

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Radana Šimůnková



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

OPTIMALIZACE PROVOZU TEPELNÝCH ELEKTRÁREN

OPTIMIZATION OF THERMAL POWER PLANT OPERATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radana Šimůnková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Studentka: Radana Šimůnková

ID: 206284

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace provozu tepelných elektráren

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište a zpracujte principy výroby a rozvodu elektrické energie pro různé energetické zdroje.
2. Proveďte podrobný rozbor technologického schématu tepelné elektrárny a specifikujte možnosti zvyšování účinnosti výrobních bloků.
3. Na základě platných legislativních předpisů proveďte výpočet pro spolupracující energetické zdroje - sestavte matematický model takového systému.
4. Energeticko-ekonomické vyhodnocení navrženého řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího bakalářské práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 1.6.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce Optimalizace provozu tepelných elektráren je koncipována na čtyři části. V první části je uveden princip výroby elektrické energie. V druhé část je uveden rozbor technologického schématu tepelné elektrárny a možnosti zvyšování účinnosti výrobních bloků. Ve třetí části je uveden matematický model dvou paralelně pracujících bloků. Čtvrtá část obsahuje ekonomické zhodnocení navrženého matematického modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

technologické okruhy, technologické schéma, spolupráce dvou bloků, emisní povolenky

ABSTRACT

The bachelor's thesis Optimization of the operation of thermal power plants has four parts. The first part presents the principle of electricity production. The second part presents an analysis of the technological scheme of the thermal power plant and the possibilities of increasing the efficiency of production units. The third part presents a mathematical model of two blocks working in parallel. The fourth part contains an economic evaluation of the proposed mathematical model.

KEYWORDS

technological circuits, technological scheme, cooperation of two units, emission allowances

ŠIMŮNKOVÁ, Radana. *Optimalizace provozu tepelných elektráren*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2021, 37 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Radana Šimůnková
VUT ID autora: 206284
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: Optimalizace provozu tepelných elektráren

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Mastnému, Ph.D. za vstřícnost, ochotu a přínosné konzultace.

Obsah

Úvod	1
1 Princip výroby elektrické energie	2
1.1 Hlavní technologické okruhy	3
1.2 Hlavní technologická zařízení	5
1.2.1 Parní kotle	5
1.2.2 Parní turbíny	7
1.2.3 Ostatní strojní zařízení	8
1.3 Typy elektráren podle použitých turbín	10
2 Technologické schéma tepelné elektrárny	14
2.1 Tepelné schéma	14
2.2 Elektrické schéma elektrárny	16
2.2.1 Hlavní elektrické schéma	16
2.2.2 Vlastní spotřeba elektrárny	16
2.3 Zvyšování tepelné účinnosti oběhu	17
3 Spolupráce dvou bloků	23
3.1 Vyvedení výkonu dvou elektrárenských bloků	23
3.2 Optimální rozdělení výkonů dvou elektrárenských bloků	24
4 Energeticko-ekonomické zhodnocení	28
4.1 Emisní povolenky	29
Závěr	31
Literatura	32
Seznam symbolů a zkratk	35
5 Přílohy	37

Seznam obrázků

1.1	Diagram is	2
1.2	Technologické schéma tepelné elektrárny	5
1.3	Schéma atmosférického fluidního kotle s cirkulační vrstvou	7
2.1	Zjednodušené tepelné schéma kondenzační elektrárny	15
2.2	Napájení rozvodny vlastní spotřeby	17
2.3	Zjednodušené tepelné schéma s mezipřihříváním	22
3.1	Elektrizační schéma dvou blokové elektrárny	24
3.2	Matematický model pro výpočet optimálního rozdělení výkonů	26
3.3	Graf optimálních výkonů bloků v závislost na požadovaném zatížení	27
4.1	Vývoj ceny emisních povolenek	30
5.1	i-s diagram	37

Seznam tabulek

2.1	Zadané parametry 200 MW elektrárny	15
2.2	Vypočtené hodnoty 200 MW elektrárny	16
2.3	Výroba elektřiny v parních elektrárnách za rok 2020	17
2.4	Vstupní hodnoty 200 MW bloku s mezipřihříváním	22
2.5	Vypočtené hodnoty pro blok s mezipřihříváním	22
3.1	Vstupní hodnoty 500 MW bloku s mezipřihříváním	23
3.2	Hodnoty 500 MW bloku při $P_e = 500$ MW	23
3.3	Hodnoty nákladových charakteristik a regulační rozsah bloků	26
3.4	Přípustný rozsah požadované zatížení	26
3.5	Vypočtené hodnoty pro tři různá požadovaná zatížení	27
4.1	Provozní ukazatele bloků	28
4.2	Hodnoty nákladů při zvýšení výkonu	29
4.3	Cena emisních povolenek	30

Úvod

Energie nevzniká a ani nezaniká, pouze se přeměňuje jedna forma energie v jinou. V tepelných elektrárnách dochází k přeměně chemicky utajené energie paliva na energii elektrickou, která je následně distribuována k jednotlivým odběratelům. Tepelné elektrárny využívají jako paliva neobnovitelné zdroje energie, kterých je na naší planetě omezené množství. Spalováním neobnovitelných zdrojů se uvolňují do ovzduší škodlivé plyny, které se mohou podílet na změně klimatu.

Podle zdroje [1] se parní elektrárny v roce 2020 podílely 48 % na instalovaném výkonu České republiky a ve stejném roce dodaly do sítě parní elektrárny 43 % celkově vyrobené elektřiny brutto v ČR. Podle zdroje [2] by mělo dojít v roce 2038 k odstavení uhelných elektráren na návrh uhlé komise. Ale o tomto termínu se stále ještě jedná. Je možné, že k odstavení uhelných elektráren dojde i dříve z důvodu zvyšující se ceny za vypouštění emisí.

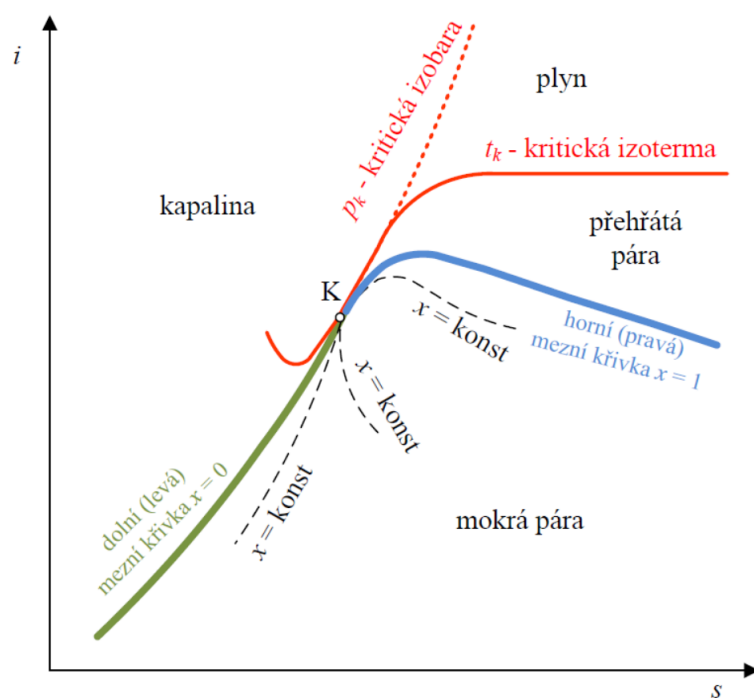
Bakalářská práce Optimalizace provozu tepelných elektráren má za úkol zmapovat možnosti zefektivnění provozu tepelných elektráren. Práce je rozdělena na čtyři základní části. První část je zaměřena na princip výroby elektrické energie. Jsou zde popsány hlavní technologické okruhy a uvedena hlavní technologická zařízení tepelných elektráren. Druhá část je zaměřena na rozbor tepelného a elektrického schématu elektrárny a na možnosti zvyšování účinnosti výrobních bloků. Je zde popsán postup při sestavování tepelného schématu. Ve třetí části je představen matematický model optimálního rozdělení výkonů dvou paralelně pracujících bloků. Čtvrtá část hodnotí přínos optimalizace a poukazuje na další aspekty nákladovosti provozu uhelných elektráren.

1 Princip výroby elektrické energie

V parních elektrárnách je přeměňována chemická energie paliva na mechanickou energii parní turbíny podle tepelného Rankin-Clausiova cyklu [3]. Mechanická energie je v generátoru přeměněna na elektrickou energii, která je distribuována odběratelům.

Rankin-Clausiov cyklus

Informace jsou čerpána ze zdroje [4]. Napájecí čerpadlo vhání vodu do kotle, kde je vodě dodáno teplo a voda změní skupenství. Vzniklá sytá pára se v přehříváku přehřívá. Přehřátá pára putuje do turbíny, kde adiabaticky expanduje a vykoná mechanickou práci. Z turbíny pára putuje do kondenzátoru, kde odevzdává teplo chladicí vodě. Zkondenzovaná voda je tlačena napájecím čerpadlem zpět do kotle. Změnu skupenství vody lze graficky znázornit pomocí is diagramu viz Obr. 1.1. Dolní mezní křivka je spojnice bodů syté kapaliny. Horní mezní křivka je spojnice bodů páry na mezi sytosti. Oblast mokré páry se nachází mezi dolní a horní mezní křivkou. Nad horní mezní křivkou se nachází oblast přehřáté páry.



Obr. 1.1: Diagram is

1.1 Hlavní technologické okruhy

Informace v následujícím textu jsou čerpány ze zdrojů [3] a [5]. Rozdělení technologických okruhů:

- a) okruh paliva a škváry
- b) okruh vzduchu a kouřových plynů
- c) okruh napájecí vody a páry
- d) okruh chladicí vody
- e) okruh elektrický

Okruh paliva a škváry

Palivo se přiváží na skládku paliva, odkud je pásovými dopravníky přivedeno do drtiče a následně přepraveno do zásobníku surového uhlí v kotelně. Ze zásobníků putuje uhlí do sušící šachty, kde pomocí kouřových plynů dochází k jeho sušení. Vysušené uhlí dále putuje do uhelných mlýnů, kde dochází k jeho rozemletí na prášek, který je poté vzduchem transportován přes třídič k práškovým hořákům v kotli. Hořením paliva v kotli se uvolňuje vázaná chemická energie, která je předána dalším nositelům energie. Po zachycení tuhých zbytků (škváry nebo strusky, popelu a popílku) v kouřových kanálech a odlučovačích popílku se tuhé zbytky hydraulicky splavují do bagrovacích jímek, ze kterých je směs vody, strusky a popílku dopravována bagrovými čerpadly na složiště.

Okruh vzduchu a kouřových plynů

Vzduch vedený vzduchovými ventilátory z horní části kotelny nebo zvenku se v ohřívacím ohřívá a následně se vhání do topeniště, ve kterém plní primární a sekundární funkci. Pomocí primárního (dopravního) vzduchu je dopraven uhelný prášek z mlýnů přes třídič do hořáků. Sekundární (spalovací) vzduch je využíván ke spalování uhelného prášku v topeništi. U fluidních kotlů bývá využíván i terciální vzduch, díky kterému je možné dohořívání paliva ve vznosu. V topeništi dochází k okysličování spalitelných prvků paliva za vzniku tepla a kouřových plynů, které obsahují například oxid uhličitý, oxidy síry a dusíku, vodní páru. Spaliny ze spalovací komory jsou přemístěny do komínu přes zadní tah kotle, odlučovače popílku a kouřové ventilátory. Díky sálání, vedení a proudění je předáváno užitečné teplo vodě a páře.

Okruh napájecí vody a páry

Okruh napájecí vody a páry je uzavřený. Napájecí voda je tvořena kondenzátem a přídatnou vodou, která je chemicky a mechanicky zbavena rozptýlených a rozpuš-

těných organických i anorganických látek. Napájecí voda se shromažďuje ve spodní části kondenzátoru, odkud je vedena pomocí kondenzačních čerpadel do nízkotlakých regeneračních ohříváků a odtud do odplynováku, kde dochází k odplynění napájecí vody, která je následně shromažďována v napájecí nádrži. Pomocí napáječek je vháněna napájecí voda přes vysokotlaké ohříváky a ekonomizér do kotle. V ekonomizéru dochází k ohřevu vody téměř k bodu varu. Pára vyrobená ve varném systému kotle se vede do několikastupňového přehříváku, kde dochází k jejímu přehřátí na požadovanou teplotu. Parním potrubím je přivedena přehřátá pára do vysokotlakého stupně turbíny, ve kterém dochází z její expanzi. Jestli má turbína přihřívání, je pára vedena do přihříváku, ve kterém se přihřeje na požadované parametry. Pára je následně vedena na vstup středotlakého a následně nízkotlakého stupně turbíny. Z posledního kola kondenzační turbíny proudí pára do kondenzátoru. Uzavřenost tohoto okruhu je narušena odluhem a odkalem, netěsnostmi a ucpávkovou parou.

Okruh chladící vody

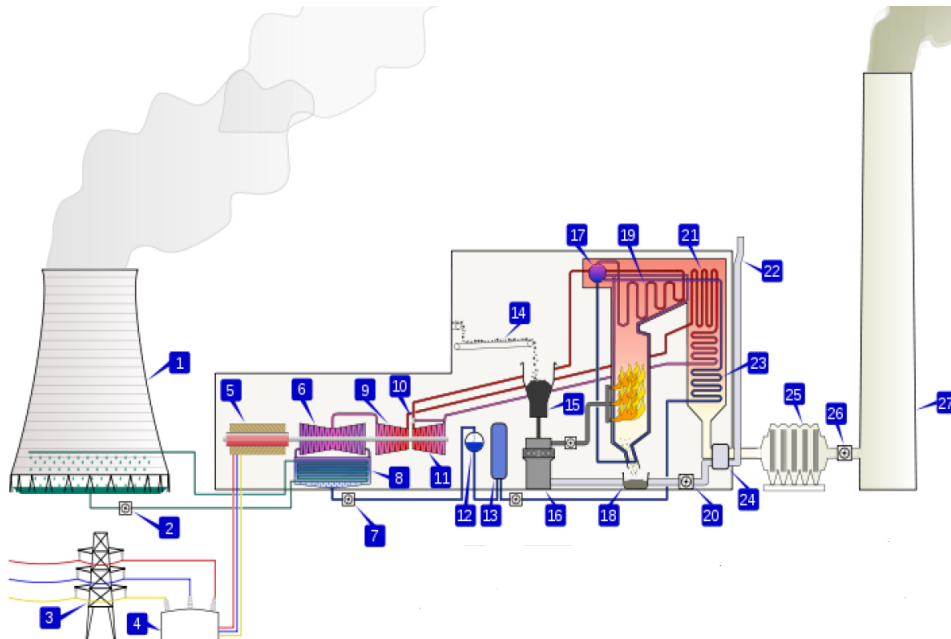
Okruh chladící vody může být otevřený nebo uzavřený. Otevřený okruh využívá průtočného chlazení. Uzavřený okruh využívá cirkulační chlazení, při kterém dochází k odebírání vody z nádrže pod chladící věží pomocí chladících čerpadel, které čerpají vodu do kondenzátoru viz Obr. 1.2. Zde je ohřívána skupenským teplem kondenzační páry. Ohřátá voda je odvedena nad odpařovací systém chladící věže, kde díky proudícímu vzduchu předá teplo atmosféře. Kvůli odpařování chladící vody se zvyšuje koncentrace rozpuštěných solí. Aby se soli neusazovaly v trubkách kondenzátoru, v potrubí a odpařovacím systému věží, se provádí odluhování. V chladící věži dochází k ochlazení vody díky částečnému vedení tepla mezi vodou a vzduchem, ale z velké části zde dochází k značnému úbytku vody způsobené jejím vypařováním. Tato ztráta vody se musí kompenzovat.

Okruh elektrický

Elektrický okruh je rozvětvený, kde hlavní větev vyústuje do elektrizační soustavy a vedlejší napájí spotřebiče v elektrárně. Na začátku elektrického okruhu je přeměňována mechanická energie turbíny na elektrickou, která je odvedena ze svorek alternátoru přes transformátory, přenosová a distribuční vedení a rozvodny až ke spotřebitelům.

Obr. 1.3 ze zdroje [6] zobrazuje: 1. Chladící věž, 2. Čerpadlo chladící vody, 3. Vedení VN, 4. Transformátor, 5. Generátor, 6. Nízkotlaká turbína, 7. Čerpadlo kondenzační vody, 8. Kondenzátor, 9. Středotlaká turbína, 10. Regulátor páry, 11. Vysokotlaká turbína, 12. Odvzdušňovač, 13. Předehříváč zásobní vody, 14. Přísun uhlí,

15. Zásobník na uhlí, 16. Drtič uhlí, 17. Parní kotel, 18. Jímka na popel, 19. Přehřívač páry, 20. Dmychadlo, 21. Prostřední ohříváč, 22. Vstup vzduchu 23. Ekonomizér, 24. Předehříváč vzduchu, 25. Čistič kouře, 26. Sací čerpadlo, 27. Komín



Obr. 1.2: Technologické schéma tepelné elektrárny

1.2 Hlavní technologická zařízení

V následující textu jsou uvedena hlavní technologická zařízení. Informace týkající se hlavních technologických zařízení jsou čerpány ze zdrojů [3] a [5].

1.2.1 Parní kotle

Rozdělení parních kotlů podle zdroje [5]:

1. Bubnové kotle
2. Průtlačné kotle
3. Fluidní kotle

Bubnové kotle

V odpařovacím systému bubnových kotlů s přirozenou cirkulací vzniká díky rozdílu měrných hmot vody a parovodní směsi přirozený oběh vody. Uzavřený okruh odpařovacího systému je tvořen zavodňovacími trubkami a varnicemi, které jsou na

straně vody spojeny zavodňovací komorou a na straně parovodní směsi bubnem. Voda přihrátá v ekonomizéru putuje do bubnu, který je využíván k napájení okruhu a k odlučování páry od vody. Voda je shromažďována ve spodní části bubnu, ze které se transportuje pomocí zavodňovacích trubek do zavodňovací komory, kde se rozděluje do jednotlivých varnic. Ve varnicích dochází k předání tepla vodě, která se následně vypařuje. Parovodní směs z varnic putuje do bubnu, ve kterém dochází k separaci páry. Z bezpečnostních důvodů je nezbytné, aby byl varný systém kotle vždy chlazen, aby za žádných provozních stavů nemohlo dojít k poruše cirkulace vody v kotli. Kotle s přirozenou cirkulací jsou spolehlivé a nejsou příliš citlivé na nerovnoměrnost v napájení vodou a ve výkonu spalovacího zařízení. Nevyžadují tak kvalitní napájecí vodu jako kotle průtočné, protože soli lze z oběhu odvádět odluhem. Nevýhodné je pomalejší najíždění kotlů.

Průtlačné kotle

Průtlačné kotle využívají vysokých tlaků páry v podkritické a nadkritické oblasti. Pomocí tlaku napáječky je vynucen pohyb směsi vody a páry v odpařovací ploše výparníku průtočného kotle. Rychlost vody se dá nastavit dle potřeby. Napájecí voda musí být úplně demineralizovaná, jinak by mohlo docházet k usazování solí. Je potřebné trvale regulovat stálý poměr množství napájecí vody a výkonu ohniště. U průtočných kotlů je rychlost najíždění vyšší než u kotlů bubnových.

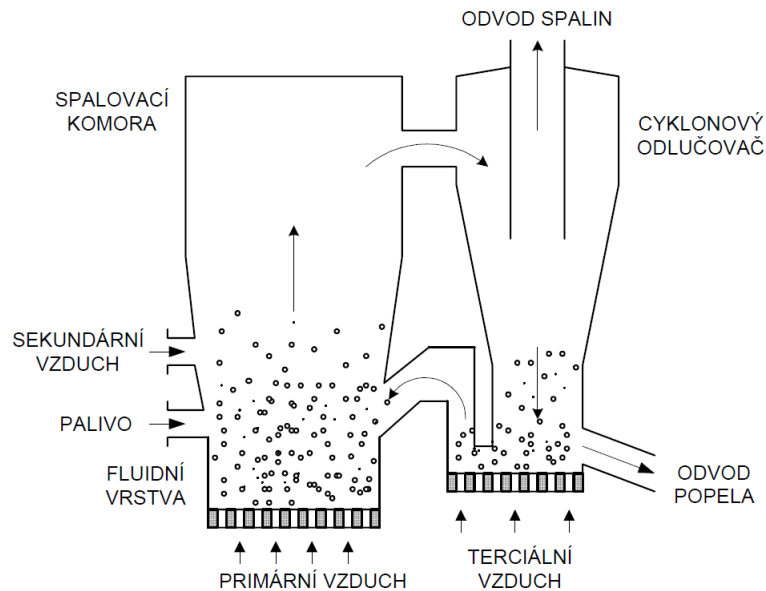
Fluidní kotle

Fluidní kotle využívají ke spalování pevných látek rošt – fluidní lože, která umožňují neustálý přísun paliva s aditivem a přísun vzduchu. Díky tomu je umožněno trvalé víření paliva nad roštem. Společně s přídavnými komponenty vytváří palivo fluidní vrstvu, která má určitou měrnou hmotnost a viskozitu.

Na obrázku Obr. 1.3 je znázorněno schéma atmosférického fluidního kotle s cirkulační vrstvou. Ze spodní části roštu je přiváděn primární vzduch sloužící k nadlehčování směsi a přísunu kyslíku potřebného pro spalování. Tíha různě velkých částic hořícího paliva musí být přibližně rovna aerodynamickému odporu v proudu primárního vzduchu, aby bylo dosaženo vytvoření fluidní vrstvy. K tomu napomáhá tvar spalovací komory, který se směrem vzhůru rozšiřuje, tím se sníží rychlost vzduchu v horní části spalovací komory. Sekundární vzduch je dopravován do fluidní vrstvy, aby bylo dosaženo dokonalého dohoření paliva a spálení prchavých složek. Fluidní kotle mohou být konstruovány jako atmosférické či tlakové podle zdroje.

U atmosférických fluidních kotlů je provozní tlak přibližně rovný atmosférickému tlaku a fluidní vrstva bývá stacionární, cirkulační nebo expanzní. U stacionární vrstvy se dojde k ustálení vrstvy na určité hladině. U cirkulační a expanzní

vrstvy dochází vlivem vyšší rychlosti primárního vzduchu k expanzi vrstvy v celém prostoru spalovací komory. U tlakových fluidních kotlů se rovná provozní tlak přibližně 1 MPa. K oddělení tuhých látek ze spalin dochází v cyklonu, do kterého putují lehčí částice paliva ze spalovací komory. Lehčí částice paliva se shromažďují ve spodní části cyklonu, do které proudí terciální vzduch. Z cyklonu se vrací částice zpět do spodní části fluidní vrstvy.



Obr. 1.3: Schéma atmosférického fluidního kotle s cirkulační vrstvou

1.2.2 Parní turbíny

Parní turbína pracuje na principu přeměny tepelné energie obsažené v páře na mechanickou energii – pára působí na lopatky rotoru a vyvolá točivý moment na hřídeli. Parní turbíny bývají mnohostupňové. Stupně jsou řazeny za sebou a jsou tvořeny rozváděcím a oběžně rotujícím ústrojím. Rozdělení turbín podle využití výstupní páry [5] :

1. Kondenzační turbíny
2. Protitlakové turbíny
3. Odběrové turíny

Kondenzační turbína

Kondenzační turbíny jsou navrženy pro přeměnu tepelné energie páry v mechanickou. Kondenzační turbíny neslouží k dodávce tepla jiným spotřebitelům. Kondenzační parní turbíny pracují na výstupu s hlubokým vakuem, které mívá tlak od 3 kPa

do 8 kPa. Následně je pára kondenzována v kondenzátoru, který navazuje na výstup z nízkotlaké části turbíny. V kondenzátoru se snižuje chlazením tlak páry na konci expanze. Tlak páry závisí na teplotě chladicí vody a zatížení. Chlazení může být provedeno jako průtočné nebo cirkulační. Při průtočném chlazení dosahuje teplota chladicí vody přibližně 10 °C, při cirkulačním 20 °C.

Protitlaková turbína

Protitlaková turbína slouží k dodávce tepla. Pro technologický proces je potřebný tlak vystupující páry vyšší než atmosférický. Velikost tlaku vystupující páry je závislá na teplotě. Protitlakové turbíny mívají regulované a neregulované odběry. Nevýhodné pro protitlakové turbíny je jejich závislost výkonu na odebíraném množství páry.

Odběrová turbína

Jako odběrové turbíny bývají označovány kondenzační turbíny s regulovaným odběrem. Z vysokotlakého dílu turbíny je část páry po částečné expanzi transportována ke spotřebitelům, zbylá část páry putuje do nízkotlaké části, kde expanduje, a následně odvedena do kondenzátoru. Rozvod páry je řízen pomocí automaticky ovládaných ventilů.

1.2.3 Ostatní strojní zařízení

Mezi ostatní strojní zařízení jsou zařazeny podle zdroje [5] :

1. mlýny
2. čerpadla
3. ventilátory
4. ohříváky vzduchu a napájecí vody
5. dopravníky

Mlýny

Pro rozemletí uhlí na prášek se využívá různých typů mlýnů podle druhu uhlí. Typy mlýnů jsou podle zdroje [5]: a) ventilátorové b) kulové c) tlukadlové

Ventilátorové mlýny se používají pro mletí hnědého uhlí, které má střední nebo vyšší obsah vody. Ve vypancěrované spirální skříni je umístěn robustní rotor, do kterého je dopravováno palivo vysušené horkými spalinami. Nárazy mlecích částí rotoru a úderů o pancéřovou skříň způsobí rozemletí paliva. Pomocí asynchronního motoru s kotvou nakrátko je zajištěn pohon mlýna.

Kulové mlýny se používají pro mletí černého uhlí, které je tvrdší než hnědé. V kulových mlýnech je drceno uhlí vahou otáčejících koulí. Uhelný prášek je z mlýna přes třídič přenášen pomocí primárního vzduchu do práškových hořáků kotle.

Tlukadlové mlýny se používají pro mletí hnědého a černého uhlí, které má vyšší obsah popelovin. Uvnitř mlecí skříně vyložené pancéři je umístěna hřídel s výkyvnými rameny, na kterých jsou připevněna tlukadla. Údery tlukadel a nárazy o stěny mlecí skříně způsobí rozemletí paliva.

Čerpadla

V elektrárnách se využívají k čerpání kondenzátu a vody čerpadla hydrodynamická, především odstředivá – radiální.

Rozdělení čerpadel podle zdroje [5] :

- a) napájecí čerpadla (napáječky)
- b) kondenzační čerpadla (kondenzátky)
- c) čerpadla na chladicí vodu (chladičky)

Napájecí čerpadla jsou určena k transportu napájecí vody z napájecí nádrže do kotle. Napájecí čerpadla potřebují dostatečnou nátokovou výšku (8 až 25 m), aby mohla čerpat z uzavřených nádrží horkou vodu o teplotě 105 °C až 170 °C. Pohon napájecích čerpadel zajišťuje pro menší výkony elektromotor a pro větší výkony parní kondenzační turbína. Díky 100 zálohování je zajištěna spolehlivost dodávky vody. Z kondenzátoru parní turbíny dopravují kondenzační čerpadla kondenzát do napájecí nádrže. Jako kondenzátky jsou používány odstředivá čerpadla, která bývají horizontálního i vertikálního provedení. Kondenzátky potřebují velkou sací sílu, protože čerpají kondenzát z prostoru značného vakua. Regulace kondenzátek se provádí pomocí ventilu řízeného podle hladiny v jímce kondenzátoru, kdy se vrátí část kondenzátu z výtlačku zpět do kondenzátoru.

Čerpadla na chladicí vodu mohou být umístěna ve strojovně u každého bloku nebo mimo strojovnu v čerpací stanici, ze které se společným potrubím transportuje chladicí voda k jednotlivým kondenzátorům. Chladičky se využívají pro dopravu velkého množství vody při malé dopravní výšce. U průtočného chlazení bývá dopravní výška v rozmezí 6 až 15 m, u cirkulačního 15 až 25 m. Konstrukce chladiček je závislá na velikosti energetických bloků a na spotřebě chladicí vody. Používá se horizontální nebo vertikální uspořádání čerpadel. U horizontálního uspořádání je vodorovně dělená konstrukce s velkým počtem oběžných kol, které jsou řazeny vedle sebe. Výhodou vertikálního uspořádání je zastavení menší plochy než u horizontálního uspořádání. Pohon chladiček je zajištěn pomocí elektromotorů bez regulace.

Ventilátory

Používané ventilátory v kotelnách jsou podle zdroje [5] :

- a) vzduchové
- b) spalínové (kouřové)

Vzduchové ventilátory přepravují primární, sekundární a terciální vzduch. Jako primární vzduch bývá označován vzduch dopravující palivo z mlýnů k práškovým hořákům. Přebytek sekundárního vzduchu je potřebný pro dokonalé spalování. V horní části spalovací komory kotle je využíván terciální vzduch pro dohořívání paliva.

Ohříváky vzduchu a napájecí vody

Ohříváky vzduchu slouží k ohřevu vzduchu před vstupem do spalovací komory kotle. Ohřev vzduchu se provádí pomocí horkých spalin. Ohřívák vzduchu bývá konstruován jako protiproudový. Součástí regeneračního ohřevu jsou ohříváky napájecí vody, které slouží jako povrchové výměníky tepla. Topným médiem je pára odebrána z neregulovaných odběrů turbíny. Ohříváním médiem je kondenzát – napájecí voda, která je následně přiváděna do kotle. Rozdělení ohříváků napájecí vody dle velikosti tlaku topné páry je podle zdroje [5]:

- a) nízkotlaké
- b) vysokotlaké

Dopravníky

Dopravníky slouží k dopravě uhlí ze skládky do zásobníků a následně do uhelných mlýnů. Dopravníky mohou být podle zdroje [5] :

- a) pásové
- b) řetězové

Pásové dopravníky jsou tvořeny dopravním pásem, který je poháněn elektromotorem. Pásové dopravníky jsou určeny k dopravě uhlí na větší vzdálenosti na rozdíl od řetězových dopravníků, které jsou používány k přepravě uhlí na menší vzdálenosti. Řetězové dopravníky jsou sestaveny z řetězů propojenými plochými nebo korýtkovými plechovými články.

1.3 Typy elektráren podle použitých turbín

Následující informace jsou převzaty ze zdrojů [3] a [5] . Rozdělení elektráren podle typu použité turbíny podle zdroje [3] :

1. Elektrárny se spalovací turbínou
2. Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla

Elektrárny se spalovací turbínou

Spouštění spalovací turbíny trvá několik minut, proto je možné rychlý rozběh a odtažení, které je téměř beze ztrát. Elektrárna se spalovací turbínou má menší obestavěný prostor na stejný instalovaný výkon jako u elektrárna s kondenzační turbínou. Také má elektrárna se spalovací turbínou nižší měrné investiční náklady. Další výhodou je nepatrná spotřeba chladicí vody a poměrně dobrá účinnost pohybující se v rozmezí 25 a 30 . V neposlední řadě je výhodné, že elektrárna se spalovací má možnost rychlé výstavby a úplné automatizace provozu. Ale velkou nevýhodou elektráren se spalovací turbínou je vysoká cena kapalného nebo plynného paliva, které spalují. Při tepelném oběhu ve spalovací turbíně nemění pracovní látka během oběhu své skupenství.

Základní zařízení tepelného oběhu spalovací turbíny jsou podle zdroje [3] :

- a) kompresor pro stlačování pracovní látky (vzduchu)
- b) spalovací komora
- c) spalovací turbína
- d) regenerační ohřívák pracovní látky
- e) hnací stroj (alternátor)
- f) startovací motor

Kompresor, spalovací komora a spalovací turbína tvoří celek. Ve spalovací komoře se za stálého tlaku spálí kapalně, plynně nebo tuhé palivo. Vzniklé spaliny jsou míseny se vzduchem, takto vzniklá pracovní látka expanduje ve spalovací turbíně – dojde k přeměně tepelné energie na mechanickou.

Jako kapalná paliva jsou používány ropné produkty – destiláty a zbytky po destilaci, které jsou pod tlakem vstříkovány do spalovací komory. Plynným palivem je zemní, generátorový nebo jiný výhřevný plyn, který je také pod tlakem přiváděn do spalovací komory. Tuhým palivem je vysušené a rozemleté uhlí, které se v práškové formě rozprašuje do spalovacích komor. Nevýhodou tuhého paliva jsou jeho vysoké náklady na sušení a mletí, dále pak zanášení a opotřebení mechanismů turbíny i znečišťování popílkem.

Okruh spalovacích turbín, ve kterém se pohybuje pracovní látka, je otevřený nebo uzavřený. V obou okruzích je vždy na společné hřídeli generátor, turbína, kompresor a motor sloužící k rozběhu celého zařízení. Následně po rozběhu se motor odpojí. Proto je výkon turbíny roven součtu příkonu kompresoru a výkonu generátoru.

U otevřeného okruhu je přes filtr nasáván okolní vzduch do kompresoru, odkud je vzduch vháněn do spalovací komory, do které je za stálého tlaku přiváděno palivo. Ve spalovací komoře dochází za stálého tlaku ke spálení paliva za vzniku směsi spalin a vzduch o teplotě 800 až 1200 °C. Takto vzniklá pracovní látka putuje ze spalovací komory do spalovací turbíny, ve které expanduje. Následně pracovní látka odchází

do okolí přes regenerační ohřívák.

U uzavřeného okruhu nedochází k přímému styku pracovního média a spalin. Pracovní látka je od spalin odděleně ohřívána v ohříváči, ze kterého putuje do turbíny, ve které expanduje. Následně pracovní látka odchází přes regenerační ohřívák a chladič do kompresoru. Pro spalovací turbíny s uzavřeným okruhem se používá především tuhé palivo.

Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla

Jako teplárny bývají označovány kombinované výrobní elektrárny a tepla, které dodávají elektrickou energii i teplo. Teplárny se odlišují od kondenzačních elektráren v použitém technologickém zařízení a celkovém tepelném schématu. Teplárny jsou investičně nákladnější než výtopny, které dodávají pouze teplo, za to jsou energeticky výhodnější, protože se snaží o co nejlepší využití primární energie fosilních paliv. Rozdělení kombinované výroby elektrické energie a tepla podle zdroje [3] :

- a) Teplárny s protitlakovými turbínami
- b) Teplárny s kondenzačními odběrovými turbínami

Teplárny s protitlakovými turbínami

U tepláren s protitlakovou turbínou má pára na výstupu z turbíny vhodný tlak a teplotu pro připojení spotřebiče tepla. Nahrazení kondenzátoru spotřebičem tepla vede k využití veškerého tepla dodaného páře v kotli. Pára se využívá pro technologické účely, vytápění a ohřev teplé užitkové vody. Technologický proces požaduje určitou teplotu páry na výstupu z turbíny, a to určuje hodnotu tlaku páry.

Z hlediska výroby elektrické energie je nevýhodné při použití protitlakových turbín to, že výroba elektřiny závisí na odběru páry spotřebiče tepla, protože výkon turbosoustrojí je přímo úměrný množství páry procházející turbínou. Z důvodu nestálosti tepelného konzumu v průběhu dne i roku se dimenzují turbíny na menší spotřebu tepla, než je maximální spotřeba. Chybějící část spotřeby bývá nahrazena špičkovými zdroji – redukční stanicí, špičkovým kotlem. Protitlakové turbíny se uplatňují u malých jednotek s velkým využitím tepelného zatížení.

Teplárny s kondenzačními odběrovými turbínami

Větší nezávislost dodávky elektrické energie na dodávce tepla je umožněna díky kondenzační odběrové turbíně, která má jeden nebo dva regulované odběry a další neregulované. V regulovaných odběrech je udržován tlak na stálé hodnotě, která je nezávislá na zatížení turbíny. Jestliže regulovaný odběr nestačí k pokrytí spotřeby

páry, využívá se regulační stanice, která přepouští potřebné množství páry a díky tomu je udržována konstantní hodnota tlaku páry v síti.

Zavedení tepláren s kondenzační odběrovou turbínou přispívá k výraznému zvýšení ekonomičnosti provozu teplárny, kdy je zlepšeno využití primární energie. Velmi výhodné u odběrových turbín je určitá nezávislost výroby elektrické energie na odběru tepelné energie.

Kondenzační odběrové turbíny jsou dražší a mají menší celkovou tepelnou účinnost než protitlakové turbíny.

2 Technologické schéma tepelné elektrárny

V následujícím textu jsou uvedena dvě technologická schéma - tepelné a elektrické. Následně jsou zmíněny možnosti zvýšení tepelné účinnosti.

2.1 Tepelné schéma

Následující informace jsou převzaty ze zdroje [3]. V technologickém schématu jsou zahrnuta zařízení elektrárny a jejich propojení. Tepelná schémata mohou být zásadní či úplná. Zásadní tepelné schéma obsahuje základní zařízení určující směr tepelných toků pracovní látky (vody, páry). Úplné tepelné schéma obsahuje všechna zařízení a jejich propojení.

Sestavení tepelného schématu

Podle zdroje [3] lze tepelné schéma sestavit následujícím způsobem :

1. typ elektrárny a její požadovaný výkon
2. počáteční a koncové stavy páry
3. typ a jednotlivé výkony turbosoustrojí
4. zásadní tepelné schéma elektrárny
5. výpočet zásadního tepelného schématu
6. úplné tepelné schéma elektrárny

Výpočet tepelného schématu

Na Obr. 2.1 je vyobrazené zjednodušené tepelné schéma kondenzační elektrárny, které obsahuje kotel K s přehříváním P, turbínu T, generátor G, kondenzátor C a napáječku N. Elektrický výkon P_e je 200 MW. Hodnoty počátečního a koncového stavu páry společně s dalšími parametry jsou uvedeny v Tab. 2.1 . Schéma lze popsat pomocí následujících rovnic.

Bilanční rovnice

$$M \cdot (i_a - i_k) = \frac{k \cdot P_e}{\eta_m \cdot \eta_g} \quad (2.1)$$

kde M (kg/h) je množství teplonosné látky, i_a (kJ/kg) je admisní entalpie, i_k (kJ/kg) je hodnota entalpie na vstupu do kondenzátoru, k je konstanta, P_e (MW) je elektrický výkon, η_m (-) je mechanická účinnost a η_g (-) je účinnost generátoru.

Rovnice tepelného výkonu kotle

$$Q_k = M \cdot (i_a - i'_{nv}) \quad (2.2)$$

Q_k	2432,9 GJ/h
Q_n	2559,8 GJ/h
η	28,13 %

Tab. 2.2: Vypočtené hodnoty 200 MW elektrárny

2.2 Elektrické schéma elektrárny

Informace jsou čerpány ze zdroje [5]. Elektrické schéma obsahuje alternátory, transformátory, rozvodny a jejich elektrické zapojení.

2.2.1 Hlavní elektrické schéma

Informace jsou čerpány ze zdroje [5]. Hlavní elektrické schéma musí splňovat požadavky na spolehlivost a operativnost při provozu.

Spolehlivost provozu

Spolehlivost provozu se z hlediska důležitosti napájení spotřebitelů dělí do třech stupňů zabezpečení dodávky. Spotřebitelé, u kterých by mohlo vzniknout krátkým přerušením dodávky elektřiny ohrožení lidských životů, zničení výrobního zařízení či velké hospodářské škody, jsou řazeni do 1. stupně. Tito spotřebitelé jsou napájeni minimálně ze dvou na sobě nezávislých zdrojů elektrické energie. Spotřebitelé, u kterých krátké přerušení dodávky elektřiny nezpůsobí hospodářské škody srovnatelné se spotřebiteli 1. stupně, jsou řazeni do 2. stupně. Tito spotřebitelé jsou napájeni dvěma zdroji. Spotřebitelé, u kterých se nepředpokládá vznik výrazných hospodářských škod, jsou řazeni do 3. stupně a jsou napájeni z jednoho zdroje.

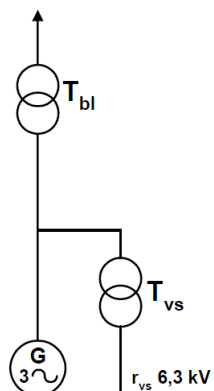
Operativnost při provozu

Elektrické schéma by mělo být navrženo tak, aby byla zajištěna dodávka elektřiny nejen v běžných provozních stavech, ale také při mimořádných stavech. Toho lze docílit pomocí paralelně pracujících zdrojů s vhodným uspořádáním přípojníc rozveden do nichž zdroje pracují.

2.2.2 Vlastní spotřeba elektrárny

Podle zdroje [5] je při výrobě elektrické energie část vyrobené elektrické energie spotřebovávána spotřebiči elektrárny, které jsou napájeny 6,3 kV z rozveden vlastní spotřeby napájené z odbočky za generátorem pomocí odbočkového transformátoru viz Obr. 2.2. V bezporuchovém stavu je napájení rozvodny vlastní spotřeby řešeno

pomocí pracovních zdrojů, v případě jejich poruchy se využívá zdroje rezervního napájení k napájení rozvodny vlastní spotřeby.



Obr. 2.2: Napájení rozvodny vlastní spotřeby

Informace v Tab. 2.3 jsou čerpány ze zdroje [1]. Parní elektrárny spotřebovaly 3 277,60 GWh na pokrytí vlastní spotřeby elektřiny na výrobu elektřiny.

výroba elektřina brutto (GWh)	35 197,90
výroba elektřiny netto (GWh)	31 920,50
technologická vlastní spotřeba elektřiny na výrobu elektřiny (GWh)	3 277,60

Tab. 2.3: Výroba elektřiny v parních elektrárnách za rok 2020

2.3 Zvyšování tepelné účinnosti oběhu

Následující informace jsou čerpány ze zdrojů [3] a [5]. Jedním z nejdůležitějších kroků při návrhu elektrárenského bloku je volba vstupních a výstupních parametrů páry a vody, které mají vliv na celkovou tepelnou účinnost zařízení a výši investičních nákladů. Se zvyšujícími se počátečními parametry páry vzrůstá tepelná hospodárnost. Zvýšení je limitováno technickými a ekonomickými možnostmi.

S narůstající teplotou a tlakem páry jsou kladeny větší nároky na jakost oceli, protože u běžně používaných ocelí se zmenšuje mechanická pevnost při teplotách vyšších než 500 °C a tím vzrůstá nebezpečí vnitřní koroze trubek přehříváku páry

a vnější koroze horkými spalinami. Teplota a tlak klade také nároky na konstrukci kotle. Velkou mechanickou pevnost a odolnost proti korozi má žáruvzdorná legovaná ocel.

Při zvýšení tlaku vzroste vlhkost v posledních stupních turbíny. Naopak při zvýšení teploty dojde k poklesu vlhkosti na konci expanze. Proto se využívá pro dosažení optimální vlhkosti na výstupu z turbíny souběžné zvyšování tlaku a teploty.

Pro stanovení optimálního tlaku jsou podstatná dvě hlediska – tepelná účinnost turbíny a doba využití zařízení. S rostoucím tlakem pak dochází k zmenšení termodynamické účinnosti, protože při zvýšení admisního tlaku vzroste průtok páry, který vede k nárůstu ztrát třením a vířením na okraji lopatek, obvodu kol a v mezeře mezi koly. Teplotu chladicí vody ovlivňují použité zdroje vody, roční období a způsob chlazení, zda se jedná o chlazení cirkulační nebo průtočné. U cirkulačního chlazení se předpokládá teplota chladicí vody asi 20 °C a u průtočného chlazení asi 10 °C.

Zvýšení tepelné účinnosti se dosahuje podle zdroje [5]:

1. zvýšením parametrů admisní páry (tlak, teploty přehřátí)
2. snížením tlaku v kondenzátoru (zvýšení vakua)
3. zvýšením teploty napájecí vody do kotle (regenerační ohřev napájecí vody)
4. přehříváním páry (tzv. mezipřehřívání)

Informace týkající se zlepšení vakua v kondenzátoru a přehřívání páry, které jsou doplněné o informace ze zdroje [8], jsou čerpány ze zdroje [7]. Informace o regeneračním ohřevu napájecí vody jsou převzaty ze zdroje [8].

Zvýšení parametrů admisní páry

Zvýšení tlaku a teploty syté páry v systému zvyšuje účinnost tepelného oběhu, ale je spojeno s nárůstem materiálových, konstrukčních a bezpečnostních požadavků. Naproti tomu snížení teploty a tlaku kondenzující páry je limitováno teplotou okolního prostředí, protože při kondenzaci páry je odváděno do okolního prostředí kondenzační teplo, které „samovolně přechází pouze z látky s vyšší teplotou do látky s nižší teplotou“ dle 2. termodynamického zákona.

Zlepšení vakua v kondenzátoru

Tlak v kondenzátoru závisí podle zdroje [7] na:

- a) teplotě chladicí vody
- b) velikosti teplosměnné plochy kondenzátoru
- c) součiniteli prostupu tepla
- d) poměrném množství chladicí vody

Pomocí snížení tlaku je možné zmenšit odvedené teplo, změnit ztráty výstupní rychlosti a zvýšit termodynamickou účinnost posledního stupně, což ovlivní výkon

celé turbíny. Způsoby dosažení zlepšení vakua u kondenzační turbíny jsou podle zdroje [7] :

- a) snížení teploty chladicí vody
- b) zvětšení průtoku chladicí vody
- c) zvětšení teplosměnné plochy kondenzátoru

Velmi výhodné je snížit teplotu chladicí vody. Při zvětšení průtoku chladicí vody dochází k zvětšení vlastní spotřeby elektrické energie kvůli pohonu čerpadel a při zvětšení teplosměnné plochy se zvyšují pořizovací náklady.

Regenerační ohřev napájecí vody (carnotizace)

Regenerační ohřev napájecí vody se uskutečňuje v regeneračních ohřívácích (tepelných výměníky). Mezi kondenzátorem a kotlem nastává postupný ohřev napájecí vody. Topnou látkou pro výměníky je část expandující páry odebrána v určitém místě turbíny, které lze stanovit pro každý regenerační ohřívák. Podle 2. termodynamického zákona lze určit nejnižší možný tlak, který ještě umožňuje ohřev vody na požadovanou teplotu. Tlak jednoznačně určuje teplotu kondenzační páry. Výhoda zavedení přehřívání tkví ve snížení množství nevyužitého tepla odvedeného z kondenzátoru. Odebraná pára z turbíny předá teplo ohřívané napájecí vodě. V podstatě se teplo „vrátí“ zpět do oběhu. Konstruktivní a provozní výhody při zavedení regeneračního ohřevu napájecí vody podle zdroje [8] :

- a) zvýšení průtoku páry vysokotlakou částí turbíny
- b) snížení průtoku páry nízkotlakou částí turbíny
- c) výrazné zmenšení rozměrů nízkotlakých dílů parní turbíny a rozměrů kondenzátu
- d) snížení spotřeby chladicí vody

Výhodou zvýšení průtoku páry vysokotlaké části turbíny je zmenšení okrajových ztrát na delších oběžných lopatkách, které je způsobeno malým měrným objemem vysokotlaké páry. Snížení spotřeby chladicí vody je umožněno díky menšímu odvedenému teple v kondenzátoru.

Přehřívání páry

Expanze páry se přerušuje z důvodu dosažení vhodného tlaku expandující páry v parní turbíně. Z vysokotlaké části turbíny, kde pára expandovala na určitý tlak, je pára vedena do přehříváku, ve kterém se pára za stálého tlaku přehřeje přibližně na původní teplotu. Z přehříváku je pára vedena do další části turbíny, kde expanduje až na tlak v kondenzátu. Zavedení přehřívání páry je nutné u oběhů s vysokými hodnotami admisního tlaku páry, jinak by expanze skončila hluboko v oblasti mokré

páry, to by zapříčinilo provozní problémy, protože větší obsah vody v expandující páře zkracuje životnost lopatek [8] .

Při přehřívání vstupní parou dochází k snížení vlhkosti páry v posledních stupních turbíny, což způsobí nárůst termodynamické účinnosti turbíny a díky tomu i nárůst účinnosti oběhu. Také při snížení vlhkosti páry dochází ke snížení nebezpečí eroze oběžných lopatek posledních stupňů turbíny vodními kapičkami. U velmi vysokých admisních tlaků se využívá během expanze dvojnásobného i trojnásobné přehřívání páry [8] .

Zvýšení účinnosti 200 MW bloku

Tepelné schéma z Obr. 2.1 bylo doplněno o mezipřehřívání a regeneraci napájecí vodu z důvodu snahy o zvýšení celkové účinnosti elektrárny. Výsledné schéma je zobrazeno na Obr. 2.3 a je popsáno následujícími rovnicemi.

Bilanční rovnice

$$M \cdot (i_a - i_k + \Delta h_1 + \Delta h_2) - M_R \cdot (i_R - i_{-k}) = \frac{k \cdot P_e}{\eta_m \cdot \eta_g} \quad (2.5)$$

$$\Delta h_1 = i_{p2} - i_{p1} \quad (2.6)$$

$$\Delta h_2 = i_{p4} - i_{p3} \quad (2.7)$$

Po dosazení rovnic (2.6) a (2.7) do rovnice (2.5) vznikne výsledná bilanční rovnice bloku s mezipřehříváním:

$$M \cdot (i_a - i_k + i_{p2} - i_{p1} + i_{p4} - i_{p3}) - M_R \cdot (i_R - i_k) = \frac{k \cdot P_e}{\eta_m \cdot \eta_g} \quad (2.8)$$

kde M (kg/h) je množství teplotosné látky, i_a (kJ/kg) je admisní entalpie, i_k je entalpie na vstupu do kondenzátoru, i_{p2} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p1} (kJ/kg) po přehřívání, i_{p1} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p1} (kJ/kg) před přehříváním, i_{p4} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p2} (kJ/kg) po přehřívání, i_{p3} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p2} před přehříváním, M_R (kg/h) je množství teplotosné látky pro regeneraci napájecí vody, i_R (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_R , k (-) je konstanta, P_e (MW) je elektrický výkon, η_m (-) je mechanická účinnost a η_g (-) je účinnost generátoru.

Bilanční rovnice pro regenerační ohřívák

$$M_k \cdot i'_k + M_R \cdot i_R = M_k \cdot i'_{k2} + M_R \cdot i'_R \quad (2.9)$$

kde M_k (kg/h) je množství teplotosné látky na výstupu z turbíny, i'_k (kJ/kg) je entalpie syté kapaliny na výstupu z kondenzátoru, M_R (kg/h) je množství teplotosné látky pro regeneraci napájecí vody, i_R (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_R , i'_{k2} (kJ/kg) a i'_R (kJ/kg) jsou entalpie syté kapaliny na výstupu z regeneračního ohříváku.

Bilanční rovnice pro směšovák

$$M_k \cdot i'_{k2} + M_R \cdot i'_R = M \cdot i'_{nv} \quad (2.10)$$

kde M_k (kg/h) je množství teplotosné látky na výstupu z turbíny, i'_k (kJ/kg) je entalpie syté kapaliny na výstupu z regeneračního ohříváku, M_R (kg/h) je množství teplotosné látky pro regeneraci napájecí vody, i'_R (kJ/kg) je entalpie syté kapaliny na výstupu z regeneračního ohříváku, M (kg/h) je množství teplotosné látky a i'_{nv} je entalpie napájecí vody.

Rovnice tepelného výkonu kotle

$$Q_k = M \cdot (i_a - i'_{nv} + i_{p2} - i_{p1} + i_{p4} - i_{p3}) \quad (2.11)$$

kde Q_k (GJ/h) je tepelný výkon kotle, M (kg/h) je množství teplotosné látky, i_a (kJ/kg) je admisní entalpie, i_k je entalpie na vstupu do kondenzátoru, i_{p2} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p1} (kJ/kg) po přehřívání, i_{p1} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p1} (kJ/kg) před přehříváním, i_{p4} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p2} (kJ/kg) po přehřívání a i_{p3} (kJ/kg) je entalpie při tlaku p_{p2} před přehříváním.

Rovnice tepelného příkonu kotle

$$Q_n = \frac{Q_k}{\eta_k \cdot \eta_p} \quad (2.12)$$

kde Q_n (GJ/h) je tepelný příkon kotle, Q_k (GJ/h) je tepelný výkon kotle, η_k (-) je účinnost kotle a η_p (-) je účinnost potrubí.

Celková účinnost

$$\eta = \frac{k \cdot P_e}{Q_n} \quad (2.13)$$

kde η (-) je celková účinnost, k (-) je konstanta, P_e (MW) je elektrický výkon a Q_n (GJ/h) je tepelný příkon kotle.

Pomocí výše uvedených rovnic, hodnot z Tab. 2.4 a hodnot z is diagramu na Obr. 5.1 byly vypočteny hodnoty při maximálním výkonu 200 MW uvedené v Tab. 2.5 .

3 Spolupráce dvou bloků

V následující části bude provedena paralelní spolupráce dvou elektrárenských bloků s instalovanými výkony 200 MW a 500 MW. Oba bloky mají stejná tepelná schémata viz Obr. 2.3. Hodnoty parametrů 500 MW bloku jsou uvedeny v Tab. 3.1 .

P_e	500 MW	t_{p1}	540 °C
p_a	18 MPa	t_{p2}	540 °C
p_{p1}	10 MPa	η_m	98 %
p_{p2}	5 MPa	η_g	95 %
p_R	2 MPa	η_k	96 %
p_k	6 kPa	η_p	99 %
t_a	540 °C	η_{td}	85 %

Tab. 3.1: Vstupní hodnoty 500 MW bloku s mezipřehříváním

Pomocí rovnic uvedených v 2. kapitole, hodnot z Tab. 3.1 a hodnot odečtených z i-s diagramu (Obr. 5.1) byly vypočteny hodnoty tepelného výkonu, příkonu a účinnosti kotle při maximálním výkonu bloku 500 MW uvedené v Tab. 3.2 .

Q_k	5058 GJ/h
Q_n	5321 GJ/h
η	33,83 %

Tab. 3.2: Hodnoty 500 MW bloku při $P_e = 500$ MW

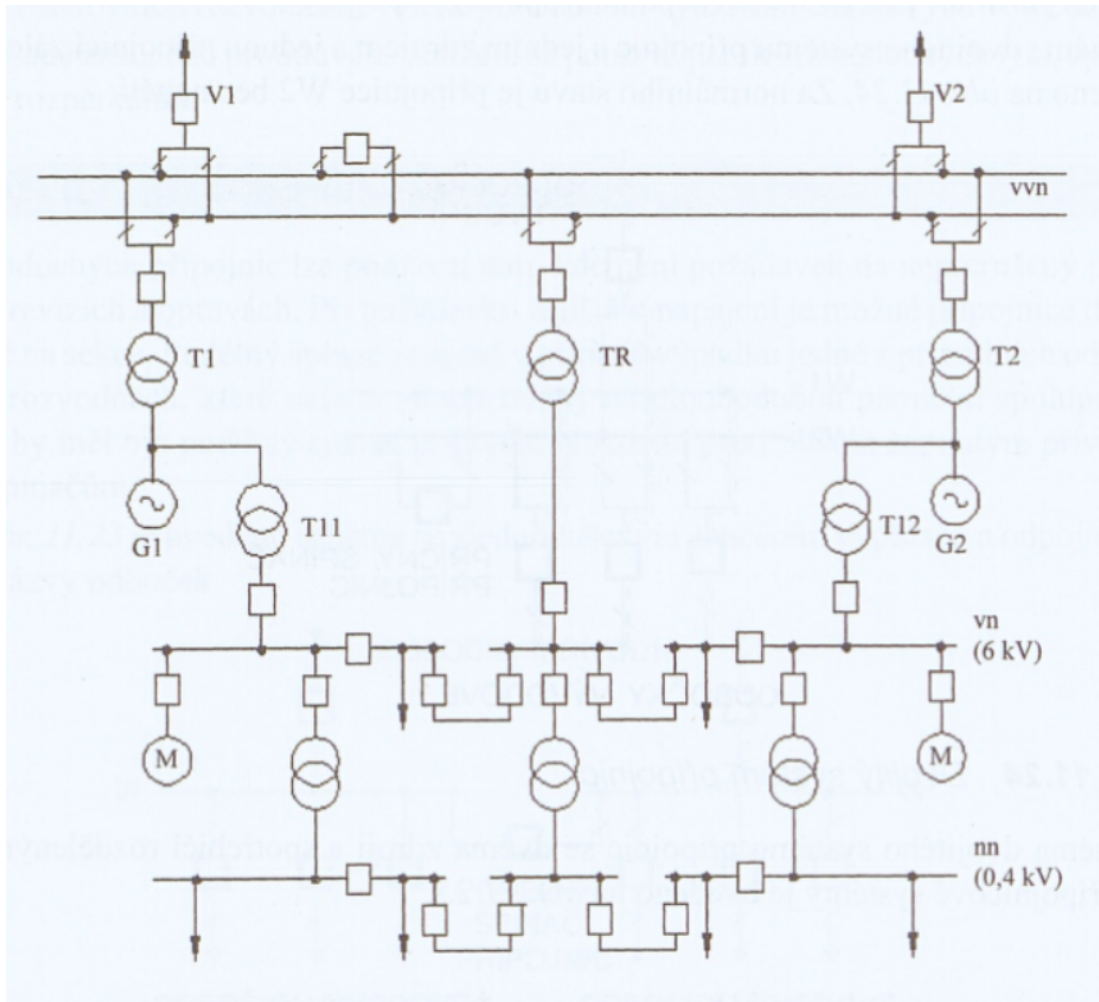
3.1 Vyvedení výkonu dvou elektrárenských bloků

Na Obr. 3.1 je znázorněno elektrické schéma dvou elektrárenských bloků. Podle zdroje [9] v okamžiku připojení alternátoru k elektrické soustavě musí být splněny čtyři fázovací podmínky:

1. shodný sled fází alternátoru a sítě
2. shodný kmitočet alternátoru a sítě
3. shodná velikost napětí alternátoru a sítě
4. nulový fázový posun mezi alternátorem a sítí

Podle zdroje [10] elektrické stanice elektráren transformují napětí alternátorů na napětí přenosové sítě a převádějí vyrobenou elektrickou energii do přenosové sítě vvn. Směr toku elektrické energie je z elektrárny do sítě, kromě vlastní spotřeby elektrárny.

Elektrické stanice v přenosové soustavě transformují elektrickou energii z jedné hladiny napětí na přenosovou hladinu. Následně je elektrická energie transportována do větví okružních přenosových sítí. Směr toku elektrické energie v odbočkách je různý (závisí na okamžitém rozložení výroby a spotřeby v elektrické soustavě).



Obr. 3.1: Elektrizční schéma dvou blokové elektrárny

3.2 Optimální rozdělení výkonů dvou elektrárenských bloků

Ze zdroje [9] je použita metoda optimalizace. Ze zdrojů [11] a [12] byly využity aproximační koeficienty nákladových rovnic bloků 110,250, 700 a 900 MW. Metodou porovnání byly stanoveny nové aproximační koeficienty pro bloky 200 a 500 MW.

Obecné rovnice nákladových charakteristik pro 1. a 2. blok:

$$N_1 = n_{01} + n_{11} \cdot P_1 + n_{21} \cdot P_1^2 \quad (3.1)$$

$$N_2 = n_{02} + n_{12} \cdot P_2 + n_{22} \cdot P_2^2 \quad (3.2)$$

kde n_0, n_1, n_2 jsou aproximační koeficienty nákladové charakteristiky.

Poměrné nákladové přírůstky jednotlivých bloků jsou dány derivací jejich nákladových charakteristik:

$$n_1 = \frac{\delta N_1}{\delta P_1} = n_{11} + 2 \cdot n_{21} \cdot P_1 \quad (3.3)$$

$$n_2 = \frac{\delta N_2}{\delta P_2} = n_{12} + 2 \cdot n_{22} \cdot P_2 \quad (3.4)$$

Podmínkou optimalizace je rovnost poměrných nákladových přírůstků:

$$n_1 = n_2 \quad (3.5)$$

$$\frac{\delta N_1}{\delta P_1} = \frac{\delta N_2}{\delta P_2} \quad (3.6)$$

$$n_{11} + 2 \cdot n_{21} \cdot P_1 = n_{12} + 2 \cdot n_{22} \cdot P_2 \quad (3.7)$$

Požadované zatížení L (MW) je dáno součtem výkonů daných bloků. Pro dva bloky je dáno rovnicí:

$$L = P_1 + P_2 \quad (3.8)$$

Z rovnice (3.8) lze vyjádřit výkon P_2 (MW) :

$$P_2 = L - P_1 \quad (3.9)$$

Po dosazení rovnice (3.9) do rovnice (3.7) se získá vztah:

$$n_{11} + 2 \cdot n_{21} \cdot P_1 = n_{12} + 2 \cdot n_{22} \cdot (L - P_1) \quad (3.10)$$

Po úpravě rovnice (3.10) obdržíme výsledný vztah pro výpočet P_1 (MW):

$$P_1 = \frac{n_{12} + 2 \cdot n_{22} \cdot L - n_{11}}{2 \cdot (n_{21} + n_{22})} \quad (3.11)$$

V matematickém modelu jsou použity pro výpočet rozdělení výkonů dvou paralelně pracujících bloků nákladové charakteristiky z Tab. 3.3 . V Tab. 3.4 je uveden přípustný rozsah požadovaného zatížení, který je limitován minimálním a maximálním regulačním rozsahem bloků.

	P_i (MW)	Nákladová charakteristika (Kč/h)	Regulační rozsah (MW)
1. blok	200	$N_1 = 29745 + 27,35 \cdot P_1 + 0,049 \cdot P_1^2$	$130 < P_1 < 200$
2. blok	500	$N_2 = 34630 + 20,93 \cdot P_2 + 0,028 \cdot P_2^2$	$310 < P_2 < 500$

Tab. 3.3: Hodnoty nákladových charakteristik a regulační rozsah bloků

Rozsah požadovaného zatížení (MW)
 $310 < L < 700$

Tab. 3.4: Přípustný rozsah požadované zatížení

Optimální rozdělení výkonu bloků 200MW a 500MW						
1	Nákladová rovnice (Kč/h)		Regulační rozsah (MW)			
2	1. blok	$N_1=29745+27,35P_1+0,049P_1^2$	$130 \leq P_1 \leq 200$			
3	2. blok	$N_2=34630+20,93P_2+0,028P_2^2$	$310 \leq P_2 \leq 500$			
4	Zadejte hodnotu požadovaného zatížení L					
5	Požadované zatížení	Rozsah zatížení	Kontrola			
6	L (MW)	440 ≤ L ≤ 700				
7	Vypočtené výkony	Kontrola	neměnné aproximační koeficienty			
8	P ₁ (MW)		1. blok		2. blok	
9	P ₂ (MW)		n ₀₁	29745	n ₀₂	34630
10			n ₁₁	27,35	n ₁₂	20,93
11	Optimální rozdělení výkonů		n ₂₁	0,049	n ₂₂	0,028
12	P ₁ (MW)					
13	P ₂ (MW)					
14	Náklady (Kč/h) při optimálním rozdělení výkonů					
15	1. blok					
16	2. blok					
17	celkem					

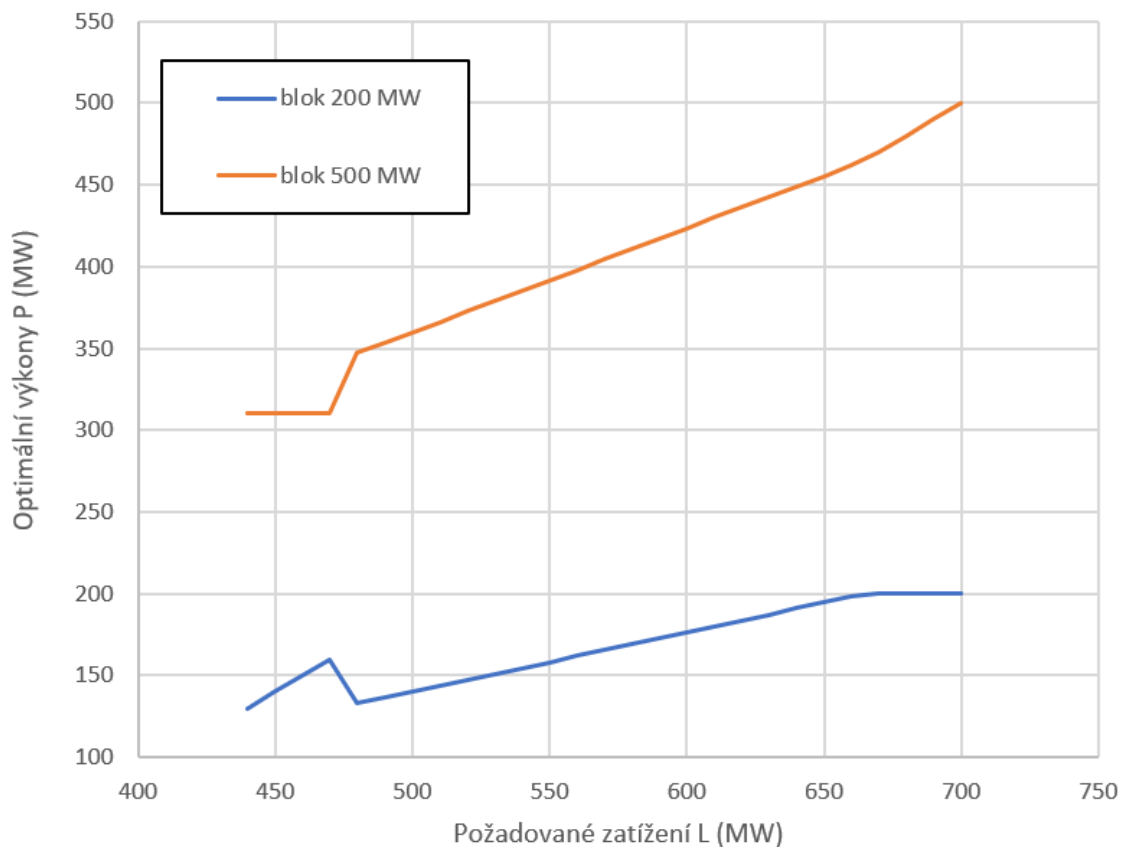
Obr. 3.2: Matematický model pro výpočet optimálního rozdělení výkonů

Matematický model byl zpracován v programu Excel. Uživatel programu zadá do oranžového políčka (viz Obr. 3.2) jím zvolenou hodnotu požadovaného zatížení. Program vyhodnotí, zda zadaná hodnota je v povoleném rozsahu hodnot zatížení obou bloků viz Tab. 3.4. Pokud ano, tak se v modrém políčku objeví slovo "správně". V opačném případě je uživatel vyzván ke změně hodnoty zatížení slovy "změňte hodnotu". Ve fialových políčkách se objeví hodnoty výkonů bloků. Program zkontroluje, zda vypočítané výkony jsou v regulačním rozsahu daných bloků. V případě splnění regulačních rozsahů se ve žlutých políčkách objeví slovo "vyhovuje", v opačném případě slovo "nevyhovuje". Pokud zvolené číslo nevyhovuje i přesto, že je v povoleném rozsahu zatížení, tak program na základě definované podmínky přepočítá rozdělení výkonů na optimální. Výsledné hodnoty optimálních výkonů se zobrazí v zeleném políčku. V růžových políčkách se zobrazí náklady při optimálním rozdělení výkonů.

V Tab. 3.5 jsou uvedeny hodnoty výkonů jednotlivých bloků pro tři různé hodnoty zatížení - 440, 580 a 700 MW. Pro požadované zatížení 440 MW nedosáhl výkon 1. bloku minimální dovolenou hodnotu 130 MW. Proto byl výkon P_1 zkorigován na hodnotu 130 MW. Pro požadované zatížení 580 MW vyhověly výkony obou bloků regulačnímu rozsahu. Pro požadované zatížení 700 MW přesáhl výkon 1. bloku maximální dovolenou hodnotu 200 MW. Proto byl výkon P_1 zkorigován na hodnotu 200 MW. Na Obr. 3.3 jsou graficky znázorněny optimální hodnoty výkonů bloků v rozsahu přípustného požadovaného zatížení.

L (MW)	440	580	700
P_1 (MW)	130	169,22	200
P_2 (MW)	310	410,78	500

Tab. 3.5: Vypočtené hodnoty pro tři různá požadovaná zatížení



Obr. 3.3: Graf optimálních výkonů bloků v závislosti na požadovaném zatížení

4 Energeticko-ekonomické zhodnocení

Výroba elektřiny a tepla se musí řídit zákonem č. 458/2000 Sb. Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon) [13].

Podle zdroje [14] se za optimální parní cyklus považuje cyklus s vhodnou kombinací investičních nákladů vzhledem k měrné spotřebě tepla. Podle zdroje [5] se k provozním ukazatelům elektrárny řadí účinnost elektrárny, měrná spotřeba páry, tepla a paliva na výrobu elektrické energie. Pro výpočet těchto provozních ukazatelů byly v matematickém modelu použity následující vztahy:

měrná spotřeba páry v turbíně m_{pt} (kg/kWh)

$$m_{pt} = \frac{M}{P_e} \quad (4.1)$$

spotřeba tepla v turbíně Q_t (GJ/h)

$$Q_t = M \cdot (i_a - i'_k) \quad (4.2)$$

měrná spotřeba tepla v turbíně q_{tt} (GJ/MWh)

$$q_{tt} = \frac{Q_t}{P_e} \quad (4.3)$$

měrná spotřeba tepla bloku q_{te} (GJ/MWh)

$$q_{te} = \frac{q_{tt}}{\eta_k \cdot \eta_p} \quad (4.4)$$

měrná spotřeba paliva bloku m_{pal} (kg/MWh)

$$m_{pal} = \frac{q_{te}}{Q_u} \quad (4.5)$$

spotřeba paliva bloku M_{pal} (kg/h)

$$M_{pal} = m_{pal} \cdot P_e \quad (4.6)$$

1. blok	2. blok
η 33,27 %	η 33,83 %
m_{pt} 2,83 kg/kWh	m_{pt} 2,76 kg/kWh
q_{te} 13,23 GJ/MWh	q_{te} 13,40 GJ/MWh
m_{pal} 853,61 kg/MWh	m_{pal} 864,30 kg/MWh

Tab. 4.1: Provozní ukazatele bloků

V Tab. 4.1 je uvedena vypočtená hodnota účinnosti bloku, měrné spotřeby páry, tepla a paliva na výrobu elektrické energie, když oba bloky spalují hnědé uhlí o stejné výhřevnosti 15,5 GJ/kg.

Optimalizace v rozdělení výkonů bloků se využívá při změnách požadovaného zatížení během provozu. V modelové situaci je požadována změna výkonu z 460 na 480 MW. Bez využití optimalizace (pouhým zvýšením výkonu 1. bloků o 20 MW) jsou náklady 165,87 Kč/MWh a při využití optimalizace činí náklady 165,65 Kč/MWh viz Tab. 4.2 . Při této modelové situaci došlo optimalizací v rozdělení výkonů bloků při změně celkového požadovaného zatížení ke snížení nákladů o 0,22 Kč/MWh oproti nevyužití optimalizace.

	výchozí stav	optimalizováno	neoptimalizováno
L (MW)	460	480	480
Náklad (Kč/h)	78759,10	79513,47	79619,70
Náklad (Kč/MWh)	171,22	165,65	165,87

Tab. 4.2: Hodnoty nákladů při zvýšení výkonu

4.1 Emisní povolenky

Podle zdroje [15] je emise definována jako znečišťující látka dodávaná zdrojem znečištění do životního prostředí.

Informace jsou čerpány ze zdroje [16] . Národní správce rejstříku povolenek je OTE, a.s. Jedna povolenka opravňuje k vypouštění 1 tuny CO_2 či jiného skleníkového plynu o stejném ekvivalentním množství CO_2ekv (např. 1 tuna CH_4 odpovídá 21 tunám CO_2ekv). Redukce skleníkových plynů se týká oxidu uhličitého, methanu, fluorovaných uhlovodíků (HFC, PFC) a fluoridu sírového. Obchodování s povolenkami je možné díky systémům emisního obchodování WCI (Western Climate Initiative), RGGI (Regional Greenhouse Gas Initiative) nebo největšího EU ETS (European Union Emission Trading Scheme). V ČR je EU ETS upraven zákonem č. 383/2012 Sb. Zákon o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů [17] . Zákon uvádí, na která zařízení se zákon vztahuje a také definuje práva a povinnosti provozovatelů zařízení.

Do nákladů na výrobu elektrické energie se cena emisní povolenky pro daný rok započítává ve výši stanovené Energetický regulační úřad. V Tab. 4.3 jsou uvedeny ceny emisních povolenek ze zdrojů [18] a [19] . Ze změny ceny emisní povolenky mezi lety 2019 a 2020 lze stanovit změnu nákladů na výrobu 1 MWh. Uhelné elektrárně spalující hnědé uhlí se zvedly náklady na výrobu 1 MWh o 51,34 Kč/MWh mezi lety 2019 a 2020, protože na výrobu 1 kWh z hnědého uhlí připadá emise 1,1 kg

CO_2 zdroje [20] . Na Obr. 4.1 ze zdroje [21] lze vidět vývoj cen emisních povolenek mezi rok 2006 a 2020.

	cena emisních povolenek (Kč/t CO_2)
2019	607,45
2020	654,12
meziroční přírůstek	46,67

Tab. 4.3: Cena emisních povolenek



Obr. 4.1: Vývoj ceny emisních povolenek

Závěr

V bakalářské práci je provedeno zvýšení účinnosti z 28,13 % na 33,27 % u 200 MW bloku. Zvýšení účinnosti bylo docíleno mezipřehříváním páry z vysokotlaké a středotlaké části turbíny a regenerací napájecí vody. Pomocí mezipřehřívání se zabezpečí, že expanze páry v turbíně neskončí hluboko v oblasti mokré páry. Regenerací napájecí vody se dosáhne snížení množství nevyužitého tepla, které by bylo jinak odvedeno kondenzátorem.

V bakalářské práci je také posouzen vliv optimalizace rozdělení výkonů dvou paralelně pracujících bloků 200 a 500 MW, které vyrábějí elektrickou energii spalováním hnědého uhlí. Optimalizace v rozdělení výkonů vychází z nákladových charakteristik obou bloků. Výpočtem modelového příkladu bylo zjištěno, že úspora nákladů na výrobu elektrické energie při využití optimalizace je v řádu desítek korun v porovnání s neoptimalizovaným stavem při zvýšení požadovaného zatížení z 460 na 480 MW.

Výraznou částí nákladů uhelných elektráren na výrobu elektrické energie se stávají sankce za vypouštění emisí skleníkových plynů vznikajících při spalování uhlí. Tyto sankce jsou známy pod pojmem emisní povolenka. Trh s emisními povolenkami je celosvětově regulován. Jednotlivé elektrárny si emisní povolenky mohou nakupovat na burzách. V bakalářské práci je rovněž vyčíslen roční nárůst průměrné ceny emisní povolenky mezi lety 2019 a 2020. Tento nárůst je výrazně vyšší než úspora dosažená optimalizací rozdělení výkonů dvou paralelně pracujících bloků 200 a 500 MW.

Literatura

- [1] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD *Čtvrtletní zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR IV. čtvrtletí 2020* [online]. [cit. 22. 05. 2021]. Dostupné z URL: https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Ctvrtletni_zprava_2020_IV_Q.pdf/ef32acbe-8093-4abd-a2cc-43ae3470bf96.
- [2] TRAMBA, David. *2038: Symbolické, ale přeceňované datum* Týdeník pro ekonomiku, politiku a bysnys, 17.12.2020. [online]. [cit. 07. 03. 2021]. Dostupné z URL: <https://oenergetice.cz/uhli/uhelna-komise-doporucila-konec-uhli-v-cr-v-roce-2038>.
- [3] MATOUŠEK, Antonín. *Elektrárny 1*. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2269-6.
- [4] LÁZNÍČKOVÁ, Ilona. *Technická mechanika: mechanika poddajných těles a termomechanika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014.
- [5] MATOUŠEK, Antonín. *Výroba elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav elektroenergetiky, 2007. ISBN 978-80-214-3317-5.
- [6] TISOT, Jaroslav. *Tepelná elektrárna* [online]. [cit. 26. 05. 2021]. Dostupné z URL: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/07_Elektroenergetika_18-20/19_MMP/047_Tepelna-elektrarna.pdf.
- [7] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [8] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [9] IBLER, Zdeněk *Technický průvodce energetika*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1.
- [10] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015.

- [11] HROMÁDKA, M. *Spolupráce elektrárenských bloků - optimalizace provozních parametrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D..
- [12] HŮBKOVÁ, Ivana *Návrh optimalizace a spolupráce elektrárenských bloků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Radil.
- [13] ZÁKONY PRO LIDI *Zákon č. 458/2000 Sb. Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)*. [online]. [cit. 23. 05. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458#cast2>>
- [14] KORNIA, Libor. *PARNÍ TURBÍNY Provozní zkušenosti* Energetický ústav, Odbor energetického inženýrství, FSI VUT v Brně, 2019.
- [15] MATOUŠEK, Antonín. *Ekologie v elektroenergetice*. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. ISBN 80-214-2538-5.
- [16] MACHÁČEK, Jan a Michal PTÁČEK. *Ekonomika a ekologie v elektroenergetice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [17] ZÁKONY PRO LIDI *Zákon č. 383/2012 Sb. Zákon o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů*. [online]. [cit. 17. 05. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-383>>
- [18] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD *Průměrná cena emisní povolenky pro rok 2019* [online]. [cit. 24. 05. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.eru.cz/documents/10540/462920/prum_cena_emis_povol_2019/e181af89-1afc-4fb1-946d-4f8cf5acbab7>.
- [19] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD *Průměrná cena emisní povolenky pro rok 2020* [online]. [cit. 24. 05. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.eru.cz/documents/10540/462920/Prumerna+cena+emisni+povolenky+za+rok+2020.pdf/b78a10d5-1915-481a-94ea-57ed8909657c>>.
- [20] SVĚT MOBILNĚ. *Emise CO₂ u elektromobilů: Tesla horší než BMW?* [online]. [cit. 25. 05. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.svetmobilne.cz/emise-co2-u-elektromobilu-tesla-hor-si-nez-bmw/4645-2>>.

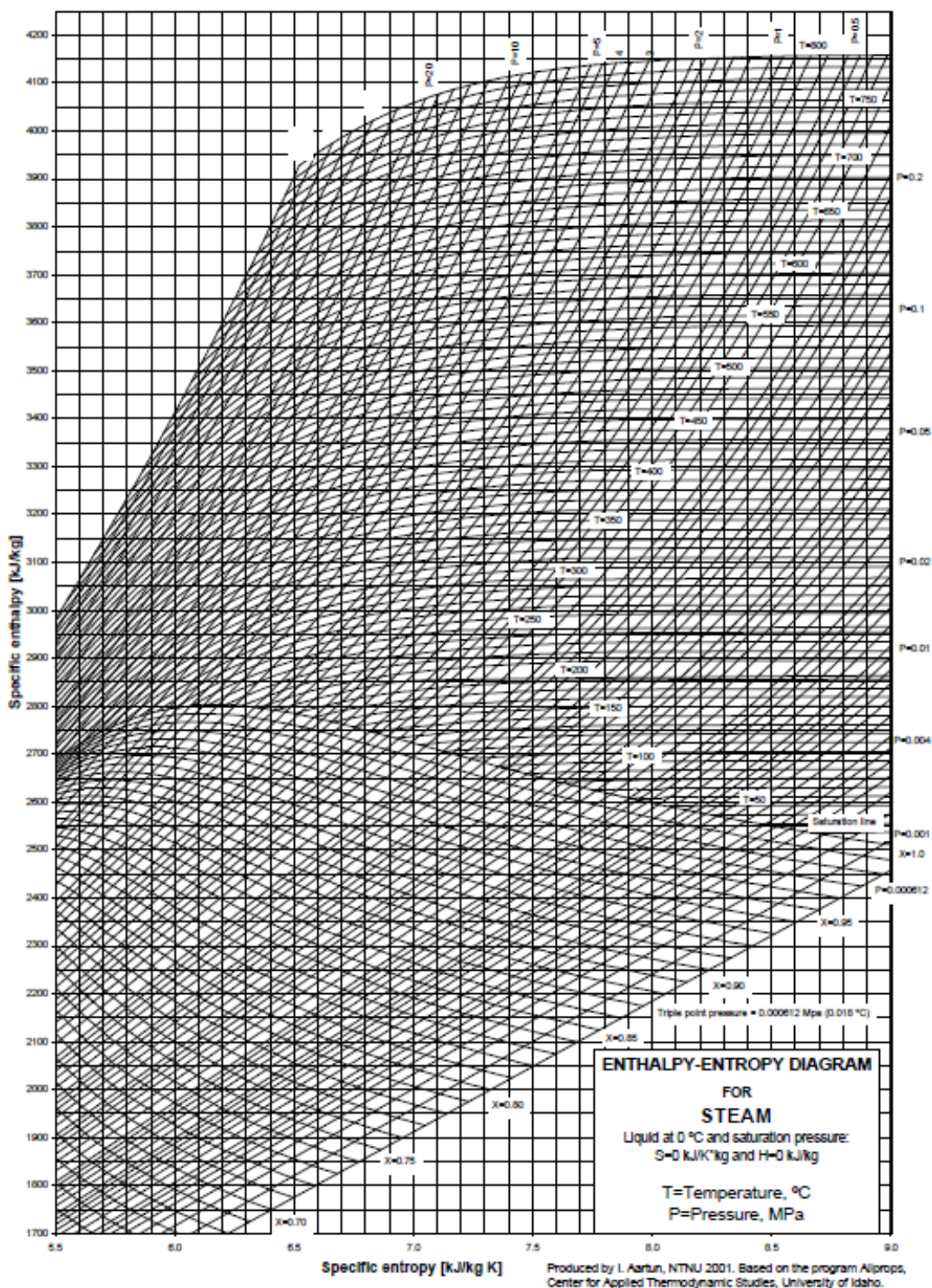
- [21] PATRIA.CZ *Emisní povolenka nad 30 EUR - poprvé po 14 letech* [online]. [cit. 24. 05. 2021]. Dostupné z URL: <<https://www.patria.cz/zpravodajstvi/4450910/emisni-povolenka-nad-30-eur---poprve-po-14-letech.html>>.
- [22] AARTUN, I. *Emisní povolenka nad 30 EUR - poprvé po 14 letech* [online]. [cit. 24. 05. 2021]. Dostupné z URL: <<https://unene.ca/wp-content/uploads/file/courses/un702/UN%200702%20Mollier%20Diagram.pdf>>.

Seznam symbolů a zkratek

η (-)	účinnost bloku
η_g (-)	účinnost generátoru
η_k (-)	účinnost kotle
η_k (-)	účinnost mechanická
η_p (-)	účinnost potrubí
η_{td} (-)	účinnost termodynamická
i_a (kJ/kg)	entalpie napájecí vody
i_k (kJ/kg)	entalpie na vstupu do kondenzátoru
i'_k (kJ/kg)	entalpie syté kapaliny na výstupu z kondenzátoru
i'_{k2} (kJ/kg)	entalpie syté kapaliny na výstupu z regeneračního ohříváku
i'_{nv} (kJ/kg)	entalpie napájecí vody
i_{p1} (kJ/kg)	entalpie při tlaku p_{p1} před přehříváním
i_{p2} (kJ/kg)	entalpie při tlaku p_{p1} po přehřívání
i_{p3} (kJ/kg)	entalpie při tlaku p_{p2} před přehříváním
i_{p4} (kJ/kg)	entalpie při tlaku p_{p2} po přehřívání
i_R (kJ/kg)	entalpie napájecí vody
i'_R (kJ/kg)	entalpie syté kapaliny na výstupu z regeneračního ohříváku
k (-)	konstanta
M (kg/h)	množství teplonosné látky
M_k (kg/h)	množství teplonosné látky na výstupu z turbíny
M_{pal} (kg/h)	spotřeba paliva
M_R (kg/h)	množství teplonosné látky pro regeneraci napájecí vody
m_{pal} (kg/MWh)	měrná spotřeba paliva bloku
m_{pt} (kg/kWh)	měrná spotřeba páry v turbíně

n_{01} (-)	aproximační koeficient nákladové rovnice 1. bloku
n_{02} (-)	aproximační koeficient nákladové rovnice 2. bloku
n_{11} (-)	aproximační koeficient nákladové rovnice 1. bloku
n_{12} (-)	aproximační koeficient nákladové rovnice 2. bloku
n_{21} (-)	aproximační koeficient nákladové rovnice 1. bloku
n_{22} (-)	aproximační koeficient nákladové rovnice 2. bloku
p_a (MPa)	admisní tlak
P_e (MW)	elektrický výkon
P_e (MW)	výkon 1. bloku
P_e (MW)	výkon 2. bloku
p_k (MPa)	kondenzační tlak
p_{p1} (MPa)	tlak prvního přehřívání
p_{p2} (MPa)	tlak druhého přehřívání
p_R (MPa)	tlak pro regeneraci napájecí vody
Q_k (GJ/h)	výkon kotle
Q_t (GJ/h)	příkon kotle
Q_t (GJ/h)	spotřeba tepla v turbíně
q_{tt} (GJ/MWh)	spotřeba tepla bloku
q_{tt} (GJ/MWh)	spotřeba tepla v turbíně
Q_u (MJ/kg)	výhřevnost paliva
t_a (°C)	admisní teplota
t_{nv} (°C)	teplota napájecí vody
t_{p1} (°C)	teplota při tlaku p_{p1}
t_{p2} (°C)	teplota při tlaku p_{p2}

5 Přílohy



Obr. 5.1: i-s diagram

Obr. 5. 1 jeze zdroje [22] .