

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrhy opatření vedoucí ke snížení dosažitelného výkonu
teplárny v době nízkých, nebo záporných cen elektřiny**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán PABIAN**
Osobní číslo: **E14N0146P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Návrhy opatření vedoucí ke snížení dosažitelného výkonu teplárny v době nízkých, nebo záporných cen elektřiny**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Popište problematiku provozu tepláren, z vnějšího a vnitřního prostředí.
2. Uveďte, jaké jsou možnosti hlediska k dosažení cíle.
3. Stanovte limity při nasazování zdrojů.
4. Navrhněte opatření na příkladu vzorové teplárny.
5. Vypočtěte provozní veličiny a očekávané úspory.
6. Proveďte ekonomické posouzení výhodnosti provozu akumulace (NPV CF, IRR).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Určí vedoucí DP na první konzultaci.
2. www stránky, katalogové listy.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Zbyněk Martínek, CSc.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh opatření vedoucí ke snížení dosažitelného výkonu teplárny v době nízkých, nebo záporných cen elektřiny.

V první části této diplomové práce je popsána obecně teorie problematiky provozu tepláren. Je zde popsáno teplárenství a jeho vývoj, princip tepláren a jejich jednotlivá technologická zařízení. Dále jsou formou teorie popsány způsoby snižování výkonu tepláren v závislosti na jejich technologických možnostech. V praktické části jsou vypočteny provozní parametry teplárny a elektrárenských bloků typu 200 MW a jsou porovnány mezi sebou. Jako poslední bod je výpočet návrhu akumulace v teplárně.

Klíčová slova

Záporné ceny, elektřina, teplárna, výroba, výkon, snížení výkonu, dosažitelný výkon

Abstract

This master thesis is focused on the design measures to reduce the maximum power of thermal power plant in times of low or negative electricity prices.

In the first part of this thesis is described the theory of thermal power plants. There is described heating industry and its development, the principle of heating plants and their individual technological equipment. Further form of theory describes ways of reducing power of the heating plants depending on their technological possibilities. In the practical part are calculated operating parameters of the heating plant and 200 MW power plant blocks and are compared with each other. At the end is the calculation of the draft accumulation at the plant.

Key words

Negative prices, electricity, heating plant, production, performance, power reduction, achievable performance

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 12.5.2016

Štěpán Pabian

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Benešovi, Ph.D. za užitečné rady a připomínky, ochotu projevenou při plnění práce a za čas, který mi věnoval. Rovněž děkuji doc. Ing. Zbyňkovi Martínkovi, CSc. za odborné vedení práce. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 PROBLEMATIKA PROVOZU TEPLÁREN	11
1.1 TEPLÁRENSTVÍ	11
1.1.1 Vývoj teplárenství	12
1.2 TEPLÁRNY	14
1.3 PARNÍ KOTEL	16
1.3.1 Roštové kotle	20
1.3.2 Práškové kotle	20
1.3.3 Fluidní kotle	21
1.4 PARNÍ TURBÍNA	21
1.4.1 Kondenzační turbína	21
1.4.2 Protitlaká turbína	22
1.5 SOUSTAVY CENTRALIZOVANÉHO ZÁSOBOVÁNÍ TEPEM	22
2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI PRO SNÍŽENÍ VÝKONU TEPLÁRNY	23
2.1 MLETÍ VÁPENCE	24
2.2 PŘECHOD Z TURBONAPAJEČKY NA ELEKTRONAPAJEČKU	25
2.3 PÁSOVÝ DOPRAVNÍK	25
2.4 ODSÍŘENÍ	25
3 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO 200 MW BLOKY	27
3.1 ELEKTRÁRNY CHVALETICE A DĚTMAROVICE	27
3.2 VÝPOČET PROVOZNÍCH PARAMETRŮ	28
4 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO TEPLÁRNU DVŮR KRÁLOVÉ	42
4.1 TEPLÁRNA DVŮR KRÁLOVÉ	42
4.2 VÝPOČET PROVOZNÍCH PARAMETRŮ TDK	43
4.2.1 Původní stav	43
4.2.2 Návrh nového stavu parametrů	46
4.3 DALŠÍ ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ VÝKONU	48
4.4 POROVNÁNÍ MEZI ELEKTRÁRNOU A TEPLÁRNOU	49
4.4.1 Elektrárna s 200MW bloky	50
4.4.2 Teplárna Dvůr Králové	50
5 NÁVRH AKUMULACE A EKONOMICKÉ POSOUZENÍ	52
5.1 NÁVRH AKUMULACE	52
5.2 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	54
5.2.1 NPV	54
5.2.2 IRR	56
ZÁVĚR	58
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	59
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

Zkratka	Význam	Jednotka
SCZT	Soustava centralizovaného zásobování teplem	
TDK	Teplárna Dvůr Králové	
K1-3	Kotel	
ROP	Redukce ostré páry	
PT	Protitlaká turbína	
KO	Kondenzační turbína	
AKU	Akumulace	
TG	Turbogenerátor	
IRR	Vnitřní výnosové procento	
NPV	Čistá současná hodnota	
CF	Peněžní tok	
r	Úroková míra	(%)
IN	Počáteční investice	(Kč)
t	Teplota	(°C)
i	Entalpie	(kJ/kg)
p	Tlak	(Pa)
s	Entropie	(kJ/kgK)
η	Účinnost	(%)
M	Množství páry	(t)
α	Poměrné množství páry	(%)
P	Elektrický výkon	(W)
δ	Procentní odchylka	(%)
Q	Akumulační schopnost	(J)
q_{el}	Měrná spotřeba tepla na elektrickou energii	(GJ/MWh)
S_{PAL_EV}	Měrná spotřeba tepla na elektrickou energii	(GJ/MWh)
S_{PAL_ED}	Měrná spotřeba tepla na elektrickou energii	(GJ/MWh)

Úvod

Tato předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh opatření vedoucí ke snížení dosažitelného výkonu teplárny v době nízkých, nebo záporných cen elektřiny.

V první části této diplomové práce je popsána problematika provozu tepláren, ale i vývoj historie teplárenství. Je zde popsáno, jak pracují jednotlivé systémy. Co je jejich primárním zdrojem pro výrobu elektřiny a tepla a jaké jsou nejpoužívanější. Dále jsou zde popsány technologická zařízení používaná v teplárnách. Součástí první kapitoly je i popis soustavy centralizovaného zásobování teplem. V druhé kapitole jsou formou teorie popsány technologické možnosti snížení výkonu teplárny. Jedná se zejména o mletí vápence, využití pásového dopravníku, ale i odsíření.

Dále navazuje praktická část práce, kde jsou počítány provozní parametry elektrárenských bloků typu 200 MW a jejich popis, v jakých elektrárnách se používaly. Popsána je rovněž teplárna Dvůr Králové. Její historie a technologický popis. Je zde rovněž proveden výpočet provozních parametrů. Pro názornost je zde porovnání mezi teplárnou a elektrárenskými bloky. Aby bylo navrženo snížení výkonu, tak jsou v dalším výpočtu upraveny vstupní provozní parametry teplárny a vyvozeny možnosti dalších způsobů snižování výkonu.

Poslední bod zadání se zabývá návrhem akumulace a jejím ekonomickým zhodnocením. Je zde tedy navržena akumulární nádrž na vodu. Výpočet je proveden pro dvě varianty nádrží pro lepší posouzení. Tyto návrhy jsou poté porovnány z ekonomického hlediska pomocí ukazatelů NPV a IRR, které jsou zde rovněž popsány.

1 Problematika provozu tepláren

Tato kapitola je zaměřena na teplárenství a jeho historii. Je zde popsán vývoj teplárenství jak před rokem 1945 tak i poté. Dále je zde uveden popis teplárny spolu s jejími energetickými zařízeními a také soustava centralizovaného zásobování teplem.

1.1 Teplárenství

Dříve se pod pojmem teplárenství skrývala kombinovaná výroba elektrické energie a tepla. Ovšem podle [1] postupem času došlo k vývoji nových technologií a terminologií, jako je například kogenerace a kombinovaný cyklus, a tak pojem teplárenství ztrácel na svém významu.

V České republice je teplárenstvím nazýváno všechno, co je nějak spojeno se zásobováním teplem. Tím se myslí výrobní a distribuční společnosti bez výroby elektrické energie. Teplárenství se bere jako část energetiky, kdy se domy, byty a průmyslové závody zásobují teplem za pomoci soustav centralizovaného zásobování teplem, známou pod zkratkou SCZT. [1]

Zdroj [2] tvrdí, že dle Teplárenského sdružení České republiky je na síť centralizovaného zásobování teplem napojeno téměř 1,5 milionu domácností, přičemž k zajištění dodávek tepla je využíváno v České republice deset tisíc kilometrů tepelných sítí.

Soustavy centralizovaného zásobování teplem tvoří zdroje tepla, které jsou na sebe vzájemně napojeny pomocí tepelných sítí k tomu určených. Také na sebe mohou být napojeny předávacími stanicemi nebo například vnitřními spotřebitelskými zařízeními. Zdroje tepla v SCZT jsou samostatné výrobní energie s podmínkou, že alespoň jedna z vyráběných energií je tepelná a je dodávána do tepelných sítí napojených na SCZT. Tepelné sítě slouží k propojení tepelných zdrojů a spotřebitelů. Rovněž lze propojovat mezi sebou i tepelné zdroje, nebo se můžou tyto sítě napojit do předávacích stanic. V těchto zařízeních se upravují parametry teplotonosné látky tak, aby korespondovaly se zařízeními spotřebitelů. [1]

1.1.1 Vývoj teplárenství

Společnost si začala uvědomovat, že jsme na dostatečném ale také spolehlivém zásobování energiemi velmi závislí. Zároveň ale podle [3] začíná energie „ubývat“, čímž dochází k růstu cen a rovněž ubývá lhostejnosti ohledně dopadu na životní prostředí během získávání energie.

- **Předválečné období**

V předválečném období, tj do roku 1945 probíhal rozvoj sítí určených k rozvodu vody, plynu a elektrické energie. Tím došlo k pozdějšímu rozvoji rozvodu tepla v průmyslových závodech a poté i ve velkých městech. Například James Watt vytápěl svoji továrnu již v roce 1770 spolu se svým bytem, nebo Francouz Bonnemann zavedl v pařížské Akademii teplovodní vytápění. Ovšem jako zakladatel teplárenství je považován Američan Holly. Ten nechal zásobovat parovodem dlouhým 5 kilometrů několik budov v Lockportu již v roce 1876 a v roce 1882 si nechal patentovat princip využití páry z výfuků parních strojů za účelem vytápění. [4]

V zemích na Českém území se používala koncem 19. století pára z parních strojů. Její využití si našlo uplatnění v technologiích a vytápění průmyslových závodů. Například v cukrovarech, textilkách a papírnách. V Praze na Karlíně byla stejnosměrná elektrárna, která začala dodávat páru o tlaku 0,35 MPa v roce 1895 do školy a radnice, ale i tehdy nová střídavá elektrárna v Holešovicích začala dodávat páru o pět let později. V letech 1919 – 1920 došlo ke vzniku první městské teplárny. Stalo se tak v Ústí nad Labem přestavbou městské elektrárny, kde došlo k výstavbě dvou nových vodotrubnatých kotlů spolu s odběrovou turbínou. Došlo tak k dodávání páry o tlaku 1,45 MPa k vytápění školy. Později byl přistavěn třetí kotel a postavila se protitlaková turbína. Rovněž došlo k rozšíření tepelné sítě ve městě. Další města zasažená tímto rozvojem byla Krnov, Mariánské Lázně a Praha-Holešovice. V Holešovicích došlo k napojení na parovod s ostrou párou generovanou kotli Garbe o tlaku 1,5 MPa pro zásobování Veletržního paláce, obytných budov a jatek. Stalo se tak díky napojení hlavního města Prahy na elektrárnu Ervěnice pomocí 110 kV linky. V Brně byla spuštěna

ve třicátých letech tehdy nejmodernější teplárna v Evropě, která pracovala s práškovými kotli. Následovalo několik dalších měst. Například Praha-Vysočany, Kolín, Děčín, Karlovy Vary,

Pardubice a další. Ovšem mezi hlavní se počítala právě teplárna v Holešovicích. Ta pracovala s kotlem Löffler. Parametry tohoto kotle byly 60 t/hodinu, pára měla tlak 13 MPa a teplotu 480 °C a dvě protitlakové turbíny 2 x 6 MW. [4]

- **Poválečné období**

V poválečných letech došlo k největšímu rozvoji velkých teplárenských celků způsobeným zejména rozvojem těžkého, energeticky náročného průmyslu. Rovněž na tom mělo podíl shromažďování obyvatel do aglomerací. Docházelo tedy k zakládání soustav dálkového zásobování teplem. Týkalo se to například hustě zabydlených měst, jako jsou Plzeň, Praha a další krajská města. [3]

V této době se teplárenství zaměřilo na obnovu průmyslu. Využívaly se městské elektrárny (České Budějovice, Poříčí, Přerov), ale rovněž se začaly stavět i teplárny nové, jejichž pracovní tlak byl roven 6,4 MPa a s parními rozvody. Mezi takto nově vystavené teplárny se řadily například teplárna v Olomouci, Strakonících, Dvoře Králové a další. Jejich využití bylo velmi dobré, díky velkému průmyslovému odběru. Na Ostravsku byly velké bytové zástavby zásobovány teplem kondenzační a důlní elektrárny. Ty byly později doplněny protitlakovými turbínami. V Praze se stavěly provizorní výtopny určené pro velká sídliště. V některých případech se dokonce používaly v těchto výtopnách staré přenesené kotle. Poté se uvedly do provozu tři malé protitlakové teplárny na uhlí, jejichž tlak byl 3,8 MPa. Jednalo se o Veleslavín, Michle 1 a Malešice 1. Tyto tři teplárny zajišťovaly dodávku horké vody i páry. K realizaci velké uhelné teplárny došlo teprve v roce 1970. Její parametry byly 1,3 MPa a jednalo se o Malešice 2. Rovněž byla plánována teplárna na mazut – Třeboradice, která měla stát mimo zastavěnou oblast a byla určena pro Severní Město. Dosluhující Teplárna v Ústí nad Labem byla nahrazena teplárnou Trmice, která byla v blízkosti a začala tak dodávat do města páru. Tato pára byla přiváděna parovody o průměru 500/250 a 600/250 mm. Jejich výstavba proběhla v letech 1960 a 1969. Na severu Čech se otvíraly nové povrchové uhelné doly s čímž souviselo i stavění nových elektráren. Úpravny uhlí společně s doly byly zásobovány párou z elektrárny Tušimice. A rovněž zásobila horkou vodou sídliště v Kadani. Dále se zde vystavěla elektrárna Prunéřov, která zásobila horkou vodou sídliště v Klášterci. [4]

Celkový přehled o vývoji teplárenství je zobrazen v tabulce 1:

Tabulka 1: Přehled vývoje teplárenství v České republice, zdroj: [3]

Období Charakteristika	20. až 40. léta 20. století	50. a 60. léta 20. století	70. a 80. léta 20. století	Přelom tisíciletí	20. a 30. léta 21. století
Charakteristika vývoje teplárenství v ČR	Počátek teplárenství	Extenzivní rozvoj	Technické zaostávání	Ekologizace Racionalizace	Intenzifikace Kvalita
Typické zdroje nově budovaných SCZT	Teplárny (Výtopny)	Elektrárny (Teplárny)	Výtopny (Elektrárny)	Malé teplárny	Všechny typy
Typické druhy používaných paliv	Uhlí	Uhlí	Topné oleje (Uhlí)	Zemní plyn (Uhlí)	Všechny druhy (Biomasa)
Typicky používaná teplonosná látka	Pára	Horká voda (Pára)	Horká voda	Teplá voda (Horká voda)	Teplá voda
Charakteristika zásobované oblasti	Průmysl (Sídliště)	Města (Průmysl)	Sídliště (Průmysl)	Sídliště	Části měst
Používaný způsob uložení tepelných sítí	Nadzemní (Kanálové)	Kanálové (Nadzemní)	Kanálové	Bezkanálové podzemní	Bezkanálové podzemní
Běžné používané typy odběrných zařízení	Přímé odběry (objektové předávací stanice)	Okreskové předávací stanice	Okreskové předávací stanice	Objektové předávací stanice (přímé odběry)	Objektové předávací stanice (přímé odběry)

1.2 Teplárny

Teplárny jsou technologická zařízení, zabývající se kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla.

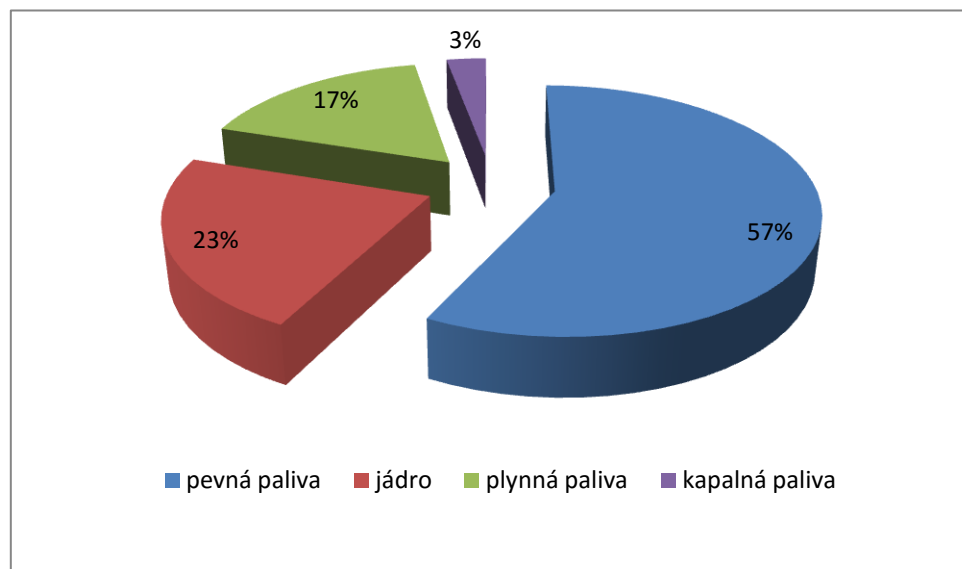
Principem funkce teplárny je přenos energie ve formě vodní páry, která se vyprodukuje v parním kotli. Přeměnu vody na páru v kotli zajišťují zdroje primární energie, které se spalují a uvolňují tak tepelnou energii potřebnou na přeměnu vody na vodní páru. Při výrobních procesech dochází podle [5] k tvorbě druhotných energetických zdrojů.

Nejčastější zdroje primární energie se dělí do čtyř základních skupin. Jedná se o pevná paliva, kapalná, plynná a také o jadernou energii. Tyto čtyři skupiny se dále dají rozepsat na jednotlivé typy paliv, které se používají v České republice nejvíce.

Nejvíce používané zdroje primární energie jsou:

- hnědé uhlí
- černé uhlí
- zemní plyn
- mazut
- biomasa

Dále pak jako zdroj primární energie lze použít i geotermální energii anebo odpad. Na obrázku 1 je zobrazeno, jak je v České republice pokryta celková spotřeba v závislosti na primárních zdrojích.



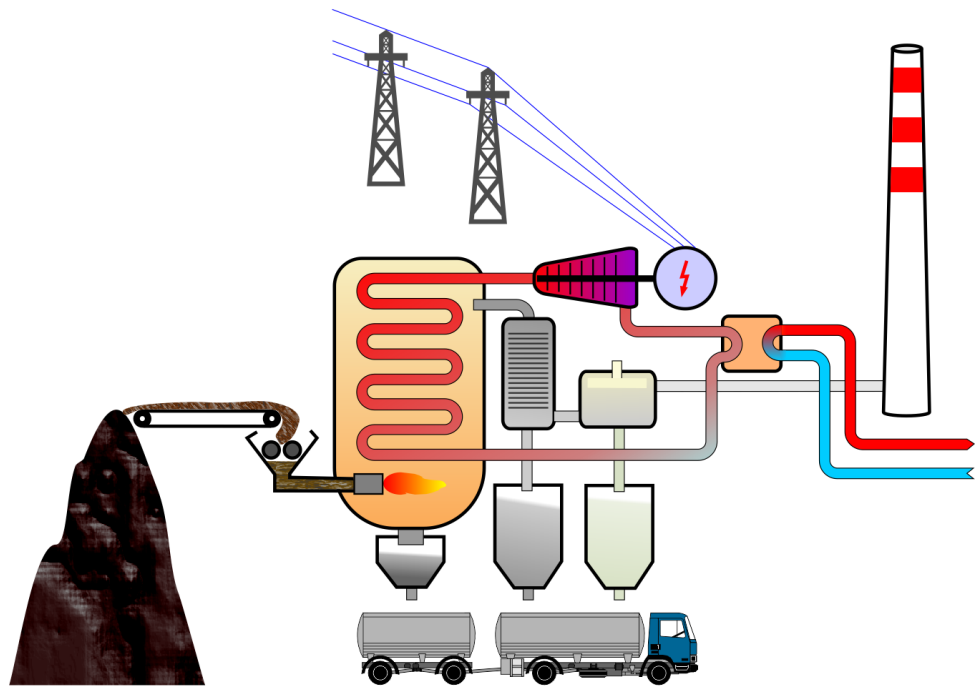
Obrázek 1: Podíl primárních energií na celkové spotřebě v České republice, zdroj: [6]

Při návrhu tepláren se musí vycházet ze základních parametrů a hlavního energetického zařízení tepláren.

Mezi hlavní zařízení patří parní kotel a parní turbína. Jako vedlejší zařízení se počítají systémy zauhlování, vodního hospodářství, chladičů zařízení, zařízení pro regenerační ohřev napájecí vody, výměňkové stanice a elektrotechnická zařízení.

Jako média, se kterými teplárna pracuje, se používá pára, horká voda, teplá voda a elektřina. Velikost teploty média ovlivňuje materiálové požadavky. Například při teplotě větší než 535 °C se používají legované austenitické oceli, které jsou odolné proti korozi. [7]

Celkové schéma teplárny a jejího provozu je znázorněno na obrázku 2:



Obrázek 2: Schéma teplárny, převzato z [8]

1.3 Parní kotel

Parní kotle jsou tepelným zdrojem tepláren. Vykonávají tedy práci, při které přeměňují primární zdroj energie na energii tepelnou. Takto vytvořená tepelná energie se používá na ohřev vody, která je hlavním oběhovým čerpadlem vháněna pod tlakem do parního kotle, kde dojde k předání tepelné energie. V závislosti použitého systému se voda přemění na sytou páru, nebo na páru přehřátou. Podle [9] lze v kogeneračním provozu použít jako primární zdroj energie i fosilní paliva.

Postupným vývojem kotlů se zvedaly jejich parametry – provozní teplota a tlak. Již mezi lety 1965 až 1970 dosahovala teplota kotlů na hranici 550 °C, případně o několik stupňů výše při použití mezipřihřáté páry. Tlak dosahoval 18 MPa. [4]

Podle [1] se projevuje účinnost kotlů na celkové energetické účinnosti teplárenských soustav. Dále se do této celkové účinnosti promítne efekt kombinované výroby elektrické energie a tepla ve zdrojích spolu se ztrátami tepla při dopravě.

Rovněž se lze v [1] dočíst, že platí přímá úměra mezi výkonem kotle a jeho střední roční energetickou účinností. To znamená, že čím je větší výkon kotle, tím je lepší střední roční energetická účinnost. V případě větších jednotek lze tuto účinnost zvětšit konstrukční dokonalostí při použití ekonomizérů nebo řízením spalovacích procesů. Další možností, jak účinnost zlepšit je způsob provozu, kdy se řadí více jednotek a zároveň se udržují v optimálním režimu. Vliv má ale i kvalita obsluhy – měření, regulace, řízení a proškolený personál. Střední roční účinnost kotlů je popsána v tabulce 2.

Tabulka 2: Střední roční účinnost kotlů, zdroj: [1]

Typ paliva pro kotle	Malé zdroje do 0,2 MW	Střední zdroje do 5 MW	Velké zdroje do 300 MW	Velké zdroje nad 300 MW
Plynná paliva	89 %	91 %	94 %	-
Kapalná paliva	88 %	90 %	91 %	-
Kvalitní tuhá paliva	65 %	75 %	88 %	89 %
Méněhodnotná tuhá paliva	53 %	70 %	87 %	88 %

Kotle mají různý tvar. Při vývoji kotlů se nejvíce používaly válcové, kvůli jejich jednoduchosti při výrobě. Válcové kotle se daly používat jako stojaté, nebo ležaté. Další tvary kotlů jsou trubnatý a skříňový. Existuje několik druhů parních kotlů, které se dělí podle použitého systému oběhu vody. Jsou to kotle:

- s přirozeným oběhem vody (bubnové kotle)
- s nuceným oběhem vody (průtlačné kotle)

Dále lze kotle dělit podle jejich použitého ohniště:

- roštové
- práškové
- cyklónové
- fluidní

V neposlední řadě se kotle dělí podle jejich pracovního tlaku:

- nízkotlaký – do 0,05 MPa
- středotlaký – od 0,05 MPa do 1,6 MPa
- vysokotlaký – od 1,6 MPa do 16 MPa
- velmi vysokotlaký – od 16 MPa do 22,1 MPa
- nadkritický – tlaky vyšší než 22,1 MPa

Výroba tepla a elektrické energie potřebuje rovněž několik pomocných zařízení ke kotli. Jedná se zejména o stroje, které připravují palivo a zajišťují jeho dodávku do kotle. Další zařízení musí zajišťovat přísun spalovacího vzduchu, přípravu spalin přes odlučovače popílku do komína, pohon kondenzátu, napájecí a chladicí vody za pomoci čerpadel nebo třeba pohon ventilátorů v chladicích věžích. Vzhledem k tomu, že jsou tato zařízení poměrně velká, tak jsou poháněna buď elektromotory, nebo parní turbínou. Popsána jsou v [4]:

- **Čerpadla** – jejich parametry byly postupem času definovány s požadovaným průtokem a tlakem. Dříve stačilo například pístové čerpadlo nebo hydrant, ale dnes je již zapotřebí velkých čerpadel pro velké energetické bloky s výkonem okolo 10 MW poháněných parou. Československo patřilo ke světovým výrobcům čerpadel s průtoky až 500 litrů za sekundu a výtlakem 100 metrů.

- **Ventilátory** – aby byla zachována vysoká účinnost přeměny z primárního zdroje energie na tepelnou energii spalováním, je třeba zajistit přesné množství spalovacího vzduchu vháněného do ohniště, kde probíhá spalování. Vzduch se dávkuje do několika zón hoření, aby se zabránilo tvorbě škodlivin, například oxidu dusíku. Rovněž se tak škodliviny produkované spalováním uhlí redukuje uvolněným vodíkem. Průtok dnes používaných ventilátorů je až 100 m³ za sekundu. Fluidní spalování vyžaduje vzduch pod větším tlakem, proto se používají radiální ventilátory.
- **Hořáky** - nejčastěji používané hořáky jsou olejové, plynové, a kombinované. Jejich výkony se pohybují od 250 kg do 4200 kg topného oleje za hodinu. V případě zemního plynu se hodnoty pohybují od 160 m³ do 2750 m³ za hodinu.
- **Mlýny** - dnešní kotle pro svou práci potřebují jemný uhelný prášek. Toho se dosáhne mletím uhlí v mlýnech. Hnědé uhlí se mele ve ventilátorových mlýnech. Černé uhlí se v něm nemele z důvodu abraze mlecích částí. [10] Rovněž takto vzniklý uhelný prášek dopravují do hořáků pomocí ventilačního účinku. Další druhy mlýnů jsou trubnaté, které mají dobré provozní vlastnosti - velký mlecí výkon, nízké opotřebení a další. Používá se pro černé uhlí. Dále je to tlukadlový mlýn, který mele uhlí údery tlukadel, jak již název napovídá. A poslední skupinou mlýnů je kroužkový a kladkový mlýn. Tato poslední skupina se využívá na uhlí s nízkým obsahem vody.
- **Ohříváky vzduchu** - pro dobré spalování prášku je třeba predehřívát vháněný vzduch do ohniště. Proto se používají Ljungström ohříváky. Jedná se o rotační spalinový ohřívák, který představuje v procesu regenerativní výměník. Při tomto ohřívání se nejdříve předává teplo do výplně ohříváku a poté se takto naakumulované teplo předá vzduchu určenému k ohřátí. [11]
- **Ofukovače a ostříkovače výhřevných ploch** - zajišťují čištění vnějších výhřevných ploch stěn ve spalovací komoře od spečeného popela. Uplatnění najdou v kotlích na všechny druhy paliva, vyjma plynu.

- **Úprava vody** - se zvyšujícím se tlakem a výkonem páry roste potřeba redukovat obsah solí. Provádí se destilace vody ve víceúrovňových odparkách. Nyní se snažíme odsolovat na hodnotu pod 5 mg.l^{-1} . To se ovšem ukázalo jako nedostačující pro tlaky páry 8 MPa a tak se dnes voda demineralizuje úplně. To umožňuje měnič iontů na bázi syntetických organických polymerů. Negativem demineralizace je nadměrné množství NaCl v odpadních vodách. Proto se dnes používají membránové procesy šetrné k životnímu prostředí.

1.3.1 Roštové kotle

Roštové kotle mohou být na biomasu a nebo uhelné. V kotlích na biomasu se spaluje dřevní štěpka, piliny, kůra, peletky a nebo směsi těchto paliv. Roštové kotle na biomasu dosahují účinnosti od 88 % do 90 %. Podle [9] se jedná již o starší typy kotlů, které se nahrazují modernějšími technologiemi. Používají se v parním nebo horkovodním provedení. Spalování probíhá na šikmém přesuvném roštu poháněném hydraulickými válci. Jejich parní výkon se pohybuje od 4 do 25 tun za hodinu o tlaku 1,4 až 3,8 MPa a teplotě 220 až 445 °C.

Uhelné roštové kotle se využívají na spalování hnědého a černého uhlí, které má zrnitost od 0 do 30 mm. Případně se v takových kotlích dá spalovat i směs uhlí a dřevního odpadu. V takovém případě ale musí být poměr uhlí a dřevního odpadu přibližně 80 % ku 20 %. Rošt je řetězový, pohybující se odzadu dopředu. Dopadá na něj palivo z mechanických pohazovačů. [12]

1.3.2 Práškové kotle

Práškové kotle se využívají pro spalování hnědého i černého uhlí. Dodané uhlí je však rozemleto na prach s jemností pod 1 milimetr. [9] Umožňují však i spalování peletek a biomasy spolu s uhlím za podmínek vhodné granulometrie. Mají poměrně vysokou účinnost dosahující hodnot až 91 %. Rovněž jako roštové kotle se provádějí jako parní nebo horkovodní. Používají se spíše tam, kde se předpokládá trvalejší provoz s větším výkonem, který se pohybuje od 35 do 200 tun páry za hodinu. Tlak páry se pohybuje okolo $3,8 \div 6,5 \text{ MPa}$ a teplota od 445 do 540 °C. [12]

1.3.3 Fluidní kotle

Spalování probíhá ve fontánové fluidní vrstvě, která se vytvoří na pevném roštu, což představuje vznos pevných látek proudem tekutiny. Fluidní vrstva se skládá nejčastěji z vápence a písku. Spalování ve fluidních kotlech dosahuje účinnosti až 92 % při zachování nízkých emisních limitů. Opět, jako dva předchozí typy kotlů, se provádějí v parní nebo horkovodní verzi. Jejich výkony začínají na 16 tunách páry za hodinu a končí na hodnotě 150 tun. Tlak činí 1,4 až 10 MPa o teplotě 220 až 540 °C. [12] [13]

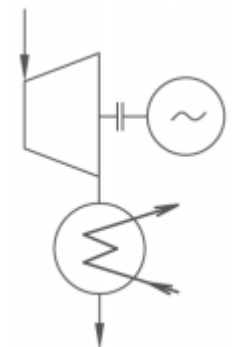
Mezi další druhy kotlů patří plynové a mazutové, ve kterých se spalují plynná a kapalná paliva nebo jejich kombinace. Takové kotle mají oproti kotlům na tuhá paliva výhodu v tom, že mají vyšší výhřevnost, nižší ztráty ale také menší obsah popelovin. Palivo se rozprašuje do sálavého plamene o teplotě okolo 1800 °C a spalování je tak velmi rychlé.

1.4 Parní turbína

Tato kapitola čerpá informace ze zdroje [14] a [9]. Hlavním úkolem parní turbíny je přeměna energie páry na mechanickou energii, díky čemuž se turbína roztočí spolu s generátorem. Jedná se tedy o tepelný motor. Pára na vstupu do turbíny se nazývá admisní. Jako emisní pára je považována pára na výstupu z turbíny. Teplota vstupní páry se pohybuje okolo 535 °C, u moderních systémů je ale teplota i vyšší. Pára se vyrábí v kotlích, které jsou popsány v předešlé kapitole, a vede se z nich na lopatky turbíny, aby mohlo dojít k předávce energie. Turbíny jsou vyráběny v kondenzačním a protitlakém provedení, nebo s odběrem páry.

1.4.1 Kondenzační turbína

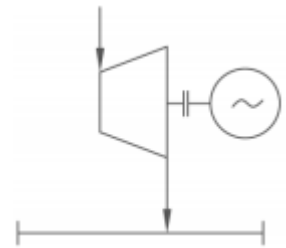
Na výstupu takovéto turbíny je umístěn kondenzátor, ve kterém se pára mění na vodu pomocí kondenzace, protože emisní pára již nemá potřebné hodnoty pro další využití. Teplota takto zkondenzované vody je minimálně 15 °C o tlaku 0,002 MPa. Tento typ turbín dosahuje vysoké účinnosti kvůli velkému teplotnímu rozdílu vstupní a výstupní páry. [15]



Obrázek 3: Zapojení kondenzační turbíny a kondenzátoru, zdroj: [15]

1.4.2 Protitlaká turbína

Na výstupu protitlaké turbíny není kondenzátor, jako v případě kondenzační, ale parovod. Je to z toho důvodu, že na výstupu z turbíny má pára vyšší teplotu, a lze proto dál využít na vytápění. Mají tedy vyšší účinnost, než kondenzační turbíny. [15]



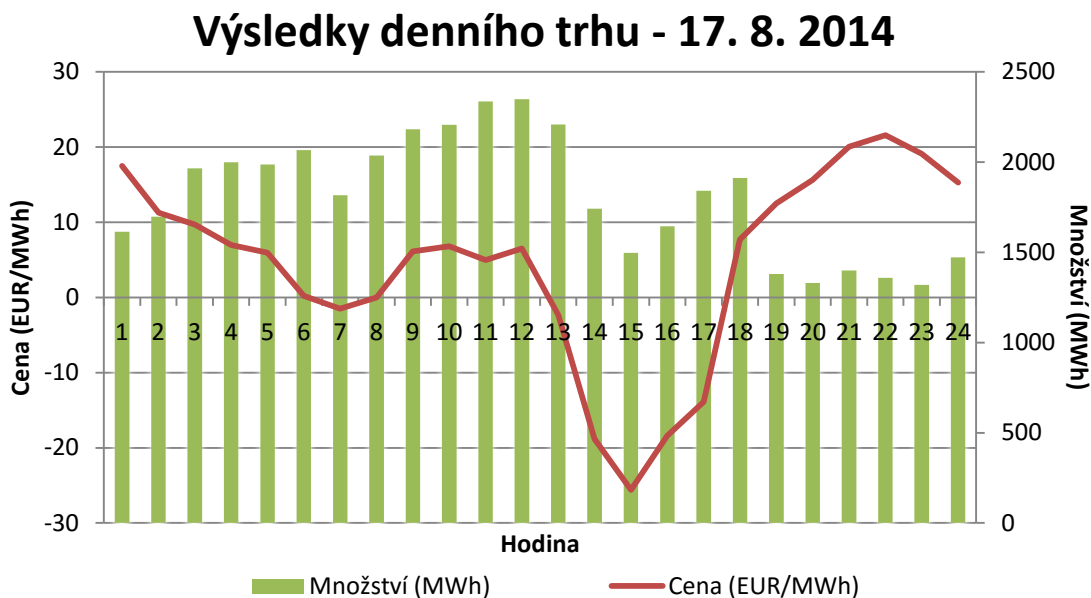
Obrázek 4: Zapojení protitlaké turbíny a parovodu, zdroj: [15]

1.5 Soustavy centralizovaného zásobování teplem

Jedná se o soustavu zařízení, která jsou vzájemně propojena, mezi nimiž dochází k rozvodu a dodávce tepelné energie. Každá SCZT má svoje specifické parametry. Jedná se o parametry energetické, technické, ekologické a ekonomické. Výroba elektrické energie úzce souvisí s výrobou, ale i dodávkami tepla, a řadí se tak mezi hlavní energetické parametry. Teplo se za pomoci SCZT dodává zejména do bytových domů, průmyslových podniků, ale i do veřejných budov, jako jsou školy, nemocnice a další. [1], [17]

2 Technologické možnosti pro snížení výkonu teplárny

Vzhledem k tomu, že efektivita výroby elektrické energie (potažmo tepla) při kondenzačním režimu je velmi nevýhodná a zároveň výkupní ceny elektrické energie jsou velmi nízké, tak vyvstává potřeba elektrickou energii nejlépe vůbec nevyrobit. Popřípadě jak její výrobu co nejvíce omezit již v předstihu, když hrozí, že bude cena elektřiny klesat. To, zda-li bude cena klesat na nízké nebo dokonce záporné hodnoty, lze zjistit podle vývinu denního trhu s elektřinou na internetových stránkách Operátora trhu s elektřinou s jednodenním předstihem. Příklad vývoje ceny elektřiny je znázorněn na obrázku 5.



Obrázek 5: Vývoj cen elektřiny podle OTE-CR.cz

Dříve se cena elektrické energie pohybovala v rozmezí 60 - 80 €/MWh a výroba elektrické energie byla zisková, popřípadě jen s mírnou ztrátovostí. Ovšem ceny elektrické energie začaly klesat. Pokud tedy cena elektřiny začala klesat, teplárnám a elektrárnám zůstávaly stejné proměnné náklady a bylo třeba přijmout určitá opatření.

Jedním z takových opatření je, že provozovatel výroby upraví flexibilitu zdroje - tedy sníží minimální výkon kotle. Ovšem to je velmi drahé, ale i problematické. Při nižších průtocích totiž může docházet k přehřívání potrubí. Obvyklý výkon kotle se pohybuje v rozmezí 50 - 60 % výkonu. Roštový kotel má ale výhodu, že nemá hořák a lze jej tedy provozovat i při průtoku páry 6 t/h z maxima 25 t/h. Ovšem to je již velmi kritická hodnota

pod 50 procenty, pod kterou nelze klesnout. Při průtoku 10 t/h je provoz takové teplárny ještě stabilní. Je to příklad teplárny Dvůr Králové.

Druhou možností je degradace parametrů. Lze tak snižovat tlak pomocí turbonapajčky. Další možnost degradace je snížení teploty. Pokud je tedy současná provozní teplota 450 °C, tak by se kleslo přibližně na hodnotu 380 - 400 °C emisní páry z kotle.

Ovšem jako nejlepší možnost se jeví varianta, kdy teplárna úmyslně zvýší vlastní spotřebu. Pokud jsou záporné ceny, tak je nejlepší elektřinu vůbec nevyrábět. Ale to není výhodné, protože je teplárna stále zatížena fixními náklady. Proto se toto řešení - zvýšení vlastní spotřeby - jeví jako nejlepší.

2.1 Mletí vápence

Jedna z možností jak zvýšit vlastní spotřebu teplárny je spuštění mletí vápence v mlýnech. Lze to velice snadno naplánovat na daný čas, protože trh s elektřinou se určuje dvakrát denně a zároveň jeden den předem. Teplárna tak velice snadno získá údaje na další den o vývoji cen elektřiny, a pokud vidí v grafu či tabulce, že cena bude klesat do nízkých nebo záporných hodnot, tak si naplánuje na daný den a hodinu právě mletí vápence.

Tím se dosáhne toho efektu, že teplárna sice elektřinu vyrobí, ale už ji nemusí dále prodat za zápornou cenu nebo nízkou. Nadělává si tak zapnutím mlýnů na mletí vápence pro sebe určité zásoby. Tím se tedy eliminuje potřeba mletí v jiné dny, kdy bude cena elektřiny opět v kladných hodnotách. Vlastní spotřeba tedy nebude tak velká a tím pádem může teplárna prodat elektřiny více, za již přijatelné ceny. Zatížení těmito mlýny je celkem velké, protože se jejich příkon pohybuje okolo 8 MW.

Mokrý vápencová vypírka spalin patří dnes mezi nejrozšířenější metody. Jedná se o vodní suspenzi namletého vápence na jemný prach, na který se zachytává škodlivý oxid siřičitý (SO₂). Výhodou této metody je, že při odsiřování vzniká i vedlejší produkt - hydrát síranu vápenatého (CaCO₄ x 2 H₂O), který je známý pod názvem energosádrovec a lze jej dále prodávat. Vápenec je dodáván ve velikostech od 2 do 12 cm jako šterk. Proto je potřeba jej rozemlít v mlýnech. Mletí probíhá ve dvou krocích. Nejprve se rozmělní na menší části o velikosti přibližně 3 milimetry v kladivových mlýnech a poté se mele na jemný prach

v kulových mlýnech. Kulové mlýny pracují na principu volně vložených ocelových koulí do mlecího bubnu. Ty otáčením padají na drobné kusy vápence a drtí jej tak na jemný prach. Princip obou mlýnů je znázorněn na následujícím obrázku. [17]



Obrázek 6: Vlevo kladivový mlýn, vpravo kulový mlýn

2.2 Přechod z turbonapaječky na elektronapaječku

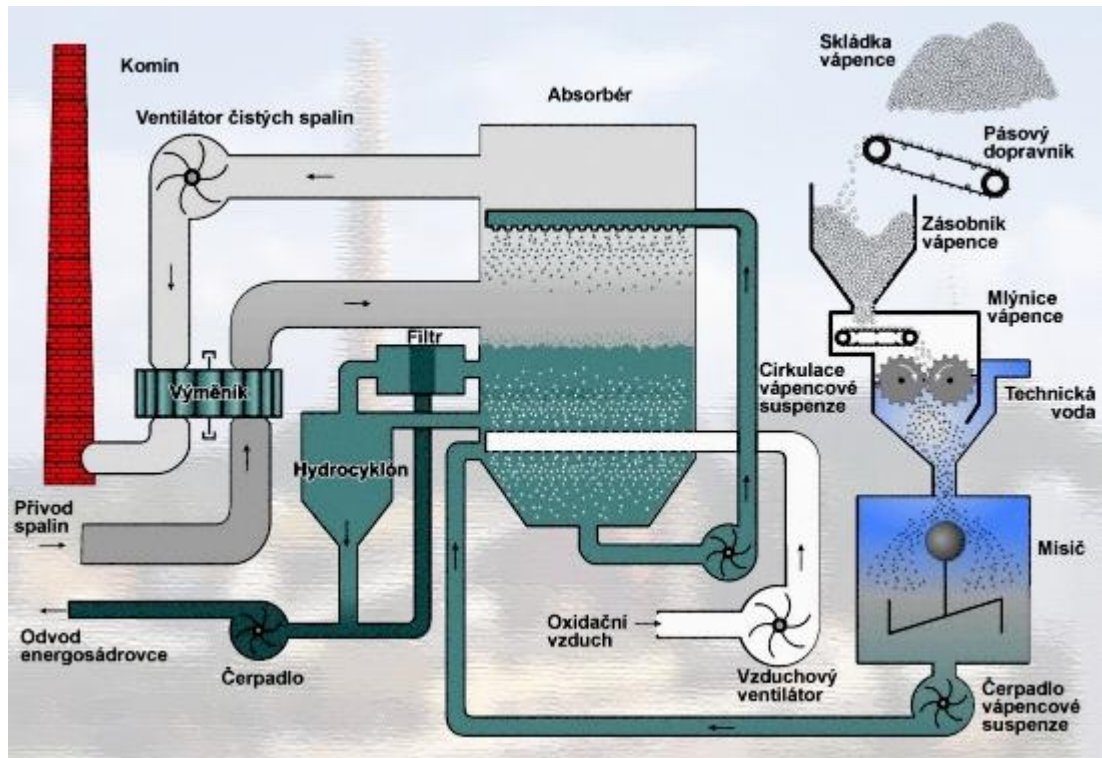
Další způsob je, že se přestane používat turbonapaječka, a přejde se na elektronapaječku. Již z názvu je patrné, že je napájena elektrickou energií oproti turbonapaječce. To se tedy také projeví na vlastní spotřebě. Ovšem tato varianta není tak účinná.

2.3 Pásový dopravník

Při spalování uhlí v teplárnách vznikají popeloviny, které je třeba nějak odvádět pryč z kotle, k čemuž slouží právě pásový dopravník. Ovšem popeloviny není třeba odvádět kontinuálně a tak si lze také naplánovat podle vývoje cen elektřiny na trhu, kdy se pásový dopravník uvede do provozu, aby se tak popeloviny dostaly z prostoru kotle.

2.4 Odsíření

Při odsířování se využívá poměrně velkých čerpadel, která pohánějí vápencovou suspenzi z mísiče do absorbéru, kde je rozprašována pomocí trysek na spaliny. Princip odsíření je znázorněn na obrázku 7, kde je zřetelně vidět skupina čerpadel nutných pro provoz jedné odsířovací jednotky. Například elektrárna Pruněřov má v jedné odsířovací jednotce čtyři čerpadla o výkonu 210 MW, jejichž příkon je 5 MW. Na každé čerpadlo tak připadá přibližně 1,2 MW. Pro normální provoz stačí provozovat jen tři čerpadla, aby odsířování vyhovovalo dnešním emisním limitům. V okamžiku, kdy nastanou nízké nebo záporné ceny elektřiny, tak se spustí všechna čerpadla, aby se zvýšila spotřeba. Suspenze se poté nechá v systému kolovat.



Obrázek 7: Proces odsiřování, převzato z [17]

Jak lze vidět z obrázku, absorbér je velká nádoba. Pro 200 MW výrobní blok dosahuje výšky 43 metrů a průměr takové nádoby je až 15 metrů. Rozprašovací trysky jsou umístěny v horní části. Odtud je rozprašována vápencová suspenze připravená z mlýnů, která reaguje s oxidem siřičitým.

3 Výpočet parametrů pro 200 MW bloky

V této kapitole je proveden výpočet provozních parametrů kondenzačního provozu pro 200MW elektrárenské bloky. Takovéto elektrárenské bloky byly instalovány zejména v elektrárnách typu Chvaletice a Dětmarovice, které jsou popsány v následující kapitole. Výpočet je proveden detailně podle skutečného technologického schéma, které je k dispozici v příloze 1. Jsou zde počítány jednotlivé části, ze kterých se daná elektrárna skládá.

V další kapitole budou pro porovnání spočítány provozní parametry teplárny Dvůr Králové, ovšem zjednodušeně. Protože se nebudou uvažovat ve výpočtu ohříváky a přehříváky, aby se omezil výkon teplárny.

3.1 Elektrárny Chvaletice a Dětmarovice

Elektrárny Chvaletice a Dětmarovice jsou v typu použitých bloků. Jedná se o 200 MW bloky, v každé z elektráren jsou po čtyřech kusech. Každá elektrárna tedy má 800 MW. Tyto elektrárny byly postaveny v 70. letech minulého století a jako palivo využívají hnědé uhlí.

Elektrárna Chvaletice je situována v Polabí u Pardubic, z čehož vyplývá, že čerpá vodu z řeky Labe, po němž bylo uhlí dopravováno lodní dopravou. Postavena byla v letech 1973 - 1979, avšak odsiřovací zařízení bylo postaveno až v roce 1998. Odsiřuje se pomocí mokré vápencové vypírky s účinností přes 95 %, popsané v kapitole 2.1. Odsiřené spaliny se ale neodvádí do komína, ale do chladicích věží. Ty měří 100 metrů a jejich průměr je 60 metrů u země. Výkon je proveden na hladině 400 kV pomocí dvou linek do rozvodny Týnec nad Labem.

Elektrárna Dětmarovice byla postavena v letech 1972 - 1976 poblíž Ostravy u polských hranic. Je to největší klasická elektrárna v Moravskoslezském kraji. Ročně se v elektrárně Dětmarovice vyrobí přibližně 2,5 TWh elektrické energie a přes 800 TJ tepla. Jeden dvousetmegawattový blok za den spotřebuje 1600 tun uhlí. Spalování probíhá ve čtyřech kotlích o teplotě až 1400 °C. Elektrická energie je vyvedena 110 kV linkou.

3.2 Výpočet provozních parametrů

1) Entalpie admisní páry

$$\begin{aligned} t_a &= 540,5 \text{ °C} & i_a &= 3411,29 \text{ kJ/kg} \\ p_a &= 16,2 \text{ MPa} & s_a &= 6,44 \text{ kJ/kgK} \end{aligned}$$

2) Po expanzi ve VT

$$p_p = 2,9 \text{ MPa} \quad i_e^{VT} = 2931,43 \text{ kJ/kg}$$

3) Ideální spád - rozdíl entalpií

$$h_0 = i_a - i_e^{VT} = 3411,29 - 2931,43 = 479,85 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{TD}^{VT} = \frac{h_s}{h_0} = \frac{i_a - i_K^{VT}}{i_a - i_e^{VT}}$$

$$\rightarrow i_K^{VT} = i_a - \eta_{TD}^{VT} \times (i_a - i_e^{VT}) = i_a - \eta_{TD}^{VT} \times h_0 = 3411,29 - 0,82 \times 479,85$$

$$i_K^{VT} = 3017,81 \text{ kJ/kg}$$

4) Entalpie přehřáté páry

$$\begin{aligned} t_p &= 537,3 \text{ °C} & i_p &= 3541,93 \text{ kJ/kg} \\ p_p &= 2,9 \text{ MPa} & s_p &= 7,36 \text{ kJ/kgK} \end{aligned}$$

5) Po expanzi v ST a NT dílu

$$t_e = t_k = 31,2 \text{ °C} \quad i_e^{ST+NT} = 2232,23 \text{ kJ/kg}$$

ideální spád:

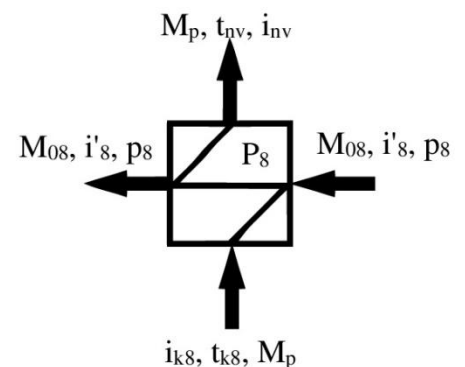
$$\eta_{TD}^{VT+NT} = 77 \%$$

$$h_0 = i_p - i_e^{ST+NT} = 3541,93 - 2232,23 = 1309,7 \text{ kJ/kg}$$

$$i_k^{ST+NT} = i_p - \eta_{TD}^{ST+NT} \times h_0 = 3541,93 - 0,77 \times 1309,7 = 2533,461 \text{ kJ/kg}$$

6) Vysokotlaký ohřívák (VTO) 2

$$\begin{aligned} t_{nv} &= 232,4 \text{ °C} & i_{nv} &= 1001,49 \text{ kJ/kg} \\ t_{k8} &= 191,6 & i_{k8} &= 814,71 \text{ °C} \\ t'_{8} &= t_{nv} + 5 \text{ °C} = 237,4 \text{ °C} & i'_{8} &= 1025,14 \text{ kJ/kg} \\ p_8 &= p'_{8} = 3,2 \text{ MPa} & i_8 &= 3060 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



Obrázek 8: VTO 2

Bilanční rovnice pro VTO 2:

$$M_p \times i_{nv} + M_{08} \times i_{8'} = M_{08} \times i_8 + M_p \times i_{k8}$$

$$M_p \times (i_{nv} - i_{k8}) = M_{08} \times (i_8 - i'_{8'}) = \alpha_8 \times M_p \times (i_8 - i'_{8'})$$

$$\alpha_8 = \frac{i_{nv} - i_{k8}}{i_8 - i'_{8'}} = \frac{1001,439 - 814,707}{3060 - 1025,144} = 0,09179 = 9,179 \%$$

7) Vysokotlaký ohřívák 1

$$t_{k8} = 191,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t'_{k7} = 160,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$i'_{8'} = 1025,144 \text{ kJ/kg}$$

$$i'_{7'} = 837,098 \text{ kJ/kg}$$

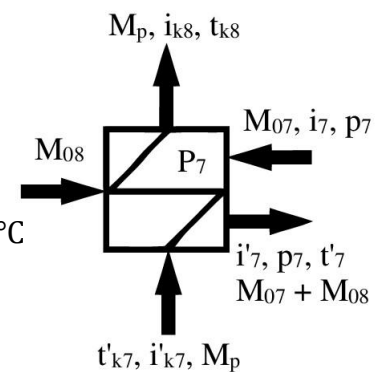
$$i_7 = 3405 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{k8} = 814,707 \text{ kJ/kg}$$

$$i'_{k7} = 677,314 \text{ kJ/kg}$$

$$t'_{7'} = t_{k8} + 5^\circ\text{C} = 196,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P'_{7'} = 1,447 \text{ MPa} = P_7$$



Obrázek 9: VTO 1

Bilanční rovnice pro VTO 1:

$$M_p \times i_{k8} + (M_{07} + M_{08}) \times i'_{7'} = M_p \times i'_{k7} + M_{08} \times i'_{8'} + M_{07} \times i_7$$

$$M_p \times i_{k8} + (\alpha_7 \times M_p + \alpha_8 \times M_p) \times i'_{7'} = M_p \times i'_{k7} + \alpha_8 \times M_{08} \times i'_{8'} + \alpha_7 \times M_{07} \times i_7$$

$$i_{k8} + (\alpha_7 + \alpha_8) \times i'_{7'} = i'_{k7} + \alpha_8 \times i'_{8'} + \alpha_7 \times i_7$$

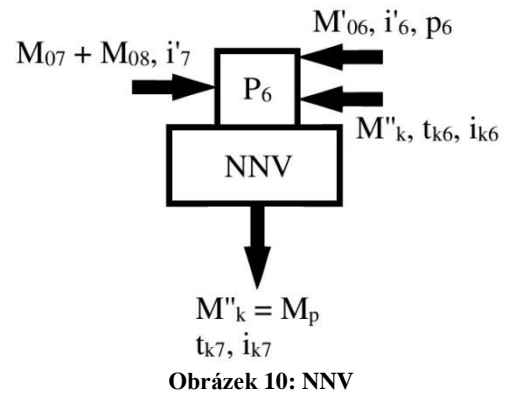
$$i_{k8} + \alpha_7 \times (i'_{7'} - i_7) = i'_{k7} + \alpha_8 \times (i'_{8'} - i'_{7'})$$

$$\begin{aligned} \alpha_7 &= \frac{i'_{k7} - i_{k8} + \alpha_8 \times (i'_{8'} - i'_{7'})}{i'_{7'} - i_7} = \frac{i_{k8} - i'_{k7} + \alpha_8 \times (i'_{7'} - i'_{8'})}{i_7 - i'_{7'}} \\ &= \frac{814,707 - 677,314 + 0,09179 \times (837,098 - 1025,144)}{3405 - 837,098} = 0,04678 \\ &= 4,678 \% \end{aligned}$$

8) Napájecí nádrž vody (NNV)

$$\begin{aligned} t_{k6} &= 136,5 \text{ °C} & i_{k6} &= 574,190 \text{ kJ/kg} \\ t_{k7} &= 159,2 \text{ °C} & i_{k7} &= 672,098 \text{ kJ/kg} \\ P_{6(t_{k7})} &= 0,606 \text{ MPa} & i'_{6} &= 3245 \text{ kJ/kg} \\ i'_{7} &= 837,098 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Bilanční rovnice pro NNV:



$$M_{k''} = M_p - M_{07} - M_{08} - M'_{06}$$

$$i'_{7} \times (M_{07} + M_{08}) + M'_{06} \times i'_{6} + M_{k''} \times i_{k6} = M_p \times i_{k7}$$

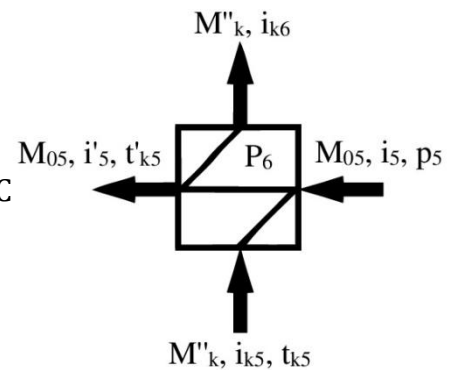
$$\begin{aligned} i'_{7} \times (\alpha_7 \times M_p + \alpha_8 \times M_p) + \alpha'_{6} \times M_p \times i'_{6} \\ + (M_p - \alpha_7 \times M_p - \alpha_8 \times M_p - \alpha'_{6} \times M_p) \times i_{k6} = M_p \times i_{k7} \end{aligned}$$

$$i'_{7} \times (\alpha_7 + \alpha_8) + \alpha'_{6} \times (i'_{6} - i_{k6}) + (1 - \alpha_7 - \alpha_8) \times i_{k6} = i_{k7}$$

$$\begin{aligned} \alpha'_{6} &= \frac{i'_{7} \times (\alpha_7 + \alpha_8) + (1 - \alpha_7 - \alpha_8) \times i_{k6} - i_{k7}}{i_{k6} - i'_{6}} \\ &= \frac{837,098 \times (0,04678 + 0,09179) + 574,19 \times (1 - 0,04678 - 0,09179) - 672,098}{574,19 - 3245} \\ &= 0,02302 = 2,302 \% \end{aligned}$$

9) Nízkotlaký ohřívák (NTO) 5

$$\begin{aligned} i_{k6} &= 574,19 \text{ kJ/kg} & t_{k5} &= 115,1 \text{ °C} \\ i_{k5} &= 482,977 \text{ kJ/kg} & t'_{k5} &= t_{k6} + 3 \text{ °C} = 139,5 \text{ °C} \\ i'_{5} &= 587,054 \text{ kJ/kg} & P_5 &= 0,356 \text{ MPa} \\ i_5 &= 3140 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



Obrázek 11: NTO 5

Bilanční rovnice pro NTO5:

$$M_{05} \times i_5 + M_{k''} \times i_{k5} = M_{k''} \times i_{k6} + M_{05} \times i'_5$$

$$\begin{aligned} \alpha_5 \times M_p \times i_5 + (M_p - \alpha_7 \times M_p - \alpha_8 \times M_p - \alpha'_6 \times M_p) \times i_{k5} \\ = (M_p - \alpha_7 \times M_p - \alpha_8 \times M_p - \alpha'_6 \times M_p) \times i_{k6} + \alpha_5 \times M_p \times i'_5 \end{aligned}$$

$$\alpha_5 \times i_5 + (1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6) \times i_{k5} = (1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6) \times i_{k6} + \alpha_5 \times i'_5$$

$$\alpha_5 \times (i_5 - i'_5) = (i_{k6} - i_{k5}) \times (1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6)$$

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= \frac{(i_{k6} - i_{k5}) \times (1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6)}{i_5 - i'_5} \\ &= \frac{(574,19 - 482,977) \times (1 - 0,04678 - 0,09179 - 0,02302)}{3140 - 587,054} = 0,02996 \\ &= 2,996 \% \end{aligned}$$

10) Nízkotlaký ohřívák 4:

$$i'_5 = 587,054 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{k4} = 94,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{exp}} = 0,187 \text{ MPa}$$

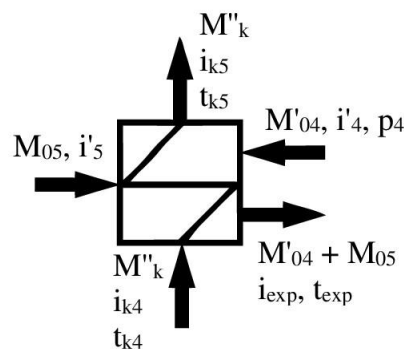
$$i_{\text{exp}} = 495,711 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{k5} = 482,977 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{k4} = 395,491 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{\text{exp}} = t_{k5} + 3 \text{ }^\circ\text{C} = 118,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$i'_4 = 3040 \text{ kJ/kg}$$



Obrázek 12: NTO 4

Bilanční rovnice pro NTO4:

$$M_{k''} \times i_{k4} + M'_{04} \times i'_{4} + M_{05} \times i'_{5} = M_{k''} \times i_{k5} + (M_{05} + M'_{04}) \times i_{exp}$$

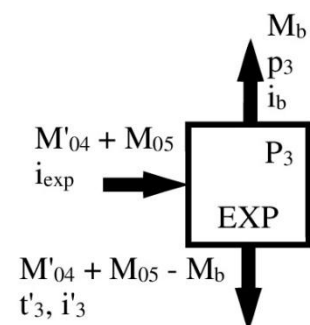
$$\begin{aligned} (M_p - \alpha_7 \times M_p - \alpha_8 \times M_p - \alpha'_6 \times M_p) \times i_{k4} + \alpha'_4 \times M_p \times i'_{4} + \alpha_5 \times M_p \times i'_{5} \\ = (M_p - \alpha_7 \times M_p - \alpha_8 \times M_p - \alpha'_6 \times M_p) \times i_{k5} + (\alpha_5 \times M_p + \alpha'_4 \times M_p) \\ \times i_{exp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6) \times i_{k4} + \alpha'_4 \times i'_{4} + \alpha_5 \times i'_{5} \\ = (1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6) \times i_{k5} + (\alpha_5 + \alpha'_4) \times i_{exp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha'_4 \times (i'_{4} - i_{exp}) &= (1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6) \times (i_{k5} - i_{k4}) + \alpha_5 \times (i_{exp} - i'_{5}) \\ &= \frac{(1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6) \times (i_{k5} - i_{k4}) + \alpha_5 \times (i_{exp} - i'_{5})}{i'_{4} - i_{exp}} \\ &= \frac{(1 - 0,004678 - 0,09179 - 0,02302) \times (482,977 - 395,491) + 0,02996 \times (495,711 - 587,054)}{3040 - 495,711} \\ &= 0,02775 = 2,775 \% \end{aligned}$$

11) Expandér

$$\begin{aligned} t'_3 &= tk4 + 3 \text{ °C} = 97,4 \text{ °C} \\ i'_3 &= 408,133 \text{ kJ/kg} \\ P'_3 &= P_3 = 0,092 \text{ MPa} \\ i_{exp} &= 495,711 \text{ kJ/kg} \\ i_b &= 2672 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



Obrázek 13: EXP

Bilanční rovnice pro expandér (EXP):

$$(M_{05} + M'_{04}) \times i_{exp} = M_b \times i_b + (M_{05} + M'_{04} - M_b) \times i'_3$$

$$(\alpha_5 \times M_p + \alpha'_4 \times M_p) \times i_{exp} = \alpha_b \times M_p \times i_b + (\alpha_5 \times M_p + \alpha'_4 \times M_p - \alpha_3 \times M_p) \times i'_3$$

$$(\alpha_5 + \alpha'_4) \times i_{exp} = \alpha_b \times i_b + (\alpha_5 + \alpha'_4 - \alpha_3) \times i'_3$$

$$\alpha_b \times (i_b - i'_3) = (\alpha_5 + \alpha'_4) \times (i_{exp} - i'_3)$$

$$\alpha_b = \frac{(\alpha_5 + \alpha'_4) \times (i_{exp} - i'_3)}{(i_b - i'_3)} = \frac{(0,02996 + 0,02775) \times (495,711 - 408,133)}{2672 - 408,133}$$

$$= 0,00223 = 0,223 \%$$

12) Regenerativní ohřívák NTO3:

$$t_{k3} = 79 \text{ }^\circ\text{C}$$

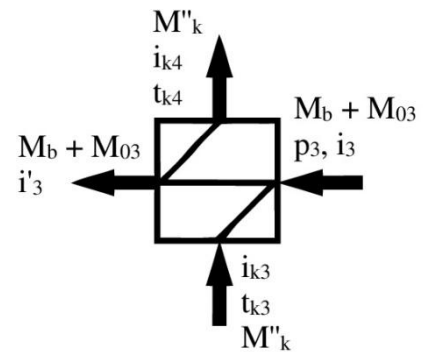
$$i_{k3} = 332,431 \text{ kJ/kg}$$

$$i'_3 = 408,133 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{k4} = 395,491 \text{ kJ/kg}$$

$$P_3 = 0,092 \text{ MPa}$$

$$i_3 = 2915 \text{ kJ/kg}$$



Obrázek 14: NTO 3

Bilanční rovnice pro NTO3:

$$M'_k \times i_{k3} + (M_b + M_{03}) \times i_3 = M'_k \times i_{k4} + (M_b + M_{03}) \times i'_3$$

$$M'_k = M'_k - (M_{03} + M'_{04} + M_{05}) = M_p - M_{07} - M_{08} - M'_{06} - M_{03} - M'_{04} - M_{05}$$

$$M'_k - M_{03} = M_p - M_{07} - M_{08} - M'_{06} - M_{03} - M'_{04} - M_{05}$$

$$\alpha'_k - \alpha_3 = 1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6 - \alpha'_4 - \alpha_5 = \alpha''_k - \alpha'_4 - \alpha_5$$

$$\alpha''_k = 1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6 = 1 - 0,04678 - 0,09179 - 0,02302 = 0,83841$$

$$M_{03} \times (i_3 - i'_3 - i_{k4} - i_{k3}) = (M'_k - M_{03}) \times (i_{k4} - i_{k3}) + M_b \times (i'_3 - i_3)$$

$$\alpha_3 = \frac{(\alpha''_k - \alpha'_4 - \alpha_5) \times (i_{k4} - i_{k3}) + \alpha_b \times (i'_3 - i_3)}{i_3 - i'_3 + i_{k4} - i_{k3}}$$

$$\alpha_3 = \frac{(0,83841 - 0,02775 - 0,02996) \times (395,491 - 332,431) + 0,00223 \times (408,133 - 2915)}{2915 - 408,133 + 395,491 - 332,431}$$

$$= 0,01698 = 1,698 \%$$

Bilance bodu A pro určení entalpie i''_3 pro bilanci turbíny:

$$(M_b + M_{03}) \times i_3 = M_b \times i_b + M_{03} \times i''_3$$

$$(\alpha_b + \alpha_3) \times i_3 = \alpha_b \times i_b + \alpha_3 \times i''_3$$

$$i''_3 = \frac{(\alpha_b + \alpha_3) \times i_3 - \alpha_b \times i_b}{\alpha_3} = \frac{\alpha_b \times (i_3 - i_b) + \alpha_3 \times i_3}{\alpha_3}$$

$$= \frac{0,00223 \times (2915 - 2672) + 0,01698 \times 2915}{0,01698} = 2946,913 \text{ kJ/kg}$$

13) Špičkový ohřívák (SO):

$$P_{SO} = 0,5 \text{ MPa}$$

$$t_{SO} = 331,8 \text{ °C}$$

$$i_{SO} = 3130,34 \text{ kJ/kg}$$

- entalpie topné vody za základním ohřívákem (ZO) a SO:

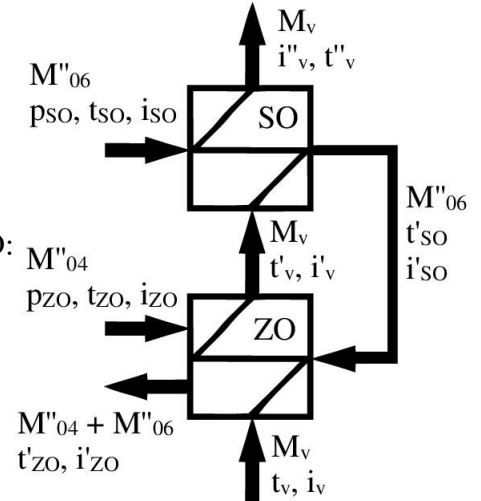
$$\text{ZO: } t'_v = 100,3 \text{ °C} \rightarrow i'_v = 420,365 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{SO: } t''_v = 126,7 \text{ °C} \rightarrow i''_v = 532,307 \text{ kJ/kg}$$

$$t'_{SO} = t''_v + 3 \text{ °C} = 129,7 \text{ °C}$$

$$i'_{SO} = 545,107 \text{ kJ/kg}$$

$$M_v = 302,4 \text{ t/h}$$



Obrázek 15: SO, ZO

Bilance SO:

$$M'''_{06} \times i_{SO} + M_v \times i'_v = M_v \times i''_v + M''_{06} \times i'_{SO}$$

$$M'''_{06} = \frac{M_v \times (i''_v - i'_v)}{i_{SO} - i'_{SO}} = \frac{302,4 \times (532,307 - 420,365)}{3130,34 - 545,107} = 13,094 \text{ t/h}$$

$$\alpha''_6 = \frac{M''_{06}}{M_p} = \frac{13,094}{M_p}$$

14) Základní ohřívák ZO:

$$\begin{aligned} P_{ZO} &= 95,7 \text{ kPa} = 0,0957 \text{ MPa} & t_{ZO} &= 217,8 \text{ }^\circ\text{C} \\ i_{ZO} &= 2910,84 \text{ kJ/kg} & t_v &= 67,9 \text{ }^\circ\text{C} \\ i_v &= 284,222 \text{ kJ/kg} & t'_{ZO} &= t'_v + 3 \text{ }^\circ\text{C} = 103,3 \text{ }^\circ\text{C} \\ i'_{ZO} &= 433,03 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Bilanční rovnice ZO:

$$M''_{04} \times i_{ZO} + M_v \times i_v + M''_{06} \times i'_{SO} = (M''_{06} + M''_{04}) \times i'_{ZO} + M_v \times i'_v$$

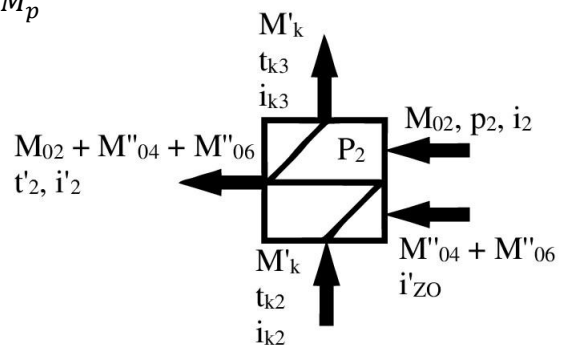
$$M''_{04} \times (i_{ZO} - i'_{ZO}) = M_v \times (i'_v - i_v) + M''_{06} \times (i'_{ZO} - i'_{SO})$$

$$\begin{aligned} M''_{04} &= \frac{M_v \times (i'_v - i_v) + M''_{06} \times (i'_{ZO} - i'_{SO})}{(i_{ZO} - i'_{ZO})} \\ &= \frac{302,4 \times (420,365 - 284,222) + 13,094 \times (433,03 - 545,107)}{2910,84 - 433,03} \\ &= 16,023 \text{ t/h} \end{aligned}$$

$$\alpha''_4 = \frac{16,023}{M_p}$$

15) Nízkotlaký ohřívák NTO2:

$$\begin{aligned} t_{k2} &= 52,9 \text{ }^\circ\text{C} \\ i_{k2} &= 221,46 \text{ kJ/kg} \\ t'_2 &= t_{k3} + 3 \text{ }^\circ\text{C} = 82,4 \text{ }^\circ\text{C} \\ i'_2 &= 345,024 \text{ kJ/kg} \\ P'_2 &= P_2 = 0,052 \text{ MPa} \\ i_2 &= 2830 \text{ kJ/kg} \\ i'_{ZO} &= 433,03 \text{ kJ/kg} \\ i_{k3} &= 332,431 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



Obrázek 16: NTO 2

Bilanční rovnice NTO2:

$$M'_k \times i_{k3} + (M_{02} + M''_{04} + M'''_{06}) \times i'_2 = M'_k \times i_{k2} + (M''_{04} + i_{k2}) \times i'_{z0} + M_{02} \times i_2$$

$$M'_k = M''_k - (M_{03} + M'_{04} + M_{05}) = M_p - M_{07} - M_{08} - M'_{06} - M_{03} - M'_{04} - M_{05}$$

$$\alpha''_k = 1 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha'_6 = 1 - 0,04678 - 0,09179 - 0,02302 = 0,83841$$

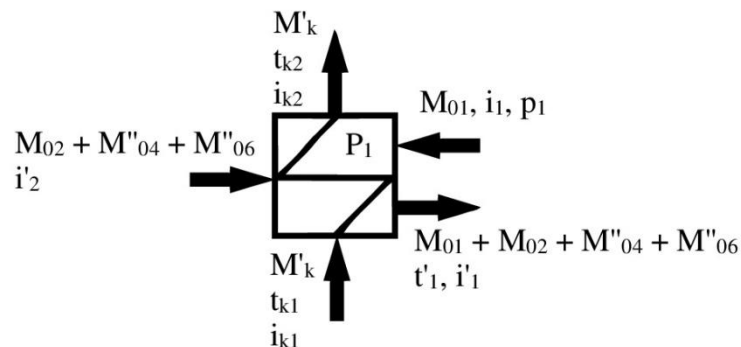
$$\alpha'_k = \alpha''_k - \alpha_3 - \alpha'_4 - \alpha_5 = 0,83841 - 0,01698 - 0,02775 - 0,02996 = 0,76372$$

$$\alpha_2 \times M_p \times (i'_2 - i_2) = (M''_{04} + M'''_{06}) \times (i'_{z0} - i'_2) + \alpha'_k \times M_p \times (i_{k2} - i_{k3})$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{\frac{M''_{04} + M'''_{06}}{M_p} \times (i'_{z0} - i'_2) + \alpha'_k \times (i_{k2} - i_{k3})}{(i'_2 - i_2)} \\ &= \frac{\frac{16,023}{M_p} \times (433,03 - 345,024) + 0,76372 \times (221,46 - 332,431)}{345,024 - 2830} \\ &= \frac{\frac{2562,471}{M_p} + (-84,751)}{-2484,976} = 0,0341 - \frac{1,0312}{M_p} \end{aligned}$$

16) Nízkotlaký ohřívák NTO1:

$$\begin{array}{ll} t_{k1} = 38,5 \text{ °C} & i_{k1} = 161,272 \text{ kJ/kg} \\ i'_1 = 234,005 \text{ kJ/kg} & P'_1 = P_1 = 0,016 \text{ MPa} \\ i'_2 = 345,024 \text{ kJ/kg} & i_{k2} = 221,46 \text{ kJ/kg} \\ i_1 = 2690 \text{ kJ/kg} & t'_1 = t_{k2} + 3 \text{ °C} = 55,9 \text{ °C} \end{array}$$



Obrázek 17: NTO 1

Bilanční rovnice pro NTO1:

$$\begin{aligned} M'_k \times i_{k1} + (M_{02} + M''_{04} + M'''_{06}) \times i'_2 + M_{01} \times i_1 \\ = (M_{02} + M''_{04} + M'''_{06} + M_{01}) \times i'_1 + M'_k \times i_{k2} \end{aligned}$$

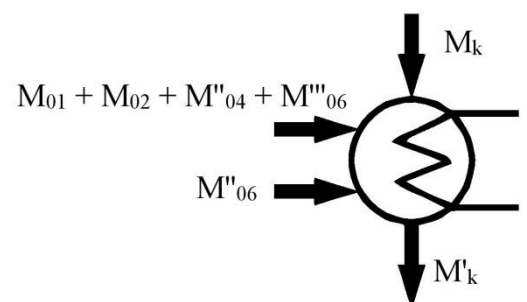
$$\begin{aligned} \alpha_1 \times M_p \times (i_1 - i'_1) \\ = \alpha'_k \times M_p \times (i_{k2} - i_{k1}) + \alpha_2 \times M_p \times (i'_1 - i'_2) + (M''_{04} + M'''_{06}) \\ \times (i'_1 - i'_2) \\ \left(\alpha_2 + \frac{M''_{04} + M'''_{06}}{M_p} \right) \times (i'_1 - i'_2) + \alpha'_k \times (i_{k2} - i_{k1}) \\ \alpha_1 = \frac{i_1 - i'_1}{\left(\alpha_2 + \frac{M''_{04} + M'''_{06}}{M_p} \right) \times (i'_1 - i'_2) + \alpha'_k \times (i_{k2} - i_{k1})} \\ = \frac{\left(0,0341 - \frac{1,0312}{M_p} + \frac{16,023 + 13,094}{M_p} \right) \times (234,005 - 345,024) + 0,76372 \times (221,46 - 161,272)}{2690 - 234,005} \\ = \frac{\left(0,0341 - \frac{30,1482}{M_p} \right) \times (-111,019) + 45,9668}{2455,995} = \frac{-3,7875 + \frac{3347,023}{M_p} + 45,9668}{2455,995} \\ = \frac{42,1811 + \frac{3347,023}{M_p}}{2455,995} = 0,0172 + \frac{1,3628}{M_p} \end{aligned}$$

17) Kondenzátor (KON):

$$M''_{06} = 28,1 \text{ t/h}$$

$$M_k + M_{02} + M''_k + M''_{06} + M_{01} + M'''_{06} = M'_k$$

$$\begin{aligned} \alpha_k = \alpha'_k - \alpha_1 - \alpha_2 - \frac{M''_{04} + M''_{06} + M'''_{06}}{M_p} \\ = 0,76372 - 0,0172 - \frac{1,3628}{M_p} - 0,0341 + \frac{1,0312}{M_p} \\ - \frac{16,023 + 28,1 + 13,094}{M_p} = 0,71242 - \frac{57,5486}{M_p} \end{aligned}$$



Obrázek 18: KON

18) Energetická bilance turbíny:

$$M_{04} = M'_{04} + M''_{04}$$

$$\alpha_4 = \alpha'_{04} + \alpha''_{04} = \alpha'_{04} + \frac{M'_{04}}{M_p}$$

$$M_{06} = M'_{06} + M''_{06} + M'''_{06}$$

$$\alpha_6 = \alpha'_{06} + \alpha''_{06} + \alpha'''_{06} = \alpha'_{06} + \frac{M''_{06} + M'''_{06}}{M_p}$$

$$M_p \times i_a + (M_p - \alpha_8 \times M_p) \times i_p = M_p \times \left(i_k^{VT} + \sum_{i=1}^7 (\alpha_i \times i_i) + \alpha_k \times i_k^{ST+NT} \right) + \frac{3600 \times P_E}{\eta_m \times \eta_g}$$

$$i_a + (1 - \alpha_8) \times i_p = \left(i_k^{VT} + \sum_{i=1}^7 (\alpha_i \times i_i) + \alpha_k \times i_k^{ST+NT} \right) + \frac{3600 \times P_E}{\eta_m \times \eta_g \times M_p}$$

$$\alpha_k = 0,71242 - \frac{57,5486}{M_p} = \alpha_{kb} + \alpha_{ka} = \alpha_{kb} + \frac{M_{ka}}{M_p}$$

$$\alpha_1 = 0,0172 + \frac{1,3628}{M_p} = \alpha_{1b} + \alpha_{1a} = \alpha_{1b} + \frac{M_{1a}}{M_p}$$

$$\alpha_2 = 0,0341 - \frac{1,0312}{M_p} = \alpha_{2b} + \alpha_{2a} = \alpha_{2b} + \frac{M_{2a}}{M_p}$$

Bilance bodu B:

$$\begin{aligned}
 M_{06} \times i_6 &= M''_{06} \times i''_6 + M'''_{06} \times i_{SO} + \alpha'_6 \times M_p \times i'_6 \\
 i_a + (1 - \alpha_8) \times i_p - i_k^{VT} - \alpha_7 \times i_7 - \alpha'_6 \times i'_6 - \alpha_5 \times i_5 + \alpha'_4 \times i'_4 - \alpha_3 \times i''_3 - \alpha_{2b} \times i_2 \\
 &- \alpha_{1b} \times i_1 - \alpha_{kb} \times i_k^{ST+NT} \\
 &= \alpha_{ka} \times i_k^{ST+NT} + \alpha''_6 \times i''_6 + \alpha'''_6 \times i_{SO} + \alpha''_4 \times i_{ZO} + \alpha_{2a} \times i_2 + \alpha_{1a} \times i_1 \\
 &+ \frac{3600 \times P_E}{\eta_m \times \eta_g \times M_p}
 \end{aligned}$$

- výsledný vztah pro celkové množství páry M_p :

$$\begin{aligned}
 M_p &= \\
 &= \frac{M_{ka} \times i_k^{ST+NT} + M''_{06} \times i''_6 + M'''_{06} \times i_{SO} + M''_{04} \times i_{ZO} + M_{2a} \times i_2 + M_{1a} \times i_1 + \frac{3600 \times P_E}{\eta_m \times \eta_g}}{i_a + (1 - \alpha_8) \times i_p - i_k^{VT} - \alpha_7 \times i_7 - \alpha'_6 \times i'_6 - \alpha_5 \times i_5 + \alpha'_4 \times i'_4 - \alpha_3 \times i''_3 - \alpha_{2b} \times i_2 - \alpha_{1b} \times i_1 - \alpha_{kb} \times i_k^{ST+NT}}
 \end{aligned}$$

Entalpie vodní páry před turbonapaječkou:

$$t_{TN} = 334,3 \text{ °C} \quad P_{TN} = 0,5 \text{ MPa} \quad i''_6 = 3135,516 \text{ kJ/kg}$$

Výpočet čitatele:

$$\frac{3600 \times P_E}{\eta_m \times \eta_g} = \frac{3600 \times 182,7 \times 10^3}{0,97 \times 0,98} = 6,919 \times 10^8$$

$$\begin{aligned}
 M''_{06} \times i''_6 + M'''_{06} \times i_{SO} + M''_{04} \times i_{ZO} \\
 = 28,1 \times 3135,516 + 13,094 \times 3130,34 + 16,023 \times 2910,84 = 175737
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ka} \times i_k^{ST+NT} + M_{2a} \times i_2 + M_{1a} \times i_1 \\
 = (-57,5486 \times 2533,461) + (-1,0312 \times 2830) + (1,3628 \times 2690) \\
 = -145049
 \end{aligned}$$

$$\text{čitatel} = 6,919 \times 10^8 + 175737 - 145049 = 6,919 \times 10^8$$

Výpočet jmenovatele:

$$\begin{aligned}i_a + (1 - \alpha_8) \times i_p - i_k^{VT} &= 3411,285 + (1 - 0,09179) \times 3541,93 - 3017,80636 \\ &= 3610,295\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}-\alpha_7 \times i_7 - \alpha'_6 \times i'_6 - \alpha_5 \times i_5 - \alpha'_4 \times i'_4 - \alpha_3 \times i''_3 \\ &= -(0,04678 \times 3405) - 0,02302 \times 3245 - (0,02996 \times 3140) \\ &\quad - (0,02775 \times 3040) - (0,01698 \times 2946,913) = -462,459\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}-\alpha_{2b} \times i_2 - \alpha_{1b} \times i_1 - \alpha_{kb} \times i_k^{ST+NT} \\ &= -(0,0341 \times 2830) - (0,0172 \times 2690) - (0,71242 \times 2533,461) \\ &= -1947,659\end{aligned}$$

$$jmenovatel = 3610,295 - 462,459 - 1947,659 = 1200,177$$

Cekové množství páry:

$$M_p = \frac{\text{čitatel}}{\text{jmenovatel}} = \frac{6,919 \times 10^8}{1200,177} = 576,5 \text{ t/h}$$

Procentní odchylka výpočtu od zadané hodnoty:

$$M_{pzad} = M_{pzad1} + M_{pzad2} = 286,1 + 265,1 = 571,2 \text{ t/h}$$

$$\delta = \frac{M_{pzad} - M_p}{M_{pzad}} \times 100 = \frac{571,2 - 576,5}{571,2} \times 100 = 0,928 \%$$

Výpočtem bylo zjištěno, že celkové množství páry generované 200MW blokem typu Dětmárovice / Chvaletice je 576,5 tuny za hodinu. Aby se snižoval výkon v dobách nízkých nebo záporných cen elektřiny, tak se budou degradovat vstupní provozní parametry a tím dojde ke snížení výkonu elektrárny. Průběh současného stavu bez snížení výkonu je znázorněn v i-s diagramu v příloze 2.

4 Výpočet parametrů pro teplárnu Dvůr Králové

V této kapitole je proveden výpočet provozních parametrů pro teplárnu Dvůr Králové (TDK). Vstupní parametry jsou při kondenzačním provozu teplárny 450 °C admisní páry o tlaku 6 MPa. Energie této páry je přeměněna za pomoci turbíny a generátoru na elektrickou energii, ale část se odvede do napájecí nádrže. Po expanzi v turbogenerátoru 1 pokračuje pára na turbogenerátor 3, kde má na vstupu teplotu 250 °C a tlak 1 MPa. Po průchodu páry všemi stupni má teplotu 40 °C a tlak 0,007 MPa. Samotný výpočet je proveden pro technologické schéma zobrazeném v příloze 3.

4.1 Teplárna Dvůr Králové

Teplárna byla postavena mezi lety 1950 až 1955 a měla sloužit jako zdroj tepla pro Dvůr Králové nad Labem. Celkem je zde nainstalováno 115,8 MW teplárenského výkonu, díky čemuž lze dodávat do 11 kilometrů dlouhé parní sítě teplo o objemu 800 TJ. Desetina tohoto tepla se spotřebuje na vytápění bytových prostor. Hlavní kotle prodělaly rekonstrukci, aby v nich bylo možné spalovat zemní plyn. Z hlediska životního prostředí proběhla instalace tkaninových filtrů na prachové částice obsažené ve zplodinách, které se eliminují i používáním paliv s nízkým obsahem síry. [18]

Disponuje celkově třemi kotli K1 - K3, které mají tepelný příkon 127,45 MWt a dále tři záložní kotle pro každý z hlavních (K11 - K13). Kotle K1 a K2 jsou parní s výkonem 32,5 tun páry za hodinu, jejich ohniště je řešeno pomocí roštů pro spalování pevných paliv. Parní kotel K3 je bubnový s práškovým ohništěm. Spaluje se v něm hnědé energetické uhlí, které dosahuje parního výkonu 75 tun za hodinu. Vyrobená pára je vedena sběrníkovým systémem do vysokotlaké parní sběrní, odkud je dále přivedena na protitlakou turbínu. V turbíně pára expanduje na tlak 0,8 MPa a teplotu 190 °C a je vedena do středotlakého rozdělovače, ze kterého pokračuje do SCZT. Nevyužitá pára pro teplárenství je přivedena na turbínu kondenzační. Výkon z TDK je po 6kV lince veden do rozvodny Lipnice. Dodávky tepla z roku 2012 jsou k vidění v tabulce 3.

Tabulka 3: Dodávky tepla z TDK za rok 2012.

Měsíc	Dodané teplo (GJ)
Leden	29 427
Únor	33 442
Březen	18 553
Duben	13 038
Květen	4 032
Červen	2 967
Červenec	3 048
Srpen	2 449
Září	3 996
Říjen	14 505
Listopad	19 482
Prosinec	29 923
Celkem	174 861

4.2 Výpočet provozních parametrů TDK

V této kapitole bude proveden výpočet parametrů při původním provozu a po změně parametrů, tedy jejich degradaci.

4.2.1 Původní stav

Vstupní parametry pro původní neekonomický provoz:

cena elektřiny = 30 €/MWh

kurz CZK/EUR = 27

cena uhlí = 50 Kč/GJ

povolenky CO₂ = 5 €/t

měrné emise = 0,1 t/GJ

ostatní proměnné = 20 Kč/GJ

$t_a = 450 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_l = 250 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_e = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_k = 39 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_{nv} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$

$M_1 = 46 \text{ t/h}$

$p_a = 6 \text{ MPa}$

$p_1 = 1 \text{ MPa}$

$p_e = 0,007 \text{ MPa}$

$p_k = 0,007 \text{ MPa}$

$p_{nv} = 0,7 \text{ MPa}$

$k_e = 1,11$

$i_a = 3300 \text{ kJ/kg}$

$i_l = 2940 \text{ kJ/kg}$

$i_e = 2570 \text{ kJ/kg}$

$i_k = 163 \text{ kJ/kg}$

$i_{nv} = 589 \text{ kJ/kg}$

Výpočet provozních parametrů při původních vstupních hodnotách:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$M_1 = M_2 + M_3$$

$$M_1 \times i_{nv} = M_2 \times i_1 + M_3 \times i_k$$

$$M_2 = M_1 - M_3$$

$$M_1 \times (i_{nv} - i_1) = M_3 \times (i_k - i_1)$$

$$46 \times (589 - 2940) = M_3 \times (163 - 2940)$$

$$M_3 = 38,94 \text{ t/h}$$

$$M_2 = M_1 - M_3 = 46 - 38,94 = 7,06 \text{ t/h}$$

$$Q_{\text{výstup}} = M_1 \times i_a = 46 \times 3300 = 151,8 \text{ GJ}$$

$$Q_2 = M_2 \times i_1 = 7,06 \times 2940 = 20,76 \text{ GJ}$$

$$Q_3 = M_3 \times i_1 = 38,94 \times 2940 = 114,48 \text{ GJ}$$

$$Q_{\text{vstup}} = M_1 \times i_{nv} = 46 \times 589 = 27,09 \text{ GJ}$$

$$Q_{\text{kotle}} = Q_{\text{výstup}} - Q_{\text{vstup}} = 151,8 - 27,09 = 124,71 \text{ GJ}$$

$$P_{TG1} = M_1 \times (i_a - i_1) \times \eta_g \times \frac{1}{3,6} = 46 \times (3300 - 2940) \times 0,96 \times \frac{1}{3,6} = 4,42 \text{ MW}$$

$$P_{TG3} = M_3 \times (i_1 - i_e) \times \eta_g \times \frac{1}{3,6} = 38,94 \times (2940 - 2570) \times 0,96 \times \frac{1}{3,6} = 3,84 \text{ MW}$$

$$q_{el} = \frac{Q_{kotle}}{P_{TG1} + P_{TG3}} = \frac{124,71}{4,42 + 3,84} = 15,1 \text{ GJ/MWh}$$

$$S_{pal_{ev}} = \frac{q_{el}}{\eta_{kotle}} = \frac{15,1}{0,85} = 17,76 \text{ GJ/MWh}$$

$$S_{pal_{ed}} = S_{pal_{ev}} \times k_e = 17,76 \times 1,11 = 19,71 \text{ GJ/MWh}$$

$$\text{Náklady na palivo} = S_{pal_{ed}} \times \text{cena uhlí} = 19,71 \times 50 = 985,5 \text{ Kč/MWh}$$

$$\text{Ostatní náklady} = S_{pal_{ed}} \times \text{ostatní proměnné} = 19,71 \times 20 = 394,2 \text{ Kč/MWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Náklady na povolenky} &= \text{cena povolenky} \times \text{měrné emise} \times S_{pal_{ed}} \times \text{kurz} \\ &= 5 \times 0,1 \times 19,71 \times 27 = 266,09 \text{ Kč/MWh} \end{aligned}$$

$$\text{Tržby za elektřinu} = \text{cena elektřiny} \times \text{kurz} = 30 \times 27 = 810 \text{ Kč/MWh}$$

$$\text{Výnos} = \text{Tržby za elektřinu}$$

$$\begin{aligned} &- \sum \text{všech nákladů} = 810 - (985,5 + 394,2 + 266,09) \\ &= -835,79 \text{ Kč/MWh} \end{aligned}$$

Výpočtem bylo zjištěno, že při původních vstupních hodnotách je provoz TDK velmi ztrátový. Jak je vidět výše ve výpočtu, ztráta činí 835,79 Kč/MWh. Proto je potřeba navrhnout taková opatření, aby provoz ztrátový nebyl, nebo alespoň ne v takové míře. Možnosti, jak toho dosáhnout, již byly popsány v kapitole 2. V této práci bude použita metoda degradace parametrů páry. Bude tedy následovat výpočet provozních parametrů, kde dojde ke snížení teploty a tlaku admisní páry za kotlem. Je zde i možnost snížit parametry napajecí vody, ale v tomto případě by nebyly úspory tak velké jako při degradaci parametrů páry

admisní. Jednalo by se přibližně o kilowaty. Teplotu t_a tedy snížíme na 400 °C a tlak na 5 MPa.

4.2.2 Návrh nového stavu parametrů

Vstupní hodnoty pro provoz s degradací parametrů, aby se dosáhlo snížení výkonu:

cena elektřiny = 30 €/MWh
kurz CZK/EUR = 27
cena uhlí = 50 Kč/GJ
povolenky CO₂ = 5 €/t
měrné emise = 0,1 t/GJ
ostatní proměnné = 20 Kč/GJ

$t_a = 400$ °C	$p_a = 5$ MPa	$i_a = 3197$ kJ/kg
$t_1 = 250$ °C	$p_1 = 1$ MPa	$i_1 = 2940$ kJ/kg
$t_e = 40$ °C	$p_e = 0,007$ MPa	$i_e = 2570$ kJ/kg
$t_k = 39$ °C	$p_k = 0,007$ MPa	$i_k = 163$ kJ/kg
$t_{nv} = 140$ °C	$p_{nv} = 0,7$ MPa	$i_{nv} = 589$ kJ/kg
$M_1 = 46$ t/h	$k_e = 1,11$	

Výpočet provozních parametrů se změněnými hodnotami admisní páry:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$M_1 = M_2 + M_3$$

$$M_1 \times i_{nv} = M_2 \times i_1 + M_3 \times i_k$$

$$M_2 = M_1 - M_3$$

$$M_1 \times (i_{nv} - i_1) = M_3 \times (i_k - i_1)$$

$$46 \times (589 - 2940) = M_3 \times (163 - 2940)$$

$$M_3 = 38,94 \text{ t/h}$$

$$M_2 = M_1 - M_3 = 46 - 38,94 = 7,06 \text{ t/h}$$

$$Q_{\text{výstup}} = M_1 \times i_a = 46 \times 3197 = 147,06 \text{ GJ}$$

$$Q_2 = M_2 \times i_1 = 7,06 \times 2940 = 20,76 \text{ GJ}$$

$$Q_3 = M_3 \times i_1 = 38,94 \times 2940 = 114,48 \text{ GJ}$$

$$Q_{\text{vstup}} = M_1 \times i_{nv} = 46 \times 589 = 27,09 \text{ GJ}$$

$$Q_{\text{kotle}} = Q_{\text{výstup}} - Q_{\text{vstup}} = 147,06 - 27,09 = 119,97 \text{ GJ}$$

$$P_{TG1} = M_1 \times (i_a - i_1) \times \eta_g \times \frac{1}{3,6} = 46 \times (3197 - 2940) \times 0,96 \times \frac{1}{3,6} = 3,15 \text{ MW}$$

$$P_{TG3} = M_3 \times (i_1 - i_e) \times \eta_g \times \frac{1}{3,6} = 38,94 \times (2940 - 2570) \times 0,96 \times \frac{1}{3,6} = 3,84 \text{ MW}$$

$$q_{el} = \frac{Q_{\text{kotle}}}{P_{TG1} + P_{TG3}} = \frac{119,97}{3,15 + 3,84} = 17,16 \text{ GJ/MWh}$$

$$S_{\text{pal}_{ev}} = \frac{q_{el}}{\eta_{\text{kotle}}} = \frac{17,16}{0,85} = 20,19 \text{ GJ/MWh}$$

$$S_{\text{pal}_{ed}} = S_{\text{pal}_{ev}} \times k_e = 20,19 \times 1,11 = 22,21 \text{ GJ/MWh}$$

$$\text{Náklady na palivo} = S_{\text{pal}_{ed}} \times \text{cena uhlí} = 22,21 \times 50 = 1110,5 \text{ Kč/MWh}$$

$$\text{Ostatní náklady} = S_{\text{pal}_{ed}} \times \text{ostatní proměnné} = 22,21 \times 20 = 444,2 \text{ Kč/MWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Náklady na povolenky} &= \text{cena povolenky} \times \text{měrné emise} \times S_{\text{pal}_{ed}} \times \text{kurz} \\ &= 5 \times 0,1 \times 22,21 \times 27 = 299,84 \text{ Kč/MWh} \end{aligned}$$

$$\text{Tržby za elektřinu} = \text{cena elektřiny} \times \text{kurz} = 30 \times 27 = 810 \text{ Kč/MWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Výnos} &= \text{Tržby za elektřinu} \\ &- \sum \text{všech nákladů} = 810 - (1110,5 + 444,2 + 299,84) \\ &= -1044,54 \text{ Kč/MWh} \end{aligned}$$

Po vypočtení nákladů a výnosů při degradaci parametrů admisní páry bylo zjištěno, že takový provoz teplárny je ještě více ztrátový, než při původním stavu - před degradací parametrů. Je tedy třeba zvolit jiný způsob snížení výkonu tak, aby se zmenšila ekonomická ztráta.

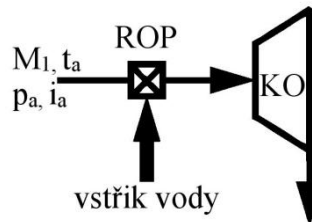
4.3 Další způsoby snižování výkonu

Vzhledem k tomu, že degradace parametrů (tzn. snížení admisní teploty a tlaku) nepřinesla požadované účinky, tak je třeba zvolit jiný způsob snížení výkonu. Jednou z možností v případě TDK je, že protitlaká turbína (viz. příloha 3) má regulovatelný odběr na svém výstupu - lze tedy regulovat tlak p_1 a teplotu t_1 . Zvýšil by se tedy tlak a tím pádem i teplota, což by byla alternativa deformace parametrů na vstupu do turbíny. Ovšem tím se dosáhlo přibližně stejného efektu jako při degradaci parametrů. Případně je možnost tyto dvě možnosti zkombinovat dohromady. Ve výpočtech bylo počítáno vždy s jednou termodynamickou účinností a proto by bylo dobré udělat technologickou zkoušku pro prověření, jestli zvýšený objem páry nebude mít další efekt na termodynamickou účinnost turbíny. Jednak aby neměla tato účinnost negativní vliv na protitlakou turbínu, ale ni na turbínu kondenzační. Dojde totiž ke změně tlaků a teplot a musí se ověřit vliv na provoz jednotlivých turbín. Jak kondenzační, tak protitlaké. Rovněž se ale musí ověřit vliv na vakuum kondenzačního provozu, aby nebylo moc velké na konci lopatek a nedošlo tak k poškození koncových řad. Popřípadě aby nekondenzovala voda. Tlak na výstupu z kondenzátoru je 9 kPa absolutních, to je poměrně vysoký tlak a kdyby hrozilo jeho zvýšení, tak by se lopatky mohly potřhat. To může být způsobeno změnou měrného objemu při stejné energii.

Při degradaci parametrů vyrobí teplárna méně MWh energie. Když bude nízká cena elektřiny, tak se sníží výkon. Ovšem to jde jen do určité míry kvůli limitování kotlem.

Takže stále teplárna musí dodávat určité množství uhlí do kotle ke spálení. Když bude cena záporná, tak se musí řešit omezení výkonu za pomoci turbíny. Budou se tedy mařit parametry tak,

aby teplárna vyráběla energii jen pro pokrytí své vlastní spotřeby, nebo se odstaví protitlaká turbína a zapojí se do technologického schéma redukce ostré páry (ROP), jak je znázorněno na obrázku 8.



Obrázek 19: Zapojení redukce ostré páry

Problém provozu přes redukcí ostré páry a využití jen kondenzační turbíny je ale v tom, že se začne odebírat elektřina ze sítě, která je zatížena distribučním poplatkem. Zároveň bude odebírán příspěvek z obnovitelných zdrojů energie. To není výhodné a je samozřejmě lepší elektřinu neodebírat, aby nevznikaly výdaje navíc. Proto je tedy, jak již bylo napsáno výše, lepší degradovat parametry tak, aby se pokryla jen vlastní potřeba teplárny. Popřípadě lze admisní páru nechat projít přes redukcí ostré páry, odkud se bude dále dělit do protitlaké a kondenzační turbíny. V případě využití regulátoru ostré páry je ale třeba dbát na to, aby nebyl dosažen limit jeho regulace množství ostré páry. Doby, kdy dojde k poklesu cen, jsou velice krátké. Zejména se jedná jen o hodinové až několikahodinové výchyly. Pro takto krátké časy je lepší udržet v provozu protitlakou turbínu a v případě velkého množství tepla by se redukovaly parametry. Nevýhoda regulátoru ostré páry je tedy jeho regulační rozsah, ale také nutnost vstříků vody do regulátoru. Regulátor totiž redukuje tlak například ze 6 MPa na 1 MPa, ale teplota zůstane stejná. Musí se tedy do systému doplňovat vstřík vody, aby se zvyšovaly objemy pracovní látky.

4.4 Porovnání mezi elektrárnou a teplárnou

Aby se mohlo provést porovnání provozu teplárny a elektrárny, tak je třeba vytvořit graf vývoje cen za rok. Takový graf lze vytvořit z dat, která jsou k dispozici na stránkách Operátora trhu s elektřinou v České republice. Do vneseného grafu se poté doplní přímka představující jednotlivé $S_{pa,ed}$ pro obě výroby. Tyto hodnoty se pochopitelně od sebe liší

a vznikne tak graficky znázorněné rozdělení, kdy je lepší používat elektrárnu a kdy teplárnu. Vzhledem k tomu, že se hodnota S_{pal_ed} mění v průběhu roku v závislosti na ročním období.

4.4.1 Elektrárna s 200MW bloky

Elektrárny s tímto typem bloků mají průměrnou spotřebu uhlí $S_{pal_ed} = 10$ GJ/MWh a jejich výrobní náklady se odhadem pohybují okolo 500 Kč/MWh. Tím pádem se jednoduchým výpočtem dostaneme k hodnotě 50 Kč/GJ, což jsou provozní náklady.

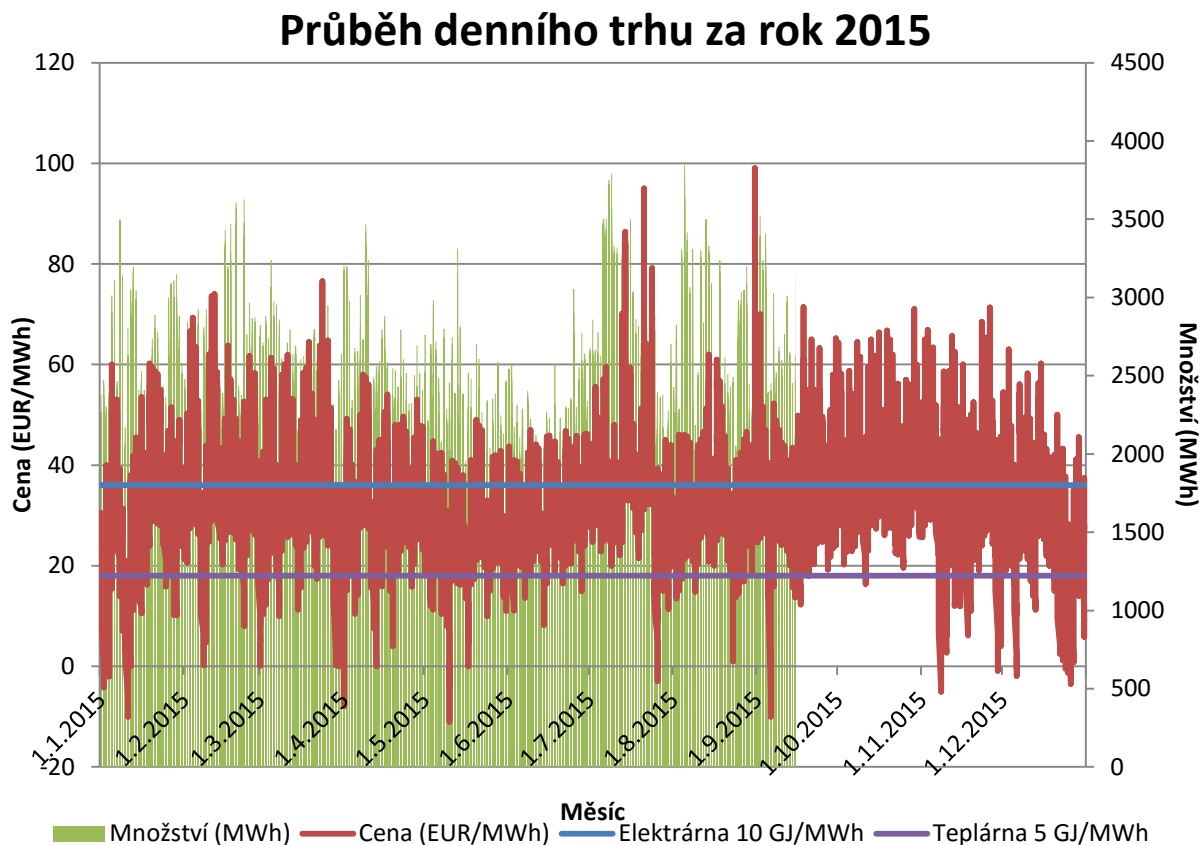
Pokud by se tato hodnota (spotřeba uhlí) počítala pomocí vzorečku, který má následující podobu:

$$S_{pal_ed} = \frac{3,6}{\eta_{bloku}} \quad (4.4)$$

Účinnost 200MW bloků dosahuje hodnot okolo 33 %. Dosazením do tohoto výrazu tedy dostaneme hodnotu $S_{pal_ed} = 10,9$ GJ/MWh. Pro zjednodušení ale v grafu vyneseme hodnotu 10 GJ/MWh.

4.4.2 Teplárna Dvůr Králové

V případě TDK se spotřeba uhlí S_{pal_ed} pohybuje po zprůměrování okolo hodnoty 5 GJ/MWh. Děje se tak v závislosti na ročním období. V létě je menší, v zimě větší. Provozní náklady se opět uvažují 50 Kč/GJ. Výpočty v této práci pro TDK byly uvažovány jen pro výrobu protitlakou. Tu lze totiž omezovat na výkonu. Proto je S_{pal_ed} na nízké hodnotě 5 GJ/MWh. Celkové porovnání je znázorněno na následujícím grafu.



Obrázek 20: Graf průběhu denního trhu podle OTE za rok 2015

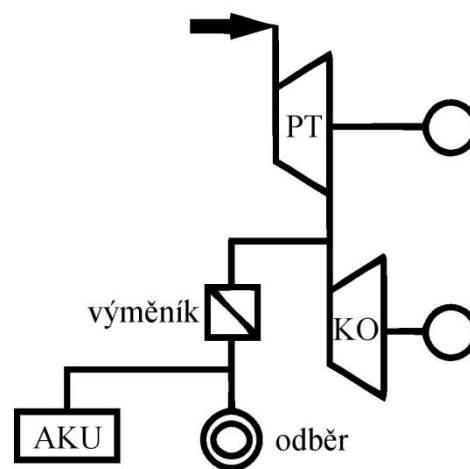
Z uvedeného grafu je vidět, že deformace parametrů je výhodná jen při ceně, která se pohybuje pod fialovou čarou znázorňující spotřebu paliva pro teplárnu. Omezování výroby v tomto případě tedy nemá moc smysl vzhledem k tomu, že se veškeré množství pohybuje nad danou mezí. Snižování výkonu na protitlakém provozu je tedy výhodné jen pro časová období, kdy se ceny pohybují pod danou oblastí, kterých je jen malé množství. V nejlepším případě jen tehdy, kdy jsou ceny záporné. U elektráren bude využití zvýšení její flexibility vyšší než v případě teplárny. Z toho vyplývá, že kogenerační výroba elektřiny je velmi účinná. Dochází při ní k přímé přeměně tepelné energie na energii elektrickou.

5 Návrh akumulace a ekonomické posouzení

V této kapitole bude proveden návrh na akumulaci tepelné energie v podobě nádrží na horkou vodu a jejich následné ekonomické zhodnocení.

5.1 Návrh akumulace

Pro výpočet budeme uvažovat nádrž na vodu o objemu 250 m³, která bude zapojena do systému teplárny způsobem znázorněným na obrázku 10.



Obrázek 21: Zapojení akumuláční nádrže do systému TDK

Pracovní teploty nádrže při tlaku 0,1 MPa jsou následující:

$$t_{\max} = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\min} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Pro výpočet obsažené energie je tedy potřeba určit entalpii při těchto teplotách:

$$i_{\max} = 398,03 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{\min} = 293,07 \text{ kJ/kg}$$

$$i\Delta = i_{\max} - i_{\min} = 398,03 - 293,07 = 104,96 \text{ kJ/kg} = 104,96 \text{ MJ/t} = 0,10496 \text{ GJ/t}$$

Využitelná energie na 250 tun vody je tedy násobek rozdílu energie a objemu nádrže:

$$Q_{\text{aku}} = i\Delta \cdot V = 0,10496 \cdot 250 = 26,24 \text{ GJ}$$

Teplárna je tedy schopna využít při těchto parametrech akumulace 26,24 GJ energie. Jedná se o nádrž otevřenou. Je zde tedy tlak atmosféry, který je 0,1 MPa. Pokud bychom

chtěli dosáhnout vyšších hodnot akumulace, je možnost udělat nádrže tlakové. Díky zvýšenému tlaku lze totiž dosáhnout vyšších teplot média uvnitř.

V případě tlakové akumulační nádrže tedy budou parametry například následující:

$$t = 250 \text{ °C}$$

$$p = 1 \text{ MPa}$$

Entalpie při těchto parametrech je tedy:

$$i = 2943,22 \text{ kJ/kg}$$

Kondenzát vracející se z teplárenství má parametry 60 °C a tlak 1 MPa. Entalpie vratného kondenzátu je tedy:

$$i_k = 251,97 \text{ kJ/kg}$$

$$i\Delta = i - i_k = 2943,22 - 251,97 = 2691,25 \text{ kJ/kg} = 2,69125 \text{ GJ/t}$$

Tento rozdíl entalpií je energie, která jde do soustavy centralizovaného zásobování teplem. Je tedy třeba teď udělat výpočet pro potřebné množství páry akumulace na tyto hodnoty. Potřebné množství páry tedy dostaneme následujícím výpočtem:

$$M = Q_{\text{aku}} / i\Delta = 26,24 / 2,69125 = 9,75 \text{ t}$$

Takto spočítané množství páry zaokrouhlíme pro zjednodušení na hodnotu 10 tun, které odpovídají přibližně 3 hodinám provozu v létě a 1 hodině v zimě. V létě umožní akumulace optimalizovat výrobu na turbogenerátoru 3. Při nízkých cenách elektřiny lze tak teplo dodávat do akumulační nádrže a případně i odstavení TG3. Při vysokých cenách je poté možné akumulační nádrže vybijet a páru z TG1 dodávat pouze do TG3. Bilance TG3 by měla být přibližně stejná, optimalizuje se však nasazení TG3 na optimální cenovou křivku. To se provede výběrem průměru maximálních a minimálních hodnot ceny z denního trhu. Vzhledem k tomu, že je to velmi proměnná hodnota, tak se tento průměr rozdílů pohybuje okolo 20 €/MWh. Výkon TG3 odpovídá v létě 3,6 MW na 25 tun páry. Ovšem v létě je minimální výkon 8 tun páry. Výkon teplárny je tedy roven 1,15 tun za hodinu. Takový výkon je lépe uplatnitelný na trhu. Ovšem je to při předpokladu, že kotel je na minimálním výkonu.

V zimních měsících je TG3 odstaven, vliv akumulace se tedy projeví pouze na TG1. Lze tedy tuto výrobu částečně optimalizovat na cenovou křivku. Výkon TG1 je 6,3 MW při hltnosti 70 tun páry. Reálně lze ovlivnit akumulací do 9,75 t. Rozložení denní výroby na TG1 je tedy rovno $6,3 \cdot 9,75 / 70$, což je 0,8775 tun za hodinu.

5.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení je provedeno pomocí ukazatele NPV, který představuje čistou současnou hodnotu. Spolu s ukazatelem IRR (vnitřní výnosové procento) je nejvíce používaným nástrojem pro ekonomické zhodnocení investic. Tedy v tomto případě investice do akumulační nádrže.

5.2.1 NPV

NPV bere v úvahu jen budoucí tok peněz, respektive výnosnost nebo ztrátovost daného projektu během jeho životnosti. Nezapočítávají se však do tohoto postupu finance z účetnictví a proto je to ukazatel nevhodný pro strategicky významné investice. Využívá se tedy víceméně pro zhodnocení krátkodobých nebo středně dlouhých časových období. [19] Výpočet NPV se provádí podle výrazu, kde CF představuje cash flow (tok peněz), r je úroková míra a t představuje dobu životnosti:

$$NPV = \sum_0^t \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (5.2.1)$$

Aby bylo možné provést výpočet ukazatele NPV, je třeba určit počáteční pořizovací náklady na akumulační nádrže, ale také jejich předpokládané roční úspory. Pořizovací náklady na akumulační nádrže se pohybují okolo 5 milionů Kč v případě atmosférické nádrže. V případě tlakové akumulační nádrže se jedná o částku zhruba 15 milionů Kč. Očekávané roční úspory díky nádržím jsou odhadnuty na 2 miliony Kč a 6 milionů Kč za rok pro atmosférickou a tlakovou akumulační nádrž. Úspory jsou jen orientační odhad. Pro přesné určení by bylo potřeba provést výpočty úspor v průběhu roku. Zejména by bylo potřeba provést rozdělení roku na období léto/zima, kdy se výroba liší.

Pro tento výpočet bude rovněž uvažována doba provozu 10 let, aby byl vidět vývoj návratnosti investic za dekádu a úrokovou míru 10%. Vše bude následně shrnuto v pro lepší

přehlednost. Jako příklad výpočtu bude napsán vzorec jen na dobu 3 let. Jeho podoba je tedy následující.

$$NPV_A = -5\,000\,000 + \frac{2\,000\,000}{(1+0,1)^1} + \frac{2\,000\,000}{(1+0,1)^2} + \frac{2\,000\,000}{(1+0,1)^3} = -26\,296 \text{ Kč}$$

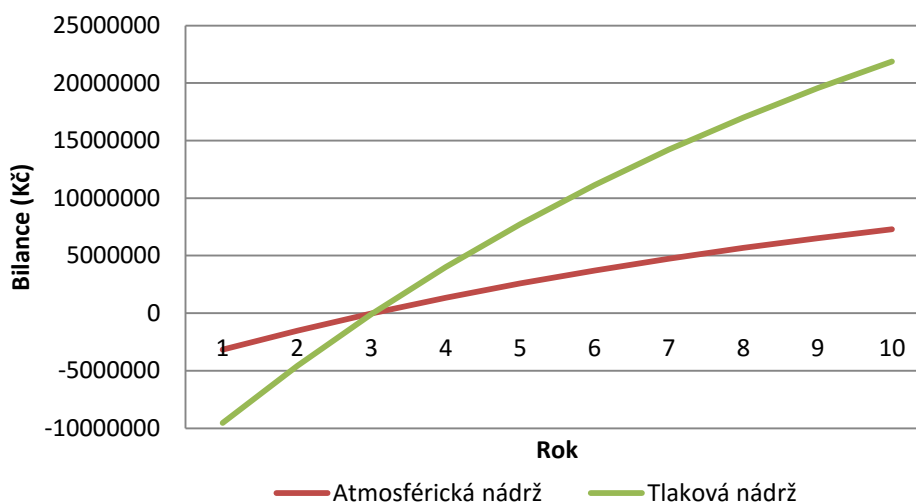
$$NPV_T = -15\,000\,000 + \frac{6\,000\,000}{(1+0,1)^1} + \frac{6\,000\,000}{(1+0,1)^2} + \frac{6\,000\,000}{(1+0,1)^3} = -78\,888 \text{ Kč}$$

Jak je tedy vidět z výpočtů, po 3 letech provozu je tato investice ztrátová, ale s přibývajícím léty se dostává ze záporných hodnot do kladných, jak je vidět v následující tabulce.

Tabulka 4: Porovnání NPV za dobu 10 let

Rok	NPV (Kč)	
	Atmosférická nádrž	Tlaková nádrž
1.	-3 181 818	-9 545 456
2.	-1 528 926	-4 586 778
3.	-26 296	-78 888
4.	1 339 731	4 019 193
5.	2 581 574	7 744 721
6.	3 710 521	11 131 564
7.	4 736 838	14 210 513
8.	5 669 852	17 009 557
9.	6 518 048	19 554 143
10.	7 289 134	21 867 403

Ekonomické zhodnocení pomocí NPV



Obrázek 22: Ekonomické zhodnocení pomocí NPV

5.2.2 IRR

Zkratka IRR představuje Internal Rate of Return. Tedy v překladu vnitřní výnosové procento. V praxi představuje výnosnost zařízení, do kterého se investovalo, po dobu jeho provozu. Zjednodušeně řečeno IRR představuje, kolik procent vyděláme. Jeho výpočet je však omezen podmínkou, že záporné peněžní toky jsou jen na počátku investice. [20] Vzorec pro výpočet je uveden v rovnici 5.2.2, kde IN představuje počáteční investici, r je diskont, CF_t představuje peněžní tok za časové období t .

$$0 = \sum_0^t \frac{CF_t}{(1+r)^t} - IN \quad (5.2.2)$$

Po dosazení do vzorce tedy pro období na 3 roky vznikne rovnice ve tvaru:

$$0 = -5\,000\,000 + \frac{2\,000\,000}{(1+r)^1} + \frac{2\,000\,000}{(1+r)^2} + \frac{2\,000\,000}{(1+r)^3} \rightarrow IRR_A = 9,7\%$$

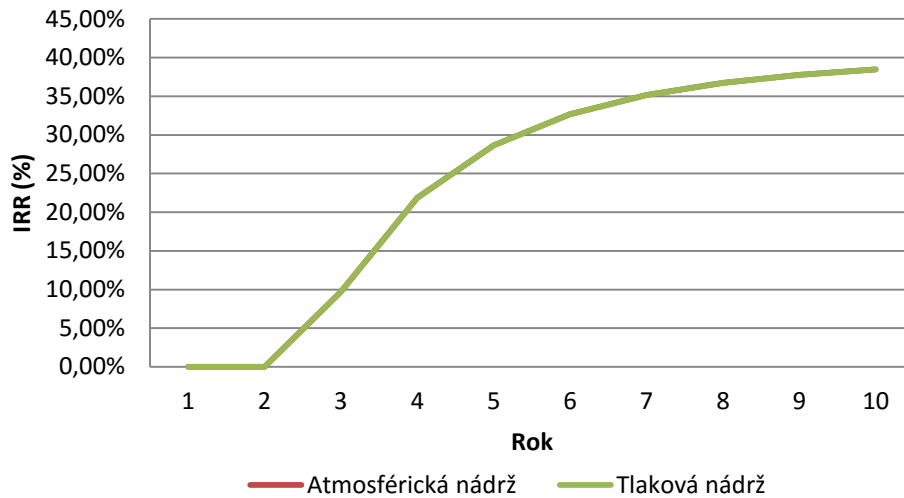
$$0 = -15\,000\,000 + \frac{6\,000\,000}{(1+r)^1} + \frac{6\,000\,000}{(1+r)^2} + \frac{6\,000\,000}{(1+r)^3} \rightarrow IRR_T = 9,7\%$$

Vypočtené vnitřní výnosové procento po třech letech je u obou variant stejné a je rovno 9,7 %. Rovněž v dalších letech se vývoj IRR shoduje. To ovšem není v praxi moc reálné a proto by bylo nutné provést přesnější výpočty. Vývoj IRR v jednotlivých letech je znázorněn v následující tabulce a grafu.

Tabulka 5: Porovnání IRR za dobu 10 let

Rok	IRR (%)	
	Atmosférická nádrž	Tlaková nádrž
1.	0,00	0,00
2.	0,00	0,00
3.	9,70	9,70
4.	21,86	21,86
5.	28,65	28,65
6.	32,66	32,66
7.	35,14	35,14
8.	36,72	36,72
9.	37,76	37,76
10.	38,45	38,45

Ekonomické zhodnocení pomocí IRR



Obrázek 23: Ekonomické zhodnocení pomocí IRR

Podle ekonomického zhodnocení pomocí ukazatele NPV vychází výhodněji do třetího roku provoz atmosférické akumulční nádrže. Od čtvrtého roku dál je výhodnější tlaková nádrž. Po 10 letech provozu generuje již zisk téměř 22 milionů Kč oproti atmosférické nádrži se ziskem přes 7 milionů Kč. Co se týče ukazatele IRR, tak shodou okolností vyšel v obou případech stejný. Nelze tedy říci, která varianta se jeví jako lepší. Vzhledem k tomu, že se předpokládá delší doba provozování akumulace než 3 roky, tak se jeví jako lepší volba nádrž tlaková.

Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na návrh opatření vedoucí ke snížení dosažitelného výkonu teplárny v době nízkých nebo záporných cen elektřiny. Vzhledem k tomu, že záporné ceny elektřiny jsou nežádoucí jev, který se vyskytuje stále častěji, tak je tomu třeba předcházet. Bylo tedy navrženo několik metod, jak dosáhnout snížení výkonu teplárny, aby neprodávala za zápornou cenu.

Mezi takto navržené metody se řadí úprava flexibility zdroje, ovšem to je omezeno nízkým průtokem a následným přehřátím potrubí. Další varianta, jak snížit výkon, je úmyslné zvýšení vlastní spotřeby teplárny. Při záporných cenách se tedy může spustit mletí vápence, pásový dopravník a nebo odsíření. Popřípadě přechod z turbonapaječky na elektronapaječku. Tato práce ale řešila snížení výkonu pomocí degradace provozních parametrů a porovnává je s provozem elektrárenských 200 MW bloků. Nejdříve byly spočítány parametry před degradací, kdy se ukázalo, že je teplárna ve ztrátě 835,79 Kč/MWh. Poté byl proveden výpočet s degradací parametrů admisní páry a došlo se k závěru, že v takovém případě ztrátovost vzrostla na částku 1044,54 Kč/MWh. Jednalo se totiž o výpočet, kdy byla uvažována celoroční degradace a kdy bude taková výroba zisková. Z toho vyplývá, že degradace parametrů je vhodná jen v dobách, kdy dojde k záporným cenám elektřiny. Ovšem i tak by degradace parametrů neměla velký přínos, protože je výskyt záporných cen elektřiny nízký - jen několik hodin v roce. Mnohem větší vliv na snižování výkonu má akumulace tepelné energie.

Byla tedy navržena výstavba akumulční nádrže. o objemu 250 m³ vody. Provedení takové nádrže je možné ve dvou variantách. Jedná se o atmosférickou a tlakovou nádrž. Náklady na atmosférickou nádrž by byly přibližně 5 milionů Kč a na tlakovou 15 milionů Kč. Doba jejich provozu se předpokládá na 10 let. Pomocí ekonomického posouzení metodou NPV se došlo k výsledku, že se v obou případech vyplatí provoz těchto nádrží již po čtvrtém roce provozu. Ovšem vzhledem k lepším provozním parametrům tlakové nádoby se jeví jako lepší. Po 10 letech provozu generuje zisk již téměř 22 milionů Kč oproti atmosférické se ziskem 7,3 milionu Kč. S ohledem na stejné IRR je tedy doporučena výstavba tlakové akumulční nádrže.

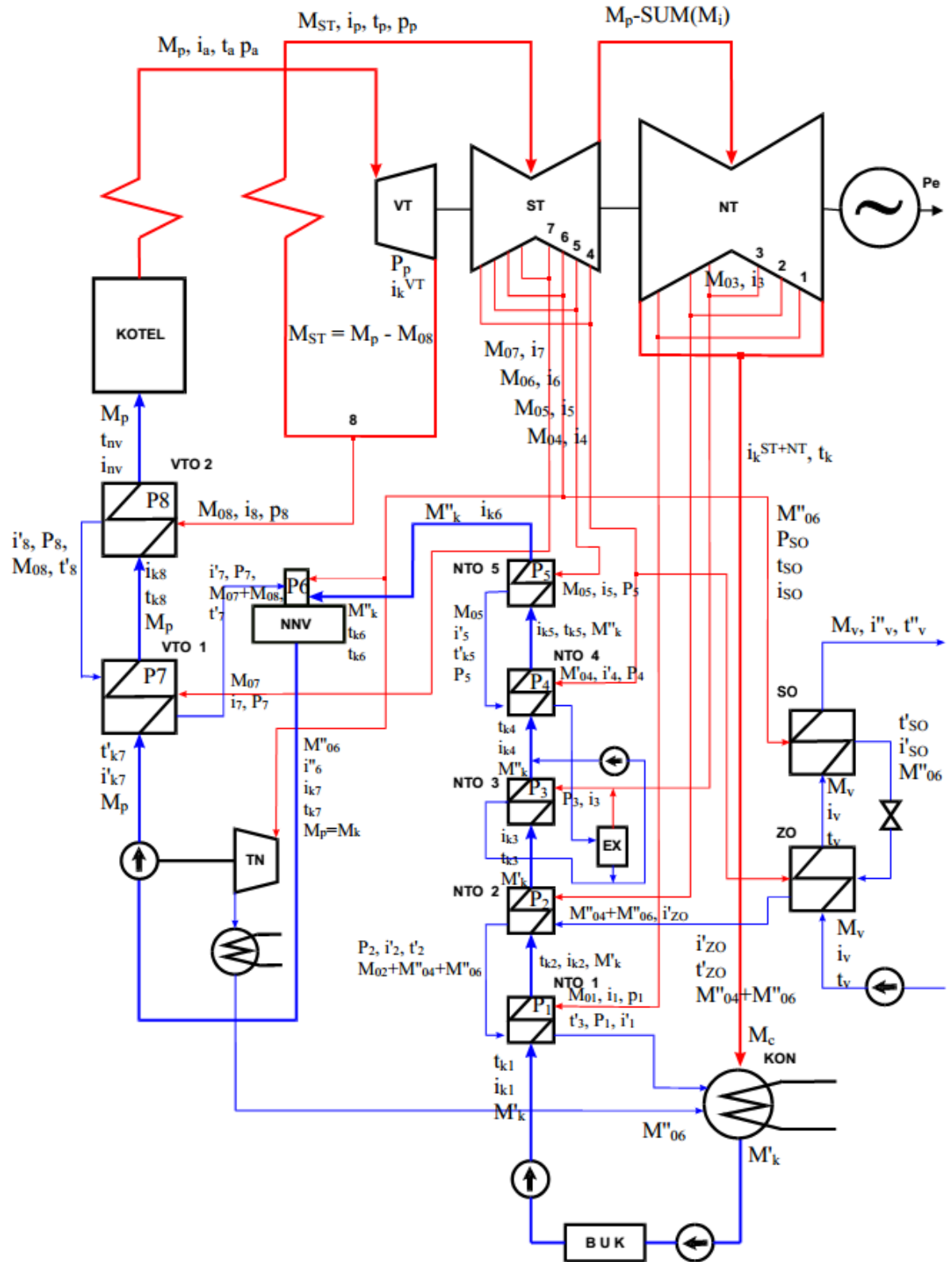
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KARAFIÁT, Josef. *Popis systémů CZT Historie, typy a principy KVET* [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/Vyroba/Popis_systemu_CZT.pdf
- [2] O Energetice.cz: *Jak funguje soustava centrálního zásobování teplem v ČR?* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/teplo/jak-funguje-soustava-centralniho-zasobovani-teplem-v-cr/>
- [3] Pro-Energy: *Vývoj teplárenství v České republice* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.pro-energy.cz/clanky4/2.pdf>
- [4] KUBÍN, Miroslav. *Proměny české energetiky: historie, osobnosti, vědecko-technický rozvoj*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2009. ISBN 978-80-254-4524-2.
- [5] Pražská teplárenská: *Základní pojmy v zásobování teplem* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.ptas.cz/cs/dodavky-tepla/prakticke-informace-pro-zakazniky/zakladni-pojmy-v-zasobovani-teplem/>
- [6] Teplárenské sdružení České republiky: *sdržení podnikatelů v teplárenství* [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.tscr.cz/data/aktuality/obrr/primencr.gif>
- [7] MARTÍNEK, Zbyněk. *Teplárenství a tepelné sítě. [přednášky]*. Plzeň: FEL ZČU, 2015
- [8] *Teplárenské sdružení České republiky: Kombinovaná výroba elektřiny a tepla v uhelné teplárně* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.tscr.cz/schema/?ids=1&h=550&x=611674>
- [9] KLEMENT, Ondřej. *Návrh akumulace tepla v soustavě CZT TDK*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [10] ŠEVČÍK, Vlastimil. *Pevnostní výpočet mlýnu pro drcení uhlí*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] *VÝMĚNÍKY TEPLA A KOTLE* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr1\[1\].pdf](http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr1[1].pdf)
- [12] *Invelt group: Popis vybraných kotlů* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: http://www.invelt.cz/media/soubory/downloads/servis/popis_vybranych_kotlu.pdf
- [13] *TZBinfo: Kotle – 2. část* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [14] *Transformační technologie: 23. Tepelné turbíny a turbokompresory* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-turbiny-a-turbokompresory.html>

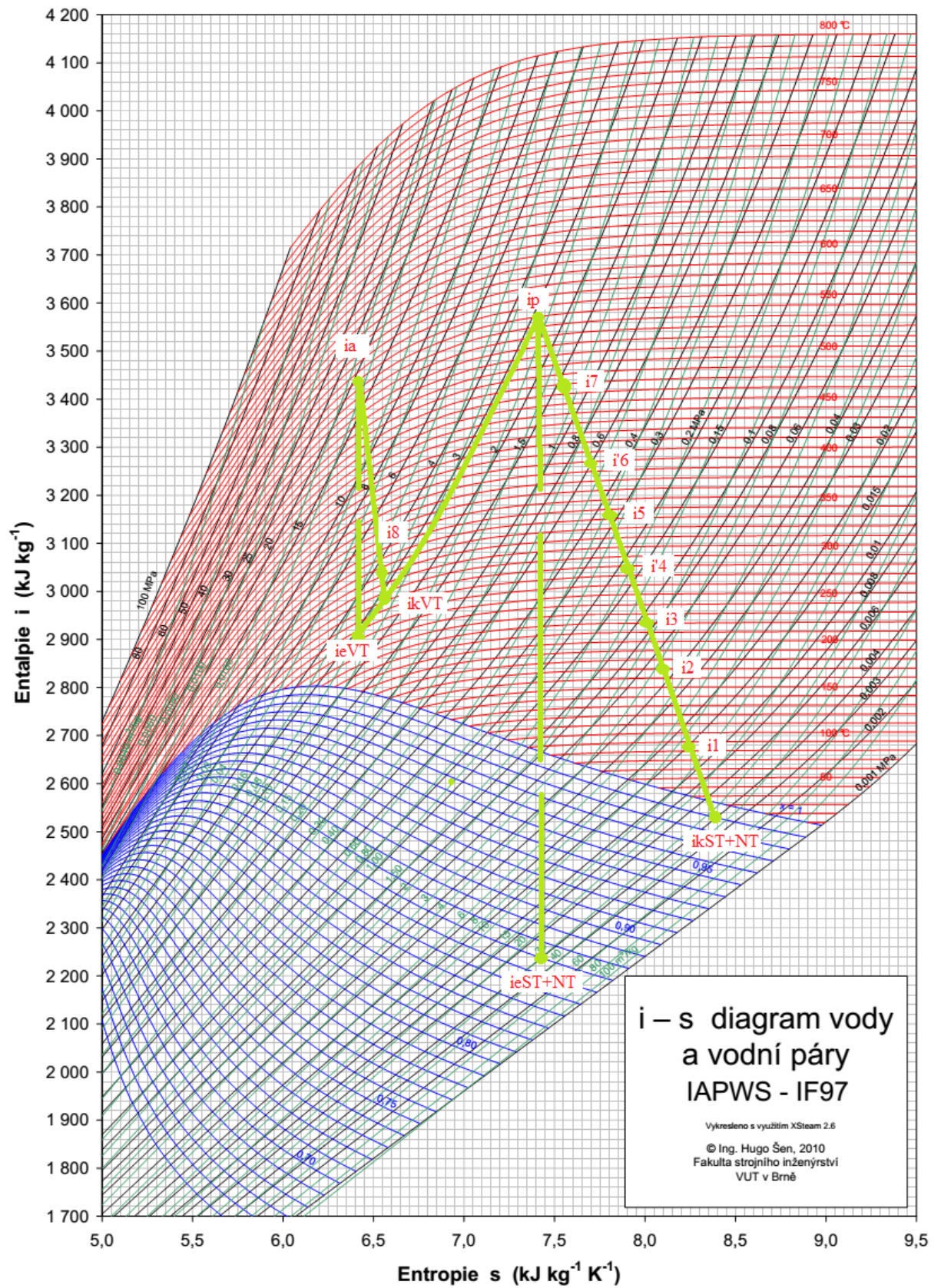
- [15] ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010, 244 s. ISBN 978-80-7043-862-6.
- [16] CIKHART, Jiří. *Soustavy centralizovaného zásobování teplem*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00021-1.
- [17] ČEZ.cz: *Mokrá vápencová vypírka spalin* [online]. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/vypirka_5.html
- [18] *Elektrárny Poříčí: Teplárna Dvůr Králové* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/porici.html>
- [19] *Hodnocení investic: Čistá současná hodnota (NPV) stručně a jasně* [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/hodnoceni-investic-cista-soucasna-hodnota-npv-strucne-a-jasne>
- [20] *Hodnocení investic: Vnitřní výnosové procento (IRR)* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/hodnoceni-investic-vnitri-vynosove-procento-irr>

Přílohy

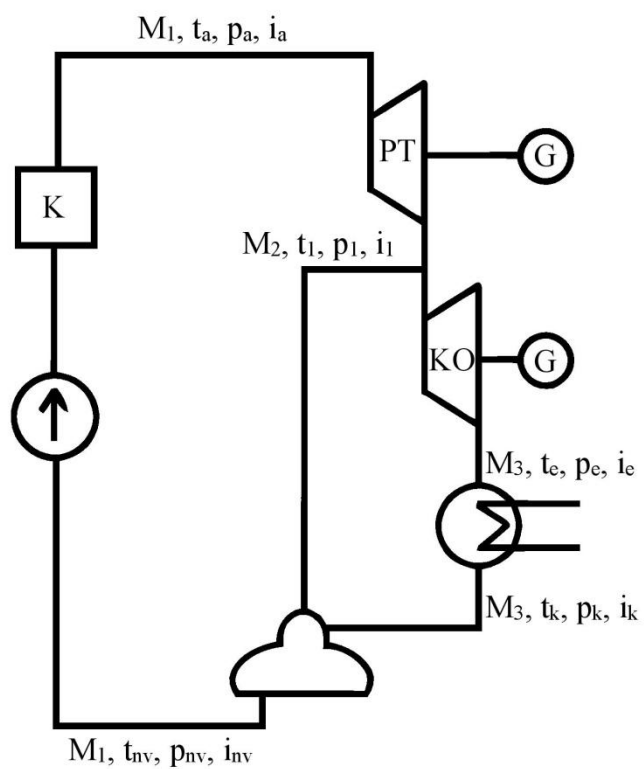
Příloha 1 - Technologické schéma 200 MW bloku Chvaletice / Dětmorovice



Příloha 2 - Průběh expanzí páry na 200MW elektrárenských blocích



Příloha 3 - Technologické schéma teplárny Dvůr Králové



Příloha 4 - CD disk