda řídící veličina **(**žádaná hodnota**)** ***w*** je stálá nebo proměnná, rozlišujeme regulaci na **stálou** (konstantní) hodnotu nebo regulaci **programovou**, případně **vlečnou**.

Regulační odchylka ***e*** pak vstupuje do ústředního regulátoru ***R***, v němž se zpracuje podle zadaného algoritmu. Ústřední člen regulátoru ***R*** vyšle signál do akčního členu ***AČ***, který je obvykle proveden jako servomotor, a tento pak přestaví akční orgán (např. regulační ventil) a změní hodnotu akční veličiny u_R. Protože zpětná vazba je záporná, vstupuje signál z akčního členu do sumačního členu akční veličiny se záporným znaménkem.

Celek tvořený měřícím členem ***MČ,*** sumačním členem, ústředním regulátorem ***R*** a akčním členem ***AČ***, představuje regulátor v širším slova smyslu.

Při výpočtech regulačních pochodů je výhodnější pracovat s odchylkami veličin od vztažného stavu než s jejich absolutními velikostmi. Odchylka veličin se vztahuje většinou k hodnotě ustáleného stavu, jakou měla veličina před provedenou změnou.

Hodnota veličiny v ustáleném stavu je vždy konstantní a označuje se např. indexem nula.

Příklad označení veličin v regulačním obvodu je uveden např. v **tab. 3-1**.

Tab. 3.1 *Označení veličin v regulačním obvodu*

Veličina	Okamžitá hodnota	Odchylka	
		prostá	poměrná
Regulovaná	y	$\Delta y = y - y_0$	$\varphi_y = \frac{y - y_o}{y_o}$
Akční	u	$\Delta u = u - u_0$	$\varphi_u = \frac{u - u_o}{u_o}$
Poruchová	v	$\Delta v = v - v_0$	$\varphi_v = \frac{v - v_o}{v_o}$
Řídící	w	$\Delta w = w - w_0$	$\varphi_w = \frac{w - w_o}{w_o}$

Směr šipek na blokovém schématu na **obr. 3.4** označuje směr toku signálů. Tento se nemusí vždy shodovat se směrem toku hmoty nebo energie.

Signál v tomto případě představuje nehmotnou informaci, která se předává mezi jednotlivými členy regulačního obvodu. Signál při tom může měnit svůj fyzikální rozměr. (Např.: teplotu, tlak, el. napětí a pod.).

Regulační obvod znázorněný na **obr. 3.4** se nazývá **zpětnovazebný** regulační (řídící) obvod, který má tyto základní znaky:

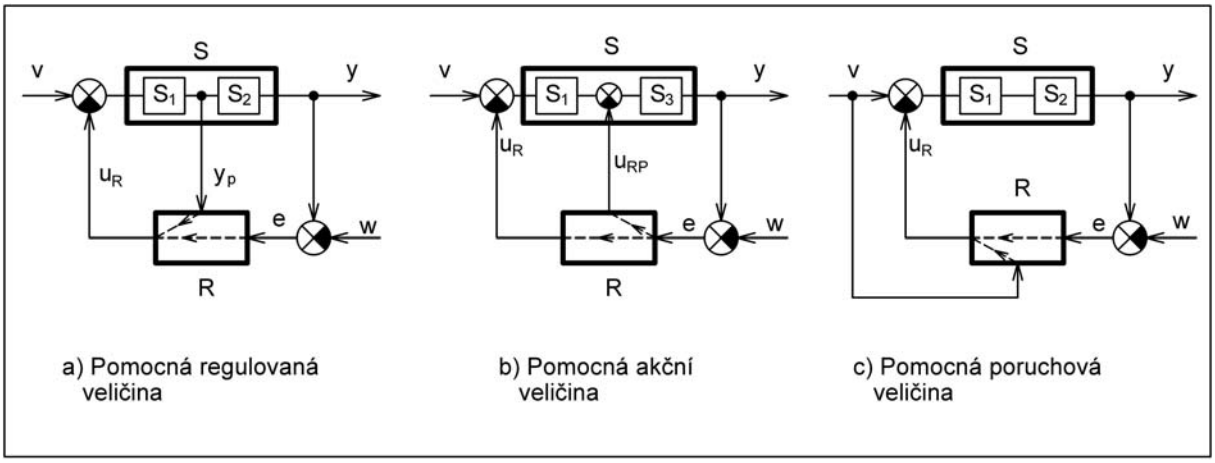
- jednotlivé členy obvodu jsou řazeny tak, že tvoří uzavřený okruh působení. Postupujeme-li ve směru toku signálu, dospějeme zpět na vstup do soustavy – jedná se o regulační obvod spojitý. (Příkladem nespojitého regulačního obvodu jsou např. dvoupolohové regulátory, které regulují systémem zapnuto – vypnuto.)
- členy regulačního obvodu jsou jednosměrné. (Předávají signál pouze v jednom směru.)
- obvod je v zapojení se zápornou zpětnou vazbou, takže signál při průchodu obvodem změní znaménko. (Signál postupující z akčního členu na sumační člen na vstupu do soustavy změní znaménko – černý segment v sumačním členu.)
- všechny členy regulačního obvodu jsou schopny trvalého provozu.

Má-li regulační obvod jednu hlavní zpětnou vazbu, tak hovoříme o **jednoduchém regulačním obvodu**. Má-li více než jednu řídící nebo akční veličinu a/nebo několik přímých nebo zpětných vazeb – pak mluvíme o **rozvětveném regulačním obvodu**.

Pokud cílem regulačního obvodu je regulovat jen jednu výstupní veličinu (jeden parametr), pak hovoříme o **jednoparametrové regulaci**.

S rostoucí složitostí (vyšším řádem) regulované soustavy se zvyšuje i sklon regulačního obvodu k nestabilitě a jakost regulačního pochodu se zhoršuje.

Zlepšení regulace (výhodnější statické i dynamické vlastnosti systému) se dosáhne při použití **rozvětvených jednoparametrových obvodů**, tj. zavedením dalších proměnných do regulačního obvodu. Možná provedení rozvětvených obvodů jsou schématicky znázorněna na **obr. 3.5**.



v – poruchová veličina y – výstupní veličina w – žádaná hodnota e – regulační odchylka U_R – akční veličina
y_p – pomocná regulovaná veličina U_{RP} – pomocná akční veličina R – regulátor S - soustava

Obr. 3.5 *Rozvětvené jednoparametrové obvody [4]*

Pomocná regulovaná veličina y_p.
Obvod je znázorněn na **obr. 3.5a)**. Je vytvořen malý, pomocný, regulační obvod, v němž probíhá regulační pochod výrazně rychleji. Pomocná regulovaná veličina y_p nezávisí již na tolika zpožďujících členech regulované soustavy jako vlastní regulovaná veličina y.

Pomocná regulovaná veličina y_p se proto odvádí z regulované soustavy pokud možno brzy – tedy co nejdříve za akčním (regulačním) orgánem. Na změnu akční veličiny nebo poruchy bude takový regulační obvod reagovat rychle.

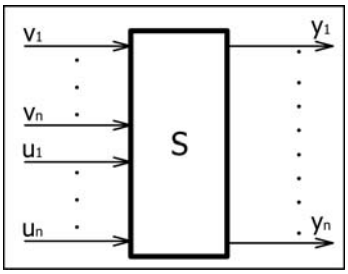
Pomocná akční veličina u_{RP} – viz **obr. 3.5 b)**.
Pomocný obvod je situován na výstupu regulované soustavy. Jeho vliv na průběh regulačního pochodu při změně poruchové nebo akční veličiny bude malý, ale změnu řídící veličiny bude takový regulační obvod sledovat rychle.

Pomocná poruchová veličina v – viz **obr. 3.5 c)**
Do regulátoru v tomto případě vstupuje jak porucha v, tak regulační odchylka e = y–w. Volbou vhodného regulátoru a seřízením jeho parametrů lze dosáhnout toho, že se eliminuje vliv poruchy v na regulovanou veličinu y. V takovém případě říkáme, že regulační obvod je **invariantní** vůči poruše v.

V praxi však velmi často je třeba regulovat více výstupních veličin, které na sebe vzájemně působí. Pro regulaci se pak nemůže použít několik na sobě nezávislých (autonomních) regulačních obvodů, ale musí se použít **víceparametrový** regulační obvod.

Mnohaparametrovými (víceparametrovými) soustavami rozumíme takové soustavy, které mají více veličin výstupních (regulovaných) a více veličin vstupních (akčních a poruchových), přičemž obecně každá veličina výstupní je ovlivňována všemi (nebo alespoň několika) veličinami vstupními. Schématicky je taková soustava naznačena na **obr. 3.6**.

Obecně u víceparametrových soustav při jejich regulaci (řízení) změna jedné akční veličiny (např. provedená proto, aby se změnila jedna veličina výstupní), vyvolá změny i dalších výstupních veličin. Jejich změny se musí opravit změnou dalších příslušných akčních veličin, čímž vzniká řetězový regulační pochod. Takové soustavy nazýváme **neautonomní**, na rozdíl od soustav **autonomních**, ve kterých se určitá výstupní veličina mění jen při změně jedné příslušné veličiny akční.



Obr. 3.6 *Víceparametrová soustava*

Podobně jako u jednoparametrových soustav se i u víceparametrových soustav snažíme odstranit v co největší míře vliv poruchových veličin na veličiny regulované. Soustavy, u nichž je tento vliv zcela eliminován nazýváme **absolutně invariantní**, pokud je vliv poruchových veličin odstraněn jen částečně (např. jen v ustáleném stavu) tak soustavy nazýváme **přibližně invariantní**.

3.1 ZÁKLADY DYNAMIKY REGULOVANÝCH SOUSTAV A REGULAČNÍCH OBVODŮ

Procesy, které probíhají v regulovaných soustavách energetických zařízení jsou převážně nestacionární a lze je popsat většinou jednou nebo více diferenciálními rovnicemi. Pokud by rovnice nebyla lineární, provádíme obvykle její linearizaci např. podle **obr. 3.1**.

Při řešení lineárních diferenciálních rovnic se s výhodou používá Laplaceova transformace (L. – transformace). K vyšetřování dynamických vlastností regulované soustavy pak používáme testovacího signálu ve tvaru jednotkového skoku. Na výstupu ze soustavy tak dostaneme odezvu, jejíž matematické vyjádření nazýváme **přechodovou funkcí** a jejím grafickým znázorněním je **přechodová charakteristika**.

Postup si dále vysvětlíme na příkladu **lineární soustavy 1. řádu**, která je popsána diferenciální rovnicí 1. řádu ve tvaru [62]

$a_1 y'(t) + a_o y(t) = u(t)$, u(t) a y(t) je vstupní a výstupní veličina systému. (3-5)

Do soustavy vstupuje signál ve tvaru jednotkového skoku, který je matematicky vyjádřen vztahem

$$u(t) = \begin{pmatrix} 0.....(t) \le 0 \\ 1.....(t) \ge 0 \end{pmatrix} \qquad (3\text{-}6)$$

Protože chceme vyšetřovat průběh výstupního signálu v čase $t > 0$, dosadíme do rovnice hodnotu u(t) = 1 a rovnici budeme řešit podle L. – transformace.

Obraz rovnice (3-5) po L. – transformaci je

$$a_1 s Y(s) + a_o Y(s) = \frac{1}{s} \qquad (3\text{-}7)$$

kde s = $\alpha + j\omega$ značí komplexní proměnnou.

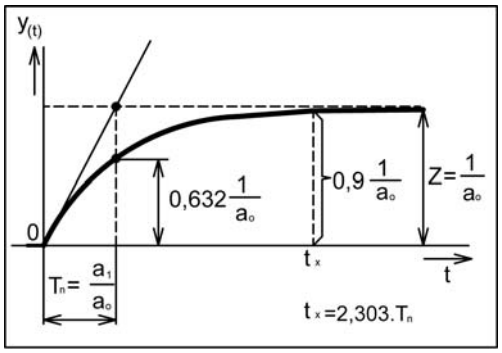
Z rov. (3-7) pak stanovíme obraz hledané funkce výstupního signálu ve tvaru

$$Y(s) = \frac{1}{a_1 s + a_0} \frac{1}{s} \qquad (3\text{-}8)$$

Protože potřebujeme získat průběh výstupního signálu v čase, musíme provést podle slovníku L. – transformace zpětnou transformaci vztahu (3-8) a získáme tak **přechodovou funkci** ve tvaru

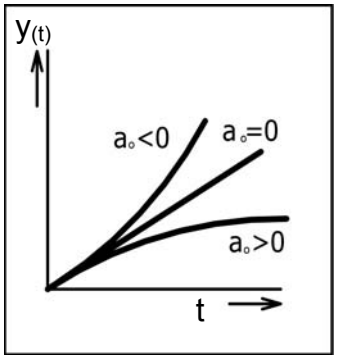
$$y(t) = \frac{1}{a_0}\left[1 - e^{-(a_0/a_1)t}\right] \qquad (3\text{-}9)$$

Odpovídající **přechodová charakteristika** je uvedena na **obr. 3.7**. Vlastnosti popisované soustavy jsou určeny dvěma konstantami, které určují statické a dynamické vlastnosti soustavy. Pro t_x = 2,303 T_n je hodnota y(t) = 0,9 Z.



T_n – doba náběhu Z – zesílení
a_0, a_1 – kořeny diferenciální rovnice

Obr.3.7 *Přechodová charakteristika statické soustavy 1. řádu*



Obr. 3.8 *Činitel autoregulace u soustav 1. řádu*

- **Statické zesílení** - určuje vlastnosti soustavy v ustáleném stavu.

  Značí se ***Z*** a jeho hodnota je $Z=1/a_0$. Pokud je $Z > 0$ (tj. $a_o > 0$), tak se výstupní signál po poruše (ve tvaru jednotkového skoku) vždy ustálí na konečné hodnotě. Takové soustavy se označují jako **statické.**

  Čím je člen a_o větší, tím dříve se výstupní signál ustálí – a to na nižší hodnotě. Proto se člen a_o nazývá též **činitelem autoregulace** (nebo statikou soustavy). Na **obr. 3.8** jsou vyznačeny přechodové charakteristiky pro případ $a_o > 0$ – tzv. **statické charakteristiky** (po ustálení vstupní veličiny se ustálí i výstupní veličina) a pro případ $a_o = 0$ a $a_o < 0$ - tzv. **astatické charakteristiky** (po ustálení vstupní veličiny se výstupní veličina trvale mění a neustálí se na nové hodnotě).
- **Dynamické chování** statické soustavy 1. řádu určuje sklon tečny k přechodové charakteristice v počátku. V praxi se však dynamika soustavy popisuje časovou konstantou T_n (**obr. 3.7**), která se nazývá **doba náběhu** a představuje časový úsek, který vytíná tečna k přechodové charakteristice v počátečním bodě t = 0 na přímce $y(t) = Z = 1/a_0$ = konst. Velikost tohoto časového úseku lze odvodit z rov. (3-9) a je

$$T_n = \frac{a_1}{a_o} \qquad [s] \qquad (3\text{-}10)$$

Čím bude časová konstanta T_n menší, tím bude odezva soustavy (na vstupní signál) rychlejší a naopak. Dosadíme-li do rov. (3-9) za $t = T_n$ z rovnice (3-10), obdržíme hodnotu funkce ***y(t)*** v čase $t = T_n$ ve tvaru

$$y(t) = 0{,}632.\frac{1}{a_0} \qquad (3\text{-}11)$$

Tento vztah se používá k snadnějšímu odečtu doby náběhu T_n z přechodové charakteristiky získané měřením na zařízení. (Konstrukce tečny k naměřené přechodové charakteristice je obtížná a není přesná.)

Podobně určíme přechodovou funkci a přechodovou charakteristiku u **statické soustavy 2. řádu.**

Obraz diferenciální rovnice této soustavy v L. – transformaci má tvar

$$a_2 s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = \frac{1}{s} \tag{3-12}$$

a obraz odezvy výstupního signálu na jednotkový skok je

$$Y(s) = \frac{1}{a_2(s^2) + a_1 s + a_o} \tag{3-13}$$

Pro nekmitavé soustavy lze tuto rovnici přepsat do tvaru [1]

$$Y(s) = \frac{Z}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \tag{3-14}$$

takže platí:

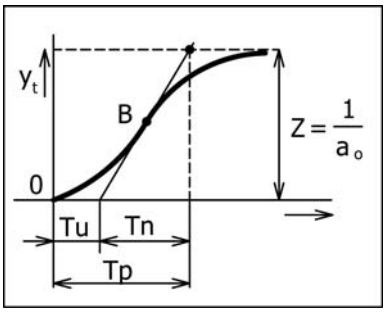
$$a_2 = \frac{T_1 T_2}{Z};\ a_2 = \frac{T_1 + T_2}{Z};\ a_0 = \frac{1}{Z}; \tag{3-15}$$

Soustava 2. řádu má tedy dvě časové konstanty T_1 a T_2. Po zpětné L. – transformaci rov. (3-14) obdržíme **přechodovou funkci**

$$y(t) = Z\left[1 + \frac{e^{-(t/T_1)}}{\frac{T_2}{T_1} - 1} + \frac{e^{-(t/T_2)}}{\frac{T_1}{T_2} - 1}\right] \tag{3-16}$$

Odpovídající přechodová charakteristika je uvedena na **obr. 3.9**. Vedeme-li k přechodové charakteristice tečnu v inflexním bodě ***B*** , tak na úrovni y(t) = 0 a $y(t) = \frac{1}{a_o}$ vytíná tečna úseky, které se označují: Tu – **doba průtahu**; Tn – **doba náběhu** a T_P = Tu + Tn – **doba přechodu**. **Statické zesílení** této soustavy Z pak má hodnotu Z =1/a_0;

Statické soustavy vyššího řádu než druhého mají přechodové charakteristiky podobného tvaru jako soustavy druhého řádu. Křivky se liší velmi málo a identifikace



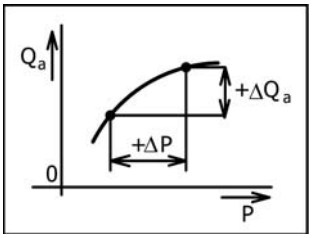
B – inflexní bod T_n – doba náběhu
T_u – doba průtahu T_p – doba přechodu
Z - zesílení

Obr. 3.9 *Přechodová charakteristika statické soustavy 2. řádu*

soustav vyšších řádů je proto obtížná a nepřesná.

Zpoždění výstupního signálu je u popsaných soustav způsobeno akumulací energie nebo hmoty v soustavě.

Závislost akumulované energie nebo hmoty v soustavě na některé hlavní výstupní veličině (např. na výkonu) lze znázornit **akumulační charakteristikou**, viz **obr. 3.10** .



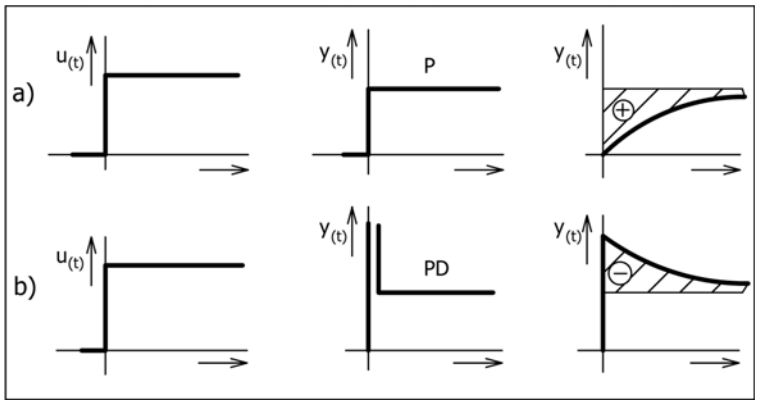
Q_p – akumulovaná energie (teplo)
P - výkon

Obr. 3.10 *Akumulační charakteristika soustavy*

Většina soustav má akumulační charakteristiku stoupající – při zvýšení výstupní veličiny (výkonu ***P***) se zvyšuje množství akumulované energie (tepla Q_a) – soustava se **nabíjí**. Při snížení výkonu ***P*** se snižuje množství akumulovaného tepla Q_a – soustava se **vybíjí**. Nabíjením, resp. vybíjením soustavy vzniká pak zpoždění výstupního signálu.

Změnu velikosti akumulované energie Q_a lze znázornit (v měřítku diagramu) šrafovanou plochou na přechodové charakteristice zobrazené na **obr. 3.11**.

V horní části a) obrázku je naznačena soustava s akumulační charakteristikou stoupající. Při skokové změně vstupní veličiny ***u(t)*** je naznačen nejdříve přechodový proces ve statické soustavě 1. řádu proporcionální (P) bez setrvačnosti (uprostřed), kdy nedochází ke změně akumulace v soustavě a výstupní signál ***y(t)*** sleduje vstupní signál ***u(t)*** bez zpoždění. Dále pak je uveden přechodový proces statické soustavy se setrvačností 1. řádu – změnu vstupního signálu ***u(t)*** sleduje výstupní signál ***y)t)*** se zpožděním a v soustavě se zvyšuje (+) akumulovaná energie – soustava se nabíjí.



$u_{(t)}$ – vstupní veličina $y_{(t)}$ – výstupní veličina
P – proporcionální soustava PD – proporcionálně-derivační soustava

Obr. 3.11 *Akumulace energie při přechodovém procesu [1]*

V dolní části b) obrázku je uvedena soustava s akumulační charakteristikou klesající. Při skokové změně vstupní veličiny ***u(t)*** je nejdříve naznačen přechodový proces v soustavě proporcionálně derivační bez setrvačnosti (uprostřed). Nedochází ke zpoždění výstupního signálu. U proporcionálně derivační soustavy se setrvačností 1. řádu (poslední charakteristika) je výstupní signál ***y(t)*** opožděn a množství akumulované energie v soustavě se snižuje (-) – soustava se vybíjí.

Na první pohled by se mohlo zdát, že popis dynamického chování soustavy pomocí přechodové funkce, resp. přechodové charakteristiky, je jednoduchý, srozumitelný a dostatečný.

Určitou jeho nevýhodou však je to, že popisuje dynamické chování soustavy pouze při změně vstupního signálu tzv. jednotkovým skokem.

Jiný popis dynamických vlastností soustavy získáme, ponecháme-li v diferenciální rovnici soustavy vstupní signál v obecném tvaru ***u(t)***, rovnici pak transformujeme a vypočteme poměr obrazů (v L.-transformaci) výstupního a vstupního signálu. Obdržíme novou funkci

$$G_{(s)} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + ... + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + ... + a_1 s + a_0}, \qquad (3\text{-}17)$$

která se nazývá **frekvenční přenosovou funkcí,** krátce pak **přenosem**. (Poměr obrazů výstupního a vstupního signálu.)

Také přenos můžeme vyjádřit graficky. Obecně je přenos komplexní číslo a proto musí být zobrazen v Gaussově rovině, v níž vodorovnou osu tvoří osa reálných čísel, svislou osu pak osa čísel imaginárních. Charakteristika pak je definována jako geometrické místo koncových bodů vektoru komplexního kmitu výstupního signálu při různých kmitočtech a nazývá se **amplitudofázovou frekvenční charakteristikou soustavy**. (Ze známého přenosu vypočteme jeho reálnou a imaginární část – vektorovým součtem obou částí v komplexní rovině získáme koncový bod vektoru výstupního kmitu pro příslušný kmitočet.)

Při zobrazení předpokládáme, že vstupní signál je harmonická funkce o amplitudě 1 a s nulovým fázovým zpožděním. V následující **Tab. 3-2** jsou uvedeny přechodové a frekvenční charakteristiky některých základních typů lineárních soustav bez setrvačnosti a se setrvačností. Frekvenční charakteristika n-tého řádu prochází „n“ kvadranty Gaussovy roviny. Jako poslední je uveden příklad proporcionální soustavy **s dopravním zpožděním T_D**. Signál procházející soustavou s čistým dopravním zpožděním se nijak nedeformuje, ale vychází ze soustavy opožděn o dobu T_D.

3.1.1 Bloková schémata, algebra přenosu

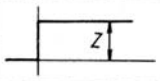
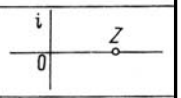
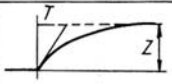
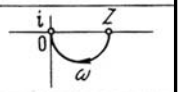
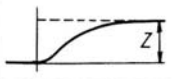
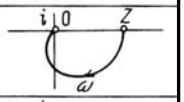
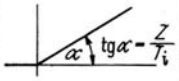
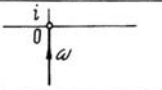
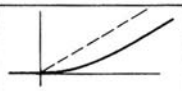
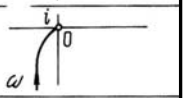
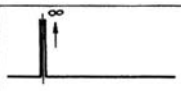
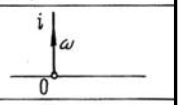
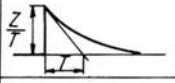
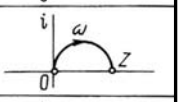
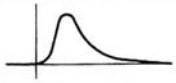
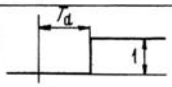
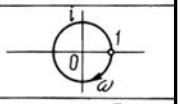
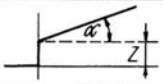
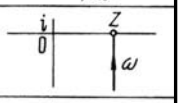
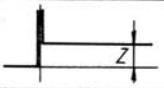
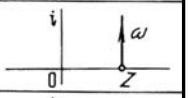
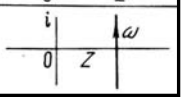
Energetická zařízení jsou převážně soustavy značně složitější než jednoduché soustavy, které jsou popsány v předešlé kapitole.

Při analýze takových složitějších soustav se je snažíme nejprve rozložit na jednodušší prvky (části), jejichž dynamické vlastnosti známe nebo je umíme snadno vyšetřit.

Vazby mezi jednotlivými prvky složitějších soustav pak pro přehlednost zakreslujeme v tzv. **blokových schématech**. Známe-li blokové schéma soustavy a přenosy všech jejich prvků (členů), můžeme výsledný přenos soustavy vypočítat podle zásad **algebry přenosů**.

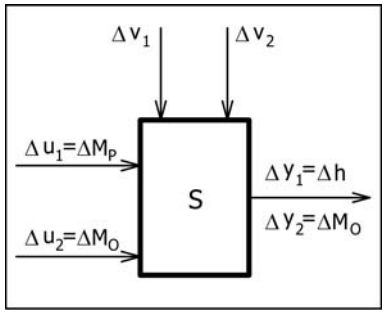
Blokové schéma je grafickým znázorněním obrazu diferenciální rovnice soustavy nebo regulačního systému. Elementární prvky (členy) soustavy nebo systému nahrazujeme obdélníky (bloky), do nichž se vpisuje symbol dynamického nebo statického chování příslušného členu. Jednotlivé bloky jsou navzájem spojeny tak, jak to odpovídá toku signálu ve skutečnosti, přičemž směr toku se označí šipkami. Takové spojení v blokovém schématu nemusí odpovídat toku hmoty nebo energie v soustavě, směr signálu může být i opačný než tok energie.

Tab. 3-2 ***Typy lineárních soustav [1]***

Typ soustavy	Přenos $G(s)$	Přechodová charakteristika	Frekvenční charakteristika
P proporcionální bez setrvačnosti	Z		
PT_1 proporcionální se setrvačností 1. řádu	$\frac{Z}{Ts+1}$		
PT_2 proporcionální se setrvačností 2. řádu	$\frac{Z}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$		
I integrační bez setrvačnosti	$\frac{Z}{T_i s}$		
IT_1 integrační se setrvačností 1. řádu	$\frac{Z}{T_i s(Ts+1)}$		
D derivační bez setrvačnosti	$T_D s$		
DT_1 derivační se setrvačností 1. řádu	$\frac{Zs}{Ts+1}$		
DT_2 derivační se setrvačností 2. řádu	$\frac{Zs}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$		
T_d čisté dopravní zpoždění	$e^{-T_d s}$		
PI proporciálně integrační	$Z(1+\frac{1}{T_i s})$		
PD proporciálně derivační	$Z(1+T_D s)$		
PID proporciálně integračně derivační	$Z(1+\frac{1}{T_i s}+T_D s)$		

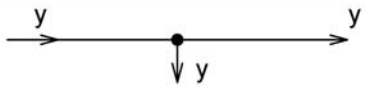
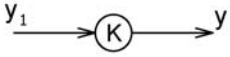
Pro jednoduché operace, např. rozdělení signálu, sčítání, odečítání a násobení signálů, se ustálily symboly, jejichž přehled je uveden v tab. 3-3.

Pro ilustraci je dále uveden příklad sestavení blokového schématu pro soustavu, kterou představuje nádrž s přítokem a odtokem homogenní kapaliny, viz. **obr. 3.3**. Naším úkolem, v tomto případu, je definovat průběh výtoku kapaliny v čase M_o (t), jestliže se změní přítok kapaliny M_p(t). Popsanou situaci lze znázornit schématem na **obr. 3.12**. Regulovanou soustavu ***S*** představuje nádrž s kapalinou. Vstupní signál u_1 – změna přítoku kapaliny M_p – vyvolá změnu dvou parametrů: výšky hladiny Δh a výtoku kapaliny ΔM_o – což jsou výstupní signály ***y***.



Obr. 3.12 *Schéma toku signálů u nádrže [6]*

Tab. 3-3 *Symboly blokových schémat*

NÁZEV	MATEMATICKÝ VZTAH	ZNAK VE SCHÉMATU
ROZDĚLENÍ SIGNÁLU		
SMĚŠOVACÍ UZEL-SČÍTÁNÍ	$y = y_1 + y_2$	
ODEČÍTÁNÍ	$y = y_1 - y_2$	
NÁSOBENÍ KONSTANTOU	$y = k \cdot y_1$	
NÁSOBENÍ SIGNÁLU	$y = y_1 \cdot y_2$	
SOUSTAVA	$y = G_{(s)} \cdot u$	

V určitém případě – pokud množství odtékající vody M_o by bylo řízeno ventilem nebo čerpadlem – může množství odtékající vody M_o představovat vstupní signál Δu_2.

V přechodovém stavu mohou „normální“ průběh změny výtoku kapaliny narušit poruchy ***v***. Takovou poruchou může být např. zanesení výstupního otvoru (jeho zúžení) $\Delta v_1 = \Delta So$ nebo změna rozdílu tlaku okolí, nad hladinou a v místě výtoku z nádrže, $\Delta v_2 = p_2 - p_1$.

Je zřejmé, že do soustavy vstupuje a z ní vystupuje více signálů. Protože podle formulace úlohy – najít časovou závislost mezi odtokem a přítokem kapaliny - máme najít vztah pouze mezi dvěma danými signály, musíme předpokládat, že v uvažovaném přechodovém stavu se ostatní signály (které nás nezajímají) nebudou měnit. Takže předpokládáme, že $\Delta v_1 = \Delta So = 0$ a $\Delta v_2 = p_2 - p_1 = 0$ – nádrž je otevřená, relativně nízká a obklopuje ji vzduch. Dále předpokládáme, že během přechodového období se nemění ani hustota kapaliny, $\Delta\rho = 0$.

V ustáleném stavu musí platit:

$M_p = M_o = M;\ \Delta M = 0;\ \Delta h = 0;$ (3-18)

Fyzikální podstatu dějů popisují tři základní vztahy:

- rovnice kontinuity (výtokový otvor)

  $M_O = S_O \,.\, w \,.\, \rho$ [kg/s] (3-19)

  S_O - průřez výtokového otvoru [m^2]
  w - rychlost ve výtokovém otvoru [m/s]
  ρ - hustota [kg/m^3]
- Bernoulliho rovnice

$$h.g + \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} = konst. \qquad [m^2/s^2] \qquad (3\text{-}20)$$

p - statický tlak [Pa]

- vztah mezi množstvím kapaliny a konstrukcí nádoby, viz rov. 3-3

Změníme-li některou vstupní veličinu, začnou se měnit parametry soustavy. V tomto přechodovém období bude porušena rovnováha mezi jednotlivými vstupními a výstupními veličinami – v našem případě bude $M_P \neq M_O$ a tento rozdíl přítoku a odtoku kapaliny vyvolá změnu akumulace kapaliny v soustavě, kterou matematicky lze vyjádřit rovnicí

$$\left[M_p(t) - M_o)t)\right]\Delta t = \Delta m \qquad [kg] \qquad (3\text{-}21)$$

respekt. rov. 3-1, což je diferenciální rovnice popisující chování soustavy v přechodovém období.

Abychom dostali žádaný vztah mezi vstupní a výstupní veličinou, musíme pomocí statických vztahů, (viz rov. 3-4) eliminovat proměnnou ***m(t)***. Z rov. 3-3 a z rov. 3-4 po úpravě obdržíme vztah

$$m(t) = \frac{S}{2g\rho}\left[\frac{M_O(t)}{\mu.S_O}\right]^2 \qquad [kg] \qquad (3\text{-}22)$$

Závislost výtoku na množství kapaliny v nádrži není tedy lineární, ale kvadratická. Úpravou rovnic (3-22) a (3-1) obdržíme hledanou diferenciální rovnici.

$$M_P(t) - M_O(t) = \frac{d\left[M_O(t)\right]^2}{dt} K, \qquad [kg/s] \qquad (3\text{-}23)$$

kde: $K = \dfrac{S}{2.g.\rho.\mu^2.S_O^2}$ [-]

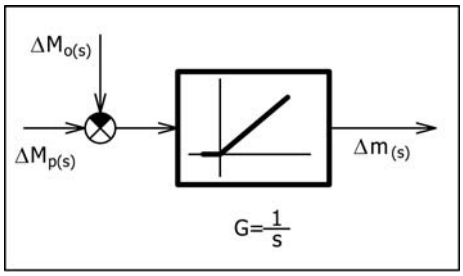
Dosadíme-li do této rovnice libovolný časový průběh přítoku kapaliny $\boldsymbol{M_p}(t)$ (např. skokovou změnu), dostaneme po integraci vztah pro časový průběh výtoku kapaliny $M_o(t)$. **Blokové schéma akumulace** kapaliny v nádrži v závislosti na odtoku a přítoku kapaliny nakreslíme např. podle rovnice

$$\frac{d\Delta m(t)}{dt} = \Delta M_P(t) - \Delta M_O(t) \qquad [kg/s] \qquad (3\text{-}24)$$

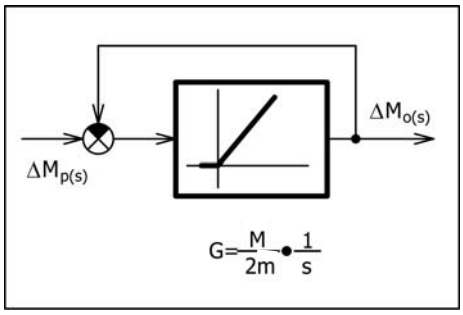
(viz též rov. 3-1). Po transformaci a úpravě obdržíme vztah

$$\Delta m(s) = \frac{1}{s}\left[\Delta M_P(s) - \Delta M_O(s)\right] \qquad [kg] \qquad (3\text{-}25)$$

Člen v hranatých závorkách se v blokovém schématu znázorní jako rozdíl dvou signálů. Výstupní signál ***Δm(s)*** se rovná rozdílu vstupních signálů dělenému parametrem ***s***. Dělení parametrem ***s*** znamená v originále integraci a v blokovém schématu ji znázorníme průchodem signálu integračním členem.



Obr. 3.13 *Blokové schéma Akumulace u nádrže [6]*



Obr. 3.14 *Blokové schéma výtoku z nádrže [6]*

Výsledné blokové schéma je pak na **obr. 3.13**. **Blokové schéma výtoku** z nádrže v závislosti na přítoku získáme ze vztahu (po úpravě výše uvedených rovnic pro výtok z nádrže)

$$2\frac{m}{M}\frac{d\Delta M_0}{dt} = \Delta M_P - \Delta M_0 \qquad \text{[kg/s]} \tag{3-26}$$

po jehož transformaci a úpravě obdržíme rovnici

$$\Delta M_0 = \frac{M}{2m}\frac{1}{s}(\Delta M_P - \Delta M_0), \quad \text{[kg/s]} \tag{3-27}$$

z níž vyplývá, že přenos integračního členu je $G(s) = \frac{M}{2m}\frac{1}{s}$

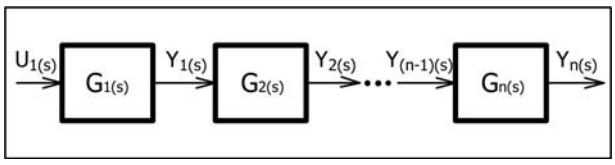
Příslušné blokové schéma je na **obr. 3.14**.

U složitějších soustav, pokud známe jejich blokové schéma, stanovíme jejich celkový přenos pomocí **zásad algebry přenosů**.

Algebra přenosů vychází ze tří základních zapojení členů (prvků) soustavy. Jsou to:

- zapojení za sebou (sériové)
- zapojení vedle sebe (paralelní)
- zapojení zpětnovazební (antiparalelní)

a) Zapojení za sebou (sériové) je znázorněno na **obr. 3.15**.



Obr. 3.15 *Sériové zapojení*

Přenos je definován jako poměr obrazu (v L-transformaci) výstupního signálu k obrazu vstupního signálu, tedy

$$G_1(s) = \frac{Y_1(s)}{U(s)};\quad G_2(s) = \frac{Y_2(s)}{Y_1(s)};\quad G_n(s) = \frac{Y_n(s)}{Y_{n-1}(s)} \quad .$$

Celkový přenos pak je definován jako $G(s) = \frac{Y_n(s)}{U_1(s)}$.

Dosadíme-li za $Y_{n(s)}$= $Y_{(n-1)(s)}$. $G_{n(s)}$ a dále za

$Y_{(n-1)(S)}$ = $Y_{2(S)}$ = $Y_{1(S)}$.$G_{2(S)}$ a za $Y_{1(S)}$ = $U_{1(S)}$.$G_{1(S)}$, obdržíme celkový přenos ve tvaru

$$G_{(S)} = \frac{Y_{n(S)}}{U_{1(S)}} = G_{1(S)}.G_{2(S)}.....G_{n(S)}$$

takže při **sériovém zapojení členů je výsledný přenos soustavy *G(s)* dán součinem přenosů jednotlivých členů *G_1*(s), *G_2*(s) a *G_n*(s).**

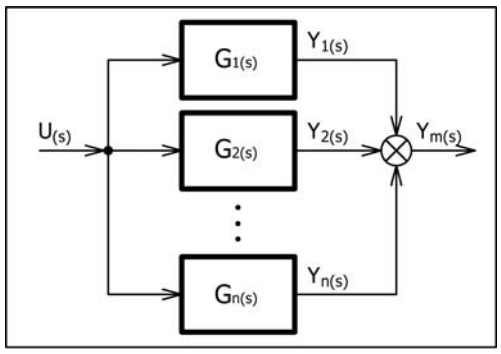
b) Zapojení vedle sebe (paralelní) je znázorněno na **obr. 3.16**.

Při stanovení výsledného přenosu postupujeme podobně jako u sériového zapojení výstupní signál $Y_{m(s)}$ se stanoví jako součet signálů

$Y_m(s) = Y_1(s) + Y_2(s) + ... + Y_n(s)$. Výsledný přenos soustavy pak obdržíme ve tvaru

$$G(s) = \frac{Y_m(s)}{U(s)} = G_1(s) + G_2(s) + ... + G_n(s) \qquad (3\text{-}29)$$

Při **paralelním zapojení členů je výsledný přenos soustavy *G(s)* dán součtem přenosů jednotlivých členů *G_1*(s), *G_2*(s) až *G_n*(s).**



***Obr. 3.16** Paralelní zapojení*

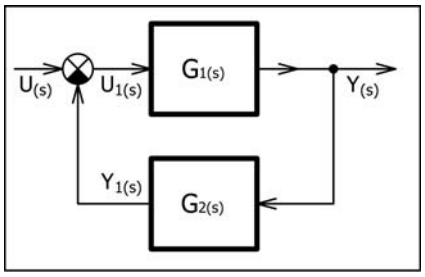
c) Zapojení zpětnovazební (antiparalelní)je ve zjednodušeném provedení jen pro dva členy znázorněno na **obr. 3.17**.

U tohoto zapojení platí, že výstupní signál se přenáší zpět na vstup do soustavy, kde se sčítá se signálem vstupním. Podle **obr. 3.17** tedy platí:

$U_1(s) = U(s) + Y_1(s)$ a $Y_1(s) = Y(s)G_2(s)$ jakož i $Y(s) = U_1(s)G_1(s)$. Eliminací signálů $U_1(s)$ a $Y_1(s)$ obdržíme hledaný celkový přenos soustavy ve tvaru

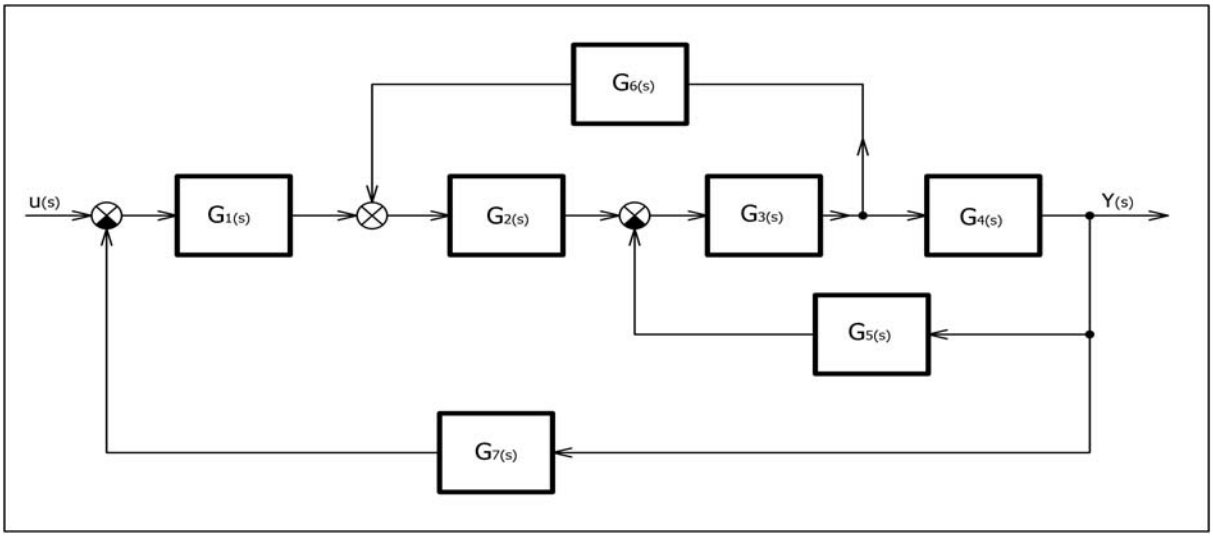
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_1(s)}{1 \pm G_1(s)G_2(s)}, \qquad (3\text{-}30)$$

kde znaménko (+) platí pro zápornou zpětnou vazbu a znaménko (-) pro kladnou zpětnou vazbu. V případě **obr. 3.17** platí tedy znaménko (+). Obecně lze při antiparalelním zapojení **celkový přenos soustavy definovat jako zlomek, v jehož čitateli je výsledný přenos přímé větve a jmenovatel se vytvoří tak, že k jedničce se přičtou (při záporné zpětné vazbě) nebo odečtou (při kladné zpětné vazbě) výsledné přenosy všech uzavřených zpětnovazebních obvodů.**



***Obr. 3.17** Antiparalelní zapojení*

Pro přiblížení uvedené definice stanovme výsledný přenos fiktivní soustavy uvedené na **obr. 3.18**, která má jednu kladnou zpětnou vazbu s přenosem G_6 a dvě záporné zpětné vazby z přenosem G_5 a G_7.



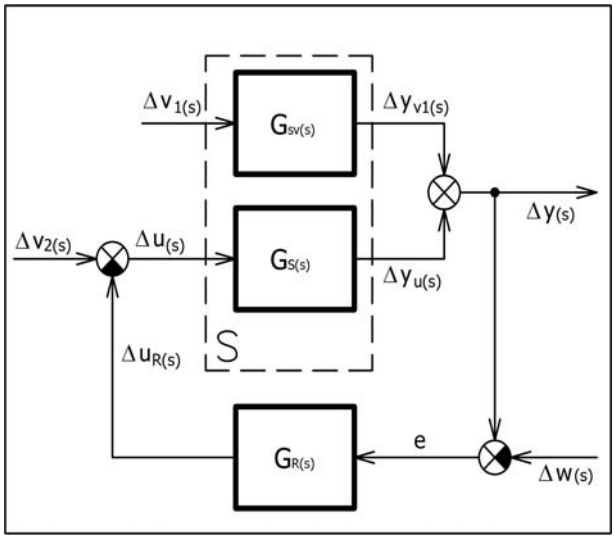
Obr. 3.18 *Příklad antiparalelního zapojení [7]*

Výsledný přenos takové soustavy podle uvedené definice pak lze psát ve tvaru

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{1+G_3(s)G_4(s)G_5(s)+G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_7(s)-G_2(s)G_3(s)G_6(s)} \qquad (3\text{-}31)$$

Algebru přenosů využijeme i při **analýze regulačního obvodu**. Blokové schéma klasického regulačního obvodu (viz **obr. 3.4**) je uvedeno na **obr. 3.19**.

V obecném případě může mít regulovaná veličina ***y*** soustavy jiný přenos na akční veličinu ***u*** než na některé poruchy ***v***. Tato skutečnost je ve schématu regulované soustavy ***S*** vyjádřená dvěma bloky $G_s(s)$ a $G_{sv}(s)$. Aby regulační obvod správně plnil svoji funkci, musí akční veličina u_R změnit polaritu – což je vyznačeno tmavým segmentem v součtovém členu na vstupu do soustavy. (Za předpokladu, že přenos regulátoru $G_R(s)$ je kladný.)



v – poruchová veličina u – vstupní veličina u_R – akční veličina
y – výstupní veličina $G_{sv(S)}$ – přenos poruchové veličiny
$G_{s(S)}$ – přenos akční veličiny $G_{R(S)}$ – přenos regulátoru
w – žádaná hodnota e – regulační odchylka S - soustava

Obr. 3.19 *Blokové schéma regulačního obvodu*

Pokud chceme vyšetřit chování soustavy ***S*** při působení poruchy v_1, pak výsledný přenos stanovíme za

předpokladu $\Delta W(s) = 0$ ve tvaru

$$G_{sv}(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta v_1(s)} = \frac{G_{sv}(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \tag{3-32}$$

Chceme-li vyšetřit chování soustavy ***S*** při změně řídící veličiny ***w***, pak výsledný přenos stanovíme za předpokladu $\Delta v_1 = \Delta v_2 = 0$ ve tvaru

$$G_{sw}(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta w(s)} = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \tag{3-33}$$

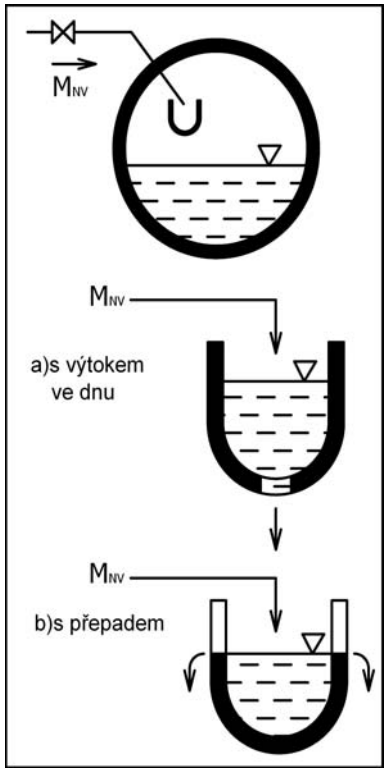
Podobně můžeme pomocí algebry přenosů stanovit výsledný přenos soustavy – výtoku z nádrže dle **obr. 3.14** a **obr. 3.3**. Jestliže vstupní signál bude mít tvar jednotkového skoku, pak celkový (výsledný) přenos výtoku z nádrže bude mít tvar $G(s) = \frac{1}{2\frac{m}{M}.s + 1}$.

Po zpětné L.-transformaci obdržíme rovnici přechodové charakteristiky (přechodovou funkci) ve tvaru

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{m}{M}t}.$$

Jedná se o statickou soustavu 1. řádu se zesílením Z = 1 a s časovou konstantou (doba náběhu) $T_n = 2\frac{m}{M}\ [s]$.

Popsanou soustavu (výtok z nádrže) lze u kotle přirovnat k napájecímu žlabu pro přívod napájecí vody do parního bubnu u kotlů s přirozenou cirkulací, viz **obr. 3.20**. V parním prostoru bubnu (nad hladinou) je umístěn po délce bubnu žlab do něhož se shora přivádí napájecí voda. Ta pak vytéká buď otvory ve dně po celé délce žlabu – provedení „a“, nebo přepadem z hladiny ve žlabu přes zářezy po obou stranách po celé délce. Časová konstanta (doba náběhu) u provedení s otvory ve dně je $T_n = 2\frac{m}{M}\ [s]$. Podobným způsobem zjistíme i dobu náběhu pro provedení s přepadem, ta bude mít hodnotu $T_n = \frac{2}{3}.\frac{m}{M}\ [s]$. Z dynamického hlediska je tedy výhodnější napájecí žlab s přepadem, protože má 3x kratší časovou konstantu.



M_{NV} – množství napájecí vody

Obr. 3.20 *Napájecí žlab v parním bubnu kotle*

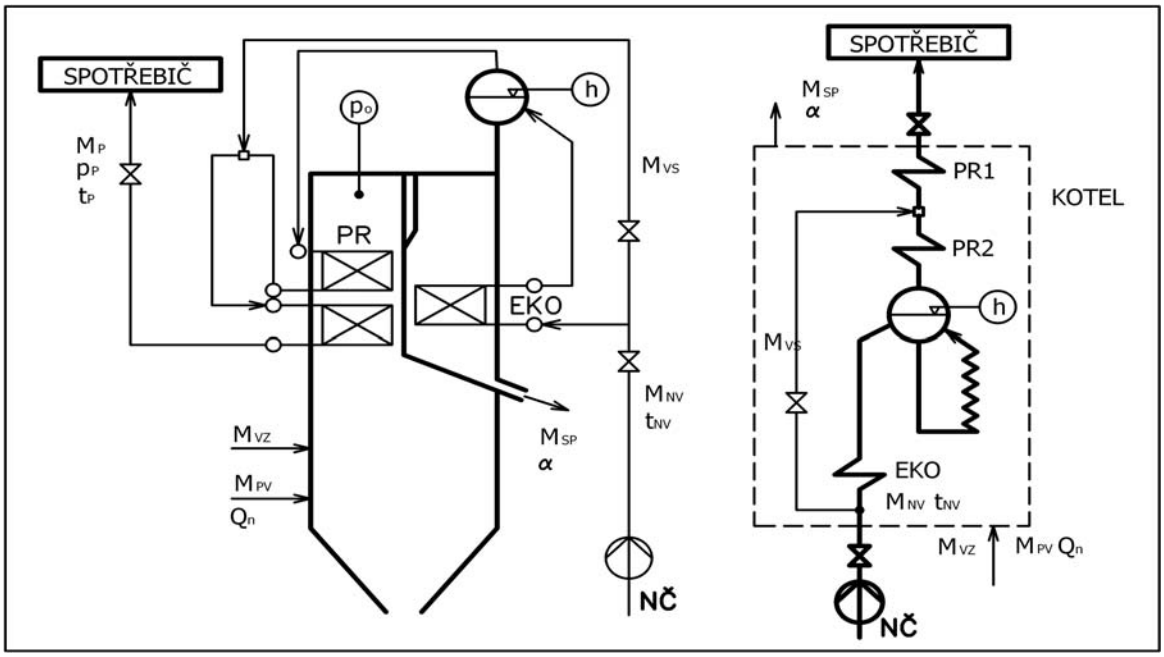
Výpočet výsledného přenosu soustavy pomocí algebry přenosů ze známých přenosových funkcí jednotlivých členů soustavy je poměrně snadný. Proto u složitých soustav se nejdříve určí pomocí operátorového slovníku přenosy jednotlivých prvků (členů) soustavy, pak se na základě algebry přenosů

určí výsledný přenos celé soustavy a následně se najde ve slovníku jeho originál – jako přechodová funkce celé soustavy. (Výpočet přechodové funkce celé soustavy z odezev jednotlivých členů soustavy je podstatně složitější.)

4. REGULACE PARNÍCH KOTLŮ

V energetice se používá celá řada různých typů kotlů (kotle s přirozenou cirkulací, kotle průtočné, kotle s přihříváním nízkotlaké páry nebo bez přihřívání, kotle s různou regulací teploty páry, kotle spalující různá paliva nebo jejich kombinace atd.) a podle nich se mění nejen počet regulačních obvodů, ale i jejich funkce.

Následující popis regulace je proveden pro parní kotel s přirozenou cirkulací, bez přihříváku páry a s regulací teploty páry vstřikem, viz **obr. 4.1**.



EKO – ohřívák vody NČ – napájecí čerpadlo PR - přehřívák

***Obr. 4.1** Schéma veličin bubnového kotle*

V souladu s blokovým schématem na **obr. 3.2** můžeme u tohoto kotle definovat:

- **výstupní veličiny** – což jsou v tomto případě regulované veličiny
  - p_p - tlak páry za kotlem
  - t_P - teplota páry za kotlem
  - po - podtlak v ohništi
  - h - výška hladiny v bubnu
  - α - přebytek spalovacího vzduchu

- **vstupní veličiny** – tyto se dělí podle upotřebitelnosti na:
  - ***akční veličiny*** – to jsou veličiny, které lze u kotle snadno ovlivňovat a jsou to:
    - M_{PV} - množství přivedeného paliva
    - M_{VZ} - množství spalovacího vzduchu
    - M_{NV} - množství napájecí vody
    - M_{VS} - množství vstřikované vody
    - M_{SP} - množství spalin

- ***poruchové veličiny*** – to jsou ty veličiny, které ovlivňují proces většinou nežádoucím způsobem a na které nemá obsluha přímý vliv
  Dělí se na:
  - ***vnější poruchové veličiny*** - to jsou ty, které způsobují změnu těch vstupních veličin, které se nepoužívají jako veličiny akční – tedy v popisovaném případě je to:
    - M_P- odběr páry z kotle (příkon spotřebiče, výkon kotle). Změna odběru páry neovlivňuje vybrané akční veličiny, ale projeví se na změně regulovaných veličin jako jsou např.: tlak páry $\boldsymbol{p_p}$, výška hladiny $\boldsymbol{h}$ v bubnu a teplota páry $\boldsymbol{t_p}$.
    - t_{NV} - teplota napájecí vody (např. výpadek regeneračního ohříváku napájecí vody). Změna teploty neovlivní vybrané akční veličiny, ale má vliv na regulované veličiny jako jsou např. tlak páry $\mathbf{p_p}$, výška hladiny **h** v bubnu a teplota přehřáté páry $\mathbf{t_p}$.
  - ***vnitřní poruchové veličiny*** – což jsou ty, které vyvolají změnu těch vstupních veličin, které se používají jako akční.
    V popisovaném případě je to:
    - Q_n - výhřevnost přiváděného paliva. Změna výhřevnosti vyvolá změnu přivedeného tepla do ohniště, které se posuzuje podle množství přivedeného paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$ – toto je akční veličinou regulace tlaku páry $\boldsymbol{p_p}$ resp. výkonu kotle.

Při návrhu jednotlivých regulačních obvodů se pak každé **regulované** (výstupní) veličině přiřazuje ta **akční veličina**, která ji ovlivňuje nejvýrazněji a nejrychleji (bez velkého zpoždění), přičemž platí, že vybraná akční veličina může být využita pro regulaci jen té jedné vybrané výstupní veličiny.

Vazby mezi jednotlivými vstupními a výstupními veličinami u kotle podle **obr. 4.1** jsou naznačeny v Tab. 4.1, a to včetně informace o statickém zesílení (síle vazby).

Tab. 4.1 *Znázornění vazeb mezi vstupními a výstupními veličinami kotle [4]*

Regulované veličiny (výstupní)		**Vstupní veličina**								**Vazba**
		Akční					**Poruchová**			
		M_{PV}	**M_{VZ}**	**M_{SP}**	**M_{VS}**	**M_{NV}**	**M_P**	**t_{NV}**	**Q_n**	
	p_p	xxx	x	0	x	x	xxx	x	xxx	
	t_P	xx	xx	x	xxx	0	xxx	0	xx	xxx silná
	α	xxx	xxx	x	0	0	0	0	xxx	xx střední
	p_0	xxx	xxx	xxx	0	0	0	0	x	x slabá
	h	x	0	0	xx	xxx	xxx	xx	x	0 zanedbatelná

Pěti regulovaným veličinám odpovídá tedy pět regulačních obvodů na kotli a akční veličiny jsou k nim přiřazeny takto:

1. regulační obvod – regulace tlaku páry p_p, resp. výkonu kotle
   - regulovaná veličina – tlak páry p_p
   - akční veličina – množství přivedeného paliva M_{PV}
2. regulační obvod – regulace teploty páry t_P
   - regulovaná veličina – teplota páry t_p
   - akční veličina – množství vstřikované vody M_{VS}
3. regulační obvod – regulace hladiny h v bubnu, resp. regulace napájení bubnového kotle
   - regulovaná veličina – hladina v bubnu h
   - akční veličina – množství napájecí vody M_{NV}
4. regulační obvod – regulace spalování, resp. přebytku spalovacího vzduchu α
   - regulovaná veličina- přebytek spalovacího vzduchu α
   - akční veličina – množství spalovacího vzduchu M_{VZ} (Množství přivedeného paliva M_{PV} jako akční veličinu nelze využít – i když má silnou vazbu – protože je jako akční veličina využito již pro regulaci tlaku.)
5. regulační obvod – regulace podtlaku p_o v ohništi
   - regulovaná veličina – podtlak spalin v ohništi p_o
   - akční veličina – množství spalin M_{SP}. (Množství přivedeného paliva M_{PV} a ani množství spalovacího vzduchu M_{VZ} nelze již využít, protože jsou jako akční veličiny využity pro regulaci tlaku a spalování.)

Někdy se regulační obvody č. 1, 4 a 5 souhrnně nazývají regulací spalování a regulační obvody č. 4 a 5 regulací jakosti spalování.

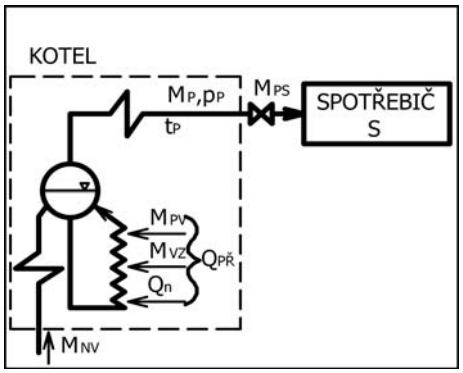
Činnost uvedených regulačních obvodů lze zlepšit měřením vhodné poruchové veličiny.

Tak např. činnost regulačního obvodu tlaku páry p_p lze zlepšit měřením odběru páry M_P, případně měřením okamžité výhřevnosti Q_n paliva (mění se přivedené teplo do kotle).

Zatímco odběr páry M_P jako pomocnou veličinu použít můžeme (množství páry umíme měřit), tak okamžitou výhřevnost Q_n paliva pro zlepšení regulace použít nemůžeme; dosud není k dispozici měřící člen, který by zjistil okamžitou výhřevnost uhlí s přijatelnou přesností a hlavně dostatečně rychle (s přijatelným zpožděním). Proto okamžitá změna výhřevnosti působí jako poruchová veličina, která zhoršuje kvalitu regulace tlaku páry (výkonu).

4.1 REGULACE VÝKONU KOTLE

Výkon kotle (viz schéma zapojení na **obr. 4.2**) můžeme definovat jako dodávku okamžitého množství páry M_P o požadovaných parametrech jako je tlak p_p a teplota t_p páry. Pokud množství páry M_{PS} odebírané spotřebičem ***S*** je ve shodě s množstvím páry M_P, kterou kotel vyrábí, pak je konstantní výkon kotle i jeho parametry. Pokud je shoda mezi vyráběným M_P a odebíraným M_{PS} množstvím páry porušena, změní se parametry páry, zejména pak tlak páry p_p. Je-li množství páry M_{PS} odebírané spotřebičem větší než množství páry M_P v kotli vyráběné, tak tlak páry p_p v kotli klesá a naopak. Tlak páry p_p v kotli je tedy ukazatelem rovnováhy mezi množstvím páry M_P v kotli vyráběné a množstvím páry M_{PS} spotřebičem odebírané. Regulační obvod, který udržuje konstantní **tlak páry** v kotli (na požadované hodnotě) je tedy zároveň regulačním obvodem **výkonu kotle**. Akční veličinou regulace je, obecně, množství tepla přivedeného do kotle $Q_{PŘ}$. Regulační obvod výkonu kotle (tlaku páry) musí splňovat alespoň tyto základní požadavky:



M_{PS} – množství páry odebírané spotřebičem
M_P – okamžité množství páry dodávané kotlem
p_p, t_p – parametry dodávané páry
M_{PV} – množství přivedeného paliva
M_{VZ} – množství vzduchu
Q_n – výhřevnost paliva M_{NV} – množství napájecí vody
$Q_{PŘ}$ – množství přivedeného tepla do kotle

Obr. 4.2 *Schéma zapojení kotel - spotřebič*

a) musí přizpůsobit okamžitý výkon kotle (množství vyráběné páry M_p) požadavku spotřebiče páry (množství odebírané páry M_{PS}), tzn. udržovat konstantní tlak p_p páry (samozřejmě v určitém tolerančním pásmu) při všech běžných provozních stavech a podmínkách. Nedodržení konstantního tlaku páry je obvykle spojeno se zhoršením ekonomie provozu kotle, popř. i spotřebiče. (Např. otevření pojišťovacích ventilů při náhlém snížení výkonu spotřebiče - tj. snížení odběru páry M_{PS}.)

   Velikost tolerančního pásma regulace tlaku páry v kotli se mění podle druhu paliva, typu kotle a způsobu jeho provozu. Pro představu lze uvést např. přípustnou odchylku tlaku páry při ustáleném provozu ve výši max. 1 % až 2 %, dále při změnách výkonu kotle v rozsahu 40 % - 100 % jmenovitého výkonu netrvajících déle než 3 min. nemá být max. regulační odchylka větší než 5 % (při rychlosti změny výkonu do 5 %/min.), případně nemá být větší než 10 % (při rychlosti změny výkonu do 10 %/min.). [4][8] Viz též kap. 5, Regulace činného výkonu elektrárenských bloků.

b) změny akční veličiny (množství přiváděného paliva M_{PV}) musí přizpůsobit omezujícím technologickým podmínkám. Tak např. max. rychlost změny výkonu kotle (rychlost a velikost změny množství přiváděného paliva) je omezena max. přípustným teplotovým gradientem u té části tlakového systému kotel – turbína, který má největší tloušťku stěny (parní buben kotle, turbínová skříň apod.). Podobně je i okamžité zvýšení výkonu mlýna (množství přivedeného paliva) u ohniště s přímým foukáním omezeno takovou velikostí změny v přívodu paliva do mlýna, při níž ještě nedojde k zahlcení mlýna palivem (může vést ke snížení výkonu mlýna nebo i k jeho odstavení).

Příliš velké a rychlé změny akční veličiny (množství paliva M_{PV}) jsou nežádoucí i z hlediska stability a jakosti spalování – a tím i tvorby emisí. Je třeba mít na zřeteli i to, že každá změna přívodu paliva M_{PV} současně působí též jako významná poruchová veličina, např. při regulaci přebytku vzduchu, podtlaku v ohništi i teploty páry – viz tab. 4.1, kap. 4.

c) musí co nejlépe eliminovat vliv poruch na regulovanou veličinu. Na změnu výkonu kotle (tlaku páry) působí jak vnitřní, tak i vnější poruchy. Za vnitřní poruchy lze v tomto případě považovat změny tepelného příkonu kotle, způsobené např. chybou měření množství dávkovaného paliva, váznutím paliva v zásobníku, kolísáním výhřevnosti paliva, změnou viskozity a špatným rozprašováním kapalného paliva, kolísáním tlaku plynného paliva, zanesením (zašpiněním) teplosměnných ploch kotle (mění se tepelný příkon do teplosměnných ploch) a s tím souvisejícím ofukováním (ostřikováním) teplosměnných ploch atd. Za vnější poruchy můžeme považovat např. změny parního výkonu kotle. Tyto mohou být požadované (žádaná změna výkonu spotřebiče páry – turbíny, výměníkové stanice) nebo způsobené nějakou činností, např. činností systému regulace teploty páry vstřikem napájecí vody.

d) musí působit jen na vlastní regulovanou veličinu (tlak páry p_p), ostatní regulované veličiny kotle musí (při změně akční veličiny výkonu kotle – M_{PV}) zůstat pokud možná invariantní (neměnné). Protože tuto podmínku nelze vždy plnit (viz bod „b“ a tab. 4.1) musí být vliv na ostatní regulované veličiny co nejmenší a při návrhu ostatních regulačních obvodů se tento vliv musí respektovat.

e) musí respektovat skutečnost, že ohniště (spalovací zařízení) sestává z různých zařízení (mlýny, podavače, plynové či olejové hořáky atd.), které mají omezený regulační rozsah.

   Tak např. běžný mlýn s přímým foukáním má regulační rozsah cca 30 % až 100 %, podavač paliva cca 20 % až 100 %, plynové hořáky cca 13 % až 100 %. Při velké změně výkonu kotle je proto ve většině případů vhodnější kombinovat změnu výkonu akčních členů (např. výkon provozovaných mlýnů) s jejich odstavováním (např. jeden z provozovaných mlýnů se odstaví). Musí se přitom počítat s tím, že se změní zesílení regulované soustavy a že odstavené hořáky se musí chladit – např. omezeným průtokem vzduchu.

f) musí zajistit regulaci výkonu kotle i při spalování více druhů paliv, a to jak při jejich samostatném spalování (černé nebo hnědé uhlí – dnes často požadované u kotlů s ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou), tak i při současném (kombinovaném) spalování (např. uhlí a olej nebo plyn – teplárenské či průmyslové kotle se dnes běžně vybavují kombinovanými hořáky pro spalování uhlí, oleje a plynu).

g) musí umět přizpůsobit svou funkci různým typům spalovacích zařízení (roštové, práškové či fluidní ohniště, ohniště pro spalování oleje, plynu, alternativních paliv atd.).

Pro regulaci výkonu (při návrhu regulačního obvodu výkonu) máme možnost zvolit akční i regulovanou veličinu z několika možností.

Budeme-li regulaci výkonu parního kotle chápat jako činnost zaměřenou na udržení vyvážené energetické bilance kotle, pak regulace musí udržovat v rovnováze přívod a odvod energie u kotle.

Jestliže přívod energie do kotle lze měnit např. změnou množství přivedeného paliva M_{PV}, pak odvod energie z kotle se může měnit změnou dodávky páry M_P – kterou lze vyvolat změnou odběru páry spotřebičem M_{PS}. Množství páry odebírané spotřebičem M_{PS} se změní buď v důsledku změny tlaku před spotřebičem

v souvislosti s jeho výkonem nebo změnou průtokové charakteristiky spotřebiče – např. regulačním ventilem u spotřebiče.

Při regulaci výkonu parního kotle se nejčastěji jako akční veličina volí množství paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$ přiváděného do kotle a regulovanou veličinou je tlak páry $\boldsymbol{p_p}$.

Závislost mezi akční (M_{PV}) a regulovanou (p_p) veličinou udává zjednodušená bilanční rovnice ve tvaru (viz též **obr. 4.2**)

$$M_{PV}.Q_n.\eta_K = M_P(i_P - i_{NV}), \qquad (4\text{-}1)$$

kde: η_K - účinnost kotle

i_P - entalpie páry za kotlem při tlaku $\boldsymbol{p_p}$ a teplotě $\boldsymbol{t_P}$

i_{NV} - entalpie napájecí vody na vstupu do kotle

Z této rovnice vyplývá, že:

- při ustáleném provozu - kdy je $\boldsymbol{M_P}$, $\boldsymbol{i_p}$ i $\boldsymbol{i_{NV}}$ konstantní a kdy můžeme předpokládat, že konstantní je i η_k a $\boldsymbol{Q_n}$ - se nemění ani množství přivedeného paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$.
- při změně odběru páry – výkonu kotle $\boldsymbol{M_P}$ – se musí změnit množství přivedeného paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$. (Pokud se ostatní parametry v rovnici nezmění.)
- pokud se nezmění průtok páry (výkon kotle $\boldsymbol{M_P}$) a změní se výhřevnost $\boldsymbol{Q_n}$ paliva (poruchová veličina), musí se změnit množství přivedeného paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$.

Z bilanční rovnice (4-1) ale také vyplývá, že regulovanou veličinou výkonu kotle by – kromě výše uvedeného tlaku páry $\boldsymbol{p_p}$, který signalizuje nesoulad mezi výrobou a odběrem páry – mohlo být přímo množství páry $\boldsymbol{M_P}$ kotlem dodávané. Prakticky ovšem toto není možné, neboť regulátor by na vnější poruchu (změna odběru páry $\boldsymbol{M_{PS}}$) reagoval opačně než soustava vyžaduje a nedosáhl by se při regulaci rovnovážný stav. Tak např. při zvětšení odběru páry na hodnotu $(\boldsymbol{M_{PS}})_1$ se zvětší odpovídajícím způsobem i odběr (dodávka) páry z kotle $\boldsymbol{M_P}$ a regulátor (chce udržet průtok páry $\boldsymbol{M_P}$ konstantní) sníží množství přiváděného paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$. Správně ale by se mělo množství přiváděného paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$ zvýšit tak, aby se výroba páry v kotli zvětšila na hodnotu odpovídající odebíranému množství páry $(\boldsymbol{M_{PS}})_1$.

Pokud se za regulovanou veličinu zvolí tlak páry $\boldsymbol{p_p}$, (viz např. **obr.4.**19) pak regulátor výkonu bude pracovat správně a dosáhne se rovnovážný stav. Tak např. při zmíněném zvýšení odběru páry na hodnotu $(\boldsymbol{M_{PS}})_1$, klesne tlak $\boldsymbol{p_p}$ za kotlem a regulátor výkonu zvýší množství přiváděného paliva $\boldsymbol{M_{PV}}$ na takovou hodnotu, při níž tlak páry se vrátí na původní (konstantní) úroveň – tím se současně zvýší i výroba páry v kotli tak, aby platilo $M_P = (M_{PS})_1$.

Popsaný způsob regulace (regulovanou veličinou je tlak páry, akční veličinou je množství přiváděného paliva) **se používá u parních kotlů s práškovým** (fluidním)**ohništěm nebo při spalování oleje či plynu**.

Pro kotle s roštovým ohništěm není tento způsob vhodný, neboť na roštu je značná zásoba paliva a změna výkonu kotle změnou množství přivedeného paliva na rošt by byla velmi pomalá. (Velké zpoždění). Proto se u **kotlů s roštovým ohništěm** používá jako akční veličina regulace výkonu kotle změna množství spalovacího vzduchu a množstvím přiváděného paliva se reguluje přebytek spalovacího vzduchu.

Tento způsob regulace výkonu (akční veličinou je množství spalovacího vzduchu) však není vhodný pro kotle s práškovým ohništěm nebo pro spalování oleje či plynu. Energetická rovnováha popsaná rov. (4-1) (akční veličinou by byl průtok vzduchu) se ustálí teprve sekundárně až po nastavení požadovaného přebytku vzduchu. Nejdříve se v tomto případě nastaví množství spalovacího vzduchu (regulace výkonu) a pak podle přebytku vzduchu se teprve upraví množství

přiváděného paliva M_{PV} do kotle – tedy s určitým zpožděním, takže kvalita regulace výkonu je značně horší než v případě, kdy akční veličinou by bylo přímo množství přiváděného paliva. A pro toto zpoždění není u kotle s práškovým ohništěm žádný důvod – změnu tepelného příkonu do kotle lze realizovat rychleji přímo změnou množství přiváděného paliva M_{PV}. (V práškovém ohništi není nevhodně působící „zásoba“ uhlí, tak jako je tomu na roštu.)

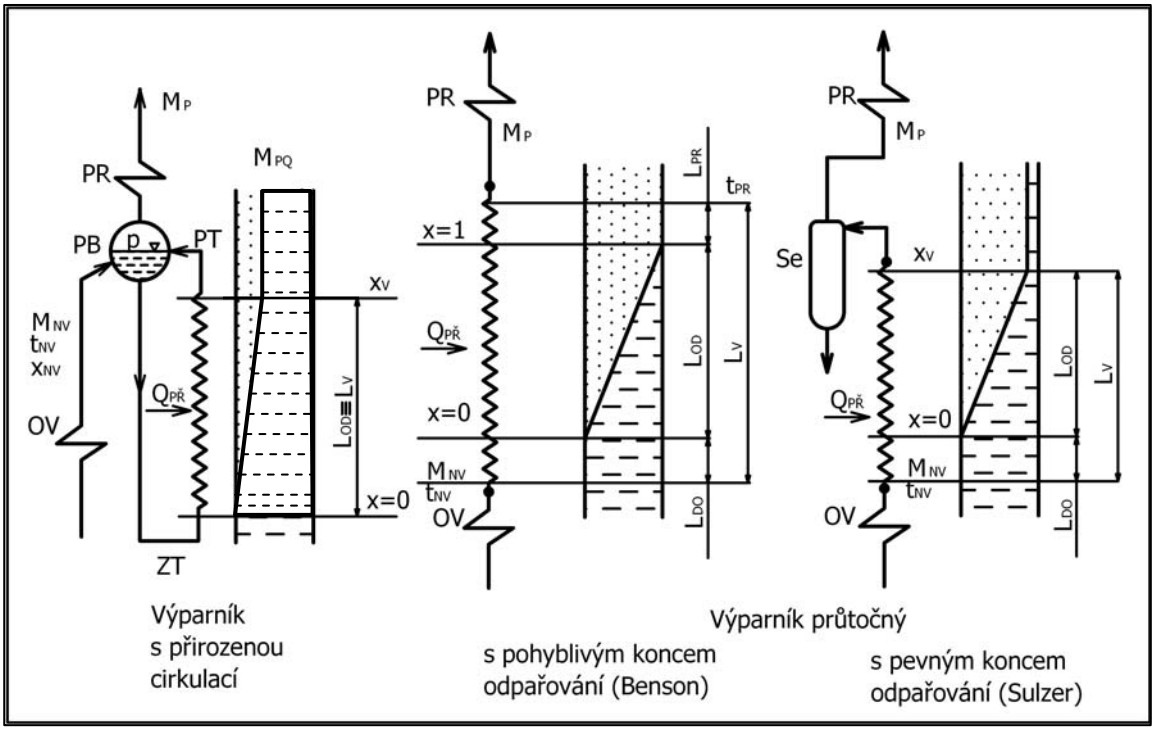
Reálně jsou u **parních kotlů** pro regulaci výkonu k dispozici dvě možnosti pro volbu regulované veličiny.

Jsou to:

- výkon spotřebiče páry (množství odebírané páry M_{PS})
- tlak páry za kotlem p_p

U **horkovodních kotlů** pak je regulovanou veličinou jejich tepelný výkon, který se stanoví jako součin průtoku, teploty a měrné tepelné kapacity vody na výstupu z kotle.

4.1.1 Dynamika výparníku parních kotlů



M_p – okamžité množství páry dodávané kotlem M_{PQ} – sytá pára vyrobená ve výparníku PB – parní buben
OV – ohřívák vody ZT – zavodňovací trubky L_V – otápěná délka (úsek) varnice L_{OD} – odpařovací délka (úsek) varnice
PT – převáděcí trubky $Q_{PŘ}$ – přivedené teplo do varnice PR – přehřívák L_{PR} – přehřívací délka (úsek) varnice
t_{NV} – teplota napájecí vody L_{DO} – dohřívací úsek t_{PR} – teplota přehřáté páry z výparníku Se – separátor
X_V – obsah páry na výstupu z výparníku

***Obr. 4.3** Schéma výparníků parních kotlů*

Výparník kotle je teplosměnná plocha, v níž se přivedeným teplem vypařuje voda a vzniká sytá pára. U vodotrubných kotlů je tato plocha provedena jako obvodové stěny spalovací komory.

Výparník kotle je tedy výměník tepla s dvoufázovým pracovním médiem, v němž je teplota pracovní látky konstantní (stav sytosti) a je funkcí tlaku pracovní látky.

Jsou dva základní typy výparníků parních vodotrubných kotlů a to **výparník s přirozenou cirkulací** (bubnový kotel) a **výparník průtočný**, který může být v provedení **s pohyblivým koncem odpařování** (typ Benson) a v provedení **s pevným koncem odpařování** (typ Sulzer) – schémata jsou uvedena na **obr. 4.3**.

Výparník s přirozenou cirkulací sestává z parního bubnu ***PB***, v němž se (kromě jiných funkcí) odlučuje voda od páry (prostor bubnu je rozdělen na „vodní" – pod hladinou a „parní" - nad hladinou) a do něhož se přivádí napájecí voda z ohříváku vody ***OV***. Z vodního prostoru bubnu se voda (na bodu varu) vede systémem zavodňovacích trubek ***ZT*** do otápěných varnic o délce L_V". Uvažujeme-li, že na vstupu do varnice má voda teplotu varu (zanedbává se ztráta tepla do okolí v systému ***ZT***), pak délka varnice L_V je totožná s odpařovací délkou L_{OD}. Ve varnici se část vody odpaří, takže na výstupu z varnice vystupuje vždy parovodní směs – tedy směs vody a syté páry na bodu varu (o stejné teplotě) – charakterizovaná suchostí x_V (udává obsah syté páry v 1 kg parovodní směsi), jejíž hodnota je v tomto případě vždy menší než jedna. (Např. 0,05 až 0,5). Parovodní směs z varnic se pak vede systémem převáděcích trubek *PT* zpět do parního bubnu, v němž se oddělí voda od páry. Sytá pára se pak odvádí z bubnu do přehříváku páry.

Výparník průtočný s pohyblivým koncem odpařování (Benson) je tvořen pouze soustavou paralelních varnic (nemá parní buben), které jsou na vstupu (i výstupu) připojeny ke společné rozdělovací (a sběrné) komoře, takže tlak na vstupu do všech varnic, jakož i na výstupu ze všech varnic je stejný.

Do výparníku vstupuje voda z ohříváku vody ***OV***, který je vždy konstruován tak, aby teplota vody t_{NV} byla nižší (např. o 30 K) než je teplota varu vody. Na otápěné délce varnice L_V lze vymezit tři úseky:

- dohřívací L_{DO} - v této části varnice se přivedená voda dohřeje z teploty t_{NV} na teplotu varu t', suchost v tomto místě je x = 0;
- odpařovací L_{OD} -v této části proběhne odpaření veškeré vody na sytou páru, suchost x = 1;
- přehřívací $L_{PŘ}$ - v této části se sytá pára přehřívá na teplotu $t_{PŘ}$, která je např. o 15 °C vyšší než je teplota sytosti.

*Na výstupu z tohoto výparníku je vždy mírně přehřátá pára, která se pak vede do přehříváku páry **PR.***

Výparník průtočný s pevným koncem odpařování (Sulzer) sestává ze soustavy paralelních varnic (podobně jako u výparníku Benson) a ze separátoru ***Se*** k němuž jsou varnice připojeny a v němž se odlučuje voda od páry.

Do výparníku vstupuje voda z ohříváku vody ***OV***, která má opět teplotu nižší než je teplota varu. Otápěnou délku varnice L_V lze rozdělit na část dohřívací L_{DO}, v níž se voda ohřeje na teplotu varu (t´; x = 0) a na část odpařovací L_{OD}, v níž se odpaří takřka veškerá voda, takže z varnice vystupuje parovodní směs s vysokou suchostí , např. $x_V = 0{,}95$.

V separátoru ***Se*** se voda (5 %) odloučí a vrací se zpět do okruhu (např. do úpravy vody), odloučená pára (95 %) se vede do přehříváku páry ***PŘ***. *Na výstupu z varnic*
u tohoto výparníku je vždy parovodní směs s vysokou suchostí.

Na základě analýzy dynamiky výparníku lze odhadnout, jak rychle bude kotel schopen změnit svůj výkon, jak bude při náhlých změnách odběru páry kolísat tlak páry, jak je třeba konstruovat výparník, aby byl kotel dostatečně pružný apod., což je důležité znát zejména u kotlů elektrárenských bloků nebo některých speciálních kotlů (např. pro dodávku páry pro výrobu celulózy), neboť za určitých okolností může být u nich výparník omezujícím článkem, pokud jde o kvalitu regulace jejich výkonu.

Při stanovení dále popisovaných dynamických vlastností výparníku se vychází z těchto zjednodušujících předpokladů:

- mezi oběma fázemi pracovního média ve výparníku (voda o teplotě varu a pára na teplotě sytosti) se při změnách termodynamických parametrů ihned obnovuje termodynamická rovnováha
- teplota stěny varnice se rovná teplotě varu, tj. hodnota součinitele přestupu tepla ze stěny varnice do pracovního média se blíží nekonečnu
- v celé tloušťce stěny varnice je stejná teplota $t_{st} = t'$, tzn. že se předpokládá varnice s malou tloušťkou stěny a s vysokou tepelnou vodivostí $(\frac{\lambda}{s} \cong \infty)$.

4.1.1.1 Dynamika výparníku s přirozenou cirkulací (bubnový kotel)

U tohoto typu výparníku (viz schéma na **obr. 4.3**) je vytvořena ve vodní části parního bubnu ***PB*** a v systému zavodňovacích trubek ***ZT*** určitá zásoba vody na stavu sytosti, tedy o teplotě varu.

Porušení hmotnostní rovnováhy se projeví změnou hladiny v parním bubnu, kdežto porušení energetické rovnováhy se projeví změnou tlaku ***p*** ve výparníku. Nejdůležitějšími vstupními veličinami jsou průtok M_{NV} a teplota t_{NV} napájecí vody, tepelný příkon výparníku $Q_{PŘ}$ a u kotlů s odpařovacím ohřívákem vody suchost x_{NV} parovodní směsi na jeho výstupu. Nejdůležitějšími výstupními veličinami jsou tlak páry ***p***, množství vyrobené páry M_P a výška hladiny v parním bubnu ***h***.

U těchto výparníků lze s přijatelnou přesností sledovat dynamiku tlaku páry ***p*** a hladiny ***h*** v bubnu odděleně a oba regulační obvody (regulace tlaku, tj. energetické bilance a regulace hladiny, tj. hmotnostní bilance) lze považovat za autonomní. Dynamika hladiny v bubnu a regulace napájení (hladiny) je popsána v kap. 4.3.1.

Při popisu dynamiky výparníku se vychází z hmotové bilance páry v parním prostoru výparníku ve tvaru [1] [6]

$$M_{PQ} - M_P \pm M_a = \frac{dm''}{d\tau} = \left[V_P'' + (V - V')\right]\frac{\partial \rho''}{\partial_P}\frac{\partial_p}{\partial \tau} \quad \text{[kg/s]}, \qquad (4\text{-}2)$$

kde: M_{PQ} - je množství páry vyrobené ve varnicích z přivedeného tepla $Q_{PŘ}$ [kg/s]

M_P - je množství páry odebírané z bubnu [kg/s]

M_a - je množství páry uvolněné nebo zkondenzované v důsledku změny tlaku (teploty) ve výparníku (změna akumulovaného tepla ve výparníku) [kg/s]

$(V - V')$ - představuje objem parních bublin pod hladinou vody [m^3]

V - objem výparníku pod hladinou [m^3]

V_P'' - objem parního prostoru bubnu [m^3]

m'' - hmotnost veškeré páry ve výparníku, tj. v parním prostoru bubnu i v bublinách ve vroucí vodě ve výparníku pod hladinou [kg]

Množství uvolněné nebo zkondenzované páry) M_a v důsledku změny akumulovaného tepla ve výparníku se vypočte ze vztahu (za předpokladu, že m' = konst.)

$$M_a = -\frac{1}{r}\left[m' \frac{\partial i'}{\partial p} + c_s m_s \frac{\partial t'}{\partial p} \right] \frac{\partial_P}{\partial \tau} \quad \text{[kg/s]} \qquad (4\text{-}3)$$

kde: m_s - je hmotnost té části výparníku, z níž se při změně tlaku předává teplo do pracovního média [kg]

m' - je obsah vody ve výparníku [kg]

Po úpravě rovnic (4-2) a (4-3) obdržíme vztah

$$M_{PQ} - M_P = \left[V_P'' + (V - V') \right] \frac{\partial \rho''}{\partial_P} \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \left(m' \frac{\partial i'}{\partial_P} + c_s m_s \frac{\partial t'}{\partial_P} \right) \frac{\partial p}{\partial \tau} = K_V \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad \text{[kg/s]} \quad (4\text{-}4)$$

kde: K_V [kg/MPa] **je akumulační konstanta** výparníku. Tato udává jaké množství páry se ve výparníku uvolní při poklesu tlaku o jednotku.

Člen $\boldsymbol{M_{PQ}}$ představuje množství páry uvolněné teplem přivedeným do výparníku $\boldsymbol{Q_{PŘ}}$, takže platí

$$M_{PQ} = \frac{Q_{PŘ}}{\iota'' - i_{NV}} \quad \text{[kg/s]} \qquad (4\text{-}5)$$

Velikost akumulační konstanty lze určit několika způsoby.

Pro přibližný výpočet lze použít zjednodušený vztah

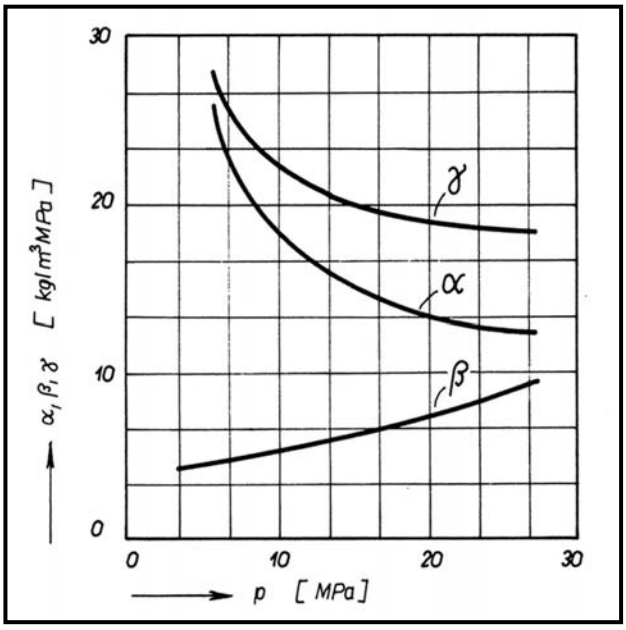
$$K_V = K_{VO} + K_{sp} + K_{Ž} \quad \text{[kg/MPa]}$$

kde: $K_{VO} = \alpha V_{VO}$; V_{VO} - je objem částí výparníku zaplněných vodou

$K_{sp} = \beta V_{sp}$; V_{sp} - je objem částí výparníku zaplněných sytou párou

$K_{Ž} = \gamma V_{Ž}$; $V_{Ž}$ - je objem kovových částí výparníku

Velikost součinitelů α; β a γ se určí z diagramu na **obr. 4.4** podle tlaku ve výparníku.



Obr. 4.4 *Součinitelé pro výpočet akumulační konstanty [6]*

Přesnější výpočty velikosti akumulační konstanty se provádí podle vztahu (4-4), který se dále upřesní respektováním skutečného rozložení teplot v silnostěnných částech tlakového systému výparníku. (Upustí se tedy od posledního předpokladu uvedeného v závěru kap. 4.1.1.)

Při výpočtu akumulační konstanty jsou obvykle potíže se stanovením správné hodnoty objemu parních bublinek pod hladinou [člen (V-V´) v rov. (4-2)]a hmotnosti kovových částí výparníku $\boldsymbol{m_s}$ [v rov. (4-3)]. Objem parních bublinek lze s dostatečnou přesností určit z oběhového čísla výparníku, viz např. [1] [9], přesné určení hodnoty hmotnosti kovových částí výparníku je obtížnější.

Hodnota $\boldsymbol{m_s}$ přestavuje hmotnost kovových částí výparníku, které mění svou teplotu současně se změnou teploty varu vody při změnách tlaku ve výparníku. U tenkostěnných topených částí výparníku (varnice) lze s dostatečnou přesností použit pro stanovení hmoty $\boldsymbol{m_s}$ skutečnou hmotnost varnice. U netopených tlustostěnných

částí výparníku (parní buben, komory) sleduje změnu teploty vody jen určitá malá část tloušťky stěny. Ve vzdálenějších částech stěny (od vnitřního okraje) bude teplota nižší (vyšší) a bude se měnit pomaleji. Proto se při stanovení hodnoty m_s u těchto částí musí uvažovat „jen“ ekvivalentní část celkové hmotnosti uvažované části tlakového systému.

Velmi přibližně lze akumulační konstantu určit i ze vztahu

$$K_V = K'_V . M_P \max. \quad \text{[kg/MPa]} \qquad (4\text{-}7)$$

kde: $K'_V = \frac{104}{p} - 3{,}75$ [kg/(MPa)(t/h)] pro bubnové kotle

$K'_V = \frac{53}{p} - 1{,}28$ [kg/(MPa)(t/h)] pro průtočné kotle

p - tlak ve výparníku [MPa]

M_P max – max. množství páry vyrobené ve výparníku [t/h]

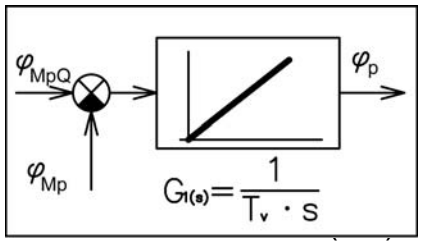
Tento způsob výpočtu je vhodné ale použit jen v těch případech, když nemáme k dispozici potřebné podklady pro přesnější výpočet.

Sloučením rovnic (4-4) a (4-5), po zavedení poměrných odchylek a po L.-transformaci, obdržíme výsledný vztah

$$\varphi_{QPŘ}(s) + \varphi_{\iota_{NV}}(s) - \varphi_{Mp}(s) = (T_v s + a_O)\varphi_p(s)$$

kde: a_O - je činitel autoregulace vyjádřený vztahem

$$a_O = \frac{\overline{p}}{\iota'' - \iota_{NV}} \frac{\partial \iota''}{\partial_P}$$



Obr. 4.5 *Blokové schéma výparníku bubnového kotle [1] [11]*

Parciální derivace termodynamických veličin se vypočtou z parních tabulek, např.

$\frac{\partial \iota''}{\partial_P} \doteq \frac{\iota''_a - \iota''_b}{p_a - p_b}$ [J/kg . MPa], kde za tlaky p_a, p_b se zvolí tlaky v okolí tlaku $\overline{p}$.

Činitel autoregulace a_o (viz též **obr. 3.8**) je pro tlak p > 3,8 MPa záporný (přenos je astatický) a pro tlak p < 3,8 MPa je kladný (přenos je statický). Pro přibližné výpočty lze brát $a_0 = 0$ a vztah (4-8) se pak zjednoduší na tvar

$$\varphi_{QPŘ}(s) + \varphi_{i\,NV}(s) - \varphi_{Mp}(s) = \varphi_{MPQ}(s) - \varphi_{Mp}(s) = T_V s \varphi_p(s) \qquad (4\text{-}10)$$

Blokové schéma této rovnice je na **obr. 4.5**

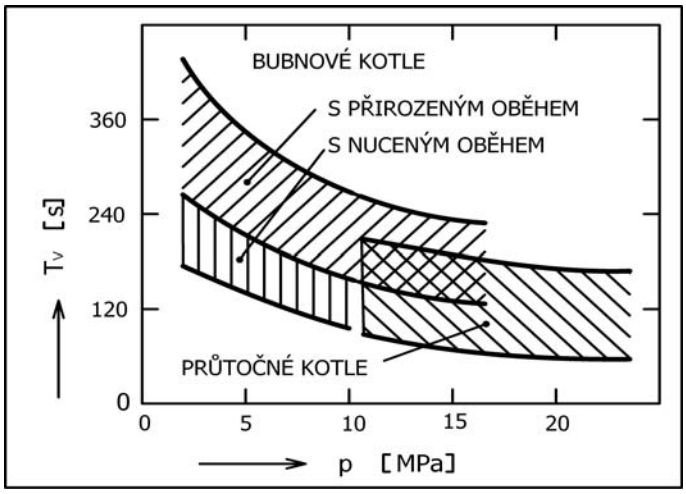
a $T_V = K_V \frac{p}{M_p}$ (4-11)

je **časová konstanta výparníku**, kde K_V je akumulační konstanta výparníku, viz např. rov. (4-4).

Časová konstanta výparníku je značně velká, neboť výparník kotle patří k částem kotle s největší akumulací tepelné energie. Orientační hodnoty časové konstanty výparníků některých kotlů jsou uvedeny na **obr. 4.6**.

Výparník s velkou časovou konstantou může být výhodný u kotlů, které zajišťují dodávku páry pro spotřebiče s velkými a rychlými změnami odběru páry

(např. v papírnách při připojení vařáků celulózy), neboť výparník zde působí jako velký akumulátor energie, takže změny tlaku páry jsou malé i při velkých změnách odběru páry.



Obr. 4.6 *Časová konstanta výparníků parních kotlů [6]*

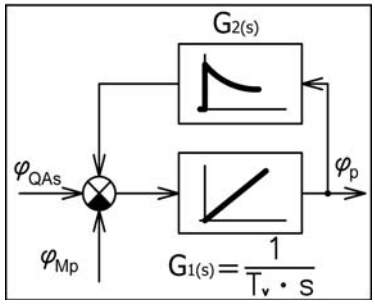
V případech, kdy se od kotle očekává rychlá změna výkonu je velká časová konstanta výparníku na závadu. Tak např. u kotlů, které jsou součástí elektrárenských bloků, je výparník nejméně pružným zařízením celého bloku. Pro posouzení dynamických vlastností bloku (regulace výkonu) má proto znalost časové konstanty výparníku značný význam. Její přibližná velikost se stanoví z rov. (4-11), a přibližná hodnota akumulační konstanty K_V se stanoví ze vztahů (4-6).

Při přesnějších výpočtech (jak již bylo uvedeno při výpočtu akumulační konstanty) se musí respektovat i vliv tepelných kapacit stěn tlakového systému, musí se tedy upustit od předpokladu (závěr kap. 4.1.1), že teplota stěny je stejná jako teplota varu vody (t_s = t´) a musí se počítat s reálnou hodnotou součinitele přestupu tepla ze stěny do pracovního média. (Neplatí, že $\alpha_1 \doteq \infty$).

Při respektování akumulovaného tepla ve stěnách jen u neotápěných částí výparníku, např. jeho tlustostěnných částí, tj. bubnu a komor, obdržíme pro akumulované teplo Q_{As} přenos ve tvaru

$$G_2(s) = \frac{\varphi_{QAs}(s)}{\varphi_p(s)} = K\frac{s}{T_s.s+1} \qquad (4\text{-}12)$$

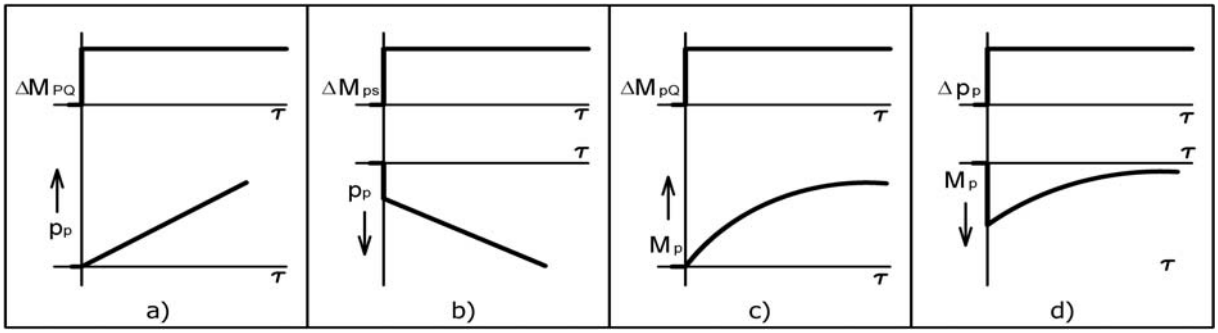
a odpovídající blokové schéma výparníku je na **obr. 4.7**. Podobným způsobem můžeme zohlednit i vliv akumulovaného tepla ve stěně varnic – tedy v topených částech výparníku.



Obr. 4.7 *Blokové Schéma výparníku s akumulací tepla [1]*

Ve skutečnosti však pára vyrobená ve výparníku protéká systémem spojovacích potrubí přes přehřívák páry a regulační ventil do spotřebiče. Tyto prvky představují (zjednodušeně řečeno) soustředěný odpor. Tato skutečnost se musí respektovat i při stanovení dynamických vlastností výparníku (dynamika tlaku páry) v případě, že konstantní tlak páry (regulovaná veličina) se udržuje až za kotlem.

Pro lepší představu o chování výparníku jsou na **obr. 4.8** uvedeny odezvy výparníku při běžných poruchách, tlak páry se měří až za kotlem. Tak např. odezva tlaku páry za kotlem p_p na skokovou změnu množství vyrobené páry ve výparníku ΔM_{PQ} (odběr páry je konst.) je na **obr. 4.8a**. Výparník se v tomto případě chová jako astatická soustava, tlak páry se trvale zvyšuje a neustálí se na nové hodnotě. Změnu ΔM_{PQ} lze realizovat změnou tepelného příkonu $Q_{PŘ}$ – např. změna množství přivedeného paliva M_{PV} nebo jeho výhřevnosti Q. Celý systém se nabíjí na vyšší tlak p_p. Na **obr. 4.8b** je



p_p – tlak páry za kotlem ΔM_{PQ} – změna množství vyrobené páry ve výparníku ΔM_{PS} – změna odběru páry do spotřebiče
M_p – množství dodávané páry za kotlem Δp_p – změna tlaku páry za kotlem

Obr. 4.8 *Odezvy výparníku bubnového kotle [10]*

znázorněna odezva tlaku páry $\boldsymbol{p_p}$ při změně odběru páry do spotřebiče $\boldsymbol{M_{PS}}$, resp. při změně odběru páry z kotle $\boldsymbol{M_p}$ – množství vyrobené páry je konst. Výparník se chová opět jako astatická soustava – tlak páry $\boldsymbol{p_p}$ se bude trvale snižovat. Počáteční skokový pokles tlaku je způsoben tím, že se musí nejdříve vytvořit potřebný tlakový spád pro větší průtok přehřívákem a potrubím. Zvýšená výroba páry $\boldsymbol{M_{PQ}}$ se realizuje na úkor akumulovaného tepla uvolněného při poklesu tlaku ve výparníku. Tepelný příkon $\boldsymbol{Q_{PŘ}}$ a ani množství napájené vody $\boldsymbol{M_{NV}}$ se nemění.
Na **obr. 4.8c** je znázorněna odezva množství dodávané páry $\boldsymbol{M_p}$ při skokové změně vyrobené páry ve výparníku $\boldsymbol{M_{PQ}}$. Výparník se chová jako statická soustava 1. řádu. Pozvolné zvyšování průtoku (dodávky) páry $\boldsymbol{M_p}$ při konstantním tlaku páry $\boldsymbol{p_p}$ je způsobeno tím, že soustava (výparník) se musí nabít na vyšší tlak, aby se zajistil vyšší průtok páry přehřívákem a potrubím.
Při zvýšení tlaku páry $\boldsymbol{p_p}$, viz **obr. 4.8d**, nejdříve dodávka páry $\boldsymbol{M_p}$ poklesne, systém se nejdříve nabíjí na vyšší tlak (množství vyrobené páry je konst.), a pak se ustálí na původní hodnotě. I v tomto případě se výparník chová jako statická soustava.

4.1.1.2 Dynamika výparníku průtočného (průtočné kotle)

Pro průtočné kotle (s pohyblivým a pevným koncem odpařování, **obr. 4.3**) je charakteristické silné vzájemné působení parametrů jednotlivých regulovaných soustav – průtočný kotel je typickým případem víceparametrového regulačního systému.

Tak např. změna množství napájené vody vyvolá nejen změnu parního výkonu, ale i posuv počátku a konce odpařování a změnu teploty páry (u kotle s pohyblivým koncem odpařování), resp. změnu parního výkonu a i posuvu počátku odpařování a změnu suchosti na výstupu z výparníku (u kotle s pevným koncem odpařování).

S tímto jsou spojeny určité komplikace jak při vyšetřování dynamických vlastností, tak i při seřizování jednotlivých regulačních obvodů a při provozování kotle.

Stejně jako u kotlů s přirozenou cirkulací tak i kotlů průtočných představuje výparník největší kapacitu a jeho chování (vlastnosti) má tedy rozhodující vliv na dynamiku celého kotle.

Při vyšetřování dynamických vlastností průtočného výparníku se obvykle vychází z těchto předpokladů [1] [11] [2]

- tlak ve výparníku je stálý časově i místně (zanedbáváme tlakovou ztrátu)

- tepelný tok do výparníku je po celé délce konstantní
- v každé části výparníku se předpokládá homogenní směs
- průměr trubek je po celé délce výparníku konstantní (dnes se ale běžně provádí výparník s odstupňovaným průměrem trubek po jeho délce, používají se např. tři různé průměry trubek)

Podrobný rozbor dynamiky výparníku je značně složitý a přesahuje svým rozsahem rámec i zaměření těchto skript. V této kapitole jsou proto uvedeny jen výsledky analýzy dynamiky výparníku. (Akumulační konstanta výparníku – viz kap. 4.1.1.1, rov. 4-7)

Vyšetřením statických vlastností výparníku (s pohyblivým koncem odpařování) [1] obdržíme **časovou konstantu výparníku T_v** (což je doba, za kterou ze syté kapaliny ***v'*** se získá sytá pára ***v''***) ve tvaru

$$T_v = \frac{rd}{4q(v'-v'')}, , \qquad [s] \qquad (4\text{-}13)$$

kde: r - výparné teplo [J/kg]
d - průměr varnice [m]
q - tepelný tok z vnitřního povrchu trubky do média [W/m^2]

a **délku výparníku L_{OD}** (během níž se změní v´na v´´, tedy odpařovací délka) ve tvaru

$$L_{OD} = w_o T_v \frac{1}{\Psi} \qquad [m] \qquad (4\text{-}14)$$

kde: w_o - počáteční rychlost vody na vstupu do výparníku (varnice) x = 0; v´; [m/s]
Tv - časová konstanta výparníku [s]
Ψ - je funkcí tlaku $\Psi_{(p)} = \frac{v'}{v''-v'}$

Vyšetřením dynamických vlastností výparníku (např. zjednodušenou grafickopočetní diferenční metodou) [1][11][2] získáme např. přechodové charakteristiky výparníku pro základní skokové poruchy jako jsou: změna průtoku napájecí vody M_{NV}, změna tepelného příkonu $Q_{PŘ}$ a změna polohy počátku odpařování $L_{x=0}$.

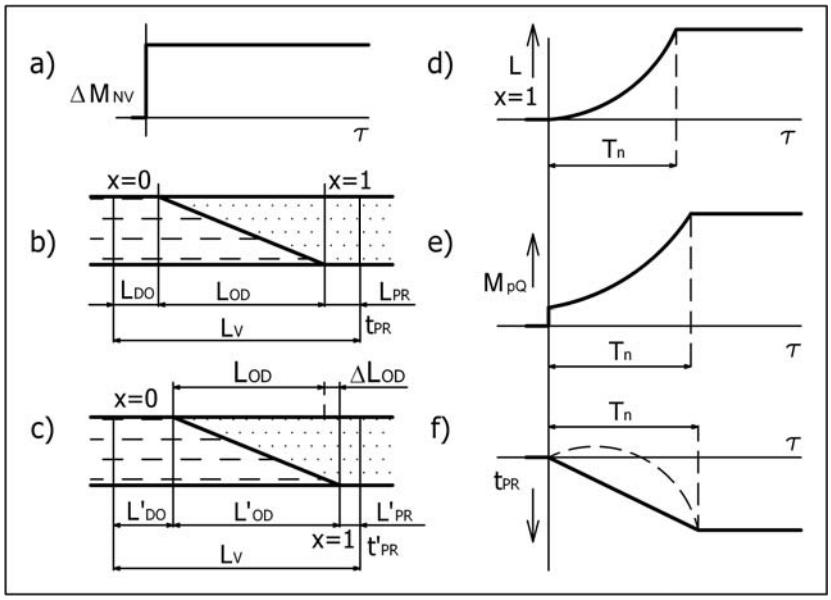
Samostatně budou dále popsány dynamické vlastnosti pro výparník s pohyblivým a s pevným koncem odpařování a dynamika tlaku průtočného výparníku.

a) výparník s pohyblivým koncem odpařování (kotel Benson)
Schéma je na **obr. 4.3.**

a1)* skoková změna množství napájecí vody *(ΔM_{NV})

Chování výparníku je naznačeno na **obr. 4.9**. Přírůstek průtoku ΔM_{NV} napájecí vody (viz **obr. a**) způsobí zrychlení průtoku směsi ve výparníku. Ustálený stav výparníku (v čase $\tau < 0$) je znázorněn na **obr. b)**. Počátek odpařování (x = 0) je ve vzdálenosti L_{DO} od počátku varnice a konec odpařování (x = 1) je ve vzdálenosti $L_{x=1} = L_{DO} + L_{OD}$ od počátku varnice.

Po skokové změně průtoku napájecí vody se výparník ustálí v novém rovnovážném stavu (viz **obr. c**). Počátek odpařování (x = 0) se posune dále od počátku varnice, tzn. $L'_{DO} > L_{DO}$ (tepelný tok stěnou se nezměnil, zvětšil se průtok vody) a délka odpařovací části se zvětší na $L'_{OD} = L_{OD} + \Delta L_{OD}$. Délka přehřívací části se zmenší, tzn. $L'_{PŘ} < L_{PŘ}$. Posuv konce odpařovacího pásma je dán vztahem



ΔM$_{NV}$ – přírustek průtoku napájecí vody L$_{DO}$ – dohřívací úsek varnice
L$_{OD}$ – odpařovací úsek varnice L$_{PR}$ – přehřívací úsek varnice
L$_V$ – otápěná stěna varnice M$_{PQ}$ – množství páry vyrobené ve výparníku
t$_{PR}$ – teplota přehřáté páry na výstupu z výparníku T$_n$ – doba náběhu

***Obr. 4.9** Odezvy výparníku – změna napájení (Benson – pohyblivý konec odpařování)*

$$\Delta L_{OD} = \frac{\Delta M_{NV}}{f} T_v (v'' - v') \quad [m] \qquad (4\text{-}15)$$

kde: f – průtočný průřez varnic na vstupu výparníku [m^2].

Přechodová charakteristika změny konce odpařování (Lx = 1) je uvedena na **obr. d)**.

Změna napájení vyvolá stejnou změnu v množství vyrobené páry ve výparníku M_{PQ}, takže $\Delta M_{NV} = \Delta M_{PQ}$.

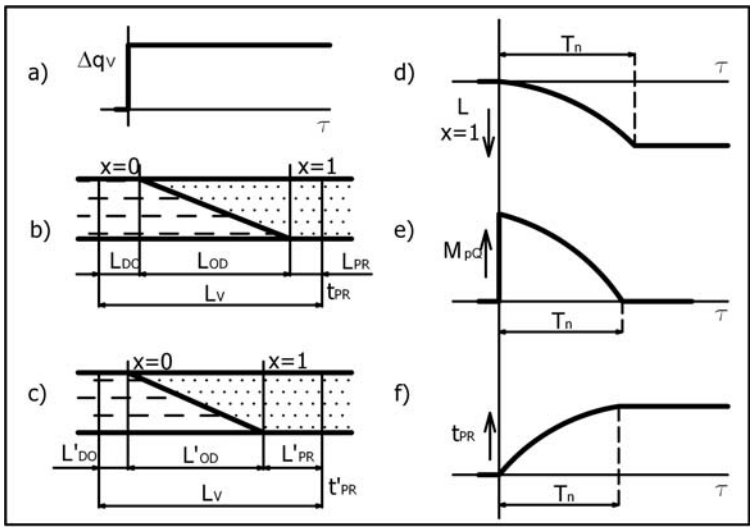
Odezva je znázorněna na **obr. e**). Jak je vidět, tak zvýšení průtoku páry neprobíhá skokově se zpožděním $T_z = T_n$, ale po počátečním zvýšení v čase $\tau = 0$ se průtok páry zvyšuje pozvolna, s dobou náběhu T_n. Tento průběh odpovídá množství vyrobené páry M_{PQ} vztažené ke konci výparníku L_v.(Jako pevnému bodu.)

Zkrácení délky $L_{PŘ}$ přehřívákové části výparníku vede k poklesu teploty přehřáté páry $t_{PŘ}$ na výstupu z výparníku L_v. (Tepelný tok do stěn je stejný, zkrátila se ale délka $L_{PŘ}$). Odezva je znázorněna na **obr. f)**. Zpoždění T_n poklesu teploty páry $t_{PŘ}$ je způsobeno opožděným průtokem páry M_{PQ} vůči napájení M_{NV} v přechodovém stavu – případně, v této souvislosti, může dojít i k přechodnému mírnému zvýšení této teploty.

a2) skoková změna tepelného příkonu q_v

Tepelný tok do pracovního média q_v se vztahuje k vnitřnímu povrchu trubek výparníku a počítá se z celkového přivedeného tepla do výparníku $Q_{PŘ}$.

Chování výparníku je naznačeno na **obr. 4.10**. Ustálený stav výparníku ($\tau < 0$) je naznačen na **obr. b)**. Po skokové změně tepelného toku Δq_v se výparník ustálí v novém rovnovážném stavu, viz **obr. c)**. Počátek odpařování (x = 0) se posune blíže k počátku výparníku $L'_{DO} < L_{DO}$, odpařovací délka se zkrátí ($L'_{OD} < L_{OD}$), takže konec odpařování (x = 1) se posune blíže k počátku výparníku. $L'_{x=1} < L_{x=1}$ nebo (L'_{DO} + L'_{OD}) < (L_{DO} + L_{OD}). V důsledku toho se zvětší délka přehřívací části výparníku, L´$_{PŘ}$ > L$_{PŘ}$.



Obr. 4.10 *Odezvy výparníku – změna tepelného toku (Benson – pohyblivý konec výparníku)*

Přechodová charakteristika změny konce odpařování Lx = 1 je naznačena na **obr. d)**.

Zvýšení tepelného toku vyvolá v přechodovém stavu zvýšení průtoku páry M_{PQ} za výparníkem, průběh je znázorněn na **obr. e)** a vztahuje se ke konci odpařování x = 1. (Odpaří se navíc objem vody odpovídající posunu konce odpařování k počátku výparníku.)

Prodloužení délky přehřívací části $L_{PŘ}$ výparníku se projeví zvýšením teploty páry $t_{PŘ}$ za výparníkem L_v. Odezva je znázorněna na **obr. f)**.

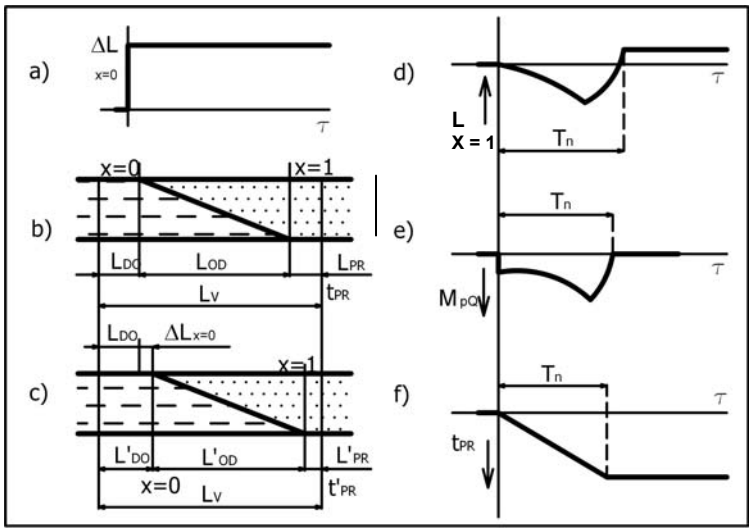
a3) skoková změna počátku odpařování *($L_{x=0}$)*

V tomto případě se musí výparník vyšetřovat samostatně pro kladný posun počátku odpařování (ve směru proudění, tj. $L'_{DO} > L_{DO}$) a pro záporný posun počátku odpařování (ve směru proti proudění, tj. $L'_{DO} < L_{DO}$).

- **kladný posun počátku odpařování**

Chování výparníku v tomto případě je zná-zorněno na **obr. 4.11**. Ustálený stav výparníku je naznačen na **obr. b)**. Kladný posun počátku odpařování (může být vyvolán třeba poklesem teploty napájecí vody – např. při výpadku vysokotlakého regenerativního ohříváku napájecí vody) má za následek prodloužení dohřívací části výparníku $L'_{DO} > L_{DO}$ (počátek odpařování x = 0, i konec odpařování x = 1, se posouvají ke konci výparníku) a zkrácení přehřívací části výparníku $L'_{PŘ} < L_{PŘ}$.

Přechodová charakteristika změny konce odpařování L_x = 1 je znázorněna na **obr. d)** – po přechodném poklesu se ustálí na mírně zvětšené hodnotě.

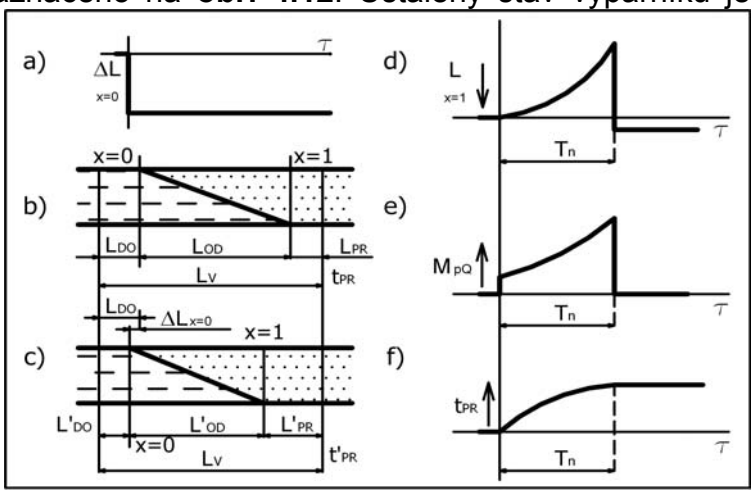


Obr. 4.11 *Odezvy výparníku – kladný posun počátku odpařování (Benson)*

Odezva množství vyrobené páry M_{PQ} ve výparníku je na **obr. e)** – a vztahuje se ke konci odpařování x = 1 – po přechodném poklesu se ustálí na původní hodnotě. (Průběh odezev v přechodovém období je ovlivněn ve výparníku tím, že v čase τ = 0 ve výparníku chybí určité množství vody, $\Delta L_{x=0} = L'_{DO}$ – L_{DO} .) Zkrácení délky přehřívací části ($L'_{PŘ} < L_{PŘ}$) vede k mírnému snížení teploty páry $t_{PŘ}$ za výparníkem L_V, viz **obr. f)**.

- **záporný posun počátku odpařování**

Chování výparníku je naznačeno na **obr. 4.12**. Ustálený stav výparníku je naznačen na **obr. b)**. Záporný posun počátku odpařování (je vyvolán třeba zvýšením teploty napájecí vody, např. po očistění trubek ohříváku vody parním ofukovačem) vede ke zkrácení dohřívací části výparníku $L'_{DO} < L_{DO}$ a prodloužení přehřívací části, $L'_{PŘ} > L_{PŘ}$. Přechodová charakteristika změny konce odpařování (L_x = 1) je vidět na **obr. d)** – po přechodném zvýšení se ustálí na mírně snížené hodnotě.



Obr. 4.12 *Odezvy výparníku – záporný posun počátku odpařování (Benson)*

Přechodová charakteristika vyrobené páry M_{PQ} je uvedena na **obr. e)** a vztahuje se ke konci odpařování x = 1 – po přechodném zvýšení se ustálí na původní hodnotě. (Průběh odezev v přechodovém období je ovlivněn tím, že v čase τ = 0 ve výparníku nadbývá určité množství vody, $\Delta L_{x=0}$.)

Prodloužení délky přehřívací části má za následek mírné zvýšení teploty t_{PR}˘ za výparníkem L_v, viz **obr. f)**.

b) výparník s pevným koncem odpařování (kotel Sulzer)

Schéma je naznačeno na **obr. 4.3**. Podobně jako u výparníku s pohyblivým koncem odpařování lze popsat odezvy tohoto výparníku na základní skokové poruchy. (Na výstupu z výparníku je vždy parovodní směs s vysokou suchostí, např. $x_v = 0{,}98$).

***b1)* skoková změna množství napájecí vody ΔM_{NV}**

Změna množství napájecí vody v tomto případě způsobí změnu suchosti x_v na výstupu z výparníku (na vstupu do separátoru). Z výparníku tedy vystupuje parovodní směs. Množství syté páry M_{sp} na výstupu z výparníku se stanoví ze vztahu

$$M_{sp} = M_p = M_{sm} x_v = M_{sm} \frac{v_{xv} - v'}{v'' - v'} \quad [\text{kg/s}] \qquad (4\text{-}16)$$

a množství vody na stavu sytosti M_{sv} na výstupu z výparníku se stanoví ze vztahu

$$M_{sv} = M_{sm}(1 - x_v) = M_{sm} \frac{v'' - v_{xv}}{v'' - v'} \quad [\text{kg/s}] \qquad (4\text{-}17)$$

kde: M_{sm} - množství parovodní směsi na výstupu z výparníku [kg/s]

$$(M_{sm} = M_{sp} + M_{sv} \equiv M_{NV})$$

M_p – množství páry na výstupu z výparníku

M_{sp} – množství syté páry

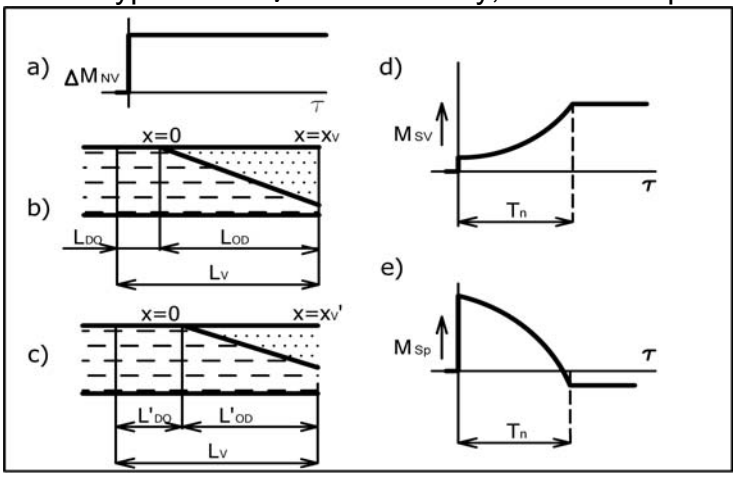
M_{sv} - množství syté vody

M_{NV} - množství napájecí vody

v_{xv} - měrný objem mokré páry na výstupu z výparníku při suchosti x_v [m^3/kg] $\quad [v_{xv} = x_v v'' + (1 - x_v) v']$

Chování výparníku je naznačeno na **obr. 4.13**. Ustálený stav výparníku (v čase $\tau < 0$) je vidět na **obr. b)**. Při skokové změně průtoku napájecí vody ΔM_{NV} se výparník ustálí v novém rovnovážném stavu, **obr. c)**.

Počátek odpařování (x=0) se posune dále od počátku varnice, tzn. $L'_{DO} > L_{DO}$ (tepelný tok stěnou ani délka výparníku L_v se nezměnily, zvětšil se průtok vody) a zmenší se hodnota suchosti páry na výstupu z výparníku, $X'_v < X_v$. Tzn., že na výstupu z výparníku se změní průtok syté páry M_{SP} a průtok vody M_{SV} při teplotě varu. Přechodová charakteristika změny průtoku vody M_{SV} je uvedena na **obr. d)** – průtok vody za výparníkem se



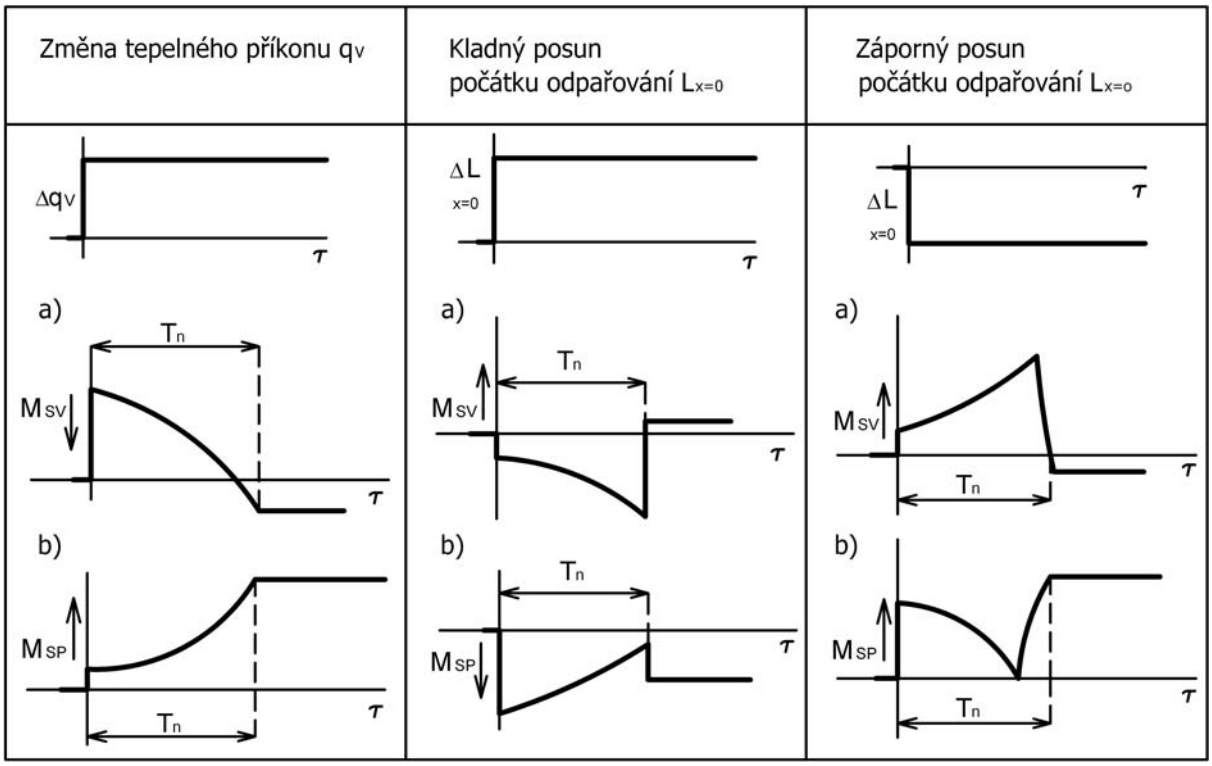
Obr. 4.13 *Odezvy výparníku – změna napájení (Sulzer – pevný konec odpařování)*

postupně ustálí na odpovídající vyšší hodnotě. Přechodová charakteristika změny průtoku (výroby) syté páry M_{SP} je uvedena na **obr. e)** – dodávka páry z výparníku se po přechodném zvýšení ustálí na mírně nižší hodnotě. Teplo předané ve výparníku $Q_{PŘ}$ (do pracovního média) se nezměnilo.

b2) skoková změna tepelného příkonu q_v

Stanoví se podobným způsobem jako v případě skokových změn dle bodu a) a bodu b1). Přechodové charakteristiky jsou uvedeny na **obr. 4.14**.

Přechodová charakteristika změny průtoku vody M_{sv} je uvedena na **obr.**



M_{SV} – průtok vody (na stavu sytosti) z výparníku M_{SP} – průtok syté páry z výparníku

Obr. 4.14 *Odezvy výparníku – změna tepelného toku a počátku odpařování (Sulzer)*

a) – průtok vody za výparníkem po přechodném zvýšení se ustálí na nižší hodnotě (průtok napájecí vody se nezměnil, při vyšším tepelném příkonu do výparníku se vyrobí více syté páry $M_{NV} = M_{sm} = M_{sp} + M_{sv}$.

Přechodová charakteristika změny průtoku syté páry M_{sp} je vidět na **obr. b)** – dodávka páry z výparníku se postupně zvyšuje na hodnotu odpovídající novému tepelnému příkonu.

b3) skoková změna počátku odpařování *($L_{x=0}$) – viz* obr. 4.14

- **kladný posun počátku odpařování** (může být vyvolán např. poklesem teploty napájecí vody).

  Přechodová charakteristika změny průtoku vody M_{sv} je uvedena na **obr. a)** – průtok vody za výparníkem se po přechodném poklesu ustálí na mírně zvýšené hodnotě.

  Přechodová charakteristika dodávky syté páry z výparníku je na **obr. b)** – průtok páry kolísá a ustálí se na odpovídající nižší hodnotě.

- **záporný posuv počátku odpařování** (může být způsoben např. zvýšením teploty napájecí vody)

  Přechodová charakteristika změny průtoku vody za výparníkem $\boldsymbol{M_{sv}}$ je na **obr. a)** – po přechodném zvýšení se průtok ustálí na mírně snížené hodnotě.

  Přechodová charakteristika průtoku páry za výparníkem $\boldsymbol{M_{sp}}$ je uvedena na **obr. b)** – dodávka páry z výparníku kolísá a ustálí se na odpovídající vyšší hodnotě.

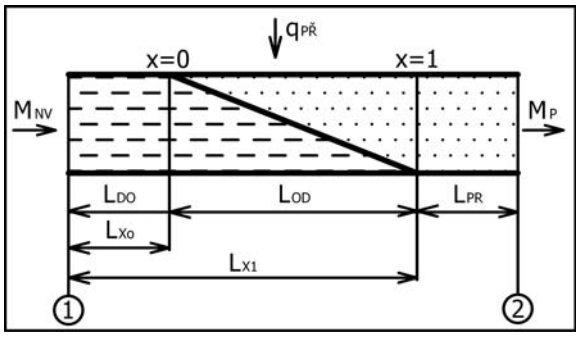
c) dynamika tlaku průtočných výparníků

Vzhledem k tomu, že u kotlů velkých elektrárenských bloků se dnes používají především průtočné výparníky pracující v oblasti podkritických i nadkritických parametrů, byla dynamice průtočných výparníků věnována značná pozornost a jejich analýza byla publikována v řadě prací, např. [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16].

V této kapitole jsou orientačně uvedeny jen některé výsledky analytického řešení dynamiky tlaku podle [6][12].

Při analýze se zanedbává teplo vznikající hydraulickými ztrátami ve výparníku, v celém výparníku se počítá s hodnotou středního tlaku.

Dále se předpokládá, že teploty ohřívaného média a vnitřního povrchu teplosměnné plochy jsou stejné a stejný po celé délce výparníku je i měrný tepelný tok z teplosměnné plochy do ohřívaného média. Výpočtové schéma výparníku je uvedeno na **obr. 4.15**.



Obr. 4.15 *Výpočtové schéma výparníku*

Po úpravách, linearizaci a zavedení relativních odchylek všech proměnných obdržíme výsledný vztah ve tvaru [4]

$$K_{vp}\varphi_{Mnv} - \varphi_{Mp} + (1 - K_{vp})(\varphi_{qP\check{R}} + \varphi_{L\,OD}) = T_{vp}\frac{d\varphi_{pv}}{d\tau} \qquad (4\text{-}18)$$

kde: φ_{Mnv} - poměrná změna přítoku napájecí vody M_{NV}

φ_{Mp} - poměrná změna dodávky páry z výparníku M_p

$\varphi_{qP\check{R}}$ - poměrná změna měrného tepelného toku $Q_{P\check{R}}$ (vztaženého na 1 m délky výparníku)

φ_{pv} - poměrná změna tlaku ve výparníku p_v $\left(p_v = \frac{p_{v1} + p_{v2}}{2} \right)$

$\varphi_{L\,OD}$ - poměrná změna odpařovací délky výparníku L_{OD}

$$\varphi_{L_{OD}} = \frac{\Delta L_{xo} - \Delta L_{x1}}{L_{OD}} \quad [1]$$

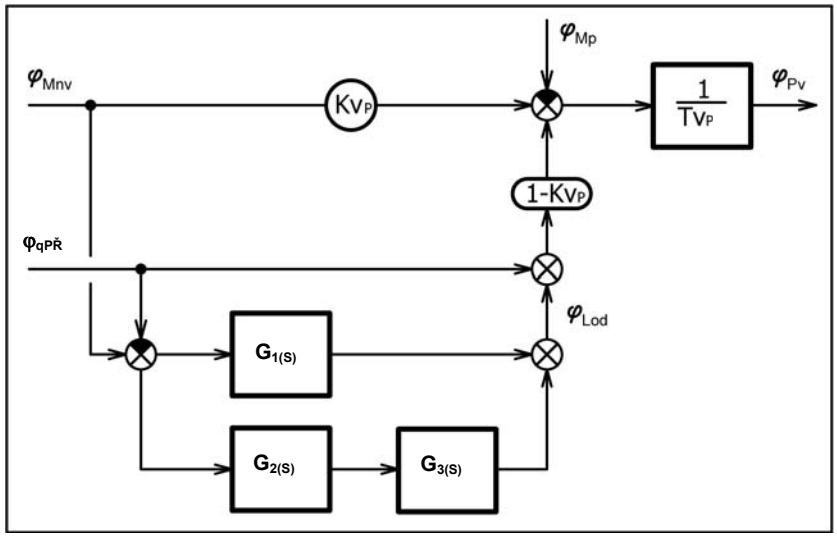
K_{vp}, T_{vp} - konstanty výparníku

Změna délky odpařovacího pásma závisí tedy i na poloze počátku a konce odpařovacího pásma a tím tedy i na průtoku vody $\boldsymbol{M_{NV}}$ a tepelném příkonu výparníku $\boldsymbol{Q_{P\check{R}}}$. (Podobně jako konec odpařovacího pásma.)

Výpočet konstant K_{vp} a T_{vp} [4] se liší podle toho, zda výparník pracuje s tlakem podkritickým nebo nadkritickým.

Výparník podle rov. (4-18) lze znázornit blokovým schématem na **obr. 4.16**.

Přenos $G_1(s) = \dfrac{\varphi_{L_{XO}}(s)}{\varphi_{M_{nv}}(s)}$ udává změnu polohy počátku odpařování při skokové změně přívodu napájecí vody, přenos $G_2(s) = \dfrac{\varphi_{L_{OD}}(s)}{\varphi_{M_{nv}}(s)}$ udává změnu délky odpařovací části výparníku při skokové změně napájecí vody a přenos $G_3(s) = \dfrac{\varphi_{L_{OD}}(s)}{\varphi_{L_{xo}}(s)}$ udává změnu délky odpařovací části výparníku při skokové změně polohy počátku odpařování.



Obr. 4.16 *Blokové schéma průtočného výparníku*

4.1.2 Základní způsoby regulace výkonu parních kotlů

Jak již bylo uvedeno v předcházejících kapitolách, může být z obecného hlediska při regulaci výkonu regulační veličinou **výkon spotřebiče páry** nebo **tlak páry.**

Víme též (kap. 4), že průtok páry za kotlem **nelze** jako regulovanou veličinu použít, neboť regulátor by na vnější poruchu (změna odběru páry) reagoval opačně než soustava vyžaduje a nedosáhl by se při regulaci rovnovážný stav.

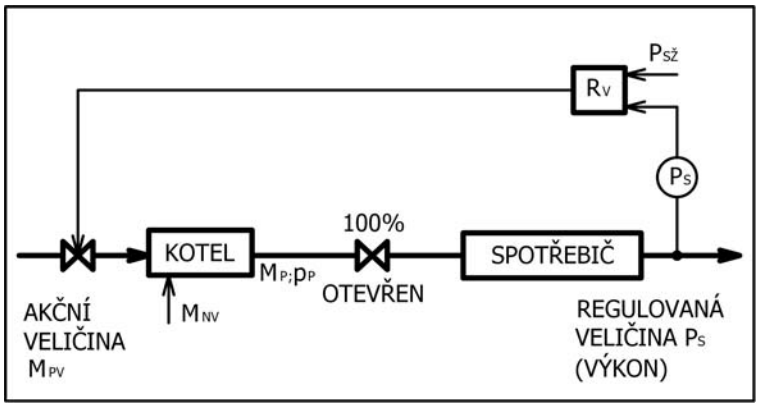
Základní způsoby regulace jsou:

a) regulace výkonu parního kotle podle výkonu spotřebiče páry

Regulovanou veličinou je výkon spotřebiče. Zjednodušené schéma je uvedeno na **obr. 4.17**. Charakteristické pro tento způsob regulace je to, že:

- kotel i spotřebič mají **společný regulátor výkonu *Rv***. Tlak páry p_p (a průtok páry M_p) před spotřebičem (za kotlem) se nereguluje, regulační ventil před spotřebičem je trvale naplno otevřený. Tlak páry p_p se nastavuje samovolně a je přímo úměrný výkonu spotřebiče.
- regulovanou **soustavu tvoří kotel i spotřebič**
  Dynamické vlastnosti takové soustavy jsou vždy horší než dynamické vlastnosti samotného kotle nebo spotřebiče.

Tento způsob regulace se vzhledem k samovolnému nastavování tlaku páry p_p podle výkonu spotřebiče nazývá **regulací výkonu klouzavým tlakem**. Výkon kotle se reguluje podle výkonu spotřebiče P_s změnou množství přiváděného paliva M_{PV} do kotle (akční veličina). Požaduje-li se vyšší výkon spotřebiče $P_{SŽ}$, zvýší se přívod paliva M_{PV} do kotle a naopak. Sníží-li se výhřevnost paliva (vnitřní porucha) poklesne parní výkon kotle, spotřebič má k dispozici méně páry a jeho výkon P_s se sníží. Regulátor R_v proto zvýší množství paliva M_{PV} tak, aby se dosáhl požadovaný výkon spotřebiče $P_{SŽ}$.



R_V – regulátor výkonu P_{SZ} – požadovaný výkon M_p – množství páry za kotlem P_p – tlak páry za kotlem

Obr. 4.17 *Regulace výkonu kotle– klouzavým tlakem [6]*

Regulace výkonu klouzavým tlakem páry nemůže tedy mít výhodné dynamické vlastnosti, ale má i některé výhody (např. využití akumulovaného tepla při poklesu tlaku ke zvýšení výroby páry), které lze využít v těch případech, kdy kolísání tlaku páry před spotřebičem lze připustit. (Např. při regulaci výkonu elektrárenských bloků, viz kap. 5.)

Použije-li se tento způsob regulace výkonu kotle, pak by kotel měl mít malou časovou konstantu výparníku a pružné spalovací zařízení.

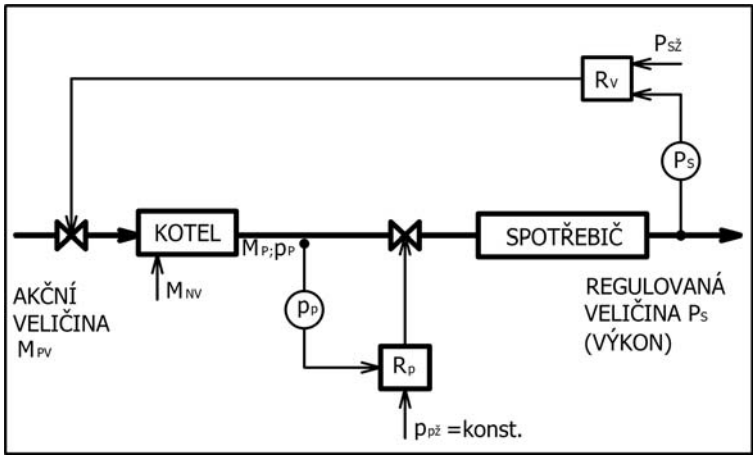
U některých spotřebičů je popsané kolísání tlaku páry při změnách výkonu nežádoucí. (Zhoršení ekonomie provozu, přídavné namáhání tlakového systému apod.). V takových případech se pro řízení výkonu kotle používá některý z následujících způsobů regulace.

b) předtlaková regulace výkonu parního kotle

Základní schéma je na **obr. 4.18** Dynamické vlastnosti regulačního obvodu jsou podobné jako při regulaci klouzavým tlakem.

Výkon kotle se reguluje podle výkonu spotřebiče P_s změnou přívodu paliva M_{PV} (akční veličina), stejně jako při regulaci klouzavým tlakem.

Tlak páry před regulačním ventilem, resp. před spotřebičem (regulační ventil je součástí spotřebiče), se ale udržuje na konstantní hodnotě $p_{Pž}$ samostatným regulátorem R_p tlaku páry, akčním



R_p – regulátor tlaku páry $p_{SŽ}$ – žádaná hodnota tlaku

Obr. 4.18 *Regulace výkonu kotle – s předtlakovou regulací [6]*

orgánem je regulační ventil před spotřebičem. V ustáleném stavu odpovídá tlak páry za kotlem regulovanému tlaku p_p před spotřebičem.

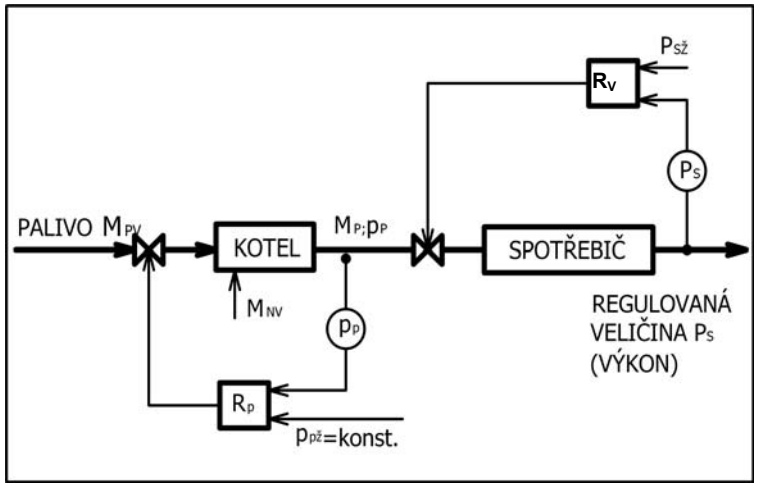
Regulovanou soustavu tvoří i v tomto případě kotel se spotřebičem, takže dynamické vlastnosti takové soustavy (jsou stejně jako v případě regulace s klouzavým tlakem) nevýhodné (malá pružnost regulace výkonu), ale tlak páry před spotřebičem se při regulaci výkonu nemění – je konstantní.

U těch zařízení, kde se požadují časté (a rychlé) změny výkonu je malá pružnost regulace výkonu nežádoucí.

V těchto případech je výhodné regulovanou soustavu rozdělit – parní kotel i spotřebič pak mají vlastní regulátory výkonu – tak jak u následujícího způsobu regulace výkonu podle bodu c).

c) klasická regulace výkonu kotle – jinak též regulace výkonu na konstantní tlak za kotlem

Schéma této regulace je uvedeno na **obr. 4.19** Kotel i spotřebič mají vlastní regulátor. Výkon spotřebiče P_s reguluje na žádanou hodnotu $P_{sž}$ regulátor výkonu spotřebiče R_v a to přestavením regulačního parního ventilu před spotřebičem. (Regulační ventil je součástí spotřebiče.)



Obr. 4.19 *Regulace výkonu kotle – na konstantní tlak za kotlem (klasická) [6]*

Regulátor výkonu kotle (tlaku páry) R_p nastavuje průtok paliva M_{pv} do kotle tak, aby se tlak páry za kotlem p_p udržoval na konstantní hodnotě $p_{pž}$.

Při požadavku na zvýšení výkonu spotřebiče regulátor R_v otevře regulační ventil spotřebiče a zvýší tak odběr páry M_p z kotle na potřebnou hodnotu. Tím ale klesne tlak páry p_p za kotlem na což reaguje regulátor R_p výkonu kotle zvýšením přívodu paliva M_{pv} do kotle, čímž se zvýší dodávka páry z kotle tak, aby se dosáhl požadovaný konstantní tlak páry za kotlem $p_{pž}$. Výkon kotle se tak zvýší a přizpůsobí se vyššímu výkonu spotřebiče.

Při zvýšení výhřevnosti paliva (u kotle je to vnitřní porucha) se zvýší výroba páry M_p v kotli a při nezměněném odběru páry spotřebičem (při nezměněném výkonu spotřebiče) se následně zvýší tlak páry p_p za kotlem. Regulátor R_p kotle sníží přívod paliva M_{pv} tak, aby vyráběné množství páry M_p v kotli bylo stejné jako odebírané množství páry spotřebičem.

Výhodou tohoto způsobu regulace výkonu kotle je, že kotel působí jako akumulátor energie. Čím větší bude akumulační konstanta kotle, tím menší bude kolísání tlaku páry p_p za kotlem při změnách výkonu spotřebiče P_s. Regulace výkonu je pružnější než v předešlých případech, neboť regulátor R_v výkonu spotřebiče může pracovat rychleji (tvoří samostatný regulační obvod s jednodušší soustavou – jen spotřebič). Regulační obvod výkonu kotle je zcela nezávislý na funkci spotřebiče – což může být v některých případech výhodou. Dílčí nevýhodou popisované klasické regulace výkonu kotle (na konstantní tlak páry)

je, že dochází ke kolísání tlaku páry p_p před spotřebičem, což může (podle druhu spotřebiče) zhoršovat ekonomii jeho provozu.

I přes tuto nevýhodu je tento způsob regulace nejužívanější metodou regulace výkonu parních kotlů.

Časová změna tlaku páry p_p [viz též rov. (4-4)] je tedy měřítkem rovnováhy výroby páry ve výparníku a odběru páry z výparníku kotle. Udržuje-li regulátor výkonu kotle tlak páry konstantní, pak je zachována i rovnováha tepelného příkonu a parního výkonu kotle. Regulátor reaguje správně na vnitřní a vnější poruchy v soustavě.

Výhodou této regulace je pružnější regulace výkonu kotle, neboť při změnách výkonu spotřebiče (vnější porucha) působí kotel jako akumulátor energie. Čím větší bude akumulační konstanta kotle, tím menší kolísání tlaku páry se vyvolá při změnách výkonu spotřebiče.

V tomto případě (při změnách výkonu spotřebiče) je tedy velká časová konstanta výparníku žádoucí.

Na druhé straně – pokud se požaduje, aby kotel rychle zvýšil výkon – je velká časová konstanta výparníku kotle nevýhodná, protože při zvyšování výkonu kotle se kotel musí nabít na vyšší tlak. (S tím souvisí i vyšší teplota varu vody a tedy i zvýšení teploty vody a páry v objemu výparníku a odpovídající zvýšení teploty stěny tlakového systému výparníku.)

Při regulaci výkonu podle konstantního tlaku páry je velmi důležité, **ve kterém místě kotle se bude konstantní tlak udržovat.**

Jsou prakticky jen dvě místa na kotli, kde lze udržovat tlak páry konstantní. Je to na výstupu z přehříváku (v parním potrubí za kotlem) nebo v parním bubnu kotle.

Pro dále uvedený popis průběhu tlaku v tlakovém systému je třeba si uvědomit, že při změnách výkonu je tlak páry v místě jeho měření konstantní (na konstantní hodnotě ho udržuje regulátor), kdežto v ostatních místech tlakového systému se tlak páry mění – protože se mění hydraulicky odpor systému.

Průběhy tlaku páry při regulaci výkonu na konstantní tlak jsou pro zvolená místa konstantního tlaku naznačeny na **obr. 4.20a** a **4.20b**; na **obr. 4.20c** jsou pro porovnání uvedeny průběhy tlaku při regulaci výkonu kotle s klouzavým tlakem.

Při regulaci výkonu s **konstantním tlakem páry za kotlem** p_p se při **zvyšování výkonu** (**obr. a-1**) např. ze 60% na 100% tlak za kotlem p_p nemění, je konstantní. Ale tlak páry p_b v parním bubnu se zvýši – a to o přírůstek hydraulického odporu při proudění zvětšeného množství páry přes systém přehříváků páry. Při zvyšování tlaku páry p_b v bubnu se zvyšuje i teplota varu vody a zvyšuje se tak množství tepla akumulovaného ve vodě, páře a stěně výparníku, jakož i v páře obsažené v přehříváku (vyšší tlak). Kotel se tedy nabíjí – viz znaménko $\oplus$ ve šrafované ploše. (Nabíjí se výparník – velké akumulované teplo, i přehřívák – menší akumulované teplo.)

Při **snižování výkonu** (**obr. a-2**) zůstává opět tlak páry p_p za kotlem konstantní, ale tlak páry p_p v bubnu se sníží. (Jsou nižší hydraulické ztráty). Tím klesne teplota varu vody (i teplota stěny výparníku) a sníží se množství akumulovaného tepla v kotli – kotel se vybíjí (viz znaménko $\ominus$).

Průběhy tlaku páry v kotli při udržování **konstantního tlaku v bubnu kotle p_b** jsou znázorněny na **obr. 4.20b**.

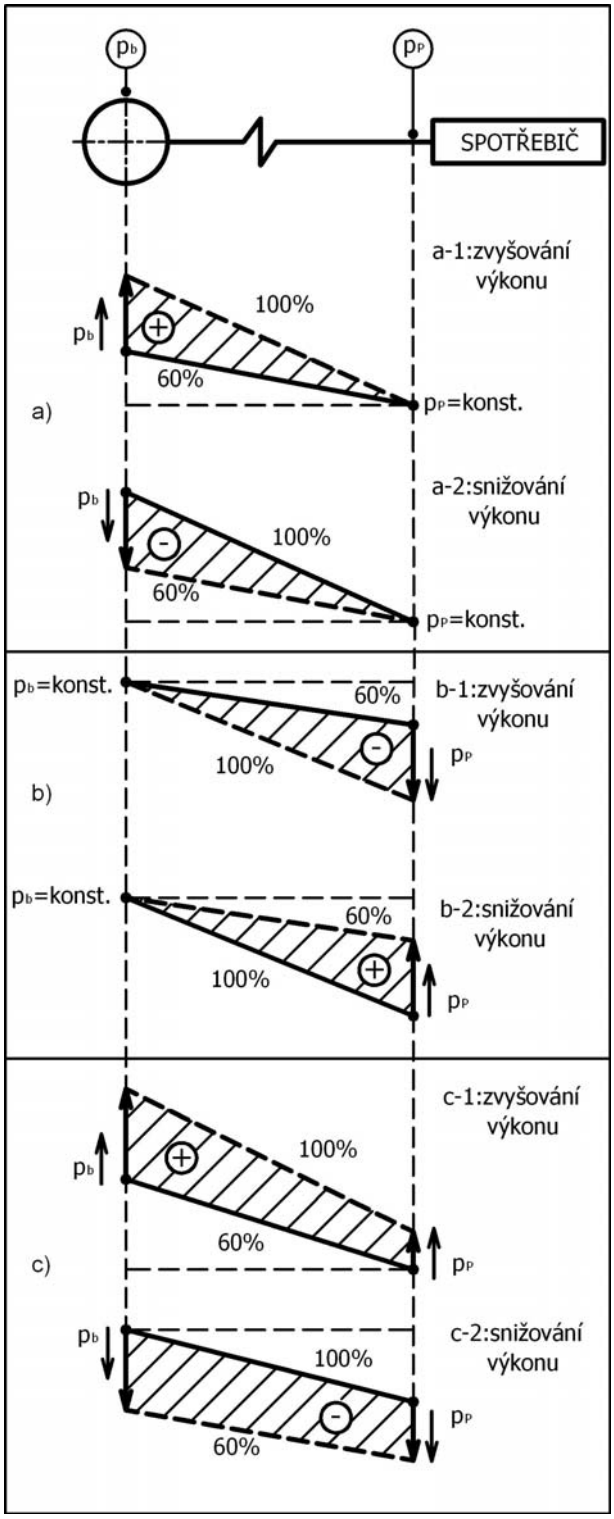
Při zvyšování výkonu kotle (**obr. b-1**) se tlak páry p_p za kotlem sníží o hydraulický odpor přehříváku páry, akumulované teplo v přehřívákovém systému se snižuje, přehřívák páry se vybíjí (⊖).

Při snížení výkonu kotle (**obr. b-2**) se tlak páry p_p za kotlem zvýší (je menší hydraulický odpor přehříváku), tím se zvýší i akumulované teplo v přehříváku – kotel se nabíjí (⊕).

Protože tlak páry p_b v bubnu kotle je konstantní (regulace) nemění se při změně výkonu kotle akumulované teplo ve výparníku, ale jen v systému přehříváku. (Teplota varu vody je konstantní, změna akumulovaného tepla souvisí jen s akumulací páry v přehřívácích – mění se jen tlak páry, teplota páry v bubnu i za kotlem je konstantní.)

Protože akumulace tepla v přehřívákovém systému je výrazně menší než akumulace ve výparníku, představuje regulace s konstantním tlakem páry v bubnu kotle nejrychlejší možnost zvyšování výkonu kotle. (Kolísá však tlak páry před spotřebičem, což je pro některé spotřebiče nevhodné.)

Na **obr. 4.20c** jsou uvedeny průběhy tlaku páry při regulaci výkonu **s klouzavým tlakem**. (Regulační ventil před spotřebičem je plně otevřen.) V tomto případě jsou dynamické vlastnosti nejhorší. Při zvyšování výkonu kotle (**obr. c-1**) se zvýší hydraulický odpor přehříváku (zvýší se i průtok páry do spotřebiče) – tlak páry za



p_b – tlak páry v bubnu p_p – tlak páry za kotlem

***Obr. 4.20** Průběh tlaku při regulaci výkonu kotle*
a) konstantní tlak páry za kotlem
b) konstantní tlak páry v bubnu kotle
c) s klouzavým tlakem páry

kotlem p_p i tlak páry p_b v bubnu se zvýší, tím se zvýší i akumulované teplo (ve výparníku i v přehříváku) a celý kotel se nabíjí. Při snižování výkonu (**obr. c-2**) se tlak páry v celém kotli (výparník i přehřívák) snižuje a kotel se vybíjí.

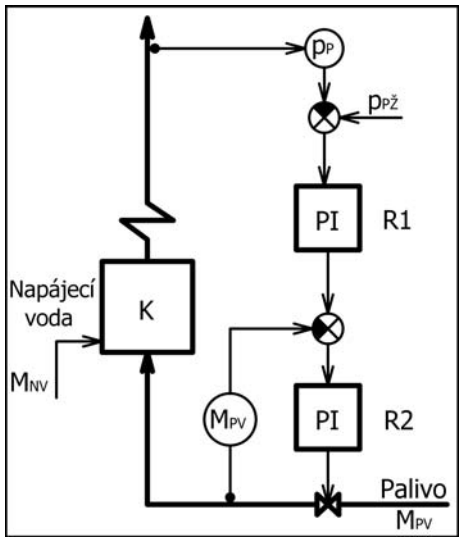
Zvýšení výkonu u této regulace je tedy nejpomalejší (největší akumulace tepla v kotli).

Akumulace tepla v kotli však není jediným kritériem pro rozhodnutí o volbě místa konstantního tlaku páry. Konečné rozhodnutí se musí provést i s přihlédnutím na ostatní kritéria, jako jsou např. požadavky kladené na spotřebič páry a způsob jeho provozu, možné způsoby provozování kotle, ekonomie provozu celé soustavy (kotel – spotřebič), nastavení pojišťovacích ventilů, zapojení parního kotle – tj. blokové uspořádání kotle a spotřebiče nebo provoz více kotlů do společné parní sítě atd.

Nejjednodušší provedení regulátoru výkonu kotle při regulaci na konstantní tlak za kotlem je znázorněno na **obr. 4.21**.

Regulovanou veličinou je tlak páry za přehřívákem p_p (nebo tlak páry v bubnu kotle p_b). Tlak páry se udržuje na požadované hodnotě $p_{pž}$, regulační odchylka vstupuje do nadřazeného regulátoru ***RI***, který je obvykle v provedení ***PI*** (ale může být i typu ***P*** nebo ***PID***) a nazývá se regulátorem výkonu. (Viz též regulátor R_p, **obr. 4.19**.)

Výstupní signál z regulátoru ***R1*** představuje vlastně žádanou hodnotu množství paliva přiváděného do kotle a porovnává se s měřenou hodnotou množství M_{pv} skutečně dodaného paliva do kotle. Regulační odchylka se vede do podřízeného regulátoru ***R2***, který je většinou typu ***PI*** a nazývá se též regulátorem množství paliva.



K – kotel M_{NV} – množství napájecí vody
p_p – tlak páry za kotlem R1, R2 - regulátory

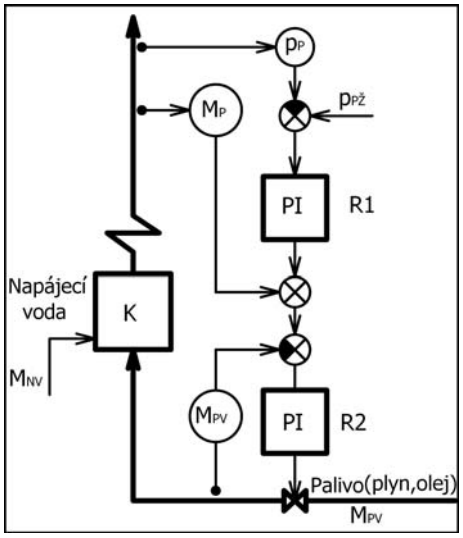
Obr. 4.21 *Základní struktura regu-látoru výkonu kotle (tlaku páry) [4]*

Při spalování plynu nebo oleje není problém měřit přímo množství spalovaného paliva M_{pv} a realizace naznačené zpětné vazby nečiní tedy žádné potíže. Jiná je situace při spalování uhlí, kdy je velmi obtížné množství spalovaného paliva M_{pv} měřit přímo. Proto se nejčastěji odvozuje naznačená zpětná vazba (tzv. malá smyčka) od otáček podavače uhlí. U některých nových kotlů se dnes začínají (pro měření průtoku uhlí) používat kontinuálně měřící radiometry – tyto snímají průtok uhlí přímo na pásovém nebo řetězovém dopravníku těsně před kotlem resp. před mlýnem (viz např. snímač fy Bethold [58], nebo čidla pro měření průtoku práškové směsi v práškovodech za mlýnem, viz. např. ECT STAR Systém [20].

Při seřizování regulátoru výkonu ***R1*** (optimalizace) se musí vzít v úvahu i předpokládaný způsob provozu kotle, případně se musí zvolit kompromisní nastavení zesílení regulátoru a jeho časových konstant.

Tak např. optimální velikost proporcionálního zesílení regulátoru výkonu ***R1*** závisí na velikosti akumulační konstanty kotle a tedy i na místě udržování konstantního tlaku páry.

Pracuje-li kotel s konstantním tlakem páry zejména v bubnu kotle p_b, mění se akumulační konstanta kotle jen velmi málo (**obr. 4.20**) a proporcionální zesílení se nemusí přestavovat. Zcela jiná situace nastane při provozu kotle s klouzavým tlakem páry, kdy se s výkonem kotle mění výrazně i jeho akumulační konstanta. Má-li být i v tomto případě regulační obvod optimalizován, pak se musí proporcionální zesílení měnit nepřímo úměrně akumulační konstantě kotle.



Mp – množství páry za kotlem

Obr. 4.22 *Regulace výkonu kotle (tlaku páry) s měřením poruchové veličiny [1][4]*

Kvalitu regulace výkonu kotle **lze zlepšit měřením poruchových veličin.**

Regulátor výkonu kotle, který **omezuje působení vnějších poruch** je naznačen na **obr. 4.22**.

Jako poruchová veličina se měří průtok páry M_p do spotřebiče (vnější porucha) a tento signál se přičítá k výstupnímu signálu z regulátoru výkonu ***R1***. Tuto strukturu lze používat jen v těch případech, kdy se často mění dodávka páry M_p do spotřebiče (tedy při častých změnách výkonu kotle), ale kotel spaluje palivo s konstantní výhřevností, tzn. olej nebo plyn (vliv vnitřních poruch je omezen na minimum). Toto omezení je zapříčiněno tím, že množství páry M_p dodávané do spotřebiče má při vnitřních poruchách (na straně paliva) opačnou polaritu než při poruchách vnějších a proto by se při působení vnitřních poruch kvalita regulace zhoršovala.

Tak např. při působení vnější poruchy (zvýší se odběr páry spotřebičem) je polarita signálu jdoucího do součtového uzlu od změny tlaku páry p_p a průtoku páry M_p stejná (má při zvýšení odběru páry znaménko $\oplus$ - při zvýšeném odběru klesne tlak p_p a regulační odchylka pro regulátor ***R1*** se zvýší) a signály se sčítají a zvyšuje se tak žádaná hodnota pro regulátor paliva ***R2*** (regulátor ***R2*** zvýší množství paliva). Avšak při působení vnitřní poruchy (sníží se teplo přivedené do kotle) je polarita signálu od změny tlaku (+) a od změny průtoku (-), tedy opačná. (Při snížení množství přivedeného tepla, např. pokles výhřevnosti, se sníží tlak páry p_p a regulační odchylka pro regulátor ***R1*** se zvýší, zatímco množství páry M_p se sníží). V součtovém členu se pak signály odečítají a regulační odchylka pro regulátor paliva ***R1*** se zmenšuje nebo může mít i opačné znaménko. Toto má samozřejmě negativní vliv na kvalitu regulace výkonu. Pokud se přesto použije množství páry M_p jako pomocná veličina i v případě spalování paliva s častým nekontrolovatelným kolísáním výhřevnosti, musí se výrazně zvětšit zesílení regulátoru výkonu ***R1***, čímž se omezí vliv opačné polarity signálu od průtoku páry M_p.

Zvětšování zesílení u regulátoru výkonu ***R1*** je ale omezeno danými mezemi stability regulačního obvodu.

Obecně platí, že omezení vlivu vnitřních poruch je obtížnější, protože tepelný příkon při spalování paliv s kolísavou výhřevností (uhlí) nelze s potřebnou přesností měřit přímo.

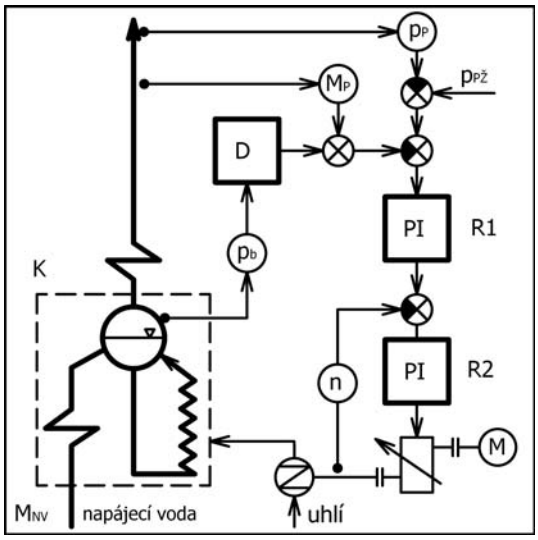
Omezit vliv **vnitřních poruch** (na kvalitu regulace výkonu) lze dvojím způsobem:

a) urychlením vlivu signálu tlaku páry p_p derivačním členem. Toto se provede záměnou regulátoru ***R1*** na **obr. 4.21**; místo ***PI*** regulátoru se použije ***PID*** regulátor (**tab. 4.2** – sloupec 1)
b) nepřímým měřením tepelného příkonu do kotle. V tomto případě se vychází ze vztahu (4-4), z něhož lze stanovit výrobu páry M_{PQ} z tepla uvolněného v ohništi.

$$M_{PQ} = K_V \frac{d\Delta p}{d\tau} + \Delta M_p \qquad \text{[kg/s]} \qquad (4\text{-}19)$$

Výraz na pravé straně této rovnice je úměrný změně tepelného příkonu kotle a schéma regulace je naznačeno na **obr. 4.23**. Při působení vnějších poruch (změna odběru páry) se oba členy pravé strany rovnice vyruší, takže signál od průtoku páry M_p nezhoršuje jakost regulace. Signál nepřímého měření tepelného příkonu je zpožděn v mlecím okruhu, ve spalovacím zařízení, při průchodu teplosměnnou plochou a ve výparníku – tím je částečně znehodnocen vliv na kvalitu regulace.

Jak je zřejmé, tak dosavadní metody eliminace působení vnitřních poruch při regulaci výkonu kotle nejsou dostatečné. Řešení souvisí s měřením tepelného příkonu do kotle zejména při spalování uhlí – tzn. s kontinuálním měřením výhřevnosti, resp. s kontinuálním měřením obsahu popela a vody.



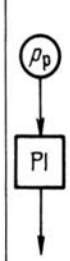
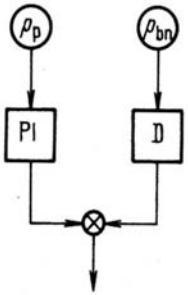
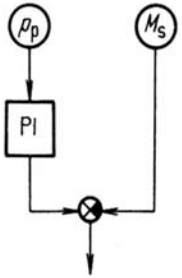
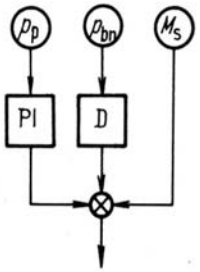
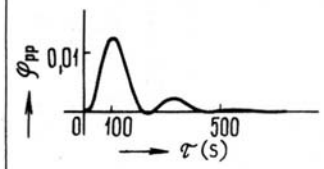
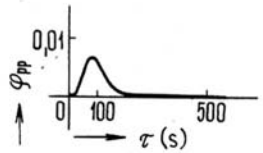
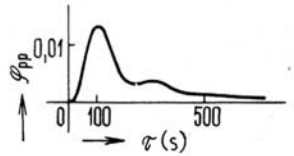
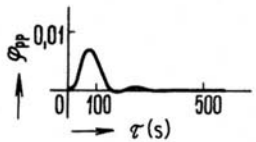
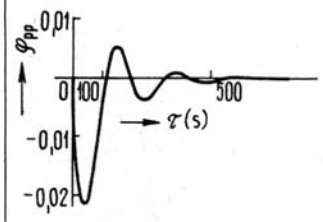
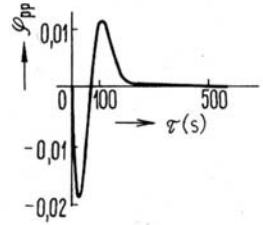
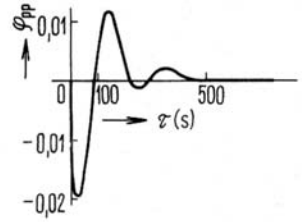
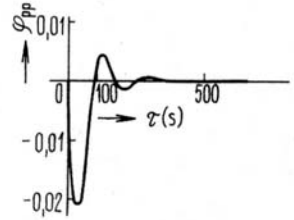
K – kotel n – otáčky D – derivační regulátor

Obr. 4.23 *Regulace výkonu kotle (tlak páry) s nepřímým měřením uvolněného tepla v ohništi [1][4]*

Chování popsaných regulátorů výkonů (základní provedení a provedení s měřením poruchové veličiny) je pro porovnání a představu znázorněno v **tab. 4.2**.

Jak je z přechodových charakteristik vidět, tak podstatného zlepšení (v porovnání se základním provedením, sloupec 1) se dosáhne zavedením pomocného signálu derivace tlaku páry (ať již je to derivace tlaku páry v bubnu dle sloupce 2, nebo použitím ***PID*** regulátoru místo původního ***PI*** regulátoru u základního provedení dle sloupce l) nebo nepřímým měřením tepelného příkonu v provedení podle sloupce 4.

Varianta s měřením pomocného signálu průtoku páry M_p do spotřebiče (sloupec 3) regulační pochod nijak výrazně nezlepšuje, při některých poruchách může být kvalita horší než u základního zapojení (viz výše – působení vnitřní poruchy).

Struktura regulátoru (obvod servomotoru nekreslen)				
Optimální nastavení regulátoru*)	$r_0 = 12;\ r_{-1} = 0{,}067$	$r_0 = 21{,}4;\ r_{-1} = 0{,}155;\ r_1 = 1{,}5$	$r_0 = 13;\ r_{-1} = 0{,}040$	$r_0 = 20;\ r_{-1} = 0{,}180;\ r_1 = 1{,}125$
Přechodová charakteristika tlaku přehřáté páry při optimálním nastavení regulátoru a skokové změně +0,1 — paliva				
Přechodová charakteristika tlaku přehřáté páry při optimálním nastavení regulátoru a skokové změně +0,1 — otevření reg. ventilu spotřebiče				

*) Podle kritéria ITAE při nastavení zesílení regulátoru na aritmetický střed optimálních hodnot při vnější a vnitřní poruše.

p_b – tlak páry v bubnu p_p – tlak páry za kotlem M_p – množství páry za kotlem φ_{pp} – poměrná změna výkonu kotle

Tab. 4-2 *Porovnání regulačních obvodů výkonů parního kotle [11][41]*

4.1.2.1 Regulace výkonu kotle s roštovým ohništěm

U kotlů s roštovým ohništěm je poměr okamžité zásoby paliva v ohništi (množství uhlí na roštu) k právě spalovanému množství paliva daleko větší než je tomu u kotlů s práškovým ohništěm (spalování ve vznosu).

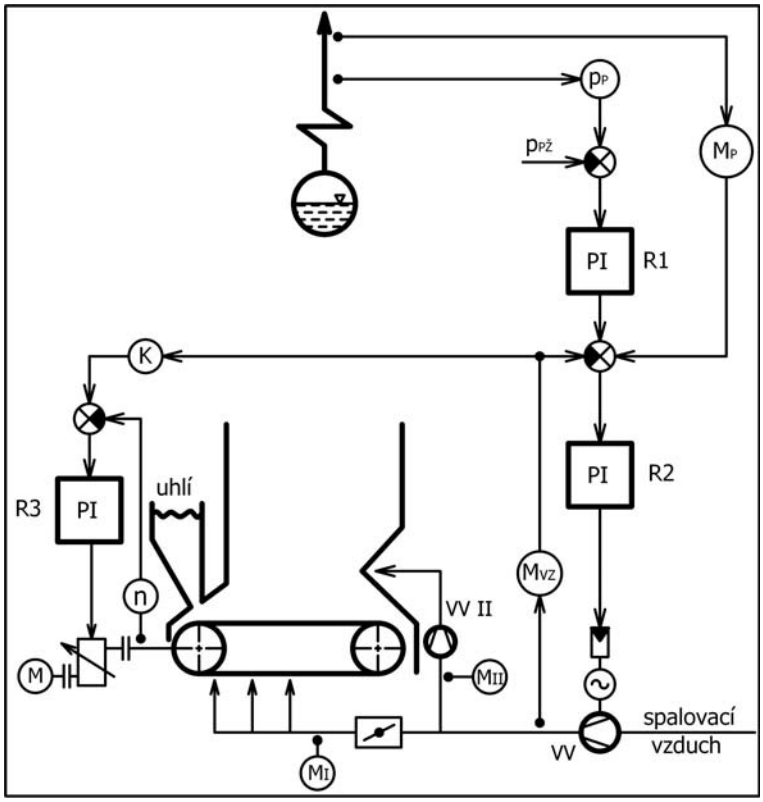
Časová konstanta výkonu roštového ohniště může tedy, při změně dodávky uhlí na rošt, dosáhnout hodnoty až několika desítek minut.

Jestliže chceme dosáhnout rychlou změnu výkonu u roštového kotle, je vhodnější takovou změnu výkonu provést změnou množství spalovacího vzduchu než změnou množství přiváděného uhlí na rošt. Změnou množství spalovacího vzduchu se podstatně rychleji změní množství uvolněného tepla v ohništi, neboť při změně množství paliva musí nejdříve vyhořet zásoba uhlí na roštu. Příklad provedení regulačního obvodu výkonu roštového kotle je uveden na **obr. 4.24**.

Regulační obvod výkonu je podobný jako v případě měření průtoku páry M_p jako poruchové veličiny (viz **obr. 4.22**) s tím rozdílem, že regulátor paliva ***R2*** ovládá průtok spalovacího vzduchu M_{vz}, jehož dodávku zajišťuje vzduchový ventilátor ***VV*** kotle.

Celkový spalovací vzduch M_{vz} se v tomto případě rozděluje na primární M_I, který se dodává do jednotlivých sekcí pod rošt a na sekundární M_{II}, který dodává ventilátor sekundárního vzduchu ***VVII*** přes vzduchové dýzy do spalovací komory nad roštem.

Kotle (kromě kotlů velmi malých výkonů) jsou obvykle vybaveny dalším regulačním obvodem, který udržuje požadované rozdělení primárního M_I a sekundárního M_{II} vzduchu v závislosti na výkonu kotle. Průtok sekundárního vzduchu (u velkých kotlů i průtok primárního vzduchu) se měří, akčním členem regulace jsou obvykle nastavitelné lopatky v sání radiálního ventilátoru ***VVII*** sekundárního vzduchu. (Regulační rozsah je malý, regulace otáček není nutná.)



p_p, M_p – tlak a množství páry za kotlem n – otáčky roštu
M_I, M_{II} – množství primárního a sekundárního vzduchu
VV – vzduchový ventilátor kotle VVII – ventilátor sekundárního vzduchu
M_{vz} – celkové množství spalovacího vzduchu

Obr. 4.24 *Regulace výkonu roštového kotle na konstantní tlak za kotlem [1][4]*

Regulovanou veličinou je obvykle množství sekundárního vzduchu M_{II}, jehož žádaná hodnota se generuje v závislosti na výkonu kotle – zbývající vzduch je pak primární vzduch M_I. Viz též kap. 4.4.2.3, **obr. 4.118**.

Dodávku uhlí na rošt řídí regulátor ***R3*** podle množství spalovacího vzduchu M_{vz}. U kotle s pásovým roštem se množství uhlí na rošt reguluje změnou otáček hnacího

hřídele roštu. Velikost konstanty ***K*** se stanoví v závislosti na výhřevnosti spalovaného paliva a na nastavené výšce vrstvy uhlí na roštu, a nastavuje se jí poměr dodávky paliva a vzduchu. Tato konstanta ***K*** se většinou nastavuje ručně, ale pokud se na kotli často spalují různé druhy uhlí s odlišnými kvalitativními parametry, pak lze (za předpokladu, že známe výhřevnost nového paliva) konstantu nastavovat automaticky podle zadané závislosti na výhřevnosti paliva a výšce jeho vrstvy na roštu.

U roštových kotlů menších výkonů se regulační obvod často zjednodušuje, odpadá např. měření průtoku páry M_p jako poruchové veličiny.

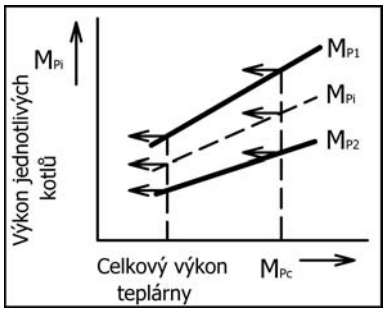
4.1.2.2 Regulace výkonu kotlů pracujících do společné sítě

Zapojení více kotlů do společné parní sítě je charakteristické pro teplárny nebo výtopny – v nových elektrárnách se dnes používá převážně blokové uspořádání kotle a turbíny.

V teplárnách se společnou parní sítí se proto musí regulovat nejen výkon (tlak páry) všech provozovaných kotlů jako celku, ale i rozdělení výkonu na jednotlivé provozované kotle. Pokud by regulace výkonu takto nepracovala, tak hrozí nebezpečí nestabilního provozu kotlů – a to i tehdy, když bude jejich součtový výkon stálý.

Výkon na jednotlivé kotle se rozděluje většinou podle jejich zatěžovací charakteristiky (**obr. 4.25**) a u každého kotle se určuje jeho velikost podle stanovených kritérií, jako např.:

- požadované změny celkového výkonu M_{pc} se rozdělí na všechny kotle rovnoměrně – tento způsob není příliš častý,
- jednotlivé kotle se na výkonu teplárny M_{pc} podílí různě, např. podle dosahované účinnosti, druhu spalovaného paliva (jeho ceny), provozní spolehlivosti, dosahovaných emisí, atd.



Obr. 4.25 *Zatěžovací charakteristika paralelně pracujících kotlů [1]*

Regulace výkonu kotlů pak musí umožnit měnit sklon i polohu charakteristiky (ve svislém směru) jednotlivých kotlů – viz **obr. 4.25**.

Obecné schéma takové regulace výkonu je uvedeno na **obr. 4.26**.

Struktura regulátoru je podobná jako v předcházejících případech a sestává z hlavního regulátoru ***R1*** výkonu (***PI*** nebo ***PID***) a z regulátoru paliva ***R2***.

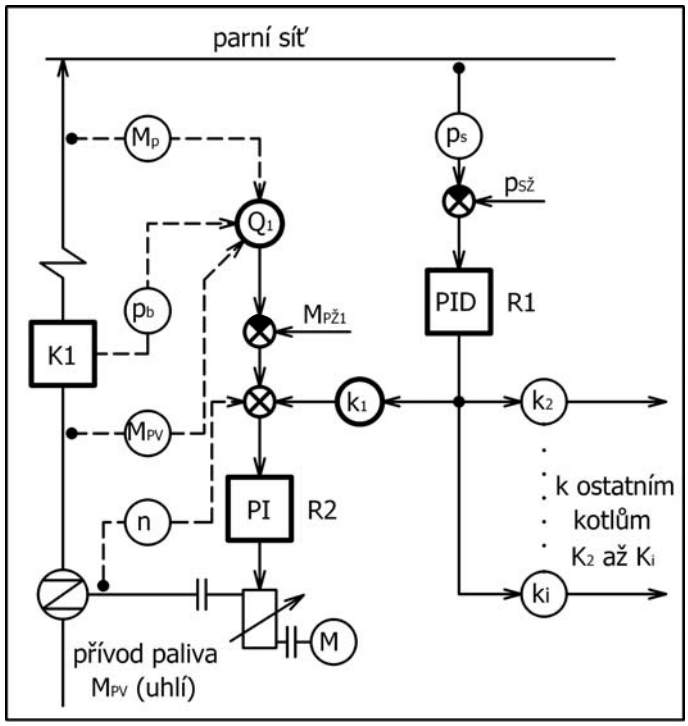
Regulovanou veličinou je tlak páry v síti p_s a regulátor výkonu ***R1*** reguluje výkon všech kotlů $k_1 \div k_i$ podle tohoto tlaku. (Regulátor výkonu ***R1*** je společný pro všechny paralelně pracující kotle.)

Výstupní signál z regulátoru výkonu ***R1*** se u každého z kotlů násobí příslušnou konstantou k_1 až k_i a vstupuje do regulátoru paliva daného kotle. Nastavením konstanty k_1 až k_i lze měnit sklon zatěžovací charakteristiky jednotlivých kotlů (**obr. 4.25**).

Zpětná vazba regulátoru paliva ***R2*** u jednotlivých kotlů je vytvořena veličinou, která obecně charakterizuje tepelný příkon Q_1 až Q_i realizovaný palivem do jednotlivých kotlů.

Regulační odchylka regulátoru paliva ***R2*** se upravuje žádanou hodnotou výkonu $M_{pž1}$ až $M_{pži}$ u každého kotle – tato se získá jako výstup ze zatěžovací charakteristiky, viz **obr. 4.25**. Změnou velikosti výkonu M_{p1} až M_{pi}, přiřazeného jednotlivým kotlům, se posouvá charakteristika (**obr. 4.25**) ve svislém směru.

Tepelný příkon Q_i jímž se realizuje zpětná vazba u regulátoru paliva ***R2*** lze stanovit (v závislosti na druhu spalovaného paliva) několika způsoby. Na **obr. 4.26** jsou naznačeny čárkovaně.



Q_1 – tepelný příkon kotle K1 n – otáčky podavače uhlí
M_{PV} – množství přivedeného paliva (přímé měření plyn, olej)
M_p – množství páry za kotlem p_s – tlak páry v síti p_b – tlak páry v bubnu

Obr. 4.26 *Regulace výkonu paralelně pracujících kotlů (do společné sítě) [1][4]*

a) přímým měřením průtoku paliva M_{pv}. Tento způsob lze využít jen při spalování plynu nebo oleje s konstantními parametry. (Podavač v přívodu paliva je nahrazen regulační armaturou, viz též **obr. 4.21**, resp. **Tab. 4.2 –** sloupec 1.)
b) při spalování uhlí měřením otáček ***n*** podavače. Nevýhodou je nepřesné určení hodnoty tepelného příkonu Q_i a navíc některé poruchy na straně paliva (vnitřní poruchy), jako je např. váznutí uhlí v bunkru jednoho z kotlů, nelze zjistit a hlavní regulátor ***R1*** výkonu je pak eliminuje rozložením na všechny kotle.

   Proto je výhodnější signál zpětné vazby odvodit nepřímým měřením tepelného příkonu Q_i do kotle pomocí měřeného průtoku páry M_p a tlaku páry p_b v bubnu (sytá pára). Viz též **obr. 4.23** a **Tab. 4.2**.

   V případě, že do společné sítě pracují kotle s různými dynamickými vlastnostmi, umožňuje tato struktura regulace rychlejší vyrovnání poruchy tím kotlem, který je pružnější.

   Nevýhodou této struktury je, že rozdělení výkonu teplárny na jednotlivé kotle není přesné, protože tlak p_b syté páry v bubnu je závislý na parním výkonu kotle.

4.1.2.3 Regulace mlecích okruhů s přímým foukáním

Při spalování uhlí v granulačních ohništích s přímým foukáním uhelného prášku je akčním členem regulace výkonu kotle pohon podavače uhlí do mlýna. Regulace používaných mlecích okruhů do jisté míry souvisí s regulací výkonu kotle a proto je vhodné o hlavních zásadách této regulace pojednat i v této kapitole.

Souvislost regulace mlýnů s regulací spalování je pak uvedena v kap. 4.4.

Mlecí okruh (při přímém foukání) obvykle je sestaven z těchto zařízení: uhelný bunkr – vynašeč (podavač) uhlí – mlýn (včetně sušení uhlí) – práškovody k hořákům – případně i hořáky. Při spalování hnědého uhlí se používají ventilátorové mlýny (se spalinovou suškou) nebo tlukadlové (kladivové) mlýny se sušením spalinami nebo ve směsi se vzduchem.

Při spalování černého uhlí se vesměs používají kladkové (kroužkové) mlýny se sušením vzduchem.

U mlecích okruhů s přímým foukáním se většinou používají tyto regulační obvody:

a) Regulace průtoku sušícího a dopravního média

Průtok média se udržuje buď na konstantní hodnotě v celém regulačním rozsahu výkonu mlýna nebo se velikost průtoku mění a reguluje v závislosti na jeho výkonu.

Rozhodnutí závisí na konstrukci mlýna, hořáků a na druhu spalovaného paliva.

U mlýnů, u nichž se pro sušení musí použít horké spaliny (např. 950°C u ventilátorového mlýna) je přímé měření průtoku velmi obtížně realizovatelné a proto se v těchto případech od regulace průtoku většinou upouští.

Regulace průtoku se převážně provádí u mlýnů, u nichž je sušícím a nosným médiem vzduch.

V těchto případech jsou požadavky na kvalitu regulace nejvyšší, protože tento vzduch je součástí celkového množství spalovacího vzduchu dodávaného do kotle (regulace spalování) a má tudíž vliv na vzněcování paliva a tvorbu emisí (tzv. primární vzduch). Tak např. podle [1][4][8] se připouští max. odchylka průtoku média ±4% vztažená k nejvyššímu průtoku.

Množství tohoto vzduchu nesmí také klesnout pod určitou minimální hodnotu při níž by došlo k zahlcení mlýna (vzduch by nestačil vynést z mlýna umleté množství uhlí), případně i k zanášení práškovodů k hořákům (rychlost v práškovodu by byla tak malá, že by docházelo k usazování uhelného prášku v jeho vodorovných úsecích), což by mělo negativní vliv na funkci hořáků a zvyšovalo by se tak i nebezpečí vznícení prášku v práškovodu.

Pokud se pro sušení použijí spaliny (o nižší teplotě) nebo směs spalin se vzduchem, může být kvalita regulace horší – připouští se odchylka ±10%, ale i v tomto případě se musí zohlednit vliv takové změny průtoku na tvorbu emisí.

b) Regulace teploty práškové směsi za mlýnem

Dodržení přípustné teploty práškové směsi za mlýnem je nutným předpokladem spolehlivého a bezpečného provozu zařízení.

Nejvyšší přípustnou provozní teplotu definuje vždy provozní předpis výrobce (provozovatele) s ohledem na bezpečnost proti výbuchu. Podle reaktivity spalovaného uhlí a obsahu kyslíku v nosném a sušícím médiu (inertní prostředí) se tato teplota pohybuje v rozmezí 80°C až 180°C, viz též doporučení ČSN 074009.

Nejnižší provozní teplotu práškové směsi za mlýnem udává opět provozní předpis výrobce (provozovatele) a to především s ohledem na spolehlivost provozu mlecí linky. Nejnižší teplota musí být bezpečně vyšší než je teplota rosného bodu nosného a sušícího média, neboť při jejím podkročení by mohly vznikat provozní potíže se zalepováním mlýna a práškovodů.

Obecně lze říci, že na kvalitu (přesnost) regulace teploty práškové směsi za mlýnem se kladou menší nároky, doporučuje se [1][4][8] dodržet max. odchylku ±20 K a trvalou regulační odchylku menší než ±10 K.

Při spalování (mletí) některých reaktivních uhlí však max. odchylku teploty práškové směsi za mlýnem nelze považovat za postačující kritérium pro vyloučení možnosti výbuchu.

Jde o to, že při mimořádných provozních stavech mlýna (např. při výpadku podavače) nelze max. odchylku teploty dodržet a dochází k značnému krátkodobému převýšení požadované teploty práškové směsi. Dále také se musí vzít v úvahu skutečnost, že pro vznícení uhelného prášku (při sušení vzduchem) je kromě potřebné teploty nutná i potřebná doba setrvání prášku na této teplotě.

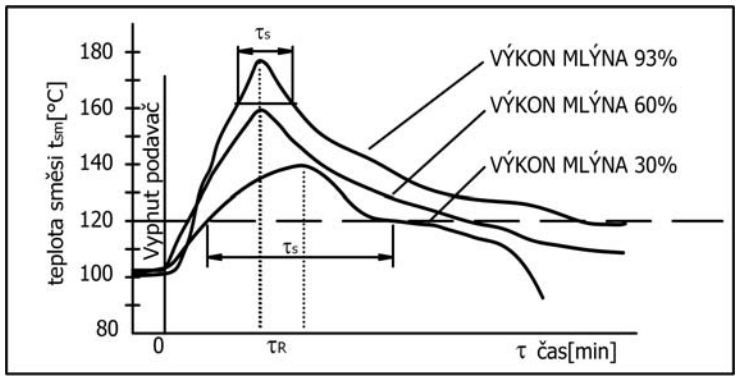
Aby regulační obvod teploty práškové směsi za mlýnem splnil obě uvedené podmínky (vyšší teplota a doba setrvání) musí být regulace dostatečně rychlá, což v tomto případě znamená zvolit vhodnou akční veličinu (schopnost zajistit rychlou změnu regulované veličiny) a dále zařízení vybavit čidlem pro měření teploty práškové směsi s dostatečně malou časovou konstantou.

Jako akční veličina se při sušení vzduchem volí změna průtoku studeného vzduchu (viz např. **obr. 4.33**) nebo změna průtoku studeného i teplého vzduchu – viz **obr. 4.35**.

Příklad průběhu teploty směsi za mlýnem při mimořádném provozním stavu mlýna je uveden na **obr. 4.27**.

Znázorněn je zde průběh teploty při simulovaném výpadku podavače paliva. Měření bylo provedeno s černým uhlím na kroužkovém mlýnu o výkonu 33 t/h.

Požadovaná teplota práškové směsi podle provozního předpisu je 90°C až 105 °C. Byly provedeny tři zkoušky při výkonech mlýna 93 %, 60 % a 30 %. V okamžiku vypnutí podavače byla teplota práškové směsi za mlýnem 100°C při výkonu 93 % a 103 °C při výkonech mlýna 60 % a 30 %.



τ_s – doba setrvání na vyšší teplotě τ_R – čas připojení regulačního obvodu

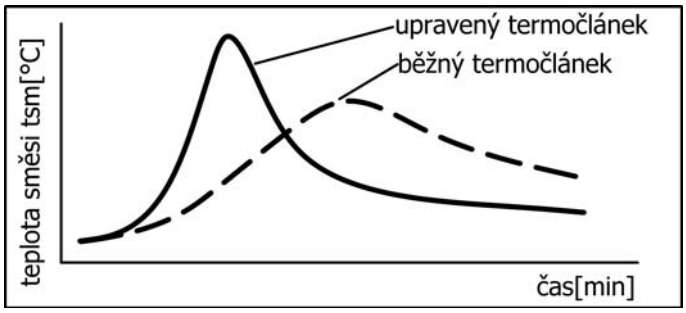
Obr. 4.27 *Teplota práškové směsi při výpadku podavače (simulovaný stav) [16]*

Současně s vypnutím podavače byla odpojena i regulace teploty práškové směsi aby se mohlo vyšetřit, jak na takovou poruchu bude reagovat soustava jako taková. Regulační obvod byl připojen v časech τ_R – prakticky v okamžiku dosažení nebezpečných teplot. Jak je vidět, tak přestože již velice krátce po připojení regulátoru se začala teplota směsi snižovat, byla doba potřebná ke snížení teploty směsi pod 120 °C značně delší než doba zvyšování teploty po výpadku podavače. Přípustné doby setrvání τ_S při teplotách vyšších než 120 °C stanovuje speciální předpis dodavatele (opatření proti výbuchu).

Seřízený regulační obvod musí tedy zvýšenou teplotu práškové směsi za mlýnem (např. při nestacionárních stavech mlýna) nejen snížit na požadovanou

hodnotu, ale musí ji snížit tak rychle, aby doba setrvání τ_s na vyšších teplotách byla menší než připouští provozní předpis.

Jak již bylo uvedeno, na kvalitu regulace má značný vliv i přesnost měření regulované veličiny (teploty práškové směsi) – především pak časová konstanta použitého měřícího členu. Na **obr. 4.28** jsou uvedeny průběhy teploty práškové směsi při výpadku podavače (viz **obr. 4.27**) měřené běžným termočlánkem s přídavnou ochranou proti abrazi a se speciálně upraveným termočlánkem s kratší časovou konstantou. Oba termočlánky byly nainstalovány současně. Jak je vidět, tak „běžným" termočlánkem nebyla vůbec zaregistrována teplotní špička.



Obr. 4.28 *Vliv použitého termočlánku na průběh teploty práškové směsi [16]*

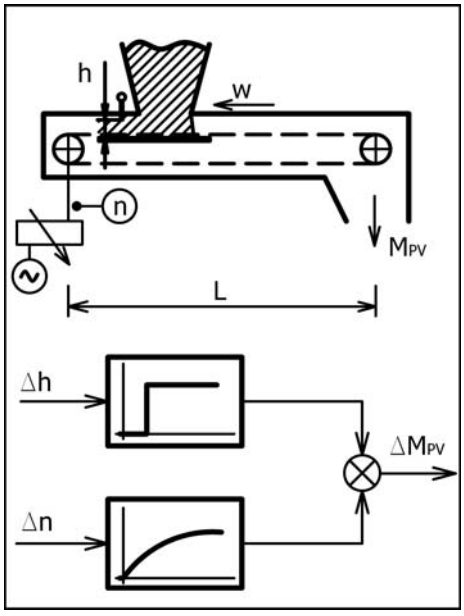
Jestliže mlecí linku považujeme za část regulované soustavy z hlediska regulace výkonu kotle, pak nelze opomenout ani vliv dynamických vlastností mlecí linky, nebo jejich částí, na kvalitu regulace. Částmi, které nejvíce ovlivňují dynamiku mlecího okruhu s přímým foukáním jsou podavač (dávkovač) uhlí a vlastní mlýn včetně sušení a třídiče.

U mlýnů s přímým foukáním se nejčastěji jako podavač (vynášeč) uhlí používají **řetězové podavače (redlery)**, u nichž se množství dopravovaného paliva řídí jednak nastavením výšky hradítka, resp. výškou vrstvy ***h*** paliva (viz **obr. 4.29**), nebo změnou otáček ***n*** podavače. Výška vrstvy paliva se většinou nastavuje při seřízení mlecí linky pro daný druh uhlí, regulace se pak provádí změnou otáček. Blokové schéma řetězového podavače je na **obr. 4.29**, a to včetně přechodových charakteristik.

Při skokové změně výšky vrstvy paliva o Δh (hradítkem) se změna v dodávaném množství paliva ΔM_{pv} projeví sice skokově, ale s určitým dopravním zpožděním, jehož velikost závisí na délce podavače ***L*** a posuvné rychlosti ***w***. Z dispozičních důvodů (zejména u kotlů s ventilátorovými mlýny a tangenciálním ohništěm) je délka podavačů značná a dopravní zpoždění je řádově v sekundách.

Proto se pro regulaci používá změna otáček podavače Δn, i když takový podavač musí mít pohon s regulací otáček a je investičně dražší. V tomto případě lze přechodový děj aproximovat statickým přenosem 1. řadu.

Z podavače padá uhlí do mlýna – v případě kladkového (kroužkového) mlýna pro černé uhlí probíhá sušení přímo ve mlýně, ventilátorový mlýn má pro sušení hnědého uhlí předřazenou proudovou spalinovou sušku. Součástí každého mlýna je i třídič pro nastavení potřebné granulometrie práškové směsi.



h – výška vrstvy uhlí n – otáčky podavače
w – rychlost posuvu uhlí

Obr. 4.29 *Blokové schéma řetězového podavače [1]*

Mlýn s třídičem se při změně přiváděného množství uhlí chová jako akumulátor – při rozdílu mezi přiváděným a odváděným množstvím uhlí se nabíjí nebo vybíjí.

Pokud se jedná o změny v průtoku uhlí menší než 10 %, tak lze provést linearizaci děje [17] a časovou konstantu mlýna T_m lze vyjádřit vztahem

$$T_m = \frac{M_{pv1} - M_{pv2}}{M_{pv2}} \quad [\text{s}] \qquad (4\text{–}20)$$

Označení je patrné z **obr. 4.30**, na němž jsou znázorněné i typické přechodové charakteristiky dodávky prášku z mlýna.

Skoková změna přívodu uhlí do mlýna M_{pv1} se na dodávce prášku M_{pv2} neprojeví okamžitě, ale s určitým zpožděním T_m – viz **obr. a)**.

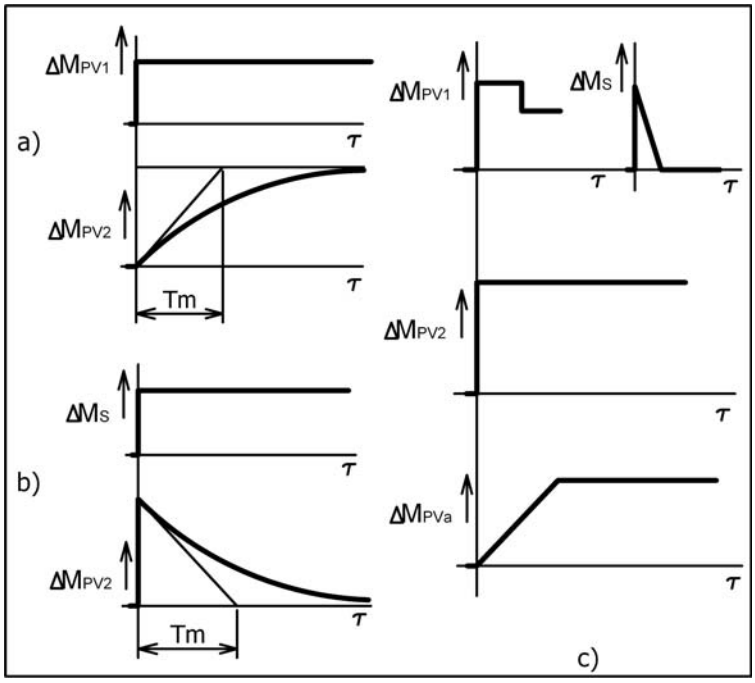
Při změně ventilace mlýna ΔM_s se odezva v dodávce prášku M_{pv2} projeví takřka okamžitě – má však derivační charakter, viz **obr. b)**. Nabízí se tedy výhodná možnost využít pro regulaci výkonu mlýna (zajímá nás množství prášku za mlýnem M_{pv2}) současně změnu obou vstupních veličin – změnu množství přiváděného uhlí ΔM_{pv1} i změnu ventilace mlýna ΔM_s. Odezvy na takovou současnou změnu ΔM_{pv1} a ΔM_s (viz horní část **obr. c)** jsou v zidealizovaném tvaru znázorněny na **obr. c)**.

V ideálním provedení lze dosáhnout takřka okamžité (skokové) změny množství dodávaného prášku M_{pv2} – prostřední charakteristika.

Současně se ale změní i akumulované množství prášku M_{pva} ve mlýně – spodní charakteristika.

V praxi se tato možnost využívá v případech, když se musí rychle měnit výkon kotle – realizace se provádí zařazením derivační vazby mezi otáčkami podavače paliva (PD) a akčním členem změny ventilace mlýna a přeregulováním množství přiváděného uhlí M_{pv1} v počáteční fázi (R1), viz např. **obr. 4.31**.

V závěrečné části této kapitoly jsou uvedena zjednodušená schémata regulace mlecích okruhů s přímým foukáním pro přípravu hnědého a černého uhlí.



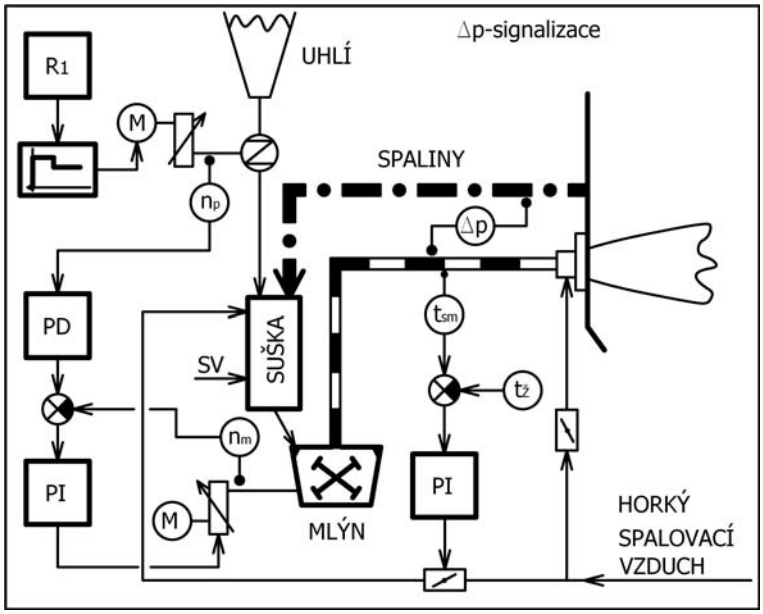
M_{PV1} – množství přiváděného uhlí do mlýna
M_{PV2} – množství odváděného uhelného prášku z mlýna
M_S – změna ventilace mlýna T_m – časová konstanta mlýna
M_{PVa} – akumulované množství prášku ve mlýně

***Obr. 4.30** Přechodové charakteristiky dodávky prášku z mlýna [1][17]*

a) při skokové změně přívodu paliva do mlýna ΔM_{PV1}
b) při skokové změně průtoku nosného a sušícího média ΔM_S
c) zidealizované přechodové charakteristiky při současné změně přívodu paliva a průtoku média

Zjednodušené schéma **regulace mlecího okruhu s ventilátorovým mlýnem** je na **obr. 4.31**. (Součástí řízení je i kontrola max. koncentrace O_2 ve směsi.)

Nosným a sušícím médiem jsou odsávané horké spaliny (cca 950 °C) z ohniště. Do spalinové sušky se přivádí horký spalovací vzduch (z výstupu spalinového ohříváku vzduchu), který se používá pro regulaci teploty práškové směsi za mlýnem t_{sm}. Množství horkého vzduchu se reguluje regulační klapkou horkého vzduchu do sušky. Do sušky se rovněž přivádí studený vzduch ***SV***, tento však jen jako havarijní, pokud se teplota směsi za mlýnem t_{sm} zvyšuje nad přípustnou hodnotu.



n_p – otáčky podavače n_m – otáčky mlýna t_{sm} – teplota primární směsi
R_1 – regulace výkonu SV – studený vzduch
Δp – tlaková diference mezi vstupem spalin a výstupem primární směsi

Obr. 4.31 *Regulace mlecího okruhu s ventilátorovým mlýnem (hnědé uhlí) [1][4]*

Průtok nosného sušícího média do mlýna se přímo neměří a nereguluje – určitým měřítkem průtoku je tlaková diference ***Δp*** mezi vstupem spalin do sušky a výstupem práškové směsi z třídiče mlýna. Tato diference se pouze měří a překročení stanovených mezí se signalizuje.

Pokud je ventilátorový mlýn vybaven regulací otáček (tak jako na **obr. 4.31**), lze současně s výkonem mlýna měnit pomocí otáček i jeho ventilační účinek.

Toto se provede např. podle zapojení na **obr. 4.31** tak, že regulátor ***R1*** (výkonu) upraví otáčky n_p podavače paliva a podle nich se upraví přes ***PD*** regulátor (potřebná derivační vazba – viz též komentář k **obr. 4.30 c)** otáčky ventilátorového mlýna n_m.

Při překročení max. přípustné teploty směsi t_{sm} za mlýnem zajistí ochrana hašení mlýnu a sušky parou.

Na **obr. 4.32** je uvedeno podobné schéma regulace mlecího okruhu jako na **obr. 4.31**, ale s korekcí regulace teploty směsi t_{sm} od velikosti průtoku horkého vzduchu do sušky.

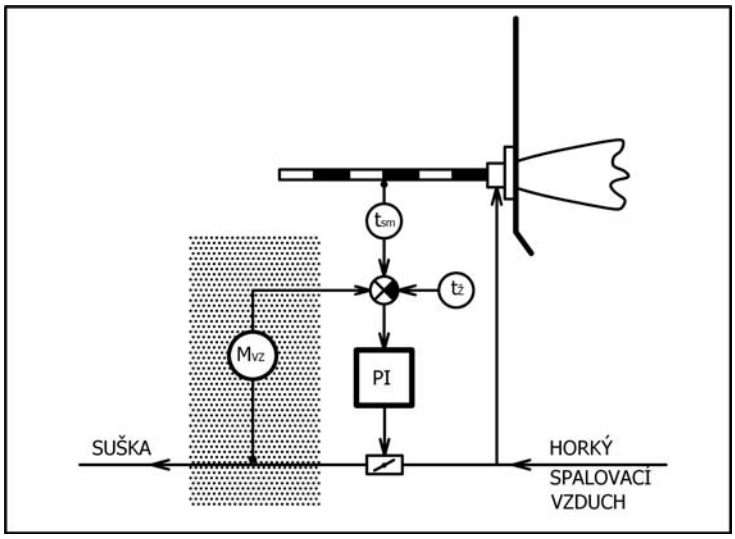
Tento korekční signál zvyšuje přesnost regulace teploty práškové směsi $\mathbf{t_{sm}}$. Je-li teplota vysoká, regulátor otevírá klapku a zvyšuje průtok horkého vzduchu. Korekční signál omezuje otevření klapky hned po zvýšení průtoku vzduchu a nikoliv až při poklesu teploty směsi t_{sm} – velké časové zpoždění.

Zjednodušené schéma **regulace mlecího okruhu s kroužkovým mlýnem** pro mletí černého uhlí je na **obr. 4.33**.

Nosným a sušícím médiem je v tomto případě směs horkého a studeného spalovacího vzduchu. Celkový spalovací vzduch pro kotel dodává vzduchový ventilátor ***VV***, zvýšení tlaku nosného a sušícího vzduchu pro mlýn zajišťuje mlýnský ventilátor ***MV***.

Ohřev vzduchu pro mlýn se zajišťuje v samostatném ohříváku vzduchu, který je integrován v ohříváku spalovacího vzduchu kotle, a který může být trubkový nebo regenerativní.

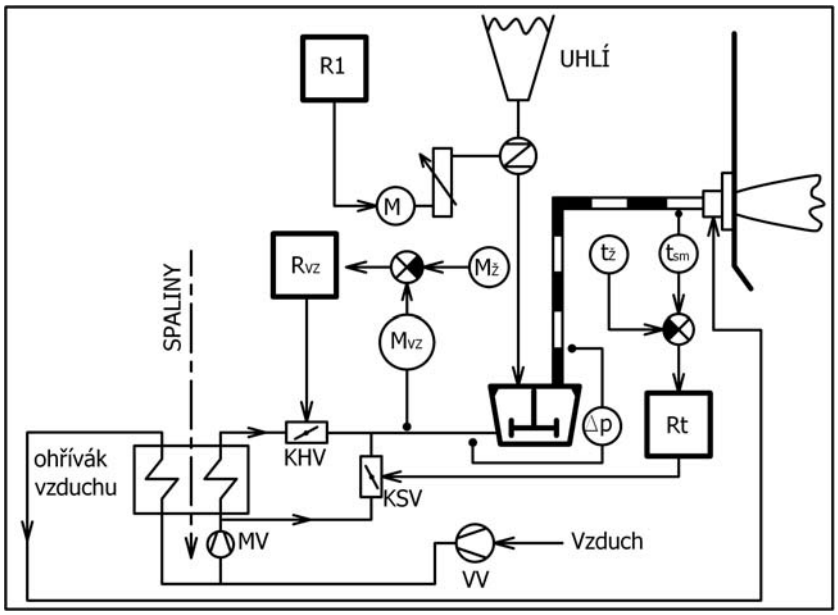
Teplotu práškové směsi t_{sm} za mlýnem (otáčky mlýna se neregulují) reguluje regulátor R_t změnou průtoku studeného vzduchu, akčním orgánem je regulační klapka studeného vzduchu ***KSV***. Při vyšší teplotě práškové směsi t_{sm} než je žádaná hodnota $t_ž$ se ***KSV*** otevírá.



Obr. 4.32 *Regulace mlecího okruhu s ventilátorovým mlýnem s korekcí od průtoku vzduchu [18]*

Dodavatel mlýna předepisuje pro jeho spolehlivou funkci i potřebné množství nosného a sušícího vzduchu. Průtok vzduchu M_{vz} přes mlýn udržuje na požadované hodnotě $M_ž$ regulátor průtoku R_{vz} změnou průtočného množství horkého vzduchu, akčním orgánem je klapka horkého vzduchu ***KHV***. Potřebný výkon mlýna se nastavuje podle signálu regulátoru výkonu ***R1***, akčním členem je měnič otáček podavače uhlí do mlýna.

Pro kontrolu spolehlivého provozu mlýna se měří i tlaková diference mezi vstupem vzduchu do mlýna a výstupem práškové směsi. Tato diference se pouze měří a signalizuje se překročení max. přípustné hodnoty. (Zahlcení, zalepení mlýna). Při vyšší teplotě práškové směsi t_{sm} regulátor teploty R_t zvýší průtok studeného vzduchu (***KSV*** otevírá), tím se zvýší průtok celkového vzduchu M_{VZ} do mlýna a regulátor průtoku R_{VZ} sníží průtok horkého vzduchu (***KHV*** uzavírá). Změna polohy u obou klapek tak vede ke snížení teploty směsi. Zatímco vliv změny polohy ***KSV*** se projeví na



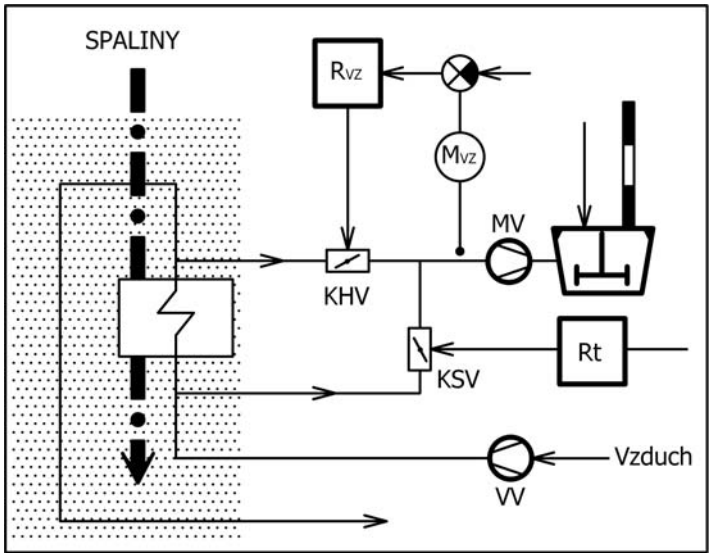
R1 – regulátor výkonu R_{VZ} – regulátor vzduchu M_{VZ} – množství vzduchu do mlýna
KHV – klapka horkého vzduchu KSV – klapka studeného vzduchu
R_t – regulátor teploty I. směsi MV – mlýnský ventilátor VV – vzduchový ventilátor
Δp – tlaková diference mlýna

Obr. 4.33 *Regulace mlecího okruhu s kroužkovým mlýnem (černé uhlí) a integrovaným* ohřívákem vzduchu [18]

teplotě práškové směsi přímo, je působení ***KHV*** opožděné, projeví se až jako důsledek regulace průtoku vzduchu M_{vz}.

Žádaná hodnota průtoku vzduchu M_z nemusí být konstantní, ale může se měnit v závislosti na výkonu podavače uhlí, (resp. na výkonu mlýna).

Podobné schéma regulace mlecího okruhu – ale se standardním ohřívákem vzduchu – je uvedeno na **obr. 4.34**. Regulační obvody jsou stejné jako u schéma na **obr. 4.33**, změnilo se provedení ohříváku vzduchu a umístění mlýnského ventilátoru ***MV***, který musí být dimenzován na dopravu ohřátého vzduchu (směs horkého a studeného).



Obr. 4.34 *Regulace mlecího okruhu s kroužkovým mlýnem a standardním ohřívákem vzduchu [18]*

Zjednodušené schéma mlecí linky s kroužkovým mlýnem na mletí reaktivního černého uhlí je uvedeno na **obr. 4.35**.

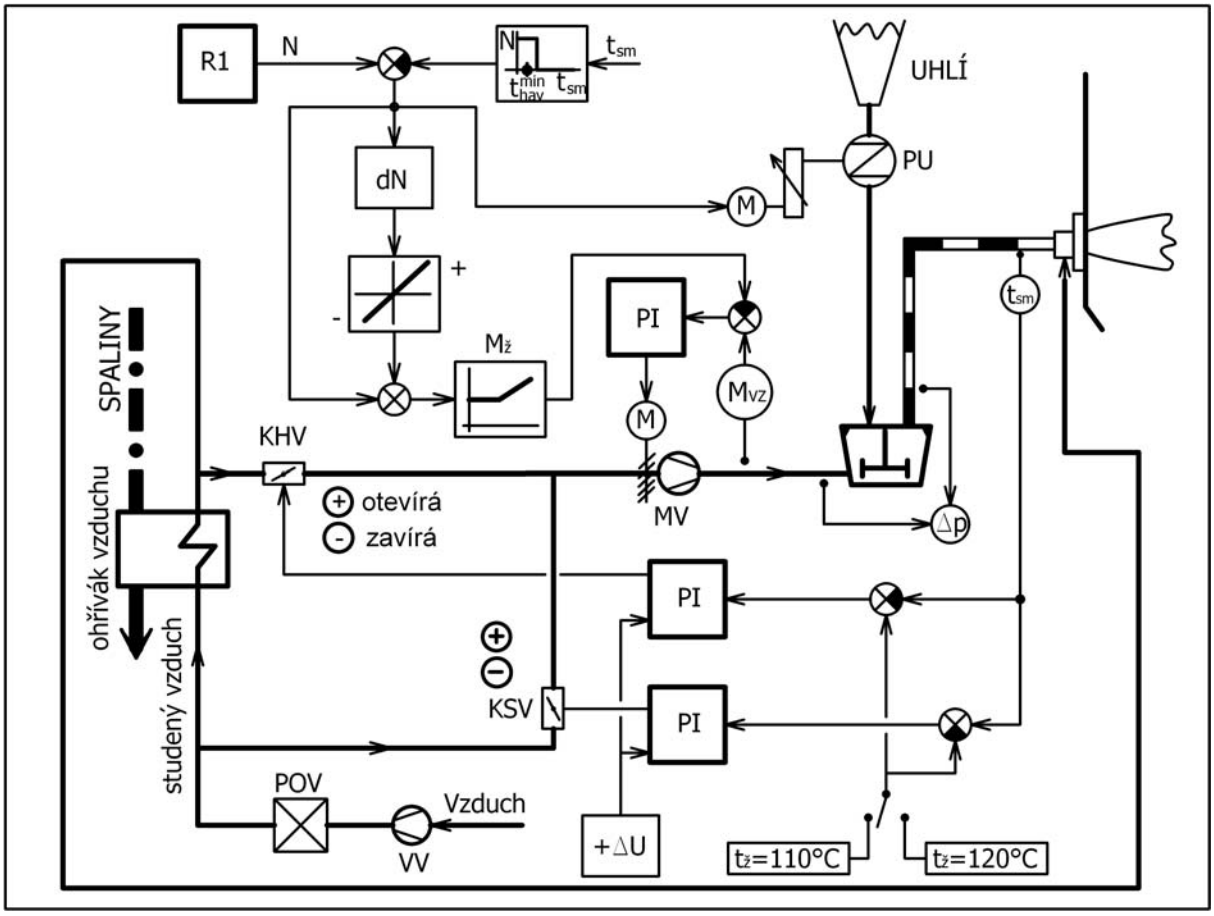
Struktura regulace je podobná jako v předchozích případech, naznačen je standardní ohřívák vzduchu, ale struktura regulace může být použita i při zapojení s integrovaným ohřívákem vzduchu (viz např. **obr. 4.33**).

Vzhledem k vyšší reaktivitě spalovaného uhlí musí být regulace upravena a doplněna tak, aby byly i při mimořádných provozních stavech mlýna splněny podmínky pro jeho bezpečný provoz z hlediska výbuchu. (Jak je vidět, tak základní struktura regulace průtoku vzduchu i regulace teploty směsi je doplněna pomocnými signály, které zvyšují kvalitu regulace a bezpečnost provozu.)

Na základě provedených zkoušek vznícení uhelného prášku v usazeném stavu se pro provoz mlýna stanoví např. podmínky uvedené na **obr. 4.36**.

Teplota práškové směsi za mlýnem se udržuje na žádané hodnotě $t_{ž}$, (např. 110 °C) s provozní odchylkou $+\Delta t_1$ a $-\Delta t_2$ (např. +5 K a –25 K). Přípustné je krátkodobé převýšení na teplotu nižší než je t_{max} (např. 120 °C). Pokud teplota práškové směsi přesáhne hodnotu t_{max}, pak toto převýšení může trvat méně než nastavenou dobu $\Delta\tau_{max}$. (např. 10 min.) – tato hodnota se s rostoucí teplotou snižuje. Jestliže regulace během doby $\Delta\tau_{max}$ nesníží teplotu směsi pod hodnotu $\mathbf{t_{max}}$, automaticky se zahájí hašení mlýna parou a mlýn se odstaví.

Jestliže teplota směsi dosáhne havarijní meze $t_{hav}^{\max}$ (např. 180 °C při výpadku podavače paliva) okamžitě se mlýn odstaví a hasí se parou.

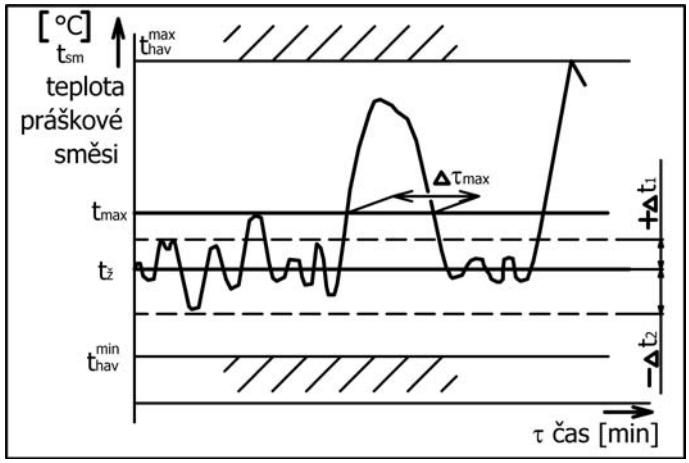


$M_ž$ – požadované množství vzduchu do mlýna POV – parní ohřívák vzduchu N – výkon mlýna ΔU – malé kladné napětí

Obr. 4.35 *Regulace mlecího okruhu s kroužkovým mlýnem a standardním ohřívákem vzduchu (VÍTKOVICE) [19]*

Pokud teplota klesne (např. při prudkém zvýšení výkonu mlýna nebo při najíždění) až na havarijní mez $t_{hav}^{\min}$ (např. 75°C) mlýn se odstaví – hrozí jeho zalepení (ucpání).

Jak je tedy dodržení uvedených požadavků zajištěno u regulace mlýna v provedení dle **obr. 4.35**. V horní části je naznačena struktura regulace množství vzduchu ***M_{vz}*** dodávaného do mlýna. (Směs horkého vzduchu za ohřívákem, např. 300 °C a studeného vzduchu za parním ohřívákem ***POV***, např. 50 °C.) Akčním členem jsou např. regulační lopatky v sání radiálního mlýnského ventilátoru ***MV***. Žádaná hodnota průtoku vzduchu ***$M_ž$*** se generuje v závislosti na



$t_ž$ – požadovaná teplota směsi $\Delta\tau_{max}$ – doba převýšení teploty
t_{hav}^{max}, t_{hav}^{min} – havarijní max. a min. teplota směsi
Δt_1, Δt_2 – provozní odchylka

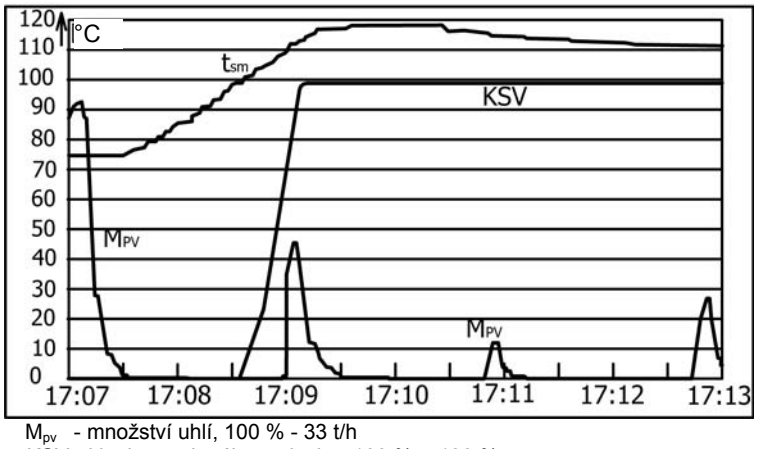
Obr. 4.36 *Teplota práškové směsi za mlýnem [21]*

požadovaném výkonu ***N*** mlýna – s klesajícím výkonem se ***$M_ž$*** snižuje, ale od určitého výkonu se udržuje konstantní. Jsou tak zajištěny potřebné rychlosti v práškovodech (usazování prášku) a v ústí hořáku (nebezpečí zpětného hoření), jakož i potřebné rychlosti ve mlýně (zamletí mlýna).

Požadovaný výkon ***N*** zadává regulátor ***R1*** výkonu kotle současně na podavač uhlí ***PU*** i pro výpočet žádané hodnoty ***$M_ž$***. Při změně výkonu se však podle derivace ***dN*** signál od výkonu zesiluje (při zvyšování výkonu) nebo zeslabuje (při snižování výkonu). Přechodně se tak průtok vzduchu přes mlýn buď zvyšuje (zajistí se větší ventilace mlýna dříve než se zvýší přívod uhlí – zabrání se zamletí mlýna a poklesu teploty ***t_{sm}***) nebo se záměrně udržuje na vyšší hodnotě a zaručuje tak vymletí akumulovaného množství uhlí (při předčasném snížení průtoku vzduchu ***M_{vz}*** by mohlo dojít k zamletí mlýna).

Rovněž i hodnota okamžitého zvýšení výkonu podavače je omezena podle teploty práškové směsi ***t_{sm}*** – zvyšování výkonu se omezí, pokud hrozí nebezpečí poklesu teploty směsi na havarijní hodnotu $t_{hav}^{\min}$.

Pokud je teplota směsi bezpečně nad hodnotou $t_{hav}^{\min}$, tak se od signálu výkonu z regulátoru ***R1*** neodečítá žádná hodnota. Pokud se teplota přiblíží $t_{hav}^{\min}$ snižuje se signál výkonu od regulátoru ***R1***, např. o 30 %, a sníží se tak množství uhlí do mlýna. Ve spodní části obrázku je naznačena regulace **teploty práškové směsi *t_{sm}*** za mlýnem. Akčními členy regulace jsou klapka horkého ***KHV*** a studeného ***KSV*** vzduchu. Každá klapka má vlastní regulátor ***PI*** a struktura je navržena tak (opačná polarita signálů při výpočtu regulační odchylky $\Delta y = t_{sm} - t_ž$), že při $t_{sm} > t_ž$ se ***KHV*** zavírá a ***KSV*** současně otevírá. Při $t_{sm} < t_ž$ se současně ***KHV*** otevírá a ***KSV*** zavírá. Protože potřebný poměr horkého a studeného vzduchu lze udržovat při různých polohách klapek ***KHV*** a ***KSV***, tak nelze vyloučit, že obě klapky budou pracovat více či méně v přivřené poloze a budou tak zbytečně zvyšovat tlakovou ztrátu na straně vzduchu. (Na jaké zvýšení tlaku pak navrhnout vzduchový ventilátor ***MV***?) Řešením je malé kladné napětí ***+ΔU***, které se přivádí současně do obou regulátorů a přičítá se k regulační odchylce – jeho velikost musí být tak malá, aby negativní vliv na regulaci při $t_{sm} \neq t_ž$ byl zanedbatelný. Avšak při nulové regulační odchylce ($t_{sm} = t_ž$) se působením tohoto kladného napětí budou obě klapky pomalu otevírat, a protože mají rozdílné charakteristiky, změní se pomalu optimální poměr horkého a studeného vzduchu. Tím se změní i ***t_{sm}*** a obě klapky budou opět řízeny regulátory podle regulační odchylky – do doby, než se znovu dosáhne nulová regulační odchylka ($t_{sm} = t_ž$). Obě regulační klapky se tak stále udržují v co nejvíce otevřené poloze – jejich tlaková ztráta je minimální.



M_{pv} - množství uhlí, 100 % - 33 t/h
KSV - klapka studeného vzduchu, 100 % - 100 %
t_{sm} - teplota směsi za mlýnem, 100 % - 110 °C

Obr. 4.37 *Provozní záznam regulace mlýna [21] [24]*

Aby při najíždění mlýna neklesla v okamžiku první dodávky uhlí teplota směsi ***t_{sm}*** pod hodnotu $t_{hav}^{\min}$, prohřívá se před najížděním mlýn na vyšší teplotu, např. na t_{sm}

= 120 °C. Jakmile se zahájí dávkování uhlí, přepíná se žádaná hodnota teploty směsi $t_{ž}$ zpět na provozní hodnotu $t_{ž}$ = 110 °C.

Na **obr. 4.37** je uveden výtah z provozního záznamu regulace při odstavování a najíždění mlýna.

V čase 17.07, kdy došlo k náhlému odstavení mlýna, byla teplota směsi t_{sm} cca 82 °C, protože se spalovalo uhlí s velkým podílem vody. Teplota byla nižší než požadovaná a ***KSV*** byla proto uzavřena. (***KHV*** byla otevřena na 100 % - není na obrázku vyznačena). Po odstavení mlýna se t_{sm} zvyšuje a těsně před dosažením teploty 110 °C začne regulátor otevírat ***KSV***. Přesto dochází k převýšení t_{sm} cca na 126 °C, ale regulátor zajistí během cca 4,5 min. snížení t_{sm} pod 120 °C – tedy hluboko pod přípustnou max. dobu setrvání nad teplotou 120 °C, která je 10 min. Na regulaci nemělo vliv ani opakované najíždění a odstavování mlýna.

4.2 REGULACE TEPLOTY PÁRY

Teplota páry na výstupu z kotle se musí udržovat s požadovanou (předepsanou) tolerancí na určité optimální hodnotě, která se stanoví podle způsobu využití páry ve spotřebiči a její maximální hodnota je limitovaná technickými možnostmi kotle a spotřebiče.

Tak např. v případě, když kotel dodává páru pro parní turbínu elektrárenského bloku, tak se při vyšší teplotě páry zvyšuje tepelná účinnost parního oběhu a snižuje se opotřebení posledních lopatek turbíny erozí vodními kapičkami.

Současně však se snižuje životnost ocelí použitých pro výrobu přehříváku kotle, parního potrubí a turbíny, což vede ke zvyšování nákladů na údržbu (výměnu) těchto částí a tím i ke zvyšování provozních nákladů. (Je třeba si uvědomit, že při opravě či výměně části tlakového systému se musí kotel odstavit – zařízení není v provozu.) Nebo se zvyšují investiční náklady v souvislosti s použitím dražších legovaných ocelí s vyšší pevností při tečení za vysokých teplot. Obecně lze teplotu páry za kotlem stanovit podle normy [22], konkrétně je vždy stanovená v objednávce kotle a to včetně požadovaných tolerancí. Obecnou představu o požadovaných tolerancích teploty páry lze získat z normy [22], kde jsou uvedeny v závislosti na jmenovité teplotě páry. Tak např. pro jmenovitou teplotu páry vyšší než 545 °C se uvádí odchylka (+5 K) a (-10 K), při teplotě 445 °C pak (+15) a (-10 K). Při nízkých teplotách páry se odchylky zvyšují. U nových bloků s nadkritickými parametry páry se požaduje teplota páry až 600 °C při odchylce ± 3 K. To znamená, že u současných el. bloků se teplota páry musí regulovat s přesností lepší než 1 %.

Konstantní parametry páry (tlak, teplota) jsou předpokladem pro hospodárný a spolehlivý provoz kotle (elektrárenského bloku).

Zatímco nedodržení tlaku páry především znamená, že výroba páry není v souladu s její spotřebou a vliv na hospodárnost (účinnost oběhu) a spolehlivost (cyklické namáhání tlakového systému) provozu není dominantní, tak odchylky od jmenovité teploty páry mají výrazný vliv na účinnost oběhu i životnost tlakového systému. Uvádí se [23] [17], že při snížení teploty páry o 1K se zhorší účinnost oběhu asi o 0,2 %. Při zvýšení teploty o 10 K (trvalé zvýšení) se sníží životnost přehříváku na 65 % původní hodnoty. [17]

Vliv náhodného kolísání teploty páry na zkrácení životnosti přehříváku je popsán v [23]. Měření bylo provedeno na několika kotlech spalujících černé a hnědé uhlí a u konvekčního přehříváku, při průměrné směrodatné odchylce teploty páry 1,1 K, bylo zjištěno snížení životnosti o 0,5 % při spalování černého uhlí a o 1,2 %, při

odchylce 1,4 K, při spalování hnědého uhlí. U sálavého přehříváku bylo zjištěno snížení životnosti 1,5% při odchylce 1,7 K při spalování černého uhlí a 4 %, při odchylce 2,0 K, při spalování hnědého uhlí.

Dodržení konstantní teploty páry (co nejmenší odchylky) má vliv i na využití bloku pro regulaci výkonu soustavy (frekvence v síti), neboť menší odchylky teploty páry umožňují realizovat větší změnu výkonu bloku, aniž by se překročily přípustné rozdíly teplot na tělese turbíny. (Změna teploty páry se sečítá se změnami teploty páry, které jsou vyvolány změnou výkonu bloku a zvyšuje se tak cyklické namáhání tlustostěnných částí tlakového systému).

Nebezpečí vzniku nepřípustného cyklického namáhání od rozdílu teplot (vnější a vnitřní povrch) u tlustostěnných částí tlakového systému, jako jsou komory přehříváků, parovody a těleso turbíny, hrozí i při najíždění a odstavování kotle a turbíny.

Spolehlivost zařízení lze zajistit v tomto případě jen udržováním teplotních trendů na přijatelných hodnotách pro použité druhy oceli.

Z hlediska návrhu kotle není problém ani tak v dodržení předepsaných odchylek teploty páry, ale především s dodržením požadované hodnoty jmenovité teploty páry ve stanoveném regulačním rozsahu výkonu kotle. Jde o to, že přehřívák kotle má konvekční (nebo sálavou) charakteristiku (viz **obr. 4.52**), takže při snížení výkonu kotle je teplota páry na výstupu z kotle nižší (vyšší) než požadovaná jmenovitá teplota.

Základním cílem regulace teploty páry u parního kotle tedy je:

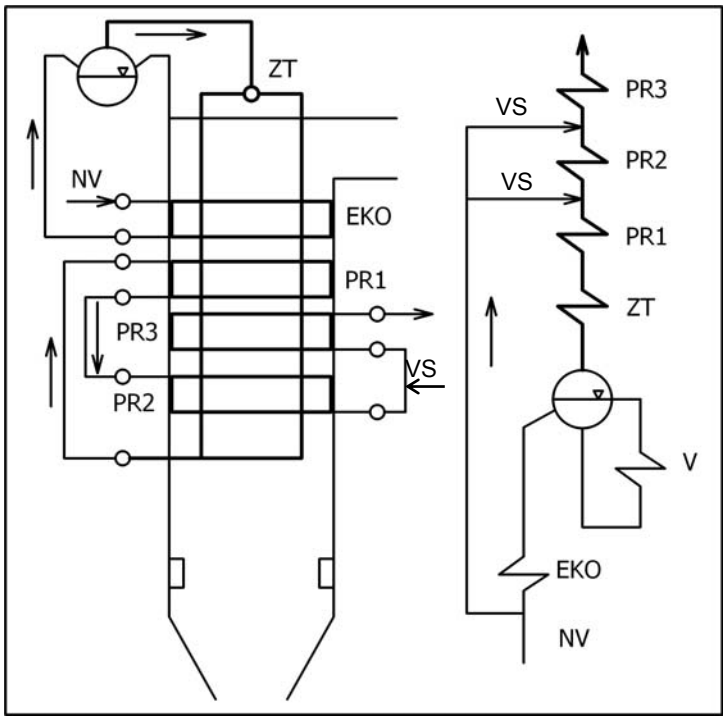
- udržovat požadovanou hodnotu jmenovité teploty za kotlem v celém regulačním rozsahu výkonu kotle. Obvyklý regulační rozsah výkonu s konstantní teplotou páry je pro přehřátou páru 60 % až 100 % a pro přihřívanou páru (nízkotlakou) 75 % až 100 % - často se požaduje možnost krátkodobého provozu s výkonem cca 110 % (vztaženo ke jmenovitému výkonu kotle)
- udržovat jmenovitou teplotu páry v požadovaných tolerancích. U moderních elektrárenských bloků je to obvykle ±5 K, případně (-10 K), u přehřáté páry a (+5 K) a (-10 K) u přihřívané (nízkotlaké) páry. U bloků s nadkritickými parametry pak ± 3K.
- udržovat předepsaný trend zvyšování (snižování) teploty přehřáté i přihřívané páry při najíždění (odstavování) kotle.

Teplotu páry musíme tedy regulovat nejen při ustáleném provozním režimu, ale i v mimořádných provozních stavech, především při změnách výkonu a při najíždění a odstavování zařízení. Uvedené poměrně vysoké nároky na kvalitu regulace teploty páry nelze zajistit pouhým připojením kotle (regulované soustavy) ke kvalitnímu regulátoru teploty páry. **Konstruktér kotle musí při jeho návrhu volit takovou konstrukci přehříváku, která by svými dynamickými vlastnostmi vyhověla zvolenému principu regulace a v co největší míře potlačila vliv možných poruchových veličin na regulovanou teplotu.**

(Rozdělit přehřívák na více dílů, snažit se kombinací sálavých a konvekčních přehříváků o dosažení ploché charakteristiky, zvolit vhodný akční člen regulace, překřížení přehříváků na straně spalin a vhodné řazení komor na parní straně atd.).

Přehřívák páry je poslední (výstupní) částí tlakového systému kotle (ve směru toku media). Schématicky je tlakový systém znázorněn na **obr. 4.38** ve zjednodušeném provedení pro kotel ve věžovém uspořádání.

Stěny kotle tvoří výparník ***V***, protiproudý ohřívák vody ***EKO*** je umístěn jako poslední plocha ve směru proudění spalin. První neregulovaný díl přehříváku tvoří závěsné trubky ***ZT*** a svazkový přehřívák ***PR1***. Dále pára proudí do deskového (sálavého) přehříváku ***PR2*** a pak do svazkového výstupního přehříváku ***PR3***. Před přehřívákem ***PR2*** a ***PR3*** je naznačen regulační vstřik napájecí vody – teplota páry za těmito díly přehříváku je tedy regulovaná.



NV – napájecí voda EKO – ohřívák vody
V – výparník ZT – závěsné trubky
PR – díly přehříváku VS – regulační vstřik

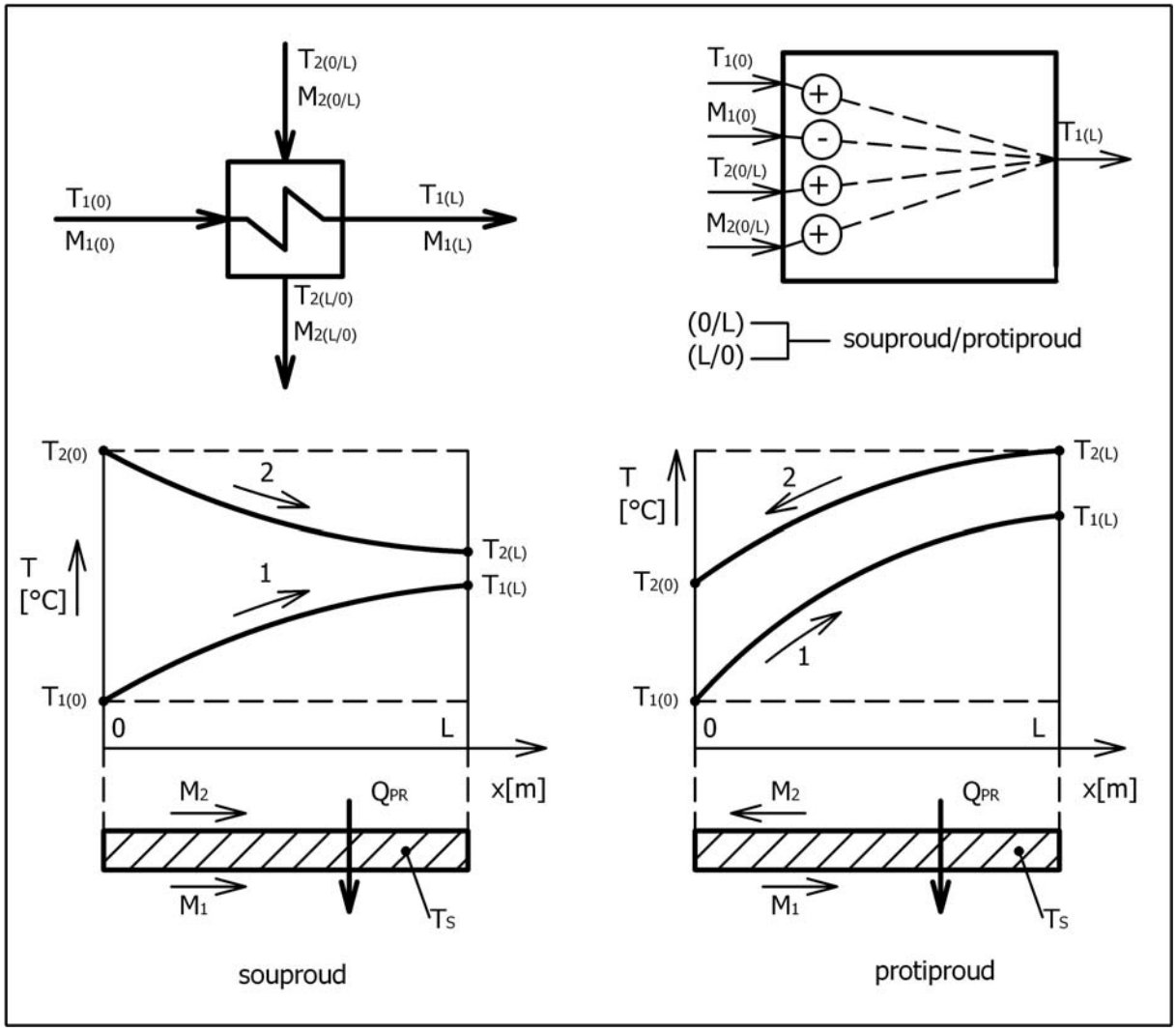
Obr. 4.38 *Schéma tlakového systému kotle*

4.2.1. Dynamika přehříváku parního kotle

Přehřívák páry je vlastně průtočný výměník tepla, kde jedním mediem je kotlem vyráběná (ohřívaná) pára a druhým médiem (ohřívacím, topným) jsou obvykle spaliny. Ale může to být i jiné médium, např. teplejší pára, jako je tomu např. u výměníku typu biflux, v němž se nízkotlaká (přihřívaná) pára ohřívá vysokotlakou přehřátou páru. (viz kap. 4.2.3, **obr. 4.75**).

Regulovanou veličinou u přehříváku páry je vždy teplota páry na výstupu z přehříváku. Vstupními veličinami, které jsou za provozu kotle proměnlivé, jsou množství a teplota páry a množství a teplota topného media (spalin). Regulační vlastnosti přehříváku posuzujeme podle toho jak reaguje na změny vstupních veličin - a odezvy výstupní teploty páry na tyto změny se nazývají regulačními charakteristikami přehříváku.

Schématicky je působení těchto veličin na výstupní teplotu páry znázorněno na **obr. 4.39**. Teploty jsou označeny ***T*** [°C] (***Ts*** je teplota stěny výměníku) a hmotnostní průtok ***M*** [kg/s]. Q_{PR} [MW] je teplo předané z media ***2*** do media ***1***.



$T_{1(0)}$, $T_{1(L)}$ – vstupní a výstupní teplota ohřívaného média (páry) $T_{2(0)}$, $T_{2(L)}$ – vstupní a výstupní teplota topného média (spalin)
$M_{1(0)}$, $M_{1(L)}$ – vstupní a výstupní průtok ohřívaného média (páry) $M_{2(0)}$, $M_{2(L)}$ – vstupní a výstupní průtok topného média (spalin)
T_S – teplota stěny Q_{PR} – teplo předané z topného média „2“ do ohřívaného média „1“

Obr. 4.39 *Veličiny u přehříváku páry*

Ohřívaná pára je označena indexem ***1***, topné medium (např. spaliny) jsou označeny indexem ***2***. Protože přehřívák páry může být zapojen jako souproud nebo protiproud, je u veličin uveden další index ***x***, který označuje stav media v průřezu vyznačeném touto souřadnicí ***x***. Při x = 0 a x = L je definován stav media na počátku a na konci výměníku.

Základní diferenciální rovnice výměny tepla v souproudém či protiproudem výměníku lze psát ve tvaru [25].

$$T_s - T_1 = \tau_1 \left[u_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_1}{\partial t} \right] \tag{4-21a}$$

$$T_s - T_2 = \tau_2 \left[u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial t} \right] \tag{4-21b}$$

$$\frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}} = \frac{\partial T_s}{\partial_t} \qquad (4\text{-}21c)$$

kde: τ - je časová konstanta prohřívání media [s]
u – průtočná rychlost media [m/s]
t – proměnná času, počítaná od okamžiku poruchy [s]
τ_s – časová konstanta prohřívání materiálu přehříváku [s]

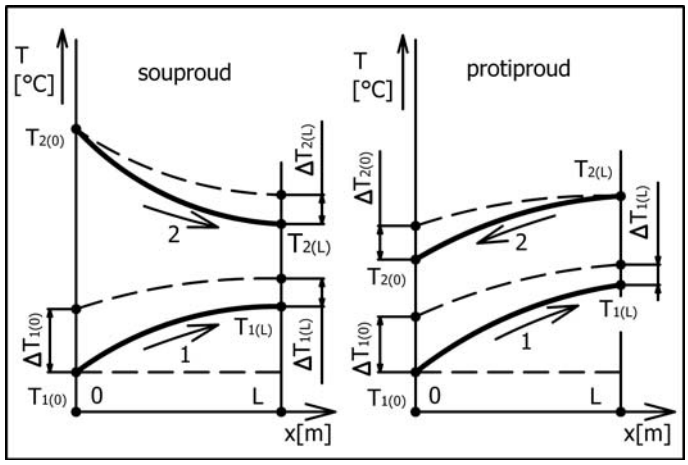
Přesné výpočty dynamických vlastností přehříváků tímto způsobem lze provést např. podle [26][27], ale zadávání vstupních dat pro takový výpočet je poměrně pracné.

Protože dynamické vlastnosti přehříváku do značné míry určuje konstruktér kotle při jeho návrhu, jsou pro něj vhodnější přibližné metody určení regulačních charakteristik, které jsou jednodušší a rychlejší.

Pokud konstruktér kotle vystačí jen se **znalostí statických regulačních charakteristik přehříváku**, pak lze použít postup dle [28].

V této části textu se dále používá označení ***přenos***“ výhradně ve smyslu statického přenosu, čímž se vyznačuje, že se jedná o přenos působení změn vstupních parametrů přehříváku na výstupní teplotu páry v ustálených stavech. Takto pojatý přenos tedy nepopisuje dynamické vlastnosti přehříváku.

Pro informaci jsou dále uvedeny jen některé (nejčastěji vyšetřované) přenosy. Značení veličin je podle **obr. 4.39**.



Obr. 4.40 *Změna teplotních poměrů na přehříváku vyvolaná zvýšením teploty páry na vstupu*

a) Statický přenos při změně teploty páry na vstupu do přehříváku

Tento je definován přenosem

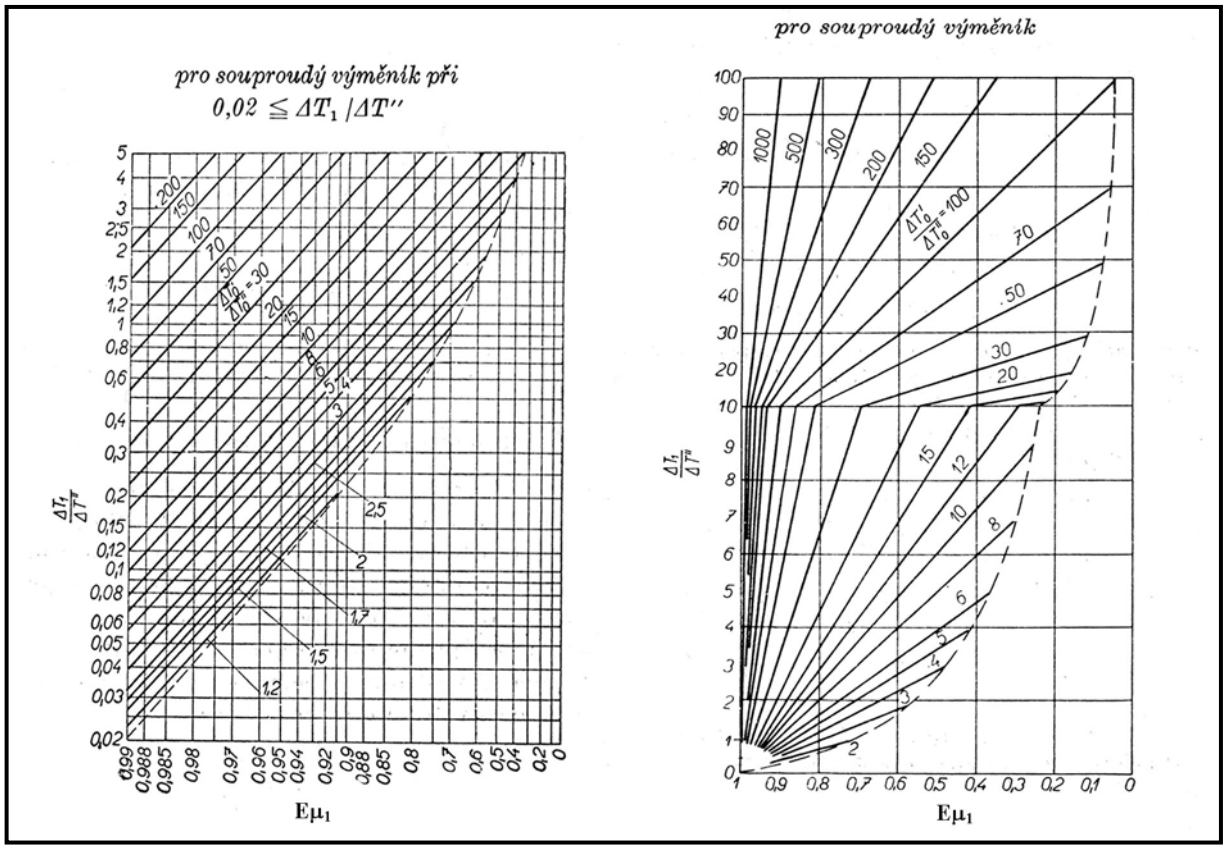
$$E_{T1} = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\Delta T_{1(0)}} = \frac{T_{2(0)} - T_{1(L)}}{T_{2(0)} - T_{1(0)}} \qquad (4\text{-}22)$$

pro souproudý přehřívák a přenosem

$$G_{T1} = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\Delta T_{1(0)}} = \frac{T_{2(L)} - T_{1(L)}}{T_{2(L)} - T_{1(0)}} \qquad (4\text{-}23)$$

pro přehřívák řazený jako protiproud.

Změna teplotních poměrů na přehříváku je naznačena na **obr. 4.40**. Při zvoleném skokovém zvýšení teploty páry na vstupu o hodnotu $\Delta \boldsymbol{T_{1(0)}}$ (např. 10 K) se teplota páry na výstupu zvýší o hodnotu $\Delta \boldsymbol{T_{1(L)}}$, která se stanoví dle rovnice (4-22) nebo (4-23) a platí, že $\Delta T_{1(L)} < \Delta T_{1(0)}$.



Obr. 4.41 *Přenos při změně průtoku páry (μ_1) na vstupu – souproud*

b) Statický přenos při změně průtoku páry na vstupu do přehříváku

Změna průtoku páry je definovaná jako poměrná změna průtoku $\mu_1 = \frac{\Delta M_1}{M_1}$, kde ***M₁*** [kg/h] je průtok páry před změnou (ustálený stav) a Δ***M₁*** [kg/h] je zvolená skoková změna průtoku páry.

Uvedený přenos zohledňuje i změnu součinitele přestupu tepla z páry do stěny přehřívákové trubky a v tomto případě se odečte z nomogramů na **obr. 4.41** a **4.42** a je definován pro souproudý ***Eμ₁*** i protiproudý ***Gμ₁*** přehřívák ve tvaru

$$E\mu_1 = G\mu_1 = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\Delta T_1}.\frac{1}{\mu_1} \qquad (4\text{-}24)$$

kde $\Delta T_1 = T_{1(L)} - T_{1(0)}$ je ohřátí páry v ustáleném stavu.

Změna teplotních poměrů na přehříváku vyvolaná zvýšením průtoku páry μ_1 na vstupu je znázorněná na **obr. 4.43**. Při výšení průtoku se teplota páry za přehřívákem sníží a naopak. Na tomto obrázku je vidět, jak se stanoví hodnoty ΔT_1, $\Delta T'$ a $\Delta T''$ potřebné pro odečtení přenosu ***Eμ₁***; ***Gμ₁*** na **obr. 4.41** a **4.42**.

c) Statický přenos při změně teploty spalin na vstupu do přehříváku

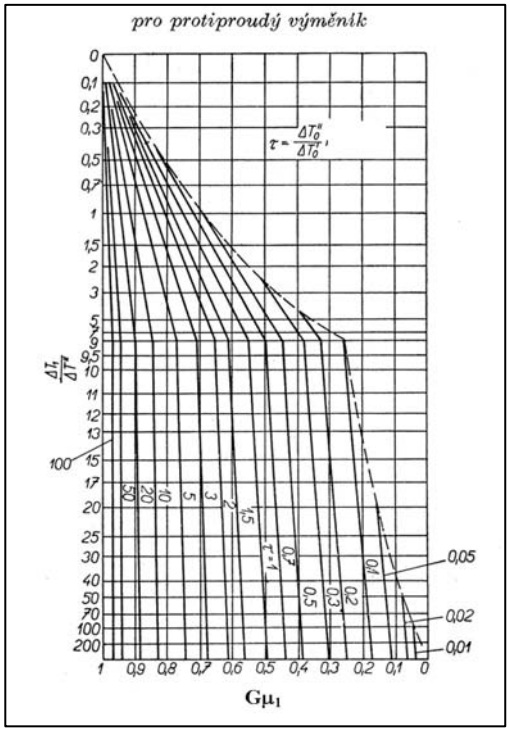
Přenos je definován ve tvaru

$$E_{T2} = \frac{\Delta T_{1(L)}.\Delta T_2}{\Delta T_{2(0)}.\Delta T_1} = \frac{T_{1(L)} - T_{1(10)}}{T_{2(0)} - T_{1(0)}} \tag{4-25}$$

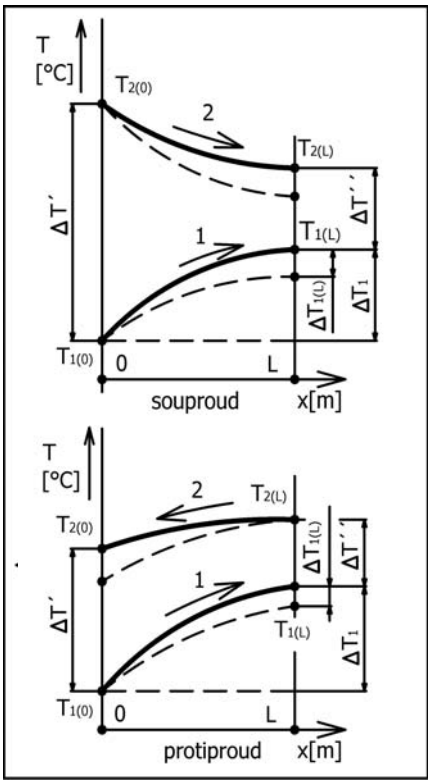
pro souproudý přehřívák a ve tvaru

$$G_{T2} = \frac{\Delta T_{1(L)}.\Delta T_2}{\Delta T_{2(L)}.\Delta T_1} = \frac{T_{1(L)} - T_{1(10)}}{T_{2(L)} - T_{1(0)}} \tag{4-26}$$

pro protiproudé řazení přehříváku.



Obr. 4.42 *Přenos při změně průtoku páry μ_1 na vstupu – protiproud (Index „0“ znamená ustálený stav.)*



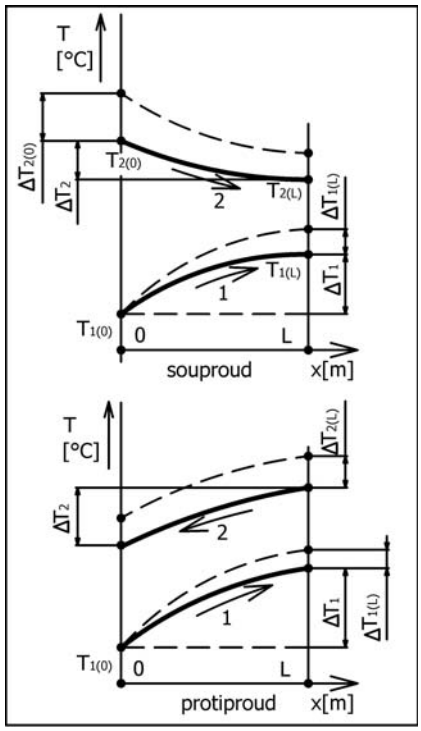
Obr. 4.43 *Změna teplotních poměrů na přehříváku při zvýšení průtoku páry μ_1*

Z uvedených rovnic se stanoví změna výstupní teploty páry $\Delta T_{1(L)}$ v závislosti na zvolené skokové změně teploty spalin na vstupu $\Delta T_{2(0)}$ nebo $\Delta T_{2(L)}$ – např. 10 K. Stanovení hodnot ΔT_1 a ΔT_2 je patrné z **obr. 4.44**.

d) Statický přenos při změně průtoku topného media (spalin) na vstupu do přehříváku

Změna průtoku spalin je definovaná opět jako poměrná změna průtoku $\mu_2 = \frac{\Delta M_2}{M_2}$, kde M_2 [kg/h] je průtok topného media (spalin) před změnou (ustálený stav) a ΔM_1 [kg/h] je zvolená skoková změna průtoku topného media.

Přenos se odečte z nomogramů na **obr. 4.45** a zohledňuje i změnu součinitele přestupu tepla z topného media (spalin) do stěny přehřívákové trubky. Jak se stanoví hodnoty ΔT_1; $\Delta T''$ a $\Delta T'$ potřebné pro odečtení přenosů je vidět na **obr. 4.46**.



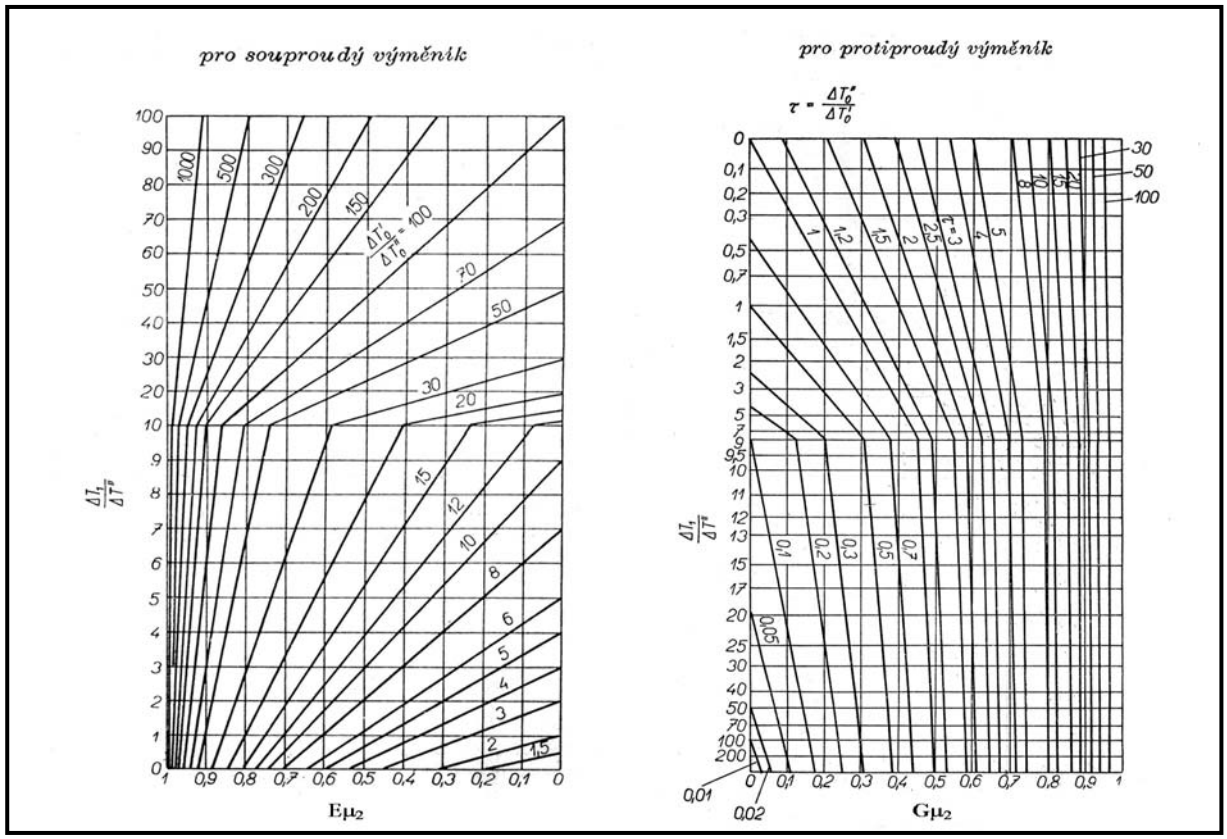
Obr. 4.44 *Změna teplotních poměrů vyvolaná zvýšením teploty topného media*

Tento přenos je pro souproud i protiproud definován ve tvaru

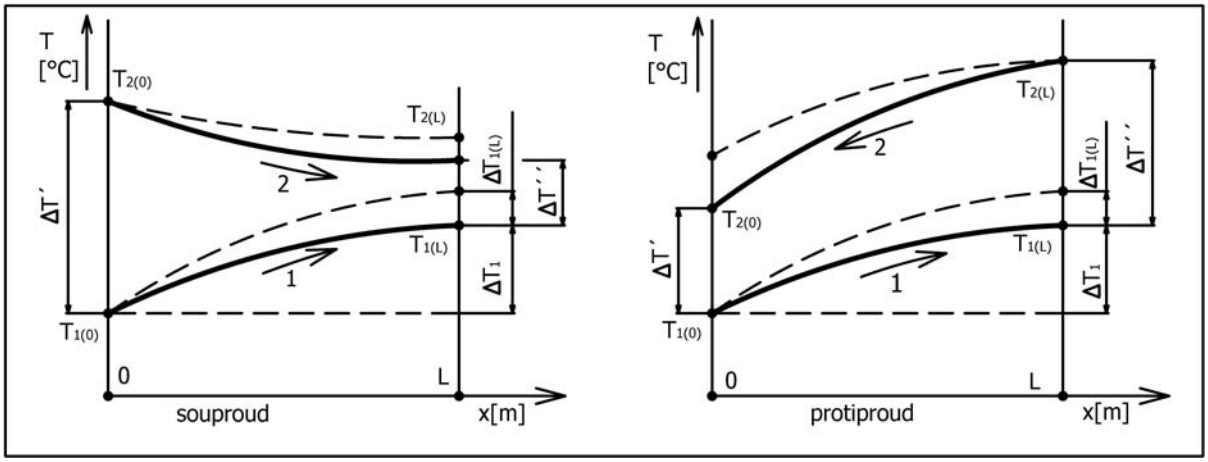
$$E\mu_1 = G\mu_2 = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\Delta T_1}.\frac{1}{\mu_2} \qquad (4\text{-}27)$$

Změna teplotních poměrů na přehříváku vyvolaná skokovým zvýšením průtoku topného media (spalin) μ_2 na vstupu je znázorněna na **obr. 4.46**. Při zvýšení průtoku spalin se teplota páry zvýší a naopak.

Pokud konstruktér kotle nevystačí se znalostí statických regulačních vlastností přehříváku může pro přibližné (ale rychlé) **určení dynamických vlastností přehříváků** použít některý z publikovaných aproximačních přenosů, např. přenosy ve tvarech, které uvádí Klefenz, (viz [1][29][30][31]) pro skokové změny teploty páry $\Delta T_{1(0)}$ [K], průtoku páry $\Delta M_{1(0)}$ [kg/s] a tepelného příkonu $\Delta q_{2\,(0)}$ [W/m^2] do ohřívané páry. Změna tepelného příkonu může být vyvolána současnou nebo samostatnou změnou průtoku $\Delta M_{2(0)}$ a teploty $\Delta T_{2(0)}$ topného media (spalin).



Obr. 4.45 *Přenos při změně průtoku topného media (μ_2) na vstupu do přehříváku*



Obr. 4.46 *Změna teplotních poměrů na přehříváku vyvolaná zvýšením průtoku topného media μ_2*

a) přenos při změně teploty páry $\Delta T_{1(0)}$ na vstupu do přehříváku

Je vyjádřen vztahem

$$G_t^*(s) = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\Delta T_{1(0)}} = \frac{1}{a_{ot}} \cdot \frac{1}{(1+T.s)^n} \qquad (4\text{-}28)$$

kde:

- $\frac{1}{a_{ot}} = \frac{C_{1(0)}}{C_{1(L)}}$
- $C_{1(0)}$; $C_{1(L)}$ - měrná tepelná kapacita páry na vstupu (0) a na výstupu (L) přehříváku [J/kg.K]

V tomto případě se jedná o soustavu n-tého řádu. Zesílení soustavy je $Z = \frac{\Delta T_{1(l)}}{\Delta T_{1(0)}} = \frac{1}{a_{ot}}$ a z diagramu na **obr. 4.47** se pro stanovené κ_p a T_R určí doba průtahu T_u a následně doba náběhu T_n. Ze známého zesílení, doby průtahu a doby náběhu lze sestrojit přibližnou přechodovou charakteristiku podle **obr. 3.9**. Přechodovou funkci můžeme přímo získat zpětnou transformací rov. 4-28, přičemž konstanta T a řád soustavy n se určí opět z diagramu na **obr. 4.47**.

kde:

$\kappa_P = \frac{\alpha_1.S_1}{C_1.M_1}$ [1]

α_1 = střední součinitel přestupu tepla ze stěny do páry [W/(m^{2}K)]

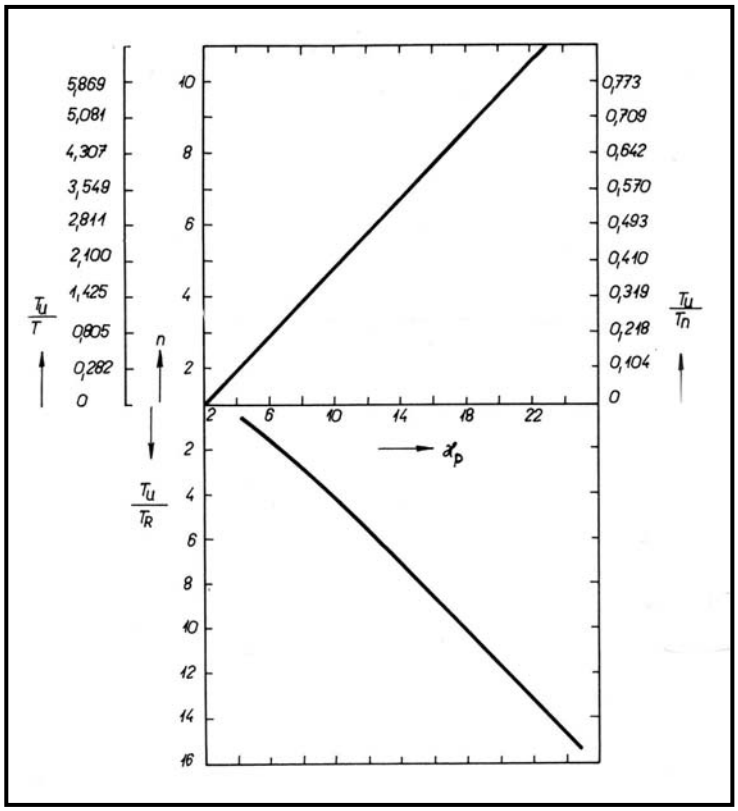
S_1 = teploměnná plocha na vnitřní straně trubky [m^2]

M_1 = průtok páry [kg/s]

$T_R = \frac{m_s.c_s}{\alpha_1.S_1}$ [s]

m_s = celková hmotnost přehříváku včetně komor a potrubí (od vstřiku až po měření teploty) [kg]

c_s = měrná tepelná kapacita materiálu trubek přehříváku [J/(kg.K)]



Obr. 4.47 *Stanovení konstant aproximačních přenosů přehříváku [4]*

b) Přenos při změně tepelného toku $\Delta q_{2(0)}$ do ohřívané páry

Tento je vyjádřen vztahem

$$G_q^*(s) = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\mu_q} = \frac{1}{a_{0q}} . \frac{1}{1 + T_q . s} \qquad (4\text{-}29)$$

kde:

- $\mu_q = \frac{\Delta q_2}{q_2}$ [1]
- $\frac{1}{a_{0q}} = T_{1(L)} - T_{1(0)}$ [s]
- $T_q = \frac{1}{a_{0q}} . \frac{m_s . c_s}{k . S}$ [s]
- κ – součinitel prostupu tepla stěnou přehřívákové trubky [w/(m^{2}K)]
- S – topená teplosměnná plocha přehříváku [m^2] (Výpočtová)
- q_2 – tepelný příkon ze spalin do ohřívané páry [W/m^2] před jeho skokovou změnou Δq_2

V tomto případě se jedná o soustavu 1. řádu se zesílením $Z = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\mu_q} = \frac{1}{a_{oq}}$ a dobou náběhu Tn = Tq. Ze známého zesílení a doby náběhu lze sestrojit přibližnou přechodovou charakteristiku podle **obr. 3.7**.

c) Přenos při změně průtoku páry $\mu_{1(0)}$ na vstupu do přehříváku

Tento je vyjádřen vztahem

$$G^*_{q(M)} = \frac{\Delta T_{1(L)}}{\mu_1} = \frac{1}{a_{0M}} . \frac{1}{1 + T_M . s} \qquad (4\text{-}30)$$

kde: • $T_M = \frac{m_s C_s}{C_1 M_1}$ [s]

• $\frac{1}{a_{oM}} = \frac{1}{a_{oq}} - \frac{M_1}{T_{1(L)}} \left[\frac{\partial (T_{1(L)} - T_{1(0)})}{\partial M_1} \right]_{M1}$ [-]

- $\frac{1}{a_{0q}}$ - zesílení přenosu $G^*_q(s)$; **rov. 4-29**
- parciální derivace se určí ze statické charakteristiky přehříváku, tj. z průběhu funkce $T_{1(L)} - T_{1(O)} = f(M_1)$ v okolí vztažného průtoku M_1, viz **obr. 4.49**.

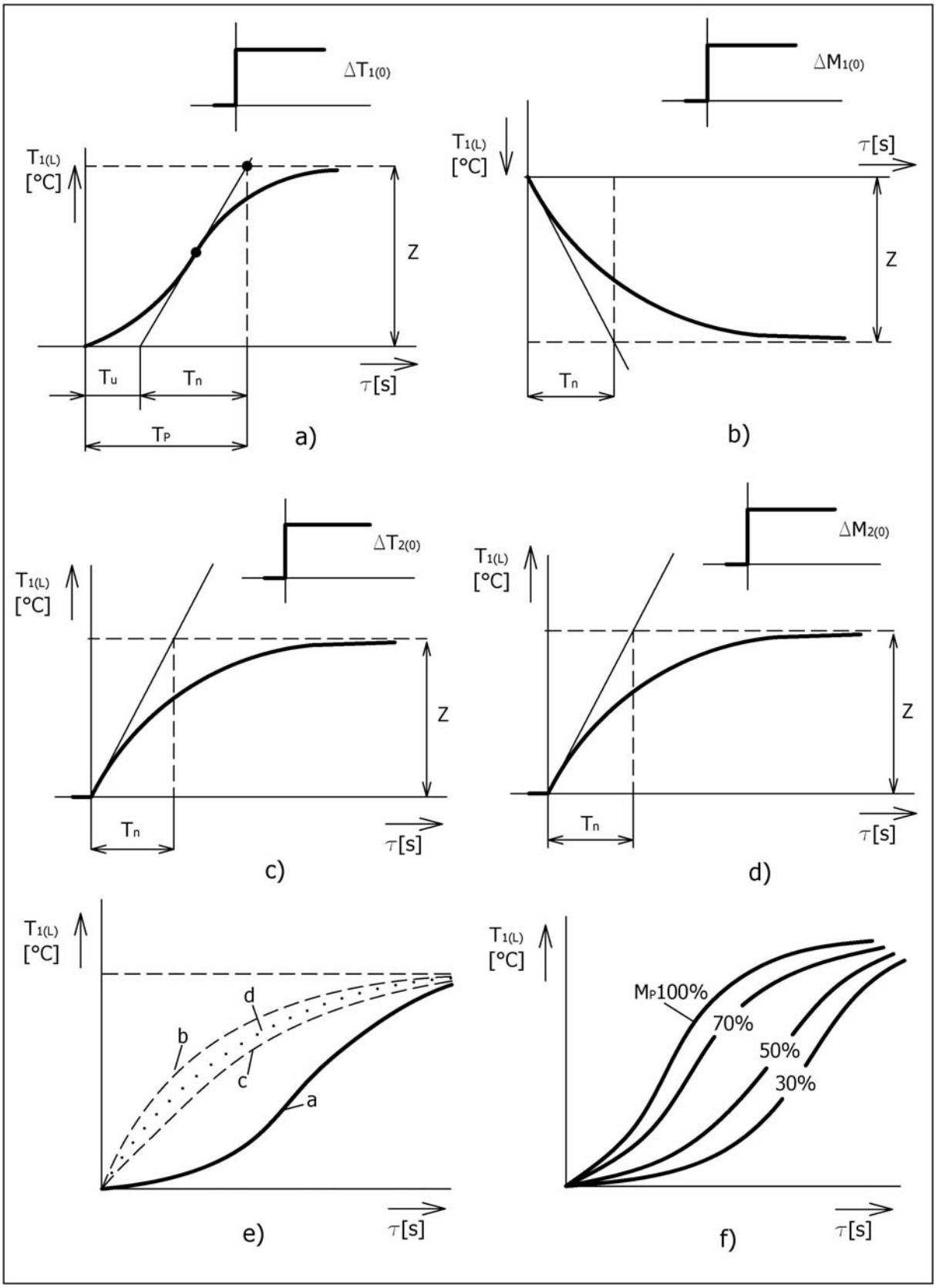
I v tomto případě se jedná o soustavu 1. řádu se zesílením $Z = \frac{1}{a_{oM}}$ (fyzikálně představuje změnu teploty na výstupu z přehříváku vyvolanou skokovou změnou průtoku páry před přehřívákem – tepelný příkon do ohřívané páry se nezměnil) a dobou náběhu T_M. Ze známého zesílení a doby náběhu lze sestrojit přibližnou přechodovou charakteristiku podle **obr. 3.7**.

Změnu regulované teploty $\Delta T_{1(L)}$ v čase při skokové změně akční nebo poruchové veličiny $\Delta T_{1(0)}$; μ_1; $\Delta T_{2(0)}$; μ_2; můžeme tedy znázornit např. pomocí přechodových charakteristik přehříváku, jejichž průběh je vidět na **obr. 4.48**. Ve všech případech se jedná o charakteristiky popisující statické soustavy.

Odezva teploty páry za přehřívákem $T_{1(L)}$ na skokovou změnu teploty páry na vstupu $\Delta T_{1(0)}$ je na **obr. 4.48a**. Jedná se o přechodovou charakteristiku vyššího řádu se zesílením ***Z***, tečna v inflexním bodě vymezuje na časové ose dobu průtahu ***Tu***, dobu náběhu ***Tn*** a dobu přechodu ***Tp***. Přenos je v tomto případě s kladným znaménkem. Kvalita regulace se posuzuje podle poměru Tu/Tn, tento poměr se mění s výkonem kotle.

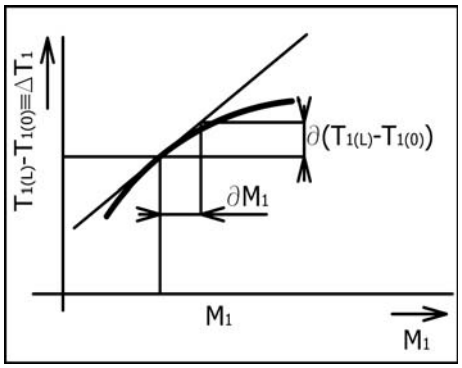
Na **obr. b)** je znázorněna odezva na změnu průtoku páry $\Delta M_{1(0)}$ na vstupu do přehříváku. Přenos je záporný, tzn. že při zvýšení průtoku páry o $+\Delta M_{1(0)}$ (nebo $+\mu_1 = \frac{\Delta M_{1(0)}}{M_1}$) se teplota páry $\Delta T_{1(L)}$ za přehřívákem sníží. Přechodová charakteristika je 1. řádu se zesílením ***Z***, tečna v počátku charakteristiky vymezuje na časové ose dobu náběhu ***Tn***.

Na **obr. c)** a **d)** jsou uvedeny odezvy na změnu teploty spalin $\Delta T_{2(0)}$ a průtoku spalin $\Delta M_{2(0)}$ na vstupu do přehříváku. V obou případech se opět jedná o charakteristiky 1. řádu se zesílením ***Z*** a dobou náběhu ***Tn***. Oba přenosy mají znaménko kladné. Často se změna průtoku spalin definuje také jako poměrná změna průtoku $\mu_2 = \frac{\Delta M_{2(0)}}{M_2}$ a místo změny teploty a průtoku spalin se zadává změna tepelného příkonu μ_q. Tato změna může být vyvolána současnou změnou teploty a průtoku spalin nebo jen jednou z nich.

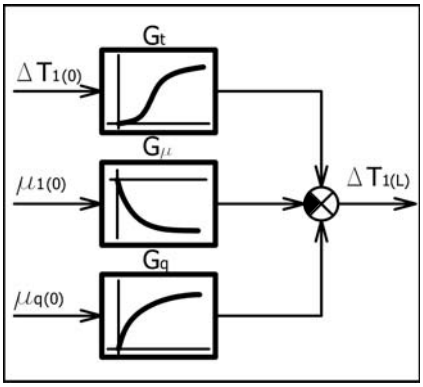


Obr. 4.48 *Přechodové charakteristiky přehříváku*

Obecně platí, čím bude doba náběhu ***Tn*** kratší, tím bude odezva přehříváku rychlejší. Na **obr. e)** jsou porovnány jednotlivé odezvy. Nejrychleji reaguje přehřívák na změnu průtoku páry $\Delta M_{1(0)}$ (μ_1), nejpomaleji pak na změnu teploty páry $\Delta T_{1(0)}$ – v tomto případě odezva zahrnuje již i dobu průtahu ***Tu*** charakteristickou pro soustavy vyššího řádu.



Obr. 4.49 *Charakteristika přehříváku*



Obr. 4.50 *Blokové schéma přehříváku*

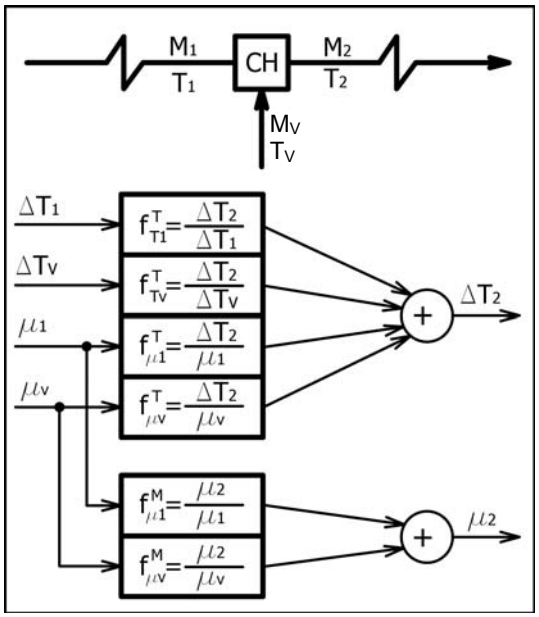
Z toho vyplývá, že regulace změnou teploty páry je z hlediska dynamických vlastností obtížnější než regulace na straně spalin. (Přesto je pro svoji jednoduchost regulace změnou teploty páry velmi rozšířená – viz další kapitola.)

I u přehříváku páry (stejně jako u každé soustavy v níž dochází k akumulaci tepla) se časové konstanty přechodových charakteristik mění v závislosti na výkonu kotle – s klesajícím výkonem se prodlužují, viz **obr. 4.48f**, kde je znázorněna odezva teploty $\mathbf{T_{1(L)}}$ na změnu teploty páry na vstupu $\Delta T_{1(0)}$, viz **obr. a)**při různých výkonech kotle. (S touto skutečností se musí počítat při návrhu i seřizování regulátoru. Obvykle se seřízení provádí pro střední regulovaný výkon kotle nebo se navrhuje adaptivní regulace, která přizpůsobuje seřízení regulátoru podle okamžitého výkonu kotle.)

Blokové schéma přehříváku s vyznačenými přenosy změny výstupní teploty páry $\Delta T_{1(L)}$ při skokové změně: teploty páry $\Delta T_{1(0)}$, množství páry μ_1 a tepleného příkonu μ_q na vstupu do přehříváku je znázorněno na **obr. 4.50**. Jednotlivé odezvy se sčítají, přenos G_μ od změny průtoku je záporný – odečítá se.

Protože u všech kotlů v našich teplárnách a elektrárnách se používá regulace teploty páry vstřikem napájecí vody, (nebo vlastního kondenzátu, viz **obr. 4.62b**) je pro úplnost uvedeno na **obr. 4.51** blokové schéma vstřiku.

Ve vstřikovém chladiči se teplota páry



M_1, T_1 – množství a teplota páry před vstřikem
CH – vstřikový chladič
M_2, T_2 – množství a teplota páry za vstřikem
M_V, T_V – množství a teplota páry vstřikované vody

Obr. 4.51 *Blokové schéma vstřikového chladiče páry [32]*

snižuje vstřikem napájecí vody nebo vlastního kondenzátu. Výstupními veličinami jsou teplota páry T_2 a množství páry M_2 za vstřikem. Změna množství páry za vstřikem je vyjádřena jako funkce poměrného průtoku páry za vstřikem, tj. $\Delta M_2 = M_2.\mu_2$. Vstupními veličinami jsou: změna teploty páry ΔT_1, změna teploty vstřikované vody ΔT_V, poměrná změna průtoku páry $\mu_1 = \frac{\Delta M_1}{M_1}$ a poměrná změna průtoku vstřikované vody $\mu_V = \frac{\Delta M_V}{M_V}$ na vstupu do chladiče.

Pro skokové změny uvedených vstupních veličin lze pro **odezvu výstupní teploty páry** ΔT_2 napsat přenosy ve tvaru:

- Přenos změny vstupní teploty

$$f_{T_1}^{T} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{c_1}{c_2}\left(1 - \frac{M_V}{M_2}\right)$$

  - c_1; c_2 – měrné tepelné kapacity páry [J/(kg, K)]

- Přenos změny teploty vody

$$f_{T_V}^{T} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_V} = \frac{c_V}{c_2}\frac{M_V}{M_2}$$

  - c_v – měrná tepelná kapacita vody [J/(kg, K)] 4-31)

- Přenos změny průtoku páry

$$f_{\mu_1}^{T} = \frac{\Delta T_2}{\mu_1} = \frac{1}{c_2}\frac{M_V M_1}{M_2^2}(i_1 - i_V)$$

  - i_1; i_V – entalpie páry a vody [J/kg]

- Přenos změny průtoku vody

$$f_{\mu_V}^{T} = \frac{\Delta T_2}{\mu_V} = -\frac{1}{c_2}\frac{M_V M_1}{M_2^2}(i_1 - i_V)$$

Jak je vidět, tak přenos změny teploty je proporcionální, zatím co přenos změny průtoku je parabolický a je pro změnu průtoku páry i vody stejný – liší se jen znaménkem, a můžeme jej vyjádřit i ve tvaru $M_2 = M_1 + M_V$

$$f_{\mu_1}^{T} = -f_{\mu_V}^{T} = \frac{1}{c_2}\frac{M_V(M_2 - M_V)}{M_2^2}(i_1 - i_V) \qquad (4\text{-}32)$$

Pro skokové změny vstupních veličin (**obr. 4.51**) lze pro **odezvu množství páry** μ_2 za vstřikem napsat přenosy ve tvaru:

- Přenos změny průtoku páry

$$f_{\mu_1}^{M} = \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{M_1}{M_2}$$

- Přenos změny průtoku vody

$$f_{\mu_V}^{M} = \frac{\mu_2}{\mu_V} = \frac{M_V}{M_2} \qquad (4\text{-}33)$$

V obou těchto případech se chladič chová jako člen s proporcionálním přenosem.

4.2.2 Základní způsoby regulace teploty páry

U parních kotlů se teplo do jednotlivých teplosměnných ploch kotle (ohřívák vody, výparník, přehřívák) předává sáláním (při vysokých teplotách spalin), konvekcí (při nižších teplotách spalin, např. pod 500 °C) nebo kombinací obou. Kromě teploty spalin ovlivňuje způsob sdílení tepla (sálání, konvekce) i konstrukční provedení plochy. Např. trubky mohou být uspořádány v hustém trubkovém svazku (převažuje konvekce, nebo jsou z nich provedeny deskové plochy uspořádané ve velké vzdálenosti od sebe – převažuje sálání. Tak např. do výparníku (**obr. 4.38**), který v tomto případě je proveden jako stěny kotle, se ve spalovací komoře předává teplo sáláním – v horní části kotle pak kombinací sálání a konvence.

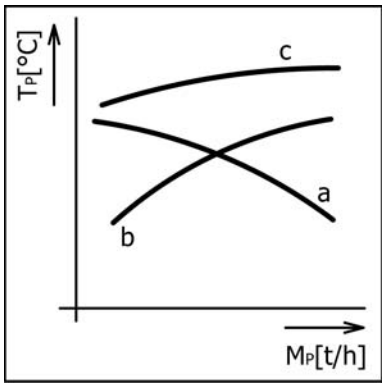
Do ohříváku vody ***EKO*** se teplo předává většinou již konvekcí (nízké teploty spalin) a u přehříváku jako celku pak kombinací sálání a konvekce. Tak např. u závěsných trubek ***ZT*** v jejich horní části se předává teplo převážně konvekcí a ve spodní části pak sáláním. U přehříváku ***PR1*** převažuje konvekce, u přehříváku ***PR3*** to pravděpodobně bude kombinace sálání a konvekce a u deskového přehříváku ***PR2*** bude převažovat sdílení tepla sáláním.

Podle provedení a umístění teplosměnné plochy v kotli má tedy přehřívák páry statickou charakteristiku (závislost teploty páry ***Tp*** na množství páry ***Mp*** – resp. na výkonu) **konvekční** nebo **sálavou**. Schématicky je průběh těchto charakteristik znázorněn na **obr. 4.52**.

U přehříváku se sálavou charakteristikou s klesajícím výkonem teplota páry vzrůstá – bez nějaké vhodné regulace ji nelze udržet na konstantní hodnotě.

U přehříváku s konvekční charakteristikou se naopak teplota páry s klesajícím výkonem snižuje – opět je tedy nutná regulace, chceme-li teplotu páry udržet konstantní.

Nejmenší vliv na teplotu páry má změna výkonu v případě, když charakteristika přehříváku je v oblasti regulačního rozsahu výkonu kotle pokud možná plochá – ideální je mírně konvekční, viz charakteristika ***c*** na **obr. 4.52**. K takové charakteristice se lze přiblížit jen pokud přehřívák kotle se rozdělí na více dílů a to tak, že se vhodně kombinují díly přehříváku se sálavou a konvekční charakteristikou.



a – sálavá b – konvekční
c – součtová – celého přehříváku

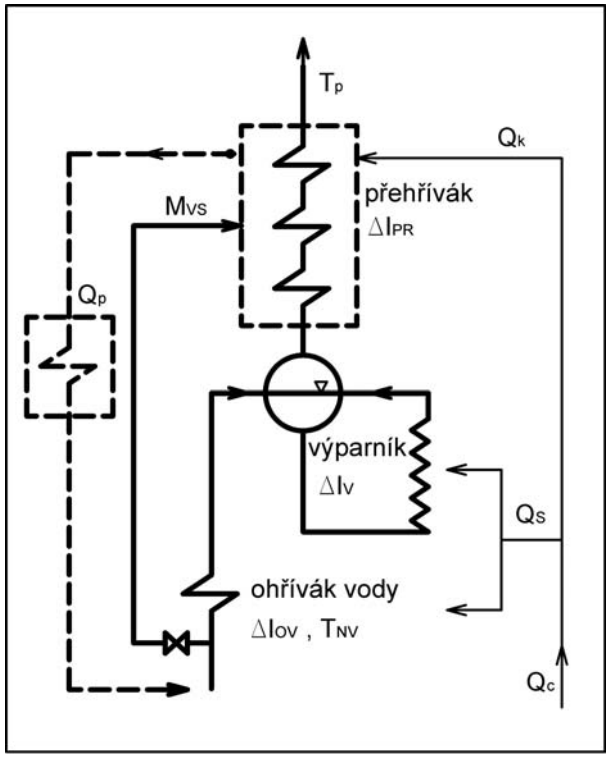
Obr. 4.52 *Statická charakteristika přehříváku*

Konstruktér kotle pak může kvalitu regulace teploty páry zlepšit i tím, že výstupní díl přehříváku provede s malou hmotností – tím zlepší jeho dynamické vlastnosti. Volí se např. menší ohřátí páry (např. 50 až 70 K), přehřívák má mít co nejmenší hmotnost – ta souvisí i s volbou vhodného materiálu a co nejkratší délky neotápěných částí (neotápěné části hadů, komory, spojovací potrubí).

Zatímco poruchové veličiny u přehříváku jsou známé (např. **obr. 4.39**) není pro volbu akční veličiny pro regulaci teploty páry jednoznačné doporučení – musí se provést analýza problému s uvážením typu kotle, vlastností spalovaného paliva, požadovaných dynamických vlastností kotle atd.

Je ale zřejmé, že jako akční veličinu nelze použít změnu množství paliva ani množství spalovacího vzduchu (i když dynamické vlastnosti přehříváku při změně tepelného příkonu jsou výhodné – viz např. **obr. 4.48 e**), neboť tyto veličiny jsou využívány jako akční veličiny při regulaci výkonu (tlaku) a spalování.

Možnosti, které jsou k dispozici pro volbu možné akční veličiny pro regulaci teploty páry, jsou naznačeny na **obr. 4.53**. Při konstantním výkonu kotle (celkové přivedené teplo Q_c = konst.) teplotu ***Tp*** výstupní páry můžeme měnit změnou poměru přírůstku entalpií v jednotlivých částech kotle.



Q_c – celkové teplo přivedené do kotle M_{VS} – množství vstřiku
Q_S – teplo přivedené do výparníku vč. ohř. vody
Q_K – teplo přivedené do přehříváku
Q_P – teplo z přehříváku přivedené do výparníku a ohř. vody
ΔI_{OV}, ΔI_V, ΔI_{PR} – přírustek entalpie na ohříváku vody, výparníku a na přehříváku
T_{NV} – teplota napájecí vody T_P – teplota výstupní páry

Obr. 4.53 *Schéma kotle – možnosti změny teploty páry [31]*

Platí-li, že $\Delta I_C = \Delta I_{OV} + \Delta I_V + \Delta I_{PR}$ (4-34)

tj. součet přírůstků entalpií na ohříváku vody $\Delta \boldsymbol{I_{OV}}$, na výparníku $\Delta \boldsymbol{I_V}$ a na přehříváku $\Delta \boldsymbol{I_{PR}}$ je při daném výkonu $\boldsymbol{Q_C}$ konstantní, pak lze měnit (při zachování konstantního výkonu) teplotu páry ***Tp*** na výstupu změnou poměru přírůstků entalpií podle rovnice

$$\frac{\Delta I_{PR}}{\Delta I_C} = \frac{1}{1+\dfrac{\Delta I_{OV}+\Delta I_V}{\Delta I_{PR}}}.[-] \qquad (4\text{-}35)$$

Jakým způsobem lze změnit poměr $\dfrac{\Delta I_{OV}+\Delta I_V}{\Delta I_{PR}}$ je schematicky naznačeno na **obr. 4.53**.

Jsou k dispozici tyto možnosti:

- Změnit poměr tepelného příkonu do výparníku $\boldsymbol{Q_S}$ a do přehříváku $Q_{PR} = Q_K$, přičemž celkový příkon do kotle $\boldsymbol{Q_C}$ by se nezměnil. Změní se $\Delta \boldsymbol{I_{PR}}$ případně i $\Delta \boldsymbol{I_V}$. Taková změna poměru tepelného příkonu se dosáhne např. změnou polohy plamene nebo recirkulací spalin do spalovací komory.
  Mění se: $\Delta \boldsymbol{I_{OV}}$, $\Delta \boldsymbol{I_V}$ i $\Delta \boldsymbol{I_{PR}}$. (viz např. O**br. 4.55**; **4.56**)
- Provést přenos tepla $\boldsymbol{Q_P}$ z oblasti přehříváku páry do oblasti výparníku nebo ohříváku vody. Provede se např. pomocí výměníku k tomuto účelu určenému – např. chlazení páry kotelní vodou (výměník je v bubnu kotle, mění se $\Delta \boldsymbol{I_V}$ a $\Delta \boldsymbol{I_{PR}}$, např. **obr. 4.59**), nebo napájecí vodou (mění se $\Delta \boldsymbol{I_{OV}}$ a $\Delta \boldsymbol{I_{PR}}$, např. **obr.**

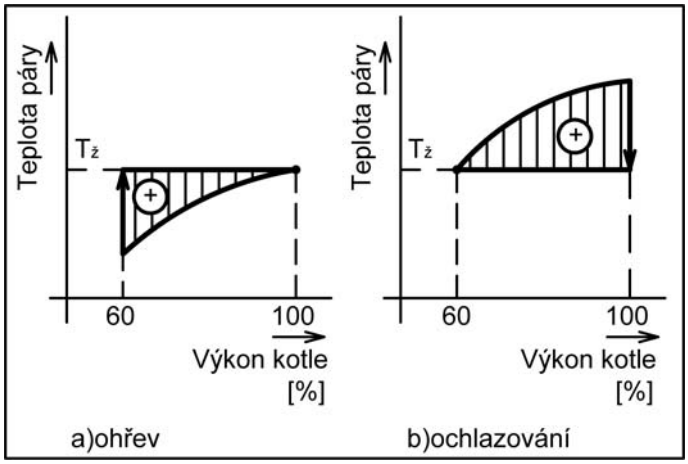
4.60), nebo se provede obtokem spalin u přehříváku – sníží (zvýší) se průtok spalin přes přehřívák a zvýší (sníží) se průtok páry přes ohřívák vody. Mění se ΔI_{PR} a ΔI_{OV}.

- Změnit poměr průtoku vody přes výparník k průtoku páry přes přehřívák. Je to dnes nejčastěji používaný způsob regulace a provádí se změnou průtoku M_{VS} vstřikované vody. Mění se nejen ΔI_{OV}, ΔI_V a ΔI_{PR}, ale i průtoky pracovního média (voda, pára) přes jednotlivé části kotle. (viz např. **obr. 4.62**).

Pro regulaci změnou polohy plamene nebo recirkulací spalin a obtokem spalin, se někdy používá souhrnný název regulace na straně spalin a pro regulaci využívající k chlazení páry výměník tepla nebo vstřik vody či kondenzátu se požívá souhrnný název regulace na straně páry.

Předpokládáme-li, že přehřívák má výslednou charakteristiku konvekční, pak podle použitého způsobu regulace (akční veličiny) se přehřívák páry dimenzuje (viz **obr. 4.54**):

- pro dosažení požadované teploty páry ($T_Ž$ např. 540 °C) při výkonu kotle 100 %. V tomto případě, viz **obr. a**, se při snížení výkonu na 60 % (regulační rozsah např. 60 % - 100 %) musí pro dosažení požadované teploty $T_Ž$ pára ohřívat. (Naklápění hořáků, recirkulace nebo obtok spalin.)
- pro dosažení požadované teploty páry $T_Ž$ při nejnižším výkonu v regulačním rozsahu kotle, např. 60 %. V tomto případě se při zvýšení výkonu na 100 % musí pára chladit, aby se dosáhla požadovaná teplota páry $T_Ž$. (Vstřik napájecí vody, chlazení páry ve výměníku, případně i obtok spalin.)



$T_Ž$ – žádaná teplota páry v regulačním rozsahu výkonu kotle

Obr. 4.54 *Dimenzování přehříváku s konvekční charakteristikou*

4.2.2.1 Regulace teploty páry změnou poměru tepelného příkonu do výparníku a do přehříváku páry

Při konstantním celkovém příkonu do kotle se musí poměr tepla předaného do výparníku a do přehříváku udržovat na určité hodnotě dané dimenzováním výparníku a přehříváku. Je-li tento poměr porušen, např. je větší teplo do výparníku, tak ve výparníku se vyrobí více syté páry a přehřívák nezajistí její přehřátí na požadovanou teplotu. V takovém případě musí regulace snížit teplo do výparníku a zvýšit teplo předané v přehříváku. Množství vyrobené syté páry se sníží a teplota páry se zvýší – jednak je menší průtok páry v přehříváku a rovněž se zvýšil tepelný příkon do přehříváku. Tento princip se v praxi realizuje změnou polohy plamene nebo recirkulací spalin.

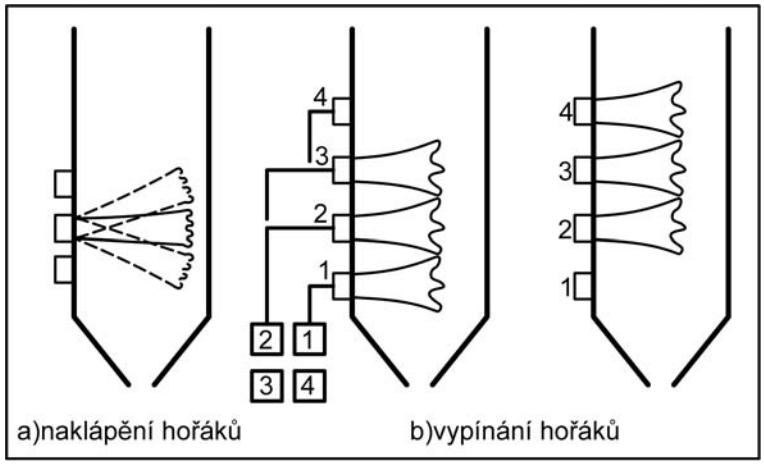
Regulace teploty páry změnou polohy plamene

Tento způsob regulace není příliš rozšířen a změna polohy plamene se může provádět buď naklápěním hořáků (vertikálně) nebo vypínáním a zapínáním jednotlivých horních nebo častěji spodních úrovní hořáků.

V případě naklápění hořáků se přívody paliva i spalovacího vzduchu naklápí nahoru nebo dolů a tím se přesouvá těžiště plamene po výšce spalovací komory – viz **obr. 4.55a**. (Mění se tak součinitel ***M*** – respektující průběh teplot ve spalovací komoře – ve vztahu pro výpočet poměrné teploty na konci ohniště). Velkou nevýhodou této regulace je složitá a nákladná konstrukce naklápěcích hořáků.

Vypínání či zapínání horních nebo spodních pater hořáků je konstrukčně jednodušší a při spalování uhlí se používá např. v případě, když primární směs se rozděluje do většího počtu hořáků, které jsou umístěny vedle sebe v několika patrech nad sebou. (Nebo v případě kdy má kotel několik mlýnů s přímým foukáním a každý mlýn je připojen jen k hořákům v jednom patře.)

Tak např. na **obr. 4.55b** jsou v provozu mlýny 1, 2, 3 – těžiště hoření je níže; nebo mlýny 2, 3, 4 – těžiště hoření je výše. Při posunutí plamene nahoru se sníží teplo předané do výparníku a zvýší se teplo předané do přehříváku a naopak.



Obr. 4.55 *Změna polohy plamene*

Tímto způsobem regulace lze dosáhnout rychlou odezvou teploty páry (viz dynamika přehříváku, **obr. 4.48e**), ale musí se při návrhu respektovat i možný vliv této regulace např. na struskování šotového prostoru, obsah spalitelných látek v popílku, emise CO a NO_x apod. Obvykle je tato regulace doplněna regulací teploty výstupní páry z kotle, např. regulací vstřikem napájecí vody, kap. 4.2.2.3.

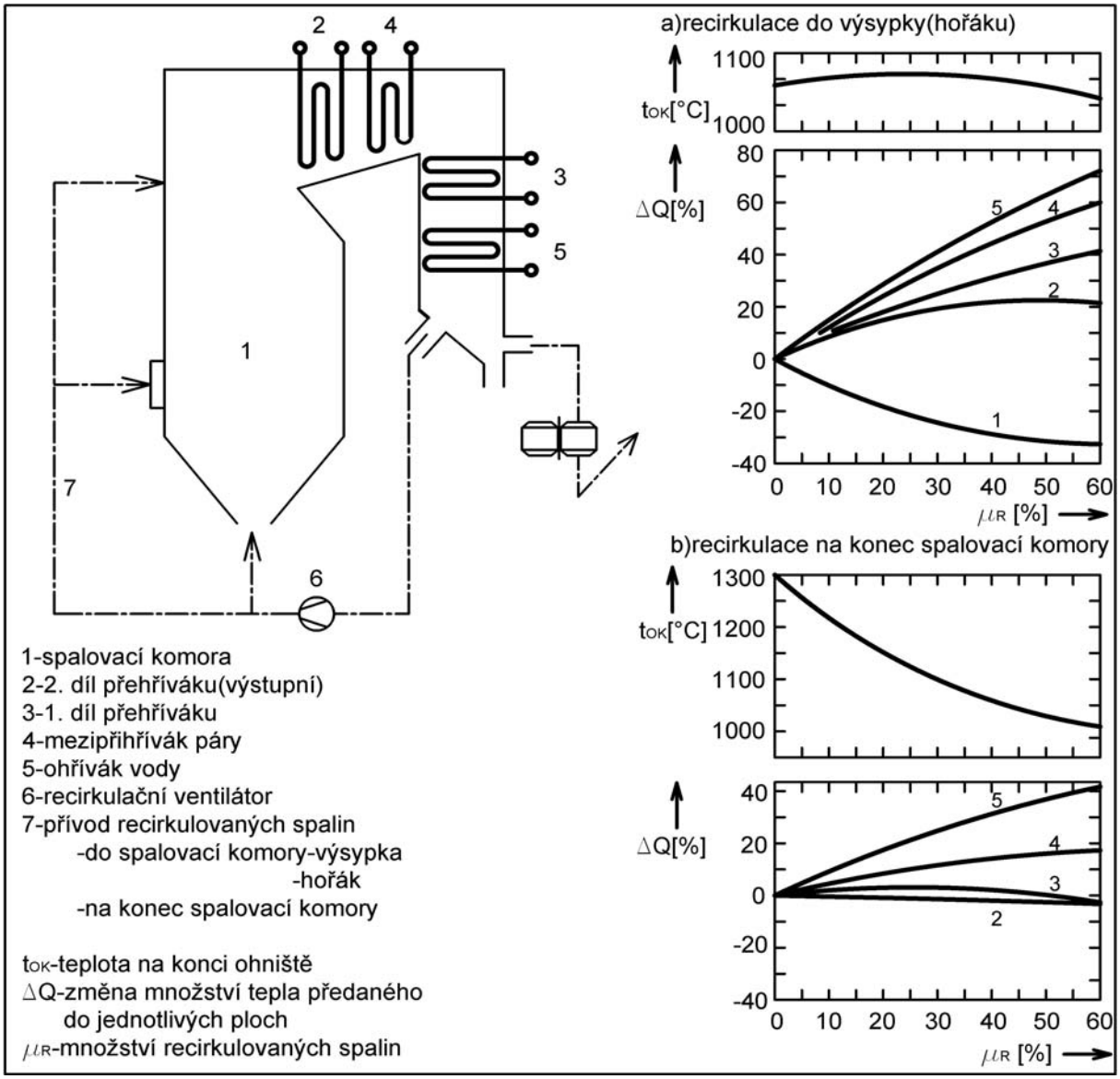
Regulace teploty páry změnou množství recirkulovaných spalin

Tento způsob regulace se používá u kotlů větších výkonů.

Princip regulace je naznačen na **obr. 4.56** a spočívá v tom, že z konvekčního tahu kotle (obvykle za ohřívákem vody) se odebírají spaliny (např. o teplotě 400 °C) a recirkulačním ventilátorem se vracejí zpět do kotle.

Nejčastěji se recirkulované spaliny přivádějí do spalovací komory (do výsypky nebo do hořáků) a nebo na konec spalovací komory – před přehřívák páry.

Průtok recirkulovaných spalin se obvykle mění změnou otáček recirkulačního ventilátoru, někdy se používají k regulaci i regulační klapky.



Obr. 4.56 *Vliv recirkulace spalin na sdílení tepla v kotli [31]*

Recirkulace spalin bezesporu komplikuje konstrukci kotle a jeho provoz, zvyšuje i investiční a provozní náklady. Recirkulace může být úspěšná jen při dodržení určitých podmínek, jako např. jsou:

- musí se zajistit dokonalé promísení recirkulovaných spalin se spalinami ve spalovací komoře (různá teplota a viskozita spalin). Přívod recirkulovaných spalin musí být proveden ve více vhodných místech po obvodu spalovací komory, výstupní rychlost recikulovaných spalin musí být dostatečně vysoká a průměr dýz větší, aby recirkulované spaliny měly dostatečnou průraznost
- musí být zajištěna těsnost potrubí recirkulovaných spalin při jejich odstavení. Uzavírací klapky musí být těsné, aby při odstavení recirkulačního ventilátoru nedošlo k opačnému proudění spalin (v místě odběru spalin je výrazně nižší tlak než ve spalovací komoře)

- musí se zabránit poklesu teploty recirkulovaných spalin (stěny potrubí) pod rosný bod spalin (nízkoteplotní koroze - zejména při spalování paliv obsahujících více síry) a to i při odstavené recirkulaci
- musí se zajistit potřebná provozní spolehlivost systému recirkulace, především recirkulačního ventilátoru a potrubí. Je to problém výše uvedené koroze a především abraze popílkem. Obsah popílku v nasávaných spalinách by měl být snížen na přijatelnou úroveň.

Je třeba si uvědomit, že k použití recirkulace spalin u kotle vedou i jiné důvody než regulace teploty páry. Recirkulace umožňuje např. ovlivnit rozměry spalovací komory, snížit nerovnoměrnost rozložení teplot podél spalovací komory, řešit problém struskování stěn ohniště nebo šotového prostoru a v neposlední řadě i redukovat emise NO_x.

Při rozhodnutí o použití recirkulace spalin k regulaci teploty páry se musí kromě zvýšení investičních a provozních nákladů vzít tedy v úvahu i dopad recirkulace na uvedené provozní vlastnosti kotle. Na druhé straně tzn., že pokud je recirkulace využita např. pro redukci NO_x (je podle NO_x řízená) tak již nemůže být využita pro regulaci teploty páry.

Výhodou recirkulace spalin je, že nezvětšuje komínovou ztrátu.

U kotlů s výtavným ohništěm lze recirkulované spaliny přivést zásadně až do vychlazovacího prostoru. U granulačních ohnišť lze přívod provést do hořáků nebo do výsypky – ovlivní se tak i struskování stěn spalovací komory a tvorba NO_x.

Při recirkulaci na konec spalovací komory se může ovlivnit i struskování šotového prostoru, ale nemůže se ovlivnit struskování stěn spalovací komory a tvorba NO_x. Protože při recirkulaci spalin se zvyšuje průtok spalin přes přehříváky a ohřívák vody, musí se tato skutečnost respektovat i při hodnocení abraze u těchto ploch.

Množství recirkulovaných spalin bývá do 20 %, přičemž podle zvoleného množství recirkulovaných spalin se stanoví dosažitelný minimální výkon kotle, při němž je ještě dodržena konstantní teplota páry. Při snižování výkonu se průtok recirkulovaných spalin zvyšuje. Přehřívák se navrhuje při jmenovitých parametrech s recirkulací ve výši cca 2 až 8%.

Tento způsob regulace je vhodnější pro olejové kotle, nejsou problémy s abrazí systému recirkulace a snižují se vysoké tepelné toky ve spalovací komoře.

S výhodou se recirkulace spalin využívá pro regulaci přihřívané (nízkotlaké) páry – přehřátá (vysokotlaká) pára se reguluje vstřikem, ale jeho velikost je vzhledem k recirkulaci spalin výrazně nižší, cca 4 %.

Vliv recirkulace spalin na sdílení tepla v kotli je znázorněn na **obr. 4.56**.

Při recirkulaci spalin do spodní části spalovací komory se při zvyšující se recirkulací teplota páry zvyšuje (**obr. a**) – sníží se teplo předané do výparníku a zvýší se teplo do přehříváku. Při recirkulaci na konec spalovací komory (před přehřívák, **obr. b**) se teplota páry snižuje – teplo předané do výparníku se nezmění, ale teplo předané do přehříváku se zmenší.

Odezva teploty páry na změnu akční veličiny je při recirkulaci spalin poněkud pomalejší než odezva při regulaci obtokem spalin, ale výhodou je široký regulační rozsah výkonu kotle s konstantní teplotou páry. (Kompenzuje se tak účinně vliv výkonu kotle na teplotu páry – konvekční charakteristika.) Recirkulaci spalin nelze použít pro regulaci teploty u kotlů, jejichž přehřívák má sálavou charakteristiku. Obvykle je tato regulace doplněna regulací teploty výstupní páry z kotle vstřikem napájecí vody, kap. 4.2.2.3.

4.2.2.2 Regulace přenosem tepla z oblasti přehříváku do výparníku

Při konstantním celkovém příkonu tepla do kotle se při tomto způsobu regulace mění předané teplo do přehříváku tím, že se část tepla z oblasti přehříváku přesune do oblasti výparníku nebo ohříváku vody.

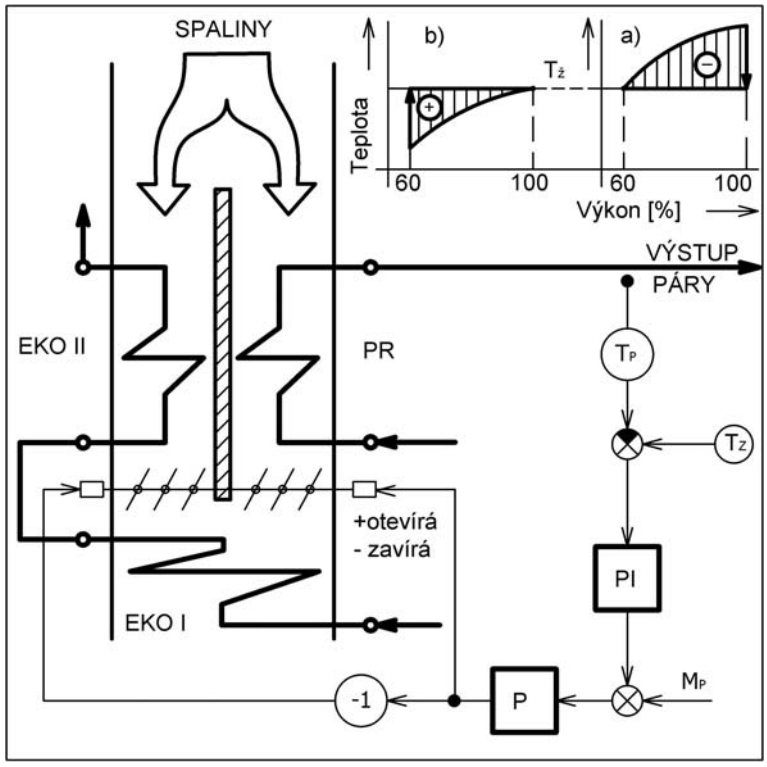
Tento princip lze realizovat obtokem spalin u přehříváku nebo zařazením výměníku tepla mezi přehřátou párou a napájecí vodou nebo kotelní vodou.

Regulace teploty páry obtokem spalin u přehříváku

Tento způsob regulace často využívají výrobci kotlů v USA v menší míře i v Evropě. U nás není rozšířen, pravděpodobně jediné případy, kdy byl tento způsob v poslední době použit, jsou fluidní kotle o výkonu 350 t/h v elektrárně Ledvice a v elektrárně ECK Kladno, které dodala ABB Brno, dnes fa ALSTOM Power Boilers Brno.

Akční veličinou je změna průtoku spalin přes přehřívák – proto se někdy nazývá tento způsob regulací na straně spalin.

Přehřívák s touto regulací má dobré dynamické vlastnosti – viz např. **obr. 4.48e**. Princip takové regulace je uveden na **obr. 4.57**.



EKOI, II – první a druhý díl ohříváku vody PR – přehřívák páry
T_p – teplota páry T_Z – žádaná teplota páry M_p – množství páry

***Obr. 4.57** Regulace teploty páry obtokem spalin*

Konvekční tah kotle je rozdělen svislou mezistěnou alespoň na dvě části; v jedné je umístěný regulovaný přehřívák páry ***PR***, ve druhé je např. výstupní díl ohříváku vody ***EKOII***. Na výstupu spalin (v nižší teplotě) jsou v každé části tahu umístěny regulační klapky, kterými se celkový průtok spalin rozděluje do části s přehřívákem páry a do části s ohřívákem vody. Protože u kotlů větších výkonů je průřez konvekčního tahu velký, musí být i rozměry klapek (především jejich délka) velké, což při požadované vysoké spolehlivosti klade značné nároky na jejich konstrukci, výrobu i montáž.

Proto se klapky umísťují do oblasti spalin s nižší teplotou (do cca 650 °C) a regulaci obtokem nelze použít např. u výstupního dílu přehříváku páry v oblasti vysokých teplot spalin. Klapky se dělají chlazené vodou, případně vzduchem, nebo nechlazené. Při chlazení vodou hrozí (při spalování sirnatých paliv) nebezpečí, že bude podkročen rosný bod a dojde k jejich korozi. U nechlazených klapek (nebo u

klapek chlazených vzduchem) hrozí nebezpečí tepelných deformací nebo neúměrných dilatací, které znemožní pohyb klapky.

U spalin vystupujících z oddělených tahů se musí zajistit jejich dokonalé promísení a ochlazení v takové míře, aby se při regulaci neměnila teplota spalin za kotlem. (Při zvýšení teploty spalin by se zhoršila účinnost kotle, při snížení teploty – byť lokálním – by se mohly vytvořit podmínky pro nízkoteplotní korozi na ohříváku vzduchu.)

Proto musí být ve spalinách za rozděleným tahem další teplosměnná plocha – v tomto případě vstupní díl ohříváku vody ***EKO*** I.

Při vyšší teplotě páry T_P než je žádaná teplota $T_{\check{Z}}$ regulátor klapky v přehřívákové části uzavírá a současně klapky v části s ohřívákem vody otevírá. Klapky jsou ovládány společným regulátorem a po rozdělení signálu za regulátorem se výstup na klapku v části s ohřívákem vody při dané polaritě (⊕ otevírá, ⊖ zavírá) násobí (-1).

Tímto se přesouvá průtok spalin – v části s přehřívákem se snižuje a v části s ohřívákem vody se zvyšuje.

Výhodou regulace teploty páry obtokem spalin je rychlejší odezva na změnu akční veličiny (než např. při regulaci vstřikem), ale regulační rozsah výkonu při tomto způsobu regulace je naopak menší.

Menší rozsah regulace výkonu a skutečnost, že regulaci obtokem nelze použít u výstupního dílu přehříváku, vede v praxi k tomu, že regulace obtokem se kombinuje často s regulací vstřikem napájecí vody. Regulace vstřikem se používá u výstupního dílu přehříváku (nebo i u těch dílů, které jsou ve vysokých teplotách spalin) a regulace obtokem se používá u vstupních dílů přehříváku v nižších teplotách spalin.

S výhodou se taková kombinovaná regulace používá u kotlů, které jsou projektovány na spalování různých odlišných druhů uhlí: např. černé a hnědé uhlí, hnědé uhlí s velmi rozdílným obsahem vody apod. V takových případech umožňuje obtok spalin dosáhnout plošší charakteristiku přehříváku a snížit tak množství vstřikované vody.

Při regulaci teploty páry obtokem se přehřívák, pokud je jeho celková charakteristika konvekční, dimenzuje např. tak [6] aby byla dosažena požadovaná teplota páry při min. požadovaném výkonu kotle, např. 60 % (viz **obr. 4.57a**), a při otevřené klapce v přehřívákové části. Při zvyšování výkonu, kdy se teplota páry zvyšuje, se klapka v přehřívákové části přivírá (klapka v paralelní části se otevírá) a snižuje se předané teplo v přehříváku. Je-li v paralelním tahu zařazen ohřívák vody, zvyšuje se současně teplo předané do výparníku – tím se zvyšuje výroba syté páry, což je z hlediska regulace teploty páry příznivé.

Nebo se při návrhu přehříváku může využít výhodné vlastnosti regulace na straně spalin spočívající v tom, že páru při změně výkonu můžeme ohřívat.

V tomto případě se přehřívák dimenzuje [1] pro dosažení požadované teploty páry při jmenovitém výkonu 100 % (viz **obr. 4.57b**) – regulační klapka v paralelním tahu je otevřená a klapka v přehřívákové části částečně přivřená.

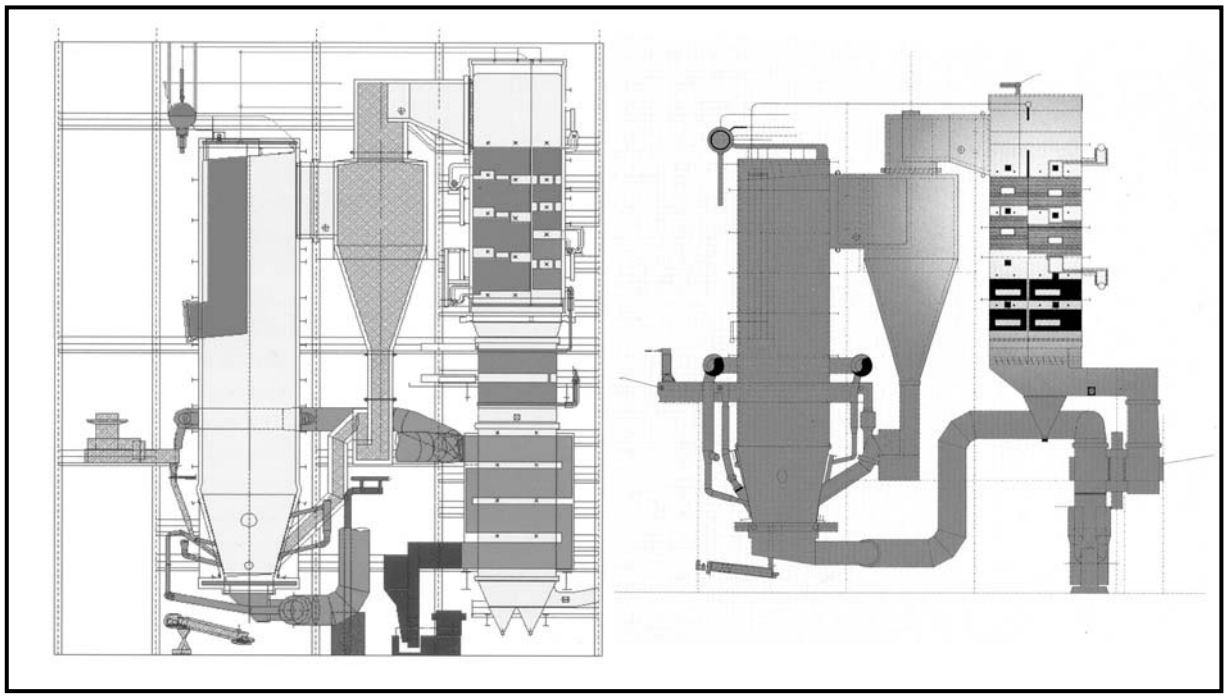
Při snižování výkonu kotle (teplota páry by byla nižší než žádaná) se klapka v paralelním tahu přivírá a klapka v přehřívákové části otevírá.

Tím se zvyšuje teplo předané do přehříváku a snižuje teplo do ohříváku vody – při této regulaci se tedy snižuje výroba syté páry.

Regulace obtokem spalin znamená však také složitější provedení konvekčního tahu kotle – s tím souvisí vyšší investiční ale i provozní náklady (spolehlivost klapek).

Při návrhu teplosměnných ploch (přehřívák, ohřívák vody) se při spalování popelnatých uhlí musí počítat i se změnou intenzity abraze při změně akční veličiny. (Intenzita abraze se mění s třetí mocninou rychlosti spalin.)

Možné provedení kotle s děleným konvekčním tahem je vidět na **obr. 4.58**.



Obr. 4.58 *Fluidní kotle Flex Tech ALSTOM Power Boiler GmbH, Brno [33]*

V levé části obrázku je uveden typový projekt uspořádání takového kotle, v pravé části pak je konkrétní uspřádání této technologie pro kotel o výkonu 375 t/h v elektrárně ECK Kladno.

V přední části děleného konvekčního tahu (levý obr.) je umístěn přihřívák páry, v zadní části pak je díl přehříváku páry a výstupní díl ohříváku vody. Ve společném tahu nad ohřívákem vzduchu je pak vstupní díl ohříváku vody.

Regulace teploty páry jejím chlazením v povrchovém výměníku

Tato patří k nejstarším způsobům regulace teploty páry vůbec, ale běžně se používá i dnes, i když jen u kotlů s nižšími parametry a s nižším výkonem. Pro chlazení páry se používá buď kotelní voda nebo napájecí voda.

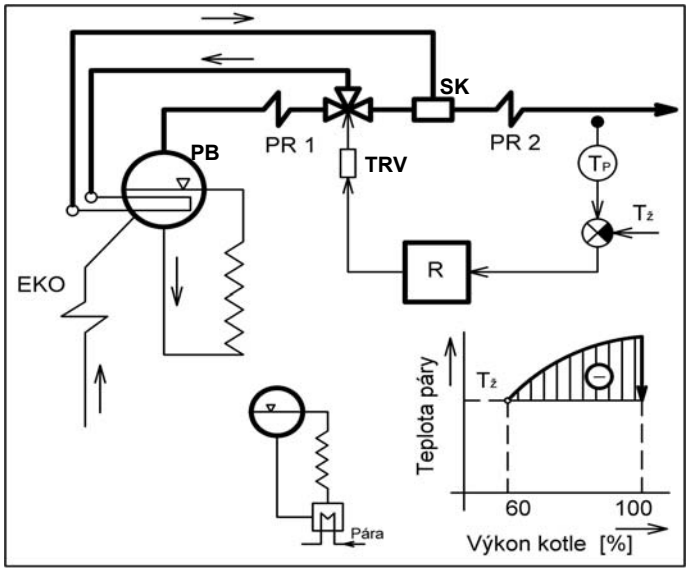
a) Chlazení páry kotelní vodou

Tento způsob se používá u kotlů s přirozenou nebo nucenou cirkulací ve výparníku, schéma je uvedeno na **obr. 4.59**.

Před regulovaným přehřívákem se část páry odvádí (např. přes trojcestný regulační ventil TRV) do výměníku tepla, který je umístěný ve vodním prostoru parního bubnu (u jednobubnových kotlů) nebo ve spodním bubnu u kotlů dvoububnových. Je-li teplota páry $T_P > T_Ž$ zvětší se množství páry do výměníku kde se ochladí a vrací se zpět do směšovacího kusu SK před přehřívák. Teplota páry před regulovaným přehřívákem se tak sníží, ale přenos na výstupní teplotu páry bude pomalejší než v případech regulace na straně spalin – viz **obr. 4.48e**.

Odebraným teplem přehřáté páře ve výměníku se současně také zvětší výroba syté páry v parním bubnu a tím i průtok páry přes přehříváky. Zvětšením průtoku páry se (při konstantním tepleném příkonu přehříváku) výstupní teplota páry rovněž sníží, ale i když je samotný přenos od změny průtoku rychlejší (než při změně teploty) bude odezva na změnu výroby syté páry pomalejší, neboť se musí započítat i přenos prvního dílu přehříváku ***PR1***.

Přehřívák páry se při tomto způsobu regulace navrhuje pro dosažení požadované teploty páry při nejnižším výkonu v daném regulačním rozsahu.



PB – parní buben TRV – trojcestný regulační ventil
SK – směšovací kus EKO – ohřívák vody PR – díly přehříváku páry

Obr. 4.59 *Chlazení páry kotelní vodou*

Nevýhodou u této regulace je to, že výměník tepla zabírá část již i tak malého prostoru parního bubnu (vestavby bubnu, kontrola vnitřního povrchu) a musí se počítat i s výskytem koroze trubek výměníku, neboť v kotelní vodě je výrazně větší koncentrace solí. Jde o to, že pokud trubky výměníku nebo přívodního potrubí prochází hladinou vody v bubnu, tak při kolísání hladiny, např. při jejím poklesu, se zbylý vodní film na trubce odpaří a na trubkách zůstane vrstvička zahuštěného louhu. Ten napadá oxidy železa na povrchu trubky a proces koroze urychlují i tepelné rázy při opakovaném ponořování a vynořování trubek z vody. Ochrana proti této korozi spočívá v konstrukčním řešení výměníku – teplosměnná plocha musí být trvale pod hladinou a pokud se přívodní potrubí vede přes hladinu vody musí být v tomto místě ochráněno ochranným pláštěm.

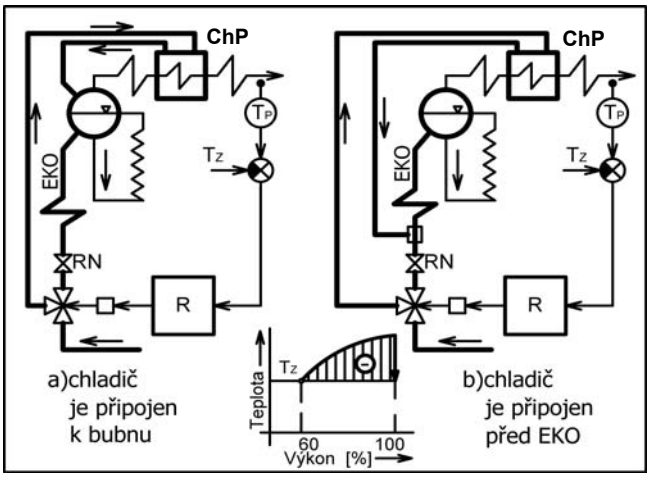
Řešením je také umístění výměníku tepla do spádového potrubí pod buben – provedení je ale dražší a musí se kontrolovat, zda v potrubí nedochází k odpařování. Bezpečnější je umístění výměníku ve spádovém potrubí pod vstupem do varnic, viz spodní část **obr**. **4.59.** Tento způsob regulace lze využít u kotlů malých výkonů v případě, když není k dispozici napájecí voda v kvalitě odpovídající regulaci vstřikem – neboť řešení s regulací vstřikem vlastního kondenzátu (viz **obr. 4.62b**) je v těchto případech obvykle složitější.

b) Chlazení páry napájecí vodou ve výměníku

Tento způsob regulace teploty páry se dnes již nepoužívá, protože:

- odezva teploty páry na změnu akční veličiny (trojcestný ventil na straně napájecí vody) je pomalá,
- při změně akční veličiny (průtok vody do výměníku) se změní i množství nebo teplota napájecí vody na vstupu do ohříváku vody a tím se změní i teplota spalin za ohřívákem vody – což může vést i ke změně teploty spalin za kotlem,
- investiční náklady jsou vyšší,
- při vysoké hladině vody v bubnu může regulátor napájení přechodně zastavit průtok nap. vody.

Podle místa zaústění ohřáté vody z výměníku zpět do kotle jsou možné dva způsoby zapojení této regulace – oba jsou znázorněny na **obr. 4.60.**



ChP – chladič páry RN – regulace napájení

Obr. 4.60 *Chlazení páry ve výměníku napájecí vodou*

- **Výměník (chladič) je připojen k bubnu kotle**
  Schéma je na **obr.4.60a)**. Chladič páry je umístěn před regulovaným přehřívákem, napájecí voda se musí odebírat před regulačním ventilem napájení ***RN*** kotle a ohřátá voda z chladiče se vede přímo do bubnu kotle. Při odběru vody před regulačním ventilem napájení ***RN*** se sice při regulaci teploty páry trojcestným ventilem mění průtok vody přes regulační ventil napájení ***RN***, ale regulace napájení (hladiny), viz kap. 4.3.1, dokáže tuto poruchu eliminovat. Pokud ale by byl odběr vody proveden až za regulačním ventilem ***RN***, pak regulace napájení by ovlivňovala i průtok vody přes chladič páry a tudíž i regulaci teploty páry.

  Regulátor teploty páry pracuje tak, že při teplotě páry T_P vyšší než je teplota žádaná $T_{\check{Z}}$ zvyšuje průtok vody přes chladič a naopak.

  Přehřívák páry se navrhuje pro dosažení žádané teploty páry při nejnižším výkonu daného regulačního rozsahu (60 %) a při provozu s výkonem vyšším se musí pára chladit.

  Část napájecí vody tedy vždy proudí obtokem kolem ohříváku vody ***EKO***, tím se zhoršuje vychlazení spalin v kotli a mění se teplota spalin za kotlem zejména v případě, pokud kotel nemá ohřívák vzduchu. (Účinnost kotle, rosný bod spalin).

  Regulační rozsah teploty páry je omezený, musí být zajištěno minimální chlazení ohříváku vody, který proto bývá konstruován jako odpařovací, tedy dražší.

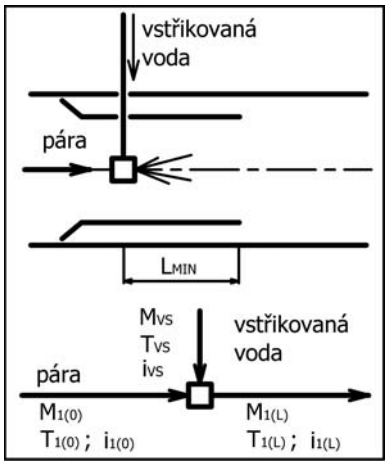
- **Výměník (chladič) je připojen před ohřívák vody *EKO***
  Schéma je na **obr. b)**. Princip regulace i podmínky pro odběr napájecí vody do chladiče jsou stejné jako v předchozím případě. Voda po ohřátí v chladiči se ale přivede zpět před ohřívák vody, takže vždy proudí veškerá voda přes ohřívák vody a jeho chlazení je zajištěné, pokud teplota vody nedosáhne varu. Nicméně, i při tomto zapojení se mění teplota spalin za ohřívákem vody resp. za kotlem, neboť se mění jeho tepelný výkon. (Mění se teplota vody na vstupu a tedy teplotní spád.)

4.2.2.3 Regulace změnou průtoku vstřikované vody

Dnes je to nejrozšířenější způsob regulace teploty páry. Má nejnižší realizační náklady, protože pára se vodou ochlazuje ve směšovacím výměníku, který je součástí spojovacího parního potrubí.

Nutným předpokladem pro takový způsob regulace je „čistá“ vstřikovaná voda, která nesmí obsahovat více solí, než odpovídá předepsanému obsahu solí v páře. Tuto podmínku lze splnit několika způsoby:

- lze vstřikovat čistý nízkotlaký kondenzát z využité páry v procesu (za kondenzátorem, za výměníkovou stanicí, atd.) – jeho doprava do místa vstřiku se zajistí vstřikovacím čerpadlem. Toto je hlavní nevýhoda tohoto způsobu a taková regulace se používá spíše ve výjimečných případech.
- lze vstřikovat „vlastní“ kondenzát, který se získá z páry odebrané z bubnu kotle jejím ochlazením (kondenzací) napájecí vodou v kondenzátoru, který je součástí kotle (viz též schéma na **obr. 4.62b**). Vhodným umístěním (převýšením) kondenzátoru nad místem vstřiku se dosáhne potřebný přetlak pro vstřik kondenzátu, takže není nutné vstřikovací čerpadlo. Výrobou kondenzátu se nemění tepelná ani hmotnostní bilance kotle. Tento způsob se používá u větších kotlů, u nichž není k dispozici napájecí voda v potřebné kvalitě. (Viz též kap. 4.2.2.2, chlazení páry kotelní vodou).
- pro vstřik se použije napájecí voda kotle, pokud je demineralizovaná s vyhovujícím obsahem solí. Není potřebný ani kondenzátor a ani vstřikovací čerpadlo. Napájecí voda pro vstřik se odebírá (obecně řečeno) před vstupem do ohříváku vody (viz též schémata na **obr. 4.62**).



L_{MIN} - minimální délka vstřiku
$M_{1(0)}$ $T_{1(0)}$ $i_{1(0)}$ - množství teplota a entalpie před vstřikem
$M_{1(L)}$ $T_{1(L)}$ $i_{1(L)}$ - množství teplota a entalpie za vstřikem
M_{VS} T_{VS} i_{VS} - množství teplota a entalpie vstřikované vody

***Obr. 4.61** Regulační vstřik – směšovací výměník*

Vstřik napájecí vody je dnes nejčastěji používaný způsob regulace a u velkých kotlů vlastně jediný způsob, který je k dispozici. Někdy se používá v kombinaci s obtokem spalin, viz – kap. 4.2.2.2.

Vlastní akční člen regulace – směšovací výměník – je konstrukčně řešen jako součást parního potrubí. Vstřikovaná voda (kondenzát) musí být přivedena tak, aby nedošlo k ohrožení pevnosti vnějšího pláště vstřiku (potrubí) od teplotních rozdílů v místě připojení a ani od tepelných pnutí způsobených dopadem kapiček vody na stěny vnějšího pláště. Vstřikovaná voda (kondenzát) je proto rozprášena na jemné kapičky a vnější plášť tělesa vstřiku musí být před dopadem kapiček chráněn tzv. košilkou, jejíž délka (L_{MIN}) musí být větší než je potřebná délka směšovacího výměníku pára /voda pro odpaření veškeré vody. Schéma regulačního vstřiku je na **obr. 4.61**.

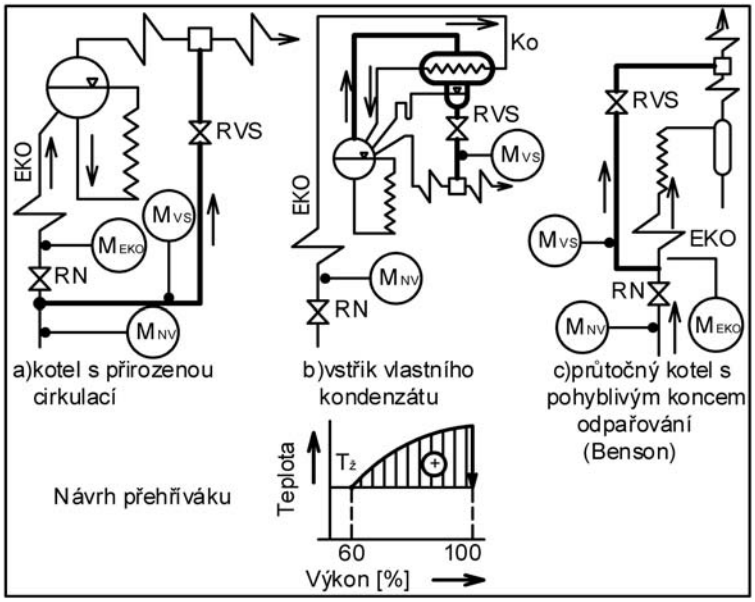
Pro regulační vstřik platí bilanční rovnice ve tvaru:

$$M_{1(0)} \cdot i_{1(0)} + M_{VS} \cdot i_{VS} = M_{1(L)}) \cdot i_{1(L)}$$
$$M_{1(L)} = M_{1(0)} + M_{VS}, \qquad (4\text{-}36)$$

z nichž lze určit buď množství vstřikované vody $\boldsymbol{M_{VS}}$ potřebné pro ochlazení páry na danou teplotu $\boldsymbol{T_{1}}_{(L)}$ nebo teplotu ochlazení páry $\boldsymbol{T_{1}}_{(L)}$ při dané velikosti vstřiku $\boldsymbol{M_{VS}}$.

Příklady zapojení regulačního vstřiku jsou uvedeny na **obr. 4.62**.

U kotlů s přirozenou cirkulací (obecně u kotlů s oběhem vody ve výparníku) je vhodné odebírat napájecí vodu pro vstřikovou regulaci před regulačním ventilem ***RN*** napájení (hladiny), neboť regulace napájení nemůže ovlivňovat regulaci teploty páry. To, že při tomto zapojení se při regulaci teploty přestavením regulačního ventilu vstřiku ***RVS*** ovlivňuje regulace napájení není příliš významné, protože regulace napájení dokáže takové poruchy eliminovat. Obvykle se u kotle měří jak průtok napájecí vody do kotle M_{NV}, tak i množství vstřikované vody M_{VS} a množství napájecí vody do ohříváku vody M_{EKO}. V některých případech se některý průtok, např. M_{EKO}, neměří a určí se odečtením množství vstřiku M_{VS} od průtoku napájecí vody M_{NV}.



RVS – regulační ventil vstřiku RN – regulace napájení K_O – kondenzátor
M_{NV} – průtok napájecí vody M_{VS} – množství vstřikované vody
M_{EKO} – množství vody přes EKO EKO – ohřívák vody

Obr. 4.62 *Schéma provedení vstřiku pro regulaci teploty páry*

Někteří autoři [1] doporučují odběr vstřikované vody až za regulačním ventilem napájení ***RN***, přičemž pro regulaci napájení se používá průtok napájecí vody do ohříváku vody M_{EKO}. Jako výhoda tohoto způsobu se uvádí možnost využít autoregulačního efektu – tlak v místě odběru vstřikované vody je úměrný výkonu kotle (tlak je určen jen hydraulickou ztrátou kotle do místa vstřiku). Uvádí se, že vliv regulace teploty na regulaci napájení se eliminuje využitím průtoku M_{EKO}. Při odběru vstřikovací vody podle **obr. 4.62a** se pro regulaci napájení používá průtok nap. vody M_{NV}.

Na **obr. 4.62b** je uvedeno schéma zapojení při regulaci teploty vstřikem vlastního kondenzátu. Část syté páry z bubnu kotle se vede do kondenzátoru K_O, kde kondenzuje napájecí vodou – v tomto případě je kondenzátor zařazen mezi ohřívák vody ***EKO*** a parní buben a ohřívák vody musí být neodpařovací. V případě, že u kotle by byl použít odpařovací ohřívák vody ***EKO***, pak kondenzátor K_O musí být zařazen za první neodpařovací díl ohříváku vody. (Tedy řazení je: EKO I – K_O – EKO II – parní buben). Vyrobený kondenzát se shromažďuje v zásobníku – přebytečný kondenzát (nevyužitý při vstřikové regulaci) se přepadem vrací zpět do parního bubnu. Kondenzátor K_O musí být proto umístěn nad parním bubnem. Množství vstřikovaného kondenzátu se nastavuje regulačním ventilem vstřiku ***RVS*** a tlakový spád pro vstřik vody se vytvoří jednak hydraulickou ztrátou na straně páry mezi parním bubnem a místem vstřiku a chybějící tlak se získá převýšením kondenzátoru K_O nad místem vstřiku. Někdy se chybějící tlak získá i vytvořením podtlaku v místě vstřiku – vstřikový chladič je v tomto případě proveden jako ejektor.

U průtočných kotlů (**obr. 4.62c**) se místo odběru vstřikované vody může lišit podle typu kotle a použité regulace napájení. U kotle typu Benson s pohyblivým

koncem odpařování (viz **obr. c**) se vstřikovaná voda odebírá za regulačním ventilem napájení ***RV*** – dále viz kap. 4.3.2.

U všech systémů regulace teploty přehřáté páry vstřikem se v případě, že přehřívák má konvekční charakteristiku, navrhuje jeho velikost pro dosažení žádané teploty T_Z při nejnižším výkonu daného regulačního rozsahu (60 %) - při vyšším výkonu se pára musí chladit.

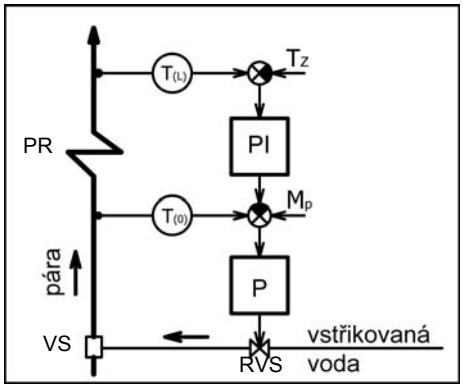
Odběr vstřikované vody před ohřívákem vody ***EKO*** má však jednu nevýhodu, s níž musí konstruktér při návrhu regulace počítat. Jde o to, že u elektrárenských a teplárenských kotlů se provádí předehřev napájecí vody v regenerativních ohřívácích, a to na teplotu např. až 240 °C i vyšší. Při výpadku (poruše) regenerativních ohříváků dojde k poklesu teploty napájecí vody do kotle (může být i více než o 100 K) a tím i ke změně tepelné bilance vstřikového chladiče páry. (Potřebné množství vstřikované vody bude nižší.) Tato skutečnost se musí respektovat především při návrhu regulačních ventilů vstřiku ***RVS***.

Přes své nesporné přednosti má regulace teploty páry vstřikem některé nežádoucí účinky, které se musí při návrhu kotle zohlednit.

- při odběru vstřikované vody se sníží průtok vody do ohříváku vody M_{EKO}. Tím se sníží jeho tepelný výkon a ochlazení spalin se zmenší. Aby se zajistila potřebná teplota spalin za kotlem, musí se odpovídajícím způsobem dimenzovat ohřívák vzduchu. Tento vliv je však výrazně menší než při použití chladičů – **obr. 4.60**.
- při změně vstřiku se mění i průtok páry přes ty díly přehříváku, které jsou řazeny před vstřikem. Aby množství páry za kotlem zůstalo konstantní, pak při zvětšení vstřiku, např. před posledním přehřívákem, se musí o stejnou hodnotu snížit průtok páry přes předcházející díly přehříváku. Při snížení průtoku páry přes první díl přehříváku se teplota páry na jeho výstupu zvýší, takže na první regulovaný přehřívák pak působí porucha s opačným vlivem než má akční veličina (při zvětšení vstřiku se teplota páry za vstřikem snižuje, ale současně z předchozího neregulovaného dílu se do vstřiku přivádí pára o vyšší teplotě, čím se teplota páry za vstřikem zvětšuje). Tato nežádoucí porucha má však výrazně delší časovou konstantu a menší zesílení než vstřik a bez problému ji lze eliminovat volbou vhodné struktury regulace. (Více regulovaných dílů přehříváku za sebou.)

Regulační obvod teploty páry vstřikem napájecí vody bývá nejčastěji proveden podle **obr. 4.63**. Regulovanou veličinou je teplota páry $T_{(L)}$ za přehřívákem. Hlavní regulátor – zpracovává regulační odchylku ($T_{(L)} - T_{(Z)}$) – je obvykle typu ***PI***, někdy se používá i ***PID***, ačkoliv toto provedení regulační pochod zlepšuje jen málo. Protože přenos změny teploty $T_{(0)}$ (za vstřikem) je dynamicky nevýhodný (přechodová charakteristika je vyššího řádu s velkou dobou přechodu, viz **obr. 4.48a**; **e**), je vhodné tuto teplotu měřit a využít ji jako pomocnou regulovanou veličinu.

Hlavní regulátor ***PI*** vlastně zadává žádanou hodnotu teploty $T_{(0)}$ a dostáváme tak kaskádovou strukturu regulačního obvodu. Vzniklou regulační odchylku pak zpracovává podřízený regulátor, obvykle typu ***P***.



RVS – regulační ventil VS – vstřikový chladič
$T_{(L)}$ – regulovaná teplota (za přehřívákem)
$T_{(0)}$ – teplota za vstřikem PR – přehřívák
M_p – množství páry T_Z – žádaná teplota páry

Obr. 4.63 *Regulační obvod teploty páry vstřikem*

Takový regulační obvod (velká smyčka zadává žádanou hodnotu malé smyčce) má poměrně dobrou stabilitu a při vhodně navrženém přehříváku (regulovaná soustava) i dobrou kvalitu regulace.

Někdy se i podřízený regulátor provádí jako ***PI***, takže vzniká kaskáda s regulátory ***PI***/***PI*** – tato však z hlediska regulace dává výsledky jen o málo lepší než kaskáda ***PI/P*** a stabilita obvodu může být i horší (v důsledku zapojení dvou integračních členů za sebou). [1]

Často se jako poruchová veličina používá signál od parního výkonu kotle M_P. Tento se přivádí do druhého sumačního členu obvykle přes ***PD*** člen a přechodné zvýšení vstřiku se využívá k rychlému okamžitému zvýšení výkonu kotle. Tato poruchová veličina se s výhodou používá v těch případech, kdy při regulaci výkonu kotle (např. při zvýšení) se přereguluje množství paliva, čímž se vytvoří porucha, která velmi silně ovlivňuje teplotu páry. Uvedené zapojení vliv této poruchy výrazně omezuje.

Při návrhu regulace teploty páry je třeba si uvědomit, že vysoké požadavky kladené na kvalitu regulace nesouvisí jen s provedením vlastního regulátoru a jeho zapojení, ale odpovídajícím způsobem musí být navrženy i ostatní členy regulačního obvodu. Odpovídající dynamické vlastnosti musí mít přehřívák páry (jako regulovaná soustava) a určuje je konstruktér kotle. Necitlivost měřícího členu (snímač teploty) musí být co nejmenší a musí být zajištěna kontrola reprodukovatelnosti a reprezentativnosti měřené teploty (verifikace) a musí být vyloučen drift nuly (posun nuly). Doba závěru regulačního orgánu (regulační ventil vstřiku ***RV***) by měla být stanovena pro nejnepříznivější případ – tj. pro ruční dálkové ovládání. Osvědčilo se zvolit rychlost přestavení regulačního ventilu na 3 % maximálního otevření za sekundu. [4]

Kaskádové zapojení regulačních obvodů (obr.4.64) se používá u větších kotlů pro dosažení kvalitnější regulace teploty páry. Přehřívák páry je rozdělen na několik dílů uspořádaných za sebou, každý (kromě prvního) je vybaven regulací teploty páry.

Pokud u kotlů velkých výkonů je přehřívák páry rozdělen do více paralelních větví (2 nebo 4 větve), pak přehříváky v každé větvi mají vlastní regulaci teploty páry.

Většinou je přehřívák kotlů rozdělen na 2 až 4 díly, tzn. že na kotli je za sebou uspořádáno několik (1 až 3) regulačních obvodů teploty páry. Jestliže je činnost jednotlivých obvodů pracujících za sebou navzájem svázána, mluvíme o kaskádovém zapojení regulačních obvodů.

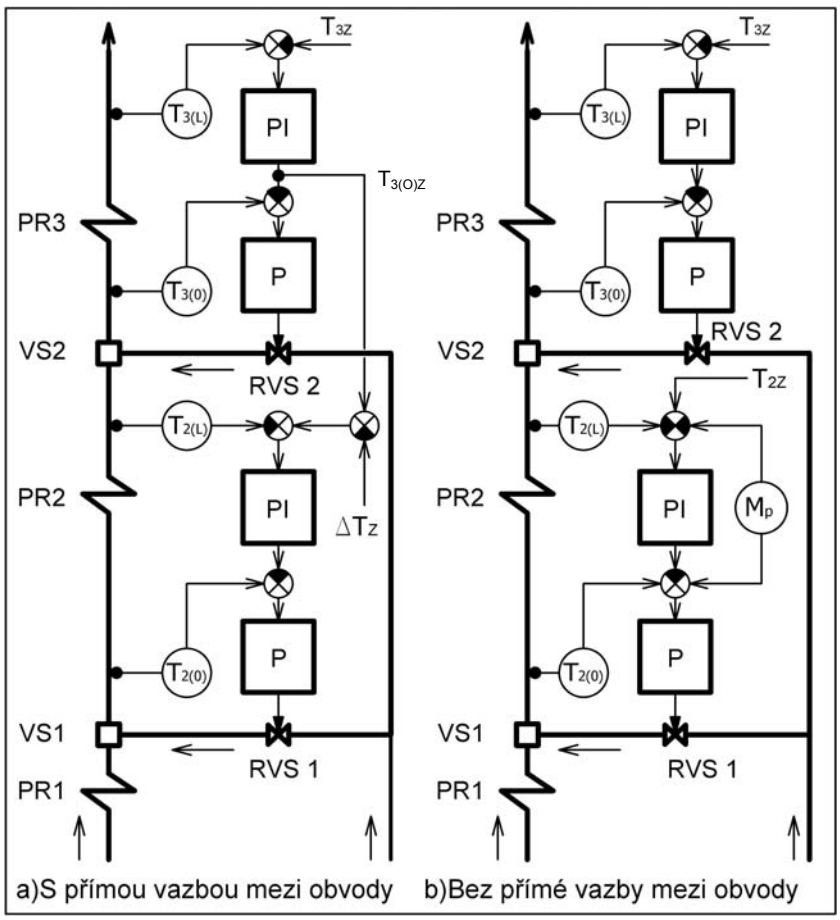
U takového zapojení se však musí hledat způsob jak zajistit správnou funkci každého jednotlivého regulačního obvodu v celém regulačním rozsahu výkonu kotle. (Každý díl má jinou statickou charakteristiku – konvekční, sálavou.)

Jsou dvě možnosti jak postupovat:

- poslední (následující) obvod ve směru proudění páry určuje žádanou hodnotu teploty páry předchozímu regulačnímu obvodu
- žádané hodnoty teploty páry všech regulačních obvodů v kaskádě (kromě posledního vstřiku) se mění s ohledem na statické charakteristiky jednotlivých dílů přehříváků řídícím signálem od výkonu kotle.

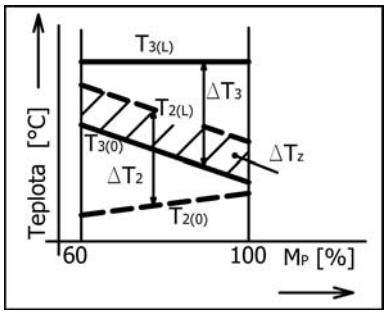
Schéma zapojení obou způsobů je naznačeno na **obr. 4.64**.

Při přímé vazbě mezi regulačními obvody (**obr. 4.64a**) se poslední regulační obvod vstřiku ***VS2*** udržuje v regulačním rozsahu tak, že předchozí regulační obvod vstřiku ***VS1*** udržuje konstantní teplotový spád ($T_{2(L)}$ – $T_{3(0)}$) na regulačním vstřiku **VS2**. (Může se ale udržovat i jiná charakteristická veličina, např. průtok vstřikované vody do ***VS2*** nebo poloha regulačního ventilu ***RVS2***, ale obvykle se udržuje teplotový spád). Udržování konstantního teplotového spádu ΔT_Z na vstřiku ***VS2*** odpovídá (při regulaci kotle na konstantní tlak) stálému poměru průtoku vstřikované a napájecí vody. Protože při silných poruchách tepelného příkonu do kotle by při regulaci mohlo dojít i k uzavření regulačního ventilu ***RVS2*** a spád na vstřiku ***VS2*** by byl nulový, počítá se žádaná hodnota teploty $T_{2(L)}$ nikoliv z měřené teploty $T_{3(0)}$ a požadovaného teplotového spádu ΔT_Z, ale přímo ze žádané hodnoty (teploty $T_{3(0)Z}$), kterou zadává hlavní regulátor ***PI*** (teploty $T_{3(L)}$) podřízenému regulátoru ***P***. Využití žádané hodnoty teploty $T_{3(0)Z}$ by mělo zabránit tomu, aby na vstupu do hlavního regulátoru vstřiku ***VS1***, byla velmi malá nebo nulová regulační odchylka.



Obr. 4.64 *Kaskádové zapojení regulačních obvodů [1]*

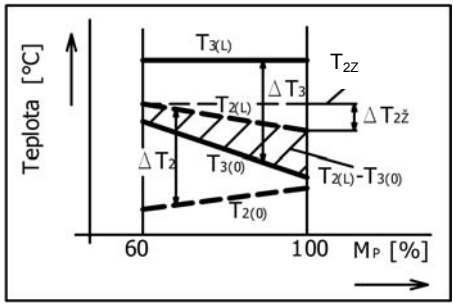
Budeme-li předpokládat, že výstupní přehřívák ***PR3*** a přehřívák ***PR1*** má konvekční charakteristiku a přehřívák ***PR2*** sálavou, pak s poklesem výkonu se u nich mění přírůstek teplot tak, jak je naznačeno na **obr. 4.65**. Ochlazení ΔT_Z na vstřiku ***VS2*** je konstantní, ΔT_2 a ΔT_3 jsou přírůstky teploty na přehříváku ***PR2*** a ***PR3***.



Obr. 4.65 *Průběh teploty při kaskádové* regulaci s přímou vazbou

Toto provedení (**obr. 4.64**a) má výhodné statické vlastnosti, neboť bez ohledu na statické charakteristiky přehříváku ***PR2*** a ***PR3*** lze vždy udržovat oba regulátory (VS1 a VS2) v regulačním rozsahu. Dynamicky je ale toto zapojení nevýhodné, protože při kaskádovém zapojení regulačních obvodů se musí nadřízený regulační obvod (VS2 – tedy výstupní teploty páry $T_{3(L)}$) nastavit jako pomalejší – a nelze jej tedy optimalizovat.

Při kaskádové regulaci **bez přímé vazby** mezi obvody (**obr. 4.64b**) není mezi jednotlivými regulačními obvody žádná přímá vazba, ale do obou součtových uzlů předcházejících regulačních obvodů se přivádí signál od parního výkonu kotle M_P.



Obr. 4.66 Průběh teplot při kaskádové regulaci bez přímé vazby [11]

Předpokládáme-li opět, že výstupní díl přehříváku **PR3** a přehřívák ***PR1*** má charakteristiku konvenční a přehřívák **PR2** sálavou, pak s poklesem výkonu se přírůstek teploty ΔT_3 a ΔT_2 u nich mění tak, jak je naznačeno na **obr. 4.66**. Aby se regulační obvod výstupního přehříváku ***PR3*** udržel v regulačním rozsahu ($T_{2(L)} - T_{3(0)} > 0$) v celém rozsahu regulace výkonu – s klesajícím výkonem se tento rozdíl zmenšuje, musí se žádaná hodnota T_{2Z} (teploty $T_{2(L)}$) nastavit při minimálním výkonu tak, aby se dosáhl minimální spád na vstřiku ***VS2*** ($T_{2(L)} – T_{3(0)}$); tento je určen dimenzováním ploch kotle a při zvyšování výkonu kotle se žádaná hodnota T_{2Z} musí snižovat až o hodnotu ΔT_{2Z} při výkonu 100 % (teplota $T_{2(L)}$ se snižuje).

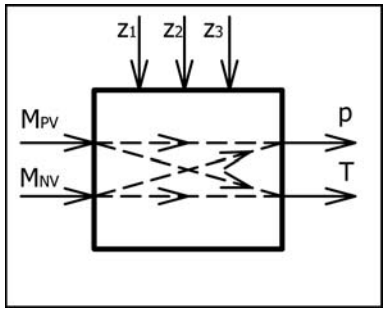
Naopak, při snižování výkonu kotle se musí žádaná hodnota T_{2Z} zvyšovat tak, aby byl zaručen potřebný teplotový spád ve vstřiku ***VSII*** i při minimálním výkonu. Pokud by se při snižování výkonu hodnota T_{2Z} nezvyšovala (a byla konstantní na odpovídající hodnotě při výkonu 100 %) pak při výkonu 60 % by byla teplota $T_{2(L)}$ konstantní a nižší než teplota $T_{3(0)}$ – vstřik ***VSII*** by byl uzavřen a regulační obvod mimo provoz.

Změna žádané teploty T_{2Z} se provede např. přivedením záporného signálu parního výkonu M_P do součtového členu hlavního regulátoru ***PI*** a přivedením kladného signálu parního výkonu M_P do součtového členu podřízeného regulátoru ***P***.

U této varianty zapojení (**obr. 4.64b**) přímá vazba mezi obvody není a proto lze každý jednotlivý obvod v kaskádě nastavit optimálně. Toto je hlavní výhoda tohoto způsobu zapojení.

Rozhodnutí o provedení kaskádové regulace s přímou vazbou nebo bez přímé vazby tedy zřejmě souvisí s potřebou individuální optimalizace jednotlivých regulačních obvodů. Pro svoji jednoduchost a dobré statické vlastnosti se proto často používá regulace s přímou vazbou.

Výše popisované zapojení regulace teploty páry vstřikem napájecí vody se používá běžně u **parních kotlů s oběhem vody ve výparníku** dle **obr. 4.62a** – tedy u kotlů s přirozenou nebo nucenou cirkulací. (Z tohoto hlediska do této skupiny patří i kotle se superponovanou cirkulací.)



M_{PV} – množství paliva
M_{NV} – průtok napájecí vody
p, T – tlak a teplota páry za kotlem
Z – poruchové veličiny

Obr. 4.67 Signálové schéma průtočného kotle

Regulaci teploty páry u průtočných kotlů nelze posuzovat odděleně od regulace výkonu a napájení. Je to dáno tím, že jakákoliv změna poměru tepleného příkonu a průtoku napájecí vody způsobuje změnu konce odpařování a tím i poruchy teploty přehřáté páry.

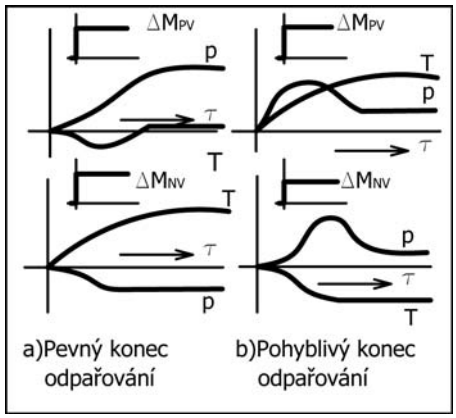
Zjednodušené signálové schéma průtočného kotle je uvedeno na **obr. 4.67**. Při návrhu regulace

průtočného kotle se musí zvolit jedna z následujících dvou alternativ.

a) tlak páry ***p*** regulovat množstvím přivedeného paliva M_{PV} a teplotu páry ***T*** množstvím napájecí vody M_{NV}
b) tlak páry ***p*** regulovat průtokem napájecí vody M_{NV} a teplotu páry ***T*** množstvím paliva M_{PV}.

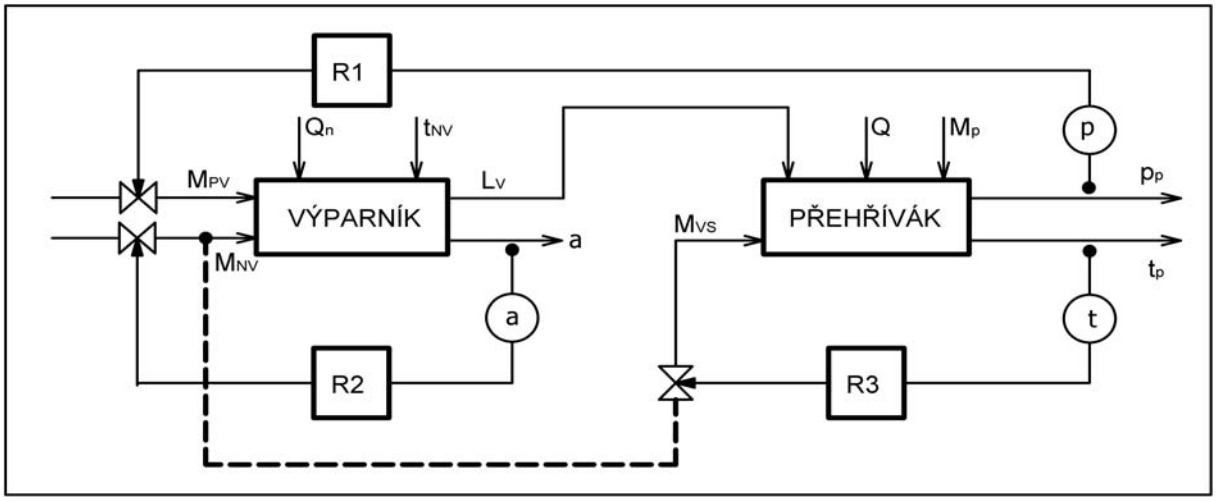
Optimální návrh regulace se provede na základě posouzení požadovaných vlastností kotle a statických a dynamických charakteristik kotle jako regulované soustavy.

Na **obr. 4.68** jsou pro názornost uvedeny přechodové charakteristiky teploty ***T*** a tlaku ***p*** páry za kotlem při konstantním otevření regulačního ventilu turbíny a to při skokové změně přívodu paliva ΔM_{PV} a průtoku napájecí vody ΔM_{NV}.



Obr. 4.68 *Přechodové charakteristiky teploty a tlaku páry za průtočným kotlem [1]*

U kotle s pevným koncem odpařování a) je jednoznačně výhodnější působení paliva na tlak páry, protože přenos průtoku napájecí vody na tlak páry má menší statické zesílení a navíc působí opačným směrem. **U kotle s posuvným koncem odpařování** b) není situace tak jednoznačná a návrh regulace se musí posuzovat případ od případu. Dosavadní vývoj však i u těchto kotlů upřednostňuje regulaci tlaku změnou paliva. Z uvedeného vyplývá, že teplota páry u průtočných kotlů by se měla regulovat změnou průtoku napájecí vody. Dynamické vlastnosti by při této regulaci však byly nevyhovující – kolísaní teploty páry by bylo nepřípustně velké. Tento problém se vyřešil (viz **obr. 4.69**) rozdělením regulované soustavy (kotle) na dvě menší části s výhodnějšími dynamickými vlastnostmi a zavedením pomocné akční veličiny.



Q_n – výhřevnost paliva L_v – délka výparníku M_{VS} – množství vstřikované vody M_p – množství přivedené páry do přehříváku
Q – tepelný příkon t_{NV} – teplota napájecí vody M_{PV} – množství přivedeného paliva M_{NV} – množství napájecí vody
p_p, t_p – tlak ateplota páry za kotlem a – pomocná regulovaná veličina výparníku

Obr. 4.69 *Regulace průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování [1]*

Kotel má dvě části, výparník a přehřívák. Akčními veličinami výparníku je množství přivedeného paliva M_{PV} pro regulaci tlaku páry ***p*** za přehřívákem a množství napájecí vody M_{NV} pro regulaci výstupní pomocné veličiny ***a*** za výparníkem (viz kap. 4.3.2).

Výstupní veličinou výparníku je také změna délky výparníku L_V, která do přehříváku vstupuje jako jedna z poruchových veličin.

Hlavními poruchovými veličinami, které vstupují do výparníku, jsou výhřevnost paliva ***Qn*** a teplota napájecí vody t_{NV}.

Akční veličinou u přehříváku pro regulaci teploty páry za přehřívákem t_p je množství vstřikované vody M_{VS}, které se odebírá z napájecí vody před vstupem do kotle.

Poruchovými veličinami u přehříváku jsou: již uvedená změna délky výparníku L_V, dále pak tepelný příkon ***Q*** a množství přivedené páry M_P.

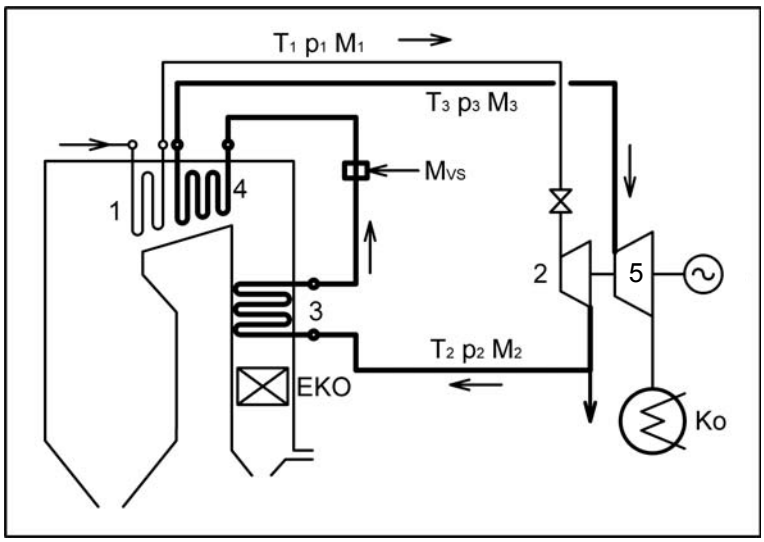
U průtočného kotle tak vznikl pro regulaci teploty páry za kotlem zcela samostatný regulační obvod R_3, který lze realizovat stejně jako regulační obvod teploty páry vstřikem u bubnových kotlů (**obr. 4.63**) a pro regulační obvody jednotlivých přehříváků lze použít kaskádové zapojení regulátorů dle **obr. 4.64**. (Viz. též obr. 4.99 až 4.104.)

Tento způsob se používá i u průtočných kotlů s pevným koncem odpařování.

4.2.3 Základní způsoby regulace teploty přihřívané páry

Elektrárenské bloky s výkony nad 100 MW bývají již vybaveny přihříváním páry, kterým se zvyšuje účinnost parního oběhu. Přihřívák obvykle bývá rozdělen na dva díly a konstrukčně je proveden jako konvekční plocha. Zjednodušené schéma zapojení přihříváku páry v kotli je uvedeno na **obr. 4.70**.

Pára z výstupního dílu ***1*** vysokotlakého přehříváku páry po expanzi ve vysokotlakém dílu ***2*** turbíny se vrací zpět do kotle a ve vstupním dílu ***3*** a výstupním dílu ***4*** přihříváku se spalinami ohřívá na stejnou nebo i vyšší teplotu než měla vysokotlaká pára a vrací se zpět do nízkotlakého dílu ***5*** turbíny.



1 – VT přehřívák 3, 4 – vstupní a výstupní díl přihříváku (NT pára)
2, 5 – VT a NT díl turbíny K_O – kondenzátor M_{VS} – množství vstřiku
T_1, p_1, M_1 – VT pára T_2, p_2 M_2 – vstup NT páry T_3, p_3, M_3 – výstup NT páry

Obr. 4.70 *Technologické schéma přihřívané (NT) páry*

Protože ekonomické důsledky nedodržení stanovené teploty přihřáté páry nejsou tak závažné jako u vysokotlaké páry, je toleranční pásmo u teploty přihřáté páry širší a na kvalitu regulace jsou kladeny mírnější požadavky.

Teplota T_1 vysokotlaké páry po expanzi ve ***VT*** dílu ***2*** turbíny klesá (např. u bloku 200 MW klesne při výkonu kotle 100 %, tj. 650 t/h, z původní teploty T_1=540 °C na

teplotu T_2 cca 341 °C) a k dalšímu snížení teploty dochází při snížení výkonu bloku (až na 322 °C při poklesu výkonu kotle na 75 %, tj. 455 t/h).

Do vstupního dílu 3 přihříváku vstupuje tedy přihřívaná pára s poměrně nízkým přehřátím, přičemž tato teplota není konstantní a s klesajícím výkonem bloku se dále snižuje.

Množství M_2 vratné přihřívané páry do kotle je rovněž nižší než množství M_1 vysokotlaké páry – a to o odběry páry např. pro vysokotlaké ohříváky napájecí vody, pohon turbonapáječky, externí dodávku tepla apod. (U 200 MW bloku může množství páry M_2 klesnout při výkonu kotle 100 %, tj. 650 t/h na 524 t/h a při snížení výkonu kotle na 70 %, tj. na 455 t/h, se množství páry M_2 dále sníží na 362 t/h.)

Tlak přihřívané páry p_2 je samozřejmě po expanzi ve ***VT*** dílu ***2*** turbíny výrazně nižší a k dalšímu jeho poklesu dochází při snižování výkonu bloku. (Např. u 200 MW bloku tlak po expanzi se při 100 % výkonu, tj. 650 t/h, sníží ze 17,3 MPa na cca 3,83 MPa a při snížení výkonu kotle na 70 %, tj. 455 t/h, klesne dále na cca 2,52 MPa.)

Parametry přihřívané páry na vstupu do kotle T_2; p_2; a M_2 tedy rovněž nejsou konstantní a mění se s výkonem bloku, přičemž u průtoku páry M_2 může nastat změna i při stabilním výkonu bloku – např. výpadek vysokotlakého ohřevu napájecí vody, odstavení či najetí turbonapáječky, změna externí dodávky tepla apod. Z parametrů přihřívané páry na výstupu z kotle T_3; p_3 a M_3 se reguluje jen teplota páry T_3 a to na hodnotě stejné nebo i vyšší než je teplota vysokotlaké páry.

Tlak páry p_3 se nereguluje, ale v kontraktu na dodávku kotle je obvykle předepsaná (a garantuje se) max. hodnota tlakové ztráty přihříváku na kotli ($p_2 – p_3$) a to ve výši např. 0,2 MPa u 200 MW bloků.

Množství přihřívané páry M_3 na výstupu z kotle je stejné jako na vstupu M_2 v případě, když se pro regulaci teploty nepoužívá vstřik napájecí vody. V případě, že se regulace vstřikem použije, je množství M_3 přihřáté páry na výstupu z kotle vyšší o průtok M_{VS} vstřikované vody ($M_3 = M_2 + M_{VS}$).

Oba díly přihříváku páry jsou v kotli umístěny v nižší teplotě spalin (ve srovnání s odpovídajícími díly přehříváku) a přihřívák páry jako celek má proto výrazně konvekční charakteristiku (viz **obr. 4.52**). Tímto se dále zvýrazňuje vliv výkonu kotle na teplotu páry a její regulaci vyvolaný závislostí vstupních parametrů na výkonu.

Na přihřívák páry v kotli působí stejné poruchové veličiny jako u přehříváku páry, stejně se stanoví i zesílení a dynamické vlastnosti (kap. 4.2.1).

Regulační vlastnosti přihříváku jsou však horší než u přehříváku, neboť přihřívák je rozdělen jen na 2 díly s velkým výkonem a vzhledem k nízkému tlaku páry a předepsané tlakové ztrátě má přihřívák výrazně větší průtočný průřez (více trubek většího průměru) a tím i větší hmotnost. Protože je umístěn v nižších teplotách spalin, je i jeho teplosměnná plocha větší.

Pro regulaci teploty přihřívané páry lze obecně použít stejné akční veličiny jako pro regulaci páry přehřáté, ale vzhledem k dodržení požadavku invariantnosti teploty přehřáté páry a ostatních regulovaných veličin se nepoužívá pro tuto regulaci např. naklápění hořáků a ani recirkulace spalin.

Rovněž u přehřáté páry často používaná regulace teploty vstřikem napájecí vody není pro regulaci teploty přihřívané páry vhodná (i když kvalita regulace by byla dobrá) a využívá se jen v kombinaci s některým jiným způsobem regulace.

Jde o to, že vstřikem napájecí vody do oběhu přihřívané páry se zhorší termická účinnost oběhu. Tak např. podle [1][2] se na každé 1 % vstřiknuté vody (z parního výkonu kotle) sníží termická účinnost oběhu přibližně o 0,1 až 0,16 %. Podle [34] znamená každé 1 % vstřiknuté vody do přihříváku zhoršení specifické spotřeby tepla o cca 0,25 %. (Podobnou hodnotu uvádí i [35]).

Podle [34] je zhoršení specifické spotřeby tepla způsobeno tím, že k původnímu vysokotlakému oběhu se (při použití vstřiku do přihřívané páry) superponuje další nízkotlaký oběh (vstřiku vody), který pracuje s vyšší spotřebou tepla, protože má podstatně nižší vstupní tlak a pracuje s nižším počtem regenerativních ohříváků vody (bez vysokotlakých ohříváků). Dále tím, že o hodnotu odpovídající vstřiku se musí snížit množství přehřáté páry do ***VT*** dílu turbíny (aby zůstal výkon turbíny konstantní), čímž se sníží výkon ***VT*** dílu turbíny. Snížením průtoku páry přes ***VT*** díl a zvýšením průtoku přes ***NT*** díl turbíny se zhoršuje termodynamická účinnost obou dílů turbíny. Z celkového výkonu turbíny bude tedy jeho část realizovaná s vyšší specifickou spotřebou tepla. Současně se ale musí zvážit příznivý vliv na snížení vlastní spotřeby napáječky (pokud se odběr pro vstřik do přihřáté páry provede z meziodběru napáječky) vyvolané snížením průtoku vysokotlaké páry. Snížení vlastní spotřeby v tomto případě má na posuzovanou specifickou spotřebu tepla velmi malý vliv a může se zanedbat.

Z uvedeného vyplývá, že by bylo výhodné pro regulaci teploty přihřívané páry používat regulaci obtokem spalin (kolem přihříváku) a regulaci pomocí výměníku tepla mezi vysokotlakou (přehřátou) a nízkotlakou (přihřívanou) párou. Protože tyto způsoby regulace ale nezaručují potřebnou kvalitu regulace teploty při změnách výkonu (nevhodné dynamické vlastnosti), kombinují se s výhodou tyto způsoby s regulací vstřikem napájecí vody, přičemž velikost vstřiku se udržuje regulací na zvolené minimální hodnotě (nebo se při stacionárním provozu udržuje vstřik na nulové hodnotě) a používá se jen při mimořádných provozních stavech, kdy hrozí nebezpečí překročení stanovených tolerancí teploty přihřívané páry.

Podobně jako u přehříváku páry se i přihřívák páry (má konvekční charakteristiku) vyloží (dimenzuje) buď pro dosažení požadované výstupní teploty při 100 % výkonu kotle – pak se musí při nižších výkonech přihřívaná pára dohřívat (obtok spalin, regulační výměník), nebo se vyloží pro dosažení výstupní teploty při výkonu na spodní hranici regulačního rozsahu (např. 70 %) a při vyšších výkonech se pak musí pára chladit (obtok spalin, obtok přihřívané páry, vstřik napájecí vody).

Regulace teploty přihřívané páry musí tedy zajistit dodržení její požadované hodnoty při regulační odchylce vyvolané jak změnou výkonu kotle (poklesem teploty a množství páry na vstupu do přihříváku, jakož i poklesem teploty od konvekční charakteristiky přihříváku), tak i změnou paliva. (Změní se množství i teplota spalin.)

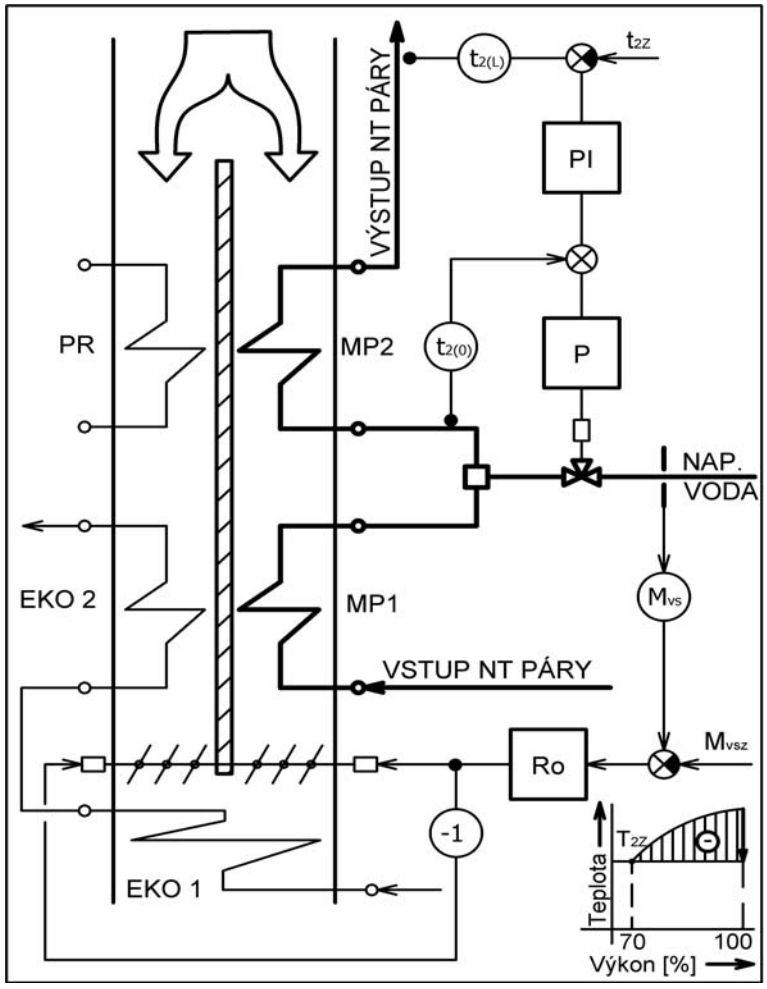
4.2.3.1 Regulace teploty přihřívané páry obtokem spalin

Schéma regulace je v principu stejné jako u regulace přehřáté páry, viz **obr. 4.57**, ale v pravé části regulovaného tahu je přihřívák páry. Vzhledem k velké hmotě přihříváku neodpovídají dynamické vlastnosti takto umístěného přihříváku požadované kvalitě regulace a proto se regulace obtokem spalin s výhodou kombinuje s regulací vstřikem napájecí vody. V tomto případě se do regulačního tahu umístí vstupní i výstupní díl přihříváku páry a nebo se výstupní díl umístí do společného tahu v oblasti vyšších teplot spalin. Regulační vstřik je před vstupem do výstupního dílu a reguluje teplotu přihřívané páry na výstupu z přihříváku. Regulace obtokem spalin řídí průtok spalin přes přihřívák tak, aby množství vstřikované vody bylo minimální (konstantní) nebo nulové – podobně jako je např. u schéma zapojení na **obr. 4.71**.

Přihřívák páry je rozdělen na dva díly ***MP1*** a ***MP2***, které jsou v tomto případě oba umístěny v regulačním tahu. Výstupní díl je vhodné provést menší, zlepší se tím jeho dynamické vlastnosti v mimořádných stavech kotle.

Výstupní teplota přihřáté páry $T_{2(L)}$ se reguluje vstřikem napájecí vody, struktura této regulace je stejná jako u přehřáté páry (**obr. 4.63**). Kvalita regulace výstupní teploty přihřívané páry $T_{2(L)}$ je tedy zajištěna jen regulací vstřikem.

Regulátor ***Ro*** obtoku spalin (může být proveden např. jako na **obr. 4.57**) řídí množství spalin přes přihřívák tak, aby množství vstřikované vody M_{VS} se udržovalo na minimální konstantní hodnotě M_{VSZ} nutné pro zajištění kvality regulace – jako minimální hodnota může být nastaven i nulový průtok vstřikované vody. (Pro nastavení nulového vstřiku může být použit i způsob regulace jako na **obr. 4.77**).



PR – VT díl přehříváku EKO 1, 2 – vstupní a výstupní díl přehříváku vody
MP1, 2 – vstupní a výstupní díl přihříváku páry Ro – regulátor obtoku spalin

Obr. 4.71 *Regulace obtokem a vstřikem [2]*

To pak znamená, že při ustáleném provozu kotle je požadovaná hodnota teploty přihřáté páry na výstupu $T_{2(L)}$ určená obtokem spalin a vstřik je uzavřen. Při jakékoliv poruše je regulační odchylka teploty ihned regulována vstřikovou regulací a podle průtoku M_{VS} vstřikované vody nastavuje regulátor ***Ro*** obtoku regulační klapky ve spalinách.

U přihřívané páry se výstupní teplota udržuje konstantní v rozsahu výkonu kotle běžně od 70 do 100 % - tedy v menším rozsahu výkonu než u vysokotlaké páry. Při výkonech nižších než 70 % se připouští nižší teplota – pokud se požaduje aby i tato byla řízená v určitých tolerancích, pak se musí žádaná hodnota této teploty T_{2Z} měnit s výkonem kotle.

Přihřívák páry má výrazně konvekční charakteristiku a v případě regulace dle **obr. 4.71** se s výhodou dimenzuje tak, aby při spodní hodnotě regulačního rozsahu výkonu kotle (např. 70%) byla dosažena požadovaná teplota na výstupu z kotle $T_{2(L)}$ a to při plně otevřených regulačních klapkách v regulovaném tahu s přihřívákem. (Regulační klapky v první části tahu jsou přivřené.)

Při vyšších výkonech kotle (nad 70 %) se musí výkon přihříváku snižovat, takže průtok spalin přes přihřívák se snižuje. (Klapky v regulačním tahu se přivírají a klapky v levé části tahu se otevírají.)

Regulace teploty přihřívané páry obtokem spalin v kombinaci se vstřikem napájecí vody je výhodná u těch kotlů, kde se spaluje uhlí s vysokým obsahem vody nebo u těch kotlů, které jsou projektovány na spalování různých druhů uhlí. S výhodou se i v tomto případě může použít zapojení podle ***obr. 4.77*** – v ustáleném stavu je vstřik nulový, toto zapojení se jeví jako vhodnější.

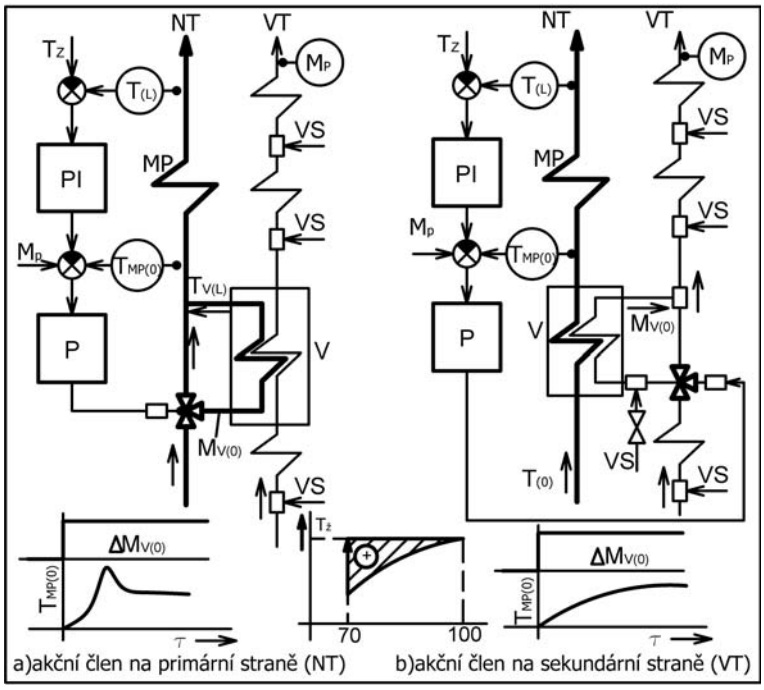
4.2.3.2 Regulace teploty přihřívané páry výměníkem tepla mezi vysokotlakou a nízkotlakou párou

Základní schéma regulace a alternativy zapojení regulačního výměníku jsou uvedeny na **obr. 4.72**.

Akčním členem regulace je trojcestný regulační ventil (šoupátko) a jsou k dispozici dva způsoby jeho zapojení.

Provedení, kdy **akční člen je zařazen v traktu nízkotlaké *NT* páry** je znázorněno na **obr. 4.72a**. Regulační výměník tepla ***V*** mezi ***VT*** a ***NT*** párou je zařazen před přihřívák páry ***MP***, trojcestným ventilem se mění průtok ***NT*** páry přes výměník.

Přihřívák páry ***MP*** musí být dimenzovaný tak, aby při jmenovitém výkonu kotle se dosáhla požadovaná teplota přihřívané páry – teoreticky by při tomto výkonu měl být průtok ***NT*** páry přes výměník ***V*** nulový (viz postř. obrázek dole). S klesajícím výkonem kotle musí chybějící teplo (konvekční charakteristika MP) dodat regulační výměník ***V***, takže průtok ***NT*** páry přes výměník ***V*** se musí zvyšovat. Regulační výměník ***V*** musí být vyložen (dimenzován) tak, aby požadovaná teplota T_Z přihřáté páry za kotlem byla dosažena i při minimálním výkonu předepsaného regulačního rozsahu, např. 70%.



NT – nízkotlaká pára VT – vysokotlaká pára VS – vstřik vody
MP – přihřívák (mezipřihřívák) páry V – výměník tepla mezi VT a NT parou
$M_{V(0)}$ – množství páry ve výměníku

Obr. 4.72 *Základní zapojení pro regulaci teploty výměníkem tepla [1]*

Struktura regulátoru je stejná jako v případě regulace přehřáté páry vstřikem (viz **obr. 4.63**), velká smyčka zadává žádanou hodnotu teploty $T_{MP(0)}$ malé smyčce, která ovládá trojcestný regulační ventil.

Zařazení akčního členu do traktu přihřívané páry ***NT*** je z dynamického hlediska výhodné – odezva teploty $T_{MP(0)}$ (za výměníkem po smísení) má průběh naznačený ve spodní části obrázku.

Při zvětšení průtoku přihřívané páry přes výměník ***V*** se nejdříve vybíjí akumulované teplo v hmotě výměníku. O toto teplo se pak přechodně zvyšuje teplota přihřívané páry po smísení $T_{MP(0)}$ – ta se pak ustálí na nižší hodnotě, ale celkově vzato, zvýšení průtoku přihřívané páry přes výměník má za následek zvýšení teploty přihřívané páry po smísení $T_{MP(0)}$.

Každá změna polohy akčního členu (poloha trojcestného ventilu) však vyvolá i změnu teploty ***VT*** páry za výměníkem – to pro regulátor teploty přehřáté páry znamená vznik poruchy. Při rozdělení přehříváku páry na vhodný počet dílů a při použití kaskádové regulace teploty přehřáté páry (**obr. 4.64**) nepředstavuje taková porucha mimořádný problém.

Nevýhodou zařazení akčního členu do traktu přihřívané páry je zvýšení tlakové ztráty na straně přihřívané páry (garantovaná hodnota) – trojcestná regulační armatura musí mít potřebnou minimální tlakovou ztrátu, často se proto používá trojcestné regulační šoupátko.

Při takovém zapojení regulačního výměníku je výhodné, když přehřívák ***VT*** páry před regulačním výměníkem ***V*** má sálavou charakteristiku. Při konvekční charakteristice hrozí nebezpečí, že při snížení výkonu by teplota ***VT*** páry před výměníkem mohla být nižší než teplota přihřívané páry a výměník by působil jako chladič. Použití regulačního výměníku klade velké nároky na přesnost tepelného výpočtu a správné dimenzování teplosměnných ploch přehříváku i přihříváku.

Zapojení **s akčním členem v traktu vysokotlaké *VT* páry** je znázorněno na **obr. 4.72b**.

Regulační výměník ***V*** mezi vysokotlakou ***VT*** a nízkotlakou párou ***NT*** je zařazen před přihřívákem páry ***MP***, ale trojcestným ventilem se mění průtok vysokotlaké ***VT*** páry. Pro dimenzování přihříváku ***MP*** platí totéž co v případě zapojení podle obr. ***a***, stejná je i struktura regulátoru.

Dynamické vlastnosti regulačního výměníku jsou však horší než v případě zapojení podle obr. ***a***. Odezva teploty $T_{MP(0)}$ přihřívané páry na změnu průtoku $M_{V(0)}$ vysokotlaké páry výměníkem je pomalejší a chybí zde efekt využití akumulovaného tepla (teplota NT páry se ve výměníku zvyšuje – výměník se naopak musí „nabít“).

Vliv na regulaci teploty ***VT*** páry je stejný jako u zapojení podle obr. ***a***, ale při zařazení akčního členu do traktu ***VT*** páry se nezvyšuje tlaková ztráta ***NT*** páry (přihřívané).

Stejné jsou i požadavky na přesnost tepelného výpočtu a správné dimenzování teplosměnných ploch.

Toto zapojení ale umožňuje pro regulaci využít další akční veličinu, a to změnu teploty ***VT*** páry před regulačním výměníkem ***V***. Tepelný výkon regulačního výměníku ***V*** lze v takovém případě měnit změnou průtoku $M_{V(0)}$ vysokotlaké páry a snižovat snížením teplotního spádu. Snížení teploty ***VT*** páry před výměníkem se provede vstřikem napájecí vody – struktura regulace může být např. podobná jako na **obr. 4.77**.

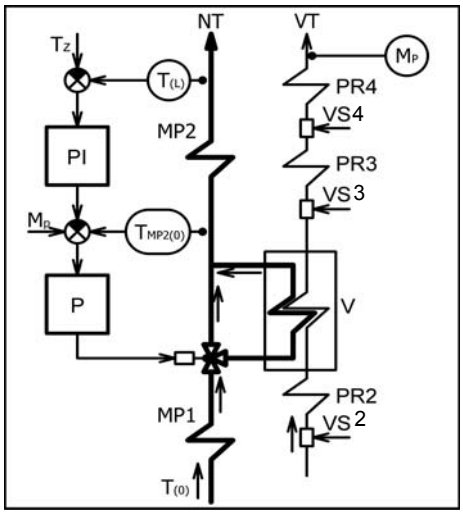
Nové struktuře regulace se pak musí přizpůsobit i vyložení (dimenzování) přihříváku ***MP*** a regulačního výměníku ***V***.

Je třeba říci, že dynamické vlastnosti obou systémů zapojení na **obr. 4.72** nejsou dobré a při popsané struktuře regulace se pravděpodobně nedodrží požadovaná kvalita regulace teploty $T_{(L)}$ přihřívané páry za kotlem.

Je to dáno tím, že regulační výměník ***V*** je před spalinovým přihřívákem ***MP***, který má velký tepelný výkon a velkou hmotnost. Přenos změny teploty $T_{MP(0)}$ před přihřívákem ***MP*** na výstupní teplotu $T_{(L)}$ je charakterizován přechodovou charakteristikou vyššího řádu (**obr. 4.48a**) s dlouhou dobou průtahu i náběhu.

Proto se zapojení dle **obr. 4.72** dnes nepoužívá. Aby se zlepšily dynamické vlastnosti soustavy při použití regulačních výměníků, musí se rozdělit přihřívák páry ***MP*** na dva díly, tak jak je znázorněno na **obr. 4.73**.

Regulační výměník (v tomto případě s obtokem přihřívané páry) je zařazen mezi vstupní díl ***MP1*** a výstupní díl ***MP2*** přihříváku páry. Výstupní díl ***MP2*** by měl mít menší výkon a musí být umístěn ve vyšší teplotě spalin. Při menším výkonu a větším teplotním spádu bude mít lepší dynamické vlastnosti a i když bude mít konvekční charakteristiku, tak tato bude plošší. Struktura regulace je stejná jako u předchozích provedení podle **obr. 4.72**.



Obr. 4.73 *Regulace teploty výměníkem tepla – dělený přihřívák [1]*

Pro toto zapojení (na regulačním výměníku je vysoká teplota přehřáté i přihřívané páry) je obzvlášť důležité dodržet výpočtový průběh teplot podél teplosměnných ploch – předpokladem je přesný tepelný výpočet a správné vyložení teplosměnných ploch.

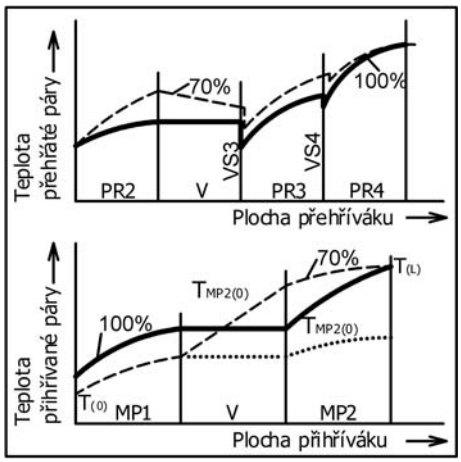
Pro představu je na **obr. 4.74** naznačen průběh teplot podél teplosměnných ploch při jmenovitém výkonu a při nejnižším výkonu regulačního rozsahu. Označení ploch a teplot je podle **obr. 4.73**.

V horní části obrázku je naznačen možný průběh teploty přehřáté páry. V tomto případě se předpokládá, že přehřívák ***PR2*** má charakteristiku sálavou (při menším výkonu je přírůstek teploty vyšší) a ostatní přehříváky konvekční (při menším výkonu je přírůstek teploty nižší).

Při výkonu 100 % se pára ohřeje na přehříváku ***PR2***, výměník ***V*** je vyřazen, takže ochlazení ***VT*** páry je nulové. Na regulačním vstřiku ***VS3*** a ***VS4*** se teplota vždy sníží, za posledním přehřívákem ***PR4*** se udržuje žádaná hodnota teploty přehřáté páry za kotlem. Při snížení výkonu např. na 70 % (což je minimální výkon pro dodržení konstantní teploty přihřívané páry) se na sálavém přehříváku ***PR2*** ohřeje pára na vyšší teplotu, ve výměníku ***V*** se její teplota sníží (ohřeje se přihřívaná pára). Ohřátí páry na přehříváku ***PR3*** a ***PR4*** bude nižší (jsou konvekční), sníží se i ochlazení na regulačním vstřiku ***VS3*** a ***VS4*** (přehřátá pára se reguluje až do výkonu 60 %).

Ve spodní části obrázku je znázorněn možný průběh teploty přihřívané páry. Oba přihříváky ***MP1*** a ***MP2*** mají konvekční charakteristiku. Při výkonu 100 % je na obou dílech ***MP1*** a ***MP2*** max. ohřátí, tak aby při vyřazeném výměníku ***V*** se dosáhla požadovaná teplota přihřívané páry $T_{(L)}$.

Při poklesu výkonu kotle na 70 % se ohřátí páry na obou dílech ***MP1*** a ***MP2*** zmenší, navíc dojde ještě ke snížení teploty přihřívané páry $T_{(0)}$ na vstupu do ***MP1***, takže chybějící teplo se musí dodat v regulačním výměníku tepla ***V***.



Obr. 4.74 *Průběh teplot při regulaci výměníkem [1]*

Tečkovanou čárou je naznačen průběh teploty přihřívané páry bez regulačního výměníku tepla ***V***.

Zapojením regulačního výměníku ***V*** mezi díly přihříváku páry ***MP1*** a ***MP2*** se při správném vyložení (dimenzování) jednotlivých teplosměnných ploch dosáhnou vyhovující dynamické vlastnosti regulačního obvodu přihřívané páry jen při ustáleném provozu v regulačním rozsahu výkonu kotle – tzn., že se eliminuje statická (konvekční) charakteristika, ale při mimořádných stavech (a při kolísání tepelného příkonu) bude kvalita regulace nevyhovující. Požadovaných vlastností i při těchto provozních stavech se dosáhne kombinací regulace regulačním výměníkem a vstřikem napájecí vody, zapojení regulátoru může být podobné jako u regulace na **obr. 4 .77** nebo **4.79**.

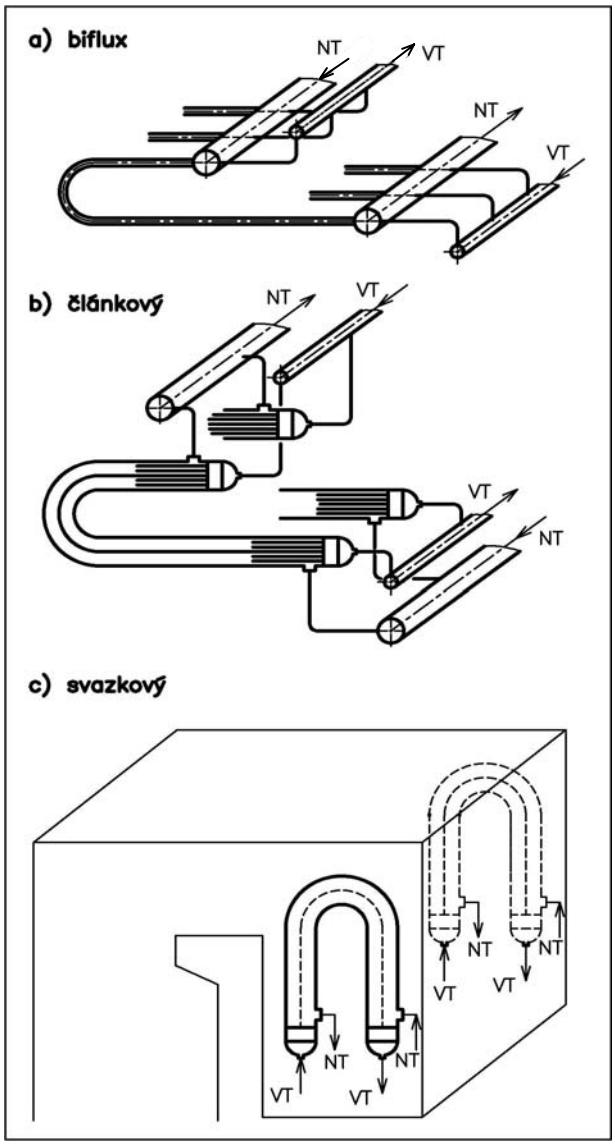
Regulační výměník tepla se navrhuje jako klasická teplosměnná plocha pro sdílení tepla mezi přehřátou (vysokotlakou) párou a přihřívanou (nízkotlakou) párou, přičemž topné medium je přehřátá pára a ohřívané medium je pára přihřívaná. Pro regulaci teploty přihřívané páry se postupně vyvinuly tři základní typy takových výměníků, jejich schémata jsou uvedena na **obr. 4.75**.

Výměník typu *biflux* [40] je naznačen na **obr. 4.75a)**. Je proveden jako trubka v trubce, v mezikruží proudí přihřívaná ***NT*** pára a ve vnitřní trubce pak přehřátá ***VT*** pára. Řádově stovky paralelních trubek jsou připojeny ke vstupním a výstupním komorám, výměník je řazen jako čistý protiproud. Jeho výhodou je, že jednotlivé hady lze při poruše zaslepit, resp. opravit. Nevýhodou jsou jeho velké rozměry, velká hmotnost a velká plocha izolace – tedy velká ztráta sáláním do okolí.

Vzhledem k vysoké hmotnosti budou horší i jeho dynamické vlastnosti.

Výměník článkový [36] (**obr. 4.75b**) sestává z více paralelně zapojených výměníků ve tvaru U o průměru např. 373 mm. V každém výměníku je svazek trubek zavařených na obou koncích do trubkovnic, které jsou uzavřeny půlkulovými dny. Uvnitř trubek proudí přehřátá ***VT*** pára a v mezikruží (v plášti) přihřívaná ***NT*** pára. Výměník je proveden jako čistý protiproud. Jeho hmotnost je nižší než u provedení biflux, menší je i zastavěný prostor.

Složitější je systém přívodu přehřáté i přihřáté páry a nevýhodou je náročná a složitá oprava při poruše



NT – nízkotlaká pára VT – vysokotlaká pára

Obr. 4.75 *Regulační výměníky tepla*

vnitřní trubky. Musí se zajistit 100% kontrola trubek i svarů při výrobě.

Svazkový výměník [37] (**obr. 4.75c**) je proveden jako celosvařovaný ve tvaru U se svazkem paralelních trubek ve vnějším plášti (např. ∅ 900 mm). V trubkách proudí přehřátá ***VT*** pára a v mezikruhovém prostoru (v plášti) přihřívaná **NT** pára, zapojení je jako čistý protiproud.

Toto provedení má nejmenší hmotnost a zastavěný prostor je minimální. Počet výměníků odpovídá rozdělení přihříváků páry v kotli do paralelních větví – obvykle se používá rozdělení do dvou větví, proto jsou na **obr. c)** dva výměníky podél bočních stěn zadního tahu. Jednoduché je i připojení parního potrubí ***VT*** i ***NT*** páry.

Nevýhodou je jeho náročná a složitá oprava při poruše vnitřního hadu – musí se proto při výrobě zajistit 100 % kontrola jak trubek, tak i svarů.

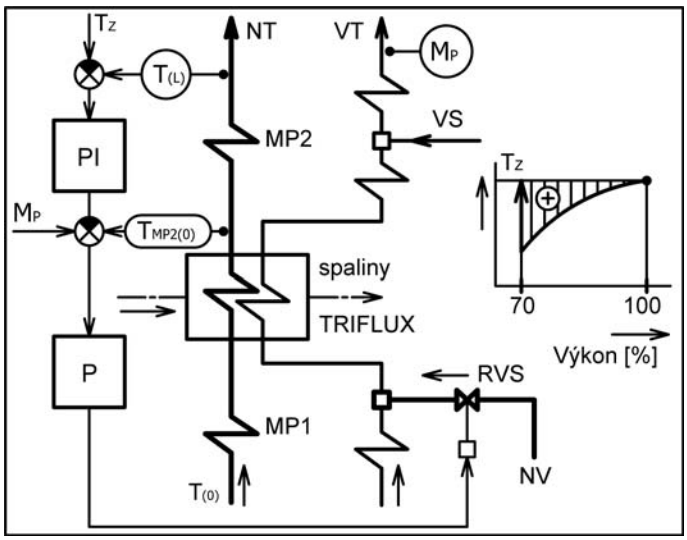
4.2.3.3 Regulace teploty přihřívané páry výměníkem tepla *triflux.*

Umístí-li se výměník tepla biflux (**obr. 4.75a**) do spalin, ohřívá se přihřívaná pára (proudí mezikružím) jak přehřátou párou (vnitřní trubka) tak i spalinami (přes vnější trubku).

I v tomto případě se používá několik způsobů zapojení regulačního obvodu, z nichž některé jsou v základním provedení uvedeny v této kapitole.

a) Regulace změnou teplotního spádu na výměníku *triflux*

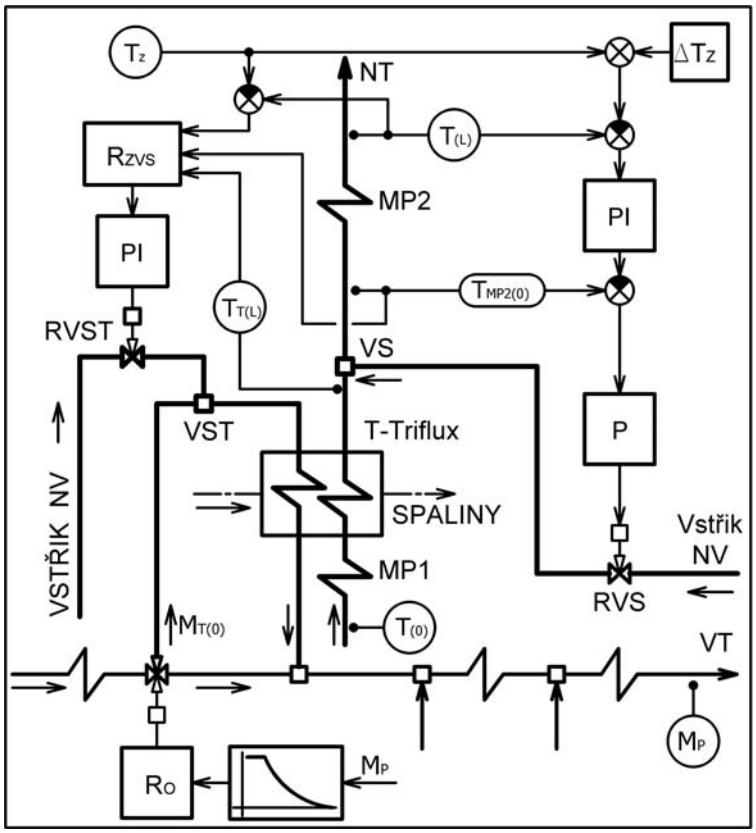
Schéma je uvedeno na **obr. 4.76**, akční člen regulace (regulační vstřik RVS) je na přehřáté ***VT*** páře. Regulační obvod je opět kaskádový, hlavní regulátor ***PI*** zadává žádanou hodnotu pro regulaci teploty $T_{MP2(0)}$ na vstupu do výstupního dílu přihříváku ***MP2***. Do součtového členu se přivádí i pomocná veličina od výkonu kotle M_P. Podřízený regulátor ***P*** pak ovládá regulační ventil vstřiku ***RVS*** napájecí vody ***NV*** do přehřáté páry před výměníkem triflux. Změnou teploty přehřáté páry se mění teplotní spád a tím i tepelný výkon výměníku. Pokud se ochladí přehřátá pára před výměníkem na teplotu, kterou má za výměníkem přihřívaná pára, pak výměník působí jako chladič – přihřívanou párou se ohřívá přehřátá ***VT*** pára.



Obr. 4.76 *Regulace změnou teplotního spádu na výměníku triflux*

Oba díly ***MP1*** a ***MP2*** přihříváku, jakož i výměník triflux, jsou vyloženy (dimenzovány) tak, aby při jmenovitém výkonu kotle byla dosažena požadovaná teplota přihřívané páry při minimálním nebo nulovém příkonu z ***VT*** páry – tzn., že vstřikem ***VS*** se teplota ***VT*** páry před trifluxem sníží na úroveň ***NT*** páry. (Přehřívák VT páry před vstřikem VS má sálavou charakteristiku). Při nižších výkonech se chybějící teplo dodá do přihřívané páry ve výměníku triflux (ze spalin a z přehřáté páry).

V tomto případě lze očekávat, že dynamické vlastnosti výstupního dílu přihříváku ***MP2*** budou lepší než při použití regulačního výměníku typu ***VT***/***NT*** pára dle **obr. 4.73**.
Při správném vyložení jednotlivých teplosměnných ploch se pravděpodobně dosáhne požadovaná kvalita regulace teploty přihřívané páry v ustáleném stavu při provozu v regulačním rozsahu výkonu bloku – tzn. při eliminaci statické (konvekční) charakteristiky. Při mimořádných provozních stavech může být kvalita regulace nevyhovující. Proto se i tento způsob regulace kombinuje s regulací vstřikem napájecí vody před výstupní díl ***MP2*** přihříváku. Zapojení regulátoru může být podobné jako u regulace na **obr. 4.77** nebo **4.78**.



$M_{T(0)}$ – průtok páry přes triflux VST – vstřik před triflux R_O – regulátor obtoku
RVST – regulační ventil vstřiku triflux R_{ZVS} – nadřízený regulátor
RVS – regulační ventil vstřiku

Obr. 4.77 *Kombinovaná regulace výměníkem tepla triflux a vstřikem [18]*

b) Regulace změnou teplotního spádu a součinitele prostupu tepla na výměníku *triflux*

Zapojení je naznačeno na **obr. 4.77**, kde je uvedena kombinovaná regulace vstřikem napájecí vody před výstupní přihřívák ***MP2*** a regulace výměníkem tepla triflux.
Akční členy regulace u výměníku triflux jsou na přehřáté ***VT*** páře – jsou to regulační ventil vstřiku ***RVST*** a trojcestný regulační ventil.

Množství přehřáté páry $M_{T(0)}$, které proudí přes triflux, se nastavuje v závislosti na parním výkonu ***Mp*** kotle.

Žádaná hodnota průtoku $M_{T(0)}$ se generuje v závislosti na parním výkonu kotle M_P, např. tak jak je naznačeno, tzn., že např. při jmenovitém výkonu kotle se generuje min. žádaná hodnota průtoku $M_{T(0)}$ a při snižování výkonu se žádaná hodnota průtoku $M_{T(0)}$ zvyšuje.

Regulátor R_O pak podle žádané hodnoty průtoku $M_{T(0)}$ nastaví odpovídající polohu trojcestného ventilu dle jeho průtočné charakteristiky. (Nebo se může přímo měřit průtok $M_{T(0)}$.)

Tento regulační obvod R_O se dimenzuje tak, aby eliminoval konvekční charakteristiku přihříváku páry včetně poklesu teploty páry $T_{(0)}$ na vstupu do přihříváku (viz např. **obr. 4.74**).
Výstupní teplota $T_{(L)}$ přihřívané páry se na požadované hodnotě T_Z udržuje vstřikem ***VST*** napájecí vody do přehřáté páry před výměníkem triflux. Změnou této teploty se mění teplotní spád na výměníku a tím jeho tepelný výkon a teplota přihřívané páry

$T_{T(L)}$ za výměníkem triflux. Množství vstřikované vody se nastavuje regulačním ventilem ***RVST***, který je ovládán regulátorem ***PI*** podle žádané hodnoty, kterou zadává nadřízený regulátor R_{ZVS} podle regulační odchylky ($T_{(L)} - T_Z$) a podle teplot přihřívané páry před výstupním dílem ***MP2*** $T_{MP2(0)}$ a za výměníkem triflux $T_{T(L)}$.

Tento regulační obvod spolu s regulátorem R_O zajistí potřebnou kvalitu regulace výstupní teploty $T_{(L)}$ přihřívané páry v požadovaném rozsahu výkonu kotle a to i při předpokládaných změnách kvality paliva. Nicméně aby při některých mimořádných provozních stavech (vyvolaných např. rychlou změnou výkonu kotle při využití bloku v systému primární a sekundární regulace výkonu) nebo při velké změně tepelného příkonu, nedošlo k překročení dovolené odchylky teploty přihřívané páry, je regulace výměníkem triflux kombinována s regulací teploty vstřikem ***VS*** napájecí vody před výstupní díl ***MP2*** přihříváku páry.

Jedná se o klasickou kaskádovou regulaci (viz též **obr. 4.63**) s tím rozdílem, že místo žádané teploty T_Z tento regulátor udržuje žádanou hodnotu teploty o něco vyšší, a to $T_Z + \Delta T_Z$. Tzn., že při žádané hodnotě teploty přihřívané páry, např. T_Z = 540 °C udržuje tuto teplotu regulátor R_{ZVS} s tolerancí např. (+5 K) a (-10 K). Regulačním ventilem ***RVS*** vstřiku napájecí vody se udržuje teplota páry vyšší o ΔT_Z, např. 3K, tedy 543 °C. Pokud je tedy teplota přihřívané páry $T_{(L)}$ nižší než 543 °C, tak je regulační ventil ***RVS*** vstřiku napájecí vody uzavřen - nedochází ke zhoršení účinnosti bloku a teplota páry se reguluje regulačním výměníkem triflux (regulátor R_{ZVS}). Teprve při větších regulačních odchylkách zasahuje regulace vstřikem ***RVS*** – zhoršení účinnosti je přechodné, jen po dobu kdy teplota $T_{(L)}$ převyšuje 543 °C.

Pokud kotel pracuje ve stabilním režimu (bez velkých a rychlých změn výkonu) a se stabilním palivem, lze použít i zjednodušené provedení regulace - jen s regulačním výměníkem triflux, bez regulace vstřikem napájecí vody ***RVS***.

Při rozhodování se ovšem musí vzít v úvahu i řízení průběhu teploty přihřívané páry $T_{(L)}$ při najíždění a odstavování kotle – pro tento účel je však regulace vstřikem napájecí vody ***RVS*** velmi vhodná a realizace není drahá.

4.2.3.4 Regulace teploty přihřívané páry vstřikem napájecí vody

Nesporné přednosti regulace teploty páry vstřikem napájecí vody (jednoduchost a dobré dynamické vlastnosti) byly pobídkou pro její využití i pro regulaci teploty přihřívané páry. Přihřívák páry v tomto případě musí být rozdělen alespoň na dva díly, vstřik napájecí vody se provede před výstupní díl a struktura regulace je stejná jako na **obr. 4.63**. V tomto provedení se ale regulace nepoužívá, protože vstřik napájecí vody nepřijatelně snižuje tepelnou účinnost oběhu, viz kap. 4.2.3. Proto se regulace vstřikem využívá jen v kombinaci s dalším způsobem regulace, např. obtokem spalin nebo regulačním výměníkem – viz kap. 4.2.3.1, 4.2.3.2 či 4.2.3.3.

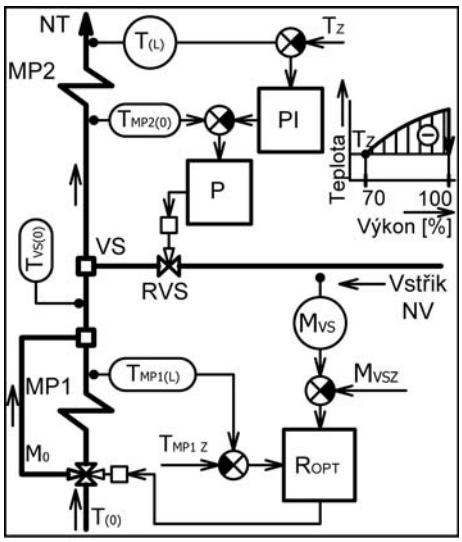
U některých elektráren s bloky 200 MW (EDĚ, ECHVA) byl pro regulaci teploty přihřívané páry použit jen vstřik napájecí vody, ale při současné optimalizaci množství vstřikované vody. Schéma takové regulace je uvedeno na **obr. 4.78**.

Přihřívák páry je rozdělen na dva díly, ***MP1*** a ***MP2***, vstřik napájecí vody je před výstupním dílem ***MP2***.

Plocha přihříváku ***MP1*** a ***MP2*** je vyložena pro dosažení požadované teploty páry $T_{(L)}$ při nejnižším výkonu požadovaného regulačního rozsahu (např. 70 %), při větším výkonu se pára musí chladit.

Napájecí voda pro vstřik ***VS*** se odebírá z mezistupně napáječky (např. 6,0 MPa).

Teplota $T_{(L)}$ se reguluje pouze vstřikem ***VS*** napájecí vody, struktura regulace je stejná jako u přehřáté páry (**obr. 4.63**). Cílem tohoto regulátoru je udržovat výstupní teplotu $T_{(L)}$ na požadované hodnotě (a v daných tolerancích) při každém provozním režimu kotle, bez ohledu na množství vstřikované vody M_{VS}, které je k tomu zapotřebí. Při mimořádných provozních stavech má tedy prioritu kvalita regulace teploty páry před hospodárným provozem. Současně s regulací teploty však působí druhý regulační obvod s optimalizačním regulátorem R_{OPT}, který udržuje průtok vstřikované vody na konstantní žádané hodnotě M_{VSZ}, a to změnou průtoku ***NT*** páry přes vstupní díl ***MP1*** přihříváku (využívá se lepších dynamických vlastností přihříváku páry při obtoku na straně přihřívané páry). Akčním členem regulace je trojcestná regulační armatura před vstupním dílem přihříváku ***MP1***, pára M_O z obtoku se zaústí do parovodu ještě před regulačním vstřikem ***VS*** – tímto tedy protéká vždy plné množství přihřívané páry.



R_{OPT} – optimalizační regulátor
M_O – množství NT páry v obtoku MP1

Obr. 4.78 *Regulace teploty přihřívané páry vstřikem [38]*

Jestliže je množství vstřikované vody M_{VS} větší než požadované, zvětší se průtok páry M_O obtokem a vstupním dílem ***MP1*** protéká méně páry a jeho tepelný výkon se sníží.

Teplota páry $T_{VS(0)}$ po smísení se sníží a pro zachování stejné teploty $T_{MP2(0)}$ za vstřikem ***VS*** se pak musí úměrně snížit i množství vstřikované vody.

Při zvětšení průtoku páry ***Mo*** obtokem se ale zvýší teplota páry $T_{MP1(L)}$ za vstupním dílem přihříváku (před smísením) a mohlo by při regulaci dojít k překročení teploty stěny hadů přihříváku ***MP1***. Proto se podle max. přípustné teploty stěny hadů (podle použité legované oceli – vstupní část hadů ***MP1*** se provede např. z oceli tř. 12 a výstupní část hadů z oceli tř. 15) nastaví přípustná teplota páry T_{MP1Z} a regulační odchylka se zavede do optimalizačního regulátoru R_{OPT}. Tento pak udržuje průtok vstřikované vody M_{VS} na žádané hodnotě, ale jen při těch provozních stavech, dokud teplota stěny hadu ***MP1*** se nezvýší na maximální přípustnou hodnotu. Protože měřit teplotu stěny jako veličinu pro regulaci by bylo obtížné, používá se jako kriterium teplota páry $T_{MP1(L)}$ na výstupu z ***MP1***.

Takže optimalizace vstřiku skončí, jakmile teplota $T_{MP1(L)}$ dosáhne nastavenou přípustnou hodnotu T_{MP1Z}. Od tohoto okamžiku optimalizační regulátor R_{OPT} nereguluje průtok vstřikované vody M_{VS}, ale teplotu $T_{MP1(L)}$ – prioritu má ochrana vstupního dílu přihříváku (havárie) před hospodárností.

Žádané množství průtoku vstřikované vody M_{VSZ} se volí jen takové, aby byla zajištěna teplota páry $T_{(L)}$ v požadovaných tolerancích – množství vstřiku M_{VS} je velmi malé a zhoršení účinnosti bloku je přijatelné. Optimalizační regulátor místo množství vstřikované vody M_{VS} může udržovat i jinou veličinu charakterizující

množství vstřikované vody, např. minimální ochlazení páry na regulačním vstřiku ($T_{VS(0)}$ - $T_{MP2(0)}$) nebo minimální otevření (polohu) regulačního ventilu vstřiku ***RVS***.

U kotlů se stabilnějším provozním režimem (bez rychlých a častých změn výkonu) se může nastavit nulový požadovaný průtok M_{VSZ} vstřikované vody. (Vhodnější je nastavit polohu regulačního ventilu RVS – zavřeno.) Optimalizační regulátor se v tomto případě musí upravit tak, aby při zavřeném vstřiku zabránil případnému poklesu výstupní teploty $T_{(L)}$ – tzn. musí při záporné regulační odchylce teploty $T_{(L)}$ změnou obtoku páry udržovat výstupní teplotu $T_{(L)}$ na žádané hodnotě. (Do optimalizačního regulátoru se např. přivede regulační odchylka [$T_{(L)}$ – T_Z], podobně jako u regulace na **obr. 4.77)**.

Na zvýšení výstupní teploty $T_{(L)}$ nad žádanou hodnotu (kladná regulační odchylka) kdykoliv nezávisle reaguje regulátor vstřiku napájecí vody, zachována zůstává i „ochranná“ funkce optimalizačního regulátoru R_{OPT} při dosažení přípustné teploty T_{MP1Z} za vstupním dílem ***MP1*** přihříváku.

Regulace vstřikem dle **obr. 4.78** není ale vhodná pro kotle, u nichž se při provozu mění množství přihřívané páry na vstupu do kotle (např. při odběru části přihřívané páry pro zajištění dodávky tepla) nebo statická (konvekční) charakteristika přihříváku (např. při spalování různých druhů paliv s výrazně odlišnými parametry.)

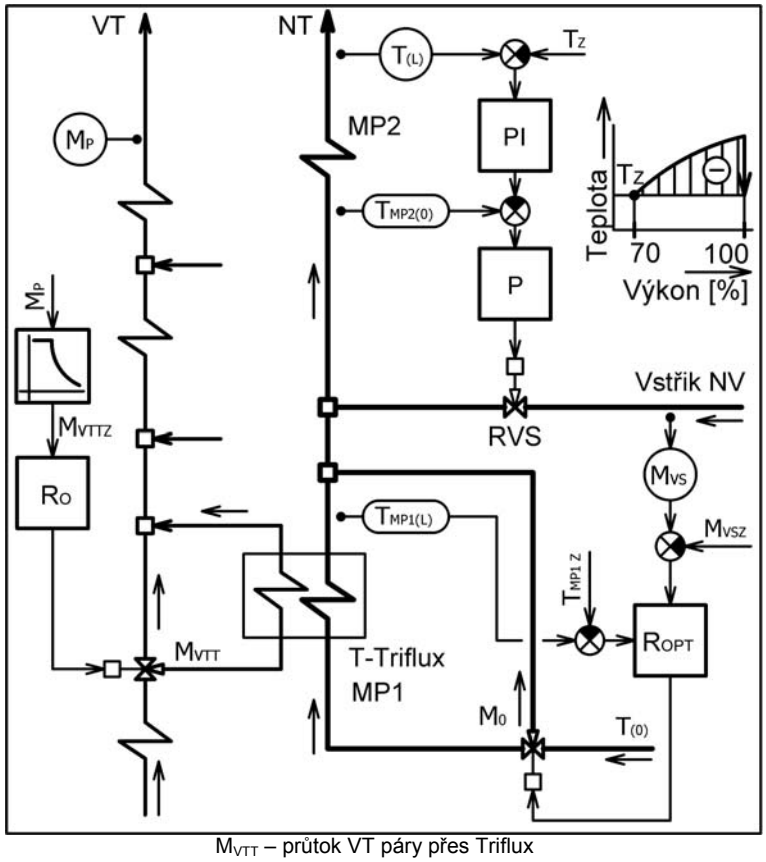
Příliš velké změny charakteristiky přihříváku či průtoku přihřívané páry by vedly k provozu s velkým množstvím vstřikované vody nebo k omezenému rozsahu regulace výkonu s konstantní teplotou přihřívané páry, protože již při relativně malém obtoku páry by se dosáhla max. přípustná teplota $T_{MP1(L)}$ páry za ***MP1***.

Pokud se takový provoz očekává (změna průtoku páry, změna paliva) je vhodnější schéma regulace teploty přihřívané páry vstřikem s optimalizací vstřiku obtokem vstupního dílu triflux - podle zapojení na **obr. 4.79**.

Vstupní díl přihříváku ***MP1*** je proveden jako výměník triflux, obtok páry je proveden na přehřáté i na přihřívané páře.

Přihřívák páry MP2 – MP1 – triflux je navržen tak, aby se dosáhla žádaná teplota T_Z přihřívané páry (při ohřevu spalinami i VT párou) při nejnižším výkonu požadovaného regulačního rozsahu (např. 70 %) – při větším výkonu se pára musí chladit.

Výstupní teplota $T_{(L)}$ přihřívané páry se reguluje opět zcela nezávisle vstřikem napájecí vody. Množství vstřikované vody M_{VS} na minimální žádané hodnotě



M_{VTT} – průtok VT páry přes Triflux

Obr. 4.79 *regulace teploty vstřikem-vstupní přihřívák MP1 jako triflux*

udržuje optimalizační regulátor R_{OPT} změnou množství ***NT*** páry M_O v obtoku kolem vstupního přihříváku ***MP1*** (triflux) – regulace je tedy stejná jako u provedení na **obr. 4.78**. Množství přehřáté páry M_{VTT} proudící přes výměník triflux ***MP1*** nastavuje regulátor R_O v závislosti na parním výkonu M_P kotle (nebo množství přihřívané páry) tak, že při jmenovitém výkonu je průtok ***VT*** páry M_{VTT} nejmenší a s klesajícím výkonem kotle se zvyšuje – regulátor R_O tedy eliminuje vliv konvekční charakteristiky přihříváku a snížení vstupní teploty $T_{(0)}$ při poklesu výkonu bloku.

Toto provedení zaručuje, že optimalizační regulátor R_{OPT} bude udržovat min. průtok vstřikované vody M_{VS} v celém regulačním rozsahu výkonu a to i při kolísání množství přihřívané páry na vstupu do kotle nebo při spalováni různých druhů paliv. Při správném vyložení přihříváku se při optimalizaci vstřiku zvýší teplota $T_{MP1(L)}$ na max. přípustnou hodnotu jen ojediněle a po přechodnou dobu – optimalizační regulátor R_{OPT} bude ochrannou funkci plnit jen výjimečně. (Případně se do regulátoru R_O přivede i regulační odchylka teploty $T_{MP1(L)}$ – při její kladné hodnotě se množství páry M_{VTT} v obtoku sníží.) Stejně jako u regulace dle **obr. 4.78** může optimalizační regulátor R_{OPT} udržovat nulové množství vstřiku M_{VS} nebo přímo regulační odchylku $[T_{(L)} – T_Z]$ – podobně jako u regulace na **obr. 4.77**.

4.2.4 Závěrečná doporučení k regulaci teploty páry

V kapitolách 4.2.2 a 4.2.3 je popsána řada způsobů regulace teploty přehřáté i přihřívané páry. Některé způsoby se již dnes nepoužívají nebo zcela výjimečně, někteří dodavatelé upřednostňují určitý systém, stejně jako někteří provozovatelé dávají přednost již zavedenému systému.

Obecně lze říci, že při volbě a návrhu systému regulace teploty páry se musí zvažovat: typ kotle, jeho výkon, parametry páry a statické charakteristiky teplosměnných ploch (sálavá, konvekční), dále palivo a jeho parametry a především pak proměnlivost vstupních parametrů, dále regulační rozsah výkonu s konstantní teplotou páry, požadavky na regulaci výkonu, dynamické vlastnosti kotle a jeho částí, požadavky na kvalitu regulace teploty páry, způsob najíždění a odstavování kotle, vliv na účinnost, dopad na provozní náklady, složitost zařízení a jeho cena, atd.

Regulace teploty přehřáté páry

- U **kotlů malých výkonů** s nízkou teplotou přehřátí lze použít regulaci vstřikem napájecí vody (**obr. 4.63**) nebo regulaci chlazením páry kotelní vodou, **obr. 4.59**. V případě, že pro regulaci vstřikem není k dispozici voda v potřebné kvalitě, pak výhodnější (jednodušší) pravděpodobně bude regulace chlazením páry kotelní vodou (**obr. 5.59**) než regulace vstřikem vlastního kondenzátu, **obr. 4.62b**.
- Pro **kotle větších výkonů** (průmyslové kotle, teplárny) s vyšší teplotou páry (dělený přehřívák) se pravděpodobně nejčastěji použije regulace vstřikem napájecí vody s kaskádovým zapojením regulačních obvodů, **obr. 4.64**. Vhodná je též regulace obtokem spalin (**obr. 4.57**) kombinovaná s regulací výstupní teploty vstřikem napájecí vody. Při nevhodné kvalitě napájecí vody lze regulaci vstřikem nahradit vstřikem vlastního kondenzátu, **obr. 4.62b**, případně chlazením kotelní vodou podle **obr. 4.59a**.
- U **kotlů elektrárenských bloků** se zřejmě dá přednost regulaci vstřikem napájecí vody s kaskádovým zapojením regulačních obvodů (**obr. 4.64**) nebo regulaci obtokem spalin (**obr. 4.57**) v kombinaci s regulací výstupní teploty vstřikem napájecí vody (v případě vícedílného přehříváku i s kaskádovým zapojením

regulačních obvodů vstřikové regulace). U největších kotlů s nadkritickými parametry se s výhodou použije kaskádová regulace vstřikem napájecí vody – většinou je přehřívák páry proveden jako čtyřvětvový.

Regulace teploty přihřívané páry

Využívá se u kotlů elektrárenských bloků a nabízí se tyto způsoby regulace:

a) regulace obtokem spalin v kombinaci s regulací vstřikem napájecí vody, viz **obr. 4.71**. Tato je výhodná především při proměnlivém množství přihřívané páry na vstupu do kotle (externí odběry) a při spalování odlišných paliv.
b) regulace výměníkem tepla triflux v kombinaci s regulací vstřikem napájecí vody dle **obr. 4.77**. Způsob využití je podobný jako v případě a).
c) regulace vstřikem napájecí vody s optimalizací vstřiku obtokem přihříváku ***MP1*** dle **obr. 4.78**. Provedení je jednoduché, ale je vhodná jen pro kotle se stabilními parametry na vstupu do kotle (nejsou externí odběry přihřívané páry a spaluje se jeden druh paliva.
d) regulace vstřikem napájecí vody s optimalizací vstřiku obtokem vstupního výměníku triflux podle **obr. 4.79**. Způsob využití je podobný jako v případech a), b) – provedení je jednodušší (jen dvě teplosměnné plochy).

U největších kotlů s nadkritickými parametry se dává přednost kombinované regulaci vstřikem napájecí vody s regulací trifluxem, bod b (případně by se mohla využít optimalizační regulace obtokem výměníku triflux, bod d), přičemž v obou případech se přihřívák dimenzuje tak, aby při ustáleném provozu byl vstřik vody nulový.

4.3 REGULACE NAPÁJENÍ

Protože regulace napájení úzce souvisí s funkcí a provedením výparníku kotle, řeší se odlišně regulace napájení u bubnových kotlů s přirozenou cirkulací (respektive s oběhem vody ve výparníku) a u kotlů s výparníkem průtočným.

Průtočné kotle – vzhledem k tomu, že mají menší tepelnou kapacitu (časová konstanta výparníku má velikost asi 1/3 časové konstanty výparníku bubnového kotle) a nemají pevnou hladinu oddělující výparník od přehříváku páry (Benson) tak jako u kotlů bubnových – vyžadují náročnější regulační systém napájení než kotle bubnové.

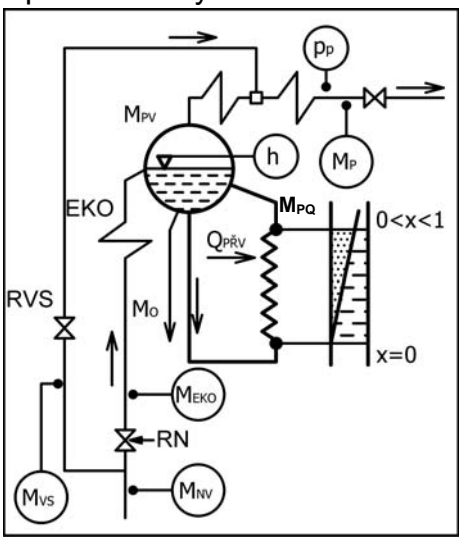
Regulační obvody výkonu kotle, napájení a svým způsobem i teploty přehřáté páry nelze u průtočných kotlů navrhovat (vyšetřovat) odděleně, ale jen jako víceparametrový regulační systém.

4.3.1 Regulace napájení kotlů s přirozenou cirkulací

Výparník tohoto kotle (z hlediska regulace a dynamických vlastností) je výměník, v němž se přivedeným teplem odpařuje kapalné pracovní medium (voda) a vzniká sytá pára. Teplota pracovního media je jednoznačnou funkcí jeho tlaku ve výparníku. Schéma výparníku bubnového kotle s přirozenou cirkulací je na **obr. 4.80**.

Hlavní části tohoto výparníku jsou:

- **parní buben** – v němž se odděluje vzniklá sytá pára od vody
- **zavodňovací trubky** – což je neotápěný systém, jímž se přivádí voda z bubnu na vstup do varnic
- **varnice** – což je systém trubek, který je obvykle uspořádaný tak, že vytváří stěny spalovací komory, a ve kterém dochází k odpařování vody (proudí jím parovodní směs)
- **převáděcí trubky** – to je systém neotápěného potrubí, kterým se parovodní směs z varnic, kterým se parovodní směs odvádí do parního bubnu kotle.



RN – regulace napájení M_p – množství páry za kotlem
M_{PV} – množství páry z výparníku
$Q_{PŘV}$ – teplo přivedené do výparníku
M_{VS} – množatví vstřiku
M_{NV} – množatví napájecí vody kotle
M_{EKO} – množství vody do ohříváku vody
RVS – regulační ventil vstřiku
M_O – množství odluhu
M_{PQ} – množství páry vyrobené z přivedeného tepla $Q_{PŘIV}$

Obr. 4.80 *Základní schéma výparníku bubnového kotle*

Do varnic vstupuje voda o teplotě varu nebo mírně podchlazená. Přivedeným teplem $\boldsymbol{Q_{PŘV}}$ do varnic se voda nejdříve dohřeje na teplotu varu (pokud byla podchlazená) a pak se postupně odpařuje, takže ve varnici proudí parovodní směs, která na výstupu z varnic dosahuje suchosti $0 < x < 1$. Podle tlaku ve výparníku, typu kotle a velikosti oběhového čísla má suchost páry *x* různou hodnotu. (U kotlů s nižším tlakem a velkým oběhovým číslem ve výparníku se dosahuje suchost *x* např. 5 %, zatímco u kotlů s vysokým tlakem a nízkým oběhovým číslem je suchost *x* např. 50 %.)

Podstatné z hlediska dynamiky výparníku je to, že ve spodní části bubnu a v zavodňovacím potrubí, jakož i v části varnic a převáděcího potrubí, je vytvořena zásoba vody o teplotě varu, zatímco v horní části bubnu a ve zbývající části varnic a převáděcího potrubí je zásoba syté páry.

Při změně tlaku ve výparníku se mění i objem syté páry v systému výparníku – tedy i objem parních bublinek v parovodní směsi.

Tlak ve výparníku se mění s výkonem kotle (při konstantním tlaku páry $\boldsymbol{p_P}$ za kotlem se mění tlaková ztráta přehříváku páry), při změně tlaku páry p_P za kotlem (např. provoz s klouzavým tlakem, prudké odběry páry apod.) a také při změně přivedeného tepla $\boldsymbol{Q_{PRV}}$ do varnic. (Při konstantním odběru páry $\boldsymbol{M_P}$ a napájení $\boldsymbol{M_{NV}}$ se při zvětšení $\boldsymbol{Q_{PRV}}$ tlak ve výparníku zvyšuje a naopak.) Při změně tlaku ve výparníku se mění ale i teplota varu a tedy i poměr vody na bodu varu a syté páry. (Při zvýšení tlaku část syté páry kondenzuje, při jeho snížení se část vody odpařuje.) Každá změna tlaku páry ve výparníku má tedy za následek změnu hladiny v bubnu (změna objemu syté páry, změna poměru vody a páry).

Ke změně hladiny v bubnu ale dojde i při porušení hmotnostní bilance na kotli (liší se odběr páry $\boldsymbol{M_P}$ z kotle a přívod napájecí vody $\boldsymbol{M_{NV}}$ do kotle) nebo při porušení hmotnostní bilance na výparníku, např. při změně odluhu $\boldsymbol{Mo}$ nebo při změně poměru množství vody do ohříváku vody $\boldsymbol{M_{EKO}}$ a množství vody $\boldsymbol{M_{VS}}$ odebírané pro regulaci teploty páry vstřikem.

Při nedodržení hmotnostní rovnováhy ($M_P = M_{NV} – M_O$ nebo $M_{PV} = M_{EKO} – M_O$, či $M_P = M_{PV} + M_{VS}$, kde ***M_{PV}*** je pára vystupující z výparníku) se nemění jen hladina v bubnu (při $M_P > M_{NV}$ hladina klesá a naopak), ale i tlak ve výparníku (při $M_P > M_{NV}$ tlak klesá a naopak).

Při všech výše uvedených změnách se mění množství akumulovaného tepla a pracovního média ve výparníku (výparník jako soustava se „nabíjí“ a „vybíjí“, viz též kap. 4.1.1) a při posuzování vlivu těchto změn na chování hladiny v parním bubnu se musí rozlišovat odezva hladiny v ustáleném stavu od pohybu hladiny v přechodovém stavu (než se dosáhne ustálený stav).

4.3.1.1 Dynamika hladiny v bubnu parního kotle

Odezvy hladiny v bubnu parního kotle při změnách vstupních nebo výstupních veličin mají zcela jiný charakter než v případě klasické nádrže s homogenní kapalinou (vodou) při změně jejího přívodu nebo odvodu. Je to způsobeno tím, že ve vodní části výparníku není homogenní kapalina, ale parovodní směs – tj. voda na bodu varu se sytou párou ve formě malých bublinek.

Vodní hladina v parním bubnu proto reaguje (jak již bylo výše uvedeno) nejen na změnu přívodu napájecí vody ***M_{NV}*** a odvodu páry ***M_{PV}***, ale i na změnu tlaku v bubnu, změnu množství přivedeného tepla ***Q_{PRV}*** do varnic (včetně změny entalpie napájecí vody) a na změnu odluhu ***M_O*** či změnu množství ***M_{VS}*** vstřikované vody pro regulaci teploty páry.

Při vyšetřování dynamického chování hladiny v parním bubnu kotle se musí rozlišovat zda má kotel neodpařovací ohřívák vody (do bubnu se přivádí množství napájecí vody ***M_{EKO}*** s teplotou nižší než je teplota varu – teplo potřebné na její dohřátí na teplotu varu se získá kondenzací části syté páry v bubnu) nebo odpařovací ohřívák vody – v tomto případě se do bubnu nepřivádí napájecí voda ***M_{EKO}***, ale stejné množství parovodní směsi (obvykle je $x<20\%$).

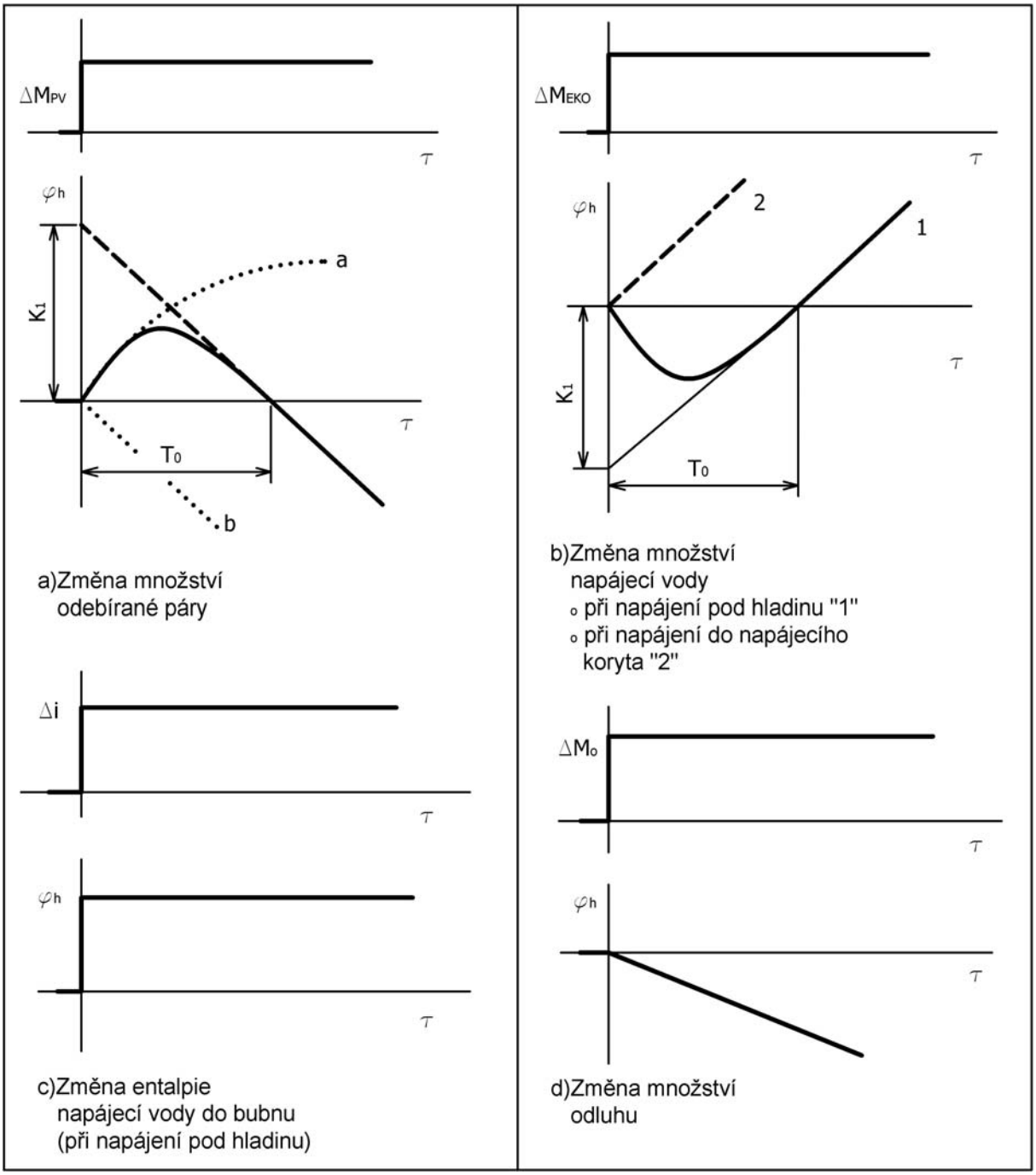
Rovněž se musí rozlišovat jestli je přívod vody do bubnu proveden pod hladinu (např. děrovaným potrubím – v případě, že kotel má neodpařovací ***EKO***, tak část syté páry obsažené ve vodě pod hladinou zkondenzuje a zmenší se tak vodní prostor bubnu) nebo do napájecího koryta nad hladinou, viz **obr. 3.20** a **4.81** (v případě, že kotel má neodpařovací E_{KO}, tak část syté páry nad hladinou zkondenzuje a na hladinu dopadá již napájecí voda o teplotě varu – sníží se ale množství odváděné syté páry z bubnu).

Tak např. **pro kotel s neodpařovacím ohřívákem vody** lze pro objem výparníku pod hladinou napsat hmotnostní bilanci v linearizovaném tvaru [1].

$$\frac{d\Delta m}{d\tau} = \Delta M_{EKO} - \Delta M_{PV} - \Delta M_0 \quad \text{[kg/s]} \qquad (4\text{-}37)$$

kde: m – je celková hmotnost vody a páry pod hladinou [kg]

M_{PV} – je průtok páry vyrobené jak z přivedeného tepla $Q_{PŘV}$, tak i následkem změny tlaku ve výparníku (množství páry z výparníku) [kg/s]



$$\varphi_h = \frac{\Delta h}{h}$$ poměrná změna hladiny

Obr. 4.81 *Přechodové charakteristiky hladiny v parním bubnu [1][6]*

Pro výšku hladiny *h* pak lze použít vztah

$$h = \frac{V}{F} = \frac{m}{\rho_m F} \quad [\text{m}] \qquad (4\text{-}38)$$

kde: V - objem výparníku pod hladinou [m^3]

F - plocha hladiny v bubnu (bere se konstantní – s výškou hladiny se nemění) [m^2]

$\overline{\rho}_m$ - hustota (střední) parovodní směsi [kg/m^3]

Po linearizaci rov. 4-38 obdržíme vztah

$$\Delta h = \frac{1}{\overline{\rho}_m F}(\Delta m - \overline{m}\frac{\Delta\rho_m}{\overline{\rho}_m}), \text{ [m]} \qquad (4\text{-}39)$$

pomocí něhož zavedeme do rov. 4-37 proměnnou *h*. Z této rovnice se pak odvodí výsledný vztah pro dynamiku hladiny, např. podle [1].

Při stanovení přechodových charakteristik jednotlivých přenosů se musí rozlišovat dva případy. (Uvažujeme neodpařovací EKO).

a) v bubnu se tlak mění, tzn. že poruchy vstupující na straně napájecí vody (odběru páry) nejsou kompenzovány okamžitou změnou přivedeného tepla Q_{PRV} do varnic (předpokládá se neodpařovací EKO a napájení pod hladinu), takže neplatí

$$\Delta M_{Pq} = \Delta M_{PV} \text{ [kg/s]} \qquad (4\text{-}40)$$

kde M_{Pq} – je množství páry vyrobené z přivedeného tepla Q_{PRV}

Přechodové charakteristiky výšky hladiny v parním bubnu při jednotlivých poruchách jsou pro tento případ znázorněny na **obr. 4.81** ($\varphi_h = \frac{\Delta h}{\overline{h}}$ je poměrná změna hladiny).

Na **obr. 4.81a** je uvedena přechodová charakteristika hladiny při změně odběru páry z bubnu (z výparníku).

Tuto charakteristiku si můžeme představit jako výslednou charakteristiku složenou z charakteristiky a), která představuje zvýšení hladiny v důsledku tzv. „navření“ hladiny při snížení tlaku ve výparníku (při vyšším odběru páry, se sníží tlak a při snížení tlaku se část vody na bodu varu odpaří – ve vodním prostoru se zvětší objem parních bublinek) a z charakteristiky b), která znázorňuje pokles hladiny způsobený narušením hmotnostní rovnováhy při zvýšení odběru páry (při konstantním tlaku).

Hladina při této poruše se tedy nejdříve zvyšuje a teprve po čase T_0 se začne snižovat pod původní úroveň.

Na obr. **4.81b** je přechodová charakteristika hladiny při změně přívodu napájecí vody do bubnu. V tomto případě záleží na způsobu přívodu napájecí vody do bubnu. Při přívodu napájecí vody pod hladinu platí charakteristika ***1***. Podobně jako v případě charakteristiky na **obr. a** je i tato charakteristika složena ze dvou charakteristik. Počáteční pokles hladiny je způsoben zmenšením vodního objemu bubnu kondenzací části parních bublinek na dohřev napájecí vody na bod varu (uvažuje se neodpařovací ***EKO***). Vzrůst hladiny je způsoben narušením hmotnostní rovnováhy při zvýšení průtoku napájecí vody.

Hladina v tomto případě se nejdříve sníží a po čase T_0 se zvyšuje nad svoji původní hodnotu.

Při přívodu napájecí vody do napájecího koryta (nad hladinu) se do vodního obsahu bubnu přivádí již voda na bodu varu (dohřev se realizoval nad hladinou kondenzací části syté páry) a přechodová charakteristika ***2*** znázorňuje zvýšení hladiny způsobené narušením hmotnostní rovnováhy při zvýšení průtoku napájecí vody.

Na **obr. 4.81c** je přechodová charakteristika hladiny při změně entalpie napájecí vody na vstupu do bubnu a to pro případ napájení pod hladinu. Tím, že

se do bubnu přivede napájecí voda o vyšší teplotě, tak se zkondenzuje méně syté páry (ve vodním prostoru bubnu) pro její dohřev na bod varu – ve vodním prostoru zbude více parních bublinek a jeho objem se zvětší. Hladina v tomto případě se zvýší proporcionálně.

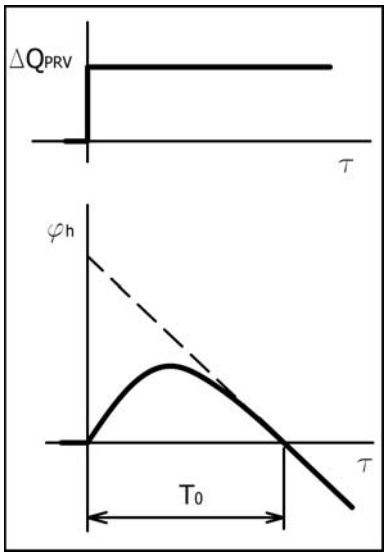
Při přívodu napájecí vody do napájecího koryta dopadá na hladinu napájecí voda již o teplotě varu – hladina se nezmění.

Na **obr. 4.81d** je přechodová charakteristika hladiny při změně množství odluhu. Tato znázorňuje pokles hladiny způsobený narušením hmotnostní rovnováhy při zvýšení množství odluhu.

Z hlediska regulace hladiny je významný přenos při změně tepla předaného ve varnicích Q_{PRV}, přechodová charakteristika je znázorněna na **obr. 4.82**.

Tuto charakteristiku si můžeme opět představit jako složenou ze dvou charakteristik.

Počáteční „navření“ hladiny je způsobeno zvětšením obsahu páry v parovodní směsi ve varnicích (výroba páry se zvýšila zvětšením tepelného příkonu). Při zvětšení objemu parovodní směsi ve varnicích se pak stejné množství parovodní směsi z varnic (nad místem realizovaného tepelného příkonu) vytlačí do parního bubnu. Následující pokles hladiny (po čase τ_O) je pak způsoben narušením hmotnostní rovnováhy ve výparníku – vyrábí se více páry než se přivádí napájecí vody.



Obr. 4.82 *Přechodová charakteristika hladiny při změně tepelného příkonu*

U kotle s odpařovacím ohřívákem vody se do parního bubnu napájí parovodní směs, tzn. voda na bodu varu a sytá pára. Bez ohledu na způsob přívodu napájecí vody (nad hladinou nebo pod hladinou) nedochází ke kondenzaci části syté páry, neboť přivedená napájecí voda se nemusí dohřívat na teplotu varu.

Přechodové charakteristiky jednotlivých přenosů mají stejný charakter jako na **obr. 4.81** (tlak v bubnu se mění) s tím rozdílem, že místo změny entalpie Δi napájecí vody se uvažuje změna suchosti Δx napájecí vody (parovodní směsi).

b) v bubnu se udržuje konstantní tlak, tzn. že změny tepelného příkonu do varnic Q_{PRV} musí přesně sledovat změny v odběru páry a napájení - tedy musí platit $\Delta M_{PQ} = \Delta M_{PV}$.

V tomto případě se při změnách entalpie napájecí vody hladina nemění a při změnách množství napájecí vody se hladina mění stejně jako u nádoby s homogenní kapalinou (**obr. 3.3**).

Některé uvedené přechodové charakteristiky (**obr. 4.82 a 4.81a, b**) mají tu zvláštnost, že z počátku je jejich průběh opačný, než ve kterém nakonec po určitém čase probíhá (nebo se ustálí). Soustavy s takovými vlastnostmi se nazývají soustavy s fázovacím přenosem a obvykle se špatně regulují, protože regulátor (pokud reguluje jen hladinu) na některé poruchy (v našem případě je to změna průtoku napájecí vody, odběru páry a tepelného příkonu) reaguje v prvním okamžiku nesprávným směrem, což může vést k rozkmitání regulačního obvodu.

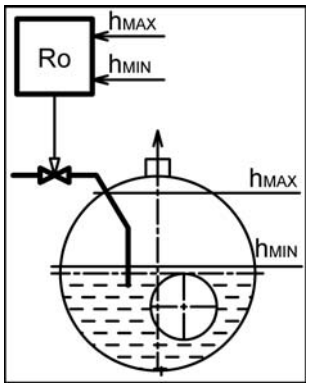
Pro kvalitu regulace hladiny má velký význam doba T_0, za kterou regulovaná veličina znova dosáhne svou původní velikost.

Pro představu si popišme proces změny hladiny např. u moderního parního kotle s tlakem páry 15,5 MPa a oběhovým číslem 10. Časová konstanta T_0 u takového kotle může být např. 115 s [6]. To znamená, že regulátor hladiny zhruba polovinu této doby (tj. asi 60 s) pracuje opačným směrem (např. u **obr. 4.81a** jde hladina nahoru a regulační napájecí ventil zavírá místo aby se otevíral) a teprve po této době začne pracovat správným směrem. Celý regulační pochod je nejen o tuto dobu opožděn, ale regulátor dokonce z počátku regulační odchylku zvyšuje.

4.3.1.2 Základní způsoby regulace napájení u kotlů s přirozenou cirkulací

Jak z předchozí kapitoly vyplývá, výparník kotle s přirozenou cirkulací je soustava s fázovacím přenosem.

Pokud by při regulaci napájení byla hladina jedinou regulovanou veličinou, pak regulátor napájení by při změně odběru páry, přívodu napájecí vody a při změně tepelného příkonu do výparníku reagoval v první fázi opačným způsobem – regulace by byla nestabilní.



Obr. 4.83 *Regulace napájení velkoprostorových kotlů*

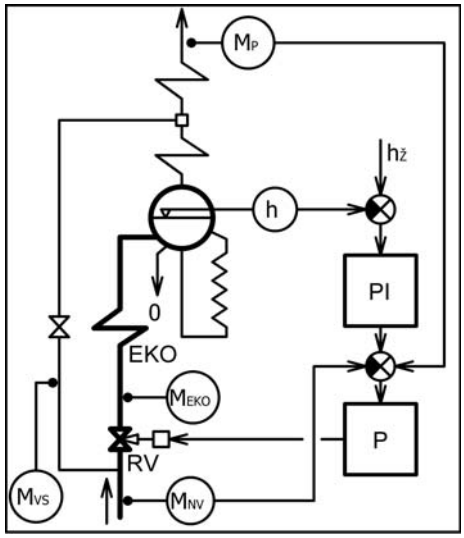
Proto se pro regulaci napájení těchto kotlů používá tzv. **třísignálová regulace napájení** – měří se hladina v bubnu h, odběr páry M_P a průtok napájecí vody M_{NV} do kotle.

Určitou výjimku tvoří např. velkoprostorové žárotrubné (plamencové) kotle malých výkonů, u nichž se někdy používá přímá regulace výšky hladiny přerušovaným napájením, viz **obr. 4.83**.

Po poklesu hladiny na minimální úroveň h_{min} se napájí tak dlouho, až se dosáhne maximální výška hladina h_{max}.

Třísignálová regulace napájení

U této regulace se kromě výšky hladiny h v bubnu měří ještě průtok napájecí vody M_{NV} a průtok páry M_P. Rozdílnost průtoků charakterizuje (definuje) vliv hlavních poruch na hmotnostní rovnováhu přítoku a odtoku. Výška hladiny se měří proto, aby se eliminovaly případné nepřesnosti měření průtoků a především proto, aby se zachytil i vliv dalších poruch, jako je např. změna odluhu O nebo změna vstřiku M_{VS}. Jedno z možných provedení regulačního obvodu s třísignálovou regulací napájení (hladiny) je uvedeno na **obr. 4.84**.



Obr. 4.84 *Třísignálová regulace napájení [1][17]*

Při tomto zapojení má měřené množství napájecí vody M_{NV} současně i funkci záporné zpětné vazby uzavřené přes akční člen regulace (regulační napájecí ventil RV), čímž se eliminují nepřesnosti a nelinearity tohoto členu.

Výhodou uvedeného zapojení je to [4], že výška hladiny ***h*** se reguluje na žádanou hodnotu nezávisle na měření průtoku vody M_{NV} a páry M_P.

Pokud by se regulační obvod zjednodušil tak, že by zůstal jen hlavní regulátor ***PI*** a signály od hladiny a průtoků vody a páry by se přivedly do součtového členu před tento regulátor, tak by se uvedené výhody nedosáhlo.

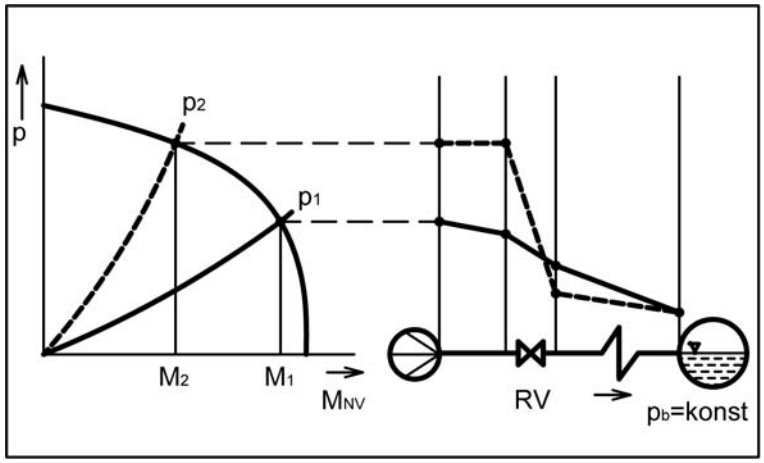
Třísignálová regulace hladiny bubnového kotle je sice zárukou spolehlivé a kvalitní regulace napájení, ale velký vliv na regulaci napájení mají i některé členy regulačního obvodu, především pak akční člen, např. ***RV***, kterým se realizuje změna průtoku napájecí vody.

Průtok napájecí vody do kotle lze měnit v podstatě dvojím způsobem:

- přestavením škrtícího regulačního ventilu – tedy změnou odporové charakteristiky napájecího systému
- změnou dodávky napájecí vody napájecím čerpadlem, tj. změnou charakteristiky čerpadla, což lze provést jen změnou otáček

a) změna odporové charakteristiky napájecího systému přestavením regulačního ventilu

Taková regulace vyvolá zejména u velkých kotlů značné zvýšení tlakové ztráty na straně pracovního media a musí se proto provést opatření, aby se při takové regulaci enormně nezvyšovala vlastní spotřeba el. energie na pohon napáječky. Průběh tlaku v napájecím systému je znázorněn na **obr. 4.86**.



Obr. 4.86 *Průběh tlaku v napájecím systému při regulaci škrcením [1]*

Při snížení průtoku (výkonu kotle) z hodnoty M_1 na hodnotu M_2 se výrazně zvýší tlakový spád na regulačním ventilu ***RV***. (Tlak v bubnu p_b se ve skutečnosti při snížení výkonu rovněž o něco sníží – a to o rozdíl tlakové ztráty přehříváků.)

Velký tlakový spád na regulačním ventilu kromě vlastní spotřeby napáječky negativně ovlivňuje i poruchovost (spolehlivost) regulačního ventilu (vyšlehání kuželky, sedla ventilu). Aby regulační ventil vyhověl všem požadavkům z hlediska regulace napájení, musí se při jeho návrhu respektovat tyto faktory.

a1) průběh statické charakteristiky regulačního ventilu, tj. závislost průtoku vody na jeho otevření a tlakovém spádu.

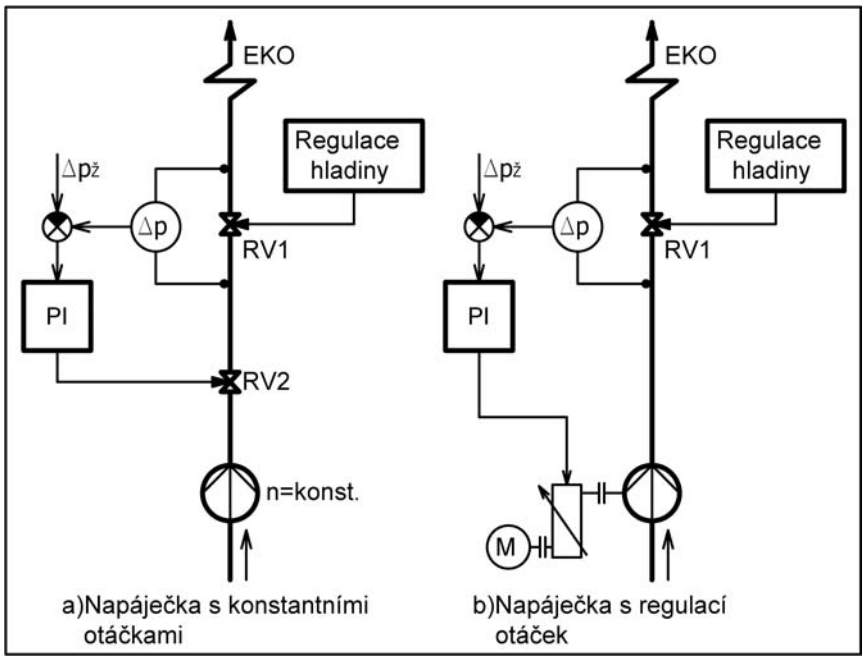
Chceme-li návrh regulace optimalizovat, musí být akční člen proveden tak, aby bylo možné charakteristiku podle potřeby změnit.

Statickou charakteristiku můžeme ale ovlivnit pouze konstrukcí škrtícího orgánu regulačního ventilu.

Pro optimalizaci regulace je výhodná lineární charakteristika, kterou lze dosáhnout vhodnou konstrukcí kuželky regulačního ventilu za předpokladu, že při změně otevření ventilu se nezmění (zůstane konstantní) jeho tlakový spád.

Jak z obr. **4.86** vyplývá, tak tlakový spád na ventilu se při regulaci mění a statická charakteristika je nelineární.

Chceme-li tedy dosáhnout lineární charakteristiku regulačního ventilu, musíme na něm, i při změně jeho otevření, udržovat konstantní tlakový spád. Tuto podmínku lze v praxi splnit dvěma způsoby:



Obr. 4.87 *Regulace konstantního tlakového spádu na regulačním ventilu napájení*

- u kotlů, kde se pro napájení používá napáječka s konstantními otáčkami se na regulačním napájecím ventilu ***RV1*** (**obr. 4.87a**) udržuje konstantní tlakový spád pomocným regulačním ventilem ***RV2***.
  Pomocný regulační ventil ***RV2*** může být zařazen před (obvyklejší) nebo za regulačním ventilem ***RV1*** napájení.
- pokud se pro napájení kotlů používá napáječka s regulací otáček, tak se konstantní tlakový spád na regulačním ventilu ***RV1*** napájení udržuje změnou otáček napáječky – např. tak jak je naznačeno na **obr. 4.87b**.

a2) regulační rozsah ventilu

Tento udává výrobce velikostí součinitele [1]

$$b_V = \frac{S_{\max.} \cdot \mu_{\max.}}{S_{\min.} \cdot \mu_{\min.}} \quad \textbf{[-]} \qquad (4\text{-}41)$$

kde: - $S_{max.}$ a $S_{min.}$ je průtočný průřez ventilu [m^2]
- $\mu_{max.}$ a $\mu_{min.}$ je jeho průtokový součinitel při max. a min. otevření ve využitelné části charakteristiky [-]

Součinitel $\boldsymbol{b_V}$ dosahuje u dvojitých odlehčených ventilů hodnotu $b_V = 6$ a i větší.

Při regulaci však nelze využívat celý rozsah charakteristiky ventilu, ale jen tzv. pracovní část charakteristiky.

Průtokové poměry ***b*** v regulačním ventilu se vyjadřují vztahem [1]

$$b = \frac{0_j}{0_{\min.}} \sqrt{\frac{\Delta p_{\min.} \cdot \rho_j}{\Delta p_j \cdot \rho_{\min.}}} \quad \textbf{[-]} \qquad (4\text{-}42)$$

kde: - 0_j a $0_{min.}$ je objemový jmenovitý a minimální průtok ventilem [m^3/s]
- Δp_j a $\Delta p_{min.}$ je tlakový spád při jmenovitém a minimálním průtoku [Pa]
- ρ_j a $\rho_{min.}$ je hustota při jmenovitém a minimálním průtoku [kg/m^3]

Regulační ventil je dobře navržen, pokud platí $b \leq b_V$.

a3) velikost tlakové ztráty na regulačním ventilu. Charakteristika napáječky musí být zvolena tak, aby tlaková ztráta na regulačním ventilu napájení při max. průtoku byla dostatečná – uvádí se ve výši alespoň 5 % tlaku v bubnu. [1] Všeobecně platí, že čím je tlaková ztráta ventilu větší, tím lepší je kvalita regulace, ale zvýší se vlastní spotřeba energie na pohon napáječky.

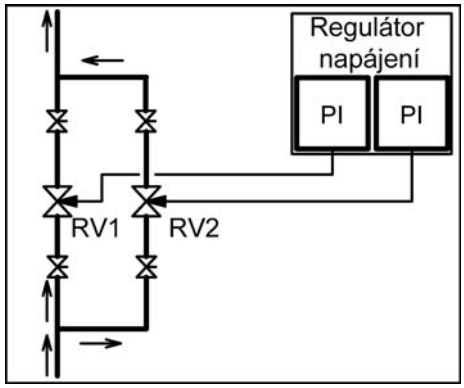
Při návrhu charakteristiky napáječky se musí respektovat rovněž i podmínka $b < b_V$, viz bod a2)

a4) provoz kotle na minimální výkon a najíždění kotle [1]

Regulační ventil napájení musí být navržen tak, aby zajistil spolehlivý provoz při regulaci napájení i v těchto mimořádných (nestacionárních) provozních stavech.

Pro splnění tohoto požadavku se nabízí několik možností provedení a zapojení.

a4–1) Použije se speciální napájecí ventil ***RV2***(s charakteristikou vhodnou pro takový mimořádný provoz), který se zařadí v obtoku hlavního napájecího ventilu ***RV1*** (paralelně). Při poklesu výkonu kotle na určitý výkon (nebo při najíždění) ovládá regulátor napájení tento speciální ventil. Protože přepínání regulátoru z hlavního regulačního ventilu na speciální je nevýhodné, může se provést ovládání podle zapojení např. na **obr. 4.88**.



Obr. 4.88 *Ovládání regulačního napájecího ventilu při najíždění*

Signál z regulátorů ***PI*** napájení se trvale přivádí na hlavní regulační ventil ***RV1*** i na regulační ventil ***RV2***, jehož charakteristika je navržena tak, aby vyhovovala pro provoz kotle s nízkým výkonem a pro najíždění kotle. Při provozu kotle v běžném regulačním rozsahu jsou uzavírací armatury u hlavního ventilu ***RV1*** otevřeny, a u ventilu ***RV2*** uzavřeny – průtok vody se reguluje hlavním ventilem ***RV1***.

Při poklesu výkonu na předem stanovenou hodnotu nebo při najíždění se uzavírací armatury hlavního ventilu ***RV1*** uzavřou a otevřené budou uzavírací armatury ventilu ***RV2*** – napájení se reguluje ventilem ***RV2***.

Přechod regulace z běžného výkonu na výkon minimální je plynulý, nedochází k přepínání regulátorů.

a4-2) Použije se jen jeden regulační ventil s velkým regulačním rozsahem, který musí být schopen spolehlivě zpracovat i velké tlakové spády, a který musí

mít vhodnou charakteristiku i pro provoz kotle s minimálním výkonem a pro najíždění (např. regulační ventil společnosti G-Team Plzeň).

a4-3) Použije se další regulační obvod, který bude udržovat hlavní napájecí ventil ***RV1*** v regulačním rozsahu i při minimálním výkonu a najíždění – viz schéma na **obr. 4.87**.

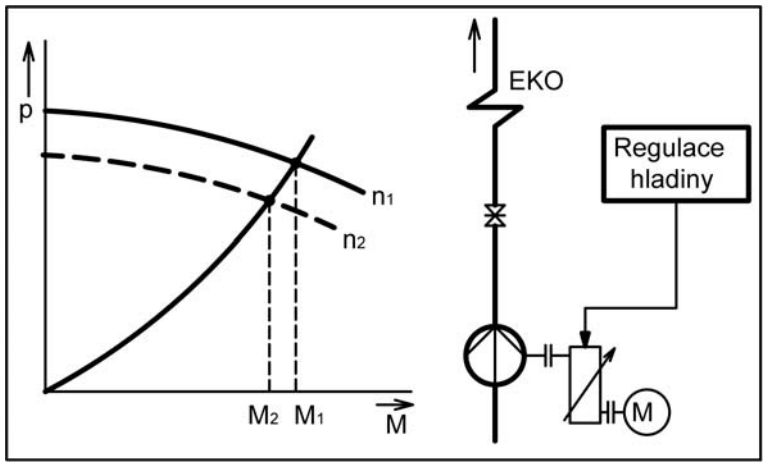
Řada dodavatelů používá osvědčený způsob podle bodu **a4-1)**, ale pro velké kotle je vhodnější provedení podle bodu **a4-3)**, zejména pokud se používá napáječka s regulací otáček.

b) Změnou charakteristiky napáječky –což lze provést jen změnou otáček. Tato regulace je jednodušší a energeticky výhodnější, ale investičně náročnější, neboť změnu otáček napáječky lze provést:

- využitím parní turbíny pro pohon napáječky (turbonapáječka)
- pokud je k pohonu napáječky použít el. motor (elektronapáječka) lze změnu otáček realizovat:
  - hydraulickou převodovkou
  - měničem frekvence

Důležitým kritériem pro volbu napáječky z hlediska regulace otáček bývá výkon napáječky a celková cena zařízení.

Regulaci napájení jen změnou otáček (bez regulačního napájecího ventilu) lze u bubnových kotlů použít jen v případě blokového uspořádání – každý kotel má vlastní napáječku. Příklad takové regulace je na **obr. 4.89**.



Obr. 4.89 *Regulace napájení bubnového kotle změnou otáček napáječky [1]*

Před vstupem do kotle je jen uzavírací armatura, regulační napájecí ventil není. Regulátor napájení - hladiny (třísignálová regulace, viz **obr. 4.84**), místo regulačního ventilu řídí otáčky napáječky. Je třeba říci, že lepší dynamické vlastnosti z hlediska regulace hladiny má regulační napájecí ventil. Proto je výhodné kombinovat regulaci škrcením (regulační napájecí ventil) s regulací otáčkami napáječky (**obr. 4.87b**). Výhody jsou popsány na příkladu regulace dvou kotlů, viz **obr. 4.90**.

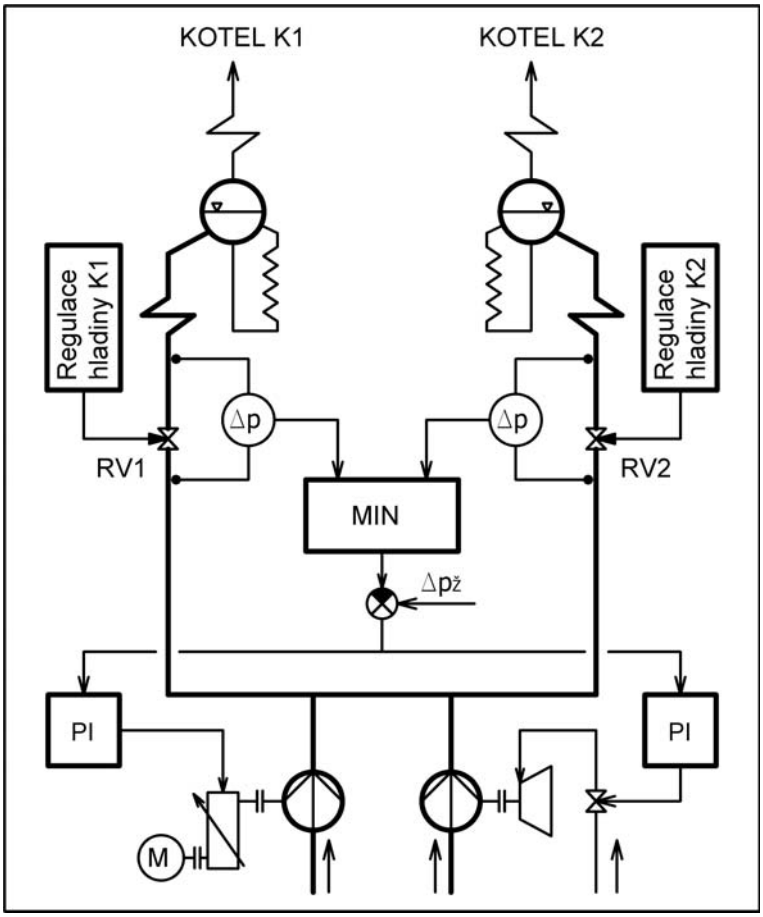
V případě, že není použito blokové uspořádání (kotel – napáječka), ale je společné napájení pro více kotlů, pak – použije-li se regulace změnou otáček napáječky – musí být každý z paralelních kotlů vybaven i samostatným regulačním napájecím ventilem, který umožňuje přizpůsobit napájení příslušného (paralelně zapojeného) kotle podle požadovaného výkonu nebo odlišného tepelného příkonu do výparníku.

Schéma společného napájení dvou kotlů je uvedeno na **obr. 4.90**. V těchto případech má regulační obvod dva akční členy (měnič otáček napáječky a regulační ventil), které mohou plnit tyto dvě funkce:

- eliminovat poruchy v napájecím systému kotle

- zajistit minimální energetickou ztrátu napájené větve při regulaci škrcením

Každý kotel má vlastní třísignálovou regulaci hladiny (napájení), akčním členem je regulační napájecí ventil (viz **obr. 4.84**). Využívají se tak vhodnější dynamické vlastnosti regulace regulačním ventilem. Otáčkami napáječky se udržuje min. potřebný tlakový spád na regulačním ventilu – zajišťuje se tak hospodárnost regulace napájení. Na **obr. 4.90** zajišťuje napájení obou kotlů turbonapáječka a jako záložní zdroj je použita elektronapáječka. Napáječka (která je v provozu) udržuje požadovaný tlakový spád $\Delta p_ž$ podle toho z regulačních ventilů ***RV1*** a ***RV2***, na kterém je hodnota Δp nižší (výběr kotle s menší tlakovou ztrátou Δp zajistí člen pro výběr minimální hodnoty). Jinak řečeno, otáčky napáječky se v daném okamžiku řídí podle toho kotle, na jehož regulačním napájecím ventilu je menší tlaková diference Δp. Hlavní regulátory napájení (hladiny) obou kotlů pracují vždy nezávisle a udržují potřebný průtok napájecí vody pro každý kotel.



Obr. 4.90 *Společné napájení dvou kotlů změnou otáček napáječky [1]*

Při vhodně navrženém vedlejším regulačním obvodu řízení otáček u napáječek lze udržet tlakový spád na regulačních ventilech ***RV1*** a ***RV2*** obou kotlů konstantní v celém provozním rozsahu, což je předpoklad pro dodržení jejich lineární charakteristiky potřebné pro optimalizaci regulace napájení – viz bod a1).

Regulace hladiny při najíždění

Kotle jsou dnes konstruovány pro provoz s klouzavým tlakem a pro rychlé najíždění ze studeného stavu. Kromě jiného jsou kotle vybaveny předehřevem výparníku „cizí“ párou a zařízením pro optimalizaci rychlosti najíždění, při níž se využívá v maximální přípustné míře pevnost (tloušťka stěny) kotlového bubnu při zvyšování tlaku páry.

Měří se průběh teploty na stěně bubnu a z teplotní diference (mezi vnitřním a vnějším povrchem) se stanoví přídavné napětí – resp. z okamžitého přípustného přídavného napětí se stanoví max. možná teplotní diference, tedy rychlost najíždění (zvyšování tlaku páry).

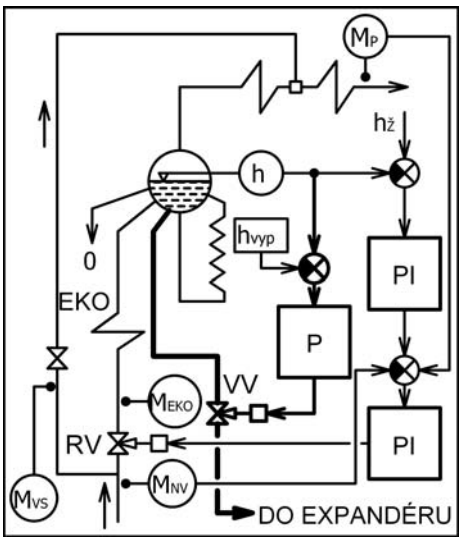
Při rychlém zvyšování tepelného příkonu ale vznikne velká „vodní špička“ (v úrovni hořáků je max. tepelný tok a část vody se rychle odpaří – tím se v tomto místě prudce zvětší objem pracovního media a voda či parovodní směs nad tímto místem

se okamžitě vytlačí do bubnu) a dojde k rychlému zvýšení hladiny vody. Problém je v tom, že v této fázi nelze hladinu regulovat (snížit) akčním orgánem regulace napájení.

V bubnu je přebytek vody, který se musí okamžitě odvést aby nedošlo k přestřiku vody do přehříváku.

Podobná situace může nastat i při provozu kotle v běžném regulačním režimu – pokud dojde k prudkému poklesu tlaku páry. (Při poklesu tlaku ve výparníku se část vody v jeho spodní části prudce odpaří.)

Pro odvod vodní špičky je proto parní buben vybaven vypouštěcím potrubím, schéma je na **obr. 4.91** (vypouštěcí potrubí je tučně). Jakmile hladina v bubnu dosáhne nastavenou hodnotu h_{vyp}, začne proporcionální regulátor ***P*** řídit odpouštění vody vypouštěcím ventilem ***VV*** tak, aby nedošlo k přestřiku vody do přehříváku.



O – odluh VV – vypouštěcí ventil
h_{vyp} – nastavená hladina pro vypouštění
RV – regulační napájecí ventil

Obr. 4.91 *Regulace hladiny při najíždění [39]*

Regulace napájení (třísignálová regulace) je neustále v činnosti a po odpuštění přebytečné vody (vodní špičky) se vypouštěcí ventil ***VV*** zavře a napájení se reguluje regulačním ventilem ***RV*** (nebo napáječkou).

4.3.2 Regulace napájení kotlů průtočných

Zatímco u kotlů bubnových s přirozenou cirkulací parní buben odděluje výparník od ohříváku vody i od přehříváku páry (do parního bubnu je zaústěn výparník, ohřívák vody i přehřívák páry), tak u kotlů průtočných parní buben v tomto smyslu neexistuje a za sebou (v sérii) jsou zapojeny ve směru toku pracovního média: ohřívák vody – výparník – přehřívák páry.

Proto jakékoliv změny poměru tepelného příkonu a průtoku napájecí vody vyvolají změnu parametrů pracovního média na konci výparníku (viz kap. 4.1.1, **obr. 4.9** až **4.14**), které se projeví okamžitě jako změna parametrů páry na vstupu do přehříváku. Tyto změny z hlediska regulace teploty páry mají charakter poruchy. (U kotle s pohyblivým koncem odpařování se mění teplota a množství páry, u kotle s pevným koncem odpařování se obecně mění suchost *x* parovodní směsi.)

Odlišné chování výparníku průtočných kotlů se musí projevit i na způsobu jejich regulace.

Zatímco u kotlů bubnových s přirozenou cirkulací se regulace výkonu, napájení a teploty páry mohly řešit samostatně, tak u průtočných kotlů je vyšetřovat samostatně nelze, ale musí se posuzovat jako víceparametrový regulační systém.

Regulace průtočných kotlů úzce souvisí s konstrukcí výparníku a některá schémata zapojení jednotlivých typů výparníků jsou na **obr. 4.92**.

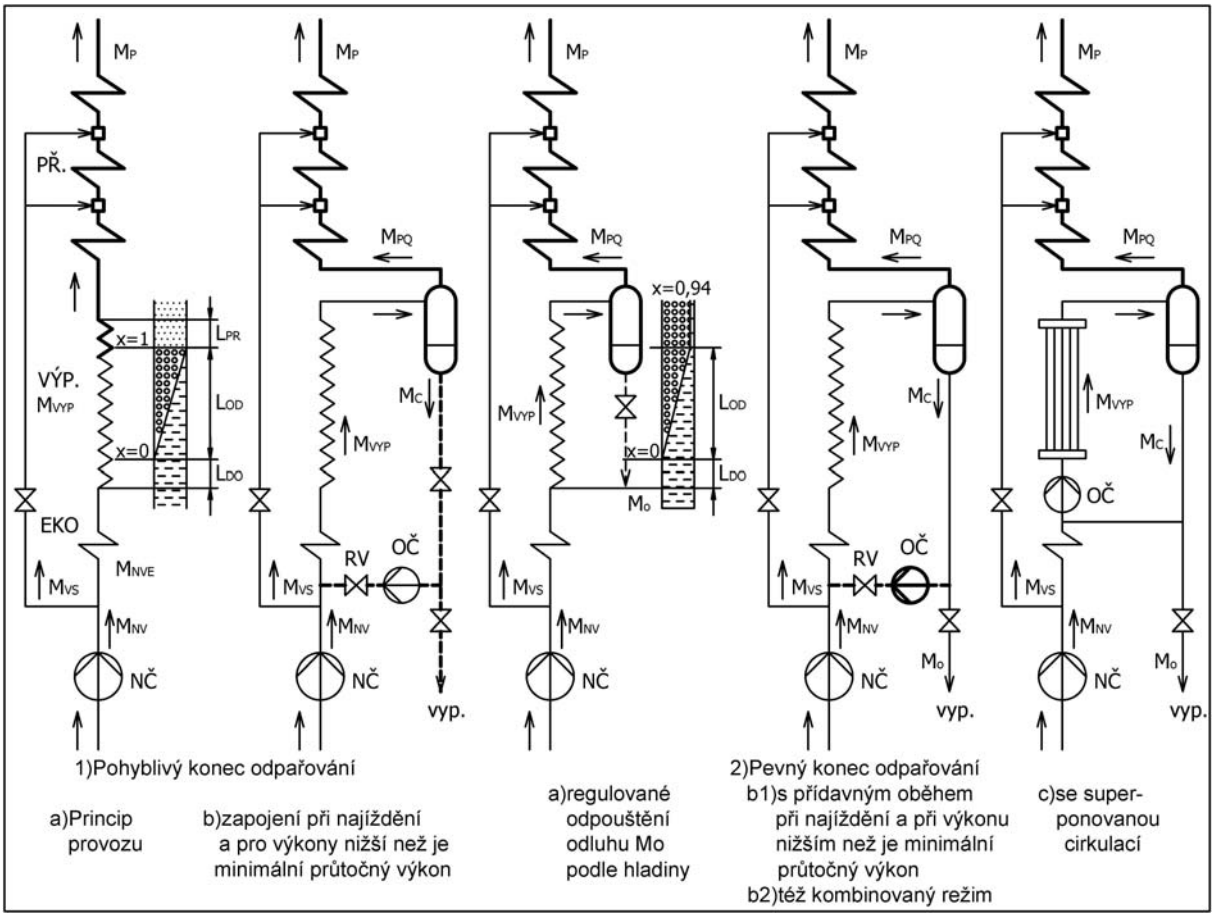
Podle konstrukce výparníku lze průtočné kotle rozdělit na kotle:

- s pohyblivým koncem odpařování (Benson)
- s pevným koncem odpařování (Sulzer) a ty pak podle zajištění průtoku ve výparníku lze rozdělit na kotle:
  - s regulovaným odpouštěním odluhu (dnes se již nepoužívají)
  - se superponovaným oběhem

- s cirkulací ve výparníku při najíždění a až do výkonu cca 75 %, při výkonu nad 75 % pak s průtočným režimem – tzv. kombinovaný režim.

a) Průtočné kotle s pohyblivým koncem odpařování (Někdy se označují jako kotle Benson)

Schéma tohoto výparníku je na **obr. 4.92** pod bodem **1, a),b**). Výparník je proveden z většího počtu paralelních trubek menšího průměru (např. kotel pro



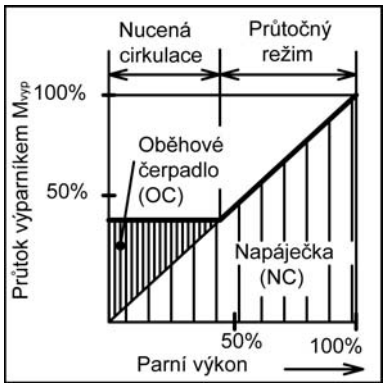
NČ – napájecí čerpadlo EKO – ohřívák vody VÝP – výparník PŘ – přehřívák M_{NV} – množství nap. vody do kotle M_{VS} – množství vstřiku M_{VYP} – množství vody přes výparník M_P – množství páry za kotlem L_{DO} – dohřívací délka L_{OD} – odpařovací délka L_{PR} – přehřívací délka M_{PQ} – množství páry vyrobené ve výparníku M_O – odluh M_C – cirkulující množství OČ OČ – oběhové čerpadlo RV – regulační ventil

Obr. 4.92 *Výparníky průtočných kotlů*

blok 200 MW má 128 trubek ∅ 32 mm) z nichž jsou vytvořeny stěny spalovací komory. Dnes se nejčastěji používá šroubovité provedení stěn, tzn. že celý svazek paralelních trubek stoupá ve šroubovici po celé výšce výparníku. (Nelze použít svislé trubky.)

Výparník je navržen tak, že na jeho výstupu je mírně přehřátá pára, přičemž do výparníku vstupuje voda s teplotou nižší než je teplota varu. Trubka výparníku má pak úsek dohřívací L_{DO} (ten začíná v počátku ohřevu varnice – prakticky na vstupní komoře výparníku – a končí v tom místě výparníku, kde se dosáhne teplota varu – tedy x=0), úsek odpařovací L_{OD} (ten končí v tom místě výparníku, kde je veškerá voda odpařena – tedy x=1) a úsek přehřívací L_{PR} (ten končí v tom místě, kde je ukončeno otápění varnice – prakticky je to místo zaústění varnic do výstupní komory výparníku).

Při nesouladu mezi napájením a tepelným příkonem výparníku se konec výparníku (x=1) posouvá směrem k přehříváku (***L**PR*** se zmenšuje) nebo od přehříváku (***L**PR*** se prodlužuje). (Viz též kap. 4.1.1, **obr. 4.9**; **4.10**; **4.11** a **4.12**) Zapojení kotle podle **obr. 1a)** odpovídá provozu kotle v regulačním provozním (průtočném) režimu, ale při takovém zapojení by kotel nemohl být uveden do provozu a nemohl by být provozován s nižším výkonem než je minimální přípustný výkon při průtočném režimu, resp. než je minimální přípustný průtok vody výparníkem. Udává se ve výši cca 40 % (při najíždění) až 55% jmenovitého výkonu (při minimálním průtočném výkonu) a je stanoven tak, aby bylo zajištěno potřebné chlazení trubek výparníku.



Obr. 4.93 *Průtok výparníkem – oběhové čerpadlo pro najíždění (schéma 1b) [39]*

Proto jsou ve skutečnosti tyto kotle zapojeny podle schéma na **obr. 1b)**. Mezi výparníkem a přehřívákem je zařazen separátor, který je trvale průtočný – bez oddělovacích armatur. Při provozu kotle v průtočném režimu protéká separátorem mírně přehřátá pára – je tedy zbytečný, ale funkci výparníku nenarušuje. Při najíždění kotle (nebo při výkonu nižším než je minimální průtočný výkon) umožňuje toto zapojení přejít z průtočného režimu na nucenou cirkulaci ve výparníku, kterou zajišťuje oběhové čerpadlo ***OC***, které je napojeno před ohřívák vody (cirkulace vody: separátor – OČ – EKO – výparník).

Množství cirkulující vody ***M**C*** se řídí regulačním ventilem ***RV*** (za oběhovým čerpadlem ***OC***) podle hladiny v separátoru a množství napájecí vody ***M**NV*** udržuje regulace napájení (podle výkonu kotle ***M**P*) tak, aby průtok výparníkem ***M**VYP*** neklesl pod přípustný minimální průtok (minimální průtočný výkon).

Průtok vody přes výparník ***M**VYP*** (viz **obr. 4.93**) je z počátku konstantní, ale jakmile parní výkon ***M**P*** dosáhne hodnoty min. průtočného výkonu tak se začne zvyšovat podle parního výkonu ***M**P*.** (Průtok výparníkem ***M**VYP*** v průtočném režimu kotle je o množství vstřikované vody menší než je parní výkon ***M**P*). Množství vody, které cirkuluje ***OC*** se postupně snižuje. Odpařená pára se v separátoru uvolňuje a odvádí se do přehříváku.

Průtoky pracovního média kotlem při cirkulačním režimu lze popsat rovnicemi

$$M_{VYP} = M_{NV} - M_{VS} + M_C$$
$$M_{PQ} = M_{VYP} - M_C \qquad (4\text{-}43)$$
$$M_P = M_{PQ} + M_{VS}$$

kde:

M_{VYP}	- je průtok média výparníkem	[kg/s]
M_{NV}	- je množství napájecí vody do kotle	[kg/s]
M_{VS}	- je množství vstřikované vody	[kg/s]
M_C	- je množství cirkulující vody OC	[kg/s]
M_{PQ}	- je množství páry odpařené ve výparníku	[kg/s]
M_P	- parní výkon kotle	[kg/s]

Jakmile se parní výkon kotle M_P zvýší nad minimální průtočný výkon výparníku tak se odstaví oběhové čerpadlo ***OC*** a vypustí se odloučená voda ze separátoru, kterým začne protékat mírně přehřátá pára z výparníku – kotel přejde z nucené cirkulace ve výparníku na průtočný režim.

Průtoky pracovního média při průtočném režimu lze popsat rovnicemi

$$M_{VYP} = M_{NV} - M_{VS}$$
$$M_{PQ} = M_{VYP} \qquad (4\text{-}44)$$
$$M_P = M_{PQ} + M_{VS}$$

Při poklesu výkonu kotle M_P na hodnotu minimálního průtočného výkonu (35–40 %) výparníku se množství napájecí vody M_{NV} udržuje na této hodnotě. Při dalším snížení tepelného příkonu (parního výkonu M_P) bude z výparníku vystupovat parovodní směs a po odloučení vody se v separátoru vytvoří hladina. V této fázi přejde kotel z průtočného režimu na nucenou cirkulaci ve výparníku, kterou zajistí oběhové čerpadlo ***OC***. Množství napájecí vody M_{NV} se bude regulovat tak, aby byl dodržen minimální průtok vody ve výparníku M_{VYP} a regulačním ventilem ***RV*** za oběhovým čerpadlem se bude udržovat hladina vody v separátoru.

Vzhledem k hydrodynamické charakteristice výparníku je teplota páry na výstupu z jednotlivých varnic značně rozdílná. Aby se rozdíly teplot udržely v přijatelných mezích, musí se provést clonkování každé varnice – potřebná tlaková ztráta musí být nastavena při minimálním průtoku 35 – 40 %, takže při jmenovitém výkonu má výparník značnou tlakovou ztrátu. Rozdíly teplot na výstupu z varnice zvyšují poruchovost výparníku. U starších průtočných kotlů typu Benzon (např. průtočné kotle pro bloky 200 MW a.s. ČEZ) není ochrana výparníku při najíždění a při minimálním výkonu provedena přechodem na nucenou cirkulaci, kotle nemají oběhové čerpadlo ***OČ***. Ochrana výparníku je provedena tak, že napáječkou se udržuje průtok vody M_{NV} na úrovni přípustného minimálního průtočného množství. (Průtok vody má charakter jako je na **obr. 4.94**) Neodpařená voda se v separátoru odloučí a vypouští se např. do napájecí nádrže bloku. Hladina v separátoru se reguluje regulačním ventilem ve vypouštěcím potrubí. Takto zapojený výparník pracuje vždy v průtočném režimu. Popsaný systém bez ***OČ*** (byť zdánlivě jednodušší) má řadu provozních nevýhod [39] (delší doba najíždění, větší spotřeba energie, nízkoteplotní koroze atd.) a dnes se již u nových kotlů nepoužívá.

b) Průtočné kotle s pevným koncem odpařování (Nazývají se někdy systém Sulzer)

Základní schémata zapojení tohoto kotle jsou uvedena na **obr. 4.92** pod bodem 2, a, b, c). Charakteristické pro tyto kotle je ukončení výparníku separátorem v místě, kde je ještě parovodní směs, tedy v místě s vysokým obsahem páry, např. x = 0,94. Výparník má dohřívací L_{DO} a odpařovací část L_{OD}, chybí (ve srovnání s kotlem s pohyblivým koncem odpařování) část přehřívací L_{PR}. Při každém provozním stavu kotle (najíždění, odstavování, jakýkoliv výkon) dochází v separátoru k odlučování páry, která se odvádí do přehříváku, a vody, která se ze separátoru řízeně odvádí tak, aby byla udržena její hladina v požadované úrovni.

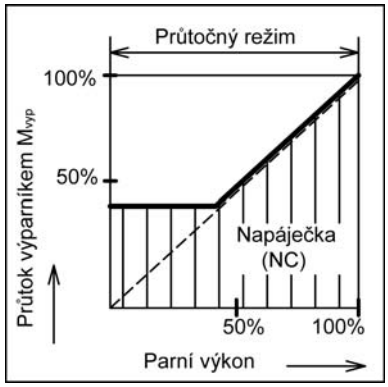
Při nesouladu mezi napájením a tepelným příkonem do výparníku se konec výparníku neposouvá (je dán separátorem), ale mění se hodnota suchosti x na výstupu z výparníku. (Viz též kap. 4.1.1, **obr. 4.13** a **4.14**).

Základní tři provedení tohoto výparníku jsou na **obr. 4.92** v bodě 2) uvedena pod body a; b; c.

b1) Průtočný kotel s regulovaným odpouštěním odluhu je uveden na schématu 2a).

Výparník tohoto kotle je vytvořen např. ze svazku paralelních trubek, které jsou vinuty např. ve šroubovici po výšce spalovací komory. Výparník je navržen tak, že na výstupu je parovodní směs s vysokou suchostí, např. x = 0,94.

Odloučená voda se ze separátoru odvádí vypouštěcím potrubím, např. do nádrže napájecí vody. Množství vypouštěné odloučené vody $\boldsymbol{M_O}$ se řídí podle hladiny vody v separátoru – stále se odpouští podle suchosti $\boldsymbol{x}$



Obr. 4.94 *Průtok výparníkem – trvalé odpouštění (schéma 2a) [39]*

Množství napájecí vody $\boldsymbol{M_{NV}}$ řídí regulátor napájení v souladu s parním výkonem, ale tak aby průtok přes výparník $\boldsymbol{M_{VYP}}$ neklesl pod minimální přípustné množství. Průběh průtoku vody při najíždění a při provozním režimu je znázorněn na **obr. 4.94**.

Průtoky pracovního média v kotli lze vyjádřit rovnicemi

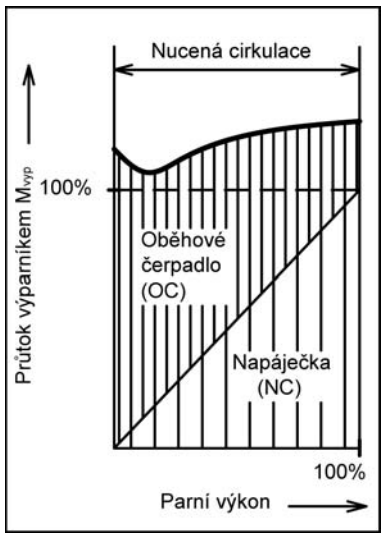
$$M_{VYP} = M_{NV} - M_{VS}$$
$$M_{PQ} = M_{VYP} - M_O \qquad (4\text{-}45)$$
$$M_P = M_{PQ} + M_{VS}$$

kde: M_O – je množství odloučené (odluhované) vody ze separátoru [kg/s].

Výparník při všech provozních stavech kotle (najíždění, odstavování, jakýkoliv výkon) pracuje v průtočném režimu. Nevýhodou tohoto zapojení je trvalé odpouštění vody na bodu varu (odluh), pro které dnes již není důvod. Nevýhodou je i to, že při najíždění se neprohřívá ***EKO*** a tím ani ohřívák vzduchu – u tohoto se proto musí provést opatření pro ochranu proti nízkoteplotní korozi. Proto se dnes u nových kotlů toto zapojení již nepoužívá.

b2) Průtočný kotel se superponovanou cirkulací je znázorněn na schématu 2c).

V tomto případě je výparník proveden ze svislých trubek, podobně jako u bubnového kotle s přirozenou cirkulací. Při všech provozních stavech (najíždění, odstavování, jakýkoliv výkon) se výparník provozuje s nucenou cirkulací, kterou zajišťuje oběhové čerpadlo ***OČ*** umístěné mezi ohřívákem vody a výparníkem – je tedy zapojeno v sérii s napáječkou ***NČ***.



Obr. 4.95 *Průtok výparníkem – superponovaná cirkulace (schéma 2c) [39]*

Odloučená voda ze separátoru je přivedena na vstup oběhového čerpadla a mísí se s vodou přivedenou z ohříváku vody.

Průtok vody výparníkem je znázorněn na **obr. 4.95**. Výparník se provozuje jen s nucenou cirkulací, průtok přes výparník M_{VYP} se s výkonem kotle mění jen málo – výparník má takřka plochou charakteristiku.

Průtoky média lze vyjádřit rovnicemi:

$$M_{VYP} = M_{NV} - M_{VS} + M_C$$
$$M_{PQ} = M_{VYP} - M_C \qquad (4\text{-}46)$$
$$M_P = M_{PQ} + M_{VS}$$

b3) Průtočné kotle s kombinovaným režimem ve výparníku [41] - do výkonu kotle cca 75% se výparník provozuje s pevným koncem odpařování, tedy s cirkulací vody ve výparníku, a při vyšších výkonech jako průtočný s pohyblivým koncem odpařování. Schéma zapojení je na **obr. 4.92 – 2/b2.** (Průtok výparníkem je obdobný jako na **obr.4.93**, průtočný provoz je až od výkonu 75%).Výparník kotle je proveden ze svazku paralelních trubek šroubovitě vinutých po výšce spalovací komory, ale může být (za určitých podmínek) proveden i ze svislých trubek.

Při najíždění kotle, a až do výkonu kotle cca 75 %, zajišťuje průtok výparníkem oběhové čerpadlo ***OČ***, které je v tomto případě umístěno ve vedlejší větvi – pod separátorem. (Může ale být umístěno i v hlavní větvi, tak jako na **obr. 2c**, ale musí být provedeno s obtokem, aby byl možný průtočný provoz.

Průtoky pracovního média v kotli při cirkulačním režimu lze vyjádřit rovnicemi:

$$M_{VYP} = M_{NV} - M_{VS} + M_C$$
$$M_{PQ} = M_{VYP} - M_C \qquad (4\text{-}47)$$
$$M_P = M_{PQ} + M_{VS}$$

Při najíždění kotle se ve výparníku udržuje minimální průtok M_{VYP} ve výši cca 40 %, vypouštění M_O je uzavřeno – používá se jen pro odvod vodní špičky, stejně jako v případě dle **obr. 4.100**.

Po zvýšení výkonu kotle na cca 75 % se oběhové čerpadlo ***OČ*** odstaví a výparník se provozuje v průtočném režimu (s pohyblivým koncem odpařování). Průtoky pracovního média lze v tomto případě vyjádřit rovnicemi:

$$M_{VYP} = M_{NV} - M_{VS}$$
$$M_{PQ} = M_{VYP} \qquad (4\text{-}48)$$
$$M_P = M_{PQ} + M_{VS}$$

Při provozu v cirkulačním režimu (0-75 %) je teplota pracovního média u všech paralelních varnic stejná (teplota varu), namáhání výparníku je příznivější.

Při provozu v průtočném režimu (75-100 %) je pro zajištění přípustných rozdílů teplot páry z varnic zapotřebí menší tlaková ztráta clonek a tlaková ztráta výparníku je nižší než u průtočného kotle dle **obr. 4.92-1**). Hlavní rozdíly mezi provozem kotle v cirkulačním a průtočném režimu lze definovat takto (viz též **obr. 4.68**).

- **Oběhový provoz** (na výstupu z výparníku je parovodní směs ***x***)
  - **Zvýší se průtok napájecí vody**
    Průtok syté páry se sníží a tím se sníží i průtok a tlak páry za kotlem, teplota páry za kotlem se zvýší. Zvýší se podíl odloučené vody na bodu varu, hladina v separátoru se zvýší – astatický průběh.
  - **Zvýší se tepelný příkon**
    Průtok syté páry se zvýší a tím se zvýší i průtok a tlak páry za kotlem, teplota páry za kotlem se zvýší. Sníží se podíl odloučené vody, hladina v separátoru se sníží – astatický průběh.
  - V obou případech má odezva hladiny v separátoru astatický průběh – bez zásahu regulátoru se neustalí v novém rovnovážném stavu.
  - Teplota pracovního média na výstupu ze všech varnic je stejná – teplota varu.

- **Průtočný režim** (na výstupu z výparníku je mírně přehřátá pára.)
  - **Zvýší se průtok napájecí vody**
    Konec odpařování se posune směrem k přehříváku. Teplota páry za výparníkem (i za kotlem) se sníží, průtok a tlak páry za kotlem se zvýší. Parametry se ustálí v novém rovnovážném stavu.
  - **Zvýší se tepelný příkon**
    Konec odpařování se posune k počátku výparníku. Teplota páry za výparníkem (i za kotlem) se zvýší a množství páry za kotlem se nezmění a po ustálení zůstane přibližně stejný i tlak páry za kotlem. Parametry se ustálí v novém rovnovážném stavu.
  - V obou případech z varnic vystupuje přehřátá pára – rozdíly teploty u jednotlivých varnic se mohou značně lišit.

4.3.2.1 Základní způsoby regulace napájení průtočných kotlů

Jak již bylo uvedeno, tak průtočné kotle vzhledem k zapojení a provedení výparníku potřebují náročnější regulační systém než kotle bubnové s přirozenou cirkulací.

Vztahy mezi hlavními vstupními veličinami (množství paliva M_{PV}, množství napájecí vody M_{NV}) a výstupními veličinami (tlak páry p, teplota páry T) průtočného kotle jsou schématicky znázorněny na **obr. 4.67**. (Působení dalších poruch z není naznačeno.)

Při návrhu regulace průtočného kotle máme tedy v principu k dispozici dvě alternativy postupu

- tlak páry za kotlem regulovat změnou množství přivedeného paliva M_{PV} a teplotu páry za kotlem změnou množství napájecí vody M_{NV},
- tlak páry za kotlem regulovat změnou množství napájecí vody M_{NV} a teplotu páry za kotlem změnou množství přivedeného paliva M_{PV}.

Optimální návrh regulace pak můžeme provést jen na základě zhodnocení statických a dynamických charakteristik (vlastností) průtočného kotle.

Přechodové charakteristiky tlaku a teploty páry za kotlem u průtočných kotlů jsou uvedeny v kap. 4.2.2.3 na **obr. 4.68**, a přechodové charakteristiky průtočných výparníků jsou uvedeny v kap. 4.1.1 na **obr. 4.9** až **4.14**. Jak je vidět z **obr. 4.68**, tak u průtočného kotle s pevným koncem odpařování se odezva tlaku páry p na změnu

napájení ΔM_{NV} projeví s malým zesílením a opačným směrem – při zvětšení průtoku M_{NV} - tlak páry za kotlem klesá. Proto u kotlů s pevným koncem odpařování je vhodnější provést regulaci tlaku páry za kotlem změnou množství přivedeného paliva M_{PV} – odezva tlaku páry p se projeví s větším zesílením a stejným směrem.

U kotle s pohyblivým koncem odpařování (**obr. 4.68b**) nelze tak jednoznačně rozhodnout, neboť odezva tlaku páry p za kotlem má při změně tepelného příkonu M_{PV} i změně průtoku napájecí vody M_{NV} přibližně stejné zesílení a v obou případech působí stejným směrem – oba způsoby lze v principu použit. V praxi se však běžně používá i u kotlů s pohyblivým koncem odpařování regulace tlaku páry za kotlem změnou množství přivedeného paliva M_{PV}.

Jestliže se regulace tlaku páry provede změnou množství přivedeného paliva, tak (v souladu s **obr. 4.67**) se regulace teploty páry za kotlem T musí provést změnou průtoku napájecí vody M_{NV}. Takový systém regulace výstupní teploty páry je však nepoužitelný, dynamické vlastnosti systému jsou nepříznivé (velká časová konstanta, malé zesílení, odezva se projeví opačným směrem atd.) a i při kvalitním regulačním obvodu by nebylo možné udržet teplotu páry v požadovaných tolerancích.

Řešit lze tento problém např. tak, že regulovaná soustava (průtočný kotel) se rozdělí na menší úseky (které mají příznivější dynamické vlastnosti) a zavede se pomocná akční veličina. Vznikne tím pro regulaci teploty páry samostatný regulační obvod, pro jehož návrh lze využít zkušenosti získané z regulace bubnových kotlů. Příklad takového rozdělení regulované soustavy je na **obr. 4.69**.

Průtočný kotel je rozdělen na dvě části – výparník a přehřívák. Akčními veličinami regulace výparníku jsou přívod paliva M_{PV} a průtok napájecí vody M_{NV}. Hlavní regulovanou veličinou je tlak páry p_p za kotlem a pomocnou veličinou je stav pracovního média a za výparníkem, který může být definován např. suchostí x parovodní směsi (pak a = x, u kotlů s pevným koncem odpařování) nebo teplotou páry za výparníkem t_p (pak a = t_p, u kotlů s pohyblivým koncem odpařování). Stav páry a za výparníkem (suchost x nebo teplota t_p) se reguluje množstvím napájecí vody $R2$ a tlak páry p_p se reguluje množstvím přivedeného paliva $R1$. Hlavními poruchovými veličinami jsou změna výhřevnosti Q_a a změna teploty napájecí vody t_{NV}. Regulovanou veličinou u přehříváku páry je teplota přehřáté páry za kotlem t_P, akční veličinou je množství vstřikované vody M_{VS}. Hlavními poruchovými veličinami jsou tepelný příkon Q do přehříváku (ze spalin – rychlost spalin, zašpinění) a množství páry M_P proudící z výparníku do přehříváku. U kotlů s pohyblivým koncem odpařování je to i měnící se délka výparníku L_V (resp. měnící se délka přehřívákové části výparníku).

Vzhledem k odlišným dynamickým vlastnostem výparníku u průtočných kotlů s pevným a pohyblivým koncem odpařování se musí odlišně řešit i jejich regulace.

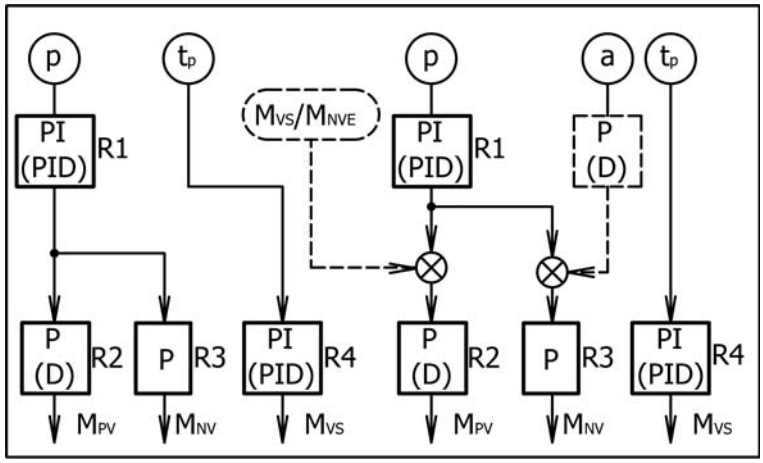
4.3.2.1.1 Regulace průtočných kotlů s pohyblivým koncem odpařování

Obecně by regulace tohoto kotle měla zaručit udržování přívodu paliva a průtoku napájecí vody na takové úrovni, aby:

- regulační odchylky tlaku páry za kotlem byly minimální
- a konec odpařovací zóny výparníku měnil svoji polohu co nejméně a omezil se tak vznik poruchy pro regulaci teploty přehřáté páry

Původně užívaná regulace průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování a její vývoj jsou naznačeny na **obr. 4.96**. Charakteristický pro tuto etapu byl společný regulátor pro přívod paliva a pro průtok napájecí vody.

Původní schéma je v levé části obrázku. Přívod paliva M_{PV} a průtok napájecí vody M_{NV} se reguloval společným regulátorem ***R1*** tlaku páry, regulace teploty páry měla vlastní regulátor ***R4***. Aby se zabránilo přechodným posuvům konce odpařování, musí se oba signály (na množství paliva i na průtok napájecí vody) navzájem přizpůsobit – to se provedlo nastavením regulátorů ***R2*** a ***R3***. Tento regulační obvod jakž takž vyhověl při regulaci poruch na straně odběru páry, ale nesplnil očekávání při regulaci poruch na straně paliva.



p – tlak páry za kotlem t_p – teplota páry za kotlem M_{VS} – množství vstřiku
M_P – množství přivedeného paliva a – pomocná regulovaná veličina výparníku
M_{NV} – množství nap. vody

Obr. 4.96 *Vývoj regulace průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování [4]*

Proto byl doplněn o další pomocné regulované veličiny, které jsou vyznačeny čárkovaně v pravé části obrázku. Pro regulaci množství přivedeného paliva M_{PV} se zavedl pomocný signál poměru M_{VS}/M_{NVE} (vstřikované vody M_{VS} a průtoku napájecí vody do ohříváku vody M_{NVE}), jako nepřímý ukazatel polohy konce odpařování. Přímý pomocný signál o poloze konce odpařování ***a*** byl připojen k regulátoru ***R3*** průtoku napájecí vody M_{NV}.

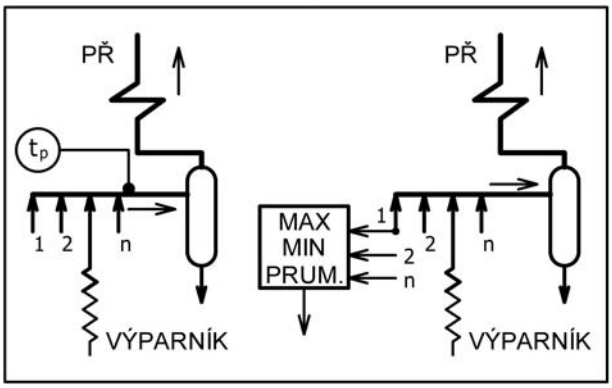
Od regulace se společným regulátorem ***R1*** přívodu paliva a napájecí vody se ustoupilo především proto, že jakost regulace nevyhovovala pro elektrárenské bloky zapojené do regulace frekvence a ani pro kotle spalující méněhodnotná paliva.

Dnes se proto u průtočných kotlů s pohyblivým koncem odpařování používá regulace se samostatnými regulačními obvody tlaku páry (výkonu kotle), teploty páry a napájení, přičemž jednotlivé obvody jsou propojeny příčnými vazbami.

Regulační obvod tlaku páry (výkonu kotle) je popsán v kap. 4.1.2 a regulační obvod teploty páry v kap. 4.2.2, 4.2.3 a 4.2.4.

Vývoj regulace napájení se samostatným regulátorem napájení je naznačen na **obr. 4.98** a **4.99**.

Předpokladem pro správný návrh regulačního obvodu napájení průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování je najít (zvolit) vhodnou regulovanou veličinu (***a*** – viz **obr. 4.69; 4.96**), která by přímo souvisela s polohou konce odpařování a která by měla pokud možno malé dopravní zpoždění. Tato veličina má zásadní význam pro kvalitu regulace napájení.



Obr. 4.97 *Výběr regulované veličiny pro regulaci napájení [4]*

Jako regulovaná veličina pro regulaci napájení přichází do úvahy (a byly ověřovány) např. tyto veličiny: (viz **obr. 4.97**)

a) Teplota mírně přehřáté páry na výstupu z výparníku.
Tento signál se často využívá, ale jeho nevýhodou je poměrně velké časové zpoždění.
Uvážíme-li, že výparník je proveden z více paralelních trubek (např. 128 u kotle pro blok 200 MW), pak je třeba definovat ***co je teplota páry za výparníkem***, když teploty z jednotlivých varnic se liší, např. o 50 K.

a_1) Může to být např. tzv. průměrná teplota, která se získá měřením teploty ve společném potrubí k separátoru – viz schéma v levé části **obr. 4.97**.

Aby regulace měla smysl, musí se teplota páry t_p za výparníkem udržovat na hodnotě o Δt_p vyšší, než je teplota syté páry při skutečném tlaku v daném okamžiku. Tzn., že žádaná hodnota této teploty $t_{pž}$ se musí generovat podle okamžitého tlaku páry. Čidlo pro měření teploty t_p za výparníkem navíc musí být v dostatečné vzdálenosti od poslední varnice tak, aby v žádném případě na něj nedopadaly kapičky vlhkosti o teplotě varu, pokud by z některé z varnic vystupovala mokrá pára. (V místě měření musí být veškerá vlhkost odpařena.)

Tato průměrná teplota není pro regulaci vhodná, pokud z některých varnic vystupuje mokrá pára a z jiných pára přehřátá, nebo v případě, kdy ze všech varnic vystupuje sice přehřátá pára, ale s velmi rozdílnými teplotami. (V takových případech pro zrovnoměrnění parametrů na výstupu z jednotlivých varnic se musí na vstupu do varnic zabudovat clonky pro zlepšení hydrodynamických charakteristik varnic – tak aby rozdíly v teplotě páry byly co nejmenší, připouští se obvykle max. 30 K.)

a_2) Může to být i nejvyšší (nejnižší, či průměrná) hodnota změřené teploty páry na výstupu z jednotlivých varnic výparníku (viz pravá část **obr. 4.97**). Určení teploty se provede v členu pro výběr maxima (minima nebo průměrné hodnoty). Teplota páry se v tomto případě měří na výstupu z každé varnice a může se měřit i jako teplota stěny neotápěné varnice – tj. např. před zaústěním varnice do sběrné komory.

Předpokladem regulace je, že na výstupu ze všech varnic je přehřátá pára (nesmí být parovodní směs) a rozdíly teplot jednotlivých varnic jsou minimální – tzn., že u jednotlivých varnic byly zabudovány clonky pro úpravu jejich hydrodynamických charakteristik.

b) Rozdíl teploty zvoleného bodu ve výparníku (v oblasti přehřáté páry) a teplot několika míst v přechodové oblasti výparníku. Teplotový rozdíl lze měřit jediným vícenásobným termočlánkem s teplými a studenými konci zapojenými proti sobě. Nevýhodou této regulované veličiny je velké časové zpoždění [1].

c) Vlhkost páry na začátku přechodové oblasti (končící odpařování), která by se měřila přímo. Problém je spolehlivé měřící čidlo vlhkosti (suchosti) páry a výběr reprezentativní varnice, na níž by se měření provedlo. (Byla by to ideální regulovaná veličina).

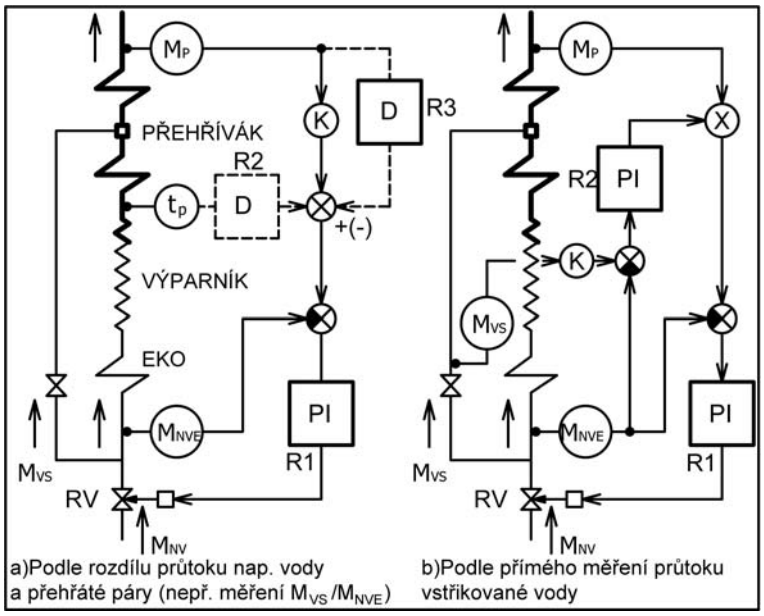
d) Tlakový rozdíl před a za výparníkem. Výhodou proti předcházejícím veličinám by mohlo být jednodušší přístrojové vybavení (nezávisí na počtu paralelních trubek) a možná lepší dynamické vlastnosti. Potíž je v tom, že tento tlakový rozdíl se mění s výkonem kotle. Nepoužívá se.

e) Rozdíl průtoku páry M_P a napájecí vody M_{NVE} – viz **obr. 4.98a**).

Tím, že se průtok napájecí vody měří před vstupem do ohříváku vody M_{NVE}, tedy za odběrem vody pro regulaci teploty vstřikem M_{VS}, se nepřímo měří i poloha konce odpařování.

f) Přímé měření rozdílu vstřikované vody M_{VS} a napájecí vody M_{NVE} – viz **obr. 4.98b**). Signál od změny průtoku vstřikované vody M_{VS} má však nevhodné vlastnosti, neboť je výsledkem činnosti celého regulačního obvodu teploty páry. **Alternativy vývoje regulace napájení** jsou schématicky naznačeny na **obr. 4.98.**

Jsou zde uvedeny dvě možnosti zapojení, které se dříve používaly. Na **obr. 4.98a**) je alternativa s **nepřímým měřením poměru vstřikované a napájecí vody** M_{VS}/M_{NVE} (viz též bod e). Toto schéma je jakousi obdobou třísignálové regulace napájení bubnových kotlů s tím rozdílem, že chybí měření hladiny.



Obr. 4.98 *Alternativy vývoje regulace napájení průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování [1]*

Základní schéma je vyznačeno plnou čárou. Tím, že průtok napájecí vody pro regulaci napájení M_{NVE} se měří až za odběrem vody pro vstřikovou regulaci teploty, se nepřímo měří i poloha konce odpařování. Konstanta ***K*** se nastaví na hodnotu odpovídající průtoku vstřikované vody M_{VS} při jmenovitém výkonu kotle. Tak např. je-li průtok vstřikované vody M_{VS} 6 % z parního výkonu, nastaví se konstanta ***K*** na hodnotu 0,94. Na regulátor napájení ***R1*** jde v tomto případě nulová regulační odchylka (M_p . 0,94 = M_{NVE}).

Při poruše (např. změna výhřevnosti) se posune konec odpařování a změní se teplota páry za výparníkem t_p a tím i teplota páry na přehřívácích, což vyvolá (zásah regulátoru teploty páry) změnu množství vstřikované vody M_{VS}. Tím vznikne regulační odchylka na regulátoru napájení ***R1***, který upraví napájení regulačním ventilem ***RV***. Podmínkou správné funkce této regulace je přesné měření průtoku vody M_{NVE} a páry M_p (korekce na tlak a teplotu) neboť chyba měření se přenáší jako regulační odchylka na regulátor napájení ***R1***. Rozdíl průtoku (M_P – M_{NVE}) nemá však vhodné dynamické vlastnosti, neboť je vlastně vyvolán změnou množství vstřikované vody M_{VS}, což je výsledek činnosti celého obvodu regulace teploty páry.

Proto se základní schéma (vyznačené plnou čárou) doplňuje pomocnými signály – tyto jsou vyznačeny čárkovaně a jsou to:

- teplota mírně přehřáté páry t_P za výparníkem, regulátor ***R2***. Její derivace má zachytit změny polohy konce odpařování vyvolané zejména vnitřními poruchami (změny tepelného příkonu)
- průtok páry M_P za kotlem, jehož derivace (R3) má stabilizovat napájení při vnějších poruchách.

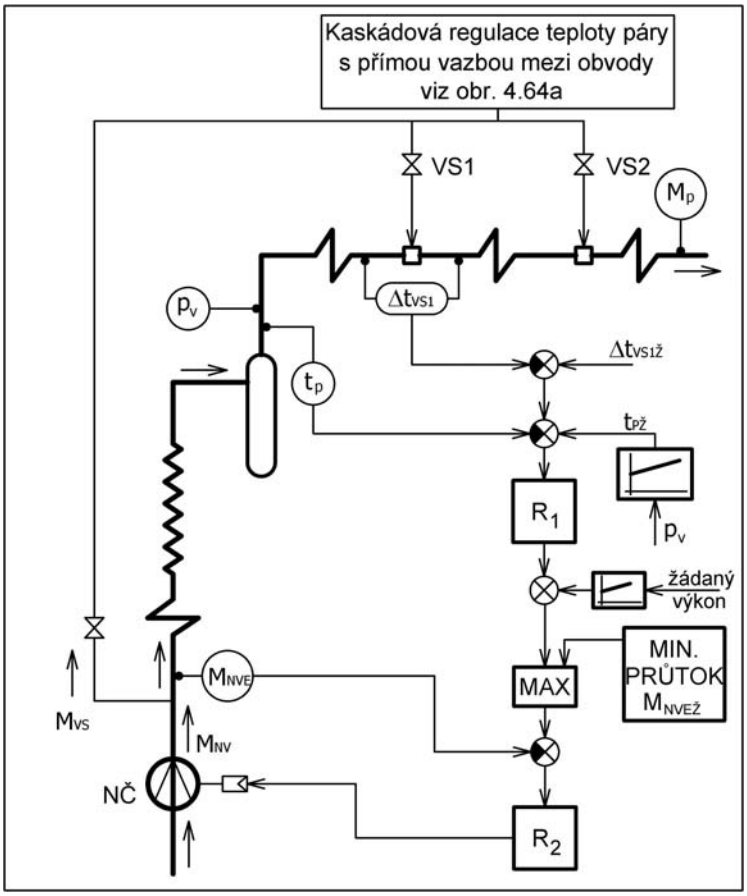
Alternativa s přímým měřením rozdílu průtoku vstřikované a napájecí vody je na **obr. 4.98b.**

Uvádí se [1], že ve srovnání s předchozí variantou (**obr. 4.98a**) nepřináší toto zapojení žádné podstatné výhody. Signál od změny průtoku vstřikované vody M_{VS} je opět výsledkem činnosti celého regulačního obvodu teploty páry a má proto nevhodné dynamické vlastnosti. Vzhledem k velkému zpoždění tohoto signálu je do obvodu zařazen další regulátor ***R2*** (korekční) s malým proporcionálním zesílením a velkou integrační časovou konstantou. Protože rozdíl průtoku vstřikované a napájené vody ($M_{VS} – M_{NVE}$) se mění s výkonem kotle (posouvá se konec odpařování) slučuje se tento signál (z R2) se signálem parního výkonu M_P v násobícím členu ×.

Příklad vhodné regulace napájení průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování je vidět na **obr. 4.99.**

Akčním členem napájení je napájecí čerpadlo ***NČ*** s regulací otáček frekvenčním měničem. (Může to být samozřejmě i regulační napájecí ventil – tak jako je uvedeno v předchozích schématech, viz např. **obr. 4.87; 4.88 a 4.89**).

Průtok napájecí vody M_{NV} do kotle se udržuje na potřebné hodnotě tak, aby teplota páry za výparníkem t_P byla v souladu s její žádanou hodnotou $t_{PŽ}$. Podmínkou této regulace je, aby pro regulaci teploty páry za kotlem byla použita kaskádová regulace s přímou vazbou mezi jednotlivými regulačními obvody (vstřiky), např. podle zapojení dle **obr. 4.64a**).



Obr. 4.99 *Příklad regulace napájení průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování*

Vazbu mezi regulací teploty páry za kotlem a regulací napájení zprostředkovává teplota páry t_P za výparníkem a ochlazení páry na prvním vstřiku Δt_{VS1}.

Regulace napájení je tak převedena na regulaci teploty páry t_P za výparníkem regulátorem ***R1***. Regulační odchylka ($t_{PŽ} – t_P$) se koriguje (sčítá se) regulační odchylkou teplotní diference na vstřiku ***VS1*** ($\Delta t_{VS1Ž}$ - Δt_{VS1}). Výstupní signál z regulátoru teploty ***R1*** se pak dále koriguje (sčítá se) upraveným signálem od výkonu kotle. Výsledný signál, nebo nastavený minimální průtok výparníkem $M_{NVEŽ}$ (výběr provede člen výběru maxima), se pak porovnává se skutečným průtokem napájecí vody do výparníku M_{NVE}. Teplotu páry za výparníkem t_P je výhodné stanovit např. podle **obr. 4.97** jako průměrnou hodnotu (schéma v pravé části obrázku) z teplot páry na výstupu z jednotlivých varnic. (Výhoda spočívá v tom, že je známá i

okamžitá max. a min. teplota na výstupu z konkrétní varnice, takže lze posoudit kvalitu seřízení výparníku.) Žádaná hodnota teploty za výparníkem $t_{PŽ}$ se generuje podle okamžité hodnoty tlaku páry p_v za výparníkem.

Regulace napájení při najíždění a nízkých výkonech kotle (Pohyblivý konec odpařování.)

Nejjednodušším zařízením pro najíždění průtočných kotlů se suchými přehříváky je separátor umístěný mezi výparníkem a přehřívákem páry (viz **obr. 4.92 – 1b**), ale bez oběhového čerpadla ***OČ***. Odloučená voda ze separátoru se vypouští do najížděcího expandéru. Systém je jednoduchý, ale pro častější najíždění je nehospodárný. Dochází ke ztrátě napájecí vody a během najíždění se rovněž neprohřívá ***EKO*** a ani ohřívák vzduchu – u něj se musí provést opatření k zabránění nízkoteplotní koroze. Proto se dnes pro najíždění využívá zapojení s oběhovým čerpadlem – viz **obr. 4.92 - 1b**.

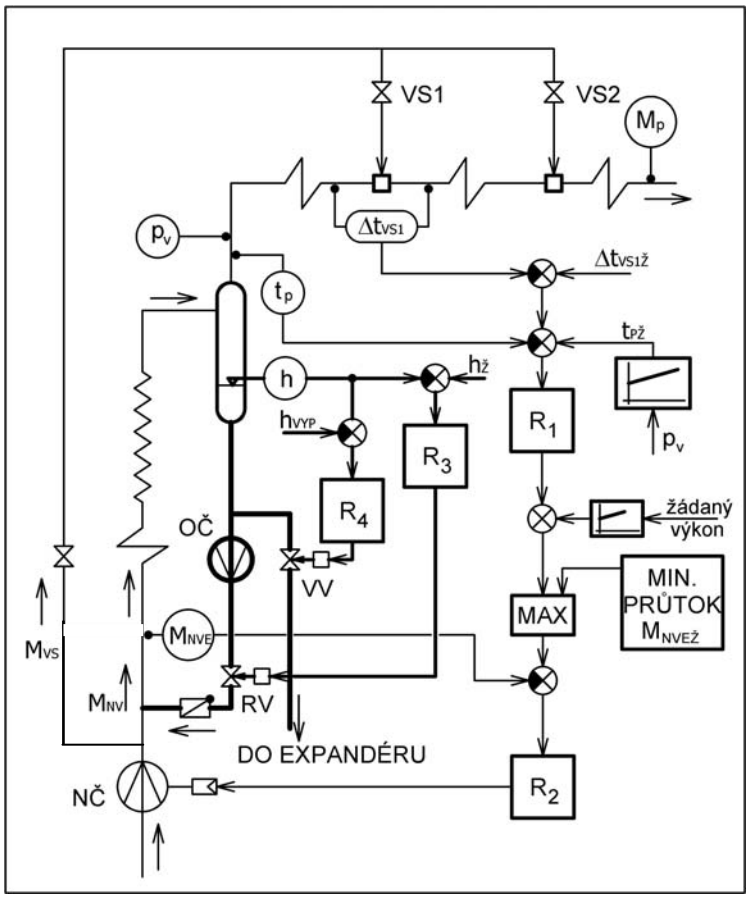
Regulační obvod napájení kotle v průtočném režimu (**obr. 4.99**) automaticky (prostřednictvím členu pro výběr max.) udržuje průtok vody do výparníku M_{NVE} vždy vyšší, než je nastavený minimální přípustný průtok $M_{NVEŽ}$.

V průtočném režimu tedy pracuje kotel jen pokud jeho parní výkon leží v rozmezí $M_{Pmax.} \geq M_P \geq M_{NVEŽ} + M_{VS}$

Při parním výkonu nižším než minimální výkon $M_P < M_{NVEŽ} + M_{VS}$ není průtočný provoz kotle možný (nestabilita výparníku) a musí se přejít na oběhový režim ve výparníku – na výstupu z výparníku je parovodní směs a přebytečná voda na bodu varu se odlučuje v separátoru, oběh vody ve výparníku zajišťuje oběhové čerpadlo, viz **obr. 4.92**.

Při najíždění cirkuluje ve výparníku zpočátku voda o teplotě nižší než je teplota varu. Tato se postupně ohřívá a odpařuje a v určité fázi najíždění (podle tepelného příkonu) vzniká tzv. vodní špička, při níž se do separátoru vytlačí v krátkém intervalu velké množství vody z výparníku (viz též kap. 4.3.1.2 Regulace hladiny při najíždění). Oběhové čerpadlo zajišťuje spolu s napájecím čerpadlem potřebný průtok výparníkem $M_{NVEŽ}$, takže přebytečné množství vody (při vodní špičce) se musí okamžitě odvést.

Schéma regulace při najíždění a nízkých výkonech je uvedeno na **obr. 4.100**. Tence je naznačeno schéma regulace napájení v průtočném režimu, silně je



Obr. 4.100 *Regulace napájení průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování při najíždění a nízkých výkonech (oběhový režim) [39]*

vyznačeno schéma regulace v oběhovém režimu (najíždění a nízký výkon).

Při snížení výkonu kotle pod minimální výkon se vytvoří v separátoru hladina a kotel přejde z průtočného režimu na režim oběhový s oběhovým čerpadlem ***OČ***. Regulace napájení (R1, R2) zůstává v provozu (udržuje se průtok $M_{NVEŽ}$) a průtok ***OČ*** nastavuje regulátor hladiny ***R3***, akčním členem je regulační ventil ***RV*** za oběhovým čerpadlem. V okamžiku vodní špičky se hladina v separátoru zvýší a jakmile dosáhne hodnoty h_{VYP}, začne regulátor vypouštění ***R4*** (proporcionální) řídit odpouštění přebytečné vody vypouštěcím ventilem ***VV*** tak, aby nedošlo k přestřiku vody do přehříváku.

Regulátor napájení (R1, R2, R3) je stále v činnosti a po odpuštění přebytečné vody ze separátoru se vypouštěcí ventil ***VV*** uzavře a pokračuje regulace napájení v oběhovém režimu. (Aby došlo k automatickému otevření a zavření vypouštěcího ventilu musí nastavená vypouštěcí hladina h_{VYP} vstupovat se záporným znaménkem.)

Po dosažení minimálního výkonu v průtočném režimu ($M_{NVE} \geq M_{NVEŽ}$) přejde regulace napájení na průtočný režim – ***OČ*** je odstaveno, v činnosti jsou regulátory ***R1*** a ***R2***.

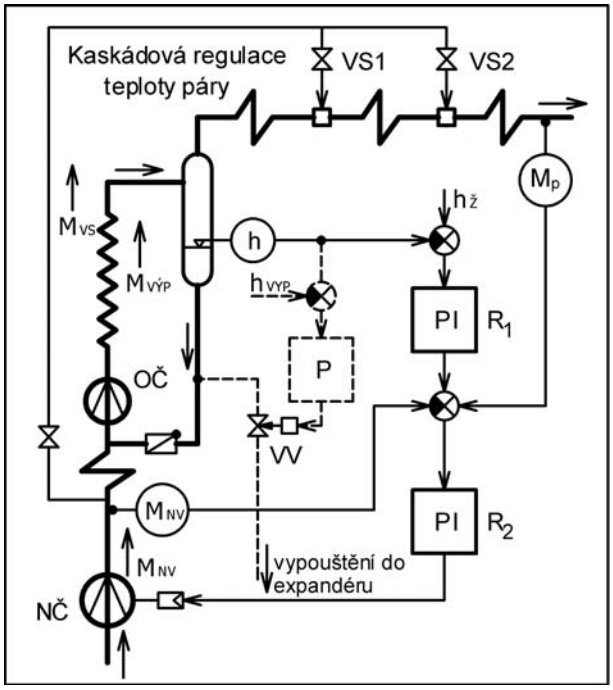
Přechodu z průtočného režimu na oběhový režim a naopak musí obsluha kotle věnovat vždy zvýšenou pozornost.

4.3.2.1.2 Regulace průtočných kotlů s pevným koncem odpařování

U těchto kotlů by se z provozního hlediska měla udržovat pokud možná konstantní suchost páry ***x*** na výstupu z výparníku a to při všech provozních stavech.

Potíž je v tom, že použitelné provozní měření vlhkosti páry *x* není k dispozici a proto se toto měření v průběhu vývoje těchto kotlů nahrazovalo různými způsoby nepřímého stanovení suchosti páry *x*.

Dnes se používají v zásadě dva způsoby regulace, které odpovídají zapojení těchto kotlů podle **obr. 4.92 – 2b** nebo **4.92 – 2c**, případně **2a**.



Obr. 4.101 *Regulace napájení průtočného kotle s pevným koncem odpařování – cirkulace ve výparníku [39][41]*

a) Regulace napájení průtočného kotle s pevným koncem odpařování – cirkulace ve výparníku

Schéma regulace je naznačeno na **obr. 4.101** a používá se u výparníků se superponovanou cirkulací (**obr. 4.92 – 2c**).

V principu je to třísignálová regulace napájení bubnového kotle viz obr. 4.84. Akčním členem regulace napájení je napájecí čerpadlo ***NČ*** s regulací otáček, ale může to být i regulační napájecí ventil, viz např. **obr. 4.87**, **4.88** a **4.89**.

Hladinu ***h*** vody v separátoru při běžném provozu kotle udržuje regulátor hladiny ***R1***, množství napájecí vody reguluje regulátor ***R2*** podle průtoku páry a

napájecí vody. Množství vody proudící výparníkem M_{VYP} v závislosti na výkonu kotle odpovídá průtoku na **obr. 4.95**.

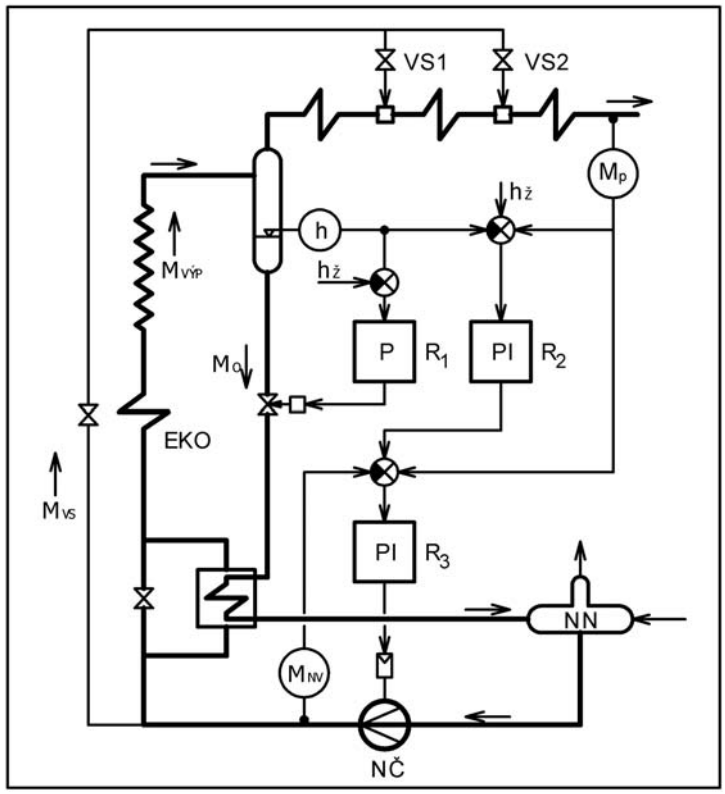
Čárkovaně je naznačena regulace vypouštění vody ze separátoru při tzv. vodní špičce – funkce je stejná jako při regulaci dle **obr. 4.100** – regulátoru ***R4***.

b) Regulace napájení průtočného kotle s pevným koncem odpařování – odpouštění vody ze separátoru

Schéma je uvedeno na **obr. 4.102** a lze je použít u výparníku s odpouštěním vody ze separátoru, obr. 4.92 – 2a, (ale také i u výparníku bez odpouštění vody s cirkulací vody při nízkých výkonech, pokud cirkulaci zajišťuje oběhové čerpadlo umístěné pod separátorem a zapojené před ohřívák vody – tak jak je zapojeno na obr. 4.92 – 2b).

Jak již bylo uvedeno v kap. 4.3.2 – b1 toto zapojení se dnes používá již málo.

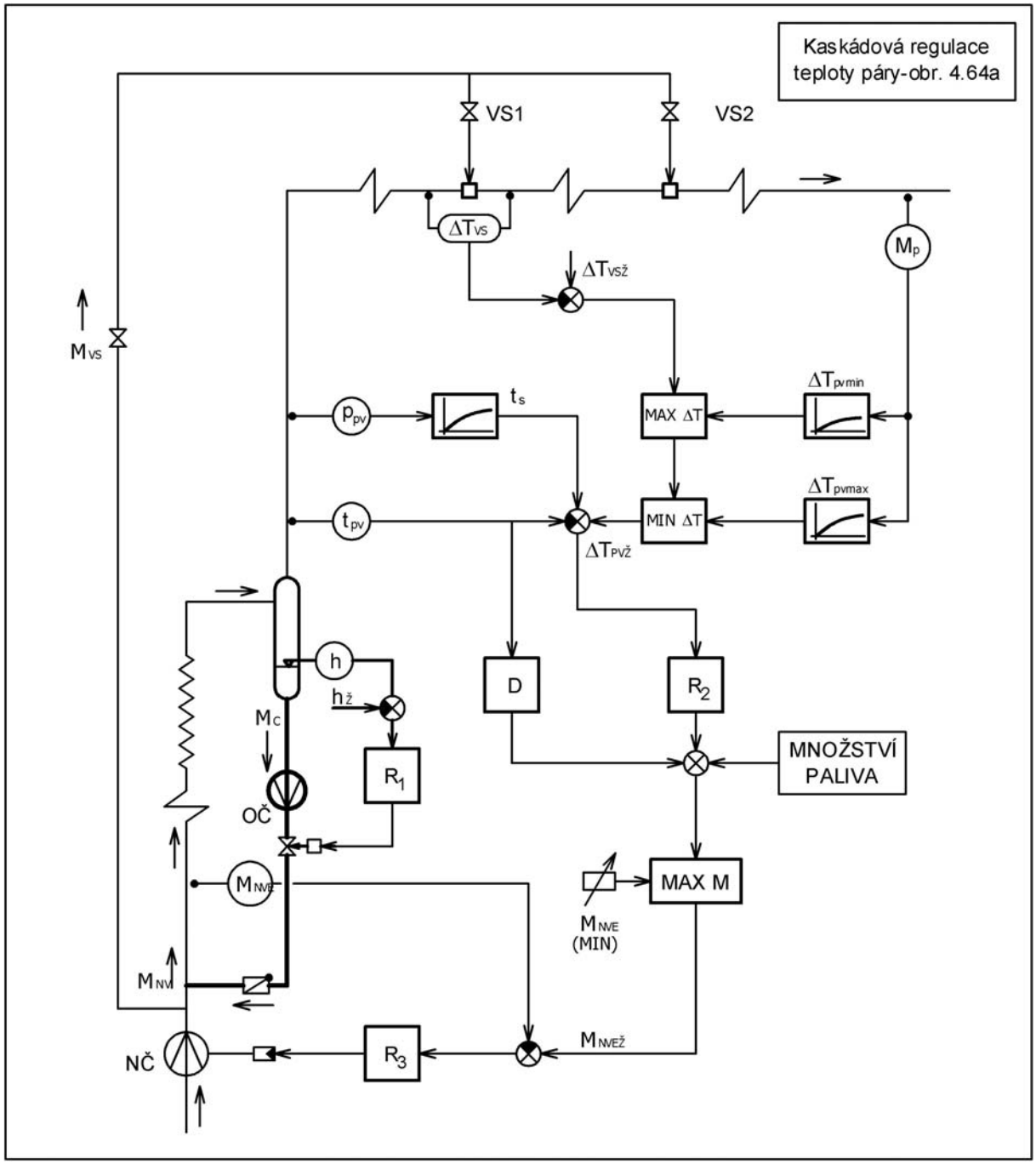
Akčním členem regulace napájení je napájecí čerpalo NC s regulací otáček, může to být i regulační napájecí ventil – viz dřívější schémata.



Obr. 4.102 *Regulace napájení průtočného kotle s pevným koncem odpařování – odpouštění vody ze separátoru [4]*

Průtok vody výparníkem M_{VYP} zajišťuje napájecí čerpadlo ***NČ***, odloučená voda M_O se ze separátoru odvádí do napájecí nádrže ***NN***, teplo odváděné vody se využije k ohřevu napájecí vody před kotlem. Pro regulaci napájení se využívá obdoba třísignálové regulace napájení bubnových kotlů (R2, R3), hladina se reguluje odpouštěním vody -regulátorem ***R1***. Aby se dodržela konstantní suchost páry ***x*** na výstupu z výparníku, musí se v závislosti na výkonu měnit i průtok odlučované vody M_O, tzn., že s výkonem kotle musí kolísat i hladina vody v separátoru. Její žádaná hodnota (regulace napájení R2) se proto upravuje signálem od výkonu kotle – signál od množství páry M_P se přičítá k žádané hodnotě hladiny. (Při vyšší žádané hodnotě hladiny se M_O snižuje a naopak).

U tohoto typu výparníku lze využít i regulaci napájení podle odst. c) – regulátor napájení ***R2*** a ***R3*** se nahradí regulací podle **obr. 4.103**.



Obr. 4.103 *Regulace napájení průtočného kotle s pevným koncem odpařování – kombinovaný režim ve výparníku [41]*

c) Regulace napájení průtočného kotle s pevným koncem odpařování – kombinovaný režim ve výparníku

Schéma regulace je uvedeno na **obr. 4.103** a s výhodou se používá pro zapojení výparníku dle **obr. 4.92– 2b**, viz též kap. 4.3.2 – b3.

Obecně však toto schéma regulace lze využít i pro zapojení výparníku dle **obr. 4.92 - 2a** a za určitých podmínek i pro zapojení dle **2c**.

Tento způsob regulace umožňuje využívat výhody výparníku s pevným koncem odpařování (oběhový režim při najíždění a provozu do výkonu cca 75%) a výhody výparníku s pohyblivým koncem odpařování – průtočný režim v rozmezí výkonu cca 75% až 100%. Důležitou fází regulace (řízení) je přechod z oběhového

režimu na průtočný a naopak - spolehlivou funkci výparníku musí zajistit automatická regulace.

Pro správnou funkci této regulace napájení má rozhodující význam jaká veličina bude zvolena pro identifikaci stavu media za výparníkem při průtočném režimu – viz parametr ***a*** na **obr. 4.69**.

V tomto případě pro identifikaci stavu za výparníkem byla zvolena teplota páry t_{pv}, která se udržuje v úzkém rozmezí mírně nad teplotou varu vody, viz šrafovaná oblast na **obr. 4.104**.

Akčním členem regulace je napájecí čerpadlo ***NČ*** s regulací otáček, může to být ale i regulační napájecí ventil – viz dřívější schémata.

Při provozu v průtočném režimu (75% – 100%) se průtok vody M_{NV} do kotle udržuje tak, aby teplota páry za výparníkem se udržovala v zadaném rozmezí.

Podmínkou této regulace je, aby regulace teploty páry byla provedena v kaskádě s přímou vazbou mezi jednotlivými regulačními obvody teploty páry (vstřiky), např. podle zapojení na **obr. 4.64a**.

Vazbu mezi regulací napájení a regulací teploty páry za kotlem zprostředkovává ochlazení páry na prvním vstřiku ΔT_{VS} a teplota páry za výparníkem t_{pv}. Regulace napájení je tak převedena na regulaci teploty páry t_{pv} za výparníkem regulátorem ***R2***, žádaná hodnota $\Delta T_{PVŽ}$ se generuje od $\Delta T_{VSŽ}$.

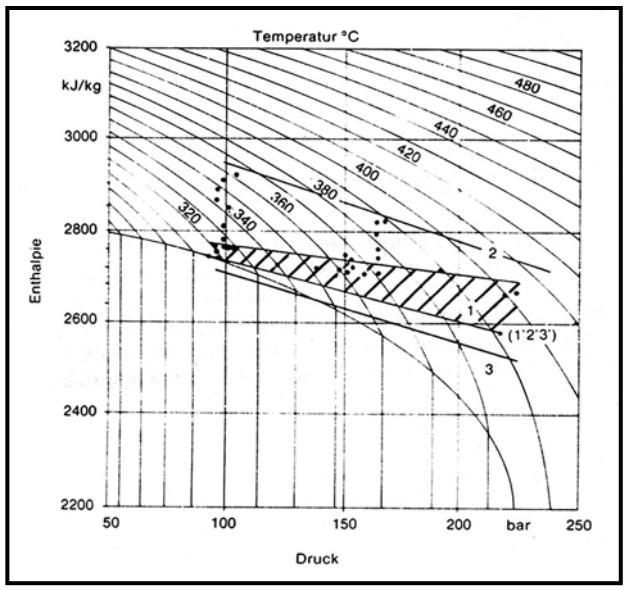
Aby rozdíly teploty páry na výstupu z jednotlivých varnic byly co nejmenší, musí se teplota páry t_{pv} za výparníkem udržovat mírně nad bodem varu – a to v oblasti uvedené na **obr. 4.104**. Dále pak systém musí umožnit přechod z průtočného režimu na oběhový a naopak.

V případě, že teplota za výparníkem t_{pv} vybočí z požadovaného rozsahu, tak se vždy změní ochlazení páry na vstřiku ***VS1*** (ΔT_{VS}) a výběrem ***Max ΔT*** se oddělí kaskádová regulace teploty páry od regulace napájení.

Převýšení teploty za výparníkem t_{pv} nad bodem varu se stanoví z rozdílu ($t_{pv} - t_s$) změřené teploty t_{pv} a vypočtené teploty sytosti t_s podle okamžitého tlaku páry p_{pv}. Pokud teplota t_{pv} leží v požadované oblasti nad teplotou varu (mezi $\Delta T_{PV\,MIN}$ a $\Delta T_{PV\,MAX}$), tak se reguluje podle ochlazení páry na vstřiku ***VS1*** (ΔT_{VSZ}).

V případě, že se teplota zvýší nad vymezenou oblast (zvýší se např. tepelný příkon – změna provozovaných mlýnů, změna zastruskování stěn spalovací komory), tak se zvýší i ochlazení páry na vstřiku ΔT_{VS}). Výběr ***MAX ΔT*** odblokuje kaskádovou regulaci teploty páry za kotlem a teplota za výparníkem se reguluje podle žádaného převýšení ΔT_{PVZ}, které se generuje podle výkonu kotle M_P v členu $\Delta T_{PV\,MIN}$.

Při poklesu teploty t_{pv} pod vymezenou oblast se sníží ochlazení páry na vstřiku ΔT_{VS} a kaskádovou regulaci teploty páry za kotlem odblokuje výběr ***MIN ΔT***. Teplota za výparníkem se pak reguluje podle žádaného převýšení $\Delta T_{PVŽ}$, které se



Obr. 4.104 *Požadovaná hodnota teploty páry za výparníkem [39][41]*

generuje podle výkonu kotle M_P v členu $\Delta T_{PV\,MAX}$.

Přechod mezi průtočným a oběhovým režimem umožňuje člen pro výběr maxima ***MAX M*** průtoku napájecí vody. Po korekci od množství paliva a od teploty páry t_{pv} vstupuje žádaná hodnota průtoku napájecí vody do výběru maxima ***MAX M***. Pokud je žádaný průtok větší než nastavená hodnota $M_{NVE(MIN)}$, např. uvedených 75%, tak se napájení reguluje podle teploty za výparníkem – kotel pracuje v průtočném režimu. Pokud žádaná hodnota průtoku klesne pod nastavenou hodnotu $M_{NVE(MIN)}$ (75%), výběr ***MAX M*** odblokuje regulaci podle teploty za výparníkem a regulátor napájení ***R3*** udržuje konstantní napájení na hodnotě $M_{NVE(MIN)}$ (75%), v separátoru se neodpařená voda odloučí a regulátor ***R1*** udržuje hladinu na požadované hodnotě.

Minimální průtok výparníku $M_{NVE(MIN)}$ lze nastavit podle různých kriterií. Podle dosavadních zkušeností [41] fy Sulzer je max. hodnota asi 75% výkonu kotle (v tomto případě může být výparník proveden i ze svislých trubek). Nejnižší hodnota minimálního průtoku pak odpovídá minimálnímu možnému průtoku šroubovitě provedeného výparníku – tj. asi 40% výkonu kotle. (Ale i u výparníku ze svislých trubek může být minimální průtok nastaven nižší než 75% výkonu, stejně jako u šroubovitě vinutého výparníku může být minimální průtok nastaven vyšší než 40% výkonu – záleží na hydraulickém minimu výparníku).

4.3.3 Závěrečná doporučení k regulaci napájení

V kapitolách 4.31 a 4.32 jsou popsány různé způsoby regulace napájení parních kotlů. Některé způsoby se dnes již nepoužívají a jsou uvedeny jen jako doklad vývoje v této oblasti.

Zejména u průtočných kotlů upřednostňují někteří dodavatelé určitý systém regulace, podobně i provozovatelé svými specifickými požadavky ovlivňují rozhodnutí o volbě způsobu regulace napájení.

Obecně lze uvést, že při volbě způsobu regulace napájení (pomineme-li velkoprostorové kotle malých výkonů) u parních kotlů se musí zvažovat: typ výparníku parního kotle a jeho konstrukční provedení, typ a provedení ohniště, výkon kotle a parametry páry, způsob provozu a regulační rozsah výkonu kotle, požadavky na regulaci výkonu, dynamické vlastnosti kotle a jeho částí, způsob regulace teploty páry, najíždění a odstavování kotle, dopad na provozní náklady, provozní spolehlivost (poruchovost), složitost zařízení a jeho cena atd.

Rozhodující vliv na výběr způsobu regulace napájení má výparník kotle – obecně se rozlišuje regulace napájení kotle s přirozenou cirkulací a regulace napájení kotle průtočného.

Akčním členem regulace napájení může být regulační napájecí ventil nebo napájecí čerpadlo s regulací otáček. Regulaci napájení jen změnou otáček napáječky (bez regulačního napájecího ventilu)lze použít jen v případě blokového uspořádání – každý kotel má vlastní napáječku. V některých případech – zejména při požadovaném provozu s velmi nízkým minimálním výkonem kotle (např. u kotle se superponovanou cirkulací nebo u kotle s přirozenou cirkulací, viz též kap. 4.3.1.2.b) – nelze zajistit spolehlivý provoz vysokotlaké napáječky při velmi nízkých otáčkách nebo s velmi nízkým výstupním tlakem. Proto se v těchto případech i za napáječky s regulací otáček zařazuje regulační ventil, kterým se udržuje tlak napájecí vody vyšší než předepsaný minimální tlak příslušný dodávanému množství vody v regulačním rozsahu od min. do maxima.

Při zapojení průtočných kotlů dle schémat uvedených v kap. 4.3.2 (mezi výparníkem kotle a jeho přehřívákem není dělící armatura) se při opravě netěsnosti u přehříváku páry musí vypustit celý tlakový systém kotle – tj. EKO – výparník – přehřívák.

V některých případech (zejména u kotlů s neodvodnitelnými přehříváky) dává provozovatel přednost jednodušší opravě poruchy přehříváku páry s kratší potřebnou dobou odstávky bloku.

Pro splnění takového požadavku se mezi výparník a přehřívák (za separátor) vloží uzavírací armatura, která tlakově oddělí obě části a umožňuje v případě opravy vypustit (vysušit) jen systém přehříváku páry. Samozřejmě, že výparník musí být vybaven odpovídajícím systémem pojišťovacích ventilů. Tlakové oddělení výparníku a přehříváku při odstavení kotle nemá vliv na popsané systémy regulace napájení, musí se ale respektovat v ***ŘS*** bloku – blokády a ochrany.

Regulace napájení kotle s přirozenou cirkulací

V tomto případě souvisí řešení problému „jen“ s dynamickými vlastnostmi výparníku a systém napájení a regulace napájení se může řešit samostatně.

Bez ohledu na využití těchto kotlů a jejich výkon a parametry páry se používá tzv. třísignálová regulace napájení – viz **obr. 4.84**. Tato se často doplňuje regulací konstantního tlakového spádu na regulačním ventilu – viz **obr. 4.87**. (Dosáhne se lineární charakteristika regulačního ventilu a sníží se jeho poruchovost – sníží se tlakový spád.) Někteří dodavatelé pro najíždění používají i zapojení podle **obr. 4.88**.

Pro rychlé najíždění (používá se i barbotáž výparníku cizí parou) se využívá zařízení pro odpouštění vodní špičky – viz **obr. 4.91**.

Regulace napájení kotlů průtočných

U těchto kotlů již nelze řešit regulaci napájení jen v souvislosti s výparníkem kotle, ale musí se posuzovat i ve vazbě na regulaci teploty páry a výkonu kotle – jedná se o víceparametrový regulační systém.

Používají se tyto způsoby regulace napájení

a) průtočný kotel s pohyblivým koncem odpařování

Dnes se používá regulace napájení podle teploty páry za výparníkem, viz **obr. 4.99**. Při najíždění a při výkonech kotle nižších než je hydraulické minimum výparníku (u šroubovitě vinutých výparníků to je asi 35 – 45 % jmenovitého průtoku páry) se automaticky přejde na oběhový režim ve výparníku. Cirkulaci zajišťuje oběhové čerpadlo a regulace je doplněna o regulaci hladiny a odpouštění vodní špičky – viz schéma na **obr. 4.100**.

Regulace napájení dle **obr. 4.99** a **4.100** se používá i u kotlů nejvyšších výkonů. Výparník se musí navrhnout a regulovat tak, aby rozdíly teploty páry na výstupu z jednotlivých varnic byly minimální a snížilo se tak nebezpečí vzniku trhlin na trubkách výparníku. Takový výparník pak má vyšší tlakovou ztrátu – potřebná rychlost proudění a tlaková ztráta clonek na vstupu do varnic musí být zajištěny již při výkonu odpovídajícím hydraulickému minimu. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat přechodu z průtočného režimu na oběhový a naopak.

b) průtočný kotel s pevným koncem odpařování – odpouštění odloučené vody ze separátoru

Schéma regulace napájení je na **obr. 4.102** – je to obdoba tzv. třísignálové regulace napájení bubnových kotlů. Pro rychlé najíždění musí být systém doplněn o vypouštěcí potrubí pro odvod vodní špičky – viz např. **obr. 4.91** a **4.100**.

Vzhledem k zapojení oběhu vody musí se u tohoto systému počítat s vyššími provozními náklady a nevýhodou je i to, že při najíždění se neprohřívá ohřívák vody a ani ohřívák vzduchu. Proto se tento systém používá již jen výjimečně.

Uvedené schéma regulace se může využit i pro výparník s cirkulací, oběhové čerpadlo je ve vedlejší větvi (pod separátorem) a zapojeno je před ohřívák vody.

c) průtočný kotel s pevným koncem odpařování – trvalá cirkulace ve výparníku

Jedná se o výparník provedený ze svislých trubek s tzv. superponovanou cirkulací (oběhové čerpadlo je v sérii s napáječkou), schéma regulace je na **obr. 4.101**. Je to obdoba třísignálové regulace napájení bubnových kotlů, napájení se reguluje v celém provozním rozsahu včetně najíždění. Pro odpouštění vodní špičky je separátor vybaven vypouštěcím potrubím. Popsaná regulace napájení se využívá především až u kotlů větších výkonů, včetně výkonů nejvyšších.

d) průtočný kotel s pevným koncem odpařování – kombinovaný režim ve výparníku

Schéma regulace je na **obr. 4.103** a zapojení umožňuje provozovat výparník při vyšších výkonech kotle v průtočném režimu (tedy podle teploty páry za výparníkem) a při nižších výkonech (a i při najíždění) v oběhovém režimu – cirkulaci zajišťuje oběhové čerpadlo ve vedlejší větvi (pod separátorem).

Struktura regulace umožňuje udržovat teplotu páry za výparníkem v úzkém rozmezí nad bodem varu (malé rozdíly teplot mezi varnicemi, nižší tlaková ztráta výparníku) a umožňuje i automatický přechod z průtočného na oběhový režim. Je odzkoušený provoz v oběhovém režimu v rozsahu výkonu kotle 0 až 75%, v průtočném režimu se pak kotel provozuje s výkony nad 75%. Samozřejmě, že dělící výkon mezi oběhovým a průtočným provozem může být i nižší než uvedených 75% - tzn., že návrh výparníku a regulaci napájení lze optimalizovat (provozní vlastnosti, cena, provozní náklady). Nejnižší hodnota dělícího výkonu mezi oběhovým a průtočným režimem je hydraulické minimum výparníku ($M_{NVE(MIN)}$), které je u šroubovitě vinutého výparníku cca 35 – 45%. V tomto případě se ale dostaneme k regulaci napájení průtočného kotle s pohyblivým koncem odpařování – viz bod a) **obr. 4.99**.

Podle hodnoty dělícího výkonu mezi oběhovým a průtočným režimem může být výparník provedený ze šroubovitě vinutých trubek nebo z trubek svislých.

Na schématu na **obr. 4.103** je oběhové čerpadlo zapojeno v cirkulačním potrubí separátoru. Strukturu regulace však lze použít i v případě, když bude oběhové čerpadlo v hlavní větvi před výparníkem (**obr. 4.92 – 2c**) (v tomto případě musí mít oběhové čerpadlo obtok pro provoz v průtočném režimu), ale i v případě výparníku s vypouštěním – viz **obr. 4.92 – 2a**. Pro vypouštění vodní špičky je separátor vybaven vypouštěcím potrubím (viz **obr. 4.100**) – na **obr. 4.103** není zakresleno.

Jak je vidět, tak popisovaná regulace napájení (**obr. 4.103**) představuje univerzální strukturu regulace použitelnou pro regulaci průtočných kotlů s pohyblivým i pevným koncem odpařování – **obr. 4.92 – 1b – 2a – 2b – 2c**.

Vystačíme tedy se dvěma způsoby regulace napájení průtočných kotlů.

Regulaci napájení dle **obr. 4.103** můžeme použít pro kotel s pohyblivým koncem odpařování (místo regulace na **obr. 4.99**) a pro kotel s pevným koncem

odpařování (místo regulace dle **obr. 4.102** a **4.103**, pro výparníky dle **obr. 4.92 – 2a, 2b, 2c**).

Regulaci napájení dle **obr. 4.101** pak můžeme použít jen pro kotel s pevným koncem odpařování s výparníkem se superponovanou cirkulací (**obr. 4.92 – 2c**).

4.4 REGULACE SPALOVÁNÍ

Snahou provozovatele kotle je zajistit při spalování fosilních paliv především: bezpečný a spolehlivý provoz zařízení (struskování, koroze, vyloučení výbuchu, omezení pulzací – viz kap. 4.5), optimalizaci provozních nákladů (množství spáleného paliva, ale i spotřebovaného reakčního činidla při využití ***SNCR***, množství spalovacího vzduchu a spalin,spotřeba paliva pro stabilizaci hoření) a maximální dosažitelné omezení vlivu spalování fosilních paliv na životní prostředí (splnění emisních limitů).

Některé požadavky lze splnit vhodným provedením nebo nastavením zařízení (mlýny, hořáky, řídící a zabezpečovací systém v oblasti ohniště), zbývající pak jen vhodným systémem regulace (řízení) kvality spalování (množství paliva či reakčního činidla, množství vzduchu a spalin, emise), případně kombinací obojího.

Tak např. při spalování uhlí s velmi proměnlivým obsahem popela (např. směsi černého uhlí a proplástků), kdy hrozí nebezpečí zhasnutí kotle, se spalovací komora kotle vybaví systémem kontroly plamene k ochraně kotle před výbuchem v případě zhasnutí plamene a následného zapálení palivové směsi - např. nežádoucím startem zapalovacích hořáků nebo žhavou struskou. Pro kontrolu plamene se spalovací komora osadí průmyslovou kamerou (zajistí se jen vizuální informace pro operátora kotle zda v kotli je, či není, plamen – není součástí automatického řízení) nebo se osadí systémem vhodných čidel, které spolehlivě a včas zhasnutí plamene indikují – v tomto případě lze tento signál v řídícím systému kotle využít (ZSB,ochrany kotle). Pokud se signál v systému řízení využívá (automatický start zapalovacích hořáků nebo naopak blokáda jejich startu, automatické odvětrání kotle apod.) musí se bezpodmínečně zajistit spolehlivost a pravdivost jeho vyhodnocení. Proto se např. spalovací komora osadí více čidly a zpracovává se signál 2 ze 3 nebo 2 ze 4 a spolu s tímto signálem (v součinu) se vyhodnocují další signály indikující existenci plamene,jako např. diference podtlaku v kotli (pod stropem) a podtlaku v oblasti hořáků a dále zvýšení měřeného obsahu kyslíku (při zhasnutí plamene se obsah kyslíku zvýší). Obvykle se pro kontrolu plamene kombinují oba uvedené způsoby - průmyslová kamera i systém čidel.

Regulovat jakost spalování fosilních paliv to předpokládá především respektovat - a v mnoha případech i regulovat - veličiny, které spalovací proces ovlivňují. Jsou to zejména tyto veličiny: přebytek spalovacího vzduchu, jemnost mletí, podtlak ve spalovací komoře a někdy se uvádí i teplota spalin za kotlem [4].

Regulace podtlaku a regulace teploty spalin za kotlem je popsaná v kap.4.5 a 4.6.

Jemnost mletí se většinou nereguluje - nastaví se při uvádění zařízení do provozu. Se zvyšující se jemností mletí klesají ztráty chemickým a mechanickým nedopalem (obsah spalitelných látek ve spalinách a v popelu), ale zvyšuje se vlastní spotřeba el.energie. Jemnost mletí má rovněž vliv na tvorbu emisí CO a NO_x. Pro konkrétní zařízení a podmínky lze tedy definovat optimální jemnost mletí.

V této kapitole je proto dále pojednáno jen o regulaci spalování z pohledu dodržení požadovaného množství (přebytku) spalovacího vzduchu.

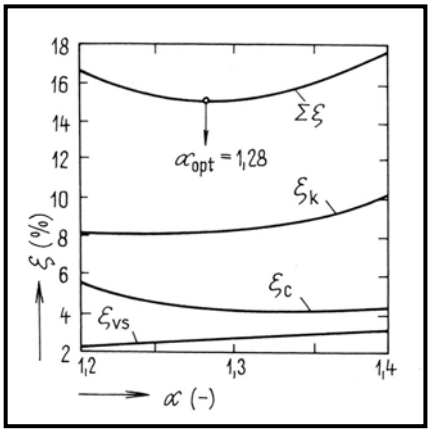
Přebytek spalovacího vzduchu se vyjadřuje součinitelem přebytku vzduchu α, který je definován jako poměr skutečně dodaného vzduchu ***Mvz*** [kg/s] do řízeného systému a množství vzduchu ***Mvzt*** [kg/s] teoreticky potřebného pro spálení přivedeného paliva –výpočtové (stechiometrické) množství vzduchu, α = 1.

$$\alpha = M_{vz} / M_{vzt} \qquad [\,-\,] \qquad (4-49)$$

Při provozu spalovacího zařízení s přebytkem vzduchu α < 1 obsahují spaliny CO a je ohrožena bezpečnost provozu (ohrožení obsluhy při úniku spalin vně kotle, nebezpečí exploze zařízení) a je překročen emisní limit CO. Při zbytečně vysokém přebytku vzduchu se zhoršuje účinnost kotle a zvyšují se provozní náklady a hrozí překročení emisního limitu NOx.

Vliv přebytku vzduchu na ztráty spalovacího zařízení (ztráta nedopalem ***ξc***, komínová ztráta ***ξk***) a na velikost vlastní spotřeby el.energie ***ξvs*** je informativně znázorněn na **obr. 4.105.**

Na obr. vyznačené optimum platí jen pro uvedené průběhy jednotlivých ztrát. Tyto jsou u různých spalovacích zařízení odlišné, takže každé zařízení může mít jinou hodnotu optimálního přebytku vzduchu z hlediska provozních nákladů – a jinou hodnotu obdržíme při optimalizaci emisí CO a NO_x.

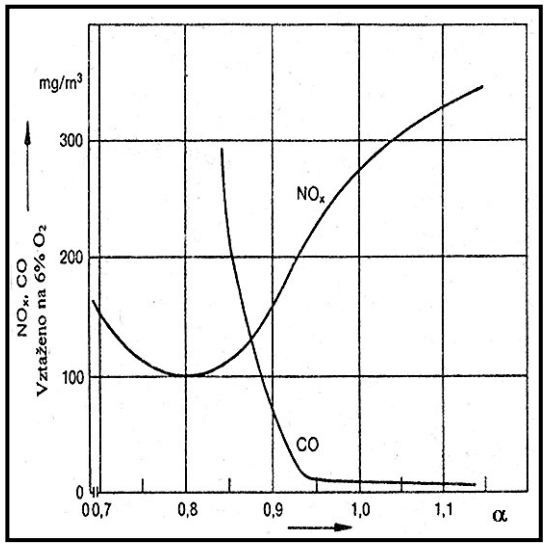


ξ_k – komínová ztráta ξ_C – ztráta nedopalem
ξ_{VS} – vlastní spotřeba el. energie
α - přebytek spalovacího vzduchu

Obr. 4.105 *Vliv přebytku vzduchu na ztráty kotle [1]*

Vliv přebytku vzduchu na tvorbu emisí CO a NO_x je znázorněn na **obr. 4.106.** Je třeba si uvědomit, že snižování ztrát (zvyšování účinnosti kotle) je při spalování fosilních paliv (zejména pak uhlí) jedinou možností jak snížit emise CO_2.

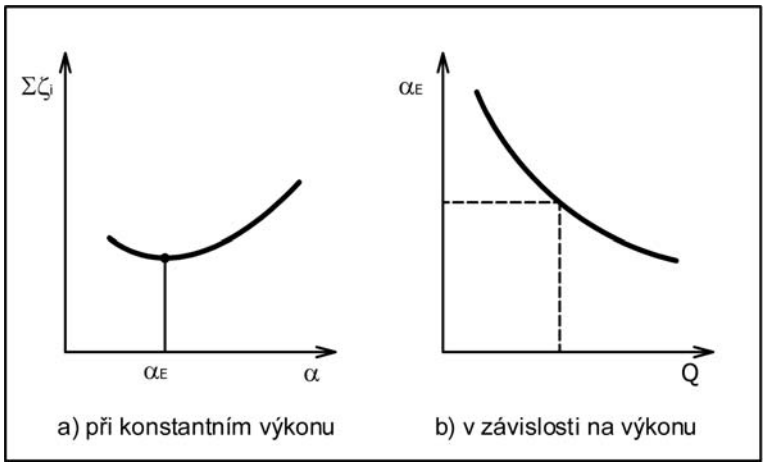
Respektování všech uvedených (i protichůdných) vlivů znemožňuje však provozovat spalovací zařízení jednoznačně jen podle ekonomického nebo ekologického optima, ale musí se volit (v regulačním rozsahu výkonu kotle) konstantní kompromisní optimální přebytek vzduchu zohledňující všechny uvedené faktory nebo se optimální přebytek vzduchu nastavuje v závislosti na výkonu kotle, např. podle [43]. Ekonomický součinitel přebytku vzduchu α_e (při něm je při konstantním výkonu účinnost kotle maximální) odpovídá minimální hodnotě součtu naměřených tepelných ztrát kotle $\Sigma\xi_i$ při konstantním výkonu, viz **obr. 4.107a. O**pakovaným měřením pro různé výkony pak z těchto minim obdržíme jeho průběh v závislosti na tepelném výkonu kotle ***Q***, viz **obr. 4.107b.**



Obr. 4.106 *Vliv přebytku vzduchu na tvorbu emisí [42]*

Při posuzování koncentrací C_{CO} a C_{NOx} v závislosti na přebytku vzduchu při konstantním výkonu mohou nastat dva případy - jsou naznačeny na **obr. 4.108.**

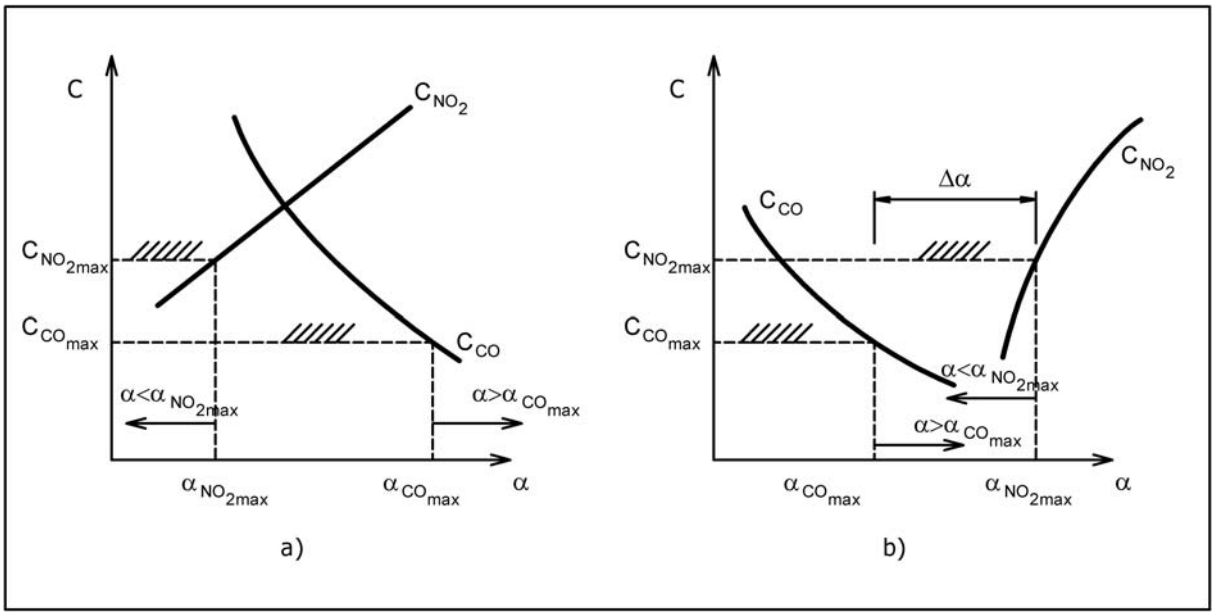
a) koncentrace mají průběh podle **obr. a)**, tzn., že nelze nastavit optimální přebytek vzduchu při němž by byly současně splněny oba emisní limity - musí se proto provést primární opatření k potlačení tvorby emisí.



Q – tepelný výkon kotle α_E – ekonomický přebytek vzduchu

Obr. 4.107 *Ekonomický součinitel přebytku vzduchu*

b) průběhy koncentrací mají podobu podle **obr. b) -** v tomto případě existuje pásmo přebytku spalovacího vzduchu $\alpha_{COmax} < \alpha < \alpha_{NO2max,}$ v němž pohybující se provozní přebytek spalovacího vzduchu zaručuje dodržení obou emisních limitů bez uplatnění dalších primárních opatření.

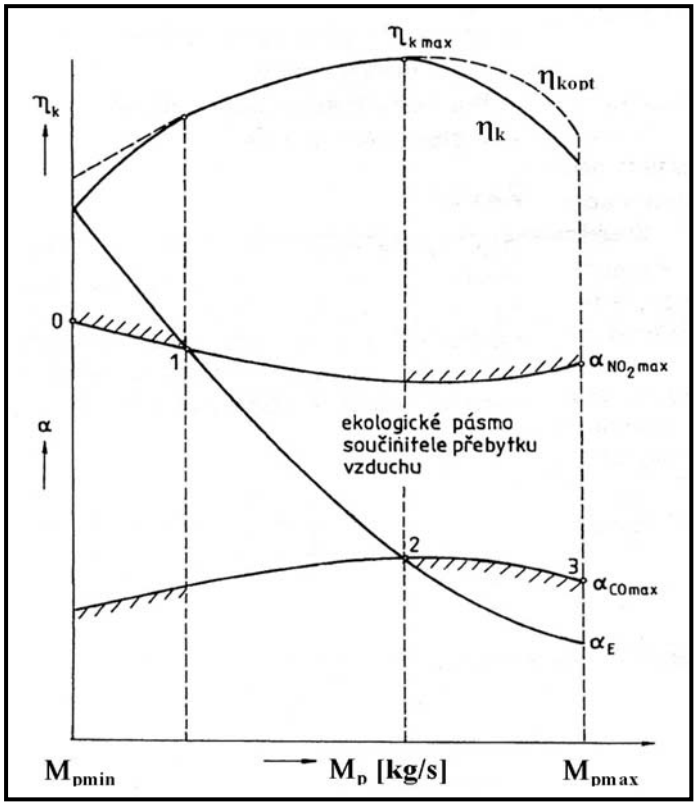


C_{NO2} – koncentrace NO_2 C_{CO} – koncentrace CO

Obr. 4.108 *Přebytek vzduchu podle emisí [43]*

Spalovací proces bude optimální pokud provozní přebytek vzduchu bude splňovat podmínky podle **obr. 4.107** a **obr. 4.108,** to znamená: $\alpha < \alpha_{NO2max}$, $\alpha > \alpha_{COmax}$ a v závislosti na výkonu kotle $\alpha = \alpha_e$. Oblast provozního přebytku vzduchu, která vyhovuje uvedeným podmínkám, je naznačena na **obr. 4.109.** Z hlediska emisí lze definovat křivku 0-1-2-3 optimálního řízení součinitele přebytku vzduchu v celém regulačním rozsahu výkonu kotle M_{Pmin} až M_{Pmax} - v krajních oblastech regulačního rozsahu 0-1 a 2-3 bude účinnost kotle η_k nižší než η_{kopt}, protože v nich nelze dodržet optimální hodnotu ekonomického součinitele přebytku vzduchu α_e .

Při spalování uhlí se musí dále zohlednit i obsah spalitelných látek v popílku a ve strusce z hlediska jejich dalšího využití.Tak např. u některých zařízení nelze jen nastavením spalovacích poměrů dodržet jak emise CO a NO_x tak i požadovaný obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích po spalování.Volí se tedy takový přebytek vzduchu, aby se dodržel emisní limit pro CO jakož i obsah spalitelných látek – emise NO_x by se přitom měly snížit na nejnižší dosažitelnou hodnotu. Pokud je emisní limit NO_x nižší než dosažitelná hodnota, musí se kotel vybavit např.zařízením ***SNCR*** - spotřeba reakčních činidel je však v takovém případě snížena na minimum.



η_K – účinnost kotle
M_{pmin}, M_{pmax} – min. a max. parní výkon kotle (regulační rozsah výkonu kotle

Obr. 4.109 *Optimální součinitel přebytku vzduchu [43]*

4.4.1 Dynamické vlastnosti spalovacích zařízení

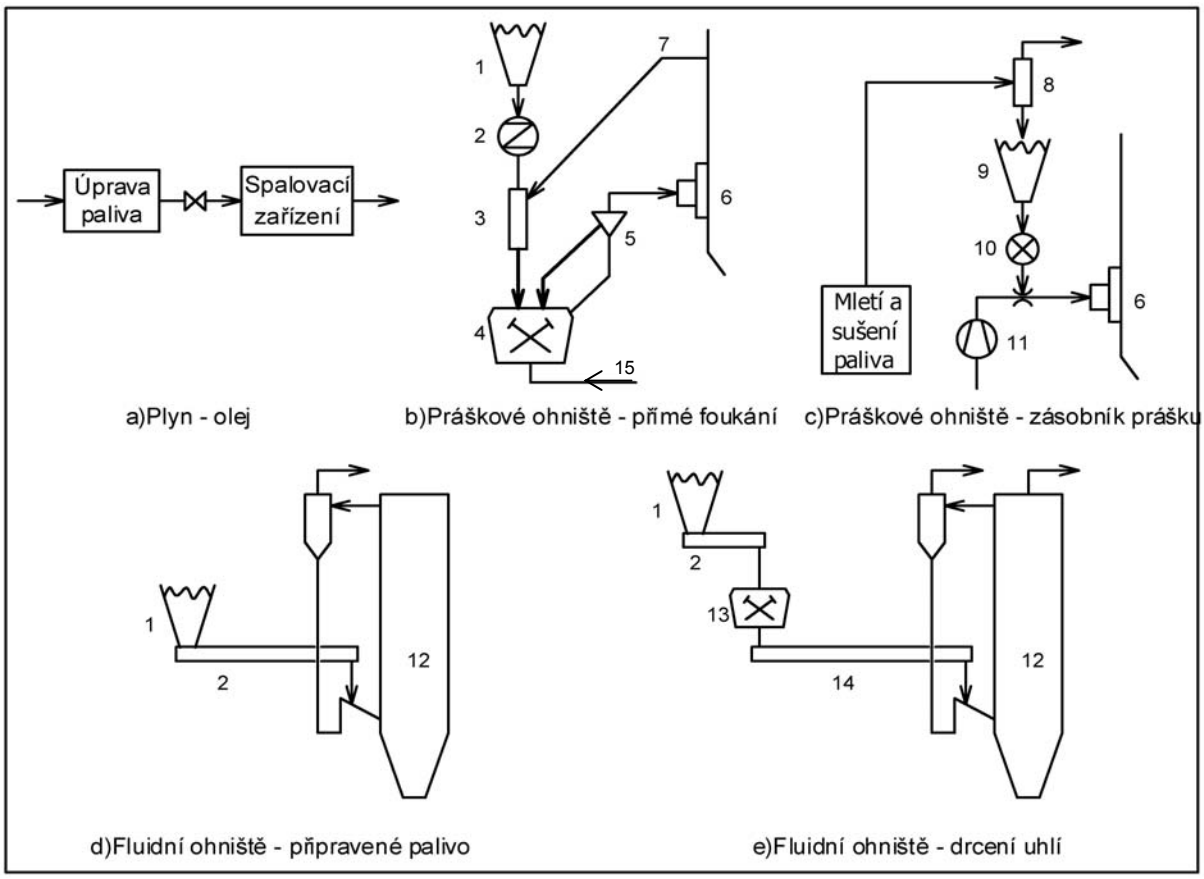
Kolísání tepelného příkonu kotle vyvolané změnou výhřevnosti spalovaného paliva nebo změnou jeho dodávaného množství má nepříznivý vliv na kvalitu jeho provozu (regulace výkonu kotle, regulace kvality spalování) i na životnost a provozní spolehlivost některých jeho částí (vyzdívky, přídavné dynamické namáhání částí tlakového systému, zvýšené nebezpečí výbuchu kotle nebo jeho havarijní odstavování z titulu zhasnutí plamene) a musí se proto těmto stavům věnovat při návrhu kotle potřebná pozornost. Zatímco pro eliminaci krátkodobých změn výhřevnosti uhlí nemá konstruktér kotle žádné možnosti (kromě částečné homogenizace v zásobníku připraveného prášku – ovšem tyto systémy mlýnic se dnes používají jen výjimečně) a současné prostředky mu umožňují získat o okamžité hodnotě výhřevnosti dodávaného uhlí informaci jen na základě změřené okamžité hodnoty obsahu popela [44] a obsahu vody [45], tak kolísání množství dopravovaného uhlí do spalovací komory může ovlivnit např.typem použitých podavačů uhlí nebo volbou vhodného zařízení pro přípravu paliva (uhlí). Obecně platí, že podle požadované dynamiky výkonu kotle - a tedy i dynamických vlastností spalovacího zařízení – se volí druh spalovaného paliva a typ ohniště (plyn /olej, roštové, práškové, fluidní) a způsob přípravy a dopravy paliva před jeho spalováním.

Dynamiku spalovacího zařízení určují především dynamické vlastnosti zařízení na přípravu paliva a dynamika spalovacího procesu.

Zařízení na přípravu paliva.

Dnes se u kotlů převážně používají způsoby přípravy paliva, které jsou schematicky, ve zjednodušeném provedení, uvedené na **obr. 4.110.**

Spalování plynu nebo oleje-obr. a) Úprava paliva zahrnuje obvykle jen redukční stanici plynu a v případě oleje olejové hospodářství (filtry, čerpadla, ohřev oleje). Pro



1 – zásobník uhlí 2 – podavač uhlí 3 – spalinová suška 4 – ventilátorový mlýn 5 – třidič 6 – spalovací komora;
7 – odběr spalin 8 – odlučovač prášku 9 – zásobník 10 – podavač prášku 11 – ventilátor primárního vzduchu;
12 – fluidní ohniště 13 – drtič 14 – dopravník uhlí 15 - vzduch

Obr. 4.110 *Zařízení pro přípravu paliva*

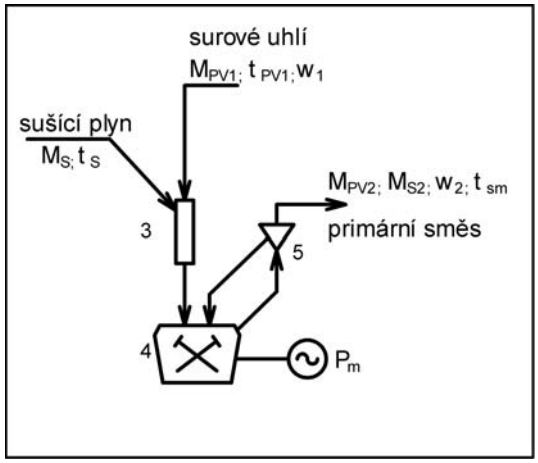
vyšetřování dynamiky spalovacího zařízení má význam jen úsek potrubí mezi regulačním ventilem (akční orgán regulace výkonu) a hořákem kotle. Při vyšetřování dynamiky výkonu se bere obvykle přenos této části systému rovný jedné, ale při vyšetřování nestability spalovacího procesu (pulzace tlaku a teploty ve spalovací komoře kotle) takové zjednodušení není možné a palivové potrubí se musí popsat přesnějším přenosem, např. podle [1].

Práškové ohniště-mlýny s přímým foukáním-obr. b) V tomto případě systém úpravy paliva zahrnuje dopravu, mletí a sušení uhlí a dopravu uhelného prášku. Akčním orgánem průtoku paliva je podavač uhlí ***2*** před mlýnem. Ve mlýně ***4***, kde probíhá mletí a sušení uhlí, dochází k akumulaci mletého uhelného prášku, jejíž velikost závisí na konstrukci mlýna. Budeme-li vyšetřovat dynamiku mlýnů s přímým foukáním pak musíme respektovat dynamické vlastnosti všech členů systému, počínaje podavačem uhlí. U elektrárenských a teplárenských kotlů se dnes vesměs jako podavače uhlí ***2*** používají řetězové podavače, u nichž lze měnit dodávku uhlí dvěma akčními veličinami - výškou vrstvy paliva a otáčkami podavače. Princip řetězového podavače a jeho blokové schéma jsou naznačeny na **obr. 4.29.** Obvykle se však výška vrstvy paliva nastaví pro dané uhlí jako konstantní a jako akční

veličina se používá změna otáček - aproximace je provedena statickým přenosem se zpožděním 1.řádu. Při spalování hnědého uhlí je před mlýnem zařazena spalinová suška ***3***, pro níž z hlediska dynamiky průtoku paliva platí totéž co pro dynamiku práškovodů - viz obr.c). Spaliny pro sušení ***7*** se odsávají na konci ohniště a primární směs se dodává do hořáků ***6***.

Dynamiku mlecího okruhu s přímým foukáním nejvíce ovlivňuje konstrukce mlýna. Zjednodušený lineární model mlýna a třídiče je popsán např.v [1] a výpočtové schéma je uvedeno na **obr. 4.111.**

Popsaná vyšetřovaná soustava je dosti složitá, zahrnuje procesy sdílení tepla a hmoty (sušení), mletí uhlí, třídění uhelného prášku,akumulaci uhelného prášku a další procesy. Vstupní signály do vyšetřované soustavy jsou:množství surového uhlí M_{PV1}, o teplotě t_{pv1} a obsahu vody W_1, průtok sušícího plynu M_S (směs spalin a vzduchu nebo jen vzduch - při sušení uhlí s malým obsahem vody, např.u černého uhlí) o teplotě t_s a dále příkon motoru mlýna P_m. Nejdůležitější výstupní signály pak jsou: množství uhelného prášku M_{PV2} v primární směsi, průtok nosného media M_{S2} v primární směsi(spaliny+vzduch+pára nebo vzduch+pára), obsah vody v uhelném prášku W_2 a teplota primární směsi t_{sm} .



Obr. 4.111 *Výpočtové schéma mlýnu s přímým foukáním*

Při návrhu regulace parního kotle je důležité znát přenosy výstupních veličin M_{PV2} a t_{sm}, nejpotřebnější přechodové charakteristiky jsou uvedeny na **obr. 4.27 a 4.30**, viz kap. 4.1.2.3.

Pro představu lze uvést některé zjištěné charakteristiky [1] regulace. Tak při změně množství podávaného paliva na podavači uhlí má přechodová charakteristika změny sálání ve spalovací komoře u kotle se zásobníkem prášku dobu průtahu včetně dopravního zpoždění (T_u + T_d) cca 3 s a dobu náběhu T_n cca 16 s, u ventilátorového mlýnu je to cca 10 s a 18 s.

Z třídiče mlýnu se namletý uhelný prášek dopravuje jako primární směs pneumaticky práškovody do hořáků kotle. Dynamika práškovodu mezi třídičem mlýnu a hořákem se obvykle aproximuje přenosem [1]

$$G(s) = e^{-T_d s}\ \frac{1}{T_p s + 1} \qquad (4\text{-}50)$$

kde T_p =1,5 až 3 s a dopravní zpoždění T_d se stanoví z délky práškovodu a rychlosti dopravovaného prášku.

Práškové ohniště-zásobník prášku-obr. c). Z dynamického hlediska je zařízení pro úpravu paliva se zásobníkem prášku výhodnější než systémy s přímým foukáním, protože akčním členem regulace výkonu kotle je podavač ***10*** prášku-mletí a sušení uhlí v tomto případě nemá na dynamiku ohniště vliv. Při návrhu regulace výkonu kotle se musí zvažovat jen dynamika práškovodu mezi podavačem prášku a hořákem, kterou lze aproximovat opět přenosem (4-50). Dynamiku takové soustavy nepříznivě ovlivňuje nevhodná konstrukce zásobníku prášku způsobující přerušovaný

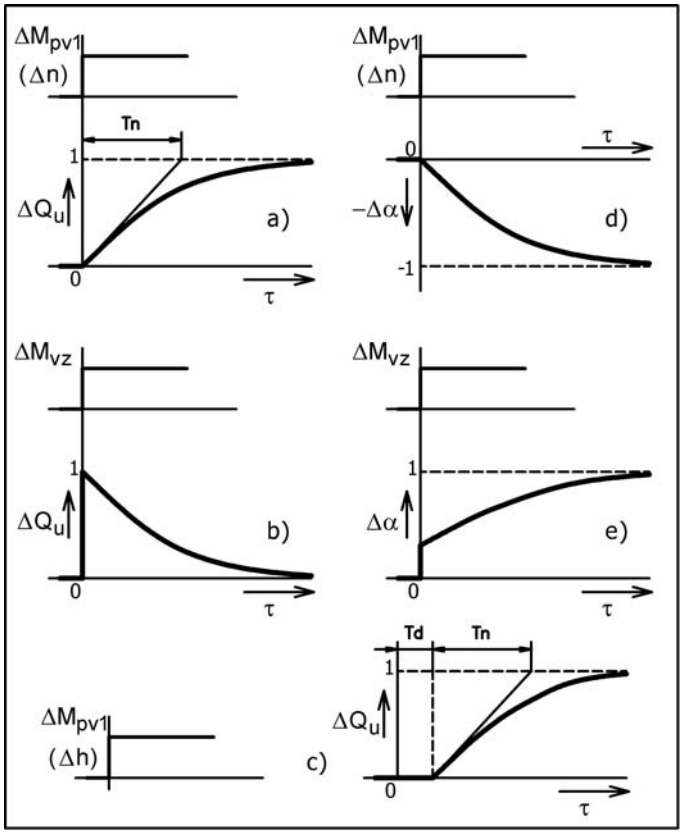
výtok prášku (klenbování), který se v podobě jednotkových skoků přenáší bez tlumení do spalovací komory kotle. Je třeba tedy použít takový systém zásobníku prášku, který zajistí kontinuální dodávku prášku. Jak již bylo uvedeno, popisovaný systém přípravy paliva se dnes již používá výjimečně, můžeme se s ním ale setkat při spalování externě dodávaného suchého uhelného prášku .

Fluidní ohniště-spalování připraveného uhlí-obr. d). V tomto případě se spaluje dodané nadrcené uhlí v surovém stavu-bez sušení, akčním členem regulace je např. řetězový podavač ***2*** uhlí. Dynamiku zařízení pro přípravu paliva určuje tento podavač (viz.**obr. 4.29)**, případně další systém mechanických dopravníků (pásové, řetězové nebo šnekové), které zajišťují dopravu uhlí do spalovací komory kotle a představují dopravní zpoždění.

Fluidní ohniště-kotel má vlastní systém drcení uhlí-obr. e). Surové uhlí ze zásobníku dopravuje např. řetězový podavač ***2*** do drtiče ***13***, z nějž se uhlí o požadované granulometrii dopravuje systémem mechanických dopravníků ***14*** do spalovací komory kotle. Akčním členem regulace je podavač uhlí a dynamiku zařízení pro přípravu paliva určují: tento podavač, zařízení pro drcení uhlí a mechanická doprava nadrceného uhlí do kotle. (Někdy se mechanická doprava nadrceného uhlí z drtiče do kotle nahrazuje pneumatickou dopravou.)

Dynamika spalování

Výše popsaná zařízení pro přípravu paliva zajistí dopravu spalovaného paliva do spalovací komory kotle. Transformaci primární energie paliva na tepelnou energii plamene a spalin však ovlivňuje i dynamika spalování paliva v ohništi, jejíž znalost je i předpokladem pro řešení stability spalování-nestabilní plamen (z dynamického hlediska je plamen nelineární soustavou) je příčinou vzniku pulsací tlaku a teploty ve spalovací komoře. Dynamika ohniště se tedy musí vyšetřovat jak z hlediska regulace výkonu kotle tak i stability spalování. Každý typ spalování uvedený na **obr. 4.110** má výrazně odlišné dynamické vlastnosti a musí se vyšetřovat samostatně. Analýza stability spalování je uvedena např. v [23].



Obr. 4.112 *Přechodové charakteristiky roštového ohniště [1][17]*

Přechodové charakteristiky roštového ohniště (pásový rošt, viz např. **obr. 4.24 a 4.118**) jsou uvedeny na **obr. 4.112.** (Lze je aplikovat ale i na rošt přesuvný.) Na obr. a) je změna tepelného výkonu roštu ΔQ_u (tepelný výkon uvolněný spálením uhlí na roštu) vyvolaná skokovým zvýšením množství přivedeného uhlí na rošt ΔM_{pv1} a to změnou otáček roštu Δn. Ke zvýšení tepelného výkonu roštu dojde se značným zpožděním, protože časová konstanta T_n roštu je velká a podle účinné délky roštu a

tepelného zatížení roštové plochy může její hodnota dosáhnout 300 až 1200s. Změna množství přivedeného uhlí na rošt jako akční veličina regulace výkonu kotle proto není vhodná a nepoužívá se.

Na obr.b) je změna tepelného výkonu roštu ΔQ_u při skokovém zvýšení množství spalovacího vzduchu ΔM_{vz}. Zvýšení tepelného výkonu roštu je takřka okamžité, ale odezva má derivační charakter - vyhořívá zásoba uhlí na roštu. Jako akční veličina regulace výkonu u roštových kotlů se proto používá změna množství spalovacího vzduchu a následně se mění i množství přiváděného uhlí na rošt - tak aby se eliminoval derivační přenos při změně spalovacího vzduchu (viz kap. 4.1.2.1, **obr. 4.24**).

Na obr.c) je opět změna tepelného výkonu roštu ΔQ_u při zvýšení množství přivedeného uhlí na rošt, v tomto případě zvětšením výšky vrstvy paliva Δh. Celkové časové zpoždění je o hodnotu dopravního zpoždění T_d ještě větší než v případě průběhu na obr. a).

Na obr. d) a e) jsou změny přebytku spalovacího vzduchu $\Delta\alpha$ při skokovém zvýšení množství přiváděného uhlí ΔM_{pv1} a spalovacího vzduchu ΔM_{vz} .

4.4.2 Základní způsoby regulace množství spalovacího vzduchu

V principu jsou možné tři základní způsoby regulace množství (přebytku) spalovacího vzduchu a to:

- metoda palivo – vzduch
- metoda pára – vzduch
- přímé měření (regulace) přebytku spalovacího vzduchu - analýza

Metoda palivo – vzduch

Tato představuje nejjednodušší způsob regulace množství spalovacího vzduchu a vychází ze vztahu [4] (jen pro ilustraci)

$$M_{vz} = \alpha_{opt} \cdot V_{vzt} \cdot \rho_{vz} \cdot M_{pv} = A \cdot M_{pv} \qquad (4\text{-}51)$$

kde

α_{opt} - požadovaný optimální přebytek vzduchu [-]

V_{vzt} - teoretické objemové množství vzduchu potřebné na spálení 1kg paliva [m^3_N/kg]

ρ_{vz} - hustota spalovaného vzduchu [kg/m^3_N]

M_{pv} - množství spáleného paliva [kg/s]

Velikost aproximační konstanty A závisí na druhu spalovaného paliva a na požadované hodnotě optimálního přebytku vzduchu. Podle rov. (4-51) se nastavuje průtok vzduchu proporcionálně podle množství paliva-tzn., že tuto metodu lze použít jen při spalování těch paliv, které mají konstantní výhřevnost (složení) a u nichž lze s potřebnou přesností měřit jejich množství.

Z uvedeného vyplývá, že tuto metodu nelze použít při spalování uhlí (mění se jeho výhřevnost a nelze s potřebnou přesností měřit ani jeho spalované množství), ale lze ji výhodně využít u kotlů spalujících plyn i olej - pokud ovšem výhřevnost je konstantní. V takovém případě je podmínkou kvalitní regulace „jen“ přesné měření množství spalovaného plynu (oleje) i množství spalovacího vzduchu.

Proto se při měření průtoku plynu a vzduchu škrtícími organy provádí korekce na teplotu a tlak media. Podle některých autorů [4] se však přesnost měření průtoku

těmito korekcemi příliš nezlepší, protože přesnost měření tlaku a teploty je omezená - a v některých případech mohou tyto korekce přesnost měření průtoku dokonce zhoršit. Za účelnější se proto považuje realizovat měřící člen průtoku několika (např. třemi) měřícími systémy s různými regulačními rozsahy.

V případě, že výhřevnost spalovaného plynu kolísá, tak se musí měřit i tzv. Wobbeho číslo ***W***, které je definováno vztahem

$$W = \frac{Q_n}{\sqrt{h}} \qquad [MJ / m^3] \qquad (4\text{-}52)$$

Kde: Q_n – je výhřevnost plynu [MJ/m^3]
$h = \rho_p/\rho_{vz}$ je hutnost plynu,
ρ_p a ρ_{vz} jsou hustoty plynu a vzduchu [kg/m^3] při stejném tlaku a teplotě.

Metoda pára – vzduch

Tento způsob se využívá při spalování paliv jejichž výhřevnost kolísá a jejichž spalované množství nelze měřit – tedy i při spalování uhlí.

Vychází se z předpokladu, že potřebné množství spalovacího vzduchu je úměrné uvolněnému teplu v ohništi, přičemž velikost tohoto tepla je určena parním výkonem kotle. Z následujících rovnic [4] (jen pro ilustraci)

$M_{pv} \cdot Q_n \cdot \eta_k = M_p(i_p - i_{nv})$ [kW] (4-53)

$M_{vz} = k_1 \cdot M_{pv} \cdot Q_n$ [kg/s]

lze stanovit potřebné množství spalovacího vzduchu v závislosti na parním výkonu kotle podle vztahu

$$M_{vz} = \frac{k_1 \cdot M_p (i_p - i_{NV})}{\eta_k} = k_2 \cdot M_p \qquad [kg/s] \qquad (4\text{-}54)$$

Kde:

k_1 - stechiometrická konstanta udávající spotřebu vzduchu na každý kJ tepla přivedený v palivu [kg_{vz}/kJ_{pv}].
M_p - množství vyráběné páry [kg/s]
i_p ; i_{nv} - entalpie páry a napájecí vody [kJ/kg]
η_k - účinnost kotle [-]

Při tomto způsobu regulace je regulovanou soustavou celý kotel (ohniště, vzduchový systém, tlakový systém) a musí se tedy při takové regulaci eliminovat celá řada vnějších poruch, které na soustavu působí. Proto se vztah (4-54) v některých případech doplňuje pomocnými signály derivace tlaku v bubnu a derivace součtu nastavení všech akčních orgánů průtoku paliva, např.otáček podavačů paliva , viz následující vztah.

$$M_{VZ} = k_2 \cdot M_p + k_3 \frac{dp}{d\tau} + k_4 \frac{d\sum n}{d\tau} \qquad [kg/s] \qquad (4\text{-}55)$$

Přímá regulace přebytku spalovacího vzduchu

Oba popsané způsoby regulace množství spalovacího vzduchu však nemůžeme považovat za regulaci v pravém slova smyslu, neboť regulačnímu obvodu chybí zpětná vazba. Tuto můžeme vytvořit jen přímým měřením přebytku spalovacího vzduchu pomocí spalinových analyzátorů. Měří se kyslík nebo oxid uhličitý a součinitel přebytku vzduchu se vypočte z přibližných vztahů

$$\alpha = \frac{\omega_{co2\,\max}}{\omega_{co2}} \quad [-] \qquad (4\text{-}56)$$

nebo $\alpha = \frac{0{,}21}{0{,}21 - \omega_{O2}}$ [-]

kde: ω - poměrný objem dané složky ve spalinách [m^3/m^3]
ω_{co2max} -hodnota maximálního objemu CO_2 ve spalinách [m^3/m^3]

Protože hodnota ω_{co2max} se mění v dosti širokém rozmezí podle druhu paliva a do výpočtu přebytku vzduchu se tak vnáší chyba, je proto měření obsahu kyslíku výhodnější a častěji se používá.

Běžné automatické kyslíkové analyzátory (sonda ZrO_2 [57]) určují obsah kyslíku ve spalinách s přesností do 2% (linearizovaný výstupní signál), při přepínatelném rozsahu 0-25% (obj.) kyslíku - jako srovnávací plyn se používá vzduch.

Dynamické vlastnosti analyzátoru charakterizuje celková doba přechodu (definovaná jako 90% doby změny) $T_{90} \leq 15s$, doba ohřevu sondy (zprovoznění) je do 30min.

Vzorek spalin odebíraných pro analýzu by měl být reprezentativní. Ideální by byl odběr z plamene každého hořáku, a to v místě, kde je již palivo spálené - tedy na konci ohniště. Takový odběr však není proveditelný.

V praxi se proto odběr provádí v tahu kotle, obvykle za přehřívákem páry, ve spalinách o teplotě do cca 900˚C. V tomto místě by měly být spaliny z jednotlivých hořáků již dostatečně promíchány - celé ohniště se považuje za jediné spalovací zařízení, tím se však přesnost regulace přebytku vzduchu zhoršuje. To je způsobeno tím, že v případě i jen jednoho neseřízeného hořáku odstraní regulační obvod vzniklou odchylku změnou průtoku vzduchu u všech hořáků – nelze tedy regulací dosáhnout optimální stav. (Tento by se dosáhl jen v případě, že kotel by měl jen jeden regulovaný hořák.)

Rovněž spaliny v tahu kotle (v místě odběru) nejsou ideálně promíchány a nelze přesně určit místo odběru, v němž by byl při všech provozních stavech kotle zajištěn reprezentativní vzorek spalin pro analýzu. Proto se často odběr spalin provádí v několika místech spalinového tahu. Provést odběr vzorku až v kanálu za kotlem(spaliny jsou již dokonale promíchány) není možné, protože by se zvětšila chyba měření (přisátý vzduch) a neúměrně by se zvýšilo dopravní zpoždění měřeného přebytku vzduchu.

Aby regulace přebytku spalovacího vzduchu na základě signálu kyslíkové sondy byla spolehlivá, musí být zaručena potřebná spolehlivost vlastního měření obsahu kyslíku-tedy spolehlivost analyzátoru. Tato závisí především na konstrukci sondy - zejména při spalování uhlí musí být sonda ve spalinách provedena tak, aby se eliminovalo nebezpečí ucpávání oddělovacího filtru i při velkých koncentracích prachu (popílku) ve spalinách.

Analyzátor spalin by měl být rovněž umístěn co nejblíže ke spalovací komoře - zkrátí se tak dopravní zpoždění.

Z výše uvedeného je vidět, že automatická analýza spalin je proveditelná, avšak i při vyhovující přesnosti měřící sondy je přesnost stanovení obsahu kyslíku ve spalinách omezená – závisí na řadě okolností, jejichž vliv nedokážeme doposud eliminovat. (Např. velký průřez spalinového tahu kotle a nehomogenní koncentrace měnící se s výkonem i po průřezu tahu apod.)

Proto se doposud signál analyzátoru spalin (obsah kyslíku) používá jako pomocný korekční signál u regulačního obvodu množství spalovacího vzduchu např. metodou pára-vzduch, viz. kap. 4.4.2.2.

Řízení spalovacího procesu

V následujících kapitolách popsané způsoby regulace množství spalovacího vzduchu poskytují pouze základní představu řekněme o regulaci celkového množství spalovacího vzduchu. Pro zajištění provozu kotle s optimální účinností a s požadovaným obsahem spalitelných látek v tuhých zbytcích po spalování, a především pro dodržení emisních limitů CO a NO_x, se kromě celkového množství vzduchu (optimální přebytek vzduchu-viz např. **obr. 4.109** nebo též Vícerozměrný regulátor a Optimalizátor spalování fy Honeywell [51]) musí řídit i jeho rozdělení po délce spalovací dráhy i po průřezu spalovací komory – je tedy vhodnější hovořit o **řízení množství spalovacího vzduchu a jeho distribuci ve spalovací komoře kotle.**

Poměrně jednoduché je takové řízení u kotlů s **roštovým ohništěm** a některé případy jsou popsány v kap. 4.4.2.3.

U kotlů s **fluidním ohništěm** se v principu spalovací vzduch rozděluje rovněž na primární (pod fluidní rošt) a sekundární, který se do spalovacího prostoru přivádí různými způsoby podle typu fluidního ohniště (stacionární nebo cirkulující fluidní vrstva apod.) a jeho provedení (s externím výměníkem nebo bez externího výměníku, atd.) – viz např. [42], [50].

U kotlů s **práškovým ohništěm** granulačním je primární vzduch (nebo jeho část) součástí primární směsi (doprava uhelného prášku) a zbývající spalovací vzduch se rozděluje a přivádí různými způsoby-podle typu ohniště a provedení hořáků. Tak např. u ohniště s čelními vířivými hořáky se vzduch přivádí ke každému z hořáků samostatně (odstavený hořák má uzavřený přívod vzduchu) a je konstrukcí hořáku rozdělen do několika průtočných průřezů jako sekundární a terciální vzduch, každý průřez má obvykle vlastní klapku pro nastavení průtoku.

U ohniště s tangenciálními proudovými hořáky se část vzduchu přivádí v hořákových hubicích hlavních práškových hořáků, zbývající pak v samostatných přívodech v několika úrovních po výšce spalovací komory nad sebou (obvykle v jedné až třech) [42], [50], v některých případech řídící systém zajišťuje i naklápění určitých vzduchových hubic v závislosti na výkonu kotle, atd.

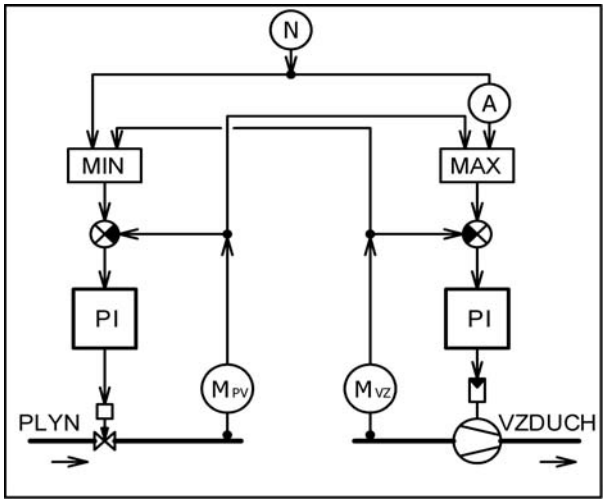
Při distribuci prášku z jednoho mlýna k více hořákům se obtížně zajišťuje jeho rovnoměrné rozdělení k jednotlivým hořákům. Některé fy. proto měří skutečný průtok prášku v každém práškovodu včetně granulometrie a podle naměřených hodnot řídí přívod vzduchu k jednotlivým hořákům (ECT STAR Systém [20]).Každý kotel-podle druhu paliva a provedení ohniště (tedy i kotle pro spalování komunálních odpadů, biomasy a pod.) – má určitá specifika, která musí systém řízení distribuce spalovacího vzduchu respektovat.

4.4.2.1 Regulace množství (přebytku)spalovacího vzduchu metodou palivo-vzduch

Při tomto způsobu regulace se průtok spalovacího vzduchu nastavuje proporcionálně podle průtoku paliva (plynu,oleje) podle rov. (4-51) - a jak již bylo uvedeno, lze ji použít jen při spalování paliv s konstantní výhřevností (s konstantním množstvím přivedeného tepla do kotle) a s možností měření jejich spalovaného množství. Schéma zapojení takové regulace je uvedeno na **obr. 4.113.**

Potřebné množství spalovaného paliva ***Mpv*** se nastavuje podle signálu okamžitého požadovaného výkonu ***N***, konstanta ***A*** pro nastavení odpovídajícího množství spalovacího vzduchu se určí podle rov. (4-51).

Problém je v tom, že přenosy průtoku paliva (systém přípravy - např. ohřevu a dopravy paliva) a přenosy průtoku spalovacího vzduchu (systém přípravy-např. předehřevu a dopravy vzduchu) mají různý časový průběh a mohou proto při změně výkonu kotle, v některých případech, vzniknout odchylky skutečného průtoku spalovacího vzduchu od požadovaného - tzn.,že v přechodových stavech může být kotel provozován s jiným přebytkem spalovacího vzduchu než je požadovaný. Při vyšším přebytku vzduchu může být přechodně překročen emisní limit NO_x, při nižším přebytku pak může být přechodně překročen emisní limit CO a při provozu s α<1 nelze vyloučit ani možnost výbuchu.



N – požadovaný výkon kotle
MIN, MAX – členy pro výběr min. a max. hodnoty vstupní veličiny
M_{PV} – množství paliva (plynu) M_{VZ} – množství vzduchu

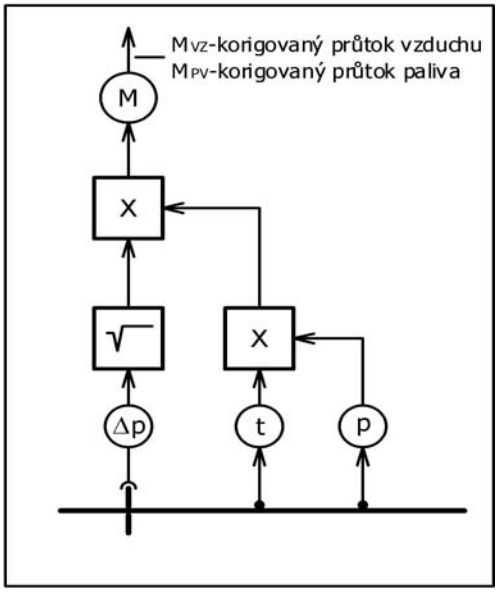
Obr. 4.113 *Regulace množství spalovacího vzduchu metodou palivo-vzduch* [4]

K eliminaci tohoto stavu jsou ve schématu zařazeny členy pro výběr maxima a minima, pomocí nichž se nastavuje taková žádaná hodnota průtoku paliva a spalovacího vzduchu, aby byl i v přechodových stavech (např. při změnách výkonu kotle) zaručen potřebný přebytek spalovacího vzduchu. (Při zvýšení výkonu kotle má prioritu zvýšení průtoku spalovacího vzduchu, při snížení výkonu kotle má prioritu snížení průtoku paliva-tzn., že vždy, i v přechodových stavech, je kotel provozován s přebytkem spalovacího vzduchu α>1.

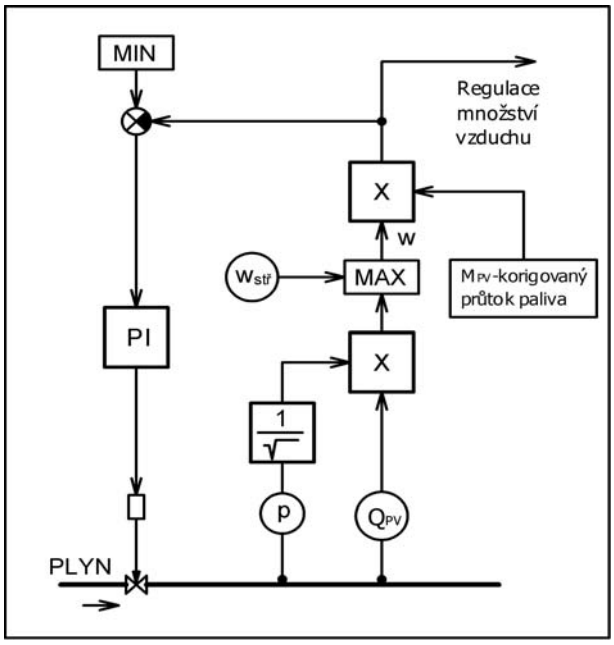
Protože podmínkou správné funkce této regulace je co nejpřesnější měření průtoku spalovacího vzduchu a množství přivedeného paliva do kotle, provádí se při jejich měření škrtícími orgány korekce na teplotu a tlak měřeného média – příklad takového zapojení je naznačen na **obr. 4.114.**

Mění-li se během provozu kotle výhřevnost spalovaného plynu nebo oleje (mění se jeho složení nebo hustota) musí se provést i měření Wobbeho čísla ***W*** – viz rov. (4-52). Wobbeho číslo se stanoví-viz např. zapojení na **obr. 4.115** - na základě měření skutečné výhřevnosti Q_{pv} spalovaného paliva a jeho hutnosti ***h***. Toto měření se provádí v plynovém kalorimetru a při ztrátě jeho signálu (zhasne plamének kalorimetru) se regulace přepne na konstantní (nastavenou) střední hodnotu $W_{stř}$ Wobbeho čísla.

Jak je vidět tak je třeba zvážit, zda při měnící se výhřevnosti paliva není vhodnější doplnit regulaci pomocným korekčním signálem obsahu kyslíku (viz. **obr. 4.117)** nebo pro řízení průtoku spalovacího vzduchu použít metodu pára-vzduch, viz kap. 4.4.2.2.



Obr. 4.114 *Korekce průtoku podle teploty a tlaku média [4]*



Obr. 4.115 *Měření Wobbeho čísla [4]*

4.4.2.2 Regulace množství (přebytku) spalovacího vzduchu metodou pára-vzduch

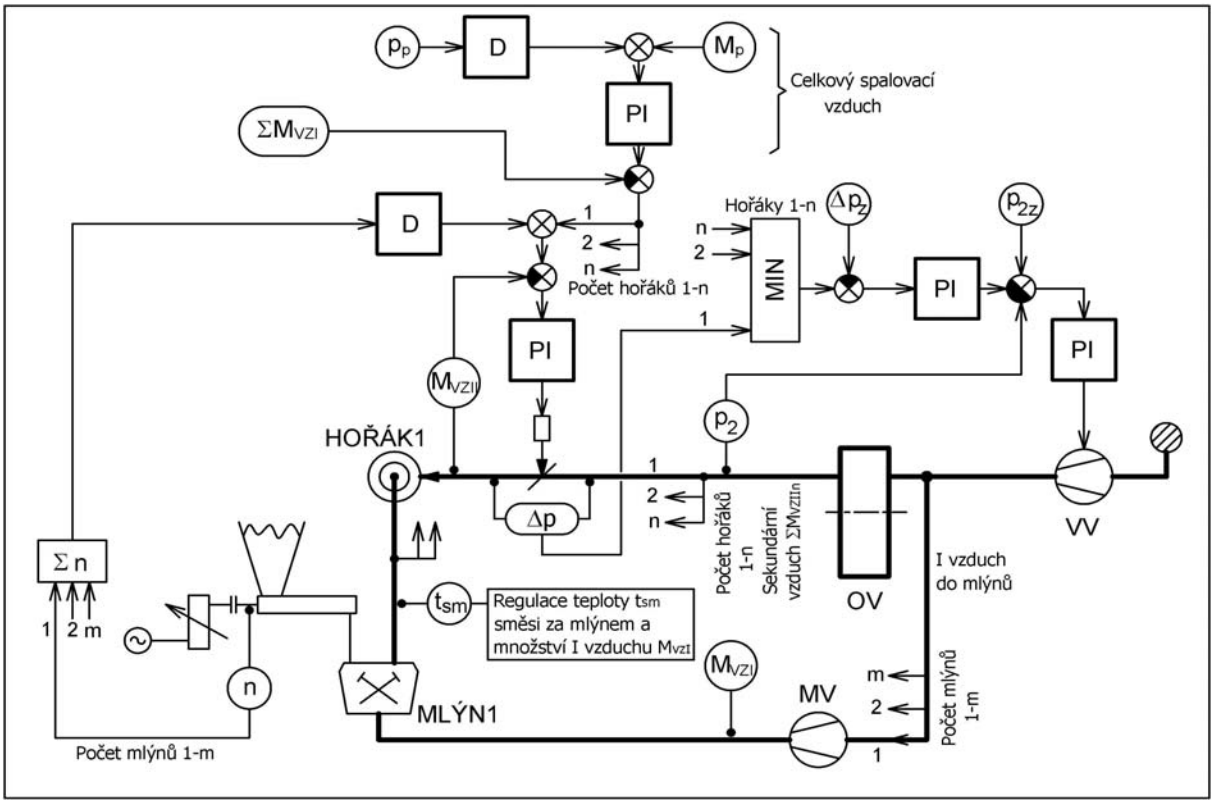
Průtok spalovacího vzduchu se v tomto případě nastavuje podle parního výkonu kotle s korekčním signálem derivace tlaku páry a derivace množství paliva (např. součtu otáček podavačů paliva) - viz rov. (4-55). Nověji se využívá i přímé měření množství dodávaného uhlí na řetězovém (pásovém) dopravníku před kotlem – např. radiometrické váhy Bethold s kobaltovým zářičem s přesností měření 0,5 % [58]. (Výměna co 3 roky, speciální režim.)

V praxi se používají různé způsoby zapojení regulátoru, jeden z možných pro ilustraci problému, je uveden na **obr. 4.116.** V tomto případě je naznačeno řízení kotle s granulačním ohništěm pro spalování černého uhlí.

Kotel má (1 až m) mlýnů s přímým foukáním a (1 až n) práškových hořáků, přičemž k jednomu mlýnu je připojeno několik hořáků. Mlýn, který je odstaven, má uzavřen přívod primárního vzduchu a uzavřen je i přívod sekundárního vzduchu do všech příslušejících hořáků.Veškeré množství spalovacího vzduchu dodává vzduchový ventilátor ***VV***, dodávku primárního vzduchu do mlýnu zajišťuje mlýnský ventilátor ***MV***.

Regulace teploty práškové směsi za mlýnem a regulace množství primárního vzduchu je naznačena symbolicky a je popsána v kapitole 4.1.2.3.

V horní části obrázku vlevo je naznačena regulace množství sekundárního vzduchu M_{vzII}, a to pro jeden hořák, jehož hodnota se nastavuje podle parního výkonu M_p a pomocného signálu derivace tlaku páry p_p společným hlavním regulátorem ***PI***, který zadává po odečtení celkového množství primárního vzduchu

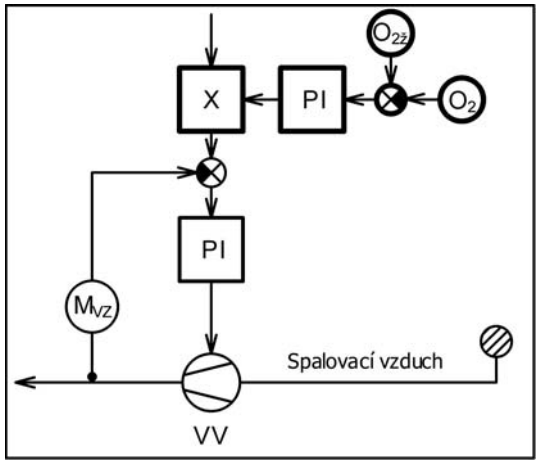


Obr. 4.116 *Regulace množství spalovacího vzduchu metodou pára – vzduch.[1]*

ΣM$_{vzI}$ žádanou hodnotu průtoku sekundárního vzduchu podřízeným regulátorům ***PI*** jednotlivých regulačních klapek. Zadávaná žádaná hodnota pro podřízené regulátory se upravuje dalším pomocným signálem od derivace součtu ***Σn*** otáček všech provozovaných podavačů uhlí.

Celkové množství spalovacího vzduchu do kotle se v tomto případě reguluje nepřímo samostatným regulačním okruhem, jehož schéma je naznačeno v pravé horní části obrázku.

Výkon vzduchového ventilátoru kotle ***VV*** se nastavuje samostatným ***PI*** regulátorem, který udržuje tlak vzduchu ***p$_2$*** za ohřívákem vzduchu na konstantní požadované hodnotě ***p$_{2ž}$***, která je korigována signálem z ***PI*** regulátoru podle nejnižší hodnoty z tlakových ztrát ***Δp*** na regulačních klapkách u všech ***n*** hořáků. Tímto způsobem se regulační klapky sekundárního vzduchu u jednotlivých hořáků udržují v potřebném regulačním rozsahu při všech provozních stavech kotle.



Obr.4.117 *Korekce podle obsahu kyslíku ve spalinách [1]*

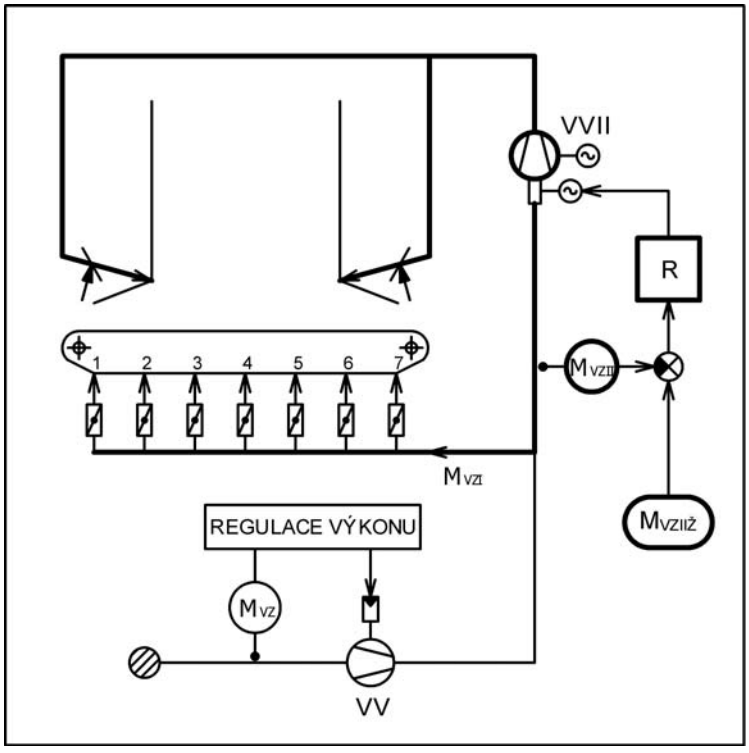
Při regulaci množství spalovacího vzduchu (přebytku vzduchu) metodou pára-vzduch se pro zvýšení kvality regulace obvykle používá jako korekční signál hodnota obsahu kyslíku ve spalinách měřená spalinovým analyzátorem. Zapojení regulačního obvodu s tímto korekčním signálem je uvedeno na **obr. 4.117.**

Jako hlavní způsob regulace je použita metoda pára-vzduch (případně i metoda palivo-vzduch) a obsah kyslíku ve spalinách se využívá jako pomocný signál. Podřízený ***PI*** regulátor pak ovládá akční orgán množství spalovacího vzduchu, kterým může být (podle provedení regulačního obvodu) vzduchový ventilátor nebo regulační klapky vzduchu u jednotlivých hořáků.

Pokud není zaručena naprostá spolehlivost analyzátoru spalin, doporučuje se omezit vlivnost signálu O_2 na 10% až 20%, aby v případě poruchy analyzátoru nevznikla příliš velká odchylka přebytku vzduchu.

4.4.2.3 Regulace množství spalovacího vzduchu u kotlů s roštovým ohništěm.

U těchto kotlů – vzhledem k dynamickým vlastnostem spalovacího zařízení, viz **obr. 4.112 -** je množství spalovacího vzduchu akční veličinou regulace výkonu kotle, schéma takové regulace je vidět na **obr. 4.24.** To znamená, že celkové množství spalovacího vzduchu nastavuje regulátor výkonu kotle podle požadovaného výkonu (resp. tlaku páry) a regulace jakosti spalování zajišťuje rozdělení tohoto vzduchu na primární a sekundární vzduch tak, aby byly dodrženy podmínky pro dosažení optimální účinnosti kotle i splnění emisních limitů. Zjednodušené schéma takové regulace je vidět na **obr. 4.118.**



Obr.4.118 *Regulace množství sekundárního vzduchu u roštového ohniště*

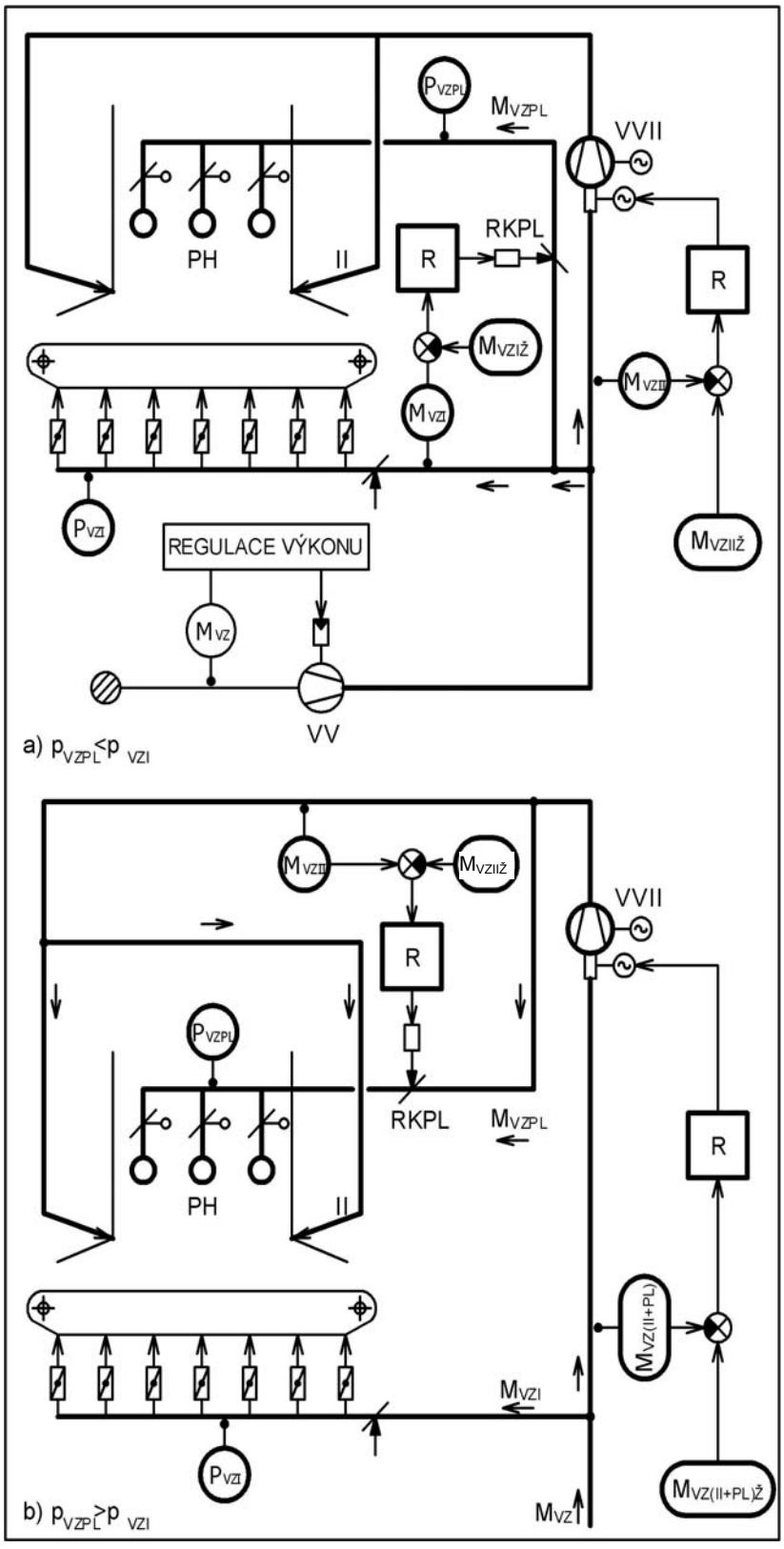
Množství spalovacího vzduchu M_{vz} nastavené podle výkonu kotle se rozdělí na primární vzduch M_{vzI}, který se přivádí přes rošt a na sekundární vzduch M_{vzII}, který se ventilátorem sekundárního vzduchu VVII vhání do spalovací komory nad roštem. Množství sekundárního vzduchu se udržuje na požadované hodnotě $M_{vzIIž}$ regulátorem, akčním členem je obvykle regulační ústrojí ventilátoru (regulace změnou otáček není nutná, regulační rozsah není velký) - zbývající vzduch se pak do kotle přivádí jako primární. Požadovaná hodnota $M_{vzIIž}$ se u kotlů větších výkonů s velkým regulačním rozsahem zadává v závislosti na výkonu kotle.

Vzduchová skříň roštu je po délce rozdělená do několika sekcí (podle velikosti a typu roštu např. do 3 až 7), každá sekce má vlastní přívod primárního vzduchu s regulační klapkou pro nastavení individuálního průtoku (emise NO_x a CO). Podle druhu spalovaného uhlí se požadované průtoky nastaví při seřizování kotle ručně, pouze když se u kotle předpokládá častá změna kvality uhlí, tak se regulační klapky vybaví dálkovým ovládáním – pro každý druh uhlí se při seřizování nastaví

požadovaná poloha klapky a při přechodu na jiný druh uhlí se klapky dálkově přestaví do nových poloh.

U kotlů větších výkonů se primární vzduch rozděluje do dvou větví - na levou a pravou stranu roštu. Obvykle se množství primárního vzduchu M_{vzL} a M_{vzP} v každé větvi měří a každá větev má i vlastní regulační klapku.

V některých případech se roštový kotel s výhodou využije pro přídavné spalování odpadních plynů,jejichž složení (malý obsah H_2) neumožňuje jejich samostatné spalování v hořáku - např. jinak nevyužitelné přebytky kychtového plynu v hutích. Přídavné spalování v tomto případě znamená, že plyn lze spalovat jen pokud výkon kotle při spalování pouze uhlí je vyšší než stanovený minimální výkon - jinak řečeno, že v kotli spolehlivě hoří uhlí. Plyn se přivádí hořákovými hubicemi (nikoliv hořáky-zajišťuje se jen přívod plynu a části spalovacího vzduchu, přívody jsou vybaveny uzavírací armaturou) většinou v bočních stěnách kotle nad přívody sekundárního vzduchu.



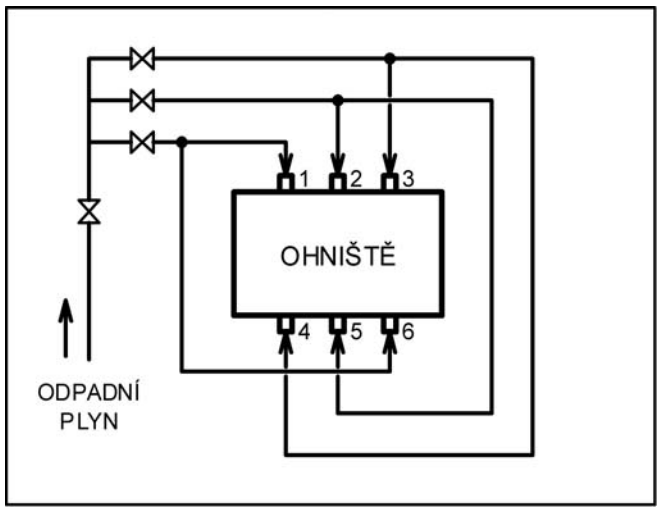
Obr.4.119 *Roštové ohniště s přídavným spalováním*

Při přídavném spalování se tedy spalovací vzduch kotle (který nastavuje regulátor výkonu) musí rozdělit na primární M_{vzI}, sekundární M_{vzII} a vzduch pro přídavně spalovaný plyn M_{vzPL}. Podle potřebného tlaku vzduchu na vstupu do hořákové hubice plynu lze spalovací vzduch do kotle

rozdělit v principu dvěma způsoby, schematicky jsou naznačeny na obr. 4.119. Na horním obr. 4.119a) je naznačena alternativa pro případ když potřebný tlak p_{vzPL} pro přídavné spalování plynu v plynových hubicích ***PH*** je nižší než tlak p_{vzI} primárního vzduchu pod roštem $p_{vzPL} < p_{vzI}$.

Celkové množství spalovacího vzduchu nastavuje regulace výkonu,množství sekundárního vzduchu M_{vzII} řídí samostatný regulační okruh. Vzduch pro spalování plynu M_{vzPL} se odebírá z potrubí primárního vzduchu a reguluje se regulační klapkou RK_{PL} tak, aby bylo dodrženo požadované množství primárního vzduchu M_{vzI} .

V případě, že tlak p_{vzPL} pro přídavné spalování plynu se musí zajistit vyšší než je tlak p_{vzI} primárního vzduchu, provede se zapojení podle **obr. 4.119b).** Celkový vzduch M_{vz} pro spalování nastavuje opět regulátor výkonu.Vzduch M_{vzPL} pro spalování plynu se odebírá až za ventilátorem VVII sekundárního vzduchu a jeho množství se reguluje regulační klapkou RK_{PL} tak, aby množství sekundárního vzduchu M_{vzII} se udržovalo na požadované hodnotě. Ventilátorem VVII sekundárního vzduchu se reguluje součtové množství $M_{vz\ (II+PL)}$ sekundárního vzduchu a vzduchu pro spalování plynu, množství primárního vzduchu M_{vzI} pak tvoří zbytek z celkového množství vzduchu M_{vz} .



Obr. 4.120 *Ovládání přívodů odpadního plynu*

Pro přídavné spalování odpadního plynu musí být roštové ohniště vybaveno signalizací plamene (hoření uhlí) - obvykle se používají tři snímače, pozitivní signál musí mít např. dva ze tří. Je vhodné doplnit tyto signály vizuálním sledováním průmyslovou kamerou.

Rovněž ovládání plynových hubic (zavírání a otevírání plynu) by mělo být provedeno tak, aby bylo zajištěno hoření plynu v celém průřezu ohniště - např. podle **obr. 4.120.** Při uzavření kteréhokoliv přívodu plynu se musí uzavřít i příslušný přívod spalovacího vzduchu.

4.5 REGULACE PODTLAKU V KOTLI

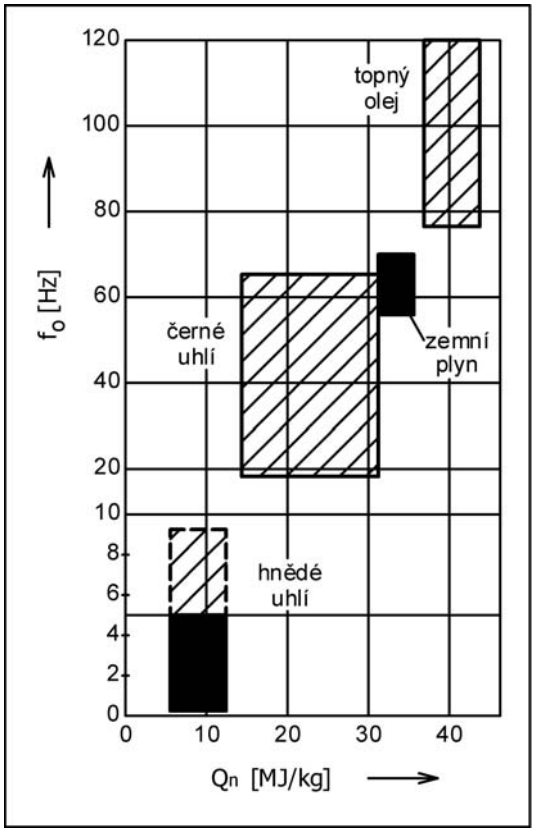
Tento regulační obvod musí zajistit potřebný podtlak ve spalovací komoře při všech provozních režimech kotle tak, aby byl zajištěn bezpečný a spolehlivý odtah spalin z kotle do ovzduší-a to i při pulzacích tlaku ve spalovací komoře. (Únik spalin do kotelny ohrožuje zdraví obsluhy a snižuje životnost především nosné konstrukce kotle vlivem koroze.)

U kotlů s přetlakovým ohništěm (prakticky jen při spalování plynu a oleje) se takový regulační obvod nerealizuje, dopravu vzduchu do kotle i odvod spalin z kotle zajišťuje vzduchový ventilátor-při návrhu takového systému se musí počítat i se sacím účinkem komínu a bod s nulovým přetlakem vůči okolí leží mezi kotlem a komínem. (Přetlak ve spalovací komoře dosahuje orientačně hodnot až 10^4 Pa.)

Optimální velikost udržovaného podtlaku se volí podle typu spalovacího zařízení, stability spalovacího procesu, kvality regulačního obvodu a podle poruchových veličin které na soustavu působí. Hlavní poruchové veličiny, které

podtlak ve spalovací komoře především ovlivňují, jsou: změny průtoku spalovacího vzduchu,kolísání množství spalovaného paliva, odstavování a najíždění mlýnů (hořáků), pulsace plamene, zanášení konvekčních ploch, čištění (ofukování a ostřikování) teplosměnných ploch, ale též např. nedodržení provozní kázně-neutěsněné vstupní průlezy do kotle. Regulovaný podtlak by se měl měřit v místě nejvyššího tlaku spalin-u klasických dvoutahových kotlů je to pod stropem spalovací komory. Orientačně lze doporučit jako optimální podtlak hodnotu 20 Pa a regulace by tento podtlak měla udržovat při ustáleném provozu s přesností ±10 Pa, přičemž max.regulační odchylka by neměla být vyšší než 30 Pa. Vysoký podtlak způsobuje zvýšené přisávání falešného vzduchu netěsnostmi kotle (nižší účinnost kotle, nedodržení potřebného režimu spalování z hlediska emisí, větší konverze SO_2 na SO_3 a tím zvýšení rosného bodu spalin, vyšší spotřeba energie na dopravu spalin apod.), nízký podtlak zvyšuje nebezpečí průniku spalin do kotelny při pulsacích ve spalovací komoře nebo při mimořádných stavech kotle.

Důležité je, aby měřící člen podtlaku byl vybaven vhodným tlumením měřeného signálu, které by eliminovalo pronikání vyšších frekvencí kolísání tlaku vyvolaných především nestabilitou spalovacího procesu (pulsace tlaku při spalování a pod.) a turbulencemi spalin v místě měření. (Pokud takové vyšší frekvence proniknou do regulačního obvodu, tak je již regulátorem prakticky nelze odstranit.)



Obr. 4.121 *Naměřené frekvence fluktuací tlaku v ohništích kotlů [48]*

Tab.4-3 *Obvyklé rozsahy základních frekvencí pulsací tlaku u některých typů ohnišť [47]*

Typ ohniště*:*	Rozsah frekvence pulsací tlaku [Hz]
zemní plyn	60 až 120
topný olej	80 až 100
černé uhlí	20 až 60
hnědé uhlí	1 až 3

Orientační hodnoty základních frekvencí pulsací tlaku ve spalovací komoře kotle jsou uvedeny v **tab. 4-3** v závislosti na druhu spalovaného paliva.

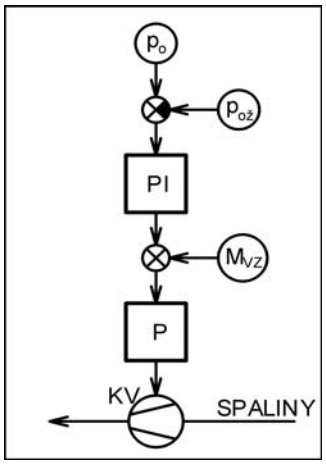
Všeobecně platí, že čím kvalitnější palivo se spaluje (vyšší výhřevnost, menší obsah vody a popele) tím vyšší je frekvence pulsací tlaku. Navíc se uplatňuje i vliv změny výkonu kotle. Tak např. bylo zjištěno, že při zvýšení výkonu kotle se zvýší jak amplituda a střední hodnota tlaku, tak i frekvence pulsací.

Naměřené závislosti základní frekvence fluktuací tlaku (fo) v ohništích kotlů podle druhu paliva a jeho výhřevnosti (Q_n) jsou uvedeny na **obr. 4.121.** Každý kotel má určitou oblast výkonu s minimální intenzitou pulsací, která se přibližně shoduje

s ekonomickým výkonem kotle. Měření a vyhodnocování pulsací tlaku v ohništi se tak osvědčilo jako jednoduchá diagnostická metoda pro hledání zdrojů nízkofrekvenčních pulsací (10^0 až 10^{-1} Hz), při nichž dochází k nebezpečnému vyšlehávání plamene netěsnostmi spalovací komory [49].

Možné provedení regulačního obvodu podtlaku spalin ve spalovací komoře kotle je naznačeno na **obr. 4.122.**

Hlavní regulátor je obvykle typu PI a velmi často se používá i pomocný signál poruchové veličiny, kterou může být např. množství spalovacího vzduchu(případně akční veličina regulátoru spalovacího vzduchu). Akční orgán - kterým obvykle bývají regulační klapky ve spalinovém kanálu (u menších kotlů) nebo natáčecí rozváděcí nebo oběžné lopatky spalinového ventilátoru, případně měnič otáček spalinového ventilátoru – ovládá obvykle proporcionální regulátor.



***Obr. 4.122** Regulace podtlaku v kotli [1]*

4.6 REGULACE TEPLOTY SPALIN ZA KOTLEM

Lze diskutovat o tom, zda tato regulace přísluší k regulaci kvality spalování v kotli. V každém případě je teplota spalin za kotlem spolu s množstvím spalin (přebytkem vzduchu) rozhodující pro dodržení optimální účinnosti kotle – a účinnost kotle je také i ekonomickým kriteriem regulace kvality spalování.

Teplotu spalin za kotlem však nelze volit jen z hlediska dosažení max. účinnosti kotle, ale její velikost souvisí i s konstrukcí kotle (zda kotel má či nemá spalinový ohřívák vzduchu) a druhem spalovaného paliva (především z hlediska obsahu síry).

Při spalování fosilních paliv obsahujících síru vzniká její oxidací ve spalovací komoře prakticky jen SO_2, a až v průběhu ochlazování spalin, přibližně pod 600 ˚C, se v závislosti na existujícím přebytku spalovacího vzduchu určitá (a to velmi malá) část vzniklého SO_2 oxiduje dále na SO_3, který při dalším ochlazení spalin pod cca 200 ˚C vytváří s vodní parou ve spalinách takřka okamžitě plynnou H_2SO_4 [52]. Při dalším ochlazování spalin pak plynná H_2SO_4 a vodní pára kondenzuje a vytváří roztok kondenzátu H_2O / H_2SO_4 - tedy všechny části zařízení, od poslední teplosměnné plochy kotle až po komín (pokud není u kotle odsiřování spalin za kotlem), které mají teplotu stěny nižší než je rosný bod směsi H_2O/H_2SO_4, budou napadeny korozí.

Teplota spalin za kotlem se proto musí udržovat na takové hodnotě,aby teplota stěny ohrožených zařízení byla vyšší, nebo v souladu, s rosným bodem spalin. Hodnotu rosného bodu spalin může konstruktér odhadnout např. podle [42], [52] a [53]. Teplota stěny se stanoví pro různá provedení kotle např.takto:

- poslední teplosměnnou plochou kotle je ohřívák vody.

  V tomto případě je pro teplotu stěny trubky ohříváku vody určující teplota media, tj.teplota napájecí vody do kotle. Teplota stěny trubky je asi o 5 K (max. o10 K) vyšší než teplota napájecí vody.

- poslední teplosměnnou plochou je trubkový spalinový ohřívák vzduchu.

  Teplotu stěny trubky lze přibližně určit vztahem

$$t_{st} = \frac{t_s \cdot \alpha_s + t_v \cdot \alpha_v}{\alpha_s + \alpha_v} \cong \frac{t_s + t_v}{2} \qquad [^{\circ}C] \qquad (4\text{-}57)$$

kde: t_s a t_v jsou teploty spalin a vzduchu [˚C]

α_s a α_v jsou součinitelé přestupu tepla konvekcí na straně spalin a vzduchu [W/(m^{2}K)]

▪ poslední teplosměnnou plochou je regenerativní spalinový ohřívák vzduchu.

Teplotu stěny plechů lze určit přibližně podle vztahu [6]

$$t_{st} = \frac{X_s \cdot \alpha_s \cdot t_s + X_v \cdot \alpha_v \cdot t_v}{X_s \cdot \alpha_s + X_v \cdot \alpha_v} \qquad [^{\circ}C] \qquad (4\text{-}58)$$

kde: α_s a α_v jsou součinitelé přestupu tepla ze spalin do plechů a z plechů do [W/(m^2.K)]

Xs a Xv jsou poměrné velikosti spalinové a vzduchové části ohříváku [-]

t_s je výstupní teplota spalin ze spalinového segmentu [˚C]

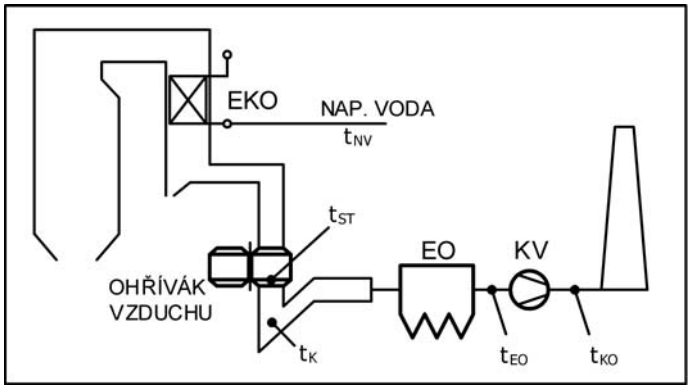
t_v je vstupní teplota vzduchu do vzduchového segmentu [˚C]

▪ spalinové kanály a zařízení za kotlem.

Teplota stěny se uvažuje stejná jako je teplota spalin.

Zajistit ochranu zařízení před korozí tedy znamená udržovat teplotu spalin (t_k) za kotlem o potřebnou hodnotu vyšší než rosný bod spalin (t_{RB}) (ochrana zařízení za kotlem) **a současně zajistit, aby teplota stěny poslední teplosměnné plochy byla s ním v souladu** – obvykle se požaduje $t_{st} \geq t_{RB}$. Schematicky je situace naznačena na **obr. 4.123.**

Teplota spalin ***t_k*** za kotlem však není konstantní a mění se při změně parametrů spalovaného paliva, při zašpinění a čištění teplosměnných ploch kotle (ofukování teplosměnných ploch) a také při změně výkonu kotle (v tomto případě souvisí i s konstrukcí kotle resp. s jeho charakteristikou: obvykle se s klesajícím výkonem kotle teplota spalin za kotlem snižuje) a pokud je tepelný oběh s regenerací tepla (VT ohříváky vody) tak se mění i se změnou teploty napájecí vody - při výpadku ohříváku vody (sníží se teplota vody) teplota spalin za kotlem klesá.



t_{st} – teplota stěny poslední teplosměnné plochy
t_k – teplota spalin za kotlem t_{EO} – teplota spalin za EO
t_{KO} – teplota spalin před komínem

Obr. 4.123 Teplotní poměry v partii za kotlem

Teplota stěny ***t_{st}*** poslední teplosměnné plochy se stanoví tak jak je uvedeno výše-viz rov.(4-57) a (4-58). Teplota spalin za kotlem t_k se určí podle potřebné teploty spalin před komínem ***t_{ko}***, uvážit se musí tepelné ztráty kanálů a zařízení (např.EO) do okolí, jakož i ohřev spalin na kouřovém ventilátoru (KV).

$$t_k \geq t_{RB} + \Delta t_{ko} + \Delta t_{z2} + \Delta t_{z1} - \Delta t_{kv} \geq t_{RB} + \Delta t_z \qquad [^{\circ}C] \qquad (4\text{-}59)$$

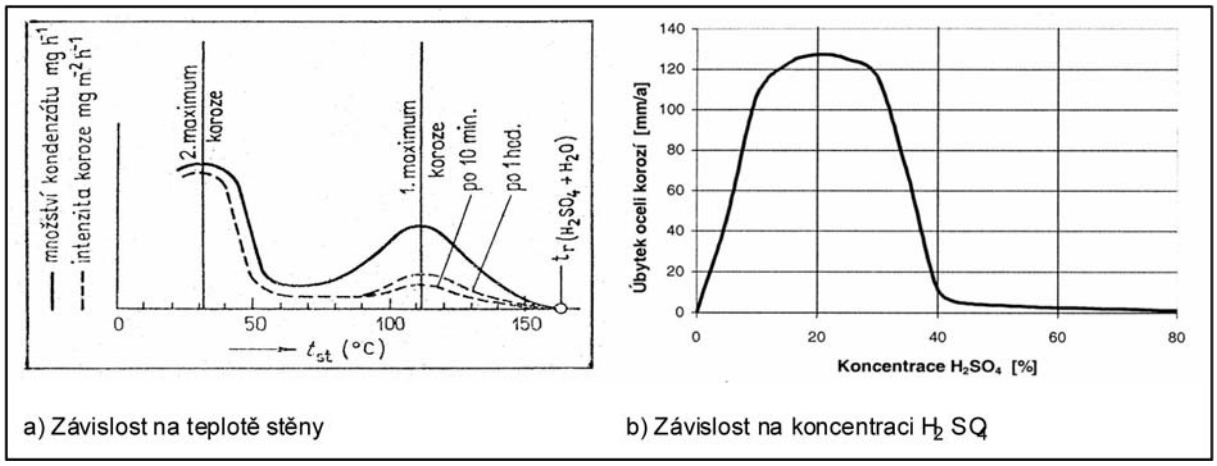
kde: $t_{ko} = t_{RB} + \Delta t_{ko}$; Δt_{ko} – je ochlazení spalin na komíně.

t_{EO} je teplota spalin za filtrem nebo odlučovačem, $t_{EO} = t_{ko} + \Delta t_{z2} - \Delta t_{kv}$

Δt_{z2} - je ochlazení spalin mezi EO a komínem
Δt_{kv} - je ohřev spalin na kouřovém ventilátoru KV
$t_k = t_{EO} + \Delta t_{z1}$
Δt_{z1} - je ochlazení spalin mezi kotlem a EO

Podmínka spolehlivého provozu – $t_{st} \geq t_{RB}$ **a současně** $t_k \geq t_{RB} + \Delta t_z$ - musí být splněna při všech provozních stavech kotle, tedy i při najíždění. Je třeba vzít v úvahu, že teplota spalin t_k za kotlem s klesajícím výkonem kotle se snižuje(pokud není regulovaná) a měnit se s výkonem kotle může i rosný bod t_{RB} spalin. Ke změně rosného bodu spalin t_{RB} může dojít i v důsledku změny koncentrace SO_3 ve spalinách vlivem nánosů popílku a jeho vlastností – tak např. nános popílku v hadicovém filtru může mít katalytické účinky na konverzi $SO_2 \rightarrow SO_3$ (bude-li obsahovat např. V_2O_5) nebo sorpční, pokud bude obsahovat např. volný CaO.

Při určení vhodné teploty stěny t_{st} poslední teplosměnné plochy se v některých případech vědomě volí teplota mírně nižší než je rosný bod ($t_{st} < t_{RB}$) – ale to jen v případě, když konstruktér provede potřebná opatření; např. když „studený“ konec teplosměnné plochy provede z materiálu odolného proti korozi nebo zajistí možnost jeho jednoduché výměny (opravy). Vychází se ze skutečnosti, že intenzita koroze při velmi malé koncentraci H_2SO_4 v roztoku je nízká a životnost studeného konce teplosměnné plochy je vzhledem k provedeným konstrukčním opatřením přijatelná. Situace je znázorněna na **obr. 4.124.**



Obr. 4.124 *Intenzita koroze [42][53]*

Na **obr.4.124a)** je naznačen průběh intenzity koroze v závislosti na teplotě stěny.Pokud korozi chceme vyloučit, pak teplota stěny t_{st} musí být bezpečně nad rosným bodem t_{RB}. Korozní účinek při dosažení hodnoty rosného bodu je ale nepatrný, protože množství vzniklého kondenzátu je malé.Teprve když klesne teplota stěny asi o 20 K až 40 K pod rosný bod, dosáhne intenzita koroze prvního maxima. Při dalším poklesu teploty stěny nejprve intenzita koroze klesá (snižuje se koncentrace H_2SO_4 v roztoku) a při poklesu teploty stěny cca pod rosný bod vodní páry dosáhne intenzita koroze druhého maxima – koncentrace H_2SO_4 dosahuje hodnoty asi 20 % až 40 %.Při koncentraci 20 % podle **obr. 4.124b)** dosahuje intenzita koroze své maximum. Ke zvlášť silné korozi dochází při opakovaném přecházení prvního maxima (takový stav může nastat zejména při najíždění a odstavování kotle) a systém regulace a řízení kotle nesmí takový provozní stav připustit.

Z tohoto hlediska jsou nejvíce ohroženy kotle s roštovým ohništěm, protože se většinou najíždí přímo uhlím (rosný bod je tedy vysoký a teplosměnné plochy na

konci kotle jsou studené) - ve srovnání s práškovými nebo fluidními kotli, u nichž se pro najíždění dnes většinou používá zemní plyn. (Při zapálení uhlí jsou teplosměnné plochy již prohřáté.)

Regulace teploty spalin za kotlem se obecně liší podle toho, zda kotel má spalinový ohřívák vzduchu.

- kotel nemá ohřívák vzduchu-poslední teplosměnnou plochou je ohřívák vody.
  V tomto případě se regulace provádí zvýšením teploty napájecí vody (předehřevem) před vstupem do ohříváku vody.
- kotel má spalinový ohřívák vzduchu – tento je tedy poslední teplosměnnou plochou v kotli.
  V tomto případě se regulace provádí zvýšením teploty studeného vzduchu (předehřevem) před jeho vstupem do ohříváku vzduchu. Používají se dva (resp. tři) způsoby předehřevu:
- recirkulace horkého vzduchu(z výstupu ohříváku vzduchu)do studeného vzduchu před jeho vstupem do ohříváku vzduchu
- předehřev „cizím“ mediem (nejčastěji nízkotlakou parou) ve výměníku tepla, který je obvykle umístěn ve vzduchovém kanálu před ohřívákem vzduchu.
- případně kombinace obou způsobů.

4.6.1 Regulace výstupní teploty spalin u kotle bez spalinového ohříváku vzduchu

Jestliže poslední teplosměnnou plochou kotle je ohřívák napájecí vody pak teplota jeho stěny t_{st} a ani teplota spalin za kotlem t_k nemůže nikdy klesnout pod teplotu napájecí vody t_{nv} – její minimální teplota je obvykle 105 ˚C. Nebezpečí koroze tedy hrozí jen při spalování paliva s vyšším obsahem síry, pokud potřebná teplota spalin t_k za kotlem (z hlediska ochrany komína před korozí) by měla být vyšší než uvedených 105 ˚C nebo pokud je rosný bod vyšší než tato teplota. Tato situace může nastat např.při spalovaní mazutu s vysokým obsahem síry. Příklad regulace u mazutového kotle je uveden na **obr. 4.125.** V tomto případě se předehřev napájecí vody na potřebnou teplotu t_{EKO} provede jejím ohřátím kotelní vodou ve výměníku tepla, který je situován (pro názornost) ve vodní části parního bubnu. Akčním orgánem regulace je trojcestný regulační ventil TRV v přívodu napájecí vody.Měří se teplota stěny ($t_{st} = t_{EKO} + \Delta t$) a teplota spalin za kotlem (t_k), regulátor (R) zpracovává menší z regulačních odchylek teploty stěny nebo teploty spalin(výběr minima).

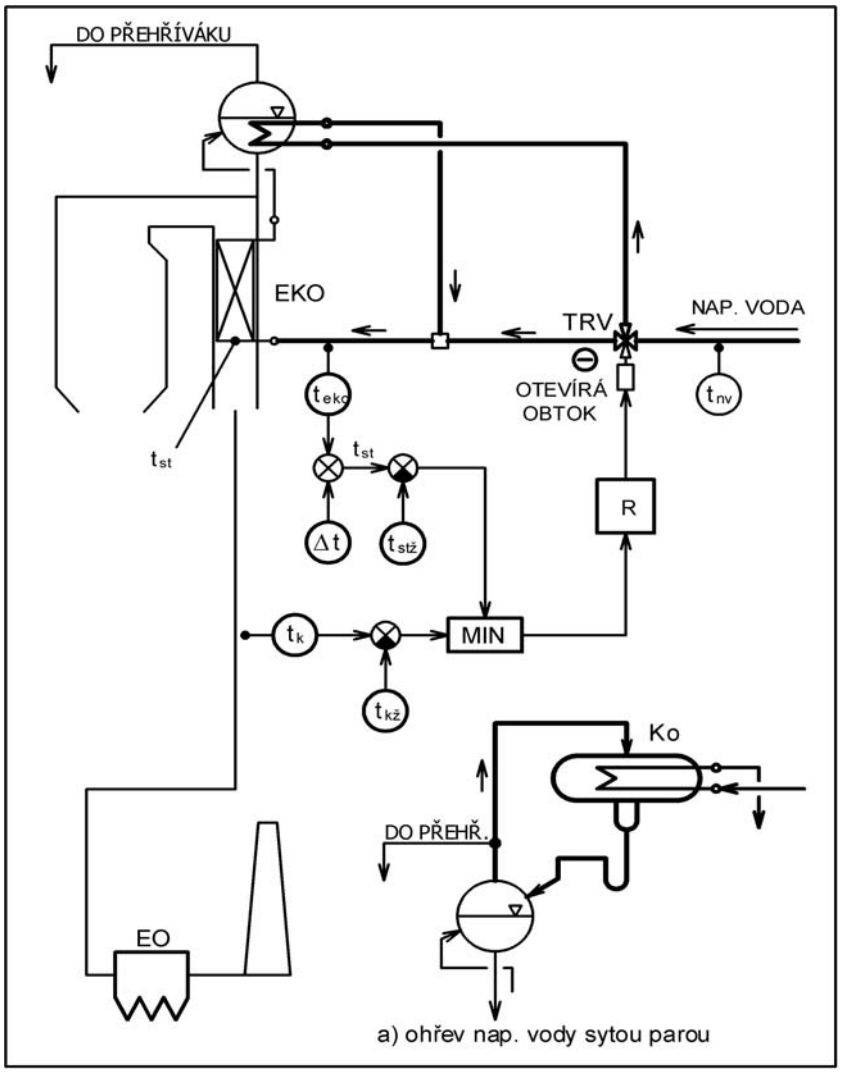
Pokud se uvedené palivo používá i pro najíždění kotle,pak podmínkou spolehlivého najíždění (s vyloučením koroze) je provedení kotle pro rychlé najíždění - tzn., že kotel má výparník s barbotáží „cizí“ parou a buben má potrubí pro rychlé vypouštění vody. Spalinový ohřívák vody se prohřívá napájecí vodou (veškerá voda jde přes výměník v parním bubnu) a barbotáží při současném odpouštění vody se musí zvýšit teplota ve výparníku tak, aby zařízení bylo provozováno nad rosným bodem.

Alternativní zapojení pro předehřev napájecí vody je naznačeno na **obr.4.125a).** Místo ohřevu kotelní vodou se použije ohřev sytou parou z parního bubnu v kondenzátoru (Ko), napájecí voda se ohřívá kondenzací syté páry, kondenzát se vrací zpět do parního bubnu kotle. Toto provedení je dražší, ale nezabírá se vodní prostor parního bubnu, nebo prostor v systému zavodňovacích trubek výparníku (viz též **obr. 4.59**).

Předehřev napájecí vody lze provést i „cizím“mediem ve výměníku tepla před vstupem napájecí vody do kotle. Regulace se pak provede opět obtokem vody kolem

výměníku, nebo na straně ohřívaného media. (Tento způsob předehřevu se používá spíše výjimečně.)

Bude-li se na kotli bez ohříváku vzduchu spalovat uhlí s velmi vysokým obsahem síry, pak v případě kotle s roštovým ohništěm lze použít stejné zapojení jako na **obr. 4.125.** U kotle s práškovým (případně i roštovým) ohništěm při najíždění např. zemním plynem lze pro regulaci teploty spalin použít opět stejné zapojení, ale nemusí se zajišťovat předehřev při najíždění.



TRV – trojcestný regulační ventil t_{EKO} – teplota napájecí vody před EKO Ko – kondenzát
t_{st} – teplota stěny poslední teplosměnné plochy (EKO) t_k – teplota spalin za kotlem

Obr. 4.125 *Regulace teploty spalin předehřevem napájecí vody*

4.6.2 Regulace výstupní teploty spalin u kotle se spalinovým ohřívákem vzduchu

Dále uvedené platí za předpokladu,že obsah síry ve spalovaném palivu je nižší než se uvažoval v předchozí kap.4.6.1 - takže ohřívák vody není ohrožen korozí ani při nejnižší teplotě napájecí vody, např. 105 ˚C.

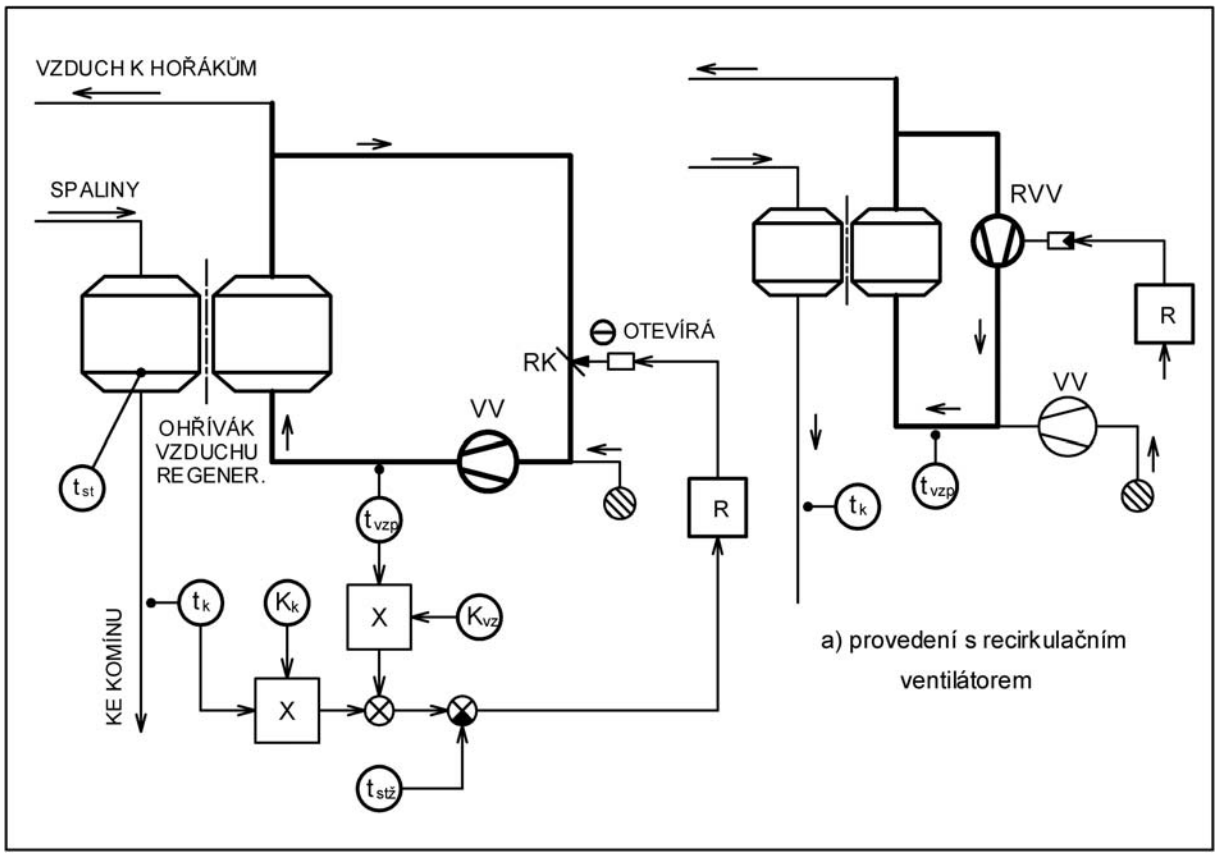
Jak již bylo výše uvedeno, používají se v tomto případě tři způsoby předehřevu vzduchu:

a) recirkulace horkého vzduchu do studeného vzduchu před jeho vstupem do ohříváku vzduchu.

Tento způsob předehřevu se používá spíše u kotlů menších výkonů .

a**1) regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu podle teploty stěny ohříváku vzduchu.**

Příklad takového zapojení je na **obr. 4.126.**



t_k – teplota spalin za kotlem t_{st} – teplota stěny poslední teplosměnné plochy (ohřívák vzduchu)
t_{vzp} – teplota předehřátého vzduchu RVV – recirkulační vzduchový ventilátor

Obr. 4.126 *Regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu podle teploty stěny [18]*

V naznačeném případu se část horkého vzduchu z výstupu ohříváku vzduchu recirkuluje zpět do sání vzduchového ventilátoru (VV), tím se zvyšuje teplota vzduchu t_{vzp} na vstupu do ohříváku-zvyšuje se tak teplota stěny t_{st} i teplota spalin t_k za kotlem. Akčním orgánem je regulační klapka RK v recirkulačním potrubí. Regulovanou veličinou je „jen"teplota stěny t_{st} ohříváku-vychází se z předpokladu, že kotel je navržen tak aby při splnění podmínky $t_{st} \geq t_{RB}$ byla současně splněna i druhá podmínka $t_k \geq t_{RB} + \Delta t_z$, rov. (4-59).

Toho lze dosáhnout tehdy (viz **obr. 4.127)**, pokud je kotel dimenzován při jmenovitém výkonu na takovou teplotu spalin za kotlem t_{kd} , pro níž platí:

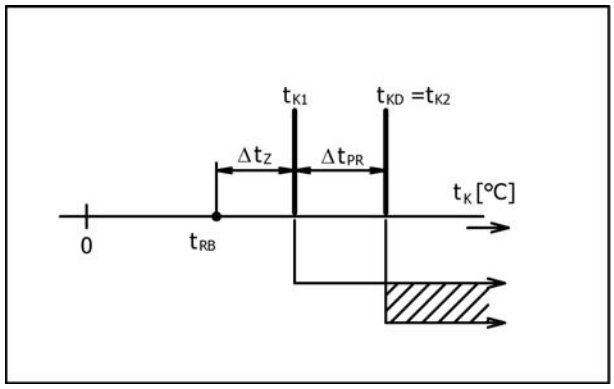
$$t_{kd} \geq t_{k1} + \Delta t_{pr} \qquad [^{\circ}C] \qquad (4\text{-}60)$$

kde: - $t_{k1} = t_{RB} + \Delta t_z$, je potřebná teplota spalin za kotlem pro zajištění ochrany zařízení partie za kotlem proti korozi, t_{RB} je rosný bod a Δt_z je celkové ochlazení spalin mezi kotlem a komínem, viz též rov. (4-59).

- Δt_{pr} je provozní pokles teploty spalin za kotlem při snížení výkonu na min. výkon a při zohlednění výpadku regenerativních ohříváků nap. vody.

Teplota spalin za kotlem při návrhu kotle t_{kd} musí v tomto případě odpovídat i minimální teplotě t_{k2}, při níž je splněna podmínka pro teplotu stěny $t_{st} \geq t_{RB}$.

Jinými slovy, při návrhu kotle musí být teplota předehřátého vzduchu t_{vzp} taková, aby při teplotě spalin t_{kd} byla teplota stěny spalinového ohříváku vzduchu $t_{st} \geq t_{RB}$. Jen v tomto případě bude současně zajištěna ochrana partie za kotlem i ochrana ohříváku vzduchu. Tak např. při t_{RB} = 80 ˚C a Δt_z = 30 K je t_{k1} = 110 ˚C. Při Δt_{pr} = 20K je kotel dimenzován na teplotu t_{kd} = 130 ˚C a teplota vzduchu t_{vzp} pak musí být ≥ 30 ˚C, pokud teplotu stěny počítáme zjednodušeně jako průměr teplot obou medií, viz rov.(4- 57). Klesne-li teplota spalin t_k na teplotu t_k = t_{k1} = 110 ˚C pak teplota předehřátého vzduchu se musí zvýšit na $t_{vzp} \geq 50$ ˚C(zajistí regulace), aby byla splněna podmínka $t_{st} \geq t_{RB}$. Pokud by však teplota spalin za kotlem t_k klesla pod teplotu t_{k1}, např. na 105 ˚C, tak regulace předehřevem vzduchu na $t_{vzp} \geq 55$ ˚C zajistí teplotu stěny ohříváku nad rosným bodem,ale nebude splněna podmínka $t_k \geq t_{k1}$ (105 < 110), pro ochranu zařízení partie za kotlem.



t_{KD} – teplota spalin za kotlem při jmenovitém výkonu – na tuto je kotel dimenzován
t_{K1} – teplota spalin za kotlem, při níž je zajištěna ochrana zařízení partie za kotlem
t_{K2} – teplota spalin za kotlem, při níž je zajištěna ochrana ohříváku vzduchu

***Obr. 4.127** Teplota spalin za kotlem při regulaci podle teploty stěny*

Při tomto způsobu regulace se teplota spalin za kotlem nereguluje – je určena návrhem kotle. Reguluje se teplota stěny ohříváku vzduchu.

Spolehlivost regulace podle teploty stěny tedy závisí na správném stanovení teploty spalin za kotlem(t_{kd}),resp.na správném stanovení max.možné provozní změny teploty spalin za kotlem (Δt_{pr}). Jestliže konstruktér kotle vědom si této situace zvolí teplotu spalin za kotlem s jakousi bezpečnostní rezervou,tak sice zajistí ochranu zařízení proti korozi, ale kotel bude provozován s vyšší komínovou ztrátou.

Teplota stěny t_{st} (**obr. 4.126**) se neměří, ale stanoví se výpočtem z naměřené teploty předehřátého vzduchu t_{vzp} a teploty spalin t_k za kotlem jako součet těchto teplot po vynásobení konstantami K_{VZ} a K_K – simuluje se tak výpočet teploty stěny podle rov. (4-57) a (4-58), při K_{VZ} = K_K = 0,5 obdržíme zjednodušený tvar rov. (4-57).

Na **obr. 4.126a)** je uvedeno alternativní provedení recirkulace horkého vzduchu-tento se přivádí až za vzduchový ventilátor VV, recirkulaci zajišťuje samostatný vzduchový ventilátor RVV v recirkulačním potrubí, který je i akčním členem regulace.Volba některého z uvedených systémů nesouvisí s regulací teploty spalin, ale je to záležitost optimalizace systému recirkulace horkého vzduchu-provedení se liší pořizovacími náklady na ventilátory VV a RVV a jejich spotřebou el. energie.

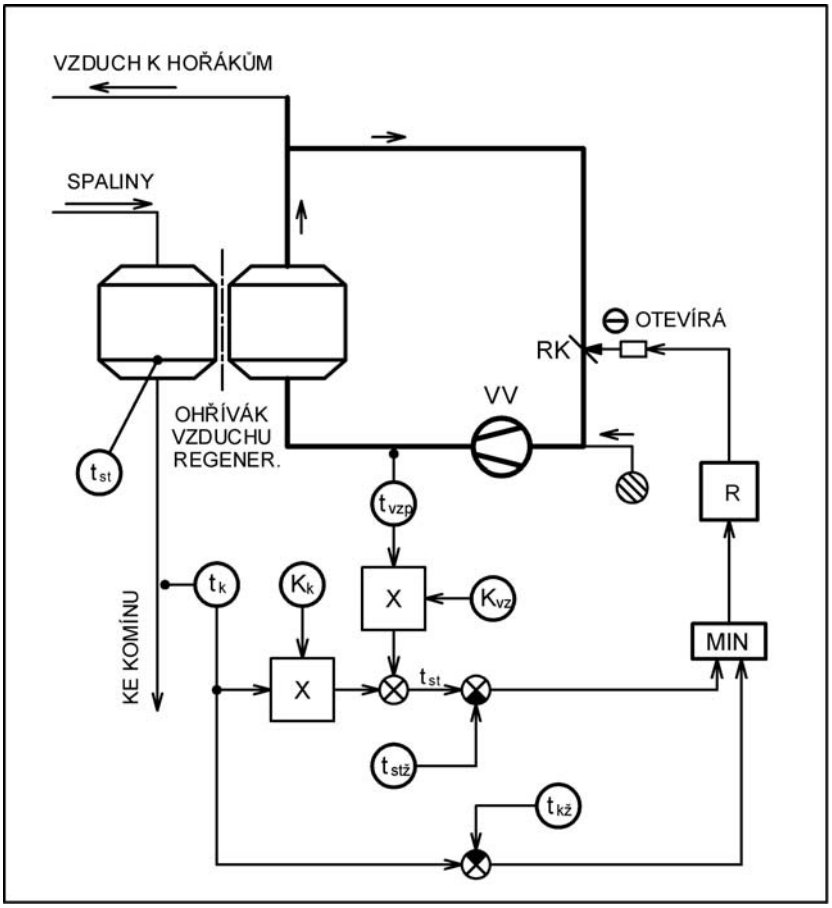
Uvedené zapojení na **obr. 4.126** nezajišťuje ochranu proti korozi při najíždění u roštových a olejových kotlů pokud se u nich pro najíždění nepoužívá např.zemní plyn. (Najíždí se provozním palivem.)

U kotlů spalujících palivo s vysokým obsahem síry (s rosným bodem $t_{RB} \geq$ 105 ˚C), při napájení napájecí vodou o teplotě 105 ˚C, se musí kromě popsané ochrany ohříváku vzduchu a partie za kotlem zajistit i ochrana ohříváku vody – a to některým ze způsobů uvedených v kap. 4.6.1 (**obr. 4.125)**, přičemž

regulovanou veličinou bude pouze teplota vody na vstupu do ohříváku vody t_{EKO} (nerealizuje se měření teploty spalin t_k za kotlem a člen pro výběr minimální hodnoty MIN).

a2) optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu

Příklad takového zapojení je uveden na **obr. 4.128.** V tomto případě je naznačeno zapojení s recirkulací horkého vzduchu do sání vzduchového ventilátoru ***VV***, regulátor ***R*** nastavuje množství recirkulovaného vzduchu vždy podle menší z regulačních odchylek teploty stěny t_{st} ohříváku vzduchu a teploty spalin t_k za kotlem .



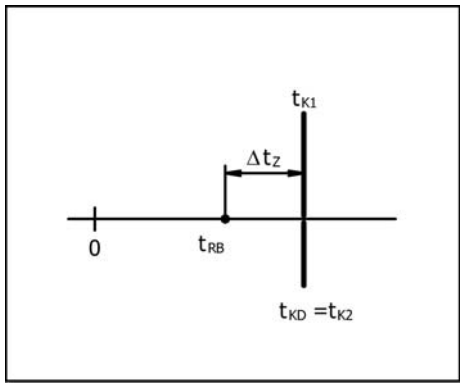
Obr. 4.128 *Optimální regulace teploty spalin recirkulací horkého vzduchu*

Teplota stěny ohříváku vzduchu se opět stanoví výpočtem z měřené teploty vzduchu t_{vzp} před ohřívákem vzduchu a z měřené teploty spalin t_k za kotlem (stejně jako u zapojení na **obr. 4.126**, výběr okamžité regulované veličiny provede člen pro výběr minimální hodnoty ***MIN***. Požadovaná teplota stěny $t_{stž}$ ohříváku vzduchu a požadovaná teplota spalin $t_{kž}$ za kotlem se nastaví na potřebné hodnoty nutné jen pro ochranu zařízení před korozí - bez přídavků zohledňujících změny výkonu, výpadek regenerativních ohříváků napájecí vody apod. Regulace zajišťuje jak ochranu zařízení proti korozi tak i nejvyšší možnou účinnost, kterou umožňuje konstrukce kotle, stav teplosměnných ploch a spalované palivo.

Situace je naznačena na **obr. 4.129** (podobně jako na obr**.** 4**.**127).

Při návrhu kotle se teoreticky může stanovit teplota spalin za kotlem $t_{KD} = t_{K1}$, teplota předehřátého vzduchu t_{vzp} se stanoví tak, aby byla splněna podmínka $t_{st} > t_{RB}$. Při poklesu teploty spalin (změna výkonu, snížení teploty nap. vody) pod teplotu t_{k1} regulátor zvýší teplotu vzduchu t_{vzp} podle žádané teploty stěny nebo spalin na takovou hodnotu, aby byly současně splněny obě podmínky: $t_{st} \geq t_{RB}$ a $t_k \geq t_{k1}$. Použijeme-li podobný příklad jako u **obr. 4.127**, pak kotel bude dimenzován na teplotu spalin $t_{KD} = t_{k1} = 110$ ˚C a vzduch se bude předehřívat na

teplotu t_{vzp} = 50˚C. Klesne-li teplota spalin pak regulátor zvýší teplotu vzduchu tak, aby byly splněny obě podmínky současně. Kotel tedy pracuje s nižší komínovou ztrátou a tudíž s vyšší účinností.



Obr. 4.129 *Teplota spalin za kotlem při optimální regulaci*

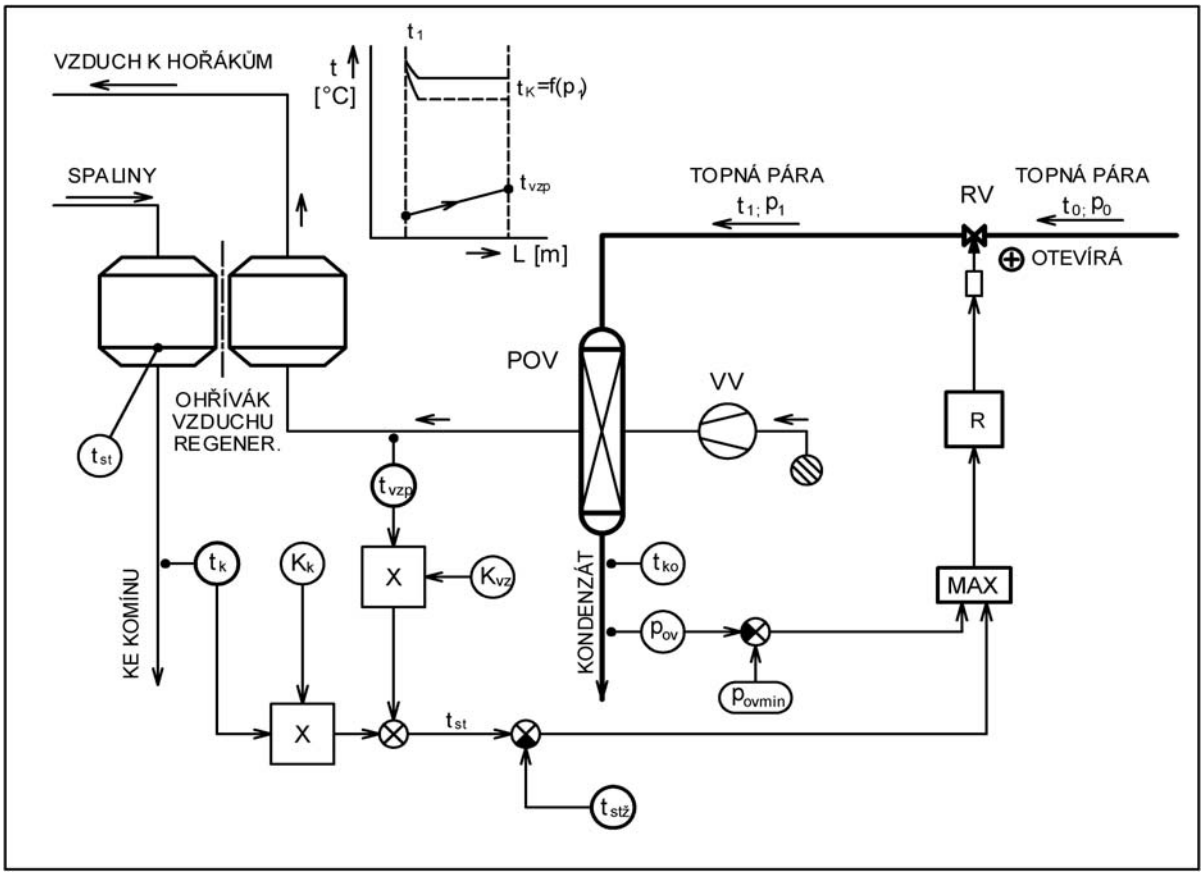
Jak již bylo uvedeno,dimenzovat kotel na teplotu spalin $t_{kd} = t_{k1}$ je krajní možnost, konstruktér dá pravděpodobně přednost mírně vyšší teplotě než je t_{k1} – ale teplota t_{kd} bude i tak nižší než v případě při regulaci podle teploty stěny, viz **obr. 4.127.**

Pro ochranu ohříváku vody platí totéž co u zapojení podle bodu a1).

b) předehřev vzduchu cizím mediem ve výměníku tepla

Ohřívacím mediem může být (podle toho co je k dispozici) horká voda, kondenzát nebo nízkotlaká pára. Většinou se využívá nízkotlaká pára, výměník tepla (parní ohřívák vzduchu ***POV***) se umisťuje přímo ve vzduchovém kanálu před spalinovým ohřívákem vzduchu a je proveden jako kondenzační. Z hlediska konstrukce výměníku a jeho regulace existuje dvojí možné provedení:

- vzniklý kondenzát se z výměníku průběžně odvádí (aut. odvaděč kondenzátu)-regulace se provádí změnou parametrů vstupní páry



POV – parní ohřívák vzduchu RV – regulační ventil t_{ko} – teplota kondenzace
p_{OV} – tlak potřebný pro odvod vzniklého kondenzátu

Obr. 4.130 *Regulace teploty spalin změnou tlaku topné páry [18]*

(především tlaku páry), případně vypínáním sekcí výměníku.

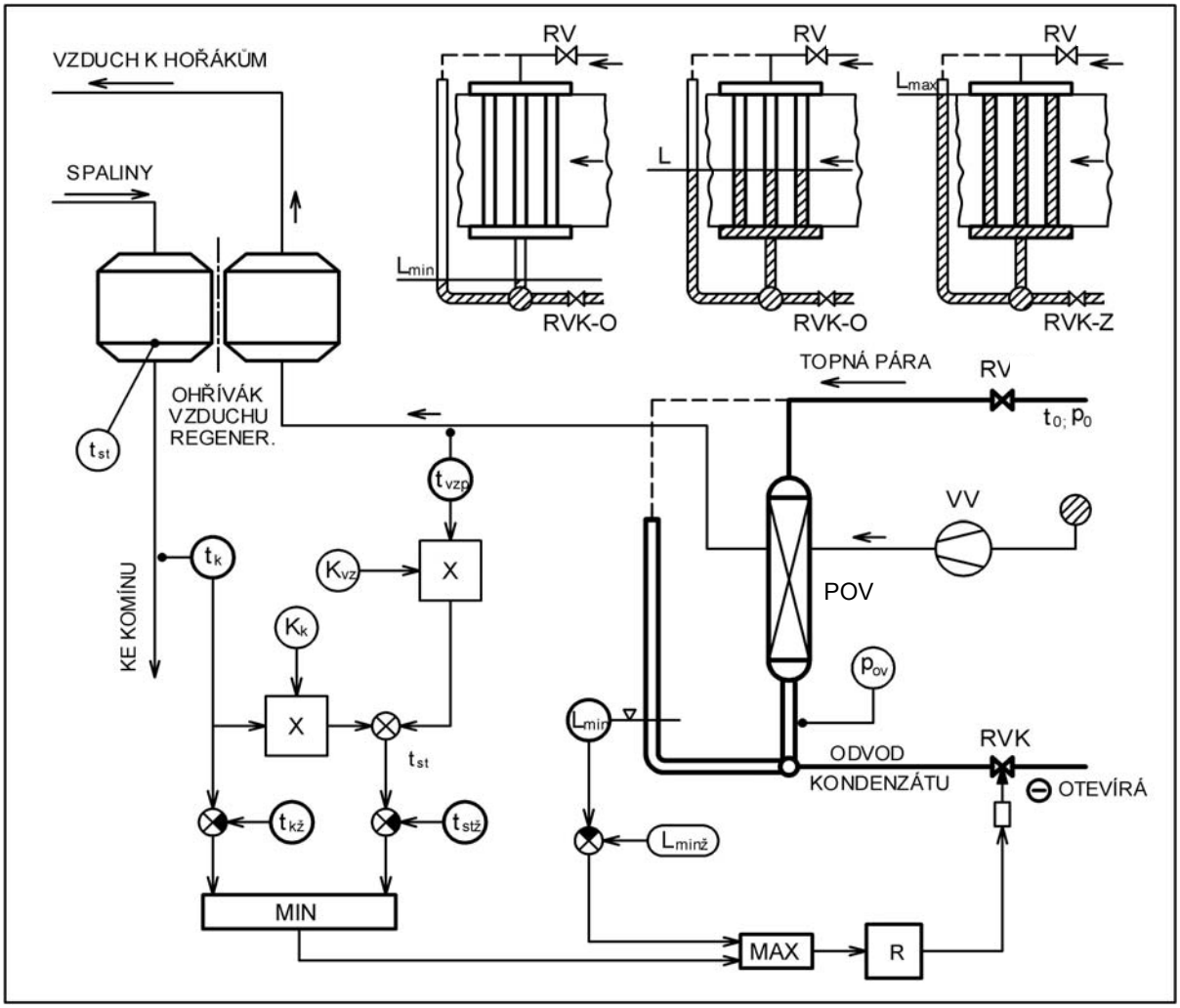
- kondenzační výměník může být částečně zaplněn kondenzátem, regulace se provádí změnou výšky hladiny kondenzátu v ***POV*** (odvodem kondenzátu) – mění se velikost teplosměnné plochy kondenzátoru.

b1) regulace teploty spalin změnou tlaku topné páry v *POV*.

Příklad takové regulace [18] je uveden na **obr. 4.130.** I v tomto případě je regulovanou veličinou např. teplota stěny ohříváku vzduchu, která se opět stanoví výpočtem stejně jako v případě regulace podle bodu ***a)***, **obr. 4.126 a obr. 4.128.**
Parní ohřívák vzduchu ***POV*** je zařazen před spalinovým ohřívákem vzduchu, akčním orgánem je regulační ventil ***RV*** v přívodu topné páry. Regulátor nastavuje tlak p_1 páry (průtok páry) v ***POV*** podle větší hodnoty (výběr ***MAX***) z regulační odchylky teploty stěny nebo rozdílu tlaku p_{ov} od minimální hodnoty p_{ovmin}. Při snížení tlaku p_1 páry v ***POV*** se sníží teplota kondenzace t_{KO} a tím i tepelný výkon ***POV***. (Q = k.S.Δt_s). Tlak p_{ovmin} je tlak potřebný pro odvod vzniklého kondenzátu.
Pokud je teplota přehřátí t_o vstupní páry příliš vysoká, je vhodné ji snížit mírně nad teplotu varu – ochlazení se provede vstřikem vody, teplotu reguluje samostatný regulační obvod. (Na obrázku není naznačený.)
Jestliže regulace vyžaduje příliš velké změny tepelného výkonu ***POV*** je vhodné tento rozdělit do dvou (tří) sekcí, které jsou na straně vzduchu řazeny bezprostředně za sebou a na straně topné páry paralelně s možností jejich uzavření. Tak např. při najíždění (kdy je výkon ***POV*** největší) jsou v provozu všechny sekce ***POV***, při provozu kotle s vyšším výkonem, při němž je potřebný výkon ***POV*** výrazně nižší, se některá jeho sekce odstaví-uzavře se u ní průtok topného media.
Toto zapojení lze použít i pro ochranu zařízení proti korozi při najíždění – regulátor se odpojí od výběru ***MAX*** a udržuje nastavenou žádanou teplotu kondenzátu t_{ko} za ***POV***. Po najetí kotle se regulátor opět připojí k výběru ***MAX***.
V případě, že kotel je napájen vodou o teplotě 105˚C a spaluje palivo s vysokým obsahem síry (rosný bod je vyšší než 105˚C), musí se zajistit i ochrana ohříváku vody a to podobným způsobem jak je popsán v kap. a1).
I při tomto zapojení (stejně jako u regulace v kap. a1) je regulovanou veličinou jen teplota stěny t_{st} spalinového ohříváku vzduchu, takže v některých provozních stavech nebude kotel pracovat s optimální účinností (viz.**obr. 4.127**).

b2) Regulace teploty spalin odvodem kondenzátu z POV.

U tohoto zapojení je ***POV*** umístěný stejně jako v předcházejícím provedení, ale jeho konstrukce musí umožnit spolehlivý provoz jak při jeho zaplavení kondenzátem tak i při kondenzačním režimu. Akčním orgánem regulace je regulační ventil ***RVK*** odvodu kondenzátu - při větším tepelném výkonu **POV** než je potřebný se množství odváděného kondenzátu zmenší, takže vzniklým přebytkem tvořícího se kondenzátu se část trubek teplosměnné plochy ***POV*** zahltí a zmenší se tak velikost kondenzační plochy ***POV*** a tím i množství zkondenzované páry.
Regulovanou veličinou může být teplota stěny spalinového ohříváku vzduchu - podobně jako na **obr. 4.130** (místo tlaku p_{ov} se udržuje minimální hladina L_{MIN}). U některých aplikací byla jako regulovaná veličina u tohoto způsobu regulace použita pouze teplota vzduchu t_{vzp} za ***POV*** [40] – jedná se spíše o ojedinělé řešení, které nemá s regulací teploty spalin ve vazbě na rosný bod spalin nic společného.



RVK – regulační ventil odvodu kondenzátu L_{min} – minimální přípustná hladina v POV

Obr. 4.131 *Optimální regulace teploty spalin odvodem kondenzátu z POV*

Dále je popsáno využití tohoto způsobu regulace **pro optimální regulaci teploty spalin** za kotlem (podobně jako na obr**.** 4.128) – zapojení je vidět na **obr. 4.131.**

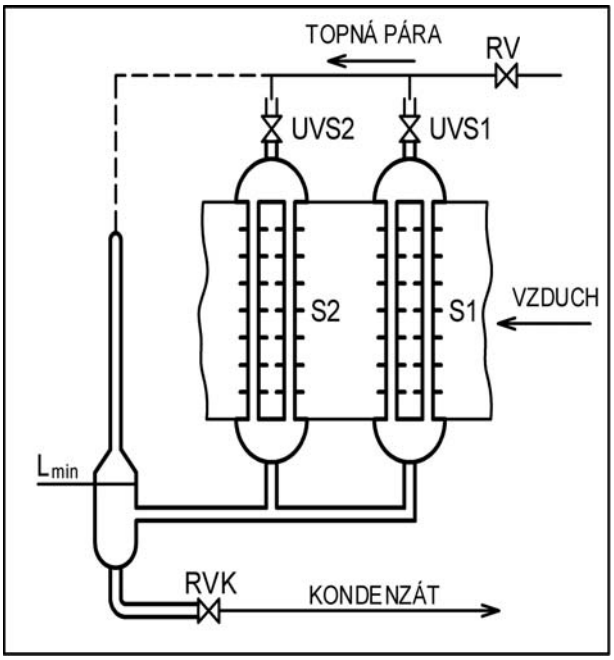
Teplota za kotlem se stanoví podobně jako je uvedeno na **obr. 4.129.**

Teplota stěny t_{st} spalinového ohříváku vzduchu se opět neměří, ale stanoví se výpočtem podobně jako v předcházejících případech. Akčním orgánem je regulační ventil ***RVK*** odpouštění kondenzátu, regulační ventil ***RV*** (ruční dálkové ovládání) v přívodu topné páry slouží k nastavení vhodného provozního tlaku, např. při změně provozních podmínek (změna paliva, zašpinění teplosměnných ploch kotle, změna teploty napájecí vody, případně najíždění kotle apod.). Jeho ovládání je kontrolováno (blokády, ochrany) tak, aby tlak p_{ov} v ***POV*** neklesl pod nastavenou minimální hodnotu potřebnou pro spolehlivý odvod kondenzátu. Regulátor ***R*** řídí odpouštění kondenzátu z ***POV*** podle větší (výběr MAX) z regulačních odchylek minimální hladiny L_{MIN} kondenzátu a teploty stěny t_{st} ohříváku nebo teploty t_k spalin za kotlem (výběr MIN). Žádaná hodnota minimální hladiny $L_{MINž}$ se volí tak, aby nedošlo ke ztrátě topné páry profukem, např. do expandéru kondenzátu.

V horní části obr. jsou naznačeny možné provozní stavy ***POV***. Na prvním obr. je stav při max. výkonu ***POV*** - regulační ventil **RVK** je v odpovídající otevřené poloze,

udržuje se min. hladina kondenzátu a celá teplosměnná plocha je využita ke kondenzaci. Na prostředním obr. je stav při výkonu nižším – regulační ventil ***RVK*** je opět v odpovídající otevřené poloze a část teplosměnné plochy je zahlcena kondenzátem, plocha využitelná ke kondenzaci je menší. Na posledním obr. je stav při odstaveném ***POV*** - regulační ventil ***RVK*** je uzavřen, celý ***POV*** je zahlcen kondenzátem a jeho teplota postupně klesne na teplotu vzduchu.

Pokud je regulační rozsah výkonu ***POV*** příliš velký, je vhodné kombinovat uvedenou regulaci s odstavením jedné nebo více sekcí ***POV***. Situace je znázorněna na **obr. 4.132**, ***POV*** je proveden ze dvou sekcí. Jestliže např. požadovaný výkon ***POV*** klesne natolik, že kondenzát v ustáleném stavu zaplavuje např 70% spodní části ***POV***, lze odstavit např. uzavíracím ventilem ***UVS1*** první sekci ***POV*** - potřebný výkon ohříváku zajistí sekce ***S2***. Uzavírací ventily ***UVS1*** a ***UVS2*** se mohou ovládat dálkově ručně nebo automaticky, např. podle hladiny kondenzátu .



Obr. 4.132 *Vypínání sekcí POV*

Tento způsob regulace zajišťuje ochranu ohříváku vzduchu proti korozi a zalepování a to i při najíždění kotle provozním palivem obsahujícím síru.

Případná ochrana ohříváku vody proti korozi se zajistí některým ze způsobů uvedených v kap. 4.6.1.

Zatopení části ***POV*** při regulaci však vede k rozdílným teplotám vzduchu ve vzduchovém kanálu za ***POV*** - v dolní zatopené části je teplota vzduchu nižší než v horní části, kde dochází ke kondenzaci. Tuto skutečnost musí konstruktér respektovat při návrhu předehřevu vzduchu a musí zajistit před vstupem do spalinového ohříváku vzduchu stejnou teplotu v celém vstupním průřezu .

Při delší odstávce kotle v zimním období se musí u ***POV*** zajistit ochrana proti zamrznutí-musí se bezpečně odvodnit a vysušit (koroze) ještě při vyšší teplotě nebo se musí zajistit jeho temperace cizí parou.

Kontrolovat (omezit) se musí i rychlost vypouštění kondenzátu-při velké rychlosti může dojít k prudkému poklesu tlaku a následnému odpařování kondenzátu doprovázenému rázy v systému.

5. REGULACE ČINNÉHO VÝKONU ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU

Dodávky elektrické energie pro naprostou většinu odběratelů se realizují prostřednictvím elektrizační soustavy, neboť je to ekonomicky výhodnější než kdyby každý spotřebič el. energie byl zásobován vlastním zdrojem energie. A to i přesto, že el. energie se v takovém případě musí přepravovat i na velké vzdálenosti, přičemž ztráty v rozvodném systému mohou představovat až 8 %.

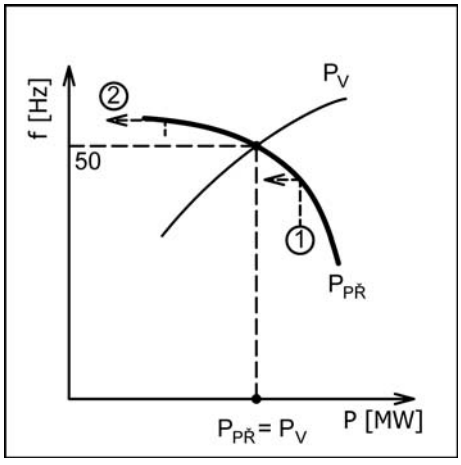
Tzn., že výkon elektrárenského bloku již nelze regulovat podle změn výkonu (potřeb) „svého“ spotřebiče, ale regulace se musí přizpůsobit určitému algoritmu regulace všech zdrojů pracujících v elektrizační soustavě.

Elektrizační soustava je jednotně řízený elektricky propojený systém, který sestává z paralelně pracujících elektráren včetně společné zálohy el. výkonu, přenosných a rozvodných zařízení (přeprava el. energie a změna jejích parametrů) a připojených spotřebičů. Jejím hlavním úkolem je bezpečná a spolehlivá dodávka požadovaného množství elektřiny všem odběratelům v dohodnuté kvalitě a s nejnižšími náklady. Nejdůležitějšími provozními parametry určujícími kvalitu dodávané elektřiny jsou kmitočet a napětí, přičemž kmitočet je celosystémový parametr, který je při ustáleném chodu elektrizační soustavy ve všech jejich místech stejný. Napětí naproti tomu je místní parametr, který může mít v různých místech soustavy různou velikost.

Ustálený chod elektrizační soustavy předpokládá rovnováhu mezi jejím příkonem (tento zajišťují elektrárenské bloky soustavy) a jejím výkonem (odběr připojených spotřebičů). Narušení této výkonové rovnováhy vyvolá změnu provozních parametrů soustavy, tj. změnu kmitočtu a napětí. Protože regulace napětí v soustavě se provádí decentralizovaně [54] (u každého elektrárenského bloku se udržuje na konstantní hodnotě samostatně, např. změnou buzení generátoru, provozem statických kondenzátorů, či regulací odboček transformátorů), musí se proto obnovení rovnováhy v elektrizační soustavě zajistit regulací frekvence.

V propojených elektrizačních soustavách se kromě frekvence musí udržovat (regulovat) na sjednaných hodnotách rovněž i výkony předávané do ostatních (propojených) soustav. Pro regulaci frekvence a předávaného výkonu v propojených elektrizačních soustavách je nejrozšířenější [54] metoda podle síťových charakteristik – podle ní reguluje pouze ta soustava, u níž došlo k narušení výkonové rovnováhy. Jde o to, že při zvýšení výkonu (odběru) v jedné ze soustav se sníží kmitočet v celém propojeném systému a při nerespektování uvedené zásady by regulátory frekvence každé soustavy zvyšovaly výkon svých vybraných elektráren.Tím by mohlo dojít k takovému zvýšení předávaného výkonu vedením (do té soustavy, v níž byla porušena výkonová rovnováha), až by se překročila hodnota nastaveného max. přípustného přenášeného výkonu a iniciovala by se funkce ochran – příslušné vedení se odpojí.

Souvislost frekvence a výkonové rovnováhy elektrizační soustavy lze znázornit statickou charakteristikou elektrizační soustavy – viz **obr.5.1.**



Obr. 5.1 *Statická charakteristika elektrizační soustavy [54]*

Okamžité zatížení elektrizační soustavy je určeno průsečíkem statické charakteristiky $P_{PŘ}$ příkonu soustavy (zdrojů – výroby elektřiny) a statické charakteristiky P_V výkonu soustavy (odběru – spotřeby elektřiny). Při příkonu soustavy $P_{PŘ}$ (výroba elektřiny) nižším než je její výkon P_V (spotřeba elektřiny), klesne frekvence v soustavě pod požadovanou hodnotu 50Hz, oblast 1). Pokud je příkon soustavy $P_{PŘ}$ vyšší než je její okamžitý výkon P_V, tak se frekvence v soustavě zvýší nad požadovanou hodnotu 50Hz, oblast 2).

V elektrizační soustavě pracují všechny bloky paralelně a rozdělení potřebného příkonu na jednotlivé bloky se provádí např. tak, aby se v souhrnu dosáhla nejnižší spotřeba paliva nebo nejnižší provozní náklady na výrobu a dodávku elektřiny. Provoz bloků je nejvíce ovlivňován snížením zatížení při nočním, sobotním a nedělním provozu a potřebné snížení příkonu elektrizační soustavy(výroby elektřiny) se může provést snížením výkonu vybraných jednotek nebo jejich odstavením. Zvýšené požadavky na řízení elektrizační soustavy klade i současný rozvoj větrných elektráren.

Pro provoz elektrárenských bloků v regulačním režimu elektrizační soustavy jsou určující i její dynamické vlastnosti, které jsou charakterizované především [54]:

- velikostí regulačního rozsahu výkonu elektrárenských bloků a šířkou jejich regulačního pásma. Regulační rozsah je určen rozmezím max. a min. výkonu bloku v němž lze blok podle potřeb soustavy provozovat. (V ostrovním provozu bloku se definuje ještě min. výkon se stabilizací spalování a bez stabilizace - tyto provozní stavy umožní provoz bloku s nízkým výkonem, ale při horší ekonomii.) Regulační pásmo závisí na dovolené zatěžovací rychlosti turbin a kotlů – rozhodující jsou tedy přípustné rychlosti změn výkonu.
- dobou spouštění bloků až do dosažení jmenovitého výkonu (z různých teplotních stavů v závislosti na délce provozní přestávky)
- kvalitou primární, sekundární a terciální regulace výkonu.

Od regulace činného výkonu elektrárenských bloků se tedy očekává, že bude udržovat frekvenci v dané elektrizační soustavě na požadované hodnotě 50Hz. Požadavky na přesnost této regulace určuje spotřebitel (tím může být jak konečný odběratel elektřiny tak i propojená soustava) svými požadavky na kvalitu parametrů dodávané elektřiny – tedy na přesnost dodržení jmenovitého kmitočtu, neboť odchylky od této hodnoty se negativně projeví na účinnosti a provozní spolehlivosti spotřebičů, ale především by mohly iniciovat automatické ochrany vedení propojených soustav. Požadavky na dodržení parametrů dodávané elektřiny jsou však výrazně přísnější u propojených soustav než u koncových odběratelů. Pokud by se přihlíželo jen k účinnosti a provozní spolehlivosti jednotlivých spotřebičů, tak by stačilo udržovat frekvenci s tolerancí např. ± 500mHz, zatímco u propojených soustav se požaduje tolerance např. ±20mHz [55], nejméně však ±40mHz.

Pracuje-li blok v regulaci elektrizační soustavy, pak jeho regulační rozsah musí být v souladu s rozsahem primární a sekundární regulace.

Primární regulace výkonu bloku [21] [54] představuje soubor technických prostředků a opatření zajišťujících rychlou změnu výkonu bloku jako reakci na změnu frekvence elektrizační soustavy. Jde o regulaci proporcionální, která využívá akumulovanou energii v technologickém zařízení a zajišťuje základní stabilizaci kmitočtu v síti. Jedná se o změny v řádu vteřin – např. 10 MW za 30 vteřin, tj.trendem cca 20 MW/min.

Pro požadovaný výkon ***ΔP*** primární regulace (příspěvek požadovaného výkonu) v rozmezí frekvence f_{min} až f_{max} platí vztah

$$\Delta P = -\frac{100 \cdot P_{jm}}{f_{jm} \cdot S_T} \cdot \Delta f \qquad [MW] \qquad (5\text{-}1)$$

kde: - P_{jm} je jmenovitý elektrický výkon bloku [MW]
- f_{jm} je jmenovitá frekvence v síti [Hz]
- Δ f je změna frekvence v síti [Hz]
- S_T je nastavená statika primární regulace [%] – pro bloky v základním zatížení je 4 až 6 %.

Tak např. pro blok 200 MW EDĚ je definovaná max.hodnota výkonu primární regulace ΔP = +10 MW, přičemž je tato hodnota konstantní pro frekvence 49,8 Hz a nižší; pro frekvenci 50,2 Hz a vyšší je minimální hodnota výkonu primární regulace opět konstantní a to ve výši (-10) MW. Pro frekvence ležící uvnitř intervalu 49,8 až 50,2 Hz se požadovaná hodnota výkonu primární regulace mění lineárně mezi výše uvedenou hodnotou max. a min.výkonu – statika primární regulace S_T (ze vztahu 5-1) je 8 %. Při výkonu primární regulace opět 10 MW, ale při frekvenci v intervalu 49,9 až 50,1 Hz je statika primární regulace S_T = 4 %.

Do regulačního obvodu primární regulace vstupuje přes omezovací člen řídící signál z nadřazené sekundární regulace. Obvyklými kritérii omezení od sekundární regulace jsou; maximální rychlost změny výkonu, maximální velikost změny výkonu, eventuálně maximální hodnota změny teploty skříně turbíny, případně další kriteria.

Primární regulaci zajišťuje regulátor každého bloku a její funkce musí být zajištěna trvale v celém regulačním rozsahu bloku. Rezerva výkonu pro primární regulaci by podle požadavku UCPTE měla být ve výši 2,5 % (vztaženo na max. výkon všech jednotek, které jsou v dané době v provozu) a musí být aktivovatelná jak ve směru zvýšení, tak i snížení výkonu.

Sekundární regulace výkonu bloku podle [21] je proces změny hodnoty výkonu regulovaného elektrárenského bloku tak, jak je požadováno sekundárním regulátorem frekvence a salda předávaných výkonů. Podle [54] je to soubor technických prostředků, který zajišťuje požadovanou hodnotu kmitočtu a regulaci sjednané výměny energie mezi sousedními elektrizačními soustavami.
(Jinak řečeno, sekundární regulace je nadřazena obvodům primární regulace všech elektrárenských bloků v soustavě – je to vlastně řídící centrum celé soustavy.)

V případě poruchy ve vlastní soustavě (výpadek výroby nebo spotřeby elektřiny) musí sekundární regulace (u každého bloku je trvale v činnosti primární regulace) dosáhnout souladu mezi výrobou a spotřebou během několika minut.

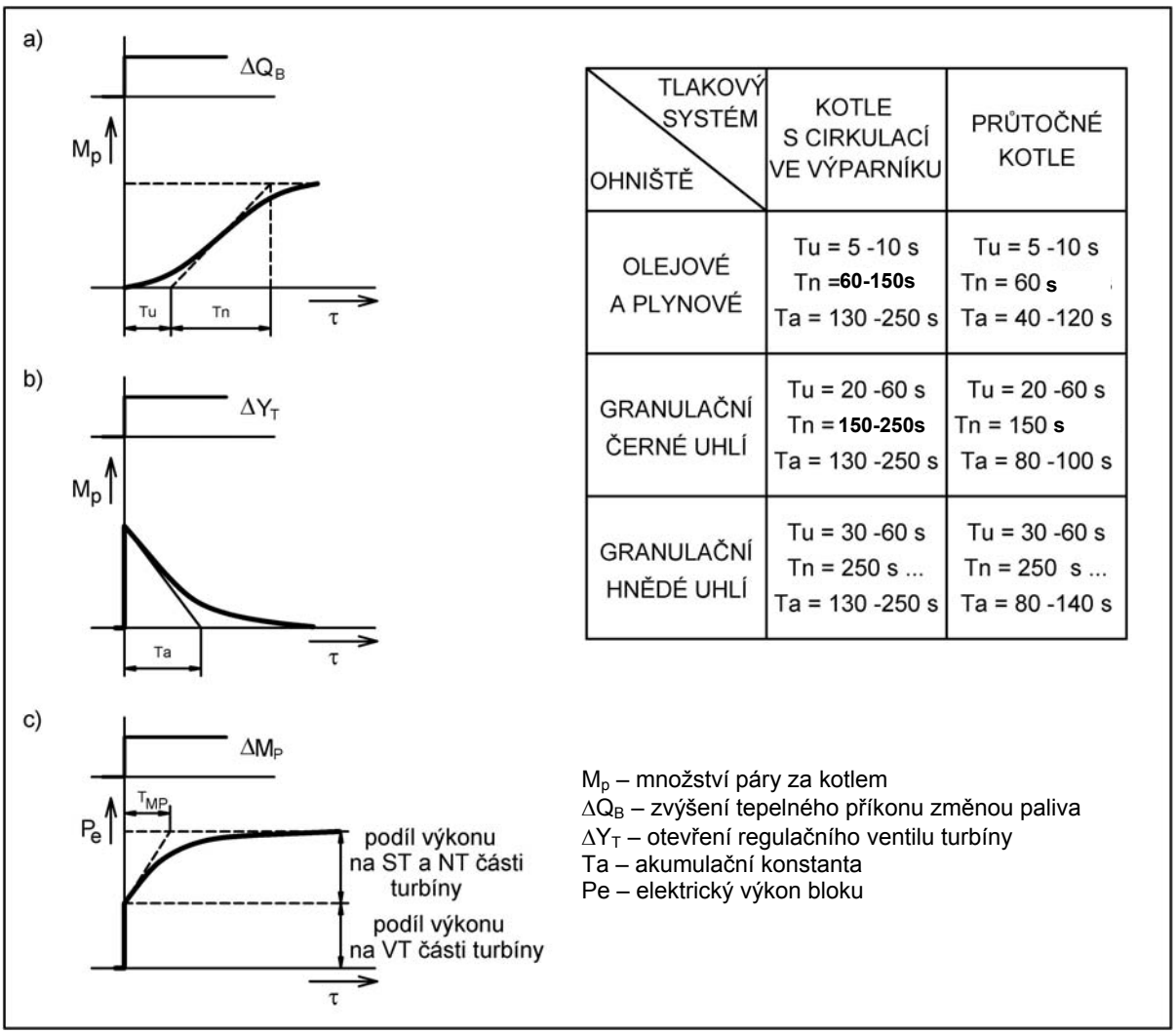
V režimu sekundární regulace ale mohou pracovat jen vybrané elektrárenské bloky – ty , které vyhovují stanoveným požadavkům především z hlediska dynamických vlastností (lze u nich aktivovat výkonovou rezervu během několika minut), funkčních vlastností technologie, a které jsou pro takový provoz vybaveny odpovídajícím přístrojovým vybavením. Požadovaný výkon zadává centrální dispečink soustavy a jeho dosažení zajišťuje instalovaný systém regulace výkonu bloku. Potřebný výkon soustavy pro sekundární regulaci je podle UCPTE asi 4 % nejvyššího celkového zatížení. Další, tzv. hodinová rezerva (studená-pomalá), se realizuje bloky, které jsou schopny převzít zatížení za více než 30min – základním kriteriem je doba najíždění a dosažení plného zatížení bloku.

Pro provoz v systému sekundární regulace musí elektrárenský blok mít potřebné dynamické vlastnosti – požadavky kladené na uhelný blok jsou uvedeny v **Tab.5-1**

Tab.5-1 *Požadavky na dynamiku sekundární regulace [54]*

VELIČINA	RYCHLOST ZMĚN	ROZSAH SEKUND. REGULACE	REGULAČNÍ ROZSAH BLOKU
NOVÝ	4 až 6 % Pjm/min	10 % Pjm(minim.)	40 až 100 % Pjm
STÁVAJÍCÍ	2 až 3 % Pjm/min	10 % Pjm(minim.)	60 až 100 % Pjm

U nových bloků se vyžaduje větší rychlost změn výkonu i větší regulační rozsah výkonu než u bloků stávajících. Zatím co volba ohniště a tlakového systému kotle nového bloku, jakož i jeho konstrukce, musí z těchto požadavků vycházet, tak u stávajících bloků se v mnoha případech musí před jejich zařazením do systému sekundární regulace výkonu provést potřebné úpravy zařízení i systému regulace a řízení.



TLAKOVÝ SYSTÉM / OHNIŠTĚ	KOTLE S CIRKULACÍ VE VÝPARNÍKU	PRŮTOČNÉ KOTLE
OLEJOVÉ A PLYNOVÉ	Tu = 5 -10 s Tn = **60-150s** Ta = 130 -250 s	Tu = 5 -10 s Tn = 60 **s** Ta = 40 -120 s
GRANULAČNÍ ČERNÉ UHLÍ	Tu = 20 -60 s Tn = **150-250s** Ta = 130 -250 s	Tu = 20 -60 s Tn = 150 **s** Ta = 80 -100 s
GRANULAČNÍ HNĚDÉ UHLÍ	Tu = 30 -60 s Tn = 250 s ... Ta = 130 -250 s	Tu = 30 -60 s Tn = 250 s ... Ta = 80 -140 s

M_p – množství páry za kotlem
ΔQ_B – zvýšení tepelného příkonu změnou paliva
ΔY_T – otevření regulačního ventilu turbíny
Ta – akumulační konstanta
Pe – elektrický výkon bloku

Obr. 5.2 *Přechodové charakteristiky bloku [56]*

Přibližnou představu o dynamických vlastnostech hlavních částí elektrárenského bloku si lze udělat z přechodových charakteristik uvedených na **obr. 5.2** (Tyto charakteristiky nelze zaměňovat s odezvami sledovaných parametrů pokud je v činnosti systém regulace a řízení – tento zasahuje již v průběhu přechodového děje a působí na něj změnou příslušné akční veličiny.)

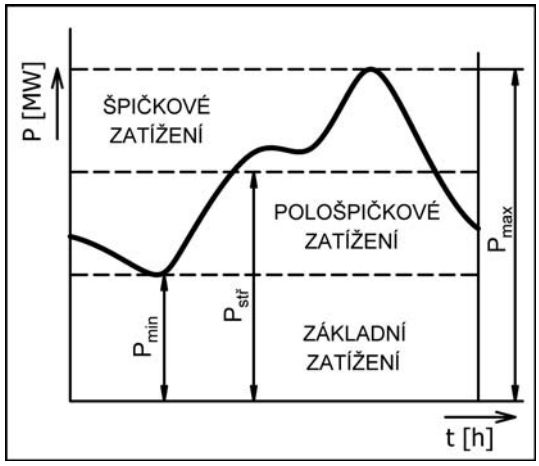
Na obr.a) je přechodová charakteristika množství páry dodávané kotlem (parní výkon kotle) M_P [kg/s] při skokovém zvýšení tepelného příkonu ΔQ_B [MW] změnou paliva (teplota a tlak páry jsou konstantní). Množství páry se zvyšuje, doby průtahu T_u a doby náběhu T_n pro různá ohniště a provedení kotle jsou uvedeny v sousední tabulce.

Na obr. b) je změna množství dodávané páry M_P při otevření regulačního ventilu turbíny ΔY_T. Přechodně se množství dodávané páry zvyšuje – využívá se akumulované teplo uvolněné při snížení tlaku – a akumulační časová konstanta T_a udává, za jakou dobu dodávané množství páry M_P klesne na původní hodnotu (tepelný příkon kotle je konstantní). Větší akumulační schopnost kotle na jedné straně prodlužuje dobu náběhu T_n (obr. a), na druhé straně se s výhodou využije pro rychlé krátkodobé zvýšení výkonu – obr. b) a obr. c)

Na posledním obr. c) je vidět zvýšení elektrického výkonu bloku P_E při skokovém zvýšení parního výkonu kotle ΔM_P. Část zvýšení el. výkonu se realizuje okamžitě na vysokotlakém dílu ***VT*** turbíny, zbývající větší část připadá na středotlaký ***ST*** a nízkotlaký ***NT*** díl turbíny s dobou náběhu T_{mp} (kotel má mezipřehřívák páry).

Regulace výkonu elektrárenských bloků pracujících v elektrizační soustavě nemůže tedy být u všech bloků jednotná, ale musí vycházet především z toho, jakým způsobem se blok podílí na provozu soustavy a jaké má mít z tohoto hlediska dynamické vlastnosti – např**.** podle **obr. 5.3** rozdělujeme bloky na:

- zdroje pracující v základním zatížení
- zdroje podílející se na regulaci výkonu a frekvence
- zdroje pološpičkové
- zdroje špičkové



Obr. 5.3 *Denní diagram zatížení soustavy*

Základní způsoby regulace výkonu elektrárenských bloků jsou pak podobné jako způsoby regulace výkonu parních kotlů – viz. kap. 4.1.2 a rozlišujeme tedy:

- provoz s konstantním tlakem páry – tento se může realizovat dvěma způsoby regulace:
  - regulací konstantního tlaku páry za kotlem (tzv. klasická regulace)
  - předtlakovou regulací
- provoz s klouzavým tlakem – tento se zajišťuje způsobem regulace s klouzavým tlakem
- provoz s řízeným(modifikovaným) tlakem – tento se realizuje způsobem regulace s modifikovaným klouzavým tlakem

5.1 REGULACE NA KONSTANTNÍ TLAK PÁRY ZA KOTLEM (KLASICKÁ REGULACE)

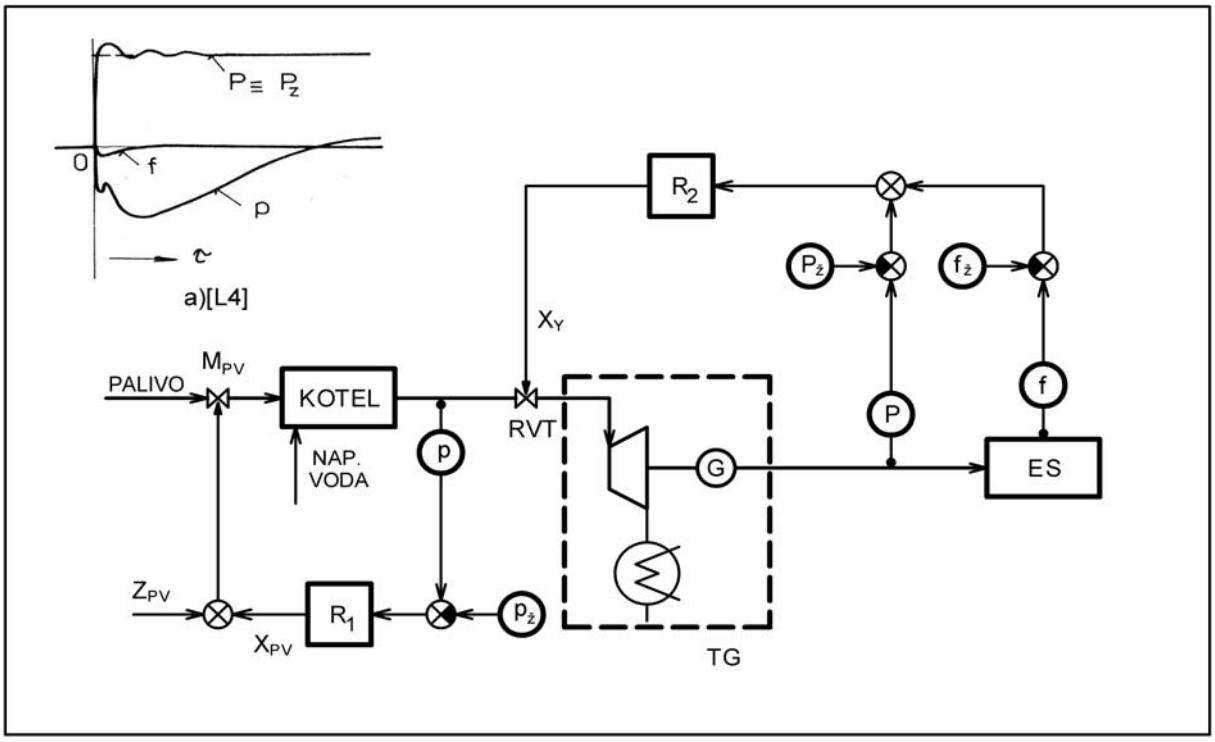
Schéma takové regulace je na **obr. 5.4 (**pro porovnání viz též obr.4.19) – jedná se vlastně o dva samostatné regulační obvody, regulaci výkonu a regulaci tlaku páry.

Elektrický výkon turbogenerátoru ***TG*** se reguluje regulátorem ***R2*** výkonu bloku podle žádané hodnoty elektrického výkonu $P_ž$ a žádané hodnoty frekvence $f_ž$ v elektrizační soustavě ***ES*** – akčním orgánem je regulační ventil turbíny ***RVT***

Tlak páry za kotlem reguluje regulátor výkonu kotle ***R1*** podle požadované hodnoty tlaku páry $p_ž$ – akčním orgánem je ventil nebo podavač nastavující množství paliva M_{pv} do kotle.

Při zvýšení požadovaného výkonu ($P_ž$ – požadavek centrálního dispečinku, viz sekundární regulace výkonu) otevře regulátor výkonu bloku ***R2*** regulační ventil ***RVT*** turbíny a zvýší tak odběr páry z kotle – množství páry (a tím i el. výkon ***TG***) se zvýší takřka okamžitě, využívá se akumulované teplo v kotli, které se uvolňuje při poklesu tlaku páry. Na pokles tlaku páry ***p*** za kotlem reaguje regulátor výkonu kotle ***R1*** a zvýší množství paliva M_{pv} dodávaného do kotle tak, aby byl obnoven požadovaný tlak páry $p_ž$.

Při poklesu frekvence ***f*** v elektrizační soustavě ***ES*** je činnost obou regulátorů ***R1*** a ***R2*** stejná.



M_{PV} – množství paliva do kotle p – tlak páry P – elektrický výkon soustavy f – frekvence v soustavě TG – turbogenerátor
ES – elektrizační soustava RVT – regulační ventil turbíny X_Y – akční veličina nastavení RVT
X_{VP} – akční veličina nastavení podavače paliva

Obr. 5.4 *Regulace výkonu elektrárenského bloku-regulace na konstantní tlak páry za kotlem*

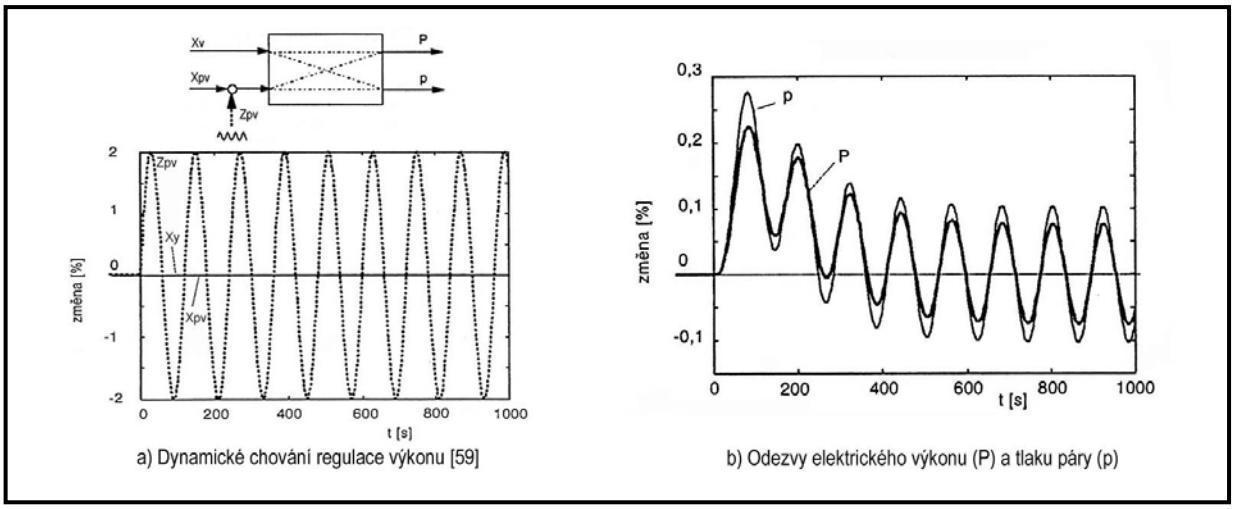
Výkon kotle se při tomto způsobu regulace **přizpůsobuje výkonu turbogenerátoru –** výhodou je, že velké kapacity (jako je parní kotel) jsou umístěny mimo hlavní regulační obvod výkonu bloku ***R2***, který pak pracuje velmi rychle, takže

požadované změny výkonu $P_{ž}$ nebo odchylky frekvence ***f*** lze regulovat velmi rychle, takřka proporcionálně, jak je vidět na přechodových charakteristikách při zvýšení žádaného výkonu $P_{ž}$, které jsou znázorněny v horní části obrázku. Určitou nevýhodou je větší kolísání tlaku páry ***p*** za kotlem, a tedy i před turbínou (doba do ustálení může být v minutách), které má negativní vliv na účinnost bloku, ale především na namáhání tělesa turbíny, potrubí a tlakového systému kotle přídavným cyklickým namáháním. Kolísání tlaku je menší u kotlů s velkou časovou konstantou výparníku (např.kotle s cirkulací ve výparníku), neboť takový výparník do určité míry kolísání tlaku tlumí. Poruchy na straně přívodu paliva ***Mpv***, způsobené např. kolísáním jeho výhřevnosti, jsou tlumené velkými kapacitami parního kotle a regulací tlaku páry za kotlem. Omezujícím článkem při požadavcích na rychlé změny výkonu je při tomto způsobu regulace parní turbína.

Při diskusi o výhodách a nevýhodách regulace výkonu na konstantní tlak páry se někdy tato charakterizuje jako regulace zajišťující „klidný výkon bloku“ ale „neklidný provoz (tlak) kotle“. Zajímavé jsou výsledky [59] dosažené při simulaci této regulace u bloku 500MW při spalování černého uhlí na průtočném kotli s mezipřehřívákem páry – při simulaci se vycházelo ze zjištěného dynamického chování regulovaných obvodů bloku.

Dynamické chování elektrárenského bloku jako regulované soustavy (blok není regulován) je vidět na **obr. 5.5** - odezvy elektrického výkonu ***P*** a tlaku páry ***p*** na obr. b) jsou vyvolány poruchovou veličinou se sinusovým průběhem (s amplitudou 2% jmenovitého výkonu), kterou je odpovídající změna množství paliva Z_{pv} do kotle.(Akční veličiny X_{pv} a X_Y se nemění – blok je bez regulace.) Jak je vidět, tak po určité době se amplitudy el.výkonu ***P*** a tlaku páry ***p*** ustálí v tzv. kvazirovnovážném stavu.

Výsledky regulace výkonu bloku na konstantní tlak páry při poruše množství

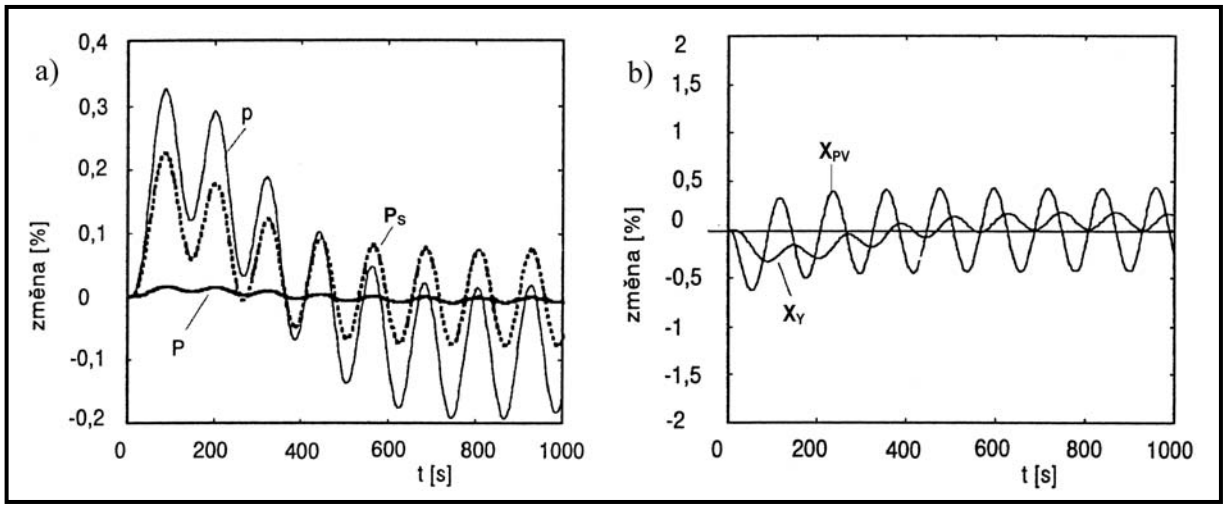


Obr. 5.5 *Dynamické chování elektrárenského bloku-bez regulace výkonu [59]*

paliva Z_{pv} (stejné jako na **obr. 5.5a**) jsou vidět na **obr. 5.6.**

Na obr.a) je vidět průběh regulace el.výkonu bloku ***P*** a tlaku páry ***p*** za kotlem při sinusové změně množství paliva (Z_{pv} - viz obr. 5.5a) – tečkovaně P_s je uveden průběh el. výkonu bloku bez regulace (viz obr. 5.5b).

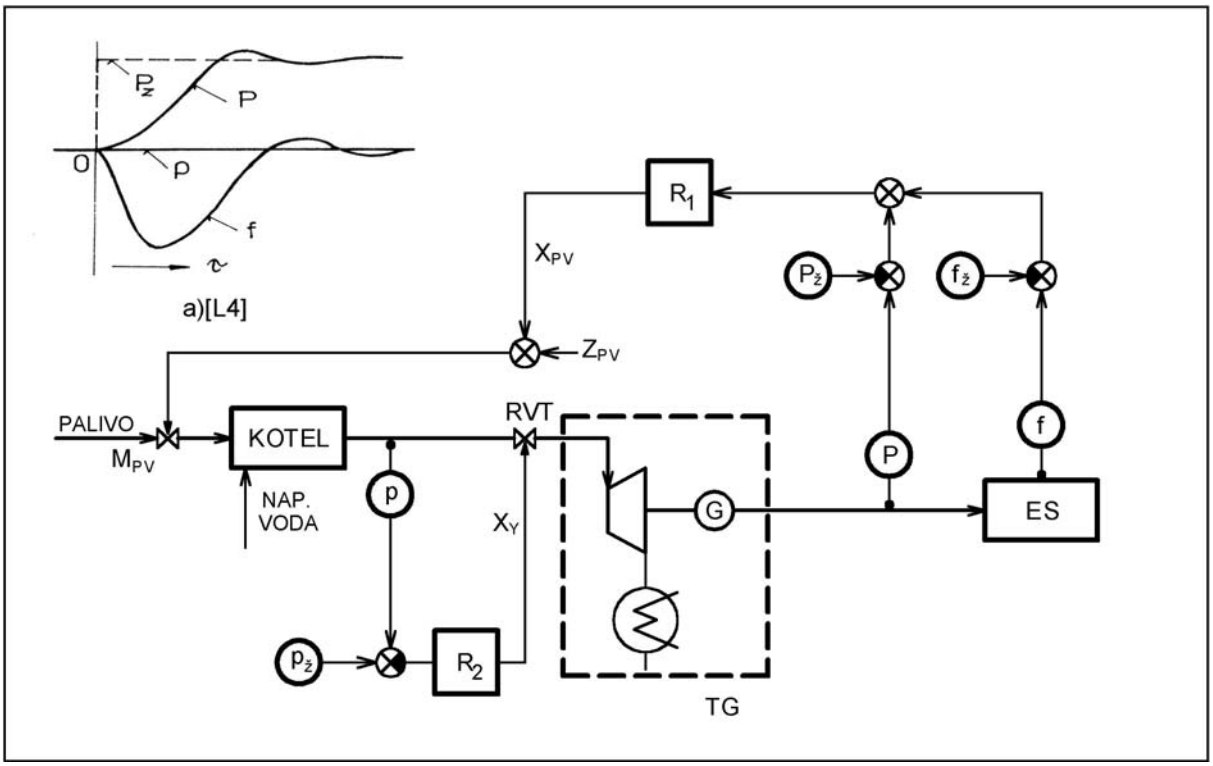
Na obr.b) je pak znázorněn průběh akčních veličin X_{pv} (výstup regulátoru výkonu kotle ***R1***) a X_Y (výstup regulátoru výkonu bloku ***R2***).



Obr. 5.6 *Regulace výkonu bloku na konstantní tlak páry při změně množství paliva [59]*

5.2 REGULACE PŘEDTLAKOVÁ

Schéma tohoto způsobu regulace je znázorněno na **obr. 5.7** (viz též obr. 4.18) a i v tomto případě se regulace realizuje prostřednictvím dvou regulačních obvodů **–** regulace el**.** výkonu bloku (výkonu kotle) a regulace výkonu turbíny(tlaku páry).



Obr. 5.7 *Regulace výkonu elektrárenského bloku-regulace předtlaková*

Elektrický výkon bloku ***P*** a frekvence ***f*** v elektrizační soustavě ***ES*** se reguluje regulátorem ***R1*** výkonu bloku, který řídí potřebné množství paliva M_{pv} do kotle,

akčním orgánem je armatura (podavač) nastavující množství paliva. Tlak páry ***p*** za kotlem (před turbínou) reguluje regulátor ***R2*** turbíny, který mění průtok páry přes turbínu, akčním orgánem je regulační ventil ***RVT*** turbíny.

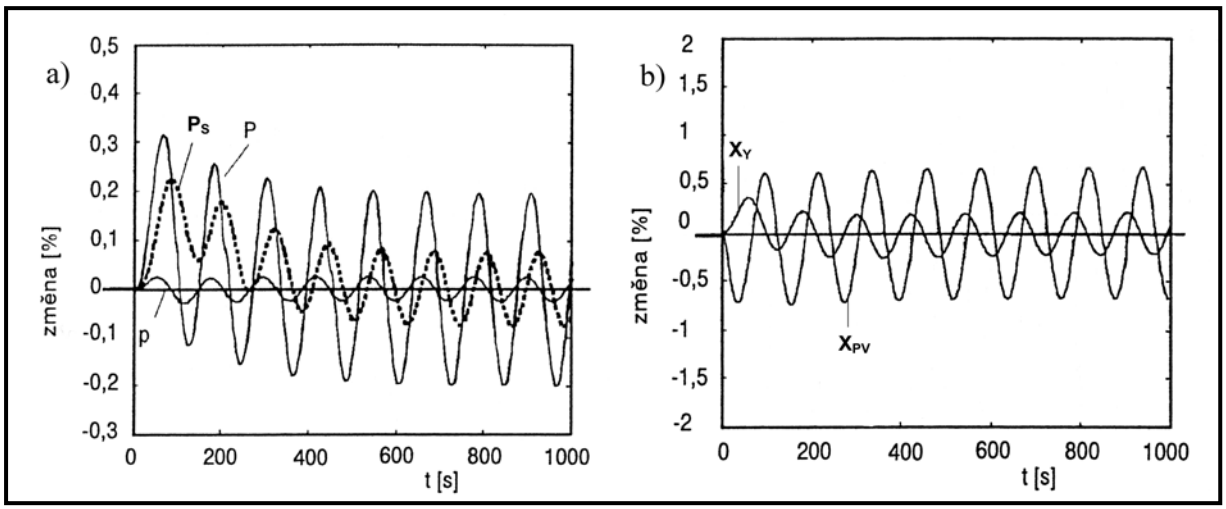
Při zvýšení požadovaného výkonu $P_{ž}$ bloku (centrální dispečink – sekundární regulace výkonu) nebo při poklesu frekvence ***f*** v elektrizační soustavě ***ES*** (primární regulace) regulátor ***R1*** výkonu bloku zvýší množství paliva M_{pv} podávaného do kotle. V kotli se zvýší výroba páry a následně vzroste i tlak páry ***p*** za kotlem nad požadovanou hodnotu $p_{ž}$. Na vzniklou regulační odchylku bude okamžitě reagovat regulátor ***R2*** turbíny větším otevřením regulačního ventilu turbíny ***RVT*** – tedy zvýšením výkonu turbogenerátoru. Elektrický výkon bloku se tedy reguluje palivem a tlak páry za kotlem (před turbínou) se reguluje regulačním ventilem turbíny. Při předtlakové regulaci se tedy **výkon turbogenerátoru přizpůsobuje výkonu kotle**. Výhodou je, že regulační obvod tlaku páry ***p*** nezahrnuje žádné velké kapacity, takže tlak páry lze udržovat na požadované hodnotě $p_{ž}$ s minimálními odchylkami – jak je vidět na přechodových charakteristikách při změně žádaného výkonu $P_{ž}$ v horní části obrázku. Udržování konstantního tlaku páry s minimálními odchylkami se příznivě projeví na účinnosti bloku, ale především se vyloučí přídavné cyklické namáhání tlakového systému kotle, parovodů a tělesa turbíny.

Nevýhodou tohoto způsobu regulace je, že všechny velké kapacity (kotel, parovody, turbogenerátor) jsou soustředěny v hlavním regulačním obvodu výkonu bloku ***R1***, takže odezvy výkonu bloku ***P*** a frekvence ***f*** budou pomalejší – viz přechodové charakteristiky v horní části obrázku. Příznivější průběh odezvy výkonu i frekvence mají el. bloky s kotly, které mají malou časovou konstantou výparníku – tedy s průtočnými kotly.

I při tomto způsobu regulace je z hlediska rychlých změn výkonu limitujícím článkem turbína.

Někdy se regulace výkonu s předtlakovou regulací charakterizuje jako regulace zajišťující „klidný provoz kotle (tlak)“, který je vykoupen „výkonově neklidným blokem.“

Při simulacích [59] této regulace u bloku 500 MW (dále kap.5.1) se opět vycházelo z dynamického chování bloku bez regulace – viz obr. 5.5. Výsledky regulace výkonu s předtlakovou regulací při poruše množství paliva (Z_{pv}-sinusový průběh, viz obr. 5.5a) jsou uvedeny na **obr. 5.8.**



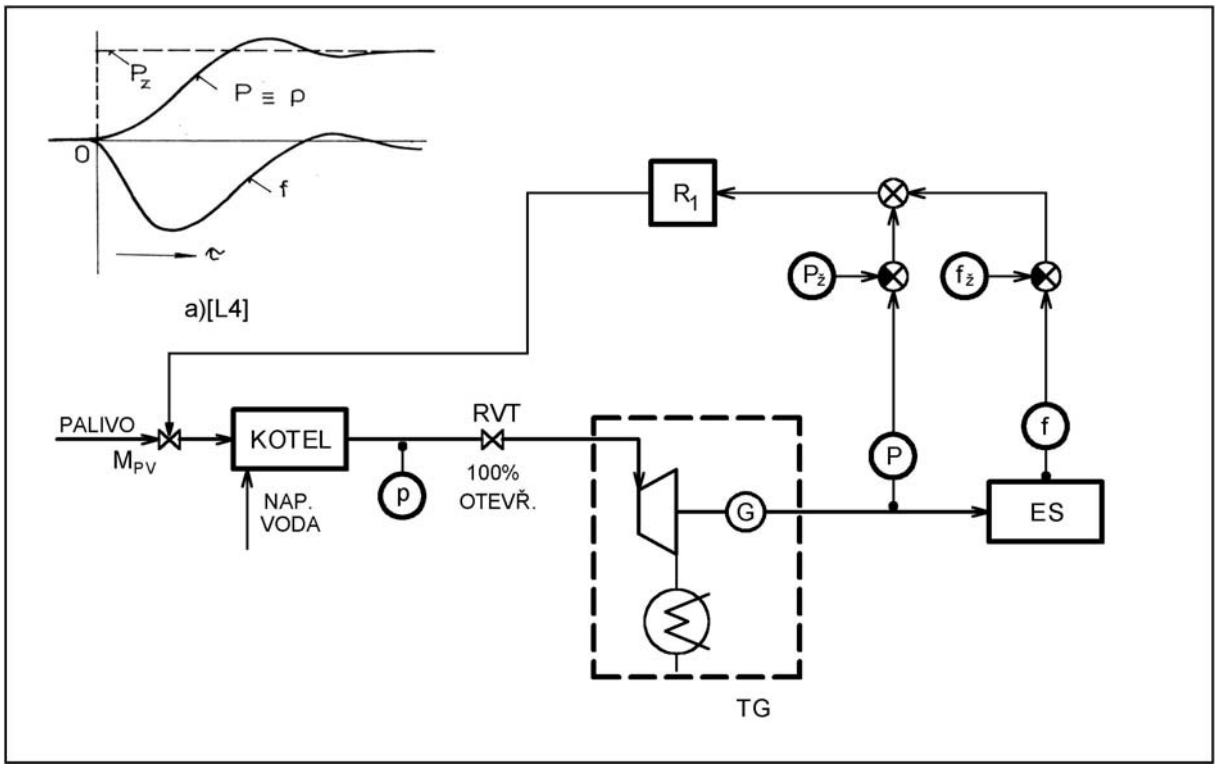
Obr. 5.8 *Regulace výkonu bloku s předtlakovou regulací při změně množství paliva [59]*

Na obr.a) je tečkovaně znázorněna odezva výkonu bloku P_s bez regulace (viz též obr. 5.5) a průběh výkonu bloku ***P*** a tlaku páry ***p*** za kotlem (před turbínou) při předtlakové regulaci.

Na obr.b) jsou vidět průběhy akčních veličin X_{pv} (výstup regulátoru výkonu ***R1***) a X_Y (výstup regulátoru ***R2*** turbíny/tlaku).

5.3 REGULACE S KLOUZAVÝM TLAKEM PÁRY

Schéma tohoto způsobu regulace je uvedeno na **obr. 5.9** (viz též obr. 4.17) a na rozdíl od předchozích způsobů regulace sestává jen z jednoho regulačního obvodu – regulace výkonu bloku (kotle).



Obr. 5.9 *Regulace výkonu elektrárenského bloku-regulace s klouzavým tlakem páry*

Elektrický výkon bloku ***P*** a frekvence ***f*** v elektrizační soustavě se reguluje regulátorem ***R1*** výkonu bloku, který řídí množství paliva M_{pv} do kotle – akčním orgánem je regulační ventil (podavač) nastavující množství paliva.Tlak páry se nereguluje, regulační ventil turbíny ***RVT*** je trvale otevřen (100%), takže tlak páry se mění se změnou výkonu bloku (kotle).

Při zvýšení požadovaného výkonu $P_ž$ bloku (centrální dispečink – sekundární regulace) nebo při poklesu frekvence ***f*** v elektrizační soustavě (primární regulace) regulátor výkonu ***R1*** zvýší dodávku paliva do kotle – tím se zvýší parní výkon kotle a výkon turbogenerátoru ***TG***, tlak páry za kotlem se zvýší úměrně zvětšené tlakové ztrátě parovodů a zvětšenému tlakovému spádu na turbíně.

Nevýhodou tohoto způsobu regulace (stejně jako u předtlakové regulace) je, že všechny velké kapacity (kotel, parovody, turbogenerátor) jsou součástí hlavního regulačního obvodu výkonu bloku, takže odezvy výkonu ***P*** bloku a tlaku páry ***p*** a frekvence ***f*** elektrizační soustavy budou pomalejší – viz přechodové charakteristiky

v horní části obrázku. Lepší dynamické vlastnosti z tohoto hlediska mají bloky s průtočnými kotly – s menší časovou konstantou výparníku.

Nízký tlak páry za kotlem při najíždění (regulační ventil turbíny je otevřený) příznivě ovlivní najíždění bloku ze studeného stavu – zkrátí se doba najíždění, protože kotel se nemusí najíždět na jmenovitý tlak páry.

Při změnách výkonu se teplota páry v jednotlivých dílech turbíny mění jen málo, což má příznivý vliv na namáhání turbíny. Tím, že se prakticky nemění ani rychlost páry vstupující do turbíny, tak se dosahuje i nižší měrná spotřeba páry (viz obr. 5.10) – zejména vzhledem k nižšímu výkonu napáječky (nižší tlak páry).

Provoz s klouzavým tlakem (klesající tlak při snižování výkonu) musí respektovat konstruktér průtočného kotle a musí zajistit spolehlivý provoz ohříváku vody (dodržet potřebný nedohřev výstupní teploty vody k teplotě varu – ta je funkcí tlaku) i výparníku (parametr určující konec výparníku pro regulaci napájení je rovněž závislý na tlaku).

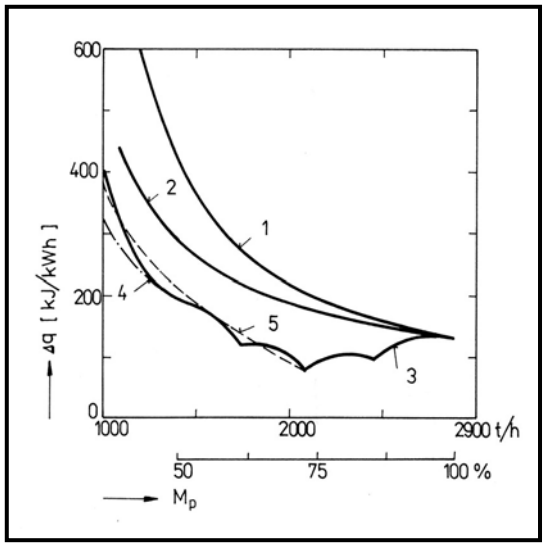
5.4 REGULACE S MODIFIKOVANÝM (ŘÍZENÝM) KLOUZAVÝM TLAKEM PÁRY– ŽÁDANÁ HODNOTA TLAKU PÁRY SE ŘÍDÍ PODLE VÝKONU.

Výhody regulace výkonu s klouzavým tlakem páry (optimální poměry na turbíně při nižších výkonech a nižší měrná spotřeba tepla, příznivější namáhání kotle i turbíny, rychlejší a tím i hospodárnější najíždění bloku) za určitých podmínek mohou převážit její nevýhody (horší kvalita regulace výkonu bloku a frekvence v elektrizační soustavě) – zejména pak v oblasti nižších výkonů.

U některých bloků se proto regulace výkonu navrhuje tak, že v oblasti vyšších výkonů pracuje blok s regulací výkonu na konstantní tlak páry a v oblasti nižších výkonů přechází na regulaci s klouzavým tlakem – hovoříme pak o regulaci s modifikovaným klouzavým tlakem a v této kapitole bude dále popsána varianta této regulace s řízením (zadáváním) žádané hodnoty tlaku páry podle výkonu bloku. (Další varianty jsou popsány např.v [56].)

Význam regulace výkonu bloku s klouzavým tlakem v oblasti nižších výkonů je zřejmý z průběhu měrné spotřeby tepla při změně výkonu – viz **obr. 5.10.**

Při regulaci na konstantní tlak páry (křivka ***1*** – regulace turbíny škrcením) je zvýšení měrné spotřeby tepla ***Δq*** při snížení výkonu bloku nejvyšší. Příznivější průběh se dosáhne při regulaci výkonu s klouzavým tlakem páry v celém regulačním rozsahu výkonu podle kap. 5.3 – křivka ***2***. Ještě výhodnější průběh se dosáhne při skupinové regulaci parní turbíny – křivka ***3*** (ale tato regulace nesouvisí s popisovanou regulací v této kapitole). Tomuto průběhu se přibližuje regulace s modifikovaným (řízeným) klouzavým tlakem páry při výkonech nižších než 75 % (křivka ***5***) – a dokonce nižší měrná spotřeba tepla se dosáhne s modifikovaným



1 – regulace turbíny škrcením
2 – regulace klouzavým tlakem
3 – skupinová regulace parní turbíny
4 – modifikovaný tlak při výkonech pod 50 %
5 - modifikovaný tlak při výkonech 70 %
M_p – parní výkon
Δq – měrná spotřeba tepla

Obr. 5.10 *Měrná spotřeba tepla bloku 840MW [4]*

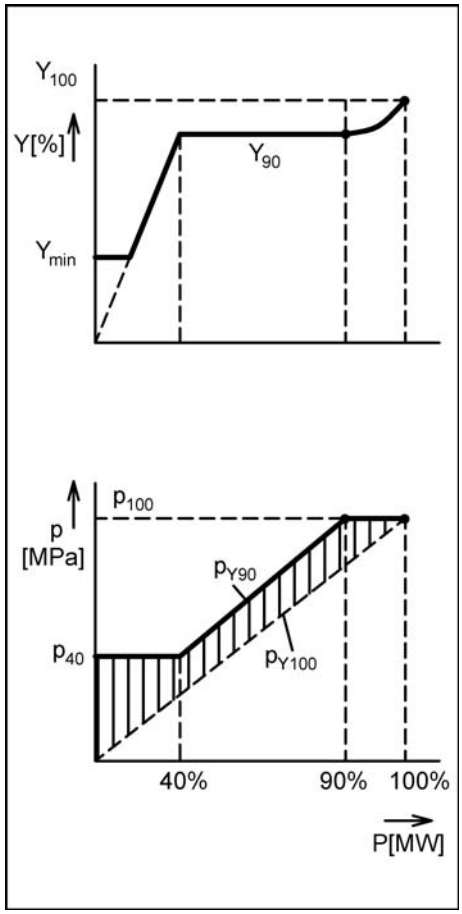
klouzavým tlakem páry při výkonech nižších než 50 %, křivka ***4***.

Příklad algoritmu pro tento případ regulace je naznačen na **obr. 5.11**, kde ***Y*** značí otevření regulačního ventilu turbíny při výkonu bloku 90 % a 100 % , a ***p*** je hodnota tlaku páry při výkonu bloku 100 % a 40 % – p_{y100} a p_{y90} označují průběh tlaku páry při ponechání ventilu turbíny v poloze odpovídající výkonu 100 % a 90 %.

Podle tohoto algoritmu se v rozsahu výkonu 100-90% blok provozuje v režimu regulace výkonu na konstantní tlak páry – regulační ventil turbíny se přivírá (z polohy Y_{100} do polohy Y_{90}) a tlak páry p_{100} je konstantní. Při provozu bloku v rozmezí výkonu 90-40 % přechází blok do režimu regulace výkonu s klouzavým tlakem páry – regulační ventil turbíny zůstává otevřen v poloze Y_{90} a tlak páry p_{y90} se postupně snižuje až na tlak odpovídající výkonu 40%. Při dalším snižování výkonu pod 40 % přejde blok zpět do režimu regulace výkonu na konstantní tlak páry – ventil turbíny se přivírá až na hodnotu Y_{min} a tlak páry zůstává konstantní p_{40}.

Tento způsob regulace má tu výhodu, že regulační ventily turbíny nejsou plně otevřeny (kromě provozu s výkonem 100 %), takže existuje možnost dosáhnout rychlého zvýšení výkonu větším otevřením regulačního ventilu turbíny – hodnota takto získaného „rezervního“ výkonu je vyznačena šrafovaně jako rozdíl mezi čarou p_{40} – p_{y90} – p_{100} a čarou p_{y100} znázorňující provoz s klouzavým tlakem páry v celém regulačním rozsahu.

Popsaný princip regulace výkonu bloku s modifikovaným tlakem páry se využívá např. u velkých elektrárenských bloků s nadkritickými parametry.



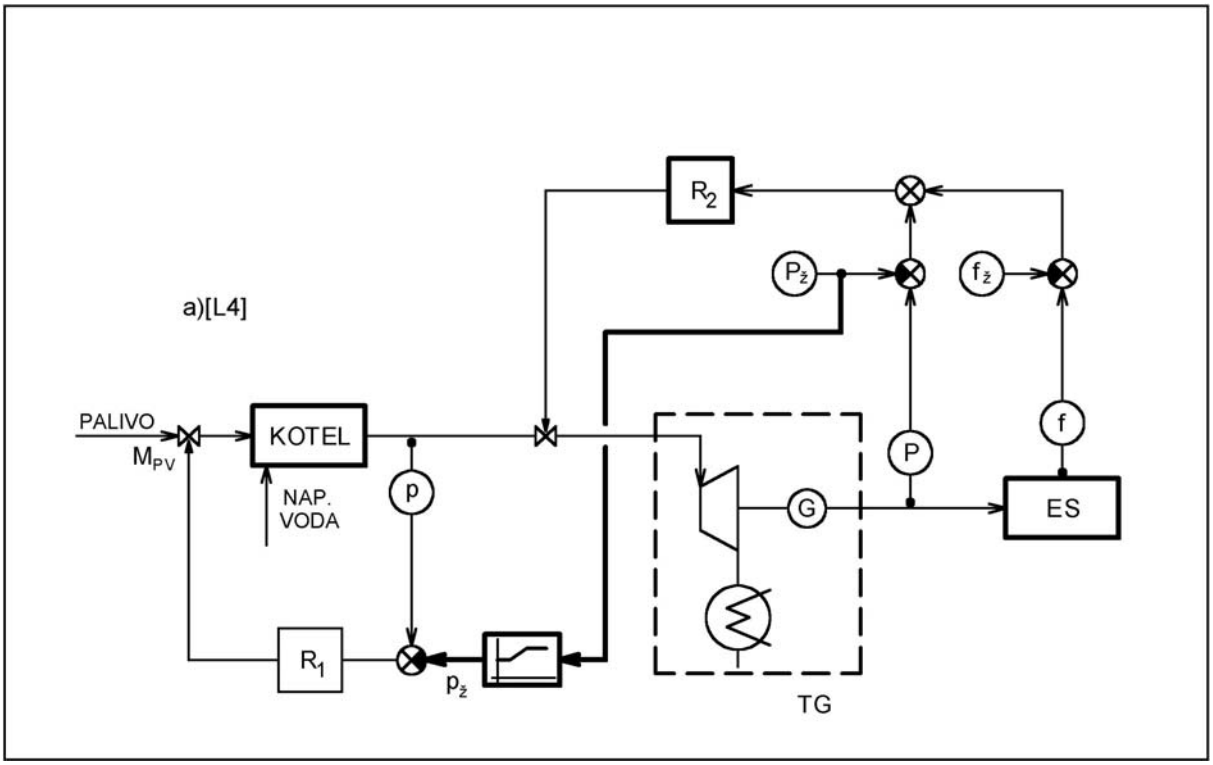
Y – otevření regulačního ventilu turbíny
p – tlak páry
P – výkon bloku

Obr. 5.11 *Algoritmus regulace s modifikovaným klouzavým tlakem páry [4]*

Schéma regulace výkonu elektrárenského bloku s modifikovaným klouzavým tlakem páry pro variantu s řízenou žádanou hodnotou tlaku páry podle výkonu bloku je uvedeno na **obr. 5.12**.

Regulace se i v tomto případě realizuje opět prostřednictvím dvou regulačních obvodů, stejně jako v případě regulace výkonu na konstantní tlak páry – **obr**.**5.4.** Tzn., že elektrický výkon bloku reguluje regulátor ***R2*** výkonu bloku podle požadovaného výkonu $P_ž$ nebo frekvence ***f*** v elektrizační soustavě ***ES***. Tlak páry za kotlem pak reguluje regulátor ***R1*** výkonu kotle podle žádané hodnoty $p_ž$, jejíž velikost se mění v závislosti na výkonu kotle, např. podle popsaného algoritmu na **obr**.**5.11.** (Regulace výkonu na konstantní tlak páry je tedy doplněna o výpočet žádané hodnoty tlaku podle výkonu bloku.)

V rozsahu výkonu 100-90 % regulátor ***R2*** reguluje výkon škrcením regulačním ventilem turbíny ***RVT*** ($Y_{100} \rightarrow Y_{90}$) a regulátor ***R1*** udržuje tlak páry na **konstantní** hodnotě p_{100}. V rozsahu výkonu 90-40 % regulátor ***R2*** udržuje regulační ventil ***RVT*** v poloze Y_{90} a regulátor ***R1*** udržuje tlak páry p_{y90} na takové hodnotě, aby byl dosažen

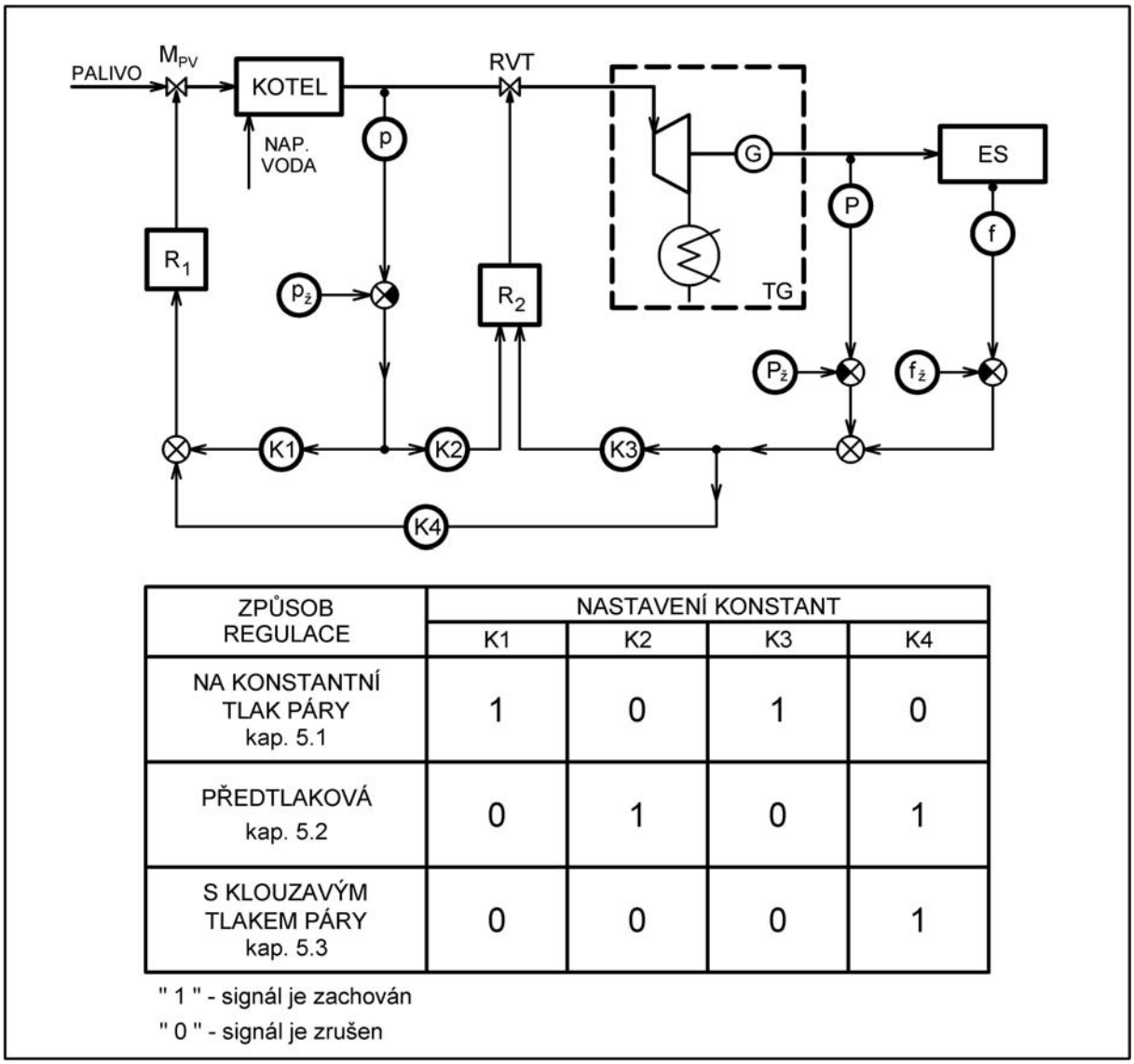


Obr. 5.12 *Regulace výkonu elektrárenského bloku-regulace s modifikovaným klouzavým tlakem páry-žádaná hodnota tlaku páry se řídí podle výkonu*

požadovaný výkon (v rozsahu 90-40 %). Při výkonech nižších než 40 % regulátor ***R2*** reguluje výkon škrcením regulačním ventilem ***RVT*** ($Y_{90} \rightarrow Y_{min}$) a regulátor ***R1*** udržuje tlak páry na konstantní hodnotě $\boldsymbol{p_{40}}$.

5.5 OBECNÁ STRUKTURA REGULACE ČINNÉHO VÝKONU ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ

Ne u všech elektrárenských bloků je jejich spolupráce s elektrizační soustavou jednoznačně definovaná a u některých bloků se může požadovat spolupráce v různých režimech (základní zatížení, položpičkový provoz, regulace frekvence) – těmto by se měla přizpůsobovat i regulace výkonu. Takový blok lze vybavit obecnou strukturou regulace výkonu podle **obr.5.13**, u níž lze vhodným nastavením konstant zvolit potřebnou strukturu regulace - na konstantní tlak, předtlakovou nebo s klouzavým tlakem páry.



ZPŮSOB REGULACE	NASTAVENÍ KONSTANT			
	K1	K2	K3	K4
NA KONSTANTNÍ TLAK PÁRY kap. 5.1	1	0	1	0
PŘEDTLAKOVÁ kap. 5.2	0	1	0	1
S KLOUZAVÝM TLAKEM PÁRY kap. 5.3	0	0	0	1

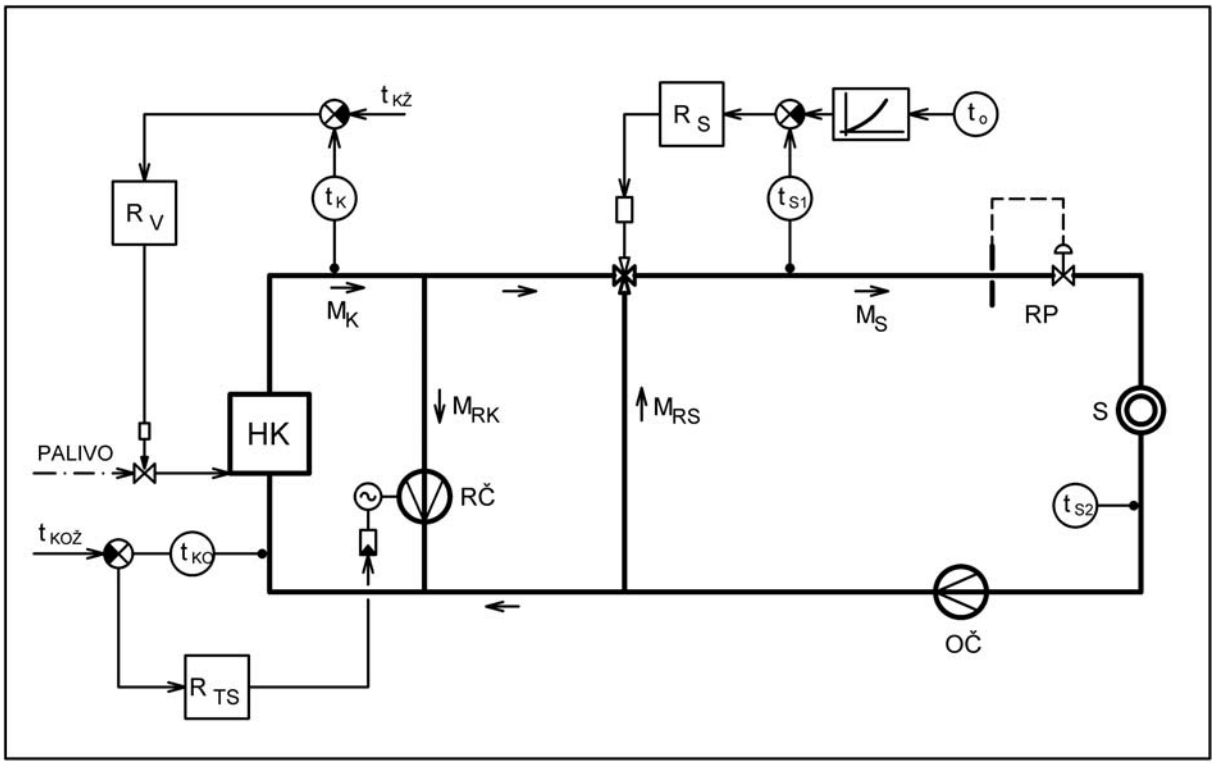
" 1 " - signál je zachován

" 0 " - signál je zrušen

Obr. 5.13 *Obecná struktura regulace výkonu bloku [4]*

6. REGULACE HORKOVODNÍCH KOTLŮ

Teplovodní či horkovodní kotel si můžeme představit jako modifikovaný parní kotel, u něhož chybí výparník a přehřívák páry, takže celý kotel je zredukován na ohřívák vody, přičemž při teplotě výstupní vody do 110 ˚C hovoříme o kotli teplovodním a pokud je teplota vyšší než 110 ˚C tak o kotli horkovodním.
Protože tyto kotle jsou napájeny vratnou vodou ze spotřebiče o nízké teplotě, musí se teplota stěny vstupního hadu udržovat na teplotě vyšší než je rosný bod spalin – především pak pokud se spaluje palivo obsahující síru.
Příklad zapojení horkovodního kotle a schéma jeho regulace podle venkovní teploty je vidět na **obr. 6.1**, kde jednotlivé symboly značí:



HK – horkovodní kotel RP – regulátor průtoku S – spotřebič OČ – oběhové čerpadlo RČ – recirkulační čerpadlo
M_K – množství vody na výstupu z kotle M_{RK} – množství recirkulované vody na vstup do kotle
M_{RS} – množství recirkulované vody před spotřebič M_S – množství vody před spotřebičem R_S – regulátor příkonu spotřebiče
t_k;$t_{kž}$ – teplota vody na výstupu z kotle a její žádaná hodnota t_{ko};$t_{kož}$ – teplota vody na vstupu do kotle a její žádaná hodnota
t_{s1};t_{s2} – teplota vody před a za spotřebičem t_o – venkovní teplota R_V – regulátor výkonu kotle R_{TS} – regulátor teploty stěny

***Obr. 6.1** Schéma zapojení a regulace horkovodního kotle podle venkovní teploty*

Regulace příkonu spotřebiče podle venkovní teploty.
Regulátor průtoku udržuje množství vody $\boldsymbol{M_S}$ přes spotřebič konstantní – tepelný výkon se reguluje změnou vstupní teploty $\boldsymbol{t_{s1}}$ přimísením potřebného množství recirkulované studené vody $\boldsymbol{M_{RS}}$, které nastavuje regulátor $\boldsymbol{R_S}$, akčním členem je trojcestný regulační ventil. Při konstantním průtoku vody závisí velikost tepelného výkonu $\boldsymbol{Q_S}$ na teplotě vstupující vody podle rovnice

$$Q_S = M_S \cdot c_{pv} \cdot (t_{s1} - t_{s2}) \qquad (6\text{-}1)$$

kde: c_{pv} – střední tepelná kapacita
$M_S = (M_K - M_{RK}) + M_{RS} = konst.$

Regulace teploty vody na vstupu do kotle.

Budeme-li předpokládat, že teplota stěny vstupního hadu kotle je přibližně stejná jako je teplota vstupující vody, pak musí platit:

$$t_{kož} \geq t_{rb} + (3 až 5)^{\circ} C \qquad (6\text{-}2)$$

kde: t_{rb} – hodnota rosného bodu spalin [˚C]

Požadovanou teplotu vody t_{ko} udržuje regulátor teploty stěny R_{TS} změnou množství recirkulované horké vody, akčním členem může být např. recirkulační čerpadlo se změnou otáček.

Regulace výkonu kotle.

Jedná se vlastně o udržování konstantní teploty vody t_k za kotlem, která musí být nižší než teplota varu při daném tlaku. Jestliže se průtok vody M_S spotřebičem udržuje konstantní, pak při regulaci výkonu spotřebiče regulátorem R_S se mění množství vratné vody (M_K – M_{RK}) do kotle. Při nízké venkovní teplotě t_o se teplota vody t_{s1} na vstupu musí zvýšit – regulátor R_S sníží množství recirkulované vody M_{RS} a má-li průtok spotřebičem M_S zůstat konstantní, musí se zvýšit průtok vody M_K přes kotel.Tím ovšem dojde k poklesu teploty vody t_k za kotlem a protože regulátor výkonu kotle R_V ji udržuje na konstantní hodnotě, tak zvýší množství paliva do kotle.

U horkovodních kotlů se většinou spaluje plyn nebo olej a používají se tzv. monoblokové hořáky. U těchto se výkon mění přestavením regulační plynové klapky, a protože tato je mechanicky spřažena s regulační vzduchovou klapkou, nastavuje se současně i potřebné množství spalovacího vzduchu.

V případech kdy se použijí klasické výkonové hořáky se výkon kotle (množství paliva) reguluje stejně jako u parních plynových (olejových) kotlů, viz. **obr. 4.113.**

Při spalování uhlí (tuhých paliv) se výkon kotle (množství paliva) reguluje stejně jako u parních kotlů spalujících tuhá paliva, včetně regulace množství spalovacího vzduchu s korekcí podle obsahu kyslíku ve spalinách.

Regulace podtlaku spalin.

Tento regulační obvod je zapotřebí jen u kotlů spalujících tuhá paliva a u plynových kotlů jen pokud mají kouřový ventilátor. Regulace je stejná jako u podobných parních kotlů.

7. REGULACE VÝKONU PARNÍCH TURBÍN

Parní turbína jako rychloběžný motor je vždy spojena s poháněným strojem, tzn., že otáčky turbíny jsou vždy jednoznačně svázány s otáčkami poháněného stroje. U elektrárenských bloků jsou tedy otáčky turbíny pevně svázány s otáčkami synchronního alternátoru (které by měly být konstantní) a souvisí s kmitočtem elektrizační soustavy – v případě pohonu jednotlivých strojů (čerpadel, kompresorů apod.) jsou otáčky turbíny proměnlivé a jsou svázány se zatížením těchto strojů.

Výkon parní turbíny se tedy musí ve všech provozních režimech přizpůsobit požadovanému zatížení a jaké možnosti pro změnu výkonu turbíny jsou k dispozici lze posoudit ze základního vztahu pro výpočet výkonu ***P*** turbíny

$$P = M_p . \Delta H . \eta_{td} \qquad \text{[kW]} \qquad (7\text{-}1)$$

kde: - M_p je množství páry na vstupu do turbíny [kg/s]
- ΔH je entalpický spád na turbíně [kJ/kg]
- η_{td} je termodynamická účinnost [%/100]

Za předpokladu, že při regulaci výkonu budeme chtít udržet co nejvyšší termodynamickou účinnost s minimálními odchylkami při změnách zatížení jsou pro regulaci k dispozici dva způsoby – regulace kvantitativní a regulace kvalitativní.

Kvalitativní regulaci lze realizovat změnou entalpického spádu ***ΔH*** na turbíně nebo změnou tlaku před turbínou.
Změnu entalpického spádu ***ΔH*** lze provést poměrně jednoduše škrcením admisní páry regulačním ventilem na vstupu turbíny.Vzhledem ke škrcení je tento způsob regulace, ve srovnání s jinými způsoby, nejméně hospodárný – viz křivka ***1*** na **obr. 5.10.**
Změna tlaku páry před turbínou se provede změnou výkonu parního kotle při regulaci výkonu bloku s klouzavým tlakem páry – kap.5.3. Měrná spotřeba tepla je nižší – viz křivka ***2*** na výše uvedeném obrázku, nebo křivky ***4*** a ***5*** při regulaci s modifikovaným klouzavým tlakem.

Kvantitativní regulaci lze provést změnou průtoku páry turbínou bez škrcení – tuto lze uskutečnit jen změnou průtočného průřezu turbíny. Konstrukčně se změna průtočného průřezu může provést jen v prvním rovnotlakém stupni turbíny – a to parciálním ostřikem. Protože z konstrukčních důvodů nelze velikost parciálního ostřiku plynule měnit, je první stupeň vybaven několika komorami, do nichž se pára přivádí přes paralelně zapojené regulační ventily a z nichž pak vstupuje do lopatkování prvního stupně. Tento způsob regulace je nejhospodárnější, viz nejnižší body křivky ***3*** na **obr. 5.10.** Pokud se turbína má zatížit výkonem, který leží mezi těmito body, musí některý regulační ventil škrtit – jedná se tedy o kombinovanou regulaci, která se nazývá *skupinová.*

Nejnáročnější fází z hlediska regulace je najíždění turbíny a její odstavení v případě náhlého odlehčení (např.výpadek generátoru ze sítě).

Při najíždění se nejprve při nezatížené turbíně zvyšují postupně otáčky až na hodnotu odpovídající okamžité frekvenci sítě – po jejich dosažení se turbogenerátor přifázuje a postupně se jeho výkon zvyšuje až na požadovanou hodnotu.

Při náhlém odlehčení turbíny jsou požadavky na rychlost zásahu regulace nejvyšší, neboť regulátor musí regulovat tak rychle, aby se předešlo zásahu

rychlouzavíracího ventilu, který okamžitě odstaví turbínu po dosažení nastavených otáček – obvykle při hodnotě 1,1 otáček jmenovitých.

7.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ REGULÁTORŮ TURBÍN

Regulátory parní turbíny rovněž prošly určitým vývojem. Měřící členy otáček turbín byly původně konstrukčně řešeny jako mechanické – princip měření byl založen na rozdílu síly vyvolané odstředivou silou otáčejícího se závaží a opačně působící síly pružiny.

Nevýhodou těchto měřících členů byla jejich malá citlivost na změnu otáček (cca ± 100 mHz) a proto byl mechanický systém opuštěn a začaly se používat hydraulické systémy,u nichž bylo možné dosáhnout citlivost až ± 30 mHz.Tyto jsou většinou založeny na principu olejového čerpadla poháněného turbínou, dosahovaný tlak oleje je úměrný kvadrátu otáček turbíny. Nevýhodou hydraulických regulátorů jsou malé změny výstupního tlaku, které nelze použít přímo pro ovládání servomotoru a musí se použít zesilovače tlaku.

V současné době se častěji používá elektrické měření otáček, např.pomocí tachodynama. Servomotory ovládající hlavní regulační ventily turbíny jsou však – bez ohledu na použitý systém měření otáček – prakticky vždy hydraulické.

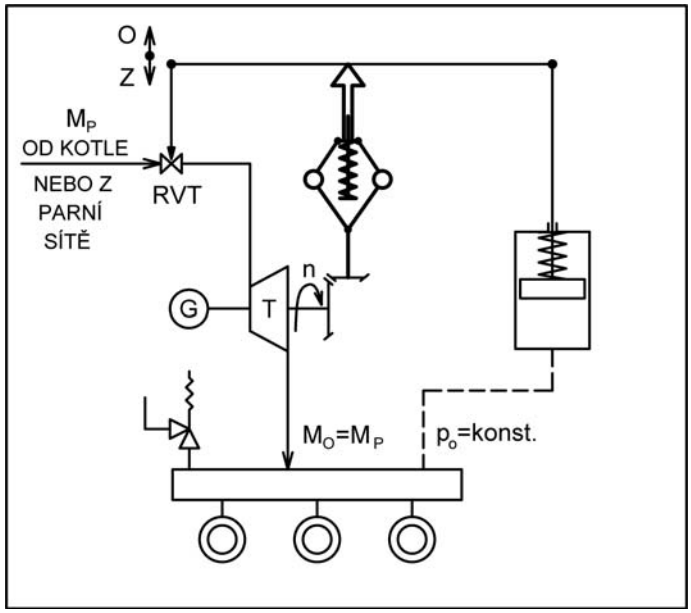
7.1.1 Regulace výkonu protitlaké turbíny

Schéma zapojení a regulace protitlaké turbíny v teplárně je naznačeno na **obr. 7.1.**

Veškeré množství páry potřebné pro zajištění dodávky tepla proudí přes parní turbínu do parní sítě s protitlakem p_o, z níž se pak pára vede k jednotlivým spotřebičům tepla. Při průtoku tohoto množství páry turbínou se vyrábí elektřina – do sítě elektrizační soustavy se dodává okamžité vyrobené množství elektřiny, elektrický výkon se nereguluje a jeho velikost je daná realizovanou dodávkou tepla (průtokem páry).

Regulace turbíny pracuje tak aby byla zajištěna dodávka tepla – tzn., že dodávku požadovaného množství páry do parní sítě regulace zajišťuje udržováním konstantního tlaku páry p_o v parní síti. Pokud se sníží odběr tepla, tak se sníží i spotřeba páry a zvýší se tlak v síti p_o, jehož působením se píst regulátoru posune nahoru a přivře se tak regulační ventil turbíny RVT.

Otáčky turbíny se v běžném provozním režimu neregulují, regulátor zasáhne (přivře regulační ventil RVT) jen v případě, když hrozí překročení maximálních otáček při náhlém odlehčení



Mp – množství páry RVT – regulační ventil turbíny T – parní turbína
O; Z; - otevřeno, zavřeno p_0 – tlak v parní síti (protitlak)

Obr. 7.1 *Regulace protitlaké parní turbíny*

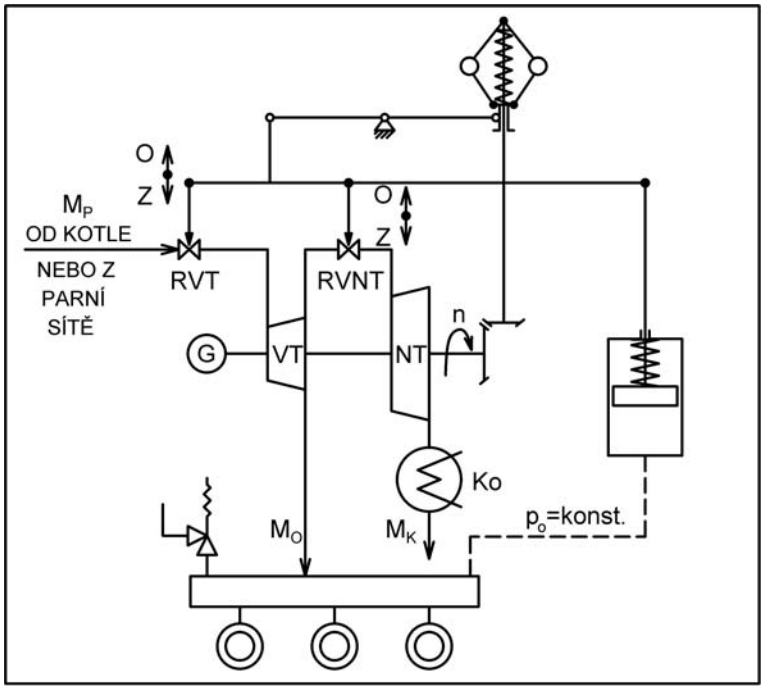
turbíny a pak při regulaci otáček turbíny při jejím najíždění. (Frekvenci v síti elektrizační soustavy trvale udržují velké elektrárenské bloky.)

7.1.2 Regulace výkonu kondenzační turbíny s regulovaným odběrem tepla

Zapojení s kondenzační turbínou s regulovaným odběrem umožňuje realizovat nezávislou dodávku tepla i elektrické energie. Schéma takového zapojení a regulace je uvedeno na **obr. 7.2.**

Parní turbína je rozdělena na vysokotlaký díl ***VT***, který je připojený k parnímu rozvaděči páry (s tlakem p_o) a nízkotlaký díl ***NT***, který je připojený ke kondenzátoru páry ***K*** a přes regulační ventil ***RVNT*** je připojen k vysokotlakému dílu ***VT***.

Veškerá pára M_p odebíraná z kotle protéká vysokotlakým dílem ***VT*** turbíny a na jeho výstupu se pak rozděluje na páru M_o potřebnou pro zajištění dodávky tepla a na zbývající část páry M_k), která proudí přes nízkotlaký díl ***NT*** turbíny do kondenzátoru páry K_o.



RVNT – regulační ventil nízkotlakého dílu turbíny
VT, NT – vysokotlaký a nízkotlaký díl turbíny
M_o – pára zajišťující dodávku tepla do sítě
M_K – pára proudící přes kondenzátor K_o - kondenzátor

Obr. 7.2 *Regulace kondenzační turbíny s regulovaným odběrem*

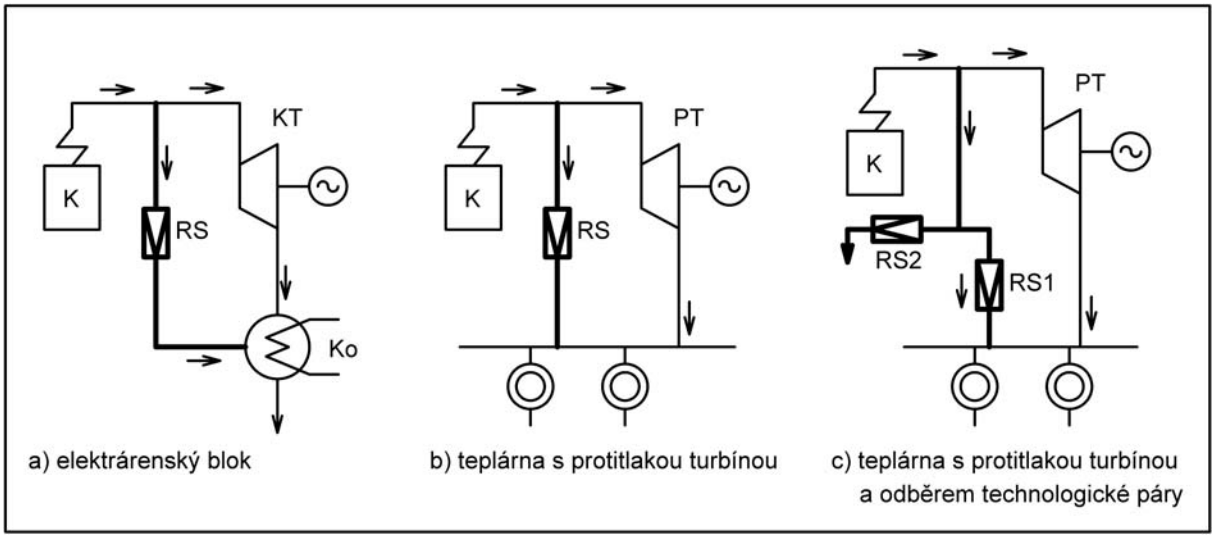
Regulace turbíny opět pracuje tak, aby byla zajištěna dodávka tepla, tzn., že udržuje konstantní tlak páry p_o v rozvaděči – tedy potřebný průtok páry M_o do sítě. Při sníženém odběru tepla se sníží i odběr páry M_o a tlak p_o v rozvaděči vzroste – regulátor tlaku přivře regulační ventil turbíny ***RVT*** a pootevře regulační ventil ***RVNT*** nízkotlaké turbíny tak, aby se tlak páry p_o udržel konstantní.

Otáčky turbíny se – stejně jako u protitlaké turbíny – regulují jen v případě, když hrozí nebezpečí překročení maximálních otáček.

8. REGULACE PŘEPOUŠTĚCÍCH A REDUKČNÍCH STANIC

U energetických bloků s parní turbínou se musí zajistit jejich spolehlivý provoz i ve všech nestacionárních stavech, které mohou být vyvolány jak provozními požadavky (najíždění, odstavování, specifické případy dodávky páry apod.) tak i činností zabezpečovacího systému bloku (***ZSB*** – např. při uzavření rychlouzavíracího ventilu při výpadku sítě, nebo v souvislosti s různými dynamickými vlastnostmi kotle a turbíny).

Pro splnění tohoto požadavku je parní turbína (respektive energetický zdroj) vybavena regulační (přepouštěcí či redukční) stanicí, jejíž zapojení je pro některé případy uspořádání znázorněno na **obr. 8.1** – o **přepouštěcí** stanici hovoříme obvykle v případě stanice umožňující zvládnout najíždění, odstavování, či mimořádné provozní



K – kotel PT – parní turbína RS – regulační stanice

Obr. 8.1 *Některé případy zapojení regulačních stanic*

stavy elektrárenských bloků, o **redukční** stanici pak nejčastěji při zajištění dodávky tepla nebo páry. (V dalším bude používán název regulační stanice ***RS***.)

Ve všech případech musí ***RS*** snížit parametry páry (tlak a teplotu) na požadovanou úroveň, přičemž důvody pro redukci parametrů páry jsou většinou tyto:

a) při najíždění a odstavování kotle nejsou parametry páry vhodné pro provoz turbíny, turbína je odstavena a pára se musí přepouštět mimo turbínu – v případě zapojení na obr. a) se pára přepouští do kondenzátoru turbíny a v případě zapojení podle obr.b) a c) se přepouští do parní sítě. Jinak by se pára v těchto fázích musela vypouštět do ovzduší, což by představovalo ztrátu tepla i kondenzátu. (U elektrárenských bloků s mezipřehříváním páry jsou přepouštěcí stanice dvě – první je v obtoku ***VT*** dílu turbíny a zajišťuje redukci parametrů páry pro průtok páry mezipřehřívákem (jeho chlazení) a druhá je v obtoku ***NT*** a ***ST*** dílu turbíny a redukuje parametry páry na parametry v kondenzátoru.)

b) při náhlém uzavření rychlouzavíracího ventilu turbíny. Parní kotel v takových případech snižuje výkon (odstavuje se) se značným zpožděním a bez zásahu ***RS*** by se tlak páry zvýšil na hodnotu otevíracího tlaku pojišťovacích ventilů, což by opět bylo doprovázeno především ztrátou kondenzátu. Pára se přepouští do kondenzátoru (obr. a) nebo do parní sítě (obr. b, c). U bloků s mezipřehříváním

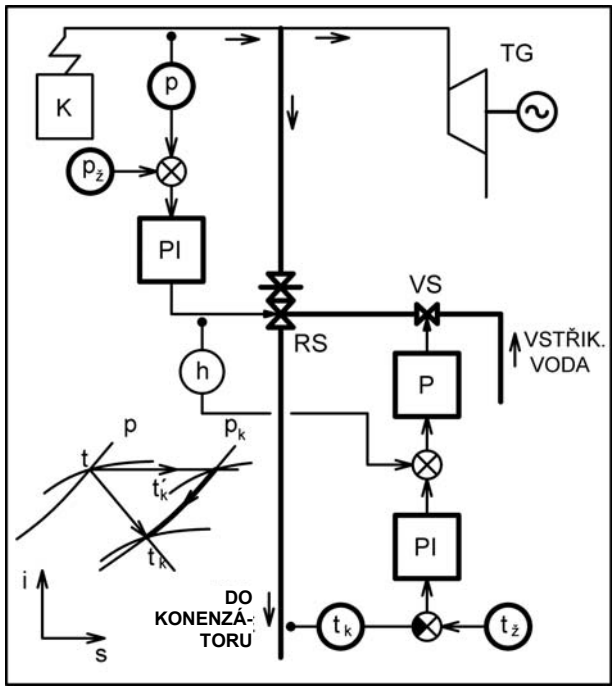
páry je chlazení mezipřehříváku zajištěno použitím dvou přepouštěcích stanic – viz bod a).

c) při dodávce např. technologické páry (často i s přerušovaným režimem) o jiných parametrech než má základní odběr, např. obr. c), kdy kromě dodávky topné páry do sítě ***RS1*** kotel zajišťuje i dodávku technologické páry o jiných parametrech ***RS2***. Nebo při zajištění páry pro vlastní potřebu, např. páru pro parní ofukovače kotle apod.
d) pro zajištění dodávky páry pro vytápění i při poruše turbíny, viz např. zapojení dle obr. b) a c).

Při najíždění, odstavování a uzavření rychlouzavíracího ventilu (body a, b) se ***RS*** regulují podle tlaku za kotlem (přepouštěcí stanice), v případě dodávky tepla nebo technologické páry (body c, d) se regulují podle tlaku páry za ***RS*** – tedy před spotřebičem (redukční stanice).

Regulace RS přepouštěcí – schéma zapojení a regulace je uvedeno na **obr. 8.2**, ***RS*** je vždy v obtoku a udržuje tlak páry ***p*** za kotlem (před ***RS***) na požadované hodnotě $p_{ž}$.

Regulační stanice ***RS*** je při běžném provozu uzavřena – uzavřený je uzavírací i regulační ventil. Stoupne-li tlak páry ***p*** za kotlem na max. přípustnou hodnotu $p_{ž}$, otevře se okamžitě uzavírací ventil (pohon má krátkou otevírací dobu, asi 5s) a současně se začne otevírat i regulační ventil, který je ovládaný regulátorem tak, aby udržoval tlak páry na konstantní hodnotě $p_{ž}$. Toto platí v případě, že u kotle je použita regulace výkonu na konstantní tlak páry. Je-li použita regulace výkonu s klouzavým tlakem, pak se pro regulaci ***RS*** místo tlaku za kotlem použije regulační odchylka regulátoru tlaku páry. (Žádanou hodnotou regulátoru ***RS*** je pak maximální přípustná hodnota této regulační odchylky.)



TG – turbogenerátor VS – vstřikový chladič
p_k, t_k – tlak a teplota v kondenzátoru

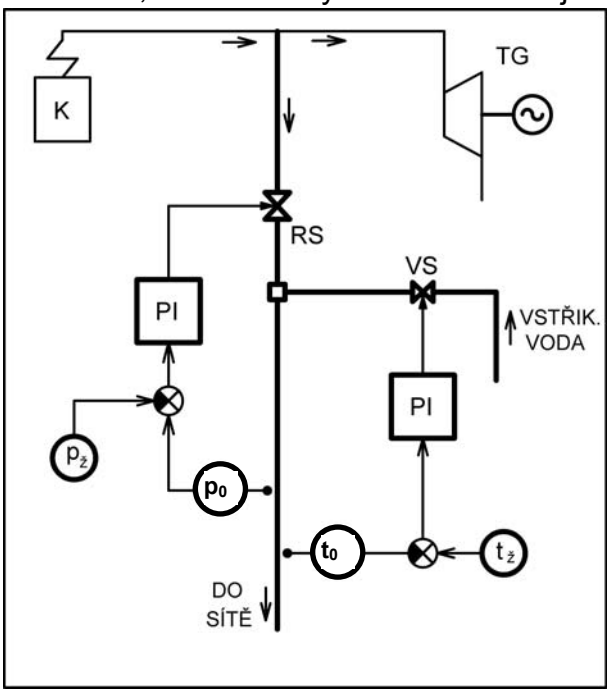
Obr. 8.2 *Regulace RS přepouštěcí*

Jak je vidět z naznačeného průběhu redukce v ***i – s*** diagramu, musí se při redukci tlaku regulovat (snížit) i teplota páry. Používá se regulace teploty vstřikem napájecí vody nebo kondenzátu – v tomto případě je použit systém vstřikování vody přímo do redukčního ventilu ***RS***. Protože u přepouštěcích stanic se musí zajistit i rychlá reakce regulátoru na změnu teploty páry, je regulační obvod teploty páry vybaven také měřením poruchové veličiny, např. zdvihu ***h*** redukčního ventilu ***RS***.

Regulace RS pro dodávku páry – schéma zapojení a regulace redukční stanice je vidět na **obr. 8.3,** regulace udržuje tlak páry ***p*** za ***RS*** (před spotřebičem) na požadované hodnotě $p_{ž}$, tato je většinou konstantní, ale může být zadávána též jako proměnlivá.

Tento způsob se používá v případech, když ***RS*** zajišťuje dodávku tepla nebo technologické páry. V těchto případech nemusí být ***RS*** zapojena vždy v obtoku turbíny – viz ***RS2*** na **obr. 8.1c**). Na tento regulační obvod nejsou kladeny tak vysoké požadavky na přesnost a rychlost zásahu jako v případě přepouštěcích stanic – regulační obvod je proto jednodušší.

K ochlazení páry se často používá samostatný vstřikový chladič za ***RS*** (může se ale použít i vstřik vody přímo v redukčním ventilu – viz **obr. 8.2**, ale nepoužívá se poruchový signál od zdvihu ventilu).

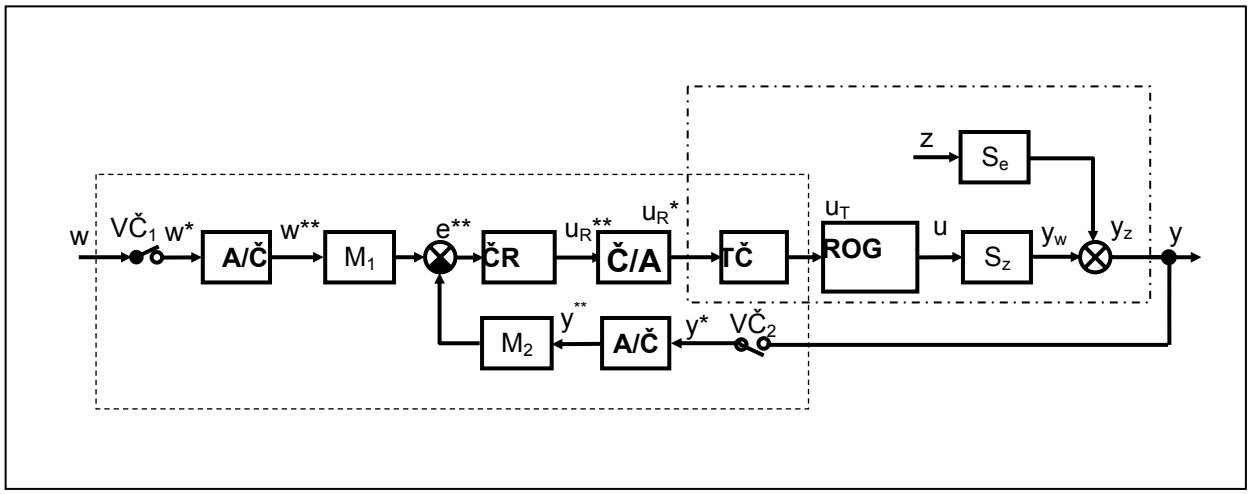


p_o, t_o – tlak a teplota v síti

Obr. 8.3 *Regulace RS pro dodávku páry*

9. DISKRÉTNÍ SYSTÉMY ŘÍZENÍ

Regulační obvod, v němž alespoň jedna veličina má tvar posloupnosti diskrétních hodnot vytvářených v určitých pravidelně se opakujících okamžicích (intervalech), nazýváme diskrétním regulačním obvodem.
Obvykle se má zato, že diskrétní regulační obvod využívá k výpočtu akční veličiny číslicový počítač. Lze říci, že nasazení číslicového počítače pro řízení představuje současný trend v rozvoji automatického řízení.
Schéma diskrétního regulačního obvodu s číslicovým regulátorem je znázorněno na ***obr. 9.1***.

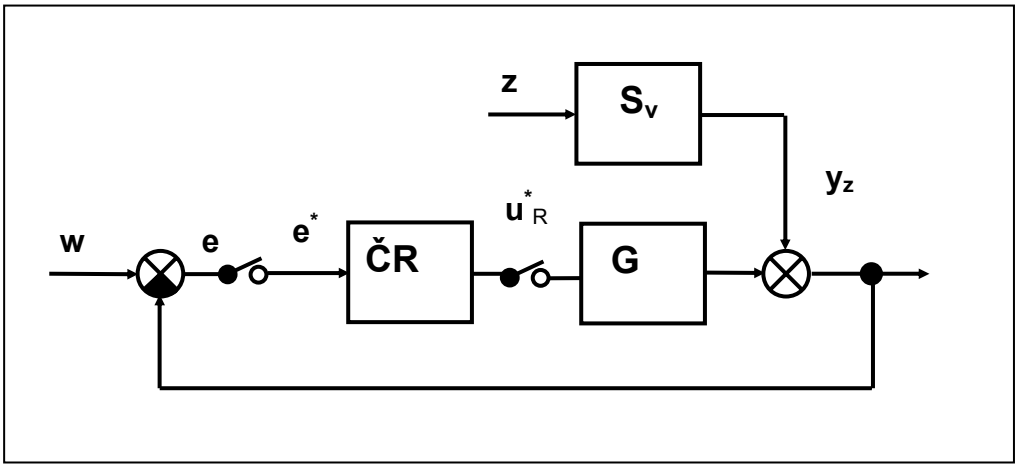


$VČ_1$, $VČ_2$ – vzorkovací členy A//Č – analogově-číslicový převodník Č/A – číslicově-analogový převodník ROG – regulační orgán S – regulovaná soustava M_1, M_2 – paměťové místo počítače ČR – číslicový regulátor TČ – tvarovací člen
* - jednou hvězdičkou jsou označeny posloupnosti impulzů diskrétních veličin
** - dvěma hvězdičkami jsou značeny číslené posloupnosti hodnot veličin

Obr. 9.1 *Blokové schéma diskrétního regulačního obvodu*

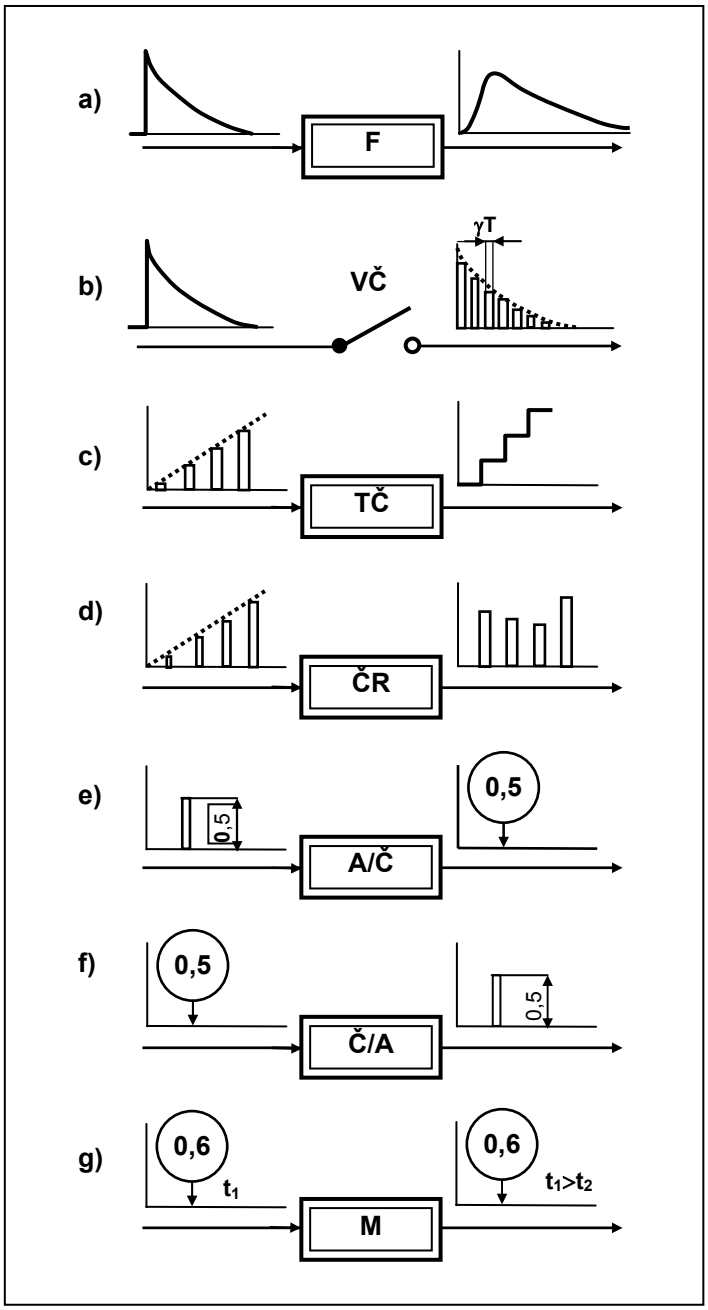
Do obvodu vstupuje žádaná hodnota regulované veličiny ***w*** a poruchová veličina ***z***. Výstupní veličina je regulovaná veličina ***y***. Žádaná veličina ***w*** a regulovaná veličina ***y*** se vzorkují vzorkovacími členy ***VČ₁*** a ***VČ₂*** a posloupnost vzorků w^* a y^* se převádí analogově číslicovými převodníky ***A/Č*** na posloupnosti číslicových hodnot w^{**} a y^{**}.Jednotlivé hodnoty w^{**} a y^{**} se postupně zapisují do určených paměťových míst ***M₁*** a ***M₂*** počítače a postupně se vypočtou regulační odchylky e^{**}. Tyto se v číslicovém regulátoru ***ČR*** (realizovaný je číslicovým počítačem) transformují podle stanoveného regulačního algoritmu na posloupnost číslicových hodnot akční veličiny u_R^{**}.
V číslicově analogovém převodníku ***Č/A*** se vytvoří posloupnost impulzů u_R^*, která se v tvarovacím členu ***TČ*** vytvaruje na akční veličinu u_T vstupující do regulačního orgánu ***ROG***. Z něj vystupuje akční veličina ***u***, která působí na regulovanou soustavu ***S*** a ovlivňuje průběh regulované veličiny ***y***, Zpětnou vazbu diskrétního regulačního obvodu tvoří vzorkovací člen ***VČ₂***, analogově číslicový převodník ***A/Č*** a paměťové místo ***M₂***.
Do regulačního obvodu rovněž vstupuje poruchová veličina ***z***, která působí na část soustavy S_z. Na soustavu může obecně působit více poruchových veličin z_i; i = 1,2,….Regulovaná veličina ***y*** se pak vytváří superpozicí složek y_{zi} a y_w.

Blokové schéma uvedené na ***obr. 9.1*** obsahuje všechny hlavní členy diskrétně i spojitě pracující části obvodu a je proto v porovnání s obvyklými blokovými schématy spojitých obvodů značně složité.
Proto se při analýze a syntéze diskrétních obvodů používá jednoduché schéma, které je znázorněno na ***obr. 9.2***.



Obr. 9.2 *Zjednodušené blokové schéma diskrétního regulačního obvodu*

Diskrétně pracující část obvodu ***ČR*** je od spojitě pracující části symbolicky oddělena „kontakty“, tvarovací člen, regulační orgán a soustava v přímé větvi jsou nahrazeny jediným členem ***G*** a součtový člen pro výpočet regulační odchylky ***e*** byl přemístěn z diskrétní do spojitě pracující části obvodu.
Pro informaci jsou na ***obr. 9.3*** uvedeny vlastnosti jednotlivých členů diskrétního regulačního obvodu.
Spojitě pracující člen (F) - obr. a). Jednoznačně transformuje vstupní spojitý signál na spojitý signál výstupní.
Vzorkovací člen (VČ)-obr. b. Je znázorněný symbolicky jako spínač. Vzorkuje v předem stanovených okamžicích vstupní spojitý signál – výstupním signálem je pak posloupnost impulzů γT.
Tvarovací člen (TC) –obr. c). Tvaruje vstupní impulz o šířce γT na signál trvající jednu periodu vzorkování.
Diskrétně pracující lineární člen (ČR) – obr. d). Transformuje posloupnost diskrétních hodnot vstupního signálu na posloupnost diskrétních hodnot výstupního signálu.
Analogově číslicový převodník (A/Č) – obr.e). Transformuje posloupnost impulzů na posloupnost číselných hodnot
Číslicově analogový převodník (Č/A) – Transformuje posloupnost výstupních číselných hodnot počítače na posloupnost impulzů.
Paměťový člen (M) – obr.g. Zaznamenává přivedenou vstupní diskrétní hodnotu a řiditelným způsobem ji vydává k dalšímu zpracování. Mezi záznamem a čtením pamatované hodnoty může uplynout nezanedbatelně dlouhý časový interval.



Obr. 9.3 *Vlastnosti jednotlivých členů diskrétního regulačního obvodu*

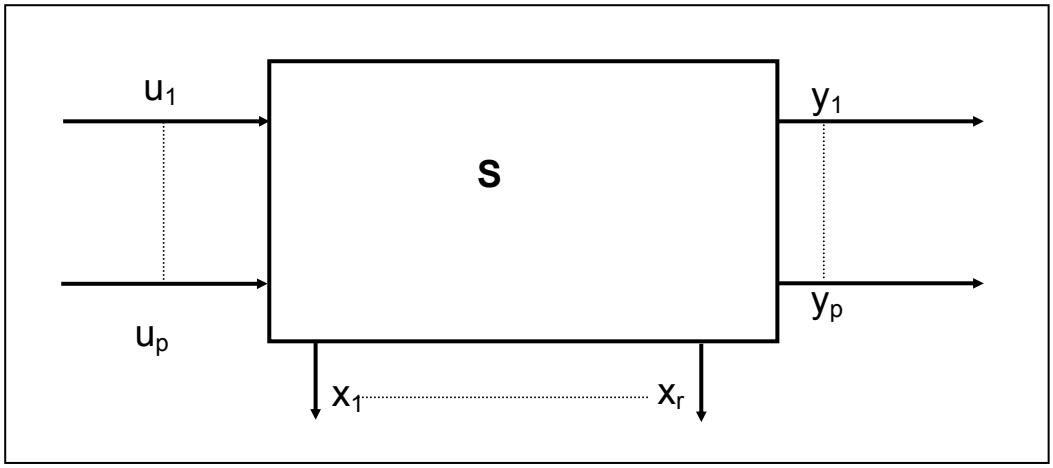
10. STAVOVÁ TEORIE ŘÍZENÍ [4], [54], [62]

Jak již bylo vzpomenuto i v kapitole 9, nedostatky klasického řízení s algoritmem ***PID*** se zejména u složitějších a vícerozměrných soustav nedaří odstranit ani pomocí složitějších regulačních obvodů – kaskádových, s využitím pomocných akčních a regulačních veličin apod. Zlepšení lze dosáhnout nasazením číslicové výpočetní techniky a jejím využitím pro realizaci složitějších řídících metod – jednou z nich pak je stavová teorie řízení.

Hlavní přínosy stavové teorie řízení lze pak formulovat např. takto:

- zrychlení zásahu regulátoru při eliminaci vlivu poruch u soustav s velkou setrvačností
- dokonalejší stabilizace málo stabilních soustav
- odolnější regulace složitých rozvětvených mnoharozměrových soustav vůči poruchám
- snazší řešení složitějších úloh řízení a jejich formalizace pro řešení na počítačích
- snazší řešení úloh číslicové regulace, řešení nestacionárních obvodů v čase a řešení obvodů nelineárních.

Na **obr. 10.1** je schématicky znázorněn mnohorozměrný lineární dynamický systém S, se vstupními veličinami $u_1 \ldots u_s$ a výstupními veličinami $y_1 \ldots y_p$



Obr. 10.1 *Mnohorozměrný lineární dynamický systém*

Vstupní a výstupní veličiny jsou funkcemi času a můžeme je zapsat ve tvaru sloupcových vektorů ***u(t)*** a ***y(t)***. K danému fyzikálnímu systému pak lze určit stavový vektor ***x(t)*** se složkami $x_1 \ldots x_r$, které se nazývají **stavové proměnné.**

Výstupní vektor ***y(t)*** bude závislý nejen na vstupním vektoru ***u(t)***, ale také na vnitřním stavu ***x(t)***.

Vektor výstupního signálu systému je tedy jednoznačně určen vztahem

$$\boldsymbol{y(t) = Y[x}(t), \boldsymbol{u(t)]} \qquad (10\text{-}1)$$

kde ***y(t)*** je odezva systému a

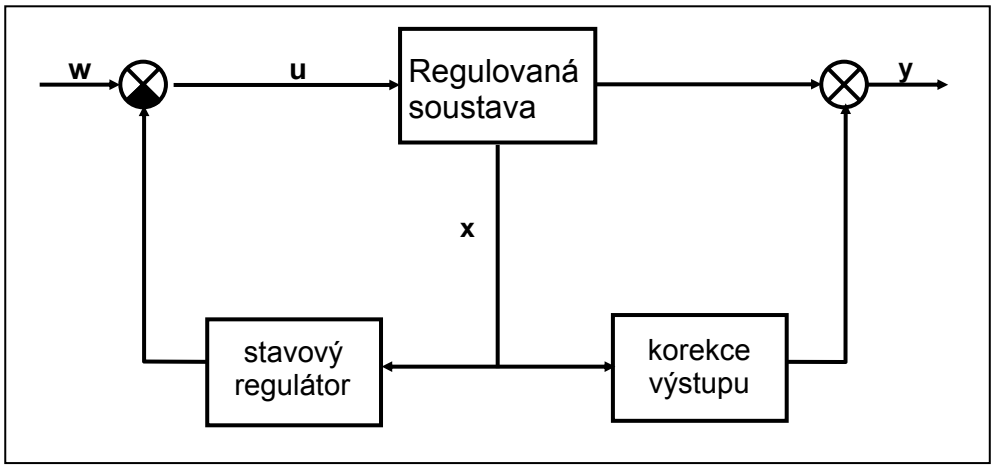
x(t) je stav systému v čase

Vnitřní popis chování dynamického systému v časové oblasti popisuje tzv. stavový model systému. Stavové veličiny ***x*** nemusí být nutně měřitelné. Měřitelné mohou být jen vstupní ***u*** a výstupní ***y*** veličiny a ty pak umožňují určovat veličiny stavové.

Stavová teorie řízení vychází ze stavového popisu a s její pomocí lze řídit i takové systémy, u nichž konvenční teorie řízení nedává uspokojivé výsledky. Stavový regulátor ve zpětné vazbě mnohorozměrného regulačního obvodu znázorněný na **obr. 10.2** umožňuje formovat celkovou dynamiku tohoto obvodu tak, aby cíl regulace

$$\boldsymbol{y} \rightarrow \boldsymbol{w} \qquad (10\text{-}2)$$

byl splněn v požadované kvalitě. Korekce výstupu umožňuje vhodně ovlivnit velikost výstupu ***y*** [62].

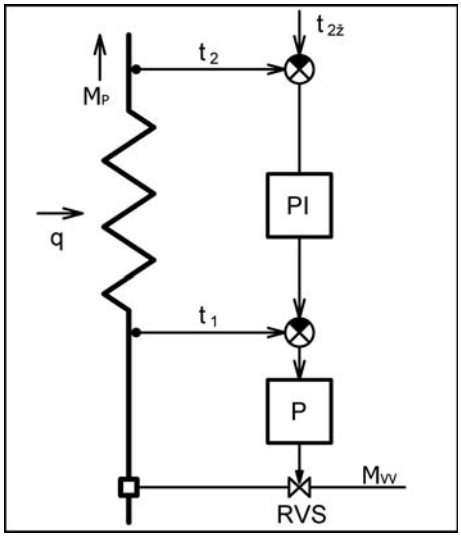


Obr. 10.2 *Blokové schéma mnohorozměrového regulačního obvodu se stavovým regulátorem*

Metody stavové teorie řízení jsou ale abstraktnější a postrádají jednoduchost a názornost klasických metod, ztrácí se souvislost stavových veličin s fyzikální podstatou řízeného procesu a potíže způsobuje modelování některých dějů, např.dopravního zpoždění.

Zjednodušený výklad stavové teorie řízení je dále popsán na příkladu regulace výstupní teploty ohřívaného media v tepelném výměníku (např. teploty páry u výstupního přehříváku páry) a to porovnáním klasické regulace teploty páry a regulace této teploty na základě stavové teorie řízení.Výstupní teplota páry se v tomto případě reguluje vstřikem napájecí vody na vstupu do přehříváku páry.

Klasické řešení regulačního obvodu je uvedeno na **obr. 10.3 –** je zřejmé, že regulátor nemá k disposici žádnou informaci o procesu, který probíhá ve výměníku. Základní informací pro regulátor je regulovaná výstupní veličina, tj.výstupní teplota páry t_2 – (ale tato je zpožděná) a pomocná regulovaná veličina – teplota páry za vstřikem t_1.

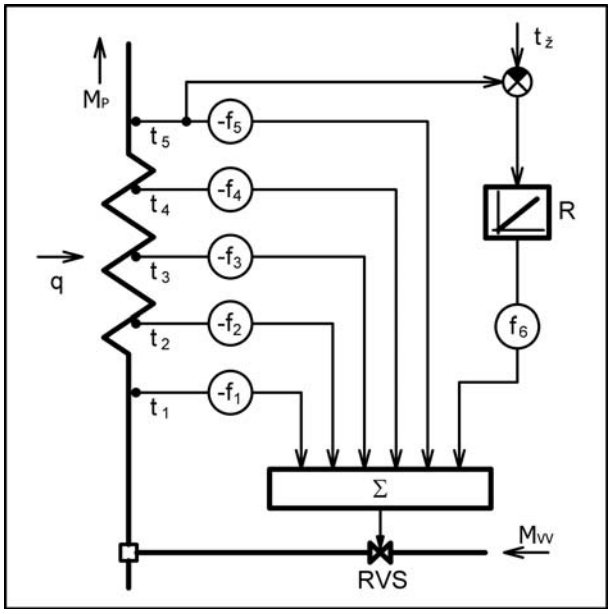


Obr. 10.3 *Klasické řešení regulace teploty páry*

Výhodnější by bylo měřit stavové veličiny (teploty t_1 až t_5) uvnitř výměníku a regulační obvod by potom měl strukturu podle **obr.10.4**

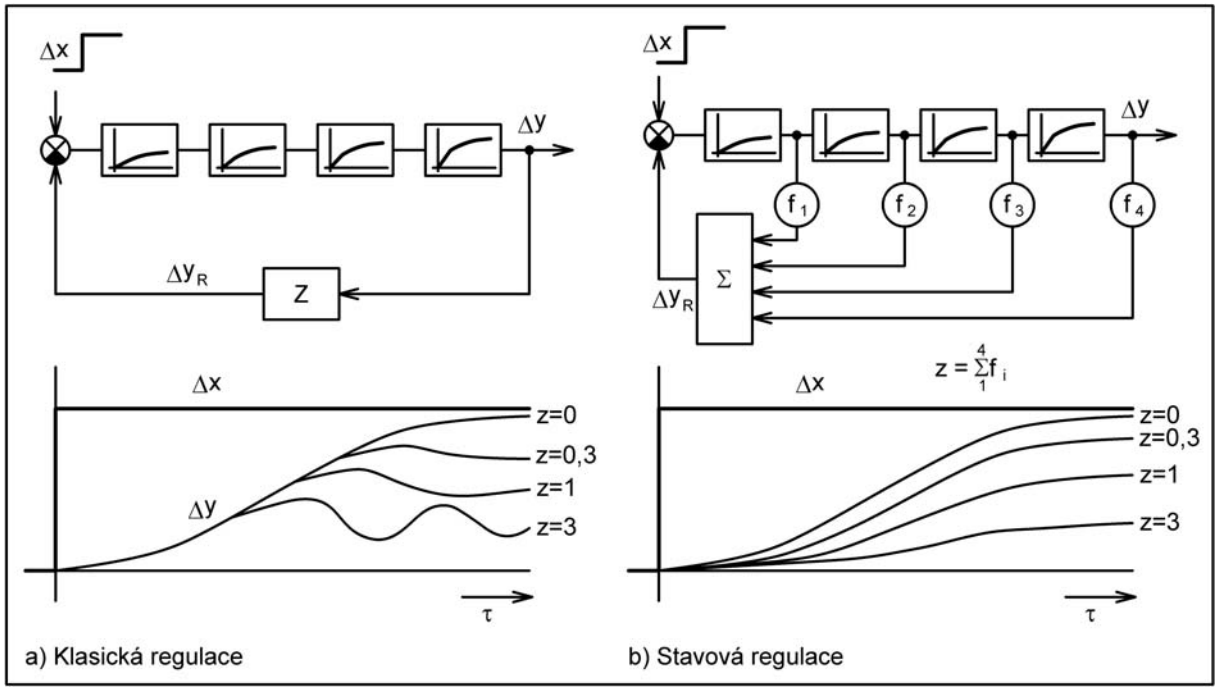
Informace o stavu soustavy se pro regulaci využijí tak, že se jednotlivé stavové veličiny sloučí v sumačním členu spolu s výstupní veličinou z ***I*** regulátoru ***R***, který zpracovává regulační odchylku výstupní teploty páry($t_5 - t_ž$) a udržuje tak výstupní teplotu konstantní. Stavové veličiny (f_1 až f_5) jsou v podstatě pomocné regulované veličiny a není třeba je porovnávat s žádanými veličinami.

Protože většinou nelze stavové veličiny z provozních nebo ekonomických důvodů přímo měřit, simuluje se jejich průběh pomocí dynamického modelu řízeného procesu – tento model se nazývá estimátor a představuje v tomto případě matematický model transportu tepelné energie výměníkem při respektování možné akumulace této energie.



Obr. 10.4 *Regulace teploty páry pomocí stavových veličin.*

Kvalitativní rozdíl mezi klasickou a stavovou metodou regulace výstupní teploty u přehříváku páry lze posoudit z průběhu přechodových charakteristik na **obr. 10.5.**



Obr. 10.5 *Průběh přechodových charakteristik regulace přehříváku páry*

U klasické regulace na obr. a) je z průběhu přechodové charakteristiky výstupní veličiny ***Δy*** (odchylka teploty výstupní páry) vidět, že při zvětšování zesílení ***Z*** sice regulační odchylka klesá, ale výrazně se zvětšuje nestabilita.

V případě stavové regulace na obr.b) je zřejmé, že při zvyšování zesílení ***Z*** se regulační odchylka rovněž zmenšuje, ale aniž by se zhoršovala stabilita – toto je důsledek dřívějšího zásahu regulátoru při simulaci průběhu teploty páry po délce přehříváku.

Při porovnání obou způsobů regulace na provozovaném elektrárenském bloku dosáhl stavový regulátor teploty páry výrazně lepší jakost regulace. Při skokovém zvýšení výkonu bloku o 10 % vznikla při stavové regulaci max. odchylka teploty páry pouze ± 1 K, zatímco při klasické regulaci dosáhla odchylka až ± 3 K.

11. ZÁKLADNÍ NÁZVOSLOVÍ

- distribuovaný systém - decentralizované řízení. Systém je rozdělen do více subsystémů, u nichž jsou pomocí mikroprocesorů řízeny jednotlivé funkční skupiny a prvky. Centrální počítač z těchto subsystémů dostává pouze vybrané informace – sníží se tak výrazně počet vstupů a výstupů. Spojení mezi prvky systému zajišťuje sběrnice, tzv. „bus“.

- bus - sběrnice pro spojení jednotlivých prvků řízeného systému. Dnes je z optických vláken, informace se předávají digitálně s příslušnou adresou, obvykle je redundantní.

- redundantní - zdvojený, zálohovaný (z hlediska spolehlivosti)

- vstupní veličiny - ovlivňují stav a průběh procesu a místo jejich měření je na počátku soustavy
  - akční - pomocí nich se proces záměrně ovlivňuje, aby se dosáhl požadovaný průběh regulované veličiny
  - poruchové - ty, které ovlivňují procesy nežádaně a obvykle negativně – jsou to změny, které soustavu vychýlí z rovnovážného stavu
    - vnitřní - tj. poruchy, co ovlivňují akční veličiny
    - vnější - tj. poruchy, co ovlivňují ty vstupní veličiny, které nejsou akční

- stavové veličiny - jsou to veličiny soustavy, které nejsou ani vstupní a ani výstupní

- výstupní veličiny - místo jejich měření určuje konec soustavy
  - regulované (řízené) – ty, které záměrně řídíme (regulujeme)
  - neregulované – ty, které nejsou předmětem řízení (regulace)

- žádaná hodnota (řídící veličina) - na této hodnotě chceme udržovat regulovanou veličinu
  - je konstantní (stálá) – pak hovoříme o regulaci na konstantní hodnotu
  - je proměnná – pak hovoříme o regulaci programové, příp. vlečné

- regulační obvod - vznikne připojením regulátoru k regulované soustavě
  - jednoduchý – má jednu hlavní zpětnou vazbu
  - rozvětvený – má více než jednu akční (řídící) veličinu a několik zpětných vazeb
- jednoparametrová regulace - reguluje se jen jedna výstupní veličina (podle jediné veličiny řídící)
- víceparametrová regulace - reguluje se více výstupních veličin, které na sebe vzájemně působí
- víceparametrová soustava - soustava má více výstupních veličin (regulovaných) a více veličin vstupních (akčních a poruchových), přičemž každou veličinu výstupní ovlivňuje více veličin vstupních
- autonomní soustava - určitá výstupní veličina se mění jen při změně jedné příslušné veličiny vstupní
- neautonomní soustava - změna jedné veličiny vstupní (aby se změnila jedna určitá veličina výstupní) vyvolá změnu i ostatních výstupních veličin
- soustava invariantní - soustava u níž je zcela eliminován vliv poruchových veličin na veličiny regulované
- soustava přibližně invariantní - soustava u níž je vliv poruchových veličin na veličiny regulované eliminován jen částečně
- přechodová funkce - matematické vyjádření odezvy výstupní veličiny soustavy na skokovou změnu veličiny vstupní (L.-transformace)
- přechodová charakteristika - grafické znázornění přechodové funkce
- statická charakteristika (soustava) - po ustálení vstupní veličiny se ustálí i výstupní veličina
- astatická charakteristika (soustava) - po ustálení vstupní veličiny se výstupní veličina trvale mění, neustálí se na nové hodnotě
- drift - posun nuly (při měření)
- verifikace (validace) - ověření, kontrola, reprezentovatelnosti a reprodukovatelnosti měření

- lineární soustava
  - její chování lze popsat lineárními diferenciálními rovnicemi. Statická charakteristika je lineární.
  - platí zákon superpozice – tzn., že např. při zdvojnásobení vstupního signálu se zdvojnásobí i výstupní signál
- nelineární soustava
  - její chování je popsáno soustavou nelineárních diferenciálních rovnic a neplatí zákon superpozice
- linearizace soustavy
  - soustava se vyšetřuje jen v nejbližším okolí regulovaného provozního bodu a nelineární charakteristika se nahradí přímkou
- přenos (přenosová funkce)
  - poměr obrazů (v L. transformaci) výstupního a vstupní signálu

12. LITERATURA

[1] Karták, J., Janeba, B., Šula, O.: Dynamika a regulace parních kotlů. Praha, SNTL 1981.
[2] Balátě, J.: Regulace a automatizace tepelně energetických zařízení. Skripta VUT, Brno 1977.
[3] Kadrnožka, J.: Tepelné elektrárny a teplárny. Praha, SNTL 1984.
[4] Karták, J.: Řízení a automatizace energetických zařízení. Skripta ČVUT, Praha 1992, ISBN 80-01-00745-6.
[5] Doležal,R.; Varcop, L.: Process Dynamics. Automatic Control of Stram Generation Plant. Elsevier Publishing Company Limited, Amsterdam-London-New York, 1970
[6] Karták, J.: Dynamika a regulace parních kotlů. Skripta ČVUT, Praha 1972.
[7] Švec, J., Kotek, Z.a kol.: Teorie automatického řízení. Technický průvodce 38, Praha, SNTL 1969
[8] Dampferzeuger – Regelung, VDI/VDE – Richtlinien 3501 až 3506, Juni 1962 až September 1973.
[9] Klefenc, G.: Die Regelung von Dampfkraftwerken, firemní literatura (Bibl. Inst.) AG, Manheim, 1973.
[10] Doležal, R.: Dynamika a regulace parních kotlů. Skripta ČVUT, Praha 1963.
[11] Profos, P.: Die Regelung von Dampfanlagen. Berlín, Springer Verlag 1962.
[12] Čermák, J., Peterka, V., Závorka, K.: Dynamika regulovaných soustav. Praha, Akademia1968.
[13] Varcop, L.: Some Aspects on the Control of the Subcritical Once – Through Boiler with Superimposed Cirkulacion. 2nd IFAC Symposium, Düsseldorf 11-13. October 1973.
[14] Varcop, L.: Rozpravy ČSAV, řada tech. věd, č.2, 1967.
[15] Varcop, L.: Zur Regelung des Brenstoffstromes und Speisewasserstromes der Durchlaufkessel. IFAC Symposium, Düsseldorf 7-8. October 1968.
[16] Měření na mlecích linkách ĚDĚ 4x200 MW. Zpráva ORGREZ n.p. Praha, srpen 1976.
[17] Černý, V., Janeba, B., Teyssler, J.: Parní kotle. Technický průvodce 32. Praha, SNTL 1983.
[18] Firemní podklady ALSTOM Power Systém GmbH, Stuttgart.
[19] Vilimec, L., Nevřiva, P.: Zařízení pro ovládání regulačních armatur teploty práškové směsi, plynů a kapalin. AO 165105.
[20] ECT STAR Systém. FOSTER WHEELER ENERGIA OY. Firemní literatura, 1/2002.
[21] ČEZ a.s. Elektrárna Dětmarovice. Firemní podklady.
[22] ČSN 070010 Základní parametry a výkonnosti parních kotlů.
[23] Karták, J.: Strojní zařízení elektráren (Základy dynamiky a regulace bloků tepelných elektráren). Skripta ČVUT, Praha 1975.
[24] Vilimec, L., Volařík, M., Jakus, J.: Spalování hnědého uhlí na kotlích 650t/h v elektrárně Dětmarovice. Sborník referátů konference Kotle a energetická zařízení, Brno 25-26.3.2003, ISBN 80-214-2317-X.
[25] Hanuš, B.: Regulační charakteristiky přehřívačů páry u kotlů československé výroby. Strojírenství 11, 1961, č.3, str.179-184.
[26] Matějka, R., Nevřiva, P., Štefan, J., Vilimec, L.: Výpočet dynamických vlastností přehříváku páry. Zpráva VŠB Ostrava, 1969.

[27] Štefan, J., Matějka, R., Nevřiva, P., Vilimec, L.: Upřesnění výpočtu výměníků tepla. Zpráva VŽKG Ostrava, 1971.
[28] Varcop, L.: Statické regulační vlastnosti konvekčních výměníků tepla. Strojírenství 13, 1963, č.5, str.351-364.
[29] Klefenz, G.: Die Regelung von Dampfkraftverken, 1. vydání, Wiessenschaftsverlag, Mannheim 1973.
[30] Klefenz, G.: Mitt. der VGB, 1961, Juni, č.72, str.191.
[31] Karták, J.: Dynamika a regulace parních kotlů. Regulační obvody parních kotlů. Skripta ČVUT, Praha 1984.
[32] Varcop, L.: Regulační vlastnosti přehřívacího traktu parních kotlů. Strojírenství 12, 1962, č.2, str.86-94.
[33] Firemní podklady. ALSTOM Power, s.r.o., Brno.
[34] ORGREZ Brno.: Ověřování vlastností zařízení v nových elektrárnách.Dílčí zpráva „Rozbor regulace teploty mezipřehřáté páry bloku 200MW“.Technická zpráva TZ 220- 41256, 1971.
[35] Ottner, K.: Der Einfluß der Zwischenüberhitzer-Einspritzung auf den spezifischen Wärmeferbrauch von Dampfkraftanlagen. BWK 21, 1969, Nr.8-August, s.419-421.
[36] Firemní podklady.IBZKG Brno,1966.
[37] Vilimec, L., Plávka, I., Chamrád, M.: Protiproudý výměník tepla mezi vysokotlakou a nízkotlakou parou. ČS patent 152808.
[38] Vilimec, L., Nevřiva, P.: Regulace teploty mezipřehřáté páry na výstupu z kotle vstřikem napájecí vody při současném obtoku páry. A.O. 166433.
[39] Leitner, R.: Vergleich zwischen Zwangdurchlauf – DE mit und ohne Vollastumwälzung und Naturumlauf – DE. VGB Kraftwerkstechnik, Heft 7, Juli 1983, s.553-568.
[40] Firemní podklady.VITKOVICE a.s.Ostrava.
[41] Läubli, F., Leithner, R., Trautmann, G.: Probleme bei der Speisewasserregelung von Zwangdurchlaufdampferzeugern und deren Lösung. VGB Kraftwekstechnik, Heft 4, April 1984, s.279-291.
[42] Vilimec, L.: Stavba kotlů-IIdíl. Skripta VŠB-TU, Ostrava 1999, ISBN 80-7078-68107.
[43] Jirouš, F.: Optimalizace provozu parních kotlů. Sborník 3. mezinárodní konference Racionálná výroba, prenos a spotreba energie. Košice-Herlany, SR, 11-13.Júna, 2001, ISSN 1335-2393.
[44] Firemní literatura.
[45] Firemní literatura.
[46] Firemní literatura.
[47] Černý, V., Hrdlička, F.: Pulsace v ohništích a průtazích parních kotlů. Zprávy ČKD Praha.
[48] Wiehen, H.: Schwingungen in Feuerräumen.VDI, Berichte 146(Verbrennung und Feuergungen), 1970.
[49] Teysler, J.: Spalování popelnatých hnědých uhlí.Praha, SNTL/ALFA 1988.
[50] Vilimec, L.: Stavba kotlů – I díl.Skripta VŠB – TU,Ostrava 2001 (první přepracované a doplněné vydání), ISBN-80-248-0076-4.
[51] Nové softwarové technologie v řízení kotlů. Fa. Honeywell, Honeywell Technology Center Praha. Energie, str.40-41.
[52] Vilimec, L., Tomčala, J.: K rosnému bodu a teplotě spalin za kotlem. Sborník VII.mezinárodní konference Spalování a životní prostředí 2003. VŠB-TU Ostrava, 17- 18.6.2003, ISBN 80-248-0394-1.

[53] Vilimec, L., Tomčala, J.: Příspěvek ke stanovení rosného bodu spalin. Sborník 5. mezinárodní konference Racionálná výroba, prenos a spotreba energie. Košice-Herlany, SR, 22-25.9.2003, ISSN 1335-2393.
[54] Ibler, Z. a kol.: ENERGETIKA, Technický průvodce, 1.díl.Praha,BEN-technická literatura 2002, ISBN 80-7300-026-1.
[55] Willmann, B.: Problematika příprav na propojení elektrizační soustavy ČR se soustavou západní Evropy. Energetika, 5/2001, str.168-172.
[56] VDI/VDE – Richtlinien, Blockregelung von Wärmekraftwerken. VDI/VDE 3508, Juli 1984.
[57] Firemní katalog Mannesmann Hartmann & Braun, Rauchgasmesser CGRGM,1990.
[58] Podklady ČEZ a.s, Elektrárna Hodonín.
[59] Sindelár, R.: Předtlaková regulace v rámci regulace elektrárenského bloku (ABB Mannheim, SRN).Energetika, 12/1966, str.413-416.
[60] Cikhart, J.: Měření a regulace ve vytápění. Druhé upravené vydání. Praha, SNTL 1984.
[61] ON 070417, návrh z 1.8.1984.
[62] Balátě, J.: Automatické řízení. BEN – technická literatura, Praha 2003, 1.vydání, ISBN 80 – 7300 – 020 – 2.