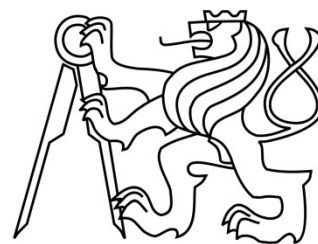


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**K13115 \_ Katedra elektroenergetiky**

---



# **Dimenzování plynového kotle pro kombinovanou výrobu**

**Dimensioning of the gas steam boiler for cogeneration**

**Praha 2017**

**Vedoucí práce: Ing. Lubomír Musálek**

**Vypracoval: Jan Votava**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Votava** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **406150**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Dimenzování plynového parního kotle pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla**

Název diplomové práce anglicky:

**Dimensioning of a gas steam boiler for cogeneration of electricity and heat**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou plynových energetických kotlů.
2. Seznamte se s podmínkami poskytování podpůrných služeb.
3. Vytvořte model spolupráce kotel-turbína, který bude dynamicky řízen.
4. Vytvořený model aplikujte pro dimenzování kotle pro zadanou situaci.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).  
[2] KARTÁK, Jan. Řízení a automatizace energetických zařízení. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00745-6.  
[3] ŠŤASTNÝ, Jiří. Energetická strojní zařízení. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03585-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Lubomír Musálek, katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.09.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2018**

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržení etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

23. května 2017

.....  
Jan Votava

## **ANOTACE**

Práce se zabývá technickoekonomickou analýzou uplatnění nového parního kotle pro průmyslový podnik, který bude umožňovat poskytování podpůrných služeb za účelem zvýšení zisku a konkurenceschopnosti.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

teplo, energetika, parní kotel, elektrická energie, kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET), podpůrné služby PpS, regulační energie

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on technical and economic analysis use of the new steam boiler for industrial enterprise, to provide support services to increase profitability and competitiveness.

## **KEYWORDS**

heat, energetics, steam boiler, electrical energy, combined heat and power (CHP), load balancing, regulation energy

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VOTAVA, J. *Dimenzování plynového kotle pro kombinovanou výrobu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2017. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubomír Musálek.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Lubomíru Musálkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. za rady týkající se provozu protitlakových turbín v průmyslových podnicích.

## OBSAH

1	Úvod.....	12
2	Technická zařízení kombinované výroby.....	13
2.1	Parní protitlakové turbíny.....	13
2.1.1	Provozní charakteristiky protitlakových turbosoustrojí.....	14
2.2	Parní turbíny kondenzační odběrové.....	17
2.3	Regulace parních turbín v elektrárenském provozu .....	19
2.3.1	Regulace škrcením.....	19
2.3.2	Regulace klouzavým tlakem.....	21
2.3.3	Skupinová regulace.....	23
2.4	Spouštění a odstavování parní turbíny .....	24
2.4.1	Spouštění.....	24
2.4.2	Odstavování parní turbíny.....	25
2.5	Plynové parní kotle .....	26
2.5.1	Základní parametry parních kotlů.....	26
2.5.2	Prvky parní části kotle .....	27
2.5.3	Velkoprostorové kotle.....	27
2.5.4	Vodotrubné kotle .....	28
2.5.4.1	Bubnové kotle s přirozenou cirkulací ve výparníku.....	29
2.5.4.2	Bubnové kotle s nucenou cirkulací ve výparníku.....	30
2.5.4.3	Kotle průtočné .....	30
2.5.5	Regulace výkonu parních kotlů .....	31
2.5.6	Regulace teploty páry parního kotle .....	35
2.5.7	Regulace redukčních stanic pro dodávku páry .....	35
2.6	Příjmy za energii vyrobenou při kombinované výrobě.....	36
2.6.1	Podmínky pro udělení zeleného bonusu KVET.....	36
2.6.2	Výpočet podpory zeleného bonusu.....	39
3	Podpůrné služby v ČR.....	40
3.1	Kategorie podpůrných služeb .....	40
3.1.1	Primární regulace frekvence bloku – (PR).....	40
3.1.2	Sekundární regulace P bloku (SR).....	41
3.1.3	Snížení výkonu (SV30).....	41
3.1.4	Minutová záloha (MZt) (t = 5 a 15 min).....	41
3.1.5	Sekundární regulace U/Q (SRUQ).....	42
3.1.6	Schopnost ostrovního provozu (OP).....	42



3.1.7	Schopnost startu ze tmy (BS).....	42
3.2	Požadavky na PpS.....	43
	• Měřitelnost se stanovenými kvantitativními parametry.....	43
	• Garantovat dostupnost služby během denního, týdenního a ročního cyklu s možností vyžádat si inspekci.....	43
	• Certifikovatelnost – stanovený způsob prokazování schopnosti poskytnout služby pomocí periodických testů.....	43
	• Možnost průběžné kontroly poskytování služeb.....	43
3.3	Příjmy za PpS a regulační energii.....	43
3.3.1	Příjmy z PpS kategorií PR, SR, MZ <sub>+15, -15, +5</sub> .....	43
3.3.1.1	Příjmy za rezervovaný výkon regulačních záloh PR, SR, MZ <sub>+15, -15, +5</sub> .....	44
3.3.1.2	Příjmy za kladnou a zápornou regulační energii.....	45
3.3.2	Příjmy z PpS ostatních kategorií.....	46
3.3.2.1	Sekundární regulace U/Q (SRUQ).....	46
3.3.2.2	Schopnost startu ze tmy (BS).....	46
3.3.2.3	Schopnost ostrovního provozu (OP).....	46
3.3.2.4	Změna zatížení (ZZ30).....	46
4	Modelování spolupráce parní kotel – turbína – spotřebič tepla pro stanovení bilance energií.....	46
4.1	Popis provozu.....	47
4.2	Výchozí stav.....	47
4.3	Energetické hospodářství objektu.....	48
4.3.1	Elektrická energie.....	48
4.3.2	Tepelná energie.....	49
4.4	Turbosoustrojí.....	49
4.5	Výpočet provozních charakteristik.....	50
4.6	Výpočet bilancí v jednotlivých uzlech provozu.....	52
5	Ekonomické zhodnocení.....	54
5.1	Čistá současná hodnota NPV.....	55
5.2	Případová studie.....	55
5.2.1	Příjmy a výdaje za vyrobenou elektrickou energii.....	56
5.2.2	Příjmy a výdaje za PpS.....	56
5.2.3	Příjmy a výdaje za dodanou regulační energii.....	56
5.3	Vstupní předpoklady.....	56
5.4	Výsledky případové studie.....	57

6 Závěr.....	59
Reference.....	60
Tištěné přílohy .....	62
Elektronické přílohy.....	72

## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A PŘÍSLUŠNÝCH ZNAČEK

Veličina	Značka	Jednotka
Čas	t	s
Výkon	P	MW
Svorkový elektrický výkon	PP	MW
Celková účinnost	$\eta$	-
Elektromechanická účinnost turbosoustojí	$\eta_{em}$	-
Termodynamická účinnost	$\eta_i$	-
Tepelná účinnost	$\eta_{tep}$	-
Teplárenský součinitel	$\alpha$	-
Tepelný výkon	Q	MW
Spotřeba tepla turbosoustrojí	$Q_{Tp}$	MW
Protitlakový tepelný výkon	$Q_{Tc}$	MW
Spotřeba tepla na elektrický výkon	$Q_{Te}$	MW
Spotřeba tepla při běhu naprázdno	$Q_{Tp0}$	MW
Protitlakový tepelný výkon při běhu naprázdno	$Q_{Tc0}$	MW
Elektromechanická složka spotřeby tepla naprázdno	$Q_{Te0}$	MW
Měrná spotřeba tepla	$c_{Tp}$	-
Měrná spotřeba tepla odpovídající tepelnému výkonu	$c_{Tc}$	-
Měrná spotřeba tepla odpovídající elektrickému výkonu	$c_{Te}$	-
Tlak	p	MPa
Entalpie páry na vstupu do tepelného stroje	i	kJ/kg
Rozdíl entalpie na vstupu a výstupu kotle K3	$\Delta I_{K3}$	kJ/kg
Rozdíl entalpie na vstupu a výstupu kotlů K4 a K5	$\Delta I_{K4,5}$	kJ/kg
Entropie	s	kJ/kg K
Hltnost turbíny	D	kg/s
Frekvence	f	Hz

## Seznam použitých zkratk

KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
UPE	Úspora primární energie
RZ	Regulační záloha
SyS	Systémové služby
PpS	Podpůrné služby
PS	Přenosová soustava
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
SZTE	Soustavy zásobování tepelnou energií
PR	Primární regulace
SR	Sekundární regulace
MZ <sub>5</sub>	Minutová záloha dosažitelná do 5 minut
MZ <sub>15+</sub>	Kladná minutová záloha dosažitelná do 15 minut
MZ <sub>15-</sub>	Záporná minutová záloha dosažitelná do 15 minut
RZPR	Primární regulační záloha
RRPR	Regulační rozsah primární zálohy
RZSR <sub>(+)</sub>	Sekundární regulační záloha, kladná část
RZSR <sub>(-)</sub>	Sekundární regulační záloha, záporná část
RRSR	Regulační rozsah sekundární zálohy
RZMZ <sub>5</sub>	Regulační záloha dosažitelná do 5 minut
RZMZ <sub>15+</sub>	Kladná regulační záloha dosažitelná do 15 minut
RZMZ <sub>15-</sub>	Záporná regulační záloha dosažitelná do 15 minut
ČSN	Česká technická norma
TNI	Technická normalizační informace
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma
NPV	Čistá současná hodnota technologie po uplynutí životnosti
r	Diskont
CF	Cash Flow

# 1 Úvod

V současné době, je globální snahou snižovat emise CO<sub>2</sub>, přičemž velký důraz je kladen na emise z průmyslu. Současně je také cílem průmyslových podniků snižovat energetickou a z toho plynoucí ekonomickou náročnost vlastní výroby, která zajistí konkurenceschopnost. Protože podniky s potřebou tepla pro zajištění chodu výroby mají specifické požadavky na parametry a množství tepelné energie pro technologii, vyrábí si teplo nejčastěji samy. Pro takové podniky je už řadu let způsob, jak snížit spotřebu primární energie<sup>1</sup> a z toho plynoucí náklady na výrobu kombinovaná výroba. Vedlejším efektem bylo donedávna snížení emisí CO<sub>2</sub>. V současné době je platí podle novely zákona 406/2000 Sb. o hospodaření energií, povinnost pro energetická hospodářství<sup>2</sup> zajistit energetický posudek. Součástí posudku je mimo jiné posouzení proveditelnosti projektů týkajících se snižování emisí ze spalovacích zdrojů využitím obnovitelných, nebo druhotných zdrojů, nebo kombinované výroby elektřiny a tepla financovaných ze státních programů podpory. Dá se tedy říct, že je v dnešní době takový legislativní tlak na použití kombinované výroby, že nelze ve většině průmyslových podniků s potřebou tepla kombinovanou výrobu vynechat při výstavbě či při rozsáhlejší rekonstrukci.

Většina průmyslových podniků využívá kvůli jednoduchosti palivového hospodářství a z toho plynoucím nízkým nárokům na prostory jako zdroj primární energie plynná případně kapalná paliva. Vekou výhodou využití těchto paliv, je vysoká dynamika regulace výkonu spalovacích zařízení pro tyto paliva určených. Vysoká dynamika spalovacích zařízení umožňuje při vhodné konstrukci parních částí rychlou změnu parního výkonu, tím pádem i výkonu elektrické.

Prítomnost takovéto techniky umožňuje poskytování podpůrných služeb, to umožňuje v průmyslových podnicích zajištění dalšího zisku. Další zdroj příjmu pak zvyšuje konkurenceschopnost podniku. Vzhledem k tomu, že po podpůrných službách je stále větší poptávka (z důvodů rychle rostoucího podílu obnovitelných zdrojů elektrické energie na celkové výrobě), je příhodné tuto službu ekonomicky zhodnotit. Další alternativou pro zvýšení zisku je poskytování regulační energie na vyrovnávacím trhu, což snižuje investiční náklady na certifikaci zařízení.

---

<sup>1</sup> Primární energie, energie, která neprošla žádným procesem přeměny. Vyhláška č. 78/2013 Sb.

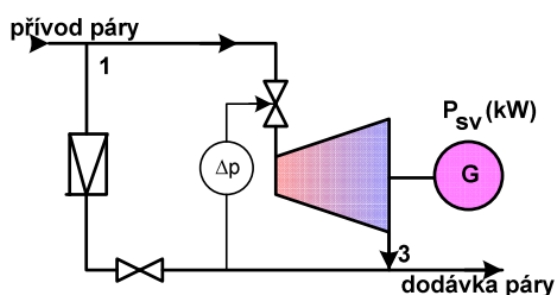
<sup>2</sup> Energetickým hospodářstvím se rozumí, soubor technických zařízení a budov sloužících k nakládání s energií.

## 2 Technická zařízení kombinované výroby

Kombinovanou výrobou tepla a elektřiny (dále jen „KVET“) [1], neboli kogenerací se myslí současná výroba tepelné energie a elektrické nebo mechanické energie v jednom procesu. Toho je v současné době možno dosáhnout celou řadou technických celků s různými podíly výroby elektřiny a tepla. Pouze dva hlavní typy KVET se však dají uplatnit v průmyslových podnicích s potřebou dodávky tepla v páře, a to technologické celky parní kotel – parní turbína a plynová turbína – spalínový kotel. Druhý typ je i přes svoji vyšší elektrickou i celkovou účinnost stále méně používaný. V této části práce bude podrobně popsán první typ, který je nejstarším zařízením používaným pro KVET, přesto však stále konkurenceschopný a v určitých aplikacích nenahraditelný.

### 2.1 Parní protitlakové turbíny

Parní protitlakové turbíny jsou konstruovány pro současnou výrobu elektrické energie a dodávku tepelné energie (tzv. točivá redukce), a to pro technologickou i pro komunální potřebu. Množství vyrobené elektrické energie je závislé na odběru a kvalitě tepelné energie. Provoz turbíny se musí přizpůsobit tak, aby při daném odběru tepla došlo ke kondenzaci veškeré emisní páry. Kvalita odebírané tepelné energie je závislá na velikosti protitlaku turbíny, který přímo ovlivňuje výkon turbíny. Protitlak definuje teplotu kondenzace, která určuje maximální teplotu ohřevu a velikost kondenzačního tepla (kJ/kg). Pro většinu aplikací je kladen požadavek na konstantní teplotu dodávaného tepla, toho se docílí udržením konstantního protitlaku v soustavě. Protitlak se udržuje na konstantní úrovni tlakovým regulátorem na vstupu páry do turbíny. Protitlaková turbína se pro použití v teplárenství s výkyvy spotřeby nedimenzuje na maximální potřebu tepla, protože by většinu času pracovala při nižším průtoku, než na jaký by byla stavěna. Takový provoz by byl značně neekonomický a snižoval by účinnost výroby elektrické energie. Z toho důvodu se pro případ potřeby většího množství tepla k turbíně přidává regulovaný obtok znázorněný na obr. 1.



Obr. 1 Schéma zapojení protitlakové turbíny v teplárenském provozu, větev 1 je regulovaný obtok pro potřeby zvýšení tepelného výkonu. [2]

Poměr mezi tepelnou energií dodanou parou při maximálním průtoku turbínou  $Q_T$  (GJ/h) a maximu tepla dodávaného  $Q_{MAX}$  (GJ/h) z KVET se nazývá teplárenský součinitel  $\alpha = \frac{Q_T}{Q_{MAX}}$  (-), a z výše popsaného důvodu se volí vždy  $\alpha < 1$ .

Provoz protitlakových turbín je charakteristický velmi vysokou celkovou účinností, ta je dána tím, že nedochází k odvodu tepla bez užítku neboli absencí kondenzátoru. Celková účinnost tepelného protitlakového oběhu je závislá pouze na účinnosti potrubního systému a parního kotle. Mezi další výhody patří vysoká účinnost a spolehlivost turbíny z důvodu absence nízkotlaké části. Nevýhodou je špatná přizpůsobitelnost spotřebě elektrické energie. Pokud není výroba vybavena dostatečně dimenzovanou redukční stanicí, není možná změna elektrického výkonu. Při potřebě rezervy elektrického výkonu je jediné řešení provoz s admisní párou o nižším tlaku a zásobování tepelného odběru přes redukční, případně redukčně-chladicí stanici. Při požadavku na vyšší výkon se zvýší tlak admisní páry, čímž vzroste průtok páry turbínou a klesne průtok redukční stanicí.

### 2.1.1 Provozní charakteristiky protitlakových turbosoustrojí

Charakteristikami turbosoustrojí se myslí závislost mezi tepelným výkonem přiváděným do turbíny, jeho přírůstky a výkony z něj odváděnými. Základní popis teoretického protitlakového provozu je možný pomocí charakteristických kvantitativních rovnic vyplývajících z i-s diagramu:

Protitlakový elektrický výkon<sup>3</sup>:

$$P_P = D_p \Delta i_p \eta_{em} \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

Protitlakový vnitřní výkon<sup>4</sup>:

$$P_P = D_p \Delta i_p \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

Protitlakový tepelný výkon<sup>5</sup>:

$$Q_P = D_p \Delta i_q \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

Entalpický spád na turbíně:

$$\Delta i_p = i_0 - i_p = (i_0 - i_{pt}) \eta_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4)$$

Entalpický spád na spotřebiči tepla:

$$\Delta i_q = i_p - i_q \quad (\text{kJ/kg}) \quad (5)$$

Elektromechanická účinnost turbosoustrojí

$$\eta_{em} = \eta_m \eta_g \quad (-) \quad (6)$$

Kde  $D_p$  je průtoka páry turbínou (kg/s),  $i_0$  je entalpie admisní páry (kJ/kg),  $i_p$  je entalpie emisní páry (kJ/kg),  $i_{pt}$  je teoretická emisní entalpie při isoentropické expanzi a daném tlakovém spádu (kJ/kg),  $i_q$  je entalpie před napájecím čerpadlem (kJ/kg),  $\eta_m$  je mechanická účinnost turbíny (-),  $\eta_g$  je účinnost generátoru (-),  $\eta_i$  je vnitřní (termodynamická) účinnost turbíny.

*Ve skutečném protitlakovém oběhu dochází ke ztrátám kondenzátu a doplňováním vodou o nižší entalpii. Pro hrubou představu jsou však tyto rovnice dostatečné.*

Při zanedbání ztrát ve skutečném provozu lze uvažovat účinnost tepelného oběhu 100% pak lze rozdělit vstupní teplo na složky. Část příkonu vstupního tepla se přeměňuje na elektrický výkon a zbytek tepelného příkonu opouští turbínu jako protitlakový tepelný

<sup>3</sup> Elektrický výkon na svorkách generátoru.

<sup>4</sup> Výkon, který je předáván parou turbíně.

<sup>5</sup> Tepelný výkon odebraný z turbíny spotřebičem.

výkon  $Q_P$ . Stejná úvaha platí i pro příkony a výkony při chodu naprázdno. Na základě této úvahy lze psát doplňkové rovnice

$$Q_{Tp} = Q_{Te} + Q_{Tc} \quad (\text{MW}) \quad (7)$$

$$Q_{Tp0} = Q_{Te0} + Q_{Tc0} \quad (\text{MW}) \quad (8)$$

kde  $Q_{Tp}$  je celková spotřeba tepla (MW),  $Q_{Te}$  je spotřeba tepla na elektrický výkon,  $Q_{Tc} \approx Q_P$  je spotřeba tepla na tepelný výkon odebíraný z turbíny, index 0 označuje spotřebu naprázdno.

Z těchto bilančních rovni lze vyjádřit:

- a) Charakteristiky energetického typu  $Q_{Tp} = f(P_P)$  sloužící k výpočtu spotřeby paliva, poměrných nákladů a pořadí najíždění v případě odlišností mezi paralelně spolupracujícími turbosoustrojími.

Z rovnic (1), (3) lze jednoduše vyjádřit měrná spotřeba páry protitlakového soustrojí  $d_p$  a měrná spotřeba tepla připadající na elektrický výkon protitlakového soustrojí  $q_{pe}$ .

$$d_p = D_p / P_P = 1 / \Delta i_p \eta_{em} \quad (\text{kg/kJ}) \quad (9)$$

$$q_{pe} = d_p \Delta i_p = 1 / \eta_{em} \quad (-) \quad (10)$$

Celková spotřeba tepla turbosoustrojí  $Q_{Tp}$  lze vyjádřit vztahem (9), který popisuje **vnější charakteristiku** turbosoustrojí

$$Q_{Tp} = Q_{Te0} + q_p P_P + Q_P \quad (\text{MW}) \quad (11)$$

kde  $Q_{Te0}$  je spotřeba tepla naprázdno připadající na elektrický výkon (MW),  $q_p$  je měrná spotřeba tepla připadající na elektrický výkon zmenšená o elektromechanické ztráty běhu naprázdno,  $P_P$  je svorkový elektrický výkon (MW),  $Q_P$  je protitlakový tepelný výkon (MW).

Hodnotu  $q_p$  lze získat ze znalosti elektromechanické účinnosti turbosoustrojí  $\eta_{em}$  a spotřeby tepla naprázdno na elektrický výkon  $Q_{Te0}$

$$q_p = 1 / \eta_{em} - q_{Te0} \quad (-) \quad (12)$$

$$q_{Te0} = Q_{Te0} / P_{Pn} \quad (-) \quad (13)$$

kde  $P_{Pn}$  je jmenovitý výkon na svorkách alternátoru,  $q_{Te0}$  je měrná spotřeba tepla na elektrický výkon při běhu naprázdno.

Pro návrh turbosoustrojí a jeho provozování se dále často uvádí **vnitřní charakteristika**, která udává závislost mezi elektrickým výkonem  $P_P$  a dodávaným tepelným výkonem  $Q_{Tc} \approx Q_P$

$$Q_P = Q_{Tc0} + \frac{Q_{Pn} - Q_{Tc0}}{P_{Pn}} P_P \quad (-) \quad (14)$$

kde  $Q_{Pn}$  je jmenovitý tepelný výkon dodávaný turbosoustrojím (MW),  $Q_{Tc0}$  je tepelný výkon naprázdno (MW).

Ze vztahů (7) a (11) lze vyjádřit tepelný výkon odpovídající elektrickému výkonu turbosoustrojí

$$Q_{Te} = Q_{Tp} - Q_{Tc} = Q_{Te0} + q_p P_p \quad (\text{MW}) \quad (15)$$

- b) Charakteristiky poměrných přírůstků  $\frac{dQ_T}{dP_t} = f'(P_t)$  sloužící k rozdělování zatížení mezi paralelně spolupracující soustrojí. Běžně se využívají jako vstupní data pro optimalizaci.

Jelikož je charakteristika poměrného přírůstku spotřeby tepla  $c_{Tp}$  derivací  $Q_{Tp}$ , lze ji vyjádřit derivováním vztahu (7) kde za  $Q_{Tc}$  dosadíme (14) a za  $Q_{Te}$  (15). Výsledný vztah má tvar

$$c_{Tp} = \left( \frac{1}{\eta_{em}} - \frac{Q_{Te0}}{P_{Pn}} \right) + \left( \frac{Q_{Pn} - Q_{Tc0}}{P_{Pn}} \right) \quad (-) \quad (16)$$

$$c_{Te} = \left( \frac{1}{\eta_{em}} - \frac{Q_{Te0}}{P_{Pn}} \right) \quad (-) \quad (17)$$

$$c_{Tc} = \left( \frac{Q_{Pn} - Q_{Tc0}}{P_{Pn}} \right) \quad (-) \quad (18)$$

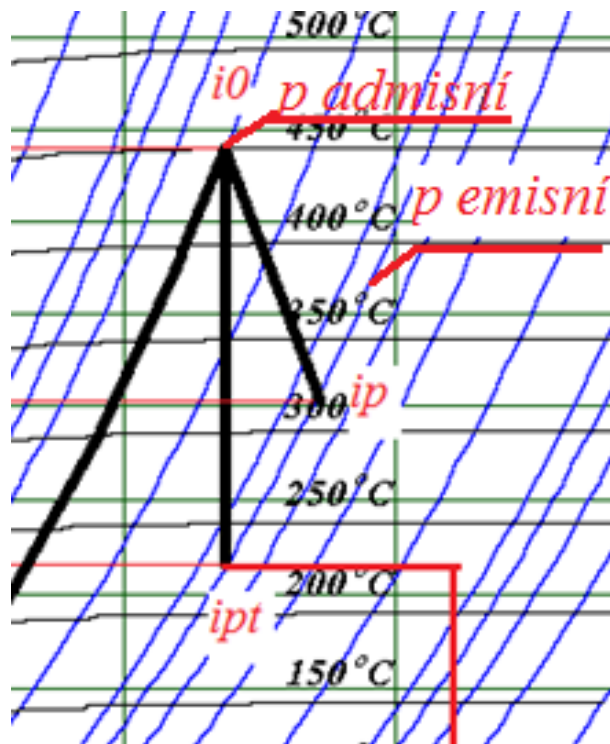
kde  $c_{Te}$  je poměrný přírůstek tepla na elektrický výkon a  $c_{Tc}$  je poměrný přírůstek spotřeby tepla na tepelný výkon.

Vztahy uvedené v této části práce umožňují dopočítat potřebné parametry pro návrh protitlakového turbosoustrojí z běžně uváděných parametrů. Tento soubor vztahů je potřeba dále doplnit o výpočet maximální hltnosti turbíny. Maximální hltnost turbíny se určí následovně

$$D_{pn} = \frac{P_{Pn}}{\eta_{em} \eta_i (i_0 - i_{pt})} \quad (\text{kg/s}) \quad (19)$$

kde  $Q_{Tcn}$  je jmenovitý tepelný příkon (kW),  $i_0$  je jmenovitá entalpie admisní páry (kJ/kg) určená jmenovitým admisním tlakem a teplotou,  $i_{pt}$  je jmenovitá entalpie emisní páry při  $\eta_i = 1$  (kJ/kg) určená jmenovitým emisním tlakem,  $i_p$  je jmenovitá entalpie emisní páry reálné turbíny (kJ/kg),  $\eta_i$  je termodynamická účinnost turbíny.

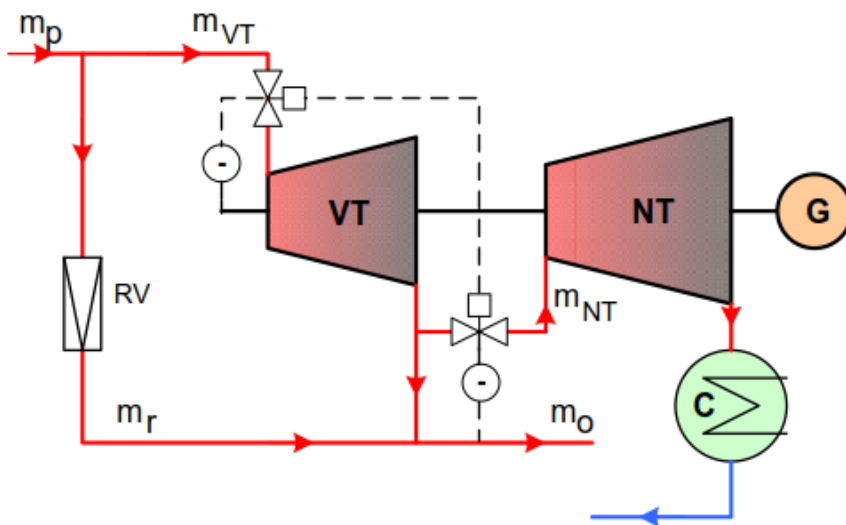




Obr. 2 Postup určení emisní entalpie, nejprve se odečte z *i-s* diagramu entalpie pro  $\eta_i = 1$ , skutečný spád odpovídá násobku  $\eta_i$  a odečteného spádu.

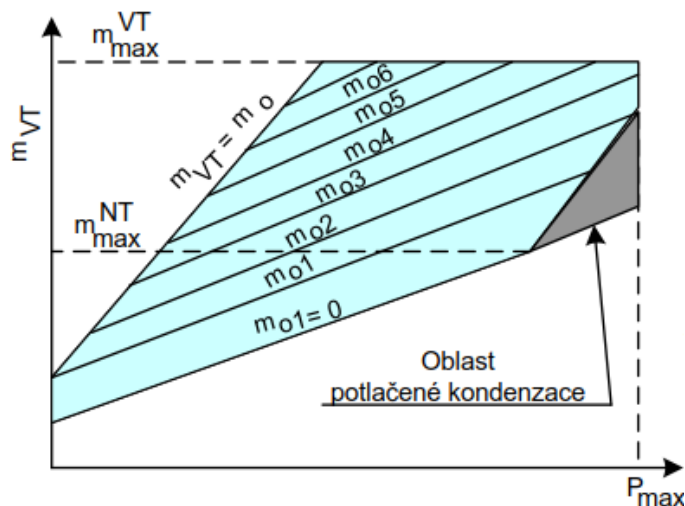
## 2.2 Parní turbíny kondenzační odběrové

Kondenzační odběrové turbíny umožňují stejně jako turbíny protitlakové, současnou výrobu elektrické energie a dodávku energie tepelné. Konstrukčně se odběrové turbíny liší tím, že mají nízkotlakou část turbíny a na jejím výstupu kondenzátor umožňující kondenzační provoz při malých průtocích. Na rozdíl od turbíny protitlakové, umožňuje zapojení odběrové turbíny vzájemnou nezávislost mezi dodávkou tepla a elektrickým výkonem, a to v závislosti na výkonu kondenzátoru a hltnosti nízkotlakého dílu turbíny ve velmi širokém pásmu. Plný výkon turbíny však nelze dosáhnout při kondenzačním provozu, protože nízkotlaký díl bývá dimenzovaný na menší průtok páry. Odběrové turbíny bývají vybaveny několika odběrovými místy, která mohou být regulovaná nebo neregulovaná. Regulované odběry se používají v případě potřeby páry o nižším než výstupním tlaku, typicky tedy pro vytopné nebo technologické účely. Neregulované odběry páry jsou typické pro elektrárenský provoz pro napájení regeneračních ohříváků. Typické zapojení odběrové turbíny je znázorněno na **Obr. 3**. Toto zapojení umožňuje jak změnu odebíraného tepla zvýšením hmotnostního toku  $m_0$  při konstantním výkonu turbíny na spojce a konstantním tlaku v parovodu, tak změnu výkonu turbíny na spojce při zachování konstantního tlaku v parovodu a konstantního hmotnostního toku  $m_0$ .



Obr. 3 Schéma zapojení odběrové turbíny v elektrárenském provozu. [2]

Ideální spotřební charakteristika typické odběrové turbíny, která je dimenzována pro teplárenský nebo průmyslový provoz a má tedy nízkotlaký díl o menší hltnosti než vysokotlaký, je znázorněna na obr. 3. Skutečný diagram není přímkový vlivem změny vnitřní termodynamické účinnosti a tepelné účinnosti v závislosti se změnou zatížení. Diagram je součástí dokumentace k příslušné turbíně. Z diagramu je patrné, že při čistě kondenzačním provozu nelze dosáhnout maximálního výkonu. Lze dosáhnout pouze výkonu, který odpovídá  $m_{\max}$  NT což je maximální hmotnostní průtok nízkotlakou částí turbíny.



Obr. 4 Ideální spotřební diagram odběrové turbíny.[2]

Technické celky s odběrovými a kondenzačně-odběrovými turbínami jsou obecně mnohem složitější než celek s protitlakovou turbínou a jsou typické spíše pro elektrárenské provozy a komunální zásobování teplem. V průmyslových provozech svoje uplatnění nenachází.

## 2.3 Regulace parních turbín v elektrárenském provozu

Elektrická energie má tu vlastnost, že ji nelze v reálné elektrizační soustavě v dostatečném množství akumulovat. Z absence akumulárního členu v soustavě pak plyne, že spojkový výkon<sup>6</sup> na hřídelích turbín, snížený o účinnost generátorů, se musí rovnat elektrickému výkonu odebíranému ze soustavy. V reálném provozu umožňuje zpoždění v regulaci výkonu turbíny, velký moment setrvačnosti soustrojí turbína-generátor. Přebytkový výkon zvyšuje energii rotujících hmot, přírůstek energie se projevuje jako zvýšení úhlové rychlosti soustrojí. To vede k nežádoucí změně frekvence v elektrizační soustavě. Tyto změny jsou však utlumeny nejen zvýšením energie na daném soustrojí, ale také propojeností elektrizační soustavy. Propojení má za následek růst frekvence v celé soustavě což je analogické roztáčení soustrojí v celé soustavě. Z těchto důvodů je provoz turbíny, jako zdroje mechanického výkonu pro výrobu elektrické energie specifický tím, že otáčky turbíny jsou téměř nezávislé na změně jejího mechanického výkonu. Pokud se zanedbají nepatrné změny frekvence, pro standardní situace v soustavě platí, že výkon turbíny  $P_t$  je přímo úměrný momentu turbíny  $M_t$ . Možnosti změny výkonu (momentu) turbíny jsou patrné z výkonové rovnice turbíny:

$$k M_t \sim P_t = M_p \cdot I_{ad} \cdot \eta_{td} \quad (20)$$

kde  $k$  je konstanta 314 (rad/s),  $M_t$  je mechanický moment (Nm),  $P_t$  vnitřní mechanický výkon turbíny,  $M_p$  hmotnostní tok páry do turbíny (kg/s),  $I_{ad}$  entalpický spád adiabatické expanze (kJ/kg),  $\eta_{td}$  termodynamická účinnost turbíny (-).

Z rovnice (20) je patrné, že výkon je závislý na dvou proměnných, kterými jsou hmotnostní tok páry a entalpický spád. Regulace hmotnostního toku páry se jeví na první pohled jako ideální způsob regulace výkonu, v dalších částech však bude vysvětlen vliv omezování hmotnostního toku páry na termodynamickou účinnost turbíny. Změna entalpického spádu je realizovatelná změnou admisního tlaku, admisní teploty a výstupním tlakem. Proto je regulace změnou entalpického spádu vždy doprovázena změnou tepelné účinnosti cyklu. Vedlejším efektem změny admisního a výstupního tlaku je také pokles hmotnostního průtoku páry. Výkon je dále závislý na termodynamické účinnosti turbíny. Termodynamická účinnost turbíny je charakteristickou vlastností daného konstrukčního provedení turbíny a určuje dokonalost expanze páry v turbíně. Termodynamická účinnost 100 % by znamenala dokonalou adiabatickou expanzi. Pro reálné turbíny platí, že termodynamická účinnost je funkcí objemového toku páry a klesá s jeho poklesem. Moderní turbíny dosahují termodynamické účinnosti až 95 %.

### 2.3.1 Regulace škrcením

Regulace škrcením je nejjednodušší způsob regulace výkonu turbíny, který se používal už u parních strojů, kde byl realizován pomocí Wattova regulátoru. Jedná se o provozně

---

<sup>6</sup> Spojkový výkon turbíny je roven vnitřnímu výkonu turbíny sníženému o mechanické ztráty turbíny. Běžně bývá mechanická účinnost turbín mezi 97 až 99,5 %.

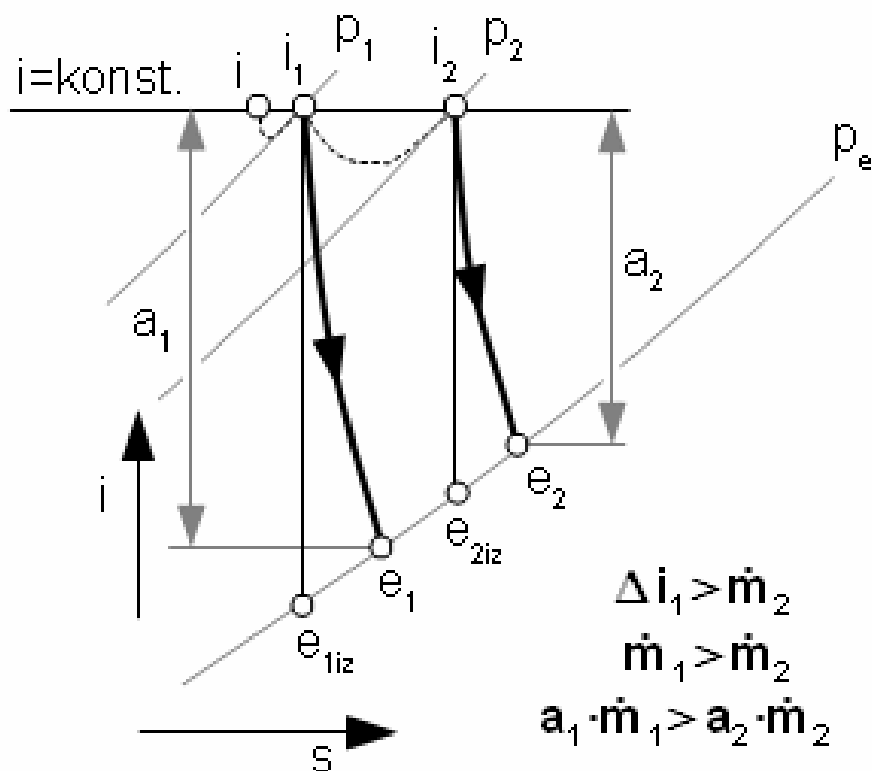
spolehlivý a investičně jednoduchý způsob regulace. Při tomto způsobu regulace má výstupní pára z kotle konstantní parametry. Parametry páry se mění až v armaturách přivádějících páru do turbíny. Podstatou škrcení je expanze páry v armaturách bez konání vnější práce. Jedná o izoentalpický děj, při kterém klesá teplota a roste entropie. Nárůst entropie má při zachování výstupního tlaku turbíny za následek snížení využitelného entalpického spádu, tedy měrné vnitřní práce. Tento pokles vede podle rovnice (20) ke snížení výkonu turbíny. Změna entalpického spádu má za následek pokles tepelné účinnosti oběhu. Proto se také regulace škrcením nazývá regulací *kvalitativní*. Pokles vstupního tlaku páry vyvolá také snížení průtoku páry, ten lze s dostatečnou přesností vyjádřit ze vztahu:

$$\left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 = \frac{p_2^2 - p_e^2}{p_1^2 - p_e^2} \cdot \frac{T_1^2}{T_2^2} \quad (21)$$

kde  $M_1$  je hmotnostní tok (kg/s) před změnou tlaku,  $M_2$  hmotnostní tok (kg/s) po změně tlaku,  $p_e$  tlak na výstupu z turbíny (pro kondenzační provoz je tlak  $p_e \approx 0$  a lze zanedbat),  $p_1$  vstupní tlak páry před škrcením (MPa),  $p_2$  tlak po škrcení (MPa),  $T_1$  teplota páry před škrcením,  $T_2$  teplota páry po škrcením.

*Z i-s diagramu je patrné, že při škrcení z vyšších tlakových úrovní jsou izotermy téměř rovnoběžné s izoentalpami, pak platí, že  $T_1 \approx T_2$  a zlomek s podílem teplot lze ze vztahu (21) vynechat. Tato skutečnost je příčinou malých změn termodynamické účinnosti viz kapitola 1.3.2.*

Z i-s diagramu na **Obr. 2** je patrné, že při stejném výstupním tlaku je na konci expanze pára s vyšší entalpií, proto může vzrůstat potřeba odvodu tepla. Zvýšená potřeba odvodu tepla má za následek zvyšování vlastní spotřeby. Celkově je tedy regulace škrcením nevhodná, a proto se používá u elektráren malých výkonů, jako pohon pomocných zařízení v elektrárně. U kombinované výroby však může být při zajištěném odběru tepla regulace škrcením výhodná, investiční náklady jsou nejnižší možné a ekonomická ztráta při regulaci je dána pouze rozdílem ceny za MWh elektrické a tepelné energie.



Obr. 5 Změna parametrů páry na vstupu turbíny při škrcení,  $a_1$  je entalpický spád ( $J \cdot kg^{-1}$ ) při tlaku  $p_1$  (MPa),  $a_2$  je entalpický spád ( $J \cdot kg^{-1}$ ) při škrcení vstupní páry na tlak  $p_2$  (MPa). [7]

### 2.3.2 Regulace klouzavým tlakem

Regulace klouzavým tlakem je z termodynamického pohledu turbíny podobná regulaci škrcením, konstrukčně se turbíny pro oba typy regulace neliší. Principiálně jde o snížení admisního tlaku páry, což má za důsledek snížení entalpického spádu a hmotnostního průtoku páry. Změny tlaku páry se však dosahuje již v parním kotli, změnou výkonu napáječky což má za následek snížení tlaku napájecí vody. Podmínkou pro použití regulace klouzavým tlakem je použití dostatečně "pružného" parogenerátoru. Změna tlaku už v kotli má tu výhodu, že je možné udržovat konstantní teplotu páry, což při regulaci škrcením možné není.

Konstantní teplota admisní páry má pozitivní vliv na termodynamickou účinnost turbíny. Pro tu platí, že  $\eta_i = f(u/c)$ , kde  $u$  je obvodová rychlost lopatky turbíny (m/s) a  $c$  je rychlost proudění (m/s). Pravá strana stavové rovnice (22) je při regulaci klouzavým tlakem konstanta, pak musí platit, že s klesajícím admisním tlakem páry roste měrný objem páry a v důsledku toho je objemový tok páry na vstupu přibližně konstantní. Pro objemový tok platí klasický vztah  $V' = c S$ , kde  $S$  je průtokový průřez = konst. Rychlost proudění je tedy konstantní a v důsledku toho i termodynamická účinnost.

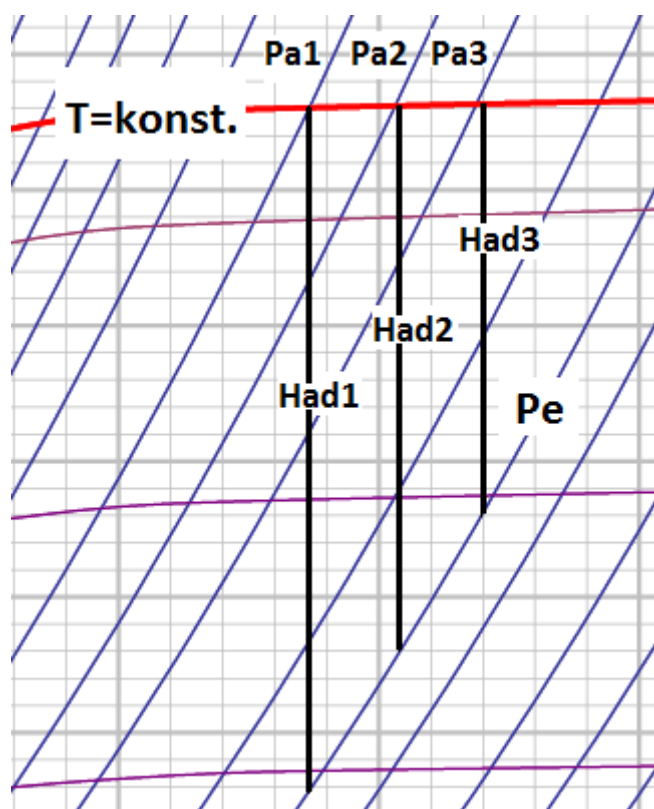
$$p_a \cdot v = r \cdot T_a \quad (22)$$

Kde  $p_a$  je admisní tlak páry (MPa),  $v$  měrný objem ( $m^3/kg$ ),  $r$  plynová konstanta ( $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ ) a  $T_a$  teplota admisní páry  $\approx$  konst. (K).

Následkem konstantního objemového toku je, že termodynamická účinnost se na rozdíl od skupinové regulace při změně zatížení téměř nemění (platí i pro regulaci škrcením, při malých změnách teplot). Pro výpočet změněných podmínek platí pro protitlakovou turbínu s protitlakem  $p_e$  s dostatečnou přesností vztah

$$\left(\frac{M_i}{M_1}\right)^2 = \frac{p_{ai}^2 - p_e^2}{p_{a1}^2 - p_e^2} \quad (23)$$

kde  $M_i$  je hmotnostní tok (kg/s) po změně tlaku z  $p_{a1}$  na tlak  $p_{ai}$ ,  $M_1$  hmotnostní tok při tlaku  $p_{a1}$ . Pro kondenzační provoz platí  $p_e \approx 0$  a ze vzorce vypadne.

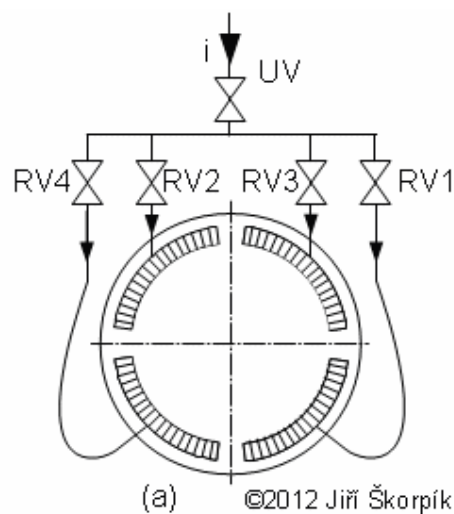


Obr. 6 Změna entalpických spádů při regulaci tlaku admisní páry a konstantní teplotě,  $H_{ad1}$  je entalpický spád ( $J \cdot kg^{-1}$ ) při tlaku  $p_{a1}$  (MPa),  $H_{ad2}$  je entalpický spád ( $J \cdot kg^{-1}$ ) při snížení admisního tlaku na  $p_{a2}$  (MPa).

Regulace klouzavým tlakem je stále více prosazována, a to hlavně u kondenzačních turbín pracujících při velmi vysokých admisních parametrech páry. Změnou admisního tlaku se udržuje požadovaný tlak v kondenzátoru. Další výhodou regulace klouzavým tlakem je značná přetížitelnost turbíny na rozdíl od regulace škrcením, běžně lze přetěžovat o 10 %, omezujícím činitelem je většinou výkon spalovacího zařízení. Nevýhodou proti regulaci škrcením je nižší citlivost regulace. Dále hrozí, že v důsledku nižší entropie než při regulaci škrcením dojde k částečné kondenzaci páry a zvýšenému opotřebením turbíny.

### 2.3.3 Skupinová regulace

Skupinová regulace se také nazývá kvantitativní regulace, jak už název napovídá, principem této regulace výkonu je snížit hmotnostní tok páry do turbíny, termodynamicky výhodnějším způsobem, než je škrcení. Požadavkem je, aby při snížení hmotnostního toku nevznikaly ztráty exergie<sup>7</sup> expanzí ve škrticích armaturách, jako je tomu při regulaci škrcením. To znamená zachování parametrů páry na vstupu do turbíny v co největší možné míře a konstantní výstupní tlak. V souladu s rovnicí kontinuity lze snížení průtoku při zachování tlakových rozdílů docílit pouze zmenšením průtočných průřezů turbíny. Plynulá změna průtokových průřezů je technicky nerealizovatelná, proto se v praxi snížení průtočných průřezů dosahuje po skocích v regulačním stupni, ten je rozdělen do sekcí, jejichž přívody lze zavírat i škrtit.



Obr. 7 schéma zapojení skupinové regulace se čtyřmi regulačními ventily RV.[7]

Pokud nestačí pro požadovanou regulaci sekce pouze zavřít a musí dojít ke škrcení přívodu páry, škrtí se ideálně jen jedna sekce, aby došlo ke znehodnocování páry v co nejmenším množství. Průtok páry turbínou závisí na tlaku  $p_1$  za regulačním stupněm, lze vyjádřit vztahem

$$\left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 = \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{1j}^2 - p_{2j}^2} \quad (24)$$

kde  $M_1$  je hmotnostní tok (kg/s) při tlaku za regulačním stupněm  $p_1$  (MPa) a výstupním tlaku u protitlakového provozu  $p_2$  (pro kondenzační provoz je tlak  $p_2 \approx 0$  a lze zanedbat),  $M_2$  je hmotnostní tok (kg/s) při poklesu tlaku za regulačním stupněm na tlak  $p_{1j}$ .

Velikost tlaku  $p_1$  závisí na velikosti průtočného průřezu, při poklesu průtoku pod výpočtový ekonomický dochází k rychlému růstu tepelného spádu, tím pádem i vyššímu poklesu tlaku  $p_1$  a nižší termodynamické účinnosti regulačního stupně. Stav páry za regulačním stupněm po smíchání, tedy na prvním stupni turbíny, je znázorněn na  $i$ -s diagramu **Obr. 8**

<sup>7</sup> Exergie je část energie, která má potenciál k přeměně na jinou formu energie.





stavu. Rozlišuje se tedy spouštění ze studeného stavu a spouštění po určité době od odstavení kdy je turbína pouze částečně vychladlá. Spouštění ze studeného stavu má tři fáze.

1. Ohřev kondenzující párou, pokud je teplota stěn nižší, než je teplota kondenzace při daném tlaku, dochází při kondenzaci k rychlému ohřevu odebráním skupenského tepla. V této fázi je rozhodující veličinou tlak páry, který určuje teplotu kondenzace. Rotor se smí pouze pootáčet, protože se v turbíně nachází velké množství vody.
2. Ohřev párou, kdy k přestupu tepla dochází pouze konvekcí. Ohřev je pomalý, postupně se zvyšuje tlak a dochází k urychlení na jmenovité otáčky, při jejich dosažení je stroj nafázován na síť.
3. Ohřívání turbíny při zatěžování. Při zvyšování výkonu stoupá tlak, teplota a rychlost páry v turbíně. Následkem je zvyšování součinitele přestupu tepla, proto je pro rychlost ohřívání rozhodující rychlost zatěžování.

Jednotlivé fáze se liší podle protitlaku a počátečního stavu. Kondenzační turbína může být spouštěna při téměř potlačené 1. fázi, ale pak musí být pomalu zatěžována. Protitlaková turbína musí být nejdříve prohřívána, až po dosažení teploty sytosti při daném protitlaku, kdy lze zvyšovat otáčky až po jmenovité. Pak může být relativně rychle zatížena. Při spouštění je výhodné spouštění s klouzavými parametry páry, které dovoluje zcela plynule zvyšovat otáčky turbíny.

Počáteční stav spouštění závisí vždy době odstavení turbíny, výrobce dodává průběhy teplot turbíny závislé na čase po odstavení. Podle míry vychladnutí je pak možné upravit průběh spouštění. Po krátké době odstavení, kdy mají všechny části ještě teplotu blízkou provozní (do 3 h u středních turbín) je běžné, že se provádí opětovné spouštění velmi rychle, v takových případech je to dokonce žádoucí, při malém průtoku jsou větší tepelné spády na jednotlivých stupních a turbína by se pomalým spouštěním spíše ochlazovala. V intervalu 3 až 18 h u středních turbín, se projevuje chladnutí hlavně u parovodů, elektrického generátoru a v případě odstaveného kotle i stěny kotle. Při delší době po odstavení už, se musí respektovat i prochladnutí turbíny. V obecném případě platí, že spouštění je rychlejší, čím má turbína méně stupňů, tedy větší tepelný spád na stupeň, díky němuž se rychleji zahřívá, následkem je však pokles vnitřní termodynamické účinnosti. Rychlejší spouštění umožňují také turbíny s většími vůlemi, pak nehrozí při nesprávném prohřátí škrtnutí rotoru o stator v takové míře. Dalším technickým řešením je odlehčování rotoru a vývrty pro rychlejší ohřev. Doba spouštění ze studeného stavu také samozřejmě klesá s klesající velikostí turbíny, tedy její menší kapacitou. Pro spouštění krátce po odstavení, jsou naopak výhodou velké rozměry, které znamenají velkou tepelnou kapacitu a malou ochlazenou plochu.

## 2.4.2 Odstavování parní turbíny

Při odstavování parní turbíny se rozlišují dva základní způsoby, a to provozní odstavování na jednotky hodin s předpokládaným opětovným spouštěním. V takovém případě je výhodné provést odstavení tak aby turbína co nejméně vychladla a aby jí bylo možné co nejrychleji spustit. Druhým případem je odstavování za účelem odstávky turbíny pro provádění servisních prací. V tomto případě je žádoucí, aby se turbína

ochladila co nejvíce už při odstavování. Pro odstavování s plánovaným brzkým spouštěním je výhodné, když může kotel pracovat s klouzavým tlakem. Pokud je taková možnost, pak se odstavení provádí snížením vstupního tlaku při konstantní teplotě a při asi 20 až 25 %  $P_j$  se vypne přívod páry rychlozávěrem. Tím zůstanou v turbíně zachovány teplotní stavy vhodné pro opětovné spuštění. Pokud je turbína dobře zaizolovaná dá se očekávat, že v intervalu 3 až 18 hodin vychladly pouze přívodní parovody, armatury a elektrický generátor. Vychladnutí těchto částí však nijak výrazně nezpomaluje proces opětovného spouštění.

## 2.5 Plynové parní kotle

Parním kotlem je nazýván soubor zařízení určených k výrobě vodní páry o tlaku vyšším, než je tlak atmosférický. Hlavními součástmi tohoto souboru jsou vždy parogenerátor, spalovací zařízení a komponenty nezbytné pro funkci spalovacího zařízení. Použití parních kotlů může být pro technologické, otopné nebo energetické účely. Podle použití jsou pak kladeny konkrétní požadavky na parametry admisní páry a regulační "pružnost". Výkon může být regulován na rozdíl od horkovodních kotlů třemi veličinami a to, teplotou admisní páry a tlakem od něž se odvíjí hmotnostní průtok páry. Parametry těchto veličin pak určují použití daného parního kotle. Dalším kritériem pro volbu parního kotle je použité palivo. Jelikož se tato práce zabývá využitím plynových parních kotlů pro technologické a energetické účely, budou zde rozebrány pouze kotle určené pro spalování zemního plynu s pracovním tlakem dosahujícím alespoň 1,6 MPa. Takové kotle se v současné době realizují ve dvou variantách, a to jako *kotle velkoprostorové* a *kotle vodotrubné*, podle konstrukce výparníku kotle. Dále se mohou lišit způsobem proudění vody ve výparníku a to na kotle s přirozenou nebo nucenou cirkulací. Charakteristickou vlastností plynových kotlů je nenáročná palivová hospodárství, snadná a rychlá regulace výkonu hořáku. Pro plynové hořáky je navíc charakteristikou vlastností vysoká rychlost spalin, která zapříčiňuje velmi rychlý přestup tepla na ploše výměníků. To vede k velmi dobrým dynamickým vlastnostem. Další výraznou výhodou je jednoduchost najíždění oproti kotlům na pevná paliva, ty se většinou neobejdou bez najíždění kapalným nebo plynným palivem což tento proces na rozdíl od kotlů plynových prodražuje.

### 2.5.1 Základní parametry parních kotlů

Pro základní návrh kotle jsou rozhodující základní parametry parních kotlů, rozlišuje je norma ČSN 07 0010, která zároveň definuje jejich názvosloví.

Jmenovitý výkon kotle (kg/s), (t/h) – je výkon, který musí kotel trvale dodávat při dodržení jednotlivých hodnot základních parametrů. Jmenovité výkony jsou doporučeny touto normou.

Základní parametry kotle – jsou tlak přehřáté páry, teplota přehřáté páry, teplota přihřáté páry, teplota napájecí vody, tlak syté páry (u kotlů vyrábějících sytou páru).

Tlak přehřáté páry (MPa) – je tlak páry na výstupu z kotle, který se měří před hlavním uzávěrem. Pokud není hlavní uzávěr, tlak se měří na výstupu z tlakové části kotlů.

Teplota přihřáté páry (°C) – je teplota na výstupu z přihříváku

Teplota přehřáté páry (°C) – je teplota na výstupu přehříváku (kotle), která se měří na stejném místě jako tlak přehřáté páry

Teplota napájecí vody (°C) – je teplota vody před místem vstupu do kotle

Jmenovitými parametry se rozumí hodnoty základních parametrů určené k udržování při trvalém provozu kotle.

## 2.5.2 Prvky parní části kotle

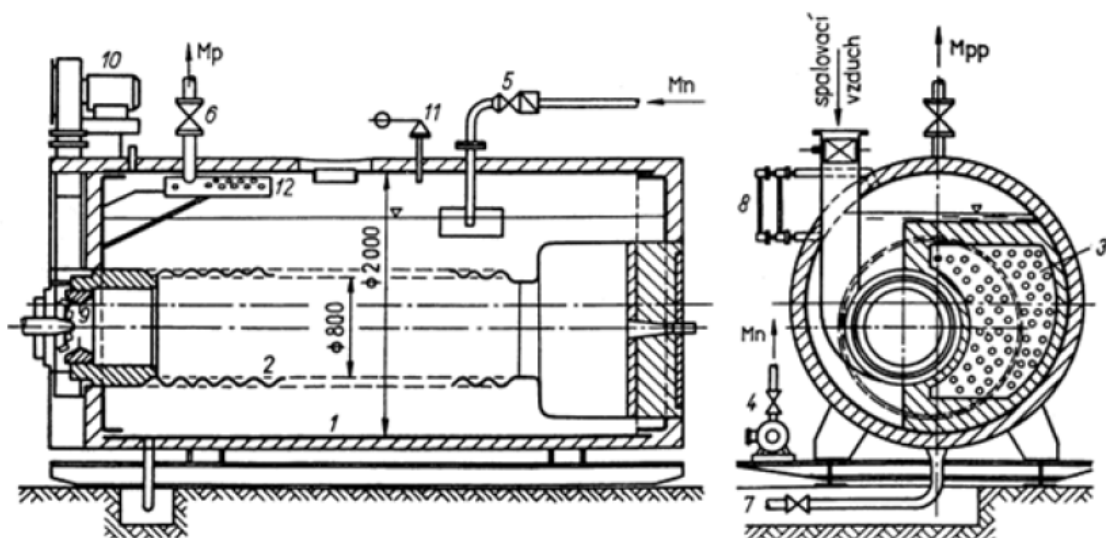
- **Ohřívák vody (ekomomizér)** je výměník posazený v nejvyšší části kotle, nebo v části se spaliny o nejnižší teplotě. V ohříváku dochází k předávání tepla téměř výhradně konvekcí, protože spaliny v této části kotle mají nízkou teplotu. Většinou má ohřívák více sekcí, s malým  $\Delta T$  pro co nejnižší růst entropie.
- **Výparník** kotle je výměníková část, v níž se přivedeným teplem vypařuje voda a vzniká sytá pára<sup>8</sup>. U vodotrubných kotlů je tato plocha provedena jako obvodové stěny spalovací komory. K předávání tepla dochází částečně konvekcí a částečně sáláním.
- **Přehřívák** je část kotle, kde dochází k přehřátí syté páry na teplotu vyšší, než odpovídá danému tlaku páry. Přehříváky se konstruují buď jako sálavé, kdy je výměník vyroben z plechů, nebo jako sálavě-konvekční kdy zůstává zachována trubková konstrukce.
- **Napájecí čerpadlo** zastává funkci zásobování parní části kotle vodou a zároveň určuje tlak výstupní páry. Ideálně by mělo být čerpadlo regulováno tak aby udrželo hladinu vody v bubnu, případně tlak u průtočného kotle. V obou případech to znamená stejný hmotnostní tok napájecí vody a výstupní páry z kotle. Při správné regulaci dochází v kotli k ideálnímu isobarickému ohřevu.
- **Cirkulační čerpadlo** zajišťuje proudění vody ve výparníku. U průtočných kotlů zastává jeho funkci čerpadlo napájecí.

## 2.5.3 Velkoprostorové kotle

Velkoprostorové kotle se vyznačují velkým *akumulačním číslem*<sup>9</sup>  $T_a = m_{kv} / M_p$  (10–20 h), to je dáno jednak relativně malou teplosměnnou plochou v poměru k množství vody a také velmi malými průtočnými rychlostmi a z toho plynoucím nízkým součinitelem přestupu tepla  $\alpha$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Z toho plynou výhody jako např. nízké kolísání tlaku i při náhlých velkých odběrech a necitlivost na kvalitu napájecí vody. Voda pro tyto kotle se většinou pouze filtruje, usazený vodní kámen lze snadno mechanicky odstranit. Jedná se o konstrukčně jednoduché kotle, umožňující využití nízkolegovaných ocelí se snadnou údržbou. Tato konstrukce má však mnoho nevýhod např. malá výkonost vzhledem k rozměrům kotle, vlivem velkých rozměrů nízká pevnost což vede k malým dosažitelným tlakům admisní páry (do 1,6 MPa), malými možnostmi přehřívání, nízkou “pružností” regulace, pomalým najížděním a z toho plynoucími tepelnými ztrátami. Pro se v dnešní době používají v daleko menší míře než kotle vodotrubné, jediný používaný typ velkoprostorového kotle je v současné době kotel plamencový žárotrubný **Obr. 9**.

<sup>8</sup> Pára bez podílu vodní složky, tzn. o suchosti  $x = 1$

<sup>9</sup> Poměr hmotnosti kotelní vody  $m_{kv}$  (t) a jmenovitého výkonu kotle (t / h)



1 - buben, 2 - plamenec, 3 - žárové trubky, 4 - napáječka, 5 - napájecí hlava, 6 - hlavní uzavírací ventil, 7 - odkalovací ventil, 8 - vodoznak, 9 - hořák, 10 - vzdchový ventilátor, 11 - pojistný ventil, 12 - parní sběrací trubka s oddělováním vlhkosti

Obr. 9 Velkoprostorový plamencový žárotrubný kotel [12]

## 2.5.4 Vodotrubné kotle

Vodotrubné kotle umožňují konstruovat kotle o základních parametrech ve velmi širokém rozsahu. Typicky o jmenovitých výkonech od nejmenších až po tisíce t/h a pro tlaky od atmosférického až po nadkritické. Běžně je lze kombinovat se spalovacími zařízeními pro všechny typy paliv. Mají typicky nízká akumulční čísla  $T_a$ , řádově desítky minut. Tato vlastnost je činí citlivé na kvalitu napájecí vody a kolísání tlaku při změně zatížení. Konstruují se tak, aby v nich pára a voda proudili jedním směrem, což zvyšuje součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , to má pozitivní vliv na velikost a chlazení kotle. Dále je výrazně zlepšen odvod páry z kotle a dochází ke snížení vzniku usazenin. Vodotrubné kotle se dělí podle způsobu proudění vody a parovodní směsi ve výparníku na kotle bubnové s přirozenou cirkulací<sup>10</sup>, bubnové s nuceným oběhem (povzbuzenou cirkulací) a kotle průtočné, které se vyznačují velmi dobrou pružností regulace.

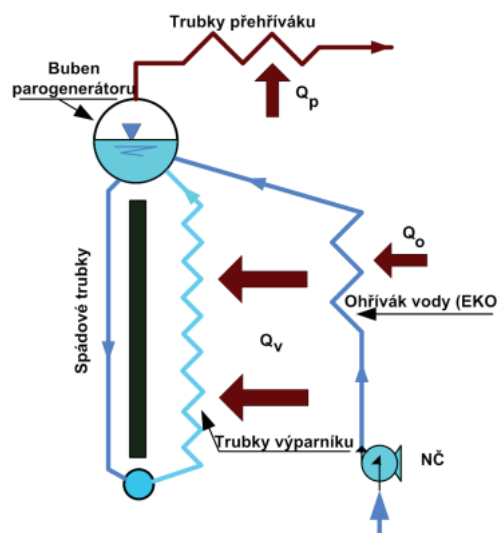
Základním konstrukčním prvkem jsou trubky, které tvoří výměňkové části kotle. Voda a pára proudí vždy uvnitř trubek, přičemž spaliny proudí zvnějšku. K přestupu tepla dochází skrz stěnu trubky, z tohoto důvodu je hlavním konstrukčním parametrem výměňkové části vnitřní a vnější průměr trubky. Menší průměr zajišťuje lepší součinitele přestupu tepla vlivem vyšších průtočných rychlostí a větší plochy na jednotku objemu. S klesajícím průměrem trubky však rostou požadavky na kvalitu vody. To může být nevýhoda u průmyslových podniků.

<sup>10</sup> Přirozená cirkulace je důsledkem rozdílu tíhy vodního sloupce ve spádových trubkách a sloupce mokré až suché páry ve výparníku.

### 2.5.4.1 Bubnové kotle s přirozenou cirkulací ve výparníku

Kotle s přirozenou cirkulací vody ve výparníku se vyznačují značně zjednodušenou konstrukcí oproti kotlům s nuceným oběhem. Cirkulace vody ve výparníku je vyvozována rozdílem hustoty v neotápěných spádových trubkách. To však znamená, že nelze stavět kotle pro vysoký jmenovitý tlak páry, protože s rostoucím tlakem klesá rozdíl hustot, při nadkritickém tlaku dokonce odpadá stav mokré páry, rozdíl hustot je tedy nulový. Tato skutečnost by vedla k neakceptovatelnému zvyšování výšky spalovací komory pro získání dostatečného tlakového rozdílu.

Charakteristickými vlastnostmi výparníku bubnového kotle s přirozenou cirkulací je, že dochází k přerušení proudění ve výparníku parním bubnem, který plní funkci separátoru vody a páry. V bubnu je tedy vždy přítomno rozhraní mezi vroucí vodou a sytou párou. Hladina vody je důležitou regulační veličinou, přesto však nehrozí výpadek výroby při krátkodobém výpadku napájecího čerpadla. Přirozená cirkulace vody ve výparníku zajišťuje chlazení varnic a trvalé vyrovnávání chemického složení kotelní vody ve spádových a varných trubkách a umožňuje snadný odluh<sup>11</sup> kotle, udržující koncentraci solí v kotelní vodě v daných mezích. Kotel se snadno reguluje, protože jsou jasně dány hranice ekonomizéru výparníku a přehříváku, nemění se s výkonem. Výparník kotle s přirozenou cirkulací se skládá z bubnu parogenerátoru, kde dochází k odloučení páry od vody. Dále plní funkci akumulárního prvku a to jak tepla, tak vody. Proto může dodávat po určitý čas více páry než by odpovídalo aktuálnímu tepelnému výkonu a hmotnostnímu toku vody.

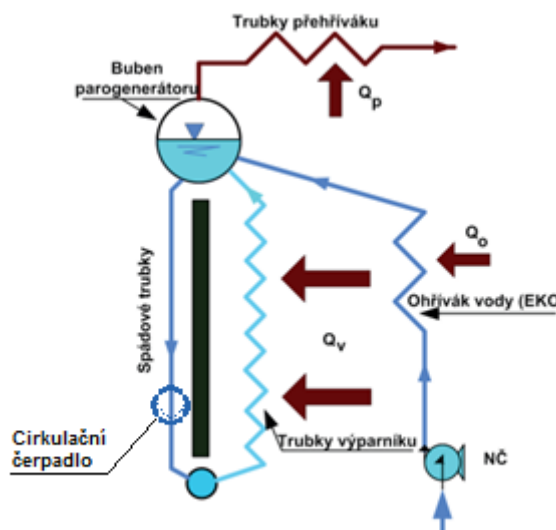


Obr. 10 Schéma parní části vodotrubného kotle s přirozenou cirkulací ve výparníku.[13]

<sup>11</sup> Odvádění nečistotami zahuštěné kotelní vody. Při odluhu dochází k tepelným ztrátám kotle.

### 2.5.4.2 Bubnové kotle s nucenou cirkulací ve výparníku

Bubnové kotle s nucenou cirkulací ve výparníku se od kotlů s přirozenou cirkulací liší pouze přítomností cirkulačního čerpadla, které zajišťuje dostatečný průtok výparníkem. Tato skutečnost umožňuje konstrukci bubnového kotle až pro nadkritické tlaky páry, při kterých již nemůže docházet k přirozené cirkulaci. Dále je umožněno snížit výšku spalovací komory kotle a tím i jeho celkové rozměry



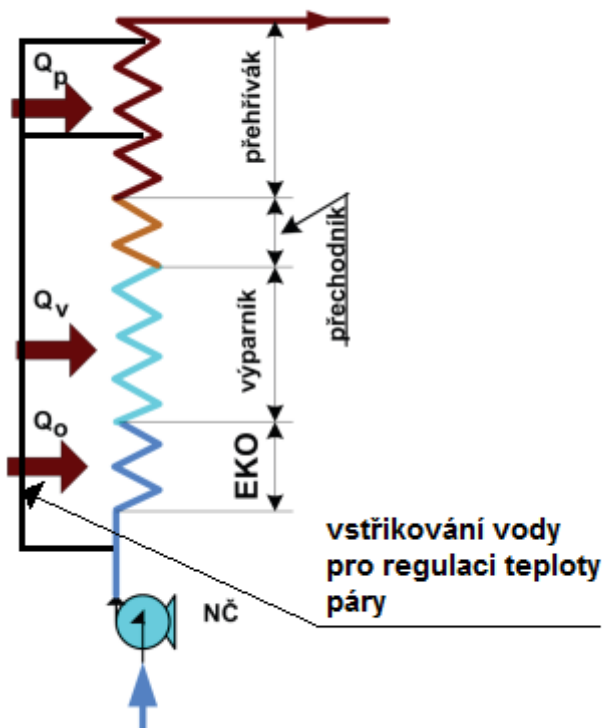
Obr. 11 Schéma parní části vodotrubného kotle s nuceným oběhem ve výparníku. [13]

### 2.5.4.3 Kotle průtočné

Konstrukčně se jedná o soustavu paralelních trubek, které tvoří sériově řazený ohřívák, výparník a přehřívák. Protože odpadá kotelní bublen, nejsou mezi jednotlivými částmi pevné hranice. To má za následek, že při změně výkonu se mění konec odpařování, při snižování výkonu se obvykle posouvá konec odparu směrem ke vstupu kotle. Tento fakt značně zesložituje regulaci výkonu, proto se průtočné kotle mohli rozšířit až s dobře zvládnutou regulační technikou. Průtok a tlak vody je vynucen výstupním tlakem napájecího čerpadla. Běžně se dosahuje vyšších rychlostí proudění, než v kotlích bubnových čemuž odpovídá vyšší součinitel přestupu tepla  $\alpha$  ( $W/m^2.K$ ), to umožňuje vyšší výkon při stejné velikosti oproti kotli bubnovému. Výparník průtočného kole má mnohem menší množství akumulované energie než výparník kotle bubnového, což umožňuje rychlejší změnu výkonu, zároveň však dochází k daleko větší choulostivosti na náhlé změny odběru a různé výpadky. Absence bubnu znamená pro kotel daleko větší choulostivost na demineralizaci napájecí vody, protože není možný odluh za provozu.

Průtočné kotle se většinou konstruují tak, aby byly schopny dodávat páru o požadovaném tlaku při konstantní teplotě páry. To znamená společně s absencí bubnu a z toho plynoucími menšími kapacitami velmi rychlou dobu najíždění celého celku kotel-turbína, pára o požadované teplotě lze odebírat ve velmi krátké době a pouze dochází ke zvyšování tlaku. Takový způsob najíždění je navíc velmi příznivý pro životnost turbíny.

Průtočné kotle se běžně používají v elektrárenských podnicích s kondenzačními turbínami, v průmyslových podnicích s odběrem tepla v páře se z důvodů spolehlivosti a regulace neuplatňují.



Obr. 12 Schéma parní části průtočného kotle, s pohyblivým koncem odpařování a regulací teploty páry vstřikováním vody. [13]

### 2.5.5 Regulace výkonu parních kotlů

Nejpřesnější regulace výkonu kotle je požadována u čistě elektrárenského provozu, protože síť není schopná akumulovat energii ve větším množství. U případě kombinované výroby s komunálním zásobováním tepla nejsou vysoké požadavky na přesnost regulace, protože otopná soustava má velkou tepelnou kapacitu, která změny výkonu vyrovnává. To však platí pouze při dostatečně dimenzované paralelně zapojené redukční stanici, jinak dochází k výše popsanému problému. U průmyslových podniků záleží na charakteru výroby, musí se předem zvážit, zda nemůže dojít k vysokým škodám v případě změny dodávky tepla. V každém případě je však nutné udržovat bilanci přívod/odvod energie dlouhodobě v rovnováze.

Výkon parního kotle je definován jako dodávka okamžitého množství páry (t/h) o požadovaných parametrech páry, jako je tlak a teplota. V případě porušení rovnováhy mezi množstvím odebírané páry spotřebičem a dodávané páry kotlem začne docházet ke změně parametrů páry, zejména tlaku. Pokud dojde k navýšení odběru páry, tlak páry začne klesat a naopak. Tlak páry je ukazatelem zachování rovnováhy mezi odběrem a výrobou. Regulace tlaku je tedy zároveň regulací výkonu kotle, přičemž akční veličinou ovlivňující tlak je přívod tepla do kotle. Jelikož tlak páry je akční veličinou pro výkon

kotle, je možné měnit výkon jak tlakem páry, tak výkonem spotřebiče páry (odebíraným množstvím páry).

Obecně se při regulaci rozlišují základní veličiny, které mají nejvýraznější vliv při provozu na regulaci. Tyto veličiny se dělí na výstupní regulované a k nim jsou přiřazeny vstupní veličiny akční. Akční veličiny jsou veličiny, kterými lze ovlivňovat veličiny výstupní. Jelikož je pro tuto práci zásadní regulace z pohledu spotřebičů, budou vypuštěny veličiny týkající se spalování. Z pohledu spotřebiče jsou podstatné následující akční a regulované veličiny.

#### výstupní regulované veličiny

- $p_p$  - tlak páry za kotlem
- $t_p$  - teplota páry za kotlem
- $h$  - výška hladiny v bubnu

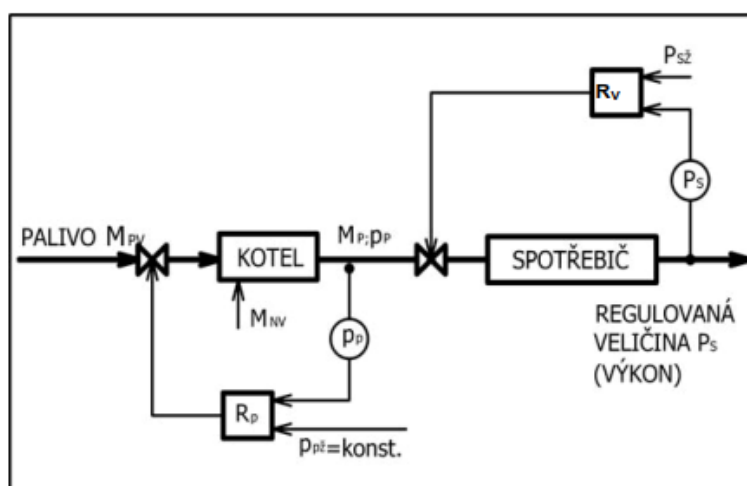
#### vstupní akční veličiny

- $M_{PV}$  - množství přivedeného paliva
- $M_{VS}$  - množství vstříkované vody
- $M_{NV}$  - množství napájecí vody

Jak již bylo zmíněno, výkon kotle závisí na tlaku páry a lze měnit výkonem spotřebiče páry a tlakem páry.

#### a) Regulace na konstantní tlak za kotlem (klasická regulace)

Jedná se o nejrozšířenější typ regulace výkonu parního kotle, schéma je uvedeno na **Obr. 13**. Spotřebič i kotel mají vlastní regulátor. Výkon spotřebiče se reguluje podle žádané hodnoty změnou průtočného průřezu parního ventilu, který je součástí spotřebiče. Regulátor výkonu kotle **RP** mění přívod paliva, tak aby byl udržen konstantní tlak před regulačním ventilem spotřebiče.

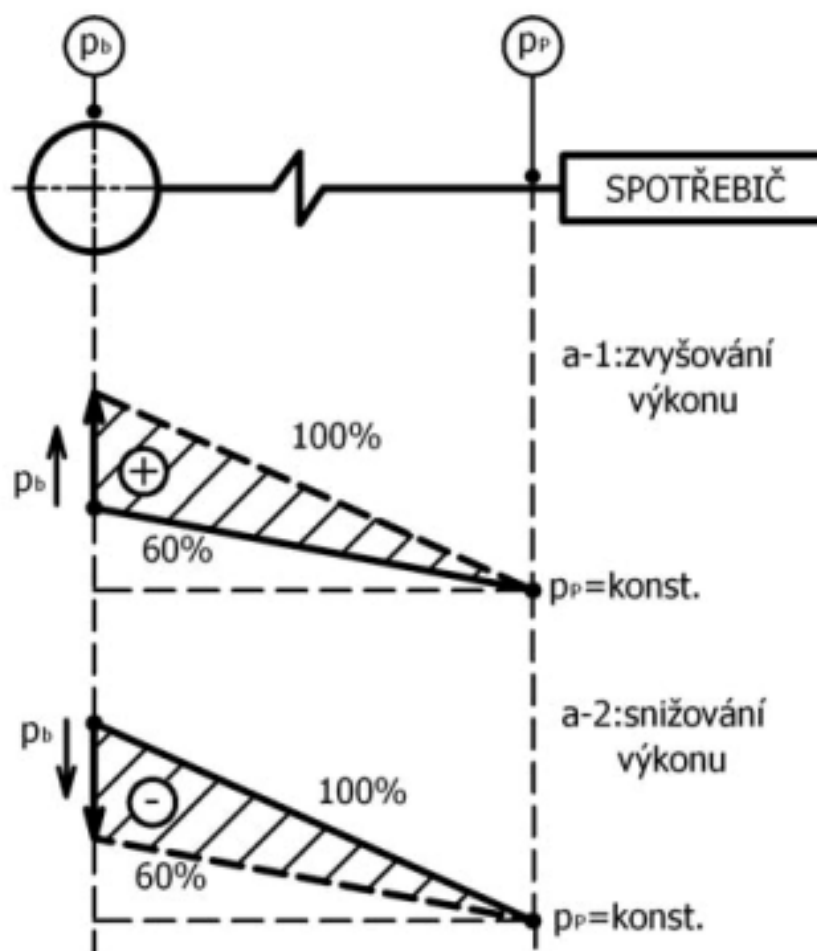


*Obr. 13 Schéma regulačního obvodu kotle s regulací výkonu na konstantní tlak (regulace klasická). [14]*

V případě, že dojde k požadavku na zvýšení výkonu spotřebiče, regulátor **RV** otevře parní ventil. Následuje zvýšení průtoku páry, což má za následek zvýšení tlakových ztrát a nárůstu tlaku v parním bubnu. Vyšší tlak v bubnu znamená vyšší teplotu



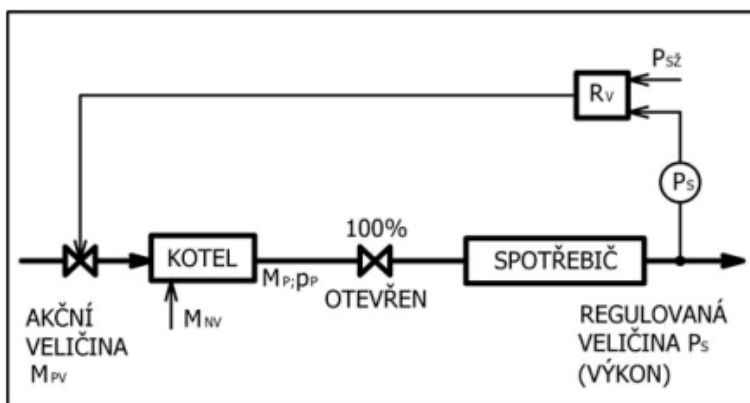
varu a musí dojít k ohřívání vody. Kotel akumuluje energii. Při požadavku na snížení výkonu je děj přesně opačný a dochází k uvolňování akumulované energie. Tyto děje jsou zobrazeny na **Obr. 14**. Tento typ regulace se nejčastěji uplatňuje v teplárnách a umožňuje velmi dobrou dynamiku regulace výkonu spotřebiče.



*Obr. 14 Změna tlaku a akumulované energie, při změně výkonu kotle s regulací na konstantní tlak. Kde  $p_b$  je tlak v bubnu a  $p_p$  je tlak páry za kotlem. [14]*

#### **b) Regulace podle výkonu spotřebiče (regulace klouzavým tlakem)**

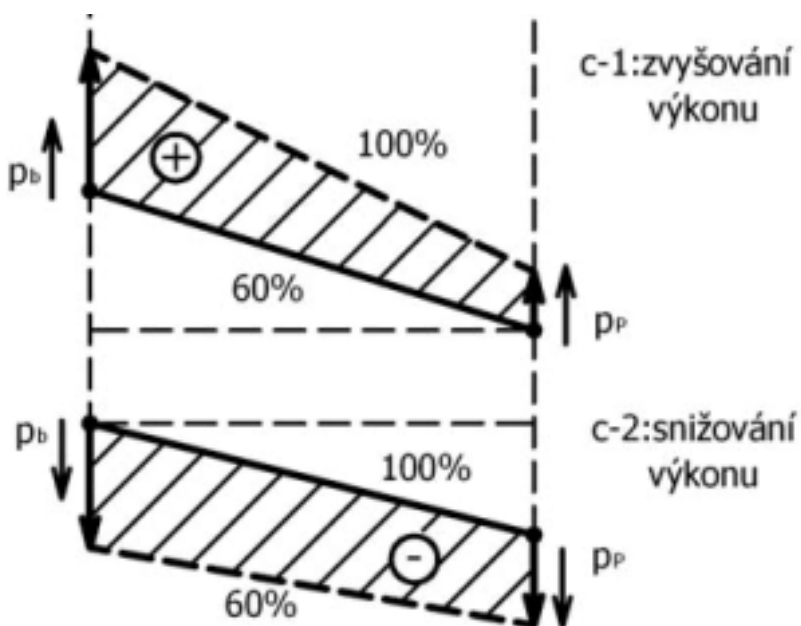
Jedná se o hospodárný způsob regulace, avšak využívaný hlavně v elektrárenském provozu k dosažení požadovaného tlaku v kondenzátoru. Pro teplárenské aplikace nepoužitelný, z důvodů značného kolísání tlaku při změně odběru. Při této regulaci se nastavuje tlak podle výkonu spotřebiče a nemění se výstupní průřez kotle. Soustrojí kotel-turbína je regulováno jedním společným regulátorem **RV**. Přívod paliva se nastavuje na základě odchylky výkonu spotřebiče od požadovaného výkonu, při požadavku na zvýšení výkonu dochází ke zvýšení přísunu paliva.



$R_v$  – regulátor výkonu  $P_{sž}$  – požadovaný výkon  $M_p$  – množství páry za kotlem  
 $P_p$  – tlak páry za kotlem

Obr. 15 Schéma regulačního obvodu kotle s regulací výkonu klouzavým tlakem. [14]

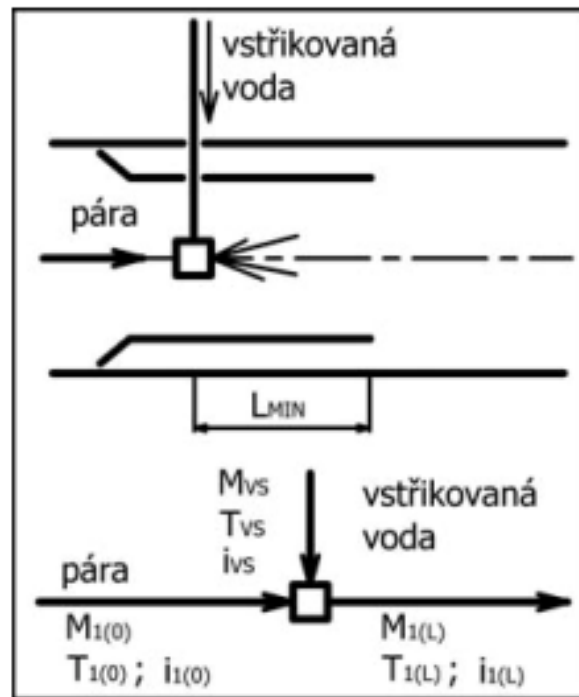
V případě, že dojde k požadavku na zvýšení výkonu spotřebiče, vzroste vlivem vyšších tlakových ztrát tlak v celé parní části, tedy v bubnu kotle i za kotlem. Tím dojde ke zvýšení akumulovaného tepla ve výparníku i v přehříváku. Zvýšení výkonu je vlivem akumulace tepla ve výparníku, ale i v přehříváku velmi pomalé. Regulace s klouzavým tlakem by se tedy měla používat pouze při dostatečně malých akumulacích konstantách parních částí kotle. Průběh akumulované energie při zvyšování výkonu je znázorněn na Obr. 16. Kde  $p_b$  je tlak v bubnu a  $p_p$  je tlak páry za kotlem.



Obr. 16 Změna tlaku a akumulované energie, při změně výkonu kotle s regulací klouzavým tlakem. [14]

## 2.5.6 Regulace teploty páry parního kotle

Mezi nejběžnější způsoby regulace teploty páry patří regulace vstřikem vody při konstantním tlaku ve směšovací výměníku. Jedná se o realizačně nejjednodušší způsob regulace teploty páry. Regulátor pouze mění množství vstřikované vody na základě odchylky skutečné teploty páry od teploty požadované. Tento způsob se používá jak pro regulaci teploty páry na výstupu z přehříváku, tak v redukčních stanicích páry. Předpokladem pro použití tohoto typu regulace je dokonale demineralizovaná voda.

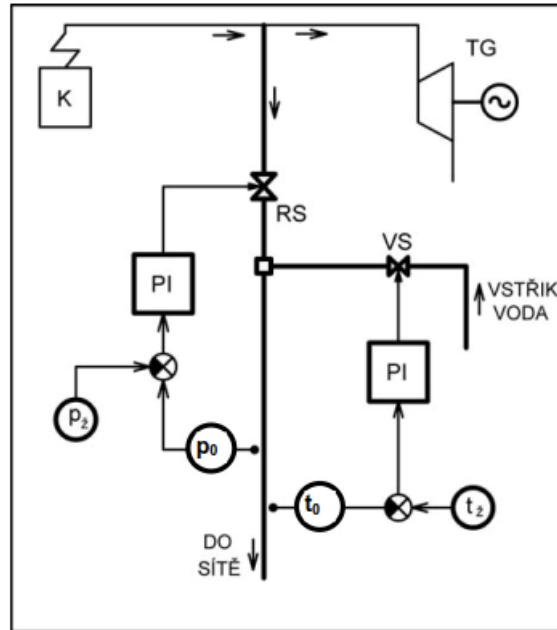


- $L_{MIN}$  - minimální délka vstřiku
- $M_{1(0)} T_{1(0)} i_{1(0)}$  - množství teplota a entalpie před vstřikem
- $M_{1(L)} T_{1(L)} i_{1(L)}$  - množství teplota a entalpie za vstřikem
- $M_{vs} T_{vs} i_{vs}$  - množství teplota a entalpie vstřikované vody

Obr. 17 Směšovací výměník pro regulaci teploty páry. [14]

## 2.5.7 Regulace redukčních stanic pro dodávku páry

V teplotných provozech je požadavkem dosáhnout požadovaného tepelného výkonu a zároveň musí být zajištěna spolehlivost při nestacionárních stavech během provozu. Takové stavy jsou například najíždění kotle, kdy pára nemá dostatečné parametry pro započítání najíždění turbíny, různé výpadky, odstavování turbíny a kotle. Tyto funkce zajišťuje paralelně řazená redukční stanice, často doplněná o vstřikování vody pro regulaci teploty. Běžné zapojení zobrazuje **Obr. 18**. Toto zapojení se používá současně s regulací výkonu kotle na konstantní tlak za kotlem. Regulátor tlaku a regulační ventil **RS** tvoří samostatnou regulační smyčku. Tlak je regulátorem regulován tak, aby byl dodržen požadovaný tlak za kotlem.



Obr. 18 Regulace redukční stanice pro dodávku páry. [14]

## 2.6 Příjmy za energii vyrobenou při kombinované výrobě

Protože KVET snižuje spotřebu primární energie, je považována za ekologický zdroj elektřiny a příjmy za vyrobenou energii jsou dotačně zvýhodněny. V současné době stále běží programy dotací, které podporují jak výstavbu či rekonstrukci KVET, tak samotnou výrobu elektrické energie. Dotace podporující výrobu v ekologických zdrojích energie a zdrojích využívající obnovitelné zdroje, a to jak pro dodávku do sítě, tak pro vlastní spotřebu se nazývá zelený bonus. Zelený bonus je dán zákonem č.165/2012 který nahradil zákon č.180/2005 Sb. o podpoře obnovitelných zdrojů druhotných zdrojů a vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla. Výši zeleného bonusu stanovuje každý rok ERU<sup>12</sup>.

### 2.6.1 Podmínky pro udělení zeleného bonusu KVET

Obecně platí, že zelený bonus pro KVET je poskytován pouze na vysokoúčinnou kombinovanou výrobu. Za vysokoúčinnou kombinovanou výrobu je považována výroba, při které dojde k úspoře minimálně 10 % primární energie oproti oddělené výrobě elektřiny a tepla. Splnění úspory 10% primární energie je základní podmínkou pro možnost získat minimální zelený bonus. Výpočet úspory primární energie je dán přílohou č. 2 vyhlášky č.453/2012 Sb. Úspora primární energie UPE se vypočte podle vztahu (25).

$$UPE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{Q_{U\check{Z}}/Q_{PAL\ KVET}}{\eta_r^V} + \frac{E_{KVET}/Q_{PAL\ KVET}}{\eta_r^T}} \right) * 100 (\%) \quad (25)$$

Kde  $Q_{PAL\ KVET}$  je spotřeba energie v palivu použitém v procesu KVET (MWh),  $Q_{U\check{Z}}$  je množství užitečného tepla (MWh),  $E_{KVET}$  je množství elektřiny z KVET,  $\eta_r^V$  je

<sup>12</sup> Energetický regulační úřad

harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu tepla Tab. 1,  $\eta_r^E$  je výsledná korigovaná harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny Tab. 2

Kategorie	Druh paliva	Rok výstavby						
		Před r. 2016			Od r. 2016			
		Horká voda	Pára (*)	Přímé využití výfukových plynů (**)	Horká voda	Pára (*)	Přímé využití výfukových plynů (**)	
Pevné	S1	Černé uhlí včetně antracitu, bituminózního uhlí, subbituminózního uhlí, koks, polokoks a petrolejový koks	88	83	80	88	83	80
	S2	Lignit, lignitové brikety, břidlicová ropa	86	81	78	86	81	78
	S3	Rašelina, rašelinové brikety	86	81	78	86	81	78
	S4	Suchá biomasa včetně dřeva a jiné pevné biomasy včetně dřevěných pelet a briket, suché dřevní štěpky, čistého a suchého odpadního dřeva, ořechových skořápek a olivových či jiných pecek	86	81	78	86	81	78
	S5	Jiná pevná biomasa včetně veškerého dřeva nezahrnutého do kategorie S4 a černý a hnědý louh	80	75	72	80	75	72
	S6	Komunální a průmyslový odpad (neobnovitelný) a obnovitelný/biologicky rozložitelný odpad	80	75	72	80	75	72
Kapalné	L7	Těžký topný olej, plynový olej/motorová nafta, ostatní ropné produkty	89	84	81	85	80	77
	L8	Biokapaliny včetně biomethanolu, bioethanolu, biobutanolu, bionafty a jiných	89	84	81	85	80	77
	L9	Odpadní kapaliny včetně biologicky rozložitelného a neobnovitelného odpadu (včetně loje, tuku a kalu)	80	75	72	75	70	67
Plynné	G10	Zemní plyn, LPG, LNG a biomethan	90	85	82	92	87	84
	G11	Plyny z rafinace, vodíkový a syntézní plyn	89	84	81	90	85	82
	G12	Bioplyn z anaerobní digesce, skládkování a čištění odpadních vod	70	65	62	80	75	72
	G13	Koksárenský plyn, vysokopecní plyn, důlní plyn a jiné získávané plyny (mimo rafinářského plynu)	80	75	72	80	75	72

Tab. 1 Harmonizované referenční hodnoty účinnosti pro oddělenou výrobu tepla.

Kategorie	Druh paliva	Rok výstavby			
		Před r. 2012	2012–2015	Od r. 2016	
Pevné	S1	Černé uhlí včetně antracitu, bituminózního uhlí, subbituminózního uhlí, koks, polokoks a petrolejový koks	44,2	44,2	44,2
	S2	Lignit, lignitové brikety, břidlicová ropa	41,8	41,8	41,8
	S3	Rašelina, rašelinové brikety	39,0	39,0	39,0
	S4	Suchá biomasa včetně dřeva a jiné pevné biomasy včetně dřevěných pelet a briket, suché dřevní štěpky, čistého a suchého odpadního dřeva, ořechových skořápek a olivových či jiných pecek	33,0	33,0	37,0
	S5	Jiná pevná biomasa včetně veškerého dřeva nezahrnutého do kategorie S4 a černý a hnědý louh	25,0	25,0	30,0
	S6	Komunální a průmyslový odpad (neobnovitelný) a obnovitelný/biologicky rozložitelný odpad	25,0	25,0	25,0
Kapalné	L7	Těžký topný olej, plynový olej/motorová nafta, ostatní ropné produkty	44,2	44,2	44,2
	L8	Biokapaliny včetně biomethanolu, bioethanolu, biobutanolu, bionafty a jiných	44,2	44,2	44,2
	L9	Odpadní kapaliny včetně biologicky rozložitelného a neobnovitelného odpadu (včetně loje, tuku a kalu)	25,0	25,0	29,0
Plynné	G10	Zemní plyn, LPG, LNG a biomethan	52,5	52,5	53,0
	G11	Plyny z rafinace, vodíkový a syntézní plyn	44,2	44,2	44,2
	G12	Bioplyn z anaerobní digesce, skládkování a čištění odpadních vod	42,0	42,0	42,0
	G13	Koksárenský plyn, vysokopecní plyn, důlní plyn a jiné získávané plyny (mimo rafinérského plynu)	35,0	35,0	35,0
Jiné	O14	Odpadní teplo (včetně výfukových plynů z vysokoteplotních procesů, produktu exotermických chemických reakcí)			30,0
	O15	Jaderné palivo			33,0
	O16	Solární termální energie			30,0
	O17	Geotermální energie			19,5
	O18	Jiná paliva výše neuvedená			30,0

Tab. 2 Harmonizované referenční hodnoty účinnosti  $Ref E_{\eta}$  pro oddělenou výrobu elektřiny.

Referenční hodnoty účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny je potřeba korigovat podle následujících pravidel daných nařízením Evropské komise 2015/2402.

a) Průměrná roční teplota

Referenční hodnoty účinností jsou dány nařízením Evropské komise 2015/2402, uvádějí se při standardních atmosférických podmínkách ISO (teplota prostředí 15 °C, 1,013 bar, relativní vlhkost 60 %). Pokud není roční průměrná teplota 15 °C provádí se korekce 0,1 procentního bodu ztráty účinnosti na každý stupeň nad 15 °C a 0,1 procentního bodu nárůstu účinnosti na každý stupeň pod 15 °C.

b) Síťové ztráty

Účinnost korigovaná na průměrnou roční venkovní teplotu se dále násobí korekčním faktorem síťových ztrát. Výsledný korekční faktor síťových ztrát je váženým průměrem

dílčích referenčních faktorů síťových ztrát, kde váha je množství dodané energie do jednotlivých typů sítí.

Napěťová hladina připojení	Korekční faktor (pro dodávky do sítě)	Korekční faktor (pro spotřebu na místě)
≥ 345 kV	1	0,976
≥ 200 – < 345 kV	0,972	0,963
≥ 100 – < 200 kV	0,963	0,951
≥ 50 – < 100 kV	0,952	0,936
≥ 12 – < 50 kV	0,935	0,914
≥ 0,45 – < 12 kV	0,918	0,891
< 0,45 kV	0,888	0,851

Tab. 3 referenční faktory síťových ztrát

Další zkoumaný parametr KVET pro udělení vyššího zeleného bonusu je celková účinnost kogenerační jednotky  $\eta_{\text{celk}}$ . Výpočet je popsán přílohou č. 1 k vyhlášce č. 453/2012 Sb.

$$\eta_{\text{celk}} = \frac{(E_{\text{sv}} + E_{\text{M}} + Q_{\text{už}})}{Q_{\text{PAL KJ}}} \quad (-) \quad (26)$$

Kde  $Q_{\text{PAL KJ}}$  je spotřeba energie v palivu použitém v procesu KVET (MWh),  $Q_{\text{už}}$  je množství užitečného tepla (MWh),  $E_{\text{sv}}$  je celkové množství elektřiny z KVET a  $E_{\text{M}}$  je množství mechanické energie získané transformací energie u parní turbíně.

## 2.6.2 Výpočet podpory zeleného bonusu

Podporu vyplácí ERU a výši stanovuje na základě každoročního cenového rozhodnutí uvedeného v cenovém věstníku ze sekce POZE (Podpora Obnovitelných Zdrojů Energie). Při splnění minimálních hodnot UPE a  $\eta_{\text{celk}}$  je podpora vyplácena podle zveřejněné tabulky na celkovou svorkovou vyrobenou energii, která je snížena o spotřebovanou energii technologické vlastní spotřeby<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Technologická vlastní spotřeba je definována v ustanovení § 2, písmeno u) zákona č. 165/2012 Sb., jako spotřeba elektrické energie na výrobu elektřiny v hlavním výrobním zařízení i pomocných provozech, které s výrobou přímo souvisejí, včetně výroby, přeměny nebo úpravy paliva, ztrát v rozvodu vlastní spotřeby i ztrát na zvyšovacích transformátorech pro dodávku do distribuční soustavy nebo přenosové soustavy.

f./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výroby [kW]		ÚPE kogenerační jednotky [%]		Celková účinnost kogenerační jednotky [%]		Zelené bonusy [Kč/MWh]
		od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	od	do (včetně)	od	do (včetně)	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	m
750	Elektřina z KVET	-	31.12.2012	5 000	-	10	15	-	-	45
751		-	31.12.2012	5 000	-	15	-	-	45	60
752		-	31.12.2012	5 000	-	15	-	45	75	140
753		-	31.12.2012	5 000	-	15	-	75	-	200

Tab. 4 podpora výroby elektřiny s instalovaným výkonem nad 5 MWe, cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 2/2017 ze dne 29. března 2017.

### 3 Podpůrné služby v ČR

Podpůrnými službami (dále jen „PpS“) se rozumí prostředky pro zajišťování systémových služeb<sup>14</sup> (dále jen „SyS“). Jsou definovány jako činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování elektrizační soustavy, kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny. Poskytují je jednotliví uživatelé přenosové soustavy. Poskytování PpS je v ČR založeno na tržních principech, společnost ČEPS pořádá výběrová řízení na PpS. Společnost ČEPS je povinna zajistit tyto služby, pokud možno s nejnižší cenou. Dále musí upřednostňovat PpS z ČR, možnost nákupu PpS ze zahraničí má, pokud nelze uspokojit poptávku v ČR.

Každý výrobce elektřiny má právo nabízet a poskytovat podpůrné služby, pokud dodrží podmínky stanovené Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribuční soustavy. Zároveň je povinen při stavbě nového zdroje o výkonu nad 30 MW podpůrné služby poskytovat [10].

#### 3.1 Kategorie podpůrných služeb

##### 3.1.1 Primární regulace frekvence bloku – (PR)

Primární regulace (PR) f bloku je lokální automatická funkce zajišťovaná obvody primární regulace, spočívající v přesně definované změně výkonu elektrárenského bloku v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty. Změnu výkonu elektrárenského bloku vyžadovanou obvody primární regulace v závislosti na odchylce frekvence udává regulační rovnice:

$$\Delta P = -\frac{100}{\delta} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f \quad (27)$$

kde  $\Delta P$  je požadovaná změna výkonu bloku (MW),  $P_n$  nominální výkon bloku (MW),  $\Delta f$  odchylka frekvence od zadané hodnoty (Hz),  $\delta$  statika primární regulace (%),  $f_n$  zadaná frekvence (Hz).

<sup>14</sup> Činnosti provozovatele přenosové soustavy (ČEPS, a.s.) pro zajištění spolehlivého provozu elektrizační soustavy s ohledem na provoz v rámci propojených elektrizačních soustav.



*Pro zlomek z výrazu se používá výraz výkonové číslo  $K = \left(-\frac{100}{\delta} \cdot \frac{P_n}{f_n}\right)$  (MW/Hz) a udává, jak se změní frekvence při změně zatížení. Používá se jak pro elektrárny, tak pro části synchronně propojené soustavy.*

Poskytovatel PpS PR musí zajistit, aby došlo k zregulování odchylky  $f$  do 30 s od okamžiku vzniku odchylky. Maximální regulační výkon je uvolňován při změně kmitočtu o 200 mHz od zadané hodnoty. Minimální velikost regulační zálohy primární energie (RZPR) poskytované na jednom bloku je 3 MW což znamená, že elektrárna musí mít regulační rozsah pro primární regulaci 6 MW. Maximální RZPR je 10 MW na jednom bloku.

### **3.1.2 Sekundární regulace P bloku (SR)**

Sekundární regulace (SR) výkonu bloku je změna výkonu regulovaného elektrárenského bloku, tak jak je požadováno sekundárním regulátorem frekvence a salda předávaných výkonů. Využití regulační zálohy sekundární regulace (RZSR) je dáno algoritmem sekundárního regulátoru Dispečinku ČEPS. Poskytovatel PpS (SR) musí velikost RZSR(+) nebo RZSR(-) bloku realizovat určenou rychlostí nejpozději do 10 minut od požadavku. SR se nakupuje, jako symetrická služba tzn., že je RZSR rezervovaná pro využití v obou směrech od bazového bodu.

Dalšími požadavky na PpS SR jsou:

Minimální rychlost změny výkonu bloku je 2 MW/min.

Minimální certifikovaná velikost RRSR na jednom bloku je 20 MW, tedy 10 MW RZSR+-, pro celek musí platit  $RZSR+ = RZSR-$ .

Maximální certifikovaná RZSR na jednom bloku je 70 MW.

### **3.1.3 Snížení výkonu (SV30)**

Podpurná služba SV30 mohou poskytovat bloky, které jsou schopny do 30 min od pokynu dispečinku ČEPS snížení výkonu o předem sjednanou hodnotu zálohy (RZSV30) nebo jsou schopny plného odstavení zdroje. U této služby není kladen požadavek na certifikaci.

PpS SV30 musí splnit následující požadavky:

Minimální velikost zálohy 30 MW.

Minimální doba garantovaného využití po aktivaci dispečerem ČEPS je 24 hodin.

Poskytovatel musí na požádání ČEPS doložit pro jednotlivé případy aktivace, na kterých blocích tuto službu poskytoval.

### **3.1.4 Minutová záloha (MZt) (t = 5 a 15 min)**

Minutovou zálohou se rozumí požadovaná změna výkonu zařízení, se schopností poskytnout sjednanou regulační zálohu  $RZMZt\pm$  v čase  $t$  od příkazu dispečinku ČEPS. Jedná se o zařízení, připojená k ES ČR. Regulační minutová záloha kladná  $RZMZt+$  může být realizována například: zvýšením výkonu bloku, zastavením čerpání (u PVE),

nenajetím programovaného čerpání, odpojením odpovídajícího zatížení od ES ČR. Regulační minutová záloha záporná RZMZt- může být realizována například: snížením výkonu bloku, připojením odpovídajícího zatížení k ES ČR.

RZMZ<sub>t5</sub> musí splnit následující požadavky:

Poskytnutí zálohy do 5 minut.

Minimální výkon jednoho bloku je 30 MW (pokud není s provozovatelem PS dohodnuto jinak).

Maximální výkon zařízení, určuje ČEPS, a.s..

Minimální doba, po kterou musí být garantováno poskytování 5-ti minutové regulační zálohy RZMZ5, jsou 4 hodiny.

RZMZ<sub>t15±</sub> musí splnit následující požadavky:

Poskytnutí zálohy do 15 minut.

Minimální výkon jednoho bloku je 10 MW.

Maximální výkon jednoho bloku je 70 MW (pokud není s provozovatelem PS dohodnuto jinak).

Doba aktivace služby není omezena.

### **3.1.5 Sekundární regulace U/Q (SRUQ)**

Sekundární regulace U/Q je automatická funkce o smluvně dohodnutém regulačním rozsahu jalového výkonu bloků, pro udržení zadané velikosti napětí v pilotních uzlech ES. Tuto službu mohou poskytovat provozovatelé elektrárenských bloků připojených do PS.

SRUQ musí splnit následující požadavky:

Zařízení musí být certifikováno na smluvně dohodnutý regulační rozsah.

Regulační proces má být aperiodický nebo maximálně s jedním překmitem a ukončený do 2 minut.

Sekundární regulace U/Q musí být zároveň schopná spolupracovat s prostředky terciární regulace napětí a jalových výkonů.

### **3.1.6 Schopnost ostrovního provozu (OP)**

Jedná se o schopnost provozu elektrárenského bloku do vydělené části vnější sítě tzv. ostrova.

Ostrovní provoz se vyznačuje velkými nároky na regulační schopnosti činného výkonu bloku. Elektrárenský blok přechází automaticky do regulačního režimu ostrovního provozu při změně frekvence o 200 mHz od jmenovité hodnoty.

### **3.1.7 Schopnost startu ze tmy (BS)**

Schopnost bloku najetí bez pomoci vnějšího zdroje napětí na jmenovité otáčky, dosažení jmenovitého napětí, připojení k síti a jejího napájení v ostrovním režimu.

## 3.2 Požadavky na PpS

Podpůrné služby musí splňovat následující požadavky:

- Měřitelnost se stanovenými kvantitativními parametry.
- Garantovat dostupnost služby během denního, týdenního a ročního cyklu s možností vyžádat si inspekci.
- Certifikovatelnost – stanovený způsob prokazování schopnosti poskytnout služby pomocí periodických testů.
- Možnost průběžné kontroly poskytování služeb.

Pokud je dosažení požadavků pro certifikaci na PpS investičně příliš náročné, případně ekonomicky nenávratné, je alternativou k poskytování PpS nabídnout regulační energii na vyrovnávacím trhu s regulační energií. V takovém případě odpadají výše uvedené požadavky, to může být výhodou pro provoz, pro které by certifikace znamenala vysoké investiční náklady, přesto jim stávající technologie dovoluje energii poskytnout.

## 3.3 Příjmy za PpS a regulační energii

### 3.3.1 Příjmy z PpS kategorií PR, SR, MZ<sub>+15, -15, +5</sub>

Podpůrné služby podléhající požadavkům na certifikaci **Tab. 5** jsou poskytovány na základě přímé dohody s ČEPS a.s. Jsou nakupovány na denním trhu nebo ve výběrových řízeních. Příjmy se skládají ze dvou položek, a to z příjmů za regulační zálohu (rezervovaný výkon) dané kategorie podpůrné služby a příjmy za poskytnutou regulační energii (nevztahuje se na regulační energie poskytnutou v rámci PR, ta je zdarma). Právě příjem za rezervovaný výkon dělá z poskytování PpS velmi zajímavou investici s poměrně rychlou dobou návratnosti, příjem je tak velký, že se čím dál častěji objevují podpůrné služby založené pouze na velkokapacitních bateriích, bez možnosti vlastní výroby.

Tabulka rozdělení regulačních záloh a energií				
Časový rámec	Rozdělení podle času	Rozdělení podle typu	Nakupovaná služba	Certifikace
0.5 minut	<b>RZV</b> Regulační záloha vteřinová		<b>RZPR</b> Regulační záloha primární regulace	Ano
5 minut	<b>RZ<sub>5</sub></b> Regulační záloha dosažitelná do 5 minut	<b>RZ<sub>5</sub><sup>+</sup></b> Regulační záloha kladná dosažitelná do 5 minut	<b>RZMZ<sub>5</sub></b> Regulační záloha minutová dosažitelná do 5 minut	Ano
15 minut	<b>RZ<sub>15</sub></b> Regulační záloha dosažitelná do 15 minut	<b>RZSR</b> Regulační záloha sekundární regulace	<b>RZSR</b> Regulační záloha sekundární regulace (PE, JE, PPE)	Ano
		<b>RZ<sub>15</sub><sup>+</sup></b> Regulační záloha kladná dosažitelná do 15 minut	<b>RZMZ<sub>15</sub><sup>+</sup></b> Regulační záloha minutová kladná dosažitelná do 15 minut	Ano
		<b>RZ<sub>15</sub><sup>-</sup></b> Regulační záloha záporná dosažitelná do 15 minut	<b>RZMZ<sub>15</sub><sup>-</sup></b> Regulační záloha minutová záporná dosažitelná do 15 minut	Ano
30 minut	<b>RZ<sub>30</sub></b> Regulační záloha dosažitelná do 30 minut	<b>RZ<sub>30</sub><sup>-</sup></b> Regulační záloha záporná dosažitelná do 30 minut	<b>RZSV<sub>30</sub></b> Regulační záloha snížení výkonu dosažitelná do 30 minut	Ne
více než 30 minut	<b>RZ<sub>&gt;30</sub></b> Regulační záloha dosažitelná v čase delším než 30 minut	<b>Ereg<sub>&gt;30</sub><sup>+</sup></b> Regulační energie kladná		Ne
		<b>Ereg<sub>&gt;30</sub><sup>-</sup></b> Regulační energie záporná		Ne
		<b>EregZ<sup>+</sup></b> Regulační energie ze zahraničí kladná		Ne
		<b>EregZ<sup>-</sup></b> Regulační energie ze zahraničí záporná		Ne

Tab. 5 Přehled nakupovaných podpůrných služeb, jejich dělení a požadavky dle kodexu přenosové soustavy.

### 3.3.1.1 Příjmy za rezervovaný výkon regulačních záloh PR, SR, MZ<sub>+15</sub>, -15, +5

Ceny za rezervovaný výkon PpS pro dané kategorie zveřejňuje ČEPS a.s. na svých internetových stránkách případně na obchodním serveru <http://market.ceps.cz/>. Ceny se liší podle časového pásma a dne v týdnu. Časová pásma jsou: denní<sup>15</sup> “D“ a noční<sup>16</sup> “N“, dále pásma pracovních “P“ a nepracovních “N“ dnů. Ceny se vypisují na každý týden v roce zvlášť. Cena je vždy uváděna v ((Kč/MW)/h). Platby za rezervovaný výkon se týkají pouze certifikovaných záloh vybraných kategorií. Průměrné roční ceny nakupovaných rezervovaných výkonů v daných časových pásmech pro roky 2016 a 2017 jsou zobrazeny v **Tab. 6**. Zprůměrování bylo provedeno na základě velmi malého rozptylu cen v jednotlivých týdnech.

<sup>15</sup> denním pásmem se rozumí období od 6:00 h do 22:00 h

<sup>16</sup> nočním pásmem se rozumí ostatní obchodní hodiny dne

typ PpS	rok	Průměrná roční cena v daný časový okamžik, za rezervovaný výkon, po dobu jedné hodiny (Kč/MW)/h			
		PD	PN	ND	NN
PR	2016	652,2	652,2	652,9	652,9
	2017	673,6	673,6	673,6	673,6
SR	2016	673,1	673,0	674,8	674,8
	2017	687,3	686,5	690,7	686,1
MZ15+	2016	207,1	207,8	204,2	208,8
	2017	201,8	198,2	196,3	198,2
MZ15-	2016	214,9	216,7	225,4	216,0
	2017	209,1	211,4	221,8	210,9
MZ5+	2016	500,0	500,0	500,0	500,0
	2017	501,3	501,3	501,3	501,3

Tab. 6 Průměrné roční ceny za rezervovaný výkon nakupovaných podpůrných služeb. [11]

Roční příjem za PpS se zjednodušeně stanoví následovně

$$C_x = P_x \cdot (t_{PD} \cdot C_{xPD} + t_{PN} \cdot C_{xPN} + t_{ND} \cdot C_{xND} + t_{NN} \cdot C_{xNN}) \quad (28)$$

kde  $C_x$  je celkový roční příjem (Kč) za PpS kategorie  $x$  o certifikovaném výkonu,  $P_x$  výkon (MW) na který je zařízení certifikováno,  $t_{PD}$  doba trvání denního pásma v pracovních dnech za rok ( $h$ ),  $C_{xPD}$  roční průměrná cena za PpS v denním časovém pásmu pracovního dne ((Kč/MW)/h).

### 3.3.1.2 Příjmy za kladnou a zápornou regulační energii

Za regulační energii je považována energie dodaná při poskytování PpS, která byla dodána nad rámec diagramového bodu bloku dané smluvními podmínkami o dodávce elektřiny. Pokud byl rozdíl mezi plánovanou výrobou a skutečnou výrobou vyvolán požadavky Dispečinku ČEPS (a v jejich rozsahu) a je v souvislosti s poskytováním PpS, je označen jako regulační energie.

Regulační energie nevzniká aktivací PpS PR. Regulační energie rovněž nemůže vzniknout v obchodním intervalu, kdy nebyly ČEPS vykoupeny příslušné PpS. Pro necertifikované poskytovatele platí, že energie je vypočítána integrací skutečně dodané energie nad rámec plánované výroby. Pro certifikované poskytovatele se regulační energie vypočte prostým součinem výkonu a doby podpůrné služby dle požadavků ČEPS.

- a) Příjem záporná regulační energie, (požadovaná energie – plánovaná) < 0

$$C = C_{re-} \cdot \int_{t_{on}}^{t_{off}} (P_{diagram} - P_{pps}) dt \quad (29)$$

Kde  $C$  je cena účtovaná poskytovatelem regulační energie ČEPS a.s. za celkovou poskytnutou regulační energii,  $C_{re-}$  je cena záporné regulační energie na trhu (průměr za období 1.1.2017 – 31.3.2017 je 5,77 Kč/MWh [11]),  $t_{on}$  čas požadavku

dispečinku ČEPS a.s. na aktivaci PpS,  $t_{off}$  čas požadavku dispečinku ČEPS a.s. na deaktivaci PpS,  $P_{diagram}$  výkon podle smluvního diagramu (MW),  $P_{PpS}$  požadovaný výkon dle dispečinku ČEPS.

b) Příjem kladná regulační energie, (požadovaná energie – plánovaná) > 0"

$$C = C_{re+} \cdot \int_{t_{on}}^{t_{off}} (P_{PpS} - P_{diagram}) dt \quad (30)$$

Kde  $C_{re+}$  je cena záporné regulační energie na trhu (průměr za období 1.1.2017 – 31.3.2017 je 2397,74 Kč/MWh [11]).

### 3.3.2 Příjmy z PpS ostatních kategorií

Pro ostatní kategorie<sup>17</sup> PpS jsou sjednávány individuální smlouvy s ČEPS a.s. Ceny za tyto kategorie PpS jsou individuálně dohodnuty ve smlouvě, nesmí však překročit ceny obvyklé pro tyto služby.

#### 3.3.2.1 Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

Cena je dána za každou hodinu poskytování 1 MVar smluveného certifikovaného regulačního rozsahu.

#### 3.3.2.2 Schopnost startu ze tmy (BS)

Cena je dána jako pevná měsíční platba za poskytování služby.

#### 3.3.2.3 Schopnost ostrovního provozu (OP)

Smlouva na poskytování (PpS) (OP) je uzavřena mezi ČEPS a poskytovatelem, který je přímo vyveden do PS ČR. Cena dohodnutá ve smlouvě na poskytování této (PpS) je stanovena pro každý blok dodavatele jako pevná platba za každou hodinu poskytování služby.

#### 3.3.2.4 Změna zatížení (ZZ30)

Cena je dvousložková, PpS obdrží cenu za rezervaci a v případě aktivace služby cenu za kladnou regulační energii.

## 4 Modelování spolupráce parní kotel – turbína – spotřebič tepla pro stanovení bilance energií

Aby bylo možné ekonomicky a technicky zhodnotit variantu provozu s poskytováním podpurných služeb daného průmyslového podniku, je nutné znát

---

<sup>17</sup> V případě potřeby nákupu PR, SR,  $MZ_{+15, -15, +5}$  na delší dobu, nebo při nenaplnění potřeby ve výběrových řízeních za běžné ceny může společnost ČEPS a.s. nakoupit i tyto služby přímým jednáním s poskytovateli.

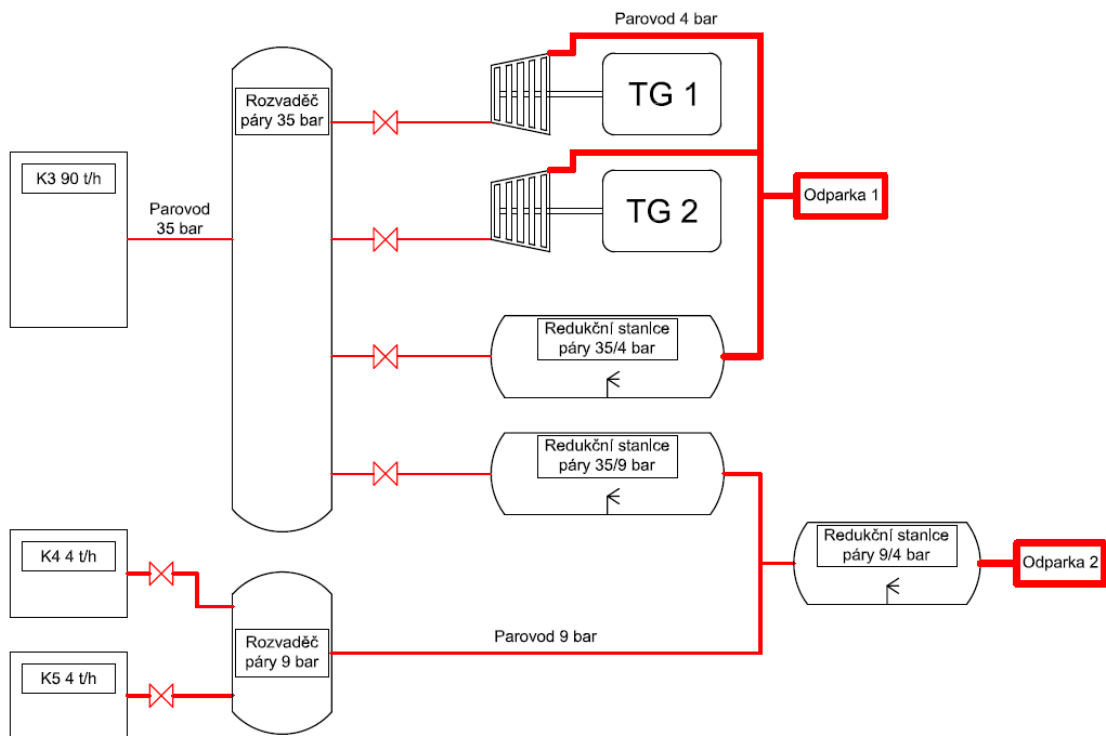
provozní parametry ve všech uzlech celku parní kotel – turbína – spotřebič tepla. Tyto provozní parametry budou výsledkem simulace provozu v modelu, který bude respektovat specifika daného průmyslového provozu a požadavky na MZ<sub>t5</sub> jako jedinou službu, která může být vzhledem k instalovanému výkonu poskytována. Jako vstupní data pro tvorbu modelu jsou použity hodnoty z výkazů pro ERU, podnikové statistiky energetického hospodářství a hodnoty z provozu získané z regulačního programu podniku.

## 4.1 Popis provozu

Jedná se o průmyslový podnik zabývající se výrobou cukru, dodávku tepla zajišťují dvě protitlakové turbíny a paralelně řazená redukční stanice, napájení parní sítě obstarává hlavní plynový kotel K3. Charakteristická vlastnost výroben cukru je kampanový provoz. Průměrně začíná období kampaně v druhé polovině září a končí v první polovině března. Mimo období kampaně jsou prováděny opravné práce, není odebírán plyn, pouze elektrická energie ze sítě distributora. V období kampaně probíhá provoz v režimu 24/7, během kampaně je podle záznamu o provozním zatížení maximální odchylka výroby činné energie do 2,5 %, výrobu elektrické energie lze považovat za konstantní. Z této skutečnosti vyplívá i konstantní odběr tepla.

## 4.2 Výchozí stav

V současnosti jsou v podniku instalovány dvě protitlaková turbosoustrojí 35/4 bar, každé o instalovaném svorkovém výkonu 6 MW s možností dodávky jalového výkonu. Regulace kotle K3 je na konstantní tlak udržovaný v rozvaděči páry před spotřebiči. Regulace výkonu turbosoustrojí je realizována škrcením. **Regulační systémy a parovody budou zachovány, splňují požadavky pro dostatečně pružnou regulaci výkonu pro potřeby MZ<sub>t5</sub>.** Dále jsou součástí parní sítě dvě redukční stanice 35/4 bar a 35/9 bar. Pro zásobování turbosoustrojí a redukčních stanic je využíván plynový kotel K3 90 t/h 435°C 35 bar, který již vzhledem ke stavu nemůže poskytovat 100 % jmenovitého výkonu. Dodatečné zásobování teplem obstarávají dva identické kotle K4 a K5 4 t/h 180°C 9 bar. Tyto kotle dodávající páru do rozvaděče páry 9 bar ze kterého je napájena redukční stanice 9/4 bar. Požadavkem je navrhnout náhradu za kotel K3 o výkonu alespoň 90 t/h. Při návrhu bude zhodnocen vyšší výkon kotle za účelem navýšení výkonu turbogenerátorů.



Obr. 19 Schéma současné parní sítě a umístění regulačních armatur.

### 4.3 Energetické hospodářství objektu

Z dostupných statistik podniku a záznamů o provozním zatížení vyplývá, že výroba probíhá s maximální odchylkou svorkového elektrického výkonu od střední hodnoty  $\pm 2,44\%$ . Střední hodnota výkonu odebíraného podnikem z generátorů je přibližně 5 MW a dodávka do sítě se pohybuje v rozmezí 0,55 až 0,7 MW. Pro měsíc listopad (listopad byl vybrán, protože není ovlivněn nákupem a je to měsíc kdy běží výroba na 100%) je odebíraný výkon vypočtený ze statistiky (příloha - Tabulka A. 1) **4,99 MW** a výkon dodávaný **0,67 MW**. Hodnoty elektrických výkonů vypočtené ze statistik se shodují s hodinovým měřením. Tepelný výkon je v protitlakovém provozu přímo úměrný výrobě elektriny, proto lze uvažovat plochý diagram výroby elektrické a tepelné energie v režimu 24/7. Na základě těchto skutečností, budou použity průměrné hodnoty jako vstupy pro model.

#### 4.3.1 Elektrická energie

Činný výkon dodávaný do technologie v režimu 24/7:	<b>5 MW</b>
Činný výkon dodávaný do sítě v režimu 24/7:	<b>0,7 MW</b>
Jalový výkon celková dodávka v režimu 24/7:	<b>2,5</b>
<b>MVAr</b>	

Jalový výkon do 3 MVAr nesnižuje schopnosti generátorů dodávat činný výkon odpovídající jmenovitému výkonu turbíny, viz kapitola 3.4.



### 4.3.2 Tepelná energie

Ze statistik spotřeby tepla na patě plynoměru a rozdílu mezi tepelnou energií dodávanou do turbosoustrojí a tepelnou energií z turbosoustrojí odebranou, lze vyčíslit celková výroba páry pro výrobu tepla. Tyto hodnoty byly vypočteny ze statistik pro měsíc listopad, viz (příloha - Tabulka A. 1).

Celkový instalovaný tepelný výkon parních kotlů: **83,58 MW**

Celkový tepelný výkon předávaný spotřebiči tepla,  
při běžném provozu: **73,56 MW**

#### Parametry kotle K3

Výrobce: **POLYCOMP a.s.  
Poděbrady**

Typ: **vodotrubný**

Uvedení do provozu: **1992**

Plánované ukončení provozu: **2012**

Tepelný výkon kotle: **77,83 MW**

Tepelný příkon kotle: **83,69 MW**

Parní výkonost kotle (pro  $\Delta I_{K3}$  3113,27 kJ/kg): **90 t/h**

Účinnost kotle: **93 %**

#### Parametry kotlů K4 a K5

Výrobce: **POLYCOMP a.s.  
Poděbrady**

Typ: **žárovodný**

Uvedení do provozu: **2012**

Plánované ukončení provozu: **2032**

Tepelný výkon kotle: **5,75 MW**

Tepelný příkon kotle: **6,18 MW**

Účinnost kotle: **93 %**

Parní výkonost kotle (pro  $\Delta I_{K4,5}$  2588,31 kJ/kg): **8 t/h**

### 4.4 Turbosoustrojí

#### Parametry turbíny:

Výrobce: **ZAMECH Elblag**

Typ: **TP6/3**

Rok výroby: **1969**

Maximální/jmenovitý elektrický výkon  $P_n$ : **6 MW**

Minimální elektrický výkon: **1 MW**

Vstupní tlak páry: **3,5 MPa**

Vstupní teplota páry:	<b>435 °C</b>
Entalpie vstupní páry:	<b>3302,13 kJ/kg</b>
Výstupní tlak:	<b>0,4 MPa</b>
Elektromechanická účinnost $\eta_{em}$ :	<b>92 %</b>
Spotřeba tepla naprázdno elektromechanická složka $Q_{Te0}$ :	<b>0,36 MW</b>
Tepelný příkon naprázdno $Q_{Tp0}$ :	<b>8,67 MW</b>
Spotřeba tepla na jmenovitý elektrický výkon $Q_{TeMAX}$ :	<b>6,522 MW</b>
Tepelný příkon jmenovitý $Q_{TpMAX}$ :	<b>48,506 MW</b>

#### Parametry turbogenerátoru:

Typ:	<b>GT2-6-01</b>
Maximální/jmenovitý elektrický výkon $P_n$ :	<b>7,5 MVA</b>
Rok výroby:	<b>1969</b>

### 4.5 Výpočet provozních charakteristik

Základním prvkem matematického modelu je vytvoření funkční závislosti vnitřní a vnější charakteristiky turbosoustrojí. Tyto charakteristiky jsou popsány v části 1.1.1. Základní charakteristiky, je možné vytvořit na základě dat poskytnutých výrobcem. Tato data získává výrobce měřením tepelných výkonů  $Q_{Tc}$  v závislosti na měřeném svorkovém výkonu generátoru. Z těchto se dopočítá dodávaný tepelný výkon  $Q_{Tp}$  a tepelný výkon  $Q_{Te}$  odpovídající elektrickému výkonu. Tyto data pro základní výkony udávané výrobcem jsou součástí Tab. 7. Pro potřeby modelu slouží však pouze jako vstupní data, ze kterých byla proložením jednotlivých bodů odvozena funkční závislost. Tato závislost je odmocninná, dle předpokladů.

$P_P$ (MW)	0	1	2	3	4	5	6
$Q_{Tc}$ (MW)	8,315	14,224	19,776	25,356	30,876	36,427	41,977
$\eta_c$ (-)	0	6,96	9,80	11,32	12,30	12,96	13,45
$Q_{Tp}$ (MW) viz (11)	8,675	15,611	22,19	28,797	35,344	41,922	48,499
$Q_{Te}$ (MW) viz (7)	0,36	1,387	2,414	3,441	4,468	5,495	6,522

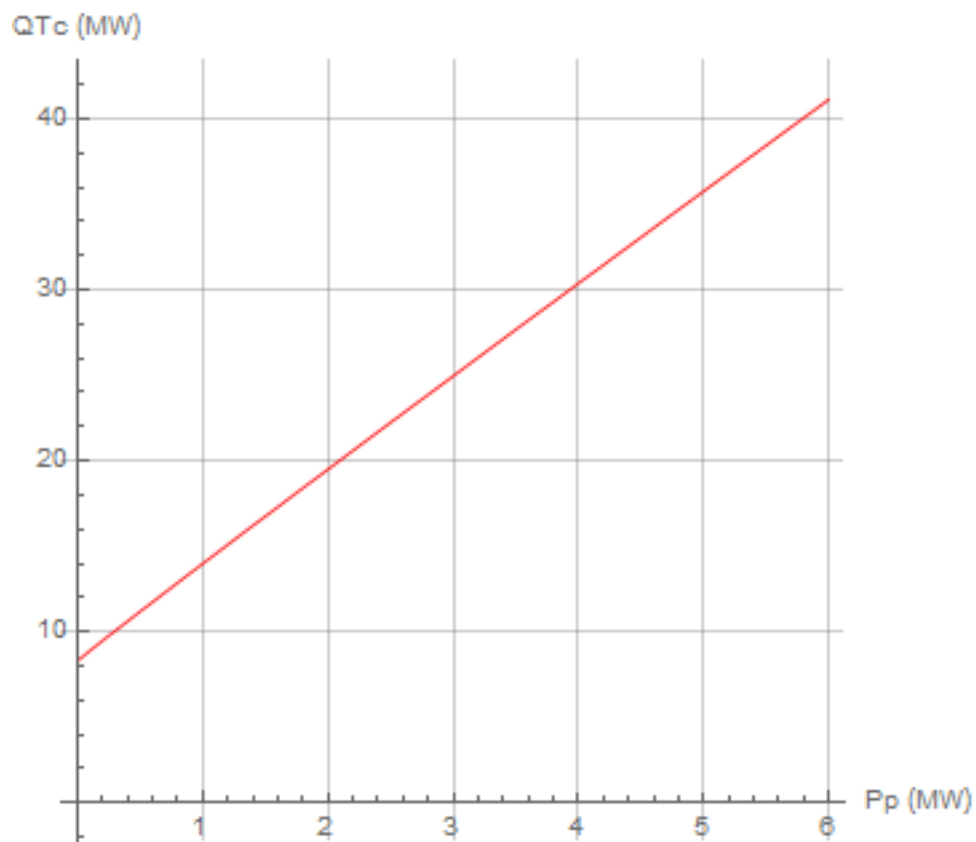
Tab. 7 Výrobcem naměřené tepelné výkony  $Q_{Tc}$  v závislosti na svorkovém výkonu [16], a dopočtené  $Q_{Tp}$  a  $Q_{Te}$ .

Získání této závislosti umožnilo vypočítat  $Q_{Tc}$  a  $Q_{Tp}$  pro výkony, při kterých jsou turbíny provozovány a porovnat tyto vypočtené hodnoty s hodnotami naměřenými. Porovnáním těchto hodnot byly dopočteny měrné odchylky, které slouží ke korekci provozních charakteristik udávaných výrobcem na charakteristiky odpovídající skutečným provozním charakteristikám turbíny. Vypočtené a naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8.

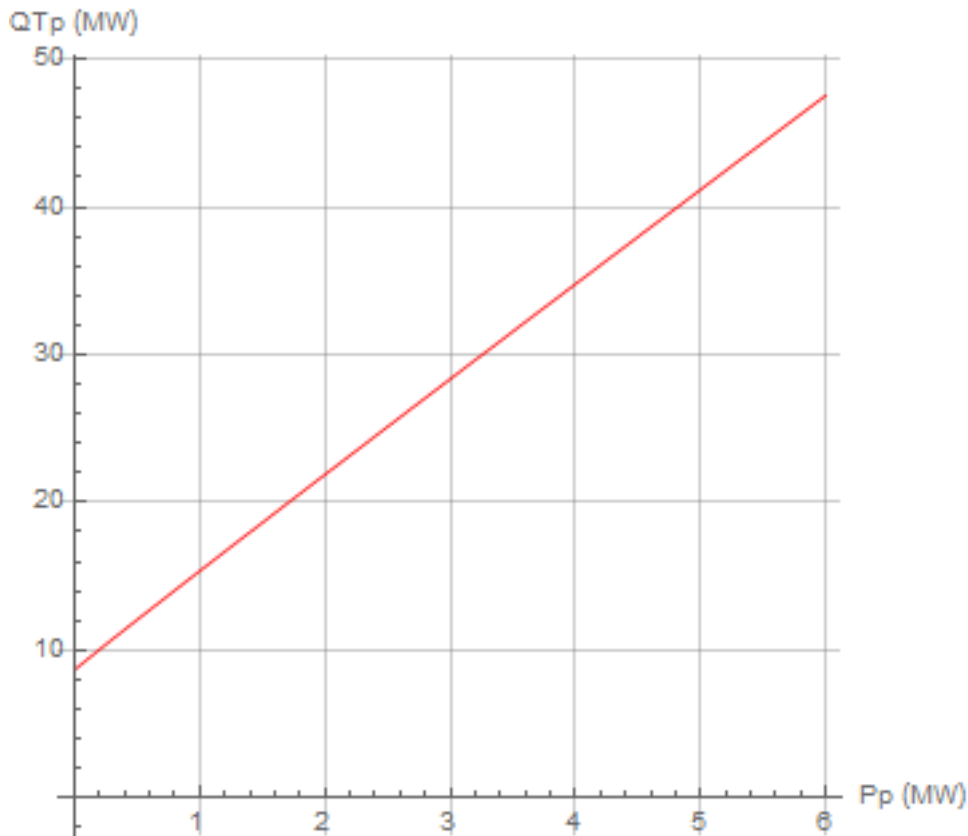
	TG 1 (MW)	TG 2 (MW)	$\Sigma$ (MW)	Změřeno (MW)	$(\Sigma - \text{Změř.}) / P_P (-)$
$P_P$ (MW)	3	2,67	5,67	5,67	-
$Q_{Tc}$ (MW)	25,368	23,529	48,897	48,155	0,13
$Q_{Tp}$ (MW)	28,81	26,63	55,441	54,59	0,15
$\eta_c$ (%)	11,13	10,71	10,93	11,33	0,067 %

Tab. 8 Vypočtené a skutečně změřené hodnoty, měrné odchylky pro korekci na skutečný stav.

Výsledkem korekce průběhů odvozených z dat výrobce jsou následující charakteristiky.



Obr. 20 Vnitřní charakteristika instalované protitlakové turbíny.

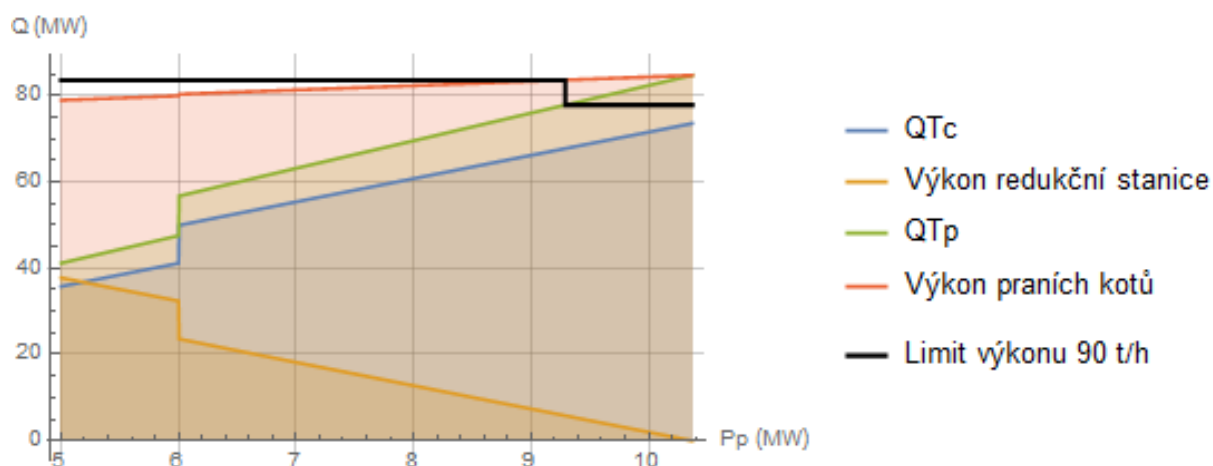


Obr. 21 Vnější charakteristika instalované protitlakové turbíny.

#### 4.6 Výpočet bilancí v jednotlivých uzlech provozu

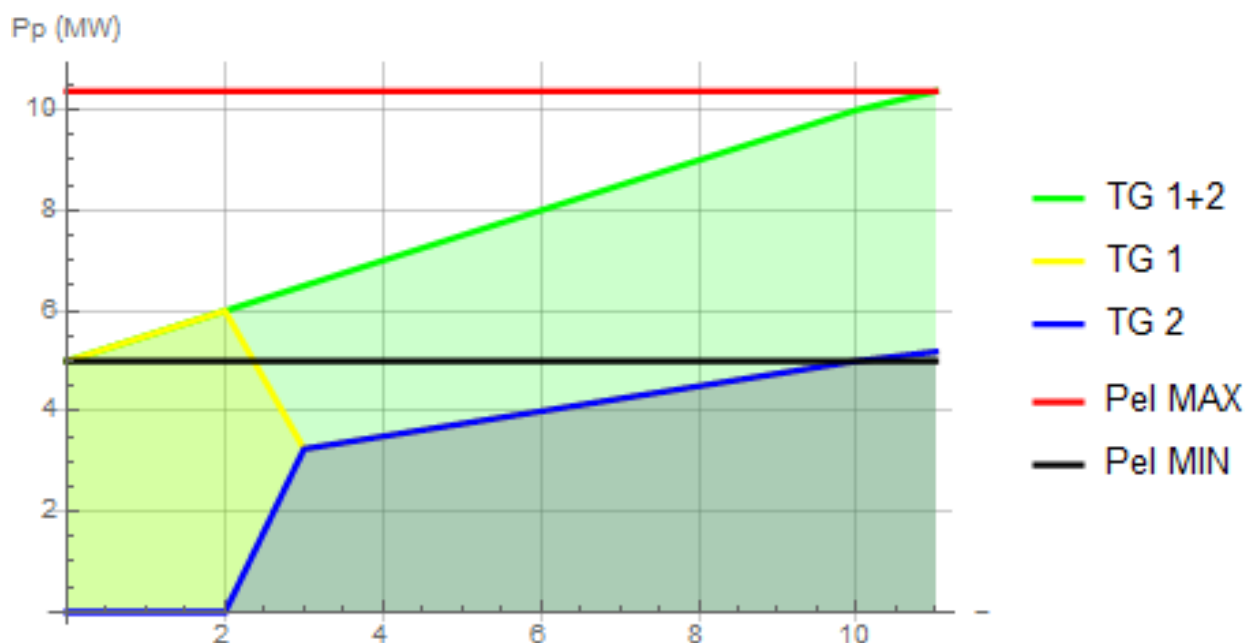
##### a) Trvalá dodávka do sítě

Při nasmlouvané trvalé dodávce do sítě odpadá nutnost, aby byly obě turbíny v provozu ohřáté na provozní teploty. To umožňuje optimalizovat rozdělení výkonů mezi instalovaná turbosoustrojí, tak aby byl součtový protitlakový tepelný výkon co nejmenší. Tím klesnou ztráty energie, které jsou sice v protitlakovém provozu téměř zanedbatelné, a tvoří je hlavně v podstatě pouze elektromechanická složka spotřeby tepla naprázdno. Přesto se tato optimalizace při trvalém konstantním zatížení vyplatí. Optimalizace v modelu je realizována jako hledání minima pro tepelný protitlakový výkon. Na základě této optimalizace byl vytvořen diagram tepelných výkonů v závislosti na požadovaném celkovém elektrickém výkonu. Výkonem redukční stanice se rozumí potřebný paralelní tepelný výkon, aby byl uspokojen požadavek technologie výroby cukru.



Obr. 22 Průběh tepelných výkonů v závislosti na odebíraném elektrickém výkonu.

Optimalizovaná rozložení výkonů mezi jednotlivá turbosoustrojí v závislosti na požadovaném elektrickém výkonu jsou znázorněná na **Obr. 23**.



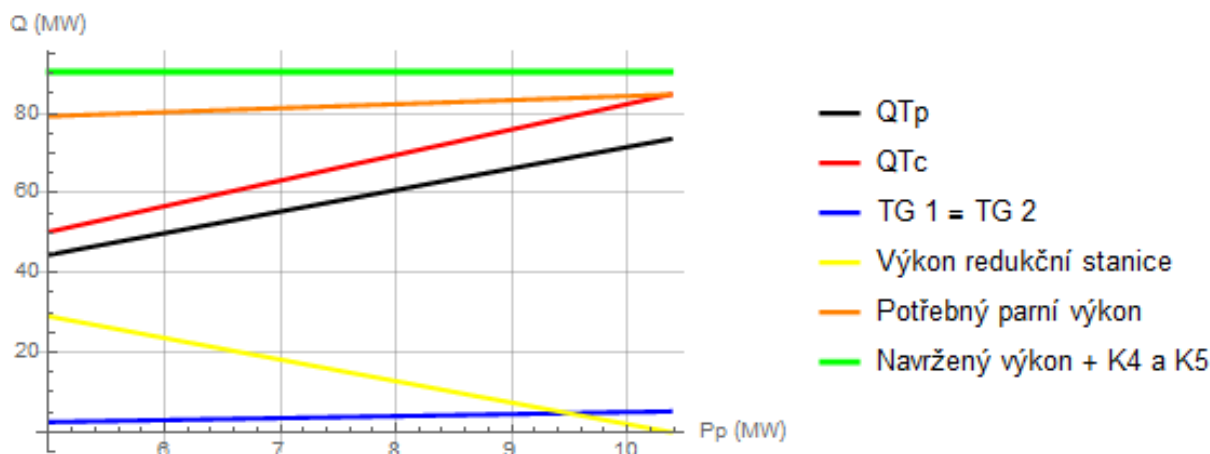
Obr. 23 Rozložení výkonů v závislosti na odebíraném elektrickém výkonu.

Model dále poskytl přehled o dosažitelných elektrických výkonech. Při současné výkonnosti kotle K3 90t/h a K4 + K5 je maximální dosažitelný elektrický výkon 9,29 MWe. Jelikož mají kotle K4 a K5 nízké parametry páry, musí při požadavku na výkon vyšší než 9,29 MW dojít ke snížení jejich výkonu a převzetí zatížení kotlem K3, tato skutečnost je znázorněna na **Obr. 22**. Pro dosažení plného elektrického výkonu 10,37 MWe, pro který je zajištěn odběr emisního tepla, je minimální potřebná výkonnost kotle K3 98 t/h.

#### b) Poskytování PpS

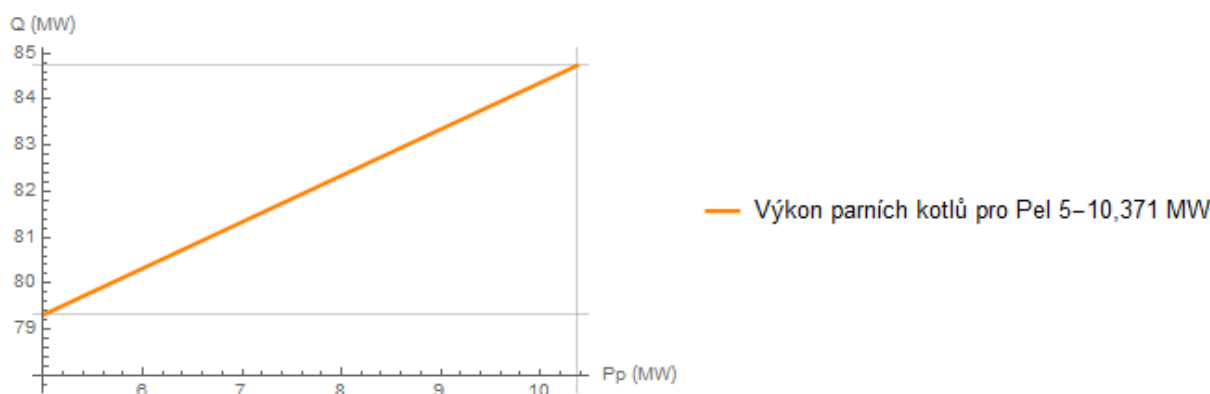
Pro poskytování PpS je klíčové, aby mohl být poskytnut výkon RZ v požadovaném čase. Proto se předpokládá trvalý provoz obou turbogenerátorů zatížených na stejný výkon. V modelu byl vytvořen obdobný graf závislosti tepelných výkonů jako

v předchozím případě, pouze však s podmínkou rovnoměrného zatížení obou turbosoustrojí a s výkonností kotle 98 t/h, **Obr. 24**.



*Obr. 24 Průběh tepelných výkonů v závislosti na odebíraném elektrickém výkonu.*

Pro  $MZ_{t5}$  je požadavek na poskytnutí RZ do 5 minut. Pokud je předpokládáno nabízet RZ o velikosti rovné rozdílu maximálního elektrického výkonu a základního odběru elektrické energie technologií, pak musí dojít během 5 minut ke zvýšení výkonu kotle K3 znázorněnému na **Obr. 25**.



*Obr. 25 Změna výkonu kotle K3 při požadavku na aktivaci RZ o maximální technicky přípustné velikosti.*

Potřebné navýšení výkonu znamená růst 1,083 MW/min což je v případě kotle o výkonnosti 98 t/h 1,277 % $P_N$ /min. Takovýto požadavek na kotel není nikterak nereálný vzhledem k tomu, že kotel takovýchto výkonů se sériově nevyrábí a vždy se jedná o zakázkovou výrobu. Nad 35 MW se parní kotle navíc provádí pouze jako vodotrubné, žárotrubné by nevyhověli rozměry. Závěrem modelu je, že z technického hlediska je poskytování  $RZ_{MZ_{t=5}}$  o výkonu 5,3 MW, realizovatelné.

## 5 Ekonomické zhodnocení

Předpokladem pro ekonomické zhodnocení je, že nový kotel bude financován pouze z finančních prostředků podniku. Pro základní zhodnocení slouží následující ekonomické nástroje.

## 5.1 Čistá současná hodnota NPV

Nejčastěji používaným investičním kritériem je tzv. čistá současná hodnota neboli NPV<sup>18</sup>. Jedná se o kritérium uvažující časovou hodnotu peněz. NPV se stanovuje podle následujícího vztahu:

$$NPV = \sum_{t=0}^{t\ddot{z}} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (31)$$

kde  $CF_t$  je peněžní tok<sup>19</sup> z investice v daném roce (Kč),  $t\ddot{z}$  je doba životnosti projektu (rok) a  $r$  je diskont reprezentující časovou cenu peněz (-).

Peněžní tok  $CF$  vyjadřuje rozdíl mezi příjmy a výdaji za účetní období. Vzhledem ke stagnujícím cenám elektřiny a plynu lze počítat s dlouhodobě konstantními příjmy i výdaji a nepočítat s eskalací<sup>20</sup> těchto komodit. Ekonomicky nejvýhodnější projekt je ten, který má při srovnatelném diskontu největší NPV.

## 5.2 Případová studie

Cílem případové studie je porovnat z ekonomického hlediska investici do nového kotle, a to ve třech variantách:

1. Kotel, který by byl prostou náhradou stávajícího dosluhujícího kotle, o výkonosti 90 t/h.
2. Kotel s vyšším výkonem, který bude umožňovat plné využití potenciálu protitlakového soustrojí, tzn. navýšení elektrického výkonu. Výkonost minimálně 98 t/h.
3. Kotel se stejným výkonem jako ve 2. variantě, ale s takovou rychlostí změny výkonu aby bylo možné nabízet RZMZ<sub>15</sub> 5,37 MW.

Posouzení ekonomické výhodnosti bude provedeno výpočtem NPV, pro jednotlivé varianty. Nejvýhodnější varianta bude disponovat nejvyšší čistou současnou hodnotou. Vzhledem k tomu, že kotel musí být vyměněn i v případě zachování stávajícího provozování, nebude do výdajů zahrnuta cena základní varianty kotle, ani náklady na provoz a údržbu kotle. Cena parních kotlů o výkonu nad 35 MW není běžně dostupná, protože nad tento výkon se kotle konstruují na míru podle požadavků zákazníka, mezi které mimo jiné patří požadavek na rychlost změny výkonu v procentech jmenovitého výkonu. Pro ekonomické zhodnocení je také podstatné, že cena kotlů nad 35 MW tvoří dle [17] pouze 1/3 ceny z celkové ceny projektu. Zbytek ceny za realizaci projektu tvoří instalace a periferie nutné pro chod kotle, vyšší regulační pružnost kotle bude tedy ovlivňovat pouze 1/3 ceny projektu. Pro všechny varianty bude muset být vzhledem k vysokému výkonu zvolen kotel vodotrubný, který bývá běžně až o 40% dražší než kotel žárotubný. Vzhledem k těmto skutečnostem je v této studii příplatek za vyšší pružnost kotle do 15 % ceny kotle, která by neměla pro výkon přesáhnout cenu třech kotlů o výkonu 35 MW, jejichž tržní cena je 150 000 EUR. Rozdíl mezi méně a více výkonnou variantou kotle by vzhledem k cenám dle [17] neměl přesáhnout 15 000 EUR.

<sup>18</sup> Z anglického Net Present Value.

<sup>19</sup> Z anglického Cash Flow.

<sup>20</sup> Eskalace zahrnuje změnu ceny vlivem inflace a zvýšené poptávky.

## 5.2.1 Příjmy a výdaje za vyrobenou elektrickou energií

### 1) Příjmy

Zelený bonus lze nárokovat na veškerou vyrobenou energii, protože i při základním elektrickém výkonu 2 x 2,5 MW je splněna podmínka na úsporu primární energie, UPE = 10%, viz vnější charakteristika. Tepelný výkon redukčních stanic se do výpočtu nezahrnuje. Pak je příjem za vyrobenou energii daný tržní cenou za elektrickou energii a zeleným bonusem. Průměrná tržní cena byla od 1.9.2016 do 31.3.2017 podle [18] 797,09 Kč/MWh. Za dodávku 1 MWh elektrické energie od sítě je příjem 842,09 Kč.

### 2) Výdaje

Výdaje na výrobu energie mají pouze variabilní složku danou palivovými náklady. Nákup kotle nevstupuje do výdajů, protože je nezbytný pro technologii. Palivové náklady na 1 MWh elektrické energie jsou dány náklady na palivo a účinností přeměny. Účinnost nového středotlakého parního kotle je dle [17] kolem 92 %, předpokládá se však výměna za kotel o minimálně stejné účinnosti jako u stávajícího kotle, tedy 93 %. Měrná spotřeba tepla na elektrický výkon instalovaného protitlakového soustrojí je dle matematického modelu 1,00786 MW/MWe. Cena plynu za 1 MWh v období od 1.9.2016 do 31.3.2017 je podle [19] 480,46 Kč/MWh + 15,93 Kč/MWh distribuce v daném místě. Palivové náklady na 1 MWh elektrické energie jsou tedy 537,9 Kč/MWh.

## 5.2.2 Příjmy a výdaje za PpS

### 1) Příjmy

Příjem za rezervovaný výkon  $MZ_{t5}$  se stanoví dle vztahu (28). Z tabulky 6 je patrné, že v této kategorii není rozdíl v platbě za rezervovaný výkon podle časových pásem. Výpočet příjmu se zjednoduší na součin doby kampaně, ceny za RZ a rezervovaný výkon.

### 2) Výdaje

Výdaje na PpS mají pouze fixní část, která odpovídá rozdílu ceny mezi kotlem s nižší pružností a kotlem s pružností vyšší. Dle 4.2 je tento rozdíl do 45 000 EUR.

## 5.2.3 Příjmy a výdaje za dodanou regulační energii

Výdaje na výrobu regulační energie jsou stejné jako v případě prosté dodávky do sítě, příjmy však nelze jednoduše stanovit, vzhledem k povaze dodávky. Běžně se může stát, že nebude obdrženo požadavek na aktivaci RZ. Proto bude pro tuto studii vzat v potaz nejhorší případ, kdy nebude odebrána regulační energie. Příjmy a výdaje budou v této kategorii nulové.

## 5.3 Vstupní předpoklady

### Společné vstupní předpoklady

- Pro všechny varianty byl zvolen typický diskont pro energetické investice 8 %.



- Inlace a růst cen komodit byl zvolen 0 %. Toto rozhodnutí lze podložit trendem v posledních letech, kdy ceny elektřiny a plynu spíše klesaly, než rostly.
- Životnost parního kotle 20 let zvolena podle obvyklé konstrukční životnosti pro tento typ zařízení.
- Průměrná délka kampaně vychází 162 dní tj. 3888 h. Během kampaně se předpokládá plné využití výrobních kapacit.
- Pro všechny varianty se uvažuje kotel s regulací na konstantní tlak za kotlem, čímž bude zachován současný princip regulace. Zároveň bude možné s takto realizovanou regulací dostatečně pružně měnit výkon turbosoustrojí pro požadavky PpS.

### **Varianta 1**

Cena kotle 0 Kč, jedná se o prostou náhradu za stávající kotel. Maximální dosažitelný elektrický výkon je 9,29 MW. Předpokladem je stálá dodávka 4,2 MW do sítě, 5MW pro potřeby technologie.

### **Varianta 2**

Cena kotle je předpokládána o 15 000 EUR vyšší než v případě varianty 1. Maximální dosažitelný elektrický výkon je 10,37 MW. Předpokladem je stálá dodávka 5,3 MW do sítě, 5MW pro potřeby technologie.

### **Varianta 3**

Cena kotle je předpokládána o 70 000 EUR vyšší než v případě varianty 1. Maximální dosažitelný elektrický výkon je 10,37 MW. Předpokladem je možnost získání platby za rezervovaný výkon  $MZ_{t5}$  5,3 MW. Výkon 5MW pro potřeby technologie zůstane zachován. Předpokládá se nejhorší varianta, kdy nedojde během kampaně k aktivaci RZ.

## **5.4 Výsledky případové studie**

Z výše uvedených dat bylo stanoveno NPV pro všechny varianty. Výsledky NPV i kumulovaného  $DCF_t$ <sup>21</sup> jsou jednoznačně nejlepší pro variantu 3.

### **Varianta 1**

NPV 48 762 001 Kč

Kumulovaný  $DCF_{t=1} = 4 598 627$  Kč

Tato varianta je přes další nulovou investici nejméně výhodná a rozhodně nelze doporučit.

### **Varianta 2**

NPV 61 128 001 Kč

Kumulovaný  $DCF_{t=1} = 5 398 030$  Kč

---

<sup>21</sup> Kumulovaný Diskontovaný Cash Flow, udává součet peněžních toků s uvažovanou časovou změnou hodnoty peněz od prvního roku do roku t.[20]

Oproti variantě 1 je již po prvním roce vyšší CF. Investice do výkonnějšího kotle se jednoznačně vplatí, navíc bude výkonnější kotel tvořit rezervou v případě zvýšení výkonnosti technologie výroby, např. při rekonstrukci pohonů technologie.

### **Varianta 3**

NPV 93 531 348 Kč

Kumulovaný  $DCF_{t=1} = 7\,674\,804$  Kč

I přes nejvyšší investici do kotle je dle kumulovaného DCF patrné, že se investice již po prvním roce vrátila. A generuje podniku největší zisk. Situace by se nezměnila ani, kdyby došlo k přehodnocení udělení zeleného bonusu, v důsledku neuznání paralelního toku tepla jako oddělené výroby. Zelený bonus je ročně pouze 880 000 Kč. Navíc bude docházet k menšímu opotřebení turbosoustrojí a poklesu nákladů na údržbu vůči variantě 1 a 2.

## 6 Závěr

Diplomová práce se zabývá ve své první části technickými částmi, které dohromady tvoří celek pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Protože zadáním bylo řešit konkrétní technickou situaci v průmyslovém podniku, je rozebrána problematika týkající se kombinované výroby založené na použití parního plynového kotle a parní turbíny. Hlavním cílem této části bylo popsat možnosti regulace a základní výpočetní vztahy pro navrhování teplárenských provozů.

Druhá část práce se zabývá podmínkami pro poskytování PpS. Dále pak platbám za PpS a regulační energii. Tato část stručně shrnuje informace pro návrh techniky a pro ekonomické zhodnocení.

Součástí práce je matematický model v softwaru Wolfram Mathematica, který k ověření technické proveditelnosti úpravy výroby elektřiny pro poskytování technické proveditelnosti a dále k jeho vlastnímu návrhu. Výsledkem návrhu jsou konstrukční požadavky na výrobce.

Po provedení případové studie se ukázalo, že pokud se podaří dohodnout s provozovatelem přenosové soustavy výkon nižší než je uvedený v kodexu přenosové soustavy, jedná se o velmi výhodnou investici. Tato investice má vzhledem k nutnosti výměny kotle dobu návratnosti jedna kampaň.

## Reference

- [1] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU ze dne 25. října 2012 o energetické účinnosti, o změně směrnic 2009/125/ES a 2010/30/EU a o zrušení směrnic 2004/8/ES a 2006/32/ES, ve znění směrnice Rady 2013/12/EU ze dne 13. května 2013 - konsolidované znění
- [2] ŠŤASTNÝ, Jiří. *Kogenerace* [online]. Praha [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://watt.feld.cvut.cz/vyuka/ESZ/index.htm>
- [3] KARTÁK, Jan. *Řízení a automatizace energetických zařízení*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00745-6.
- [4] ŠŤASTNÝ, Jiří. *Energetická strojní zařízení*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03585-9.
- [5] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).
- [6] ČSN 07 0010. *Základní parametry a výkony pro parní kotle stabilní*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1984.
- [7] ŠKORPÍK, Jiří. Parní turbína v technologickém celku, *Transformační technologie*, 2011-04, (last updated 2016-03-08). Brno: Jiří Škorpík, (on-line) pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/parni-turbina-v-technologickem-celku.html>.
- [8] <http://docplayer.cz/12256956-Typy-kotlu-jejich-deleni-podle-vybranych-hledisek-kotel-horkovodni-typu-kotlu-7-12-2015-deleni-z-hlediska.html> obrázky kotlů
- [9] Vážené průměry ceny PpS 2016. ČEPS,a.s. (online). 2011 (cit. 2013-05-24). Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Jak-seobstaravaji-PpS/Stranky/Vazene-prumery-cenPpS2013.aspx>
- [10] Zákon č. 458/2000 Sb., energetický zákon
- [11] OTE: *Roční zpráva* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/statistika/rocni-zprava>
- [12] *Kotle* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr7\[1\].pdf](http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr7[1].pdf)
- [13] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [14] VILIMEC, Ladislav. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 9788024818535.
- [15] Zákon č. 165/2012 Sb., Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů
- [16] MARECKI, Jacek. *Hospodárná výroba tepla a elektřiny v teplárnách*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1978, 223 s.
- [17] ROHDE, Clemens, Ali AYDEMIR, Simon HIRZEL a Berit OSTRANDER. *Ecodesign Preparatory Study on Steam Boilers (ENTR Lot 7)* [online]. , 170-180 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.eco-steamboilers.eu/eco-steamboilers-wAssets/docs/20141217-Steam-Boilers-Ecodesign-Final-Report.pdf>
- [18] Elektřina - aktuální a historické ceny elektřiny, graf vývoje ceny elektřiny - od 1.9.2016 - měna CZK. *Kurzycz* (online). (cit. 2017-04-18). Dostupné z: <http://www.kurzycz.com/komodity/index.asp?A=5&idk=142&od=1.9.2016&do=30.3.2017&curr=CZK>

- [19] PXE - Zemní plyn - aktuální a historické ceny zemního plynu, graf vývoje ceny zemního plynu - 1 rok - měna CZK. *Kurzycz* (online). (cit. 2017-04-18). Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/komodity/index.asp?A=5&idk=6329&od=18.4.2016&do=17.4.2017&curr=CZK>
- [20] VAŠÍČEK, Jiří. ČVUT FEL. *Cash Flow* [přednáška]. 2011 [cit. 2017-05-11]. Dostupné také z: <https://ekonom.feld.cvut.cz/cs/student/predmety/ucetnictvi-a-finance>
- [21] Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů

## Tištěné přílohy

Tabulka A. 1 - Průměrné výroby a spotřeby el. energie během kampaně 2014-2015

Tabulka A. 2 - Průměrné výroby a spotřeby tepelné energie během kampaně 2014-2015

Příloha B. 1 – Zdrojový kód matematického modelu v programu Wolfram Mathematica 10.4

Příloha B. 2 – Případová studie - výpočty

Statistika spotřeby elektrické energie (nákup, prodej, výroba)							
měsíc	Svorková výroba (MWh)	spotřeba (MWh)	nákup (MWh)	celková spotřeba (MWh)	dodávka (MWh)	provoz	rok
srpen	0	0,000	172,780	173	0	údržba	2014
září	2 299,488	2 011,477	119,031	2 131	288	kampaň+údržba	
říjen	3 905,088	3 400,120	0,364	3 400	505	kampaň	
listopad	4 077,600	3 594,719	0,340	3 595	483		
prosinec	4 032,960	3 552,047	9,461	3 562	481		
leden	4 053,984	3 530,934	0,320	3 531	523	kampaň	2015
únor	3 419,808	3 043,817	6,223	3 050	376		
březen	405,408	359,166	166,508	526	46	kampaň+údržba	
duben	0	0,000	173,954	174	0	údržba	
<b>Zelený bonus za kampaň</b>	998 745	Kč					

Tabulka A. 1 - Průměrné výroby a spotřeby el. energie během kampaně 2014-2015

rok	Spotřeba tepelné energie v páře při KVET (MWh)	Množství užitého tepla z KVET (MWh)	Celková spotřeba tepla v páře (MWh)	Celková spotřeba tepla v páře pro výrobu tepla (MWh)	Úspora primární energie (%)	provoz
2014	0	0	0	0	0	údržba
	22168,9	19553,2	32369,8	29870,3	14	kampaň+údržba
	37648,1	33206,0	54971,8	50727,1	14	kampaň
	39311,3	34672,9	57400,2	52968,0	14	
38880,9	34293,4	56771,8	52388,2	14		
2015	39083,6	34472,1	57067,8	52661,3	14	kampaň
	32969,7	29079,6	48140,5	44423,3	14	kampaň+údržba
	3908,5	3447,3	5706,9	5266,2	14	
	0	0	0	0	0	údržba

Tabulka A. 2 - Průměrné výroby a spotřeby tepelné energie během kampaně 2014-2015

```

In[1]= Quiet@Remove["Global`*"];
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
Qje = 0.36; (*viz kapitola 1.1.1*)
Qjc = 8.315; (*viz kapitola 1.1.1*)
Qj = Qje + Qjc; (*viz (8)*)
QTp = QTe + QTc; (*viz (7)*)
cTe =  $\frac{1}{0.92} - \frac{Qje}{6}$ ; (*viz (18)*)

```

### Vnitřní charakteristika turbosoustrojí $QTc = f(Pp)$ dle dat výrobce

```

In[9]= Data = {1, 14.224, 2, 19.776, 3, 25.326, 4, 30.876, 5, 36.427, 6, 41.977} // Flatten;
(*data od výrobce turbíny tepelný výkon dodávaná z
protitlaku v závislosti na elektrickém výkonu Tab. 7*)
TepelneVykony = Partition[Data, 2];
graf = ListPlot[TepelneVykony];
fce = a * xb + 8.315; (*nalezení funkce vnitřní charakteristiky*)
find = FindFit[TepelneVykony, fce, {a, b}, x];
QTc = fce /. find; (*funkce vnitřní charakteristika*)
graf2 = Plot[QTc, {x, 0, 6}, Axes -> {True},
  AspectRatio -> 1, PlotStyle -> {Red, Thickness[0.005]},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "QTc (MW)"}, GridLines -> Automatic];
Show[graf2, graf];

```

### $\eta = f(Pp)$ dle výrobce

```

In[17]= Data1 = {1, 6.96, 2, 9.8, 3, 11.32, 4, 12.3, 5, 12.96, 6, 13.45} // Flatten;
Ucinnost = Partition[Data1, 2];
grafU = ListPlot[Ucinnost];
fceU = a * xb + f;
findU = Quiet@FindFit[Ucinnost, fceU, {a, b, f}, x];
η = fceU /. findU;
graf2U = Plot[η, {x, 0, 6}, Axes -> {True},
  AspectRatio -> 1, PlotStyle -> {Red, Thickness[0.005]},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "η (%)"}, GridLines -> Automatic];
Show[graf2U, grafU];

```

### Spotřeba tepla na elektrický výkon $QTe=f(Pp)$ dle dat výrobce

```

In[25]= QTe = cTe * x + Qje; (*tepelný výkon odpovídající elektrickému výkonu viz (15)*)
GrafQTe = Plot[QTe, {x, 0, 6}, Axes -> {True},
  AspectRatio -> 1, PlotStyle -> {Red, Thickness[0.005]},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "QTe (MW)"}, GridLines -> Automatic];

```

## Vnější charakteristika turbosoustrojí $Q_{Tp}=f(P_p)$ dle dat výrobce

```

In[27]= GrafQTp = Plot[QTp, {x, 0, 6}, Axes -> {True},
  AspectRatio -> 1, PlotStyle -> {Red, Thickness[0.005]},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "QTp (MW)"}, GridLines -> Automatic];

```

### Charakteristiky poměrných přírůstků

```

In[28]= cTp = D [QTp, x]; (*viz vztah 16*)
  cTc = D [QTc, x]; (*viz vztah 17*)

```

### Korekce na skutečné parametry provozovaných soustrojí

```

In[30]= ΔcTc = 0.1309; (* měrná odchylka od vnitřní
  měrné spotřeby dané výrobcem (MW/MW) Tab.8*)
  ΔcTp = 0.15; (* měrná odchylka od vnější měrné
  spotřeby dané výrobcem (MW/MW) Tab.8*)
  ΔcTe = ΔcTp - ΔcTc; (* měrná odchylka od měrné spotřeby
  tepla na elektrický výkon dané výrobcem (MW/MW) Tab.8*)
  Δη = 0.133;

```

### Korigované charakteristiky turbosoustrojí

```

In[34]= (*Korekce dat naměřených výrobcem na skutečné hodnoty z provozu*)
  nQTc = QTc - ΔcTc * x;
  nQTp = QTp - ΔcTp * x;
  nQTe = nQTp - nQTc;
  nη = η + Δη * x;

```

### Vnitřní charakteristika protitlakového turbosoustrojí korigovaná podle skutečných hodnot z provozu

```

In[38]= Vnitřni = Plot[nQTc, {x, 0, 6}, Axes -> {True}, AspectRatio -> 1,
  PlotStyle -> {Red, Thickness[0.005]}, AxesLabel -> {"Pp (MW)", "QTc (MW)"},
  GridLines -> Automatic, AxesOrigin -> {0, 0}];

```

### Vnější charakteristika protitlakového turbosoustrojí korigovaná podle skutečných hodnot z provozu;

```

In[39]= Vnější = Plot[{nQTp}, {x, 0, 6}, Axes -> {True}, AspectRatio -> 1,
  PlotStyle -> {Red, Thickness[0.005]}, AxesLabel -> {"Pp (MW)", "QTp (MW)"},
  GridLines -> Automatic, AxesOrigin -> {0, 0}];

```



## Model provozu

```

n(40)= ΔIkotelK3 = 3113.27; (*kJ/kg pro 435°C P3,5 Mpa a H2O 45°C*)
ΔIkotelK45 = 2588.31; (*kJ/kg pro 0,9 Mpa a H2O 45°C*)
PK45max = 5.752; (*maximální celkový výkon kotle K4 a K5 pro ΔIkotelK45 MW*)
QTechnologie = 73.56; (* tepelný výkon odebíraný technologií*)
PsvorkyMin = 5; (*elektrický výkon trvale odebíraný technologií*)
nQTc1 = nQTc / . x → P1;
nQTc2 = nQTc / . x → P2;
nQTP1 = nQTP / . x → P1;
nQTP2 = nQTP / . x → P2;
nQTc11 = 2 * nQTc1 / . P1 → (0.5 * x); (*vnitřní charakteristika
pro paralelně pracující stejně zatížená trubosoustrojí*)
nQTP11 = 2 * nQTP1 / . P1 → (0.5 * x);
(*vnější charakteristika pro paralelně
pracující stejně zatížená trubosoustrojí*)
PsvorkyMax = 2 * FindRoot[nQTc1 = 0.5 * QTechnologie, {P1, 5}][[1, 2]]
(*maximální generovaný elektrický výkon
při kterém je zajištěn odběr emisního tepla*)
PK3MaxProPelMax = 2 * nQTP1 / . P1 → (0.5 * PsvorkyMax)
(*výkon kotle K3 pro PsvorkyMax MW*)
PK3vykonostPelMax = (PK3MaxProPelMax / ΔIkotelK3) * 3600
(*výkonost kotle K3 pro PsvorkyMax t/h*)
KotelMin = (QTechnologie - nQTc11 + nQTP11) / . x → 5; (*minimální výkon
kotle K3 pro pokrytí spotřeby tepla technologie a PsvorkyMin MW*)

```

## Navrhovaný výkon kotle v t/h

```

n(55)= PnNavrzeno = 98;
(*navržený výkon kotle v t/h*)
PnNavrzenoMW =  $\frac{PnNavrzeno}{3600} * \Delta IkotelK3$ ;
(*navržený výkon kotle v MW*)

```

## Předem nasmouvaný výkon - optimalizované QTc a QTP pro dosažitelný výkonový rozsah

```

n(57)= (*při dodávce nasmouvané energie se volí rozložení výkonů tak
aby byl co nejnižší tepelný příkon tzn. nejnižší tepelné ztráty*)

```

```

In[58]= RossahP = {{1, 6}, {1, 6}}; (*rossah výkonu turbíny TP 6*)
TeploDodavkaTG = {{nQTc1}, {nQTc2}};
(*minimalizovaná funkce, protitlakový tepelný výkon*)
Psvorky = {5, 5.5, 6, 6.005, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, PsvorkyMax};
(*přizpůsobený výkon v case, od minima technologie po dosažitelné maximum*)

fcePenale[{{a_, b_}, i_] := Abs[ $\left(P_i - \frac{a+b}{2}\right)^5$ ]
 $\left(\frac{1}{2} (-\text{Tanh}[1\,000\,000\,000 (P_i - a)]) + 0.5 + \frac{1}{2} \text{Tanh}[1\,000\,000\,000 (P_i - b)] + 0.5\right) * 500\,000;$ 
fcePenaleProMin[i_] := fcePenale[{{RossahP[[i]], i}];
fcePenaleProMinSKomb[komb_] :=
  komb.Table[fcePenaleProMin[i], {i, Length[TeploDodavkaTG]};

fceNaklady[i_] := TeploDodavkaTG[[i]]
fceNakladySKomb[komb_] :=
  komb.Table[fceNaklady[i], {i, 1, Length[TeploDodavkaTG]}]
nakladyDiagramSKomb[Přadany_, komb_] :=
  (Evaluate[komb.Table[P_i, {i, 1, Length[TeploDodavkaTG]}]] - Přadany)^2 *
  100\,000\,000;
fceSoucetProMin[Přadany_, komb_] := fcePenaleProMinSKomb[komb] +
  fceNakladySKomb[komb] + nakladyDiagramSKomb[Přadany, komb]

pocProMin[komb_] := Table[komb[[i]] * {P_i, 100}, {i, 1, Length[TeploDodavkaTG]}]
pocProMinSKomb[komb_] := Cases[pocProMin[komb], {_Subscript, _}]
fceFindmin[Přadany_, komb_] := Module[{vysl},
  vysl = FindMinimum[fceSoucetProMin[Přadany, komb], pocProMinSKomb[komb]];
  {vysl}
]
kombAll = Drop[Tuples[{0, 1}, 2], 1];
fceHodinaOptimal[hodina_] := Module[{data},
  data = Table[fceFindmin[Přadany[[hodina]], kombAll[[i]]],
    {i, 1, Length[kombAll]}] // Quiet;
  Sort[data][[1]]
] (*optimalizované rozdělení výkonů podle požadovaného celkového Pe1*)

```

## Průběhy tepelných výkonů v závislosti na elektrickém výkonu

```

(73)= QRedukciS = Table[{Psvorky[[i]], QTechnologie - fceHodinaOptimal[i][[1, 1]],
  (i, Length[Psvorky])};
(*tepelný výkon předávaný bypassem redukční stanice*)

QTc12 = Table[{Psvorky[[i]], fceHodinaOptimal[i][[1, 1]], (i, Length[Psvorky])};
(*celkový protitlakový tepelný výkon*)

QTp12 = Quiet@Table[{Psvorky[[i]], Plus[nQTp1 /. fceHodinaOptimal[i][[1, 2, 1]],
  If[NumericQ[nQTp2 /. fceHodinaOptimal[i][[1, 2, 2]]],
    nQTp2 /. fceHodinaOptimal[i][[1, 2, 2]], 0]], (i, Length[Psvorky])};
(*celkový protitlakový tepelný výkon*)

PelVykony1 = Table[fceHodinaOptimal[i][[1, 2, 1, 2]], (i, Length[Psvorky]);
(*výkon TG1 v závislosti na požadovaném celkovém Pel*)

PelVykony2 = Quiet@Table[If[NumericQ[fceHodinaOptimal[i][[1, 2, 2, 2]]],
  fceHodinaOptimal[i][[1, 2, 2, 2]], 0], (i, Length[Psvorky]);
(*výkon TG2 v závislosti na požadovaném celkovém Pel*)

PK3K4K5 = Table[{QRedukciS[[i, 1]], QRedukciS[[i, 2]] + QTp12[[i, 2]],
  (i, Length[Psvorky])}; (*celkový výkon dodávaný v páře*)

(70)= DodavkaDoSite = ListLinePlot[{QTc12, QRedukciS, QTp12, PK3K4K5}, Filling -> Bottom,
  PlotLegends -> {"QTc", "Výkon redukční stanice", "QTp", "Výkon hraních kotů"},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "Q (MW)"}, GridLines -> Automatic];
Limit90t = Plot[If[PnNavrzenoMW > nQTp11, PnNavrzenoMW + PK45max, PnNavrzenoMW],
  {x, 5, PsvorkyMax}, PlotLegends -> {"Limit výkonu 90 t/h"},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "Q (MW)"}, GridLines -> Automatic,
  PlotStyle -> {Black, Thickness[0.007]}, AxesOrigin -> {5, 0}];
DodavkaSlimitem = Show[DodavkaDoSite, Limit90t]

```

## Rozdělení elektrických výkonů TG1 a TG2 v závislosti na požadovaném celkovém výkonu - režim trvalé dodávky

```

In[82]= PrubehyPel =
  ListLinePlot[{Table[{i - 1, Drop[Psvorky, {4}][[i]], {i, Length[Psvorky] - 1}},
    Table[{i - 1, Drop[PelVykony1, {4}][[i]], {i, Length[Psvorky] - 1}},
    Table[{i - 1, Drop[PelVykony2, {4}][[i]], {i, Length[Psvorky] - 1}}], Filling ->
  Bottom, PlotLegends -> {"TG 1+2", "TG 1", "TG 2", "Pel MAX", "Pel MIN"},
  AxesLabel -> {"-", "Pp (MW)", GridLines -> Automatic,
  PlotStyle -> {{Green, Thickness[0.007]},
    {Yellow, Thickness[0.007]}, {Blue, Thickness[0.007]}}};
  PMINMAX = ListLinePlot[{{(0, PsvorkyMax), {11, PsvorkyMax}}, {{0, 5}, {11, 5}}},
  PlotLegends -> {"Pel MAX", "Pel MIN"},
  PlotStyle -> {{Red, Thickness[0.007]}, {Black, Thickness[0.007]}}];
  RozlozeniSatiszeni = Show[PrubehyPel, PMINMAX]

```

## Diagram při poskytování podpůrných služeb

```

In[85]= VykonyPPS = Plot[{nQTc11, nQTp11, 0.5 x, QTechnologie - nQTc11,
  QTechnologie - nQTc11 + nQTp11, If[PnNavrzenoMW > nQTp11,
  PnNavrzenoMW + PK45max, PnNavrzenoMW]}, {x, 5, PsvorkyMax},
  PlotLegends -> {"QTp", "QTc", "TG 1 = TG 2", "Výkon redukční stanice",
  "Potřebný parní výkon", "Navržený výkon + K4 a K5"},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "Q (MW)", GridLines -> Automatic,
  PlotStyle -> {{Black, Thickness[0.007]}, {Red, Thickness[0.007]},
    {Blue, Thickness[0.007]}, {Yellow, Thickness[0.007]},
    {Orange, Thickness[0.007]}, {Green, Thickness[0.01]}}, AxesOrigin -> {5, 0}]

In[86]=

In[87]= EmenaPpS = Plot[{QTechnologie - nQTc11 + nQTp11}, {x, 5, PsvorkyMax},
  PlotLegends -> {"Výkon parních kotlů pro Pel 5-10,371 MW"},
  AxesLabel -> {"Pp (MW)", "Q (MW)",
  GridLines -> {{(5, PsvorkyMax), {KotelMin, PK3MaxProPelMax}}, PlotStyle ->
  {{Orange, Thickness[0.007]}, {Green, Thickness[0.01]}}, AxesOrigin -> {5, 78}]

In[88]= EmenaPkotle = D[{QTechnologie - nQTc11 + nQTp11}, x];
  EmenaPkotle /. x -> 6

In[89]= TypPpS = 5; (*RMS t5 - minuty pro uvolnění zálohy*)

In[90]= SjednanyP = PsvorkyMax - PsvorkyMin; (*velikost regulační zálohy*)

In[91]= PozadovaRychlostRegulace = EmenaPkotle * (SjednanyP / TypPpS) /. x -> 5
  (*požadovaná rychlost změny výkonu kotle
  pro poskytnutí zjednané zálohy ve zjednaném čase*)

```

```
In[93]:= Pprocentne = (PozadovaRychlostRegulace / PnNavrzenoMW) * 100
(*maximální růst výkonu v % jmenovitého výkonu*)

In[94]:= KontrolaP[v_] := If[(PnNavrzenoMW > nQTp11 /. x -> v),
  "Výkon kotle je dostatečný pro požadovaný elektrický výkon" v "MW",
  "Výkon kotle je nedostatečný pro požadovaný elektrický výkon" v "MW"]
(*kontrola výkonu kotle*)

In[95]:= KontrolaP[9.5]

Export["satiseni.png", EmenappS];
```

Příloha B. 2 – Případová studie - výpočty

Případová studie - výpočty část 1.

kotel	-	EUR
cena plynu vč distribuce	496,4	Kč/MW
MAX výkon svorkový	9,200	MW
výkon technologie elektrický	3,000	MW
doba maxima = doba kampaně	3888	h
měrná spotřeba TG	1,008	MW/Mwe
účinnost kotle	0,930	-
cena za silovou elektřinu	797,090	Kč/MWh
zelený bonus	45,0	Kč/MWh
kurz EUR/CZK	27	Kč
růst cen elektrické energie	0,0%	
růst cen zemního plynu	0,0%	
inflace	0,0%	
eskalice zemního plynu	0,0%	
diskont	8,0%	
životnost	20	let

kotel	13 000	EUR
cena plynu vč distribuce	496,4	Kč/MW
MAX výkon svorkový	10,300	MW
výkon technologie elektrický	3,000	MW
doba maxima = doba kampaně	3888	h
měrná spotřeba TG	1,008	MW/Mwe
účinnost kotle	0,930	-
cena za silovou elektřinu	797,090	Kč/MWh
zelený bonus	45,0	Kč/MWh
kurz EUR/CZK	27	Kč
růst cen elektrické energie	0,0%	
růst cen zemního plynu	0,0%	
inflace	0,0%	
eskalice zemního plynu	0,0%	
diskont	8,0%	
životnost	20	let

kotel	70 000	EUR
regulační energie	0	h
cena plynu vč distribuce	496,4	Kč/MW
MAX výkon svorkový	10,300	MW
výkon technologie elektrický	3,000	MW
doba maxima = doba kampaně	3888	h
měrná spotřeba TG	1,008	MW/Mwe
účinnost kotle	0,930	-
cena za regulační energii	2 397,740	Kč/MWh
cena za MZt3	301,300	Kč/MWh
zelený bonus	45,0	Kč/MWh
kurz EUR/CZK	27	Kč
růst cen elektrické energie	0,0%	
růst cen zemního plynu	0,0%	
inflace	0,0%	
eskalice zemního plynu	0,0%	
diskont	8,0%	
životnost	20	let

Varianta 1

rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
investice	-										
cena spotřebovaného zemního plynu na výrobu elektrické energie pro dodávku		8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475
Příjem ze dodanou energii		13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993
CF	-	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517
DCF	-	4 598 627	4 237 988	3 942 582	3 650 539	3 380 128	3 129 748	2 897 915	2 683 255	2 484 495	2 300 459
DCF kumulovány		4 598 627	8 856 615	12 799 197	16 449 736	19 829 864	22 959 613	25 857 528	28 540 783	31 025 278	33 325 736

NPV =	48 762 001
NPV kontrola	48 762 001

Varianta 2

rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
investice	405 000											
cena spotřebovaného zemního plynu na výrobu elektrické energie pro dodávku		11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	
Příjem ze dodanou energii		17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	
CF	-	405 000	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	
DCF	-	405 000	3 803 030	3 373 176	4 975 163	4 606 632	4 285 400	3 949 444	3 656 893	3 386 012	3 135 196	2 902 960
DCF kumulovány		3 398 030	10 771 205	15 746 368	20 353 000	24 618 400	28 567 844	32 224 737	35 610 750	38 745 946	41 648 905	

NPV =	61 128 001
NPV kontrola	61 128 001

Varianta 3

rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
investice	1 890 000											
cena spotřebovaného zemního plynu na výrobu elektrické energie pro dodávku		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Příjem ze dodanou regulační energii												
Příjem ze MZt3		10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	
CF	-	1 890 000	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	
DCF	-	-1890000	9 564 804	8 856 300	8 200 278	7 592 850	7 030 416	6 509 645	6 027 449	5 580 971	5 167 566	4 784 783
DCF kumulovány		7 674 804	16 531 104	24 731 382	32 324 232	39 354 648	45 864 293	51 891 742	57 472 713	62 640 279	67 425 062	

NPV =	99 531 348
NPV kontrola	99 531 348

Případová studie - výpočty část 2.

varanta 1

rok	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
investice										
cena spotřebovaného zemního plynu na výrobu elektrické energie pro dodávku	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475	8 784 475
Příjem za dodanou energii	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993	13 750 993
CF	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517	4 966 517
DCF	2 130 054	1 972 272	1 826 178	1 690 906	1 565 653	1 449 679	1 342 195	1 242 866	1 150 802	1 063 357
DCF kumulovaný	35 455 791	37 428 063	39 254 241	40 945 147	42 510 800	43 960 479	45 302 775	46 545 641	47 696 443	48 762 001

Varianta 3

rok	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
investice										
cena spotřebovaného zemního plynu na výrobu elektrické energie pro dodávku	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171	11 085 171
Příjem za dodanou energii	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443	17 352 443
CF	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272	6 267 272
DCF	2 687 926	2 488 820	2 304 463	2 133 762	1 975 706	1 829 357	1 693 849	1 568 379	1 452 203	1 344 632
DCF kumulovaný	44 336 831	46 825 651	49 130 114	51 263 876	53 239 381	55 068 938	56 762 787	58 331 166	59 783 369	61 128 001

Varianta 3

rok	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
investice										
cena spotřebovaného zemního plynu na výrobu elektrické energie pro dodávku	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Příjem za dodanou regulační energii	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Příjem za MZts	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988
CF	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988	10 329 988
DCF	4 430 355	4 102 180	3 798 315	3 516 959	3 256 443	3 015 225	2 791 875	2 585 070	2 393 383	2 216 280
DCF kumulovaný	71 855 417	75 957 598	79 755 913	83 272 872	86 529 315	89 544 540	92 336 415	94 921 485	97 315 068	99 531 348

## **Elektronické přílohy**

Př. E. 1 Model provozu

*Model\_provozu.nb*

Př. E. 2 Statistika energetického hospodářství, kampaň 2014

*Statistika\_energie.xlsx*

Př. E. 3 Případová studie

*Pipadova\_studie.xlsx*