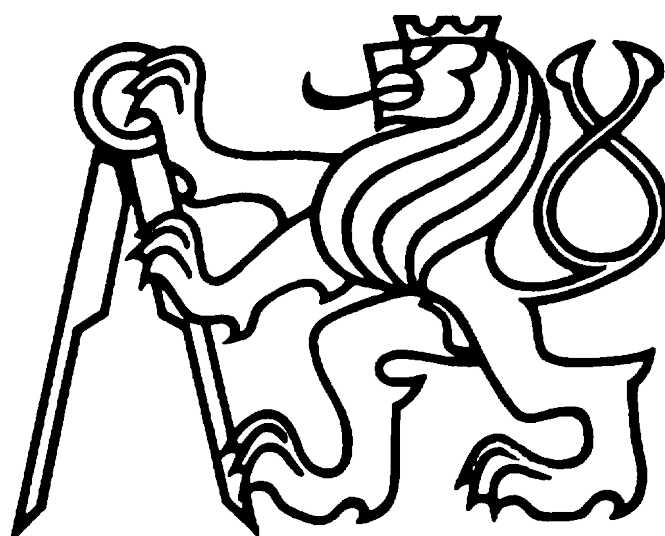


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**POROVNÁNÍ TEPELNÝCH OBĚHŮ JADERNÉ A UHELNÉ
ELEKTRÁRNY**

**COMPARISON OF THERMODYNAMIC CYCLES IN
NUCLEAR AND COAL POWER PLANT**

Autor: Ondřej Matějka

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Bouček

Praha, 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Ondřej Matějka**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Porovnání tepelných oběhů jaderné a uhelné elektrárny**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište obecně tepelné oběhy používané v elektrárnách a uveďte způsoby zvyšování jejich účinnosti.
2. Porovnejte spolu oběhy v uhelné, uhelné nadkritické a jaderné tlakovodní elektrárně z hlediska použité technologie a parametrů vody (páry) (Temelín, Mělník, nový blok Ledvice).
3. Spočítejte účinnosti oběhů u všech elektráren pro jmenovitý výkon bloků.
4. Určete vliv výpadku vybraných zařízení elektráren na jejich celkovou účinnost.

Seznam odborné literatury:

- [1] HEJZLAR, Radko. Termodynamika. ČVUT v Praze FJFI, Vyd. 3. 1998, 166 s. ISBN 80-01-01127-5.
- [2] Sborník přednášek pro Letní Univerzitu. Jaderná elektrárna Temelín, 2015
- [3] DOLEŽAL J. a kol., Jaderné a klasické elektrárny. Vyd. 1. ČVUT v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [4] Technologická schémata elektráren Temelín, Mělník, nový blok Ledvice

Vedoucí: Ing. Stanislav Bouček

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

Prohlášení

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

V Praze dne 25. 5. 2016

.....

Ondřej Matějka

Poděkování

Děkuji Ing. Stanislavu Boučkovi za odborné vedení mé práce a cenné rady, které mi během vypracování poskytl. Děkuji také Ing. Marku Mynaříkovi za poskytnutí všech potřebných podkladů a zajištění exkurze v elektrárně Mělník.

Anotace

Tato práce se zabývá tepelnými oběhy realizovanými ve velkých elektrárenských blocích. Shrnuje teoretické znalosti potřebné pro určování účinností skutečných tepelných oběhů v elektrárnách. V práci jsou popsány funkce jednotlivých zařízení používaných v tepelných obězích elektráren a jejich vliv na termickou účinnost. Tyto znalosti jsou použity pro určení účinností tepelných oběhů tří českých elektráren. Pro každou elektrárnu jsou stanoveny změny účinnosti při výpadku vybraných zařízení a vliv jednotlivých zařízení na celkovou termickou účinnost je vzájemně porovnán.

Klíčová slova

elektrárna, jaderná, uhelná, tepelný oběh, účinnost

Annotation

This thesis deals with thermodynamic cycles realized in large power plant units. Theoretical knowledge necessary for assessing efficiency of real power plants is summarized. Functions of used devices are described together with their impact on cycle efficiency. Presented theoretical knowledge is then utilized to determine efficiencies of thermodynamic cycles in three Czech power plants. Change of thermodynamic efficiency caused by outage of selected devices is calculated for each power plant and mutually compared.

Key words

power plant, nuclear, coal, thermodynamic cycle, efficiency

Obsah

1	ÚVOD.....	7
2	TEPELNÉ OBĚHY.....	8
2.1	Termodynamika	8
2.2	Tepelné diagramy	9
2.3	Voda jako pracovní látka	10
2.4	Parní oběhy.....	10
2.5	Možnosti zvyšování účinnosti oběhu	11
2.5.1	Větší rozmezí teplot.....	11
2.5.2	Přihřívání páry	12
2.5.3	Carnotizace regeneračním ohřevem napájecí vody	12
2.5.4	Teplárenské oběhy	13
2.6	Účinnost skutečných oběhů.....	13
3	ZAŘÍZENÍ TEPELNÝCH OBĚHŮ V ELEKTRÁRNÁCH	15
3.1	Parogenerátor	15
3.2	Turbína.....	15
3.3	Kondenzátor.....	16
3.4	Kondenzátní čerpadlo	16
3.5	Termický odplyňovač.....	16
3.6	Napájecí čerpadlo	16
3.7	Separátor	17
4	POROVNÁNÍ TEPELNÝCH OBĚHŮ ELEKTRÁREN.....	18
4.1	Výpočet účinnosti	19
5	TEMELÍN.....	20
5.1	Princip funkce.....	20
5.2	Tepelný oběh	20
5.3	T-s diagram.....	20
5.4	Výpočet.....	21
5.4.1	Bez separátoru	24
5.4.2	Bez prvního nízkotlakého ohříváče	24
6	MĚLNÍK III.....	26
6.1	Princip funkce.....	26
6.2	Tepelný oběh	26
6.3	T-s diagram.....	26
6.4	Výpočet.....	27
6.4.1	Bez turbonapáječky	29
6.4.2	Bez prvního vysokotlakého ohřevu	30
7	NOVÝ ZDROJ LEDVICE	31
7.1	Princip funkce.....	31
7.2	Tepelný oběh	31
7.3	T-s diagram.....	31
7.4	Výpočet.....	32
7.4.1	Bez využití tepla spalin EKOGAVO	35
7.4.2	Bez čtvrtého nízkotlakého ohřevu	36
8	SROVNÁNÍ	37
9	ZÁVĚR	39
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	40
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	41
	PŘÍLOHY	42

1 Úvod

V této práci se budu věnovat porovnání skutečných tepelných oběhů elektráren s parní turbínou. Téma jsem si vybral po stáži v jaderné elektrárně Temelín, kde mě tato část elektrárny zaujala, a proto jsem se jí rozhodl dále zabývat a porovnat s dalšími elektrárnami. Cílem této práce bude analyzovat tepelný oběh v jaderné elektrárně a oběhy v uhelných elektrárnách a určit termické účinnosti konkrétních oběhů. Dále určím vliv jednotlivých zařízení na účinnost oběhu, a jak se projeví jejich výpadek. Výsledné hodnoty mezi sebou porovnam, určím výhody a nevýhody jednotlivých oběhů a ověřím správnost výsledných hodnot.

Velké elektrárenské bloky jsou základem naší elektrizační soustavy a přeměna tepelné energie na energii mechanickou je nezbytná součástí těchto elektráren. Úpravami této části elektráren lze dosahovat stále vyšších účinností a tím snižovat spotřebu paliva. Zde ukáži, jak jsou realizovány tepelné oběhy v Jaderné elektrárně Temelín, elektrárně Mělník III a nový zdroj Ledvice a jakých dosahují účinností.

Popisem tepelných oběhů se zabývá termodynamika. Ze znalostí základů fyziky a termodynamických zákonů odvodím základní vztahy, ze kterých budu vycházet. V této části také zavedu dvě důležité veličiny – entalpii a entropii. Entalpie popisuje určitým způsobem energii uloženou v pracovní látce a z její změny v jednotlivých zařízeních tepelného oběhu se určuje termická účinnost elektrárenského oběhu. Využívanou pomůckou pro přiblížení tepelných oběhů jsou tepelné diagramy. Při použití vhodného tepelného diagramu je možné lépe pochopit, jaké děje v oběhu probíhají a jak různé změny ovlivní celkovou účinnost. Právě způsobem zvyšování účinnosti oběhu se budu věnovat detailněji.

Realizované tepelné oběhy se skládají z mnoha zařízení zvyšujících celkovou účinnost i dalších s jiným významem. Jejich zapojení v tepelném oběhu je komplikované a pracovní látka díky nim proudí více větvemi oběhu. Při určování účinnosti a dalších parametrů oběhu jsou užívány základní bilanční vztahy pro jednotlivá zařízení, které zde také vysvětlím.

Po shrnutí všech těchto teoretických znalostí přistoupím ke konkrétním tepelným oběhům realizovaným v našich konkrétních elektrárnách. Z dodaných podkladů přehledně zpracuji schémata těchto tepelných oběhů s parametry páry v jednotlivých místech oběhu a příslušející T-s diagram. Poté pomocí poznatků z teoretické části pomocí více dílčích výpočtů určím termickou účinnost daného tepelného oběhu, přepočítám vypočítané hodnoty na jmenovité a porovnam se skutečnými hodnotami. Také využiji sestavené rovnice a po jejich úpravách určím účinnosti oběhů bez vybraných zařízení. Na závěr porovnam vliv jednotlivých zařízení na účinnost oběhu a tepelné oběhy elektráren mezi sebou.

2 Tepelné oběhy

S probíhajícími rozvojem je lidstvo stále více závislé na elektrické energii. I přes současné změny v oblasti elektroenergetiky je většina elektrické energie v České republice vyráběna ve velkých blocích klasických a jaderných elektráren a s vysokým zastoupením zejména jaderných elektráren se počítá i v budoucnosti [14, s. 111]. Tyto elektrárny využívají chemickou nebo jadernou energii uloženou ve vytěžených surovinách, kterou přeměňují na energii tepelnou. Nejpoužívanější způsob přeměny vznikajícího velkého množství tepelné energie na energii elektrickou je využití tepelného oběhu s turbosoustrojím složeném z turbíny a alternátoru [5, s. 11].

Nejčastěji používaný tepelný oběh je uzavřený oběh s pracovní látkou vodou (parní oběh), v paroplynových elektrárnách je využíván ještě navíc otevřený oběh, kde jsou pracovní látkou spaliny [5, s. 32]. V této práci se budu zabývat pouze parními oběhy v klasických a jaderných elektrárnách.

2.1 Termodynamika

Tepelnými oběhy se zabývá oblast fyziky nazvaná termodynamika. Termodynamika je vědou o zákonitostech přeměn energie, zejména přeměn souvisejících s teplem jako formou přenosu energie [1, s. 10]. Pro popis vlastností jakékoliv látky se používají stavové veličiny, které dělíme do dvou kategorií. Extenzivní, které závisí na množství látky a mezi které patří objem V [m^3], vnitřní energie U [J], entalpie H [J], entropie S [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$]. Naopak intenzivní veličiny nezávisí na množství a patří mezi ně teplota T [K], tlak p [Pa], suchost x [-] a měrné veličiny odvozené od extenzivních: měrný objem v [$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$], měrná vnitřní energie u [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$], měrná entalpie h [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] a měrná entropie s [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$] [1, s. 14]. Toto značení veličin budu používat i v této práci.

Při dalších úvahách budu vycházet z prvního a druhého termodynamického zákona. První zákon termodynamiky můžeme zapsat jako:

$$dQ = dU + dA, \quad (1)$$

kde dQ je element tepla přiváděného uzavřené soustavě, dU je změna vnitřní energie soustavy a dA je element práce soustavou vykonané [1, s. 10]. Z druhého termodynamického zákona vyplývá, že žádný periodicky pracující tepelný stroj nemůže pracovat pouze dodáváním tepla. Maximální účinnosti η dosahuje Carnotův oběh:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2)$$

Tento vztah platí pro periodicky pracující bezeztrátový tepelný motor, který odebírá teplo Q_1 o teplotě T_1 , koná práci A a odevzdává teplo Q_2 o teplotě T_2 [1, s. 10-12]. Z toho plyne pro elementární množství tepla vztah:

$$\frac{dQ_1}{T_1} = \frac{dQ_2}{T_2} = dS, \quad (3)$$

kterým je zároveň definována entropie S [1, s. 12]. Dále je možné vyjádřit elementární objemovou práci:

$$dA_v = p \cdot dV, \quad (4)$$

obdobně lze vyjádřit elementární tlakovou práci:

$$dA_p = -V \cdot dp. \quad (5)$$

Důležitá veličina pro moje další výpočty je entalpie H , která je definována jako [1, s. 14]:

$$H = U + p \cdot V, \quad (6)$$

pro její elementární změnu platí:

$$dH = dU + d(p \cdot V) = dU + dp \cdot V + dV \cdot p. \quad (7)$$

Když dosadím do prvního termodynamického zákona (1) vztahy (3) a (4), dostanu:

$$dQ = T \cdot dS = dU + p \cdot dV, \quad (8)$$

následně do nového vztahu (8) dosadím (7):

$$dQ = dH - V \cdot dp. \quad (9)$$

Pokud tento vztah (9) upravím a dosadím první část vztahu (8), dostávám stavovou rovnici pro entalpii:

$$dH = T \cdot dS + V \cdot dp, \quad (10)$$

pro měrné veličiny přechází rovnice na tvar:

$$dh = T \cdot ds + v \cdot dp. \quad (11)$$

Poslední důležitý vztah dostanu dosazením vztahu (5) do rovnice (9):

$$dQ = dH + dA_p. \quad (12)$$

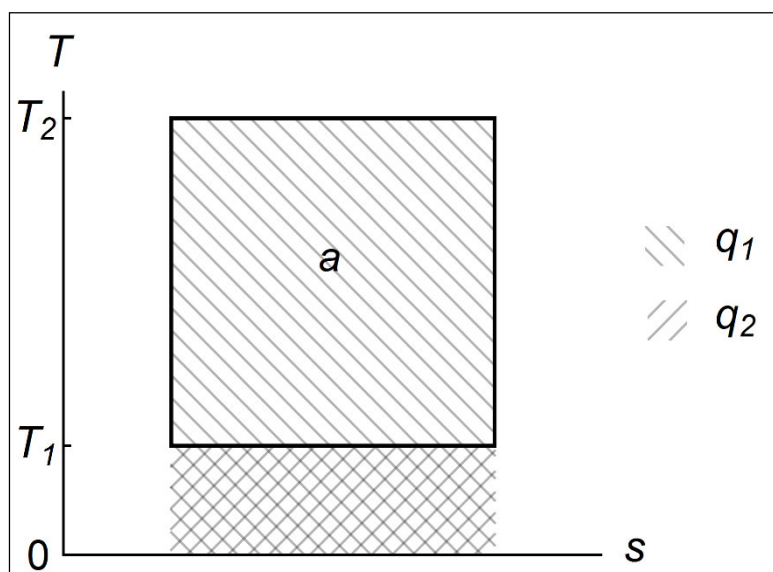
Z těchto dvou posledních vztahů budu vycházet při dalších úvahách.

2.2 Tepelné diagramy

Pro znázorňování stavové změny látky jsou často používány tepelné diagramy. Na jejich osách jsou vždy zobrazovány stavové veličiny. Tyto diagramy se používají kvůli vyšší názornosti zobrazených dějů, často jsou také konkrétní diagramy používány pro snazší zjišťování požadovaných hodnot. Diagram může být zobrazován jak v základních jednotkách, tak v měrných, já budu dále používat měrné. Jedním ze základních diagramů je p - v diagram, ve kterém můžeme vidět jako plochu pod křivkou jak objemovou ($p \cdot dv$), tak tlakovou ($v \cdot dp$) práci [1, s. 26].

Dalším užitečným diagramem je T - s diagram, který budu používat dále v této práci. V tomto diagramu, kde na ose x je měrná entropie a na ose y je teplota, je vidět jako plocha pod křivkou dodané měrné teplo ($q = T \cdot ds$). Pokud se v tomto diagramu zobrazí ideální

uzavřený oběh, pak je měrná vykonaná práce a rovna rozdílu přivedeného a odvedeného měrného tepla, což v diagramu odpovídá ploše uvnitř křivky (Graf 1).



Graf 1 – T-s diagram Carnotova oběhu

Při základních výpočtech tepelných oběhů se také používá h-s diagram (někdy nazýván Mollierův). Tento diagram je vhodný k snadnému odečítání rozdílu entalpií pracovní látky při adiabatické expanzi nebo kompresi, čímž se získá vykonaná nebo spotřebovaná tlaková práce [1, s. 29].

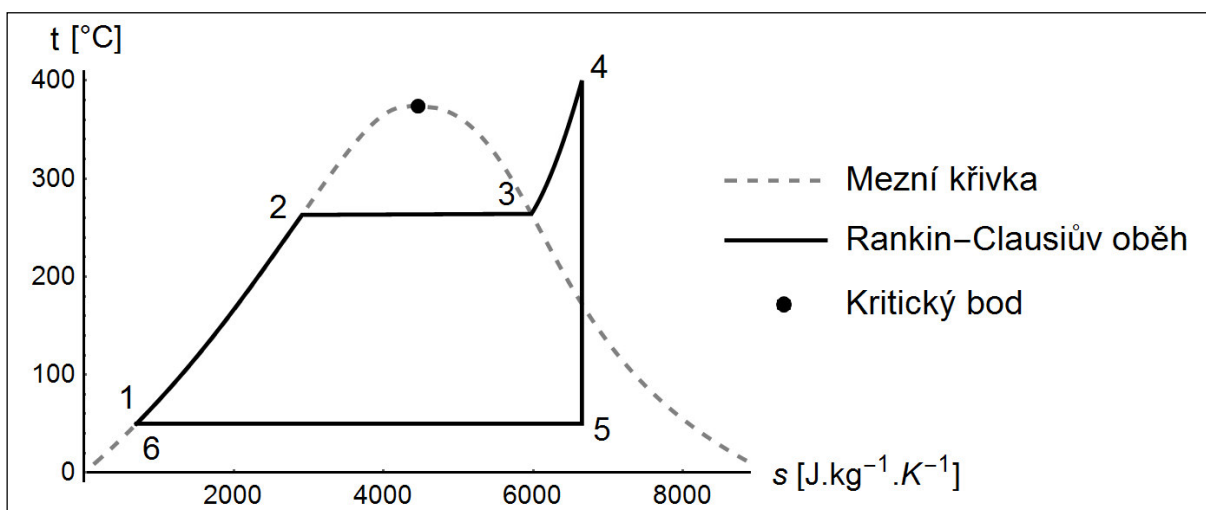
2.3 Voda jako pracovní látka

Aby bylo dosaženo při výpočtech tepelných oběhů s pracovní látkou vodou relevantních výsledků, musí být voda považována za reálnou látku. Neplatí pro ni tedy stavová rovnice ideálního plynu a další zjednodušení vztahující se k ideálnímu plynu. Existují sice stavové rovnice pro vodní páru, které jsou však velmi složité a těžko se používají přímo při výpočtech. Z těchto teoretických vztahů a experimentálně zjištěných hodnot byly vytvořeny parní tabulky a diagramy, ze kterých je možné snadněji zjistit požadované hodnoty ze známých. Mezi nejlepší možnosti patří použití programu TVVP [4], ve kterém jsou zpracované parní tabulky podle průmyslové formulace IAPWS-IF97.

2.4 Parní oběhy

Základní parní oběh používaný v elektrárnách je Rankin-Clausiusův oběh (Graf 2). V tomto oběhu dochází od bodu 1 k dodávání tepla a izobarickému ohřevu až k bodu varu při daném tlaku (bod 2). Poté se voda izobaricky i izotermicky odpařuje až na mez sytosti (bod 3). V tomto případě dochází ještě k přehřívání páry až na teplotu 400 °C (bod 4). Následně pára vstupuje do turbíny, kde dochází k expanzi páry. Z turbíny vystupuje mokrá pára o teplotě 50 °C (bod 5), která izobaricky kondenzuje v kondenzátoru až do bodu 6 (v Grafu 2 splývá s bodem 1).

Napájecím čerpadlem je poté zvýšen tlak kondenzátu až na tlak, při kterém probíhá izobarický ohřev [5, s. 31].



Graf 2 – Rankin-Clausiov oběh s přehříváním páry

Při izobarickém ohřevu ($dp = 0$) je podle vztahu (9) přivedené měrné teplo rovno zvýšení měrné entalpie látky. Pokud budu uvažovat, že je turbína tepelně izolovaná ($dQ = 0$), pak podle vztahu (12) je rozdíl měrných entalpií na vstupu a na výstupu turbíny roven měrné tlakové práci vykonané turbínou.

Jestliže měrnou entalpii páry v bodě x Grafu 2 označím jako h_x , pak můžu účinnost tohoto oběhu vyjádřit přibližně jako [5, s. 31]:

$$\eta = \frac{a}{q_1} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_1}. \quad (13)$$

Zde je zanedbána práce, kterou musí vykonat napájecí čerpadlo, aby se kondenzát dostal do bodu 1, což bude mírně snižovat účinnost daného oběhu. Účinnost oběhu na obrázku dosahuje 35,5 %, když teoreticky maximální účinnost, které by dosahoval mezi těmito teplotami Carnotův motor, je 52 %. Proto se účinnost tohoto oběhu vylepšuje různými metodami, které dále popíši.

2.5 Možnosti zvyšování účinnosti oběhu

Existuje více způsobů, kterými se zvyšuje účinnost Rankin-Clausiova oběhu. Zde shrnu ty, které se v technické praxi využívají, a jaké jsou jejich další klady a zápory.

2.5.1 Větší rozmezí teplot

Obecně se účinnost oběhu zvýší, pokud je teplo dodáváno při vyšší teplotě a odebíráno při nižší teplotě. Většina tepla v Rankin-Clausiově oběhu se dodává při teplotě varu vody. Pro zvýšení teploty varu musí být zvýšen tlak, čímž se však zvyšují nároky na používaná zařízení. Také se musí dodávat teplo ze zásobníku o vyšší teplotě, což je možné u tepelných elektráren,

ne však u jaderných tlakovodních. Tato možnost je využívána u nově stavěných nadkritických tepelných elektráren.

Aby došlo ke kondenzaci páry, musí být teplota páry vyšší než teplota chladicí vody, teplota kondenzace tedy nemůže být dále snižována [5, s. 33].

2.5.2 Přihřívání páry

Další možností je opakování části oběhu, která má nejvyšší účinnost, což je část na Grafu 2 mezi body 3 a 4 (zde se pracuje s vyšším rozdílem teplot). Tato možnost se v praxi označuje jako přihřívání páry. V turbíně nedochází k celé expanzi tak, jak je znázorněno na Grafu 2. Turbína se zde skládá z více dílů, které se nazývají podle pracovních tlaků jako vysokotlaký (VT), středotlaký (ST) a nízkotlaký (NT). Ve vysokotlakém dílu expanduje pára na určitý tlak, při kterém je znovu ohřívána a poté přivedena do středotlakého a z něj přímo do nízkotlakého (někde bez středotlakého dílu).

U tepelných elektráren bývá přihřívání uskutečňováno přivedením páry znovu do kotle. U jaderných elektráren se používá tepelný výměník nazývaný přihříváč (označení P), kde je pára přihřívána odběrem páry přímo za parogenerátorem. Často bývá přihříváč kombinován v jednom bloku se separátorem, který odseparuje vlhkost a sníží tím množství tepla potřebné pro přihřívání páry.

Bez použití přihřívání páry by navíc expanze skončila v oblasti páry s vyšší vlhkostí, která není vhodná pro chod turbíny, snížila by se i termodynamická účinnost turbíny. Toto řešení je vhodné i konstrukčně, protože tím nebude turbína jeden obrovský celek, ale více dílů, které se snadněji vyrábí a provozují. U nadkritických tepelných elektráren může být použito i dvojnásobné nebo trojnásobné přihřívání páry [5, s. 33].

2.5.3 Carnotizace regeneračním ohřevem napájecí vody

Pro přiblížení Rankin-Clausiova oběhu Carnotovu se dá využít přihřívání napájecí vody (v Grafu 2 mezi body 1 a 2). Ideálně by se vždy po expanzi páry na tlak nepatrně nižší všechna pára vyvedla z turbíny a přihřála po částech od vstupu do turbíny až po výstup z napájecího čerpadla. To však není prakticky možné a využívá se jiný, o něco méně účinný, způsob.

Turbína je vybavená určitým počtem odběrů (může být mezi jednotlivými stupni), ze kterých se vždy malá část páry odvádí do regeneračních ohříváčů. Turbína je navíc konstruovaná tak, že se odebírá ta nejvlhčí část páry, která by mohla dále turbínu poškodit. Pára z těchto odběrů se vede do tepelných výměníků, kde předává svou energii (včetně kondenzační) napájecí vodě a vrací se zpět do oběhu až za kondenzátorem. Tyto regenerační ohříváče se dělí podle tlaku ohřívajícího kondenzátu na nízkotlaké (NTO) a vysokotlaké (VTO) a může jich být více.

Použití regeneračního ohřevu přináší ještě řadu dalších výhod. Zvýšení účinnosti je v tomto případě zajištěno snížením odvodu tepla v kondenzátorech, pára ze všech odběrů

kondenzuje v regeneračních ohřivačích. To snižuje velikost kondenzátorů a množství chladicí vody. Odebíráním páry během expanze také dochází k postupnému snižování hmotnostních průtoků páry turbínou při nižších tlacích, takže se nebudou příliš zvyšovat rozměry nízkotlakých dílů turbíny [5, s. 35].

Výhodou je také rozložení teplotního spádu mezi jednotlivé regenerační ohřevy a nedochází k velkému tepelnému namáhání parogenerátoru. Dodávané teplo parogenerátoru je využito hlavně k fázové změně pracovní látky, ne k ohřevu.

2.5.4 Teplárenské oběhy

Další možností je kombinovaná výroba elektrické energie a tepla. Expanze páry v tomto oběhu skončí při vyšším tlaku odpovídajícím teplotě, která je požadovaná. Kondenzační teplo je zde poté využíváno k dalším účelům a není odváděno bez užitku do okolí [13, s. 53]. Tímto případem se v této práci zabývat nebudu, budu porovnávat elektrárny čistě v kondenzačním režimu bez dalšího využití tepla nebo páry.

2.6 Účinnost skutečných oběhů

K vykreslení diagramů a vypočítání celkové účinnosti tepelného oběhu potřebujeme znát parametry páry v jednotlivých místech oběhu a jeho technologické schéma. Nulová hodnota entalpie se v praxi přisuzuje vodě o teplotě 0 °C, díky tomu lze měrnou entalpii kondenzátu o nižších teplotách určit s dostatečnou přesností jako:

$$h = t \cdot c_w, \quad (14)$$

kde t je teplota kondenzátu v °C a měrná tepelná kapacita vody $c_w = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Měrná tepelná kapacita se však s rostoucí teplotou zvyšuje, proto při vyšších teplotách je tato metoda nepřesná a entalpii kondenzátu budu zjišťovat z parních tabulek.

Základní výpočet účinnosti se provádí v měrných jednotkách, tedy pro jeden kilogram pracovní látky. Při použití regeneračních ohřevů a dalších technologií odebírající páru z oběhu neplatí, že všechnu práci vykoná celý kilogram pracovní látky. Proto pro každý odběr páry z hlavního oběhu se určuje poměrný odběr z energetických bilancí ohřivačů (a jiných zařízení).

Pokud se zanedbají tepelné ztráty, které bývají nepatrné [13, s. 160], sestaví se energetickou bilanci ohřivačů:

$$\beta_1 \cdot \Delta h_1 = \beta_2 \cdot \Delta h_2, \quad (15)$$

kde β_1 je poměrný hmotnostní odběr a Δh_1 je pokles entalpie daného odběru, β_2 je poměrný hmotnostní tok a Δh_2 je nárůst entalpie ohřivané látky [13, s. 159]. Při použití více odběrů na různých místech je možné sestavit podle technologického schématu energetické bilance všech ohřivačů a dalších zařízení, určit jejich odběry a celkovou účinnost oběhu určit podle:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{\sum \beta_i \cdot a_i}{\sum \beta_j \cdot q_j}, \quad (16)$$

kde β jsou poměrné průtoky, a příslušející práce, které se určí z rozdílu měrných entalpií mezi částmi turbíny, a q dodaná tepla příslušející průtokům, která se také určí z rozdílu měrných entalpií [5, s. 51].

3 Zařízení tepelných oběhů v elektrárnách

Ve skutečné realizaci obsahují tepelné oběhy v elektrárnách mnoho zařízení s různými funkcemi, zde popíšeme ty nejdůležitější a ty, které mají vliv na účinnost a nebyly popsány v předchozí části.

3.1 Parogenerátor

Parogenerátor (PG) je zařízení všech tepelných elektráren a víceokruhových jaderných elektráren a dochází v něm k fázové změně pracovní látky – vody na páru.

V tepelných elektrárnách je parogenerátor soustava trubek procházejících kotlem. V kotli dochází ke spalování paliva a uvolněná tepelná energie je předávána pracovní látce v trubkách parogenerátoru, která se vypařuje, případně i přehřívá dále v přehříváči. Při použití přehřívání páry je pára vystupující z vysokotlakého dílu přivedena do oddělené části, kde dochází k jejímu přehřívání. Protože je parogenerátor s přehříváčem umístěn přímo v kotli, vyznačuje se někdy tento tepelný výměník v textu i ve schématech přímo jako kotel (K).

Ve víceokruhových jaderných elektrárnách je parogenerátor tepelný výměník, ve kterém je předávána tepelná energie pracovní látky předchozího okruhu. V obvyklých dvouokruhových tlakovodních jaderných elektrárnách je tepelná energie tlakové vody primárního okruhu předávána vodě sekundárního okruhu o nižším tlaku, která se zde izobaricky odpařuje. Teplo je zde předáváno přes teplosměnné trubičky. Tato část je důležitá i z hlediska jaderné bezpečnosti, protože odděluje radioaktivní a neaktivní pracovní látky.

V jednookruhových jaderných elektrárnách není parogenerátor potřebný, chladiivo reaktoru je zde zároveň pracovní látkou a přímo vstupuje do turbíny [5, s. 113]

3.2 Turbína

Velké elektrárenské bloky jsou nejčastěji vybaveny kondenzační odběrovou turbínou složenou z více dílů z důvodů, které byly uvedeny výše. Každý díl se navíc skládá z několika stupňů, mezi kterými mohou být umístěny odběry. Každý následující stupeň jednoho dílu turbíny má větší poloměr než předchozí, protože během expanze dochází k zvětšování objemu páry.

Každý díl turbíny bývá zpravidla konstruován jako dvouproudý. To znamená, že se pára přivádí doprostřed turbíny a expanduje na jednotlivých stupních od středu k okrajům, přesně jak znázorňuje schematická značka. Vysokotlaké díly pracující při vysokých teplotách a tlacích páry mohou být konstruovány jako jednoproudé, ve kterých nejsou jednotlivé stupně symetrické, ale směřují pouze na jednu stranu (opět odpovídá značce ve schématu).

Nízkotlaké díly mohou být naopak složeny z více obdobných částí, aby nedosahovaly příliš velkých rozměrů. Odběry z nich nemusí být zcela symetrické, jeden odběr může být umístěn pouze na jedné části a jiný odběr pouze na další části. Ve schématech je více částí

zobrazováno jako jeden díl, pokud je více nesymetrických odběrů, jsou zobrazeny všechny odběry zvlášť [13].

3.3 Kondenzátor

Z kondenzační turbíny jde pára vždy do hlavního kondenzátoru (HK). V něm odevzdává pára nízkopotenciálové teplo chladicí vodě a kondenzuje. Pod kondenzátrem je umístěn sběrač kondenzátu, ze kterého je voda vedena na vstup kondenzátního čerpadla [5, s. 39].

3.4 Kondenzátní čerpadlo

Kondenzátní čerpadlo (KČ) čerpá kondenzát dále do nízkotlakých regeneračních ohřevů. Zvyšuje tlak a tedy i teplotu varu vody a díky tomu nedochází v nízkotlakých ohřivačích k odpařování [2, s. 29].

3.5 Termický odplyňovač

Funkce termického odplyňovače (TO) je zbavení napájecí vody rozpuštěných plynů, které mohou mít nežádoucí účinky v dalších zařízeních. Z nízkotlakých ohřevů je voda přiváděna do vrchní části odplyňovače, kde je poté rozstříkována ve formě malých kapiček. Takto rozptýlená voda je prudce ohřívána párou z některého odběru, čímž se z ní uvolňují rozpuštěné plyny. V termickém odplyňovači tedy nedochází k ohřívání napájecí vody přes teplosměnnou plochu jako v jiných ohřivačích, ale přímým vhnáním páry z odběru. Zkondenzovaná pára a odplyněná napájecí voda stéká do napájecí nádrže, která je zpravidla ve spodní části odplyňovače (odpovídá schematické značce termického odplyňovače) [13, s. 172].

3.6 Napájecí čerpadlo

Odplyněný kondenzát zpravidla pokračuje do napájecího čerpadla (NČ), které má za úkol dosáhnout určitého tlaku, při kterém bude docházet ideálně k izobarickému ohřevu pracovní látky ve vysokotlakých ohřivačích a parogenerátoru. Kvůli tlakovým ztrátám potrubí a dalších zařízení bude tlak během ohřevu mírně klesat, nejvyšší tlak pracovní látky v celém oběhu je tedy na výstupu napájecího čerpadla.

Pohon napájecího čerpadla může být zajištěn elektronapáječkou (ELN) s elektromotorem nebo turbonapáječkou (TBN). To je menší turbína, která odebírá páru z určitého místa oběhu, pracuje jako standardní turbína a vznikající mechanická energie přímo pohání připojené čerpadlo. Technicko-ekonomickým porovnáním účinnosti oběhu s turbonapáječkou a ceny turbonapáječky určíme, zda je vhodné ji použít [13, s. 185].

3.7 Separátor

Zařízení používané v jaderných elektrárnách k odstranění vlhkosti z páry po expanzi ve vysokotlakém dílu. Separátor (SP) bývá konstrukčně v jednom bloku s přehříváčem, takovýto celek se nazývá separátor přehříváč (SPP).

Hlavním důvodem separování je snížení množství dodávaného tepla v přehříváči, což vede ke zmenšení množství odebírané páry směřující do přehříváče a zlepšení účinnosti celého oběhu.

V tepelných elektrárnách bývá obvykle na výstupu z vysokotlakého dílu pára stále v oblasti přehřáté páry. Navíc zde může být přehřívání realizováno zavedením výstupu páry z vysokotlakého dílu znovu do kotle, přehřívání zde není realizováno tepelným výměníkem využívajícím odebíranou páru. Separátor se proto v tepelných elektrárnách nepoužívá [13, s. 114].

4 Porovnání tepelných oběhů elektráren

V praktické části této práce se budu zabývat konkrétními tepelnými oběhy elektráren Temelín, Mělník III a nový zdroj Ledvice. Většina dat potřebných pro naše výpočty je obsažena v technologických schématech jednotlivých elektráren [10, 11, 12]. V těchto schématech je však zakresleno mnoho dalších zařízení a potrubí, která se neuplatňují při jmenovitém provozu elektrárny a těchto výpočtech, ale jsou důležitá při ostatních provozních stavech. Také zanedbám a nevyznačím zařízení, která odebírají nepatrné množství páry (například ucpávky turbíny). Dále jsou ve schématech vyznačeny i hodnoty hmotnostních toků, já však budu posuzovat oběhy pouze podle parametrů páry, hmotnostní toky použiji pouze tam, kde nelze poměrné hmotnostní toky určit jinak, a v závěrečném srovnání.

Další potřebná data, která se ve schématech nenachází, jako jsou například účinnosti turbonapáječek a tepelné výkony kotlů, jsem získal přímo z elektráren s pomocí Ing. Marka Mynaříka.

Pro přehlednost a sjednocení všech značení jsem si vytvořil vlastní zjednodušená technologická schémata se všemi nezbytnými informacemi a zařízeními (Přílohy 1, 3, 5). Při značení zařízení a parametrů páry jsem začínal od výstupu páry z parogenerátoru nebo kotle, číselné značení odběrů proto nemusí přesně odpovídat značení v elektrárně. U tepelných výměníků jsem šipkami vyznačil vstupy páry nebo kondenzátu do výměníku.

Parametry páry v jednotlivých místech oběhu příslušející vyznačeným místům v technologických schématech (Přílohy 1, 3, 5) jsou uspořádány v tabulkách (Přílohy 2, 4, 6). Do tabulek jsou doplněny i hodnoty entropie, které jsem neznal a byly doplněny z parních tabulek [4]. Hodnoty tlaku kondenzátu jsou uváděny pouze orientačně, důležité jsou pouze rozdíly tlaků vytvořené čerpadlem, kterým je úměrná práce čerpadel. Ztráty v potrubí jsou započítány pouze pro potrubí vycházející z parogenerátoru nebo kotle. Zde je dosahováno vysokých teplot a tlaků, proudí tudíž největší množství páry a délka potrubí je obvykle velká. Ztráty v ostatních potrubí a tepelných výměnících budou z důvodu vysoké účinnosti těchto zařízení zanedbány.

Z hodnot teplot a entropie v tabulkách (Přílohy 2, 4, 6) vytvořím T-s diagramy tepelných oběhů jednotlivých elektráren. Graf vytvořím v programu Mathematica [8], část oběhu, kde dochází k izobarickému ohřevu, proložím izobarou z parních tabulek integrovaných přímo v programu Mathematica [8]. Graf by tedy měl přesně odpovídat skutečným parametrům páry v oběhu, pouze v části zobrazující expanzi v turbíně může být odchylka. Zobrazené odběry páry z turbíny mohou mít totiž trochu odlišné parametry, než má pára v turbíně, protože díky konstrukci turbíny je odebírána pára s vyšší vlhkostí. Odběry také nemusí být ve více nízkotlakých dílech umístěny ve všech, a tak může docházet k jiným průběhům expanze v různých nízkotlakých dílech. Změna parametrů páry na lopatkách turbíny je obecně komplikovanější a v této práci se jí nebudu podrobněji zabývat.

4.1 Výpočet účinnosti

Výpočet účinnosti budu provádět jednoduchým způsobem, při kterém určím dodané teplo a vykonanou práci turbínou při průchodu jednoho kilogramu pracovní látky celým oběhem (kapitola 2.6). Poměr vykonané práce a dodaného tepla určuje termickou účinnost oběhu (rovnice 16). Celý oběh však nevykoná celé množství pracovní látky. Proto si pro výpočet účinnosti určím poměrné velikosti odběrů z bilančních rovnic, které sestavím podle technologických schémat (Přílohy 1, 3, 5).

Parametry páry budeme pro přehlednost rovnic udávat ve tvaru x_i , kde x je požadovaná veličina a i je její označení ve schématu i v tabulce. Poměrné odběry budu značit β_j , kde j je zařízení, do kterého odběr směřuje. Průtoky páry v hlavní části oběhu budu vyjadřovat jako jednotkový průtok mínus předcházející poměrné odběry. Entalpii kondenzátu při teplotě y budu označovat h_k (y °C).

K vyřešení soustavy rovnic a určení účinnosti využiji opět program Mathematica [8] (Přílohy 7, 8, 9). Díky použití výpočtu s oběhem jednoho kilogramu pracovní látky a sestavení bilančních rovnic můžu jednoduše celou soustavu rovnic upravit a stanovit změnu účinnosti při výpadku vybraných zařízení.

Na závěr převedu poměrné hodnoty na jmenovité díky známým tepelným výkonům parogenerátoru či kotlů. Výsledné hodnoty porovnáám s některými známými hodnotami elektráren, porovnáám mezi sebou jednotlivé elektrárny a zhodnotím jak správnost celého výpočtu, tak jednotlivé elektrárny mezi sebou z hlediska termické účinnosti a použité technologie.

5 Temelín

Jaderná elektrárna Temelín je česká jaderná elektrárna s dvěma bloky s tlakovodními reaktory typu VVER 1000 V320 [2 s. 21]. První blok vyrobil první elektřinu v roce 2000, celá elektrárna byla uvedena do provozu v letech 2002 až 2003 [3]. Jmenovitý výkon každého bloku po výměně vysokotlakého i nízkotlakých dílů je 1080 MW. V současnosti jsou oba reaktory provozovány při tepelném výkonu 3132 MW, což je 104 % jeho projektovaného výkonu, z tohoto provozního stavu budu vycházet [10].

5.1 Princip funkce

Temelín je dvouokruhová elektrárna, každý blok má tedy primární a sekundární okruh. V primárním okruhu dochází k přeměně jaderné energie na energii tepelnou, toto teplo je odváděno z aktivní zóny reaktoru chladičem – tlakovou vodou. V parogenerátorech předává tlaková voda primárního okruhu svoji tepelnou energii vodě v sekundárním okruhu.

Sekundárním okruhem, který slouží k přeměně tepelné energie na mechanickou, se budu zabývat dále.

Mechanická energie turbíny je přeměňována na elektrickou alternátorem, připojeným přes spojku k turbíně. Elektrická energie je v blokových transformátorech transformována na hladinu velmi vysokého napětí a je dodávána do přenosové soustavy [2].

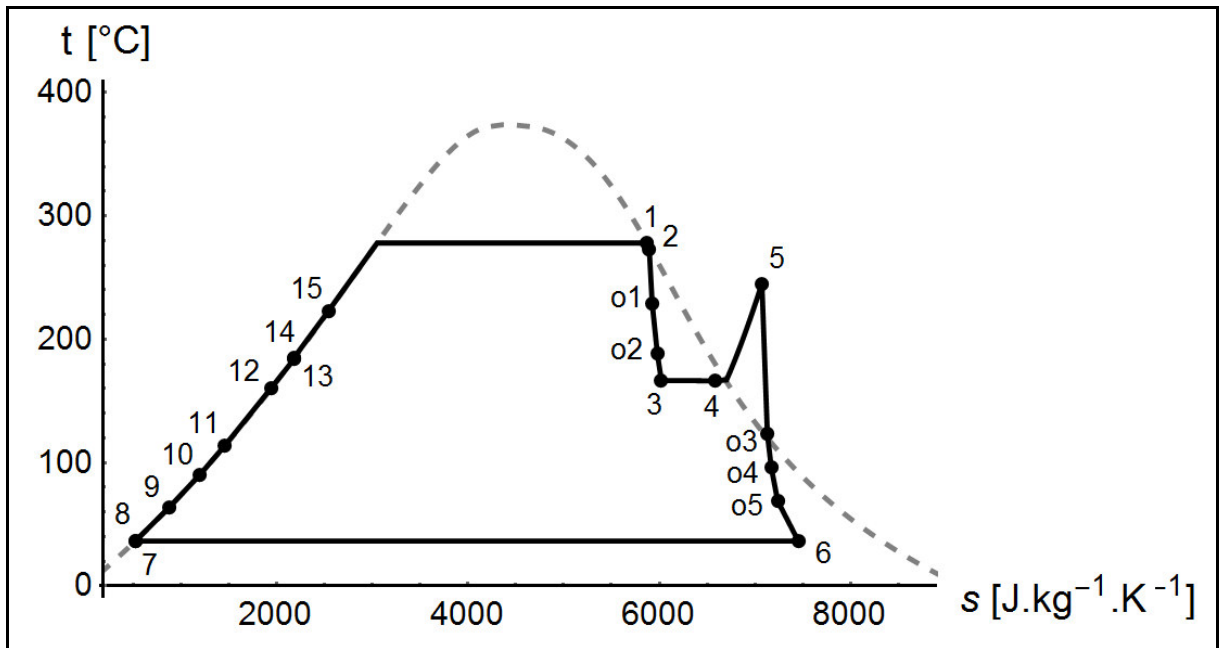
5.2 Tepelný oběh

V parogenerátorech je tepelná energie z primárního okruhu předávána vodě v sekundárním okruhu, která se odpařuje a vzniká sytá pára. Většina této páry směřuje do vysokotlakého dílu parní turbíny, z mokré páry vystupující z turbíny je odseparována voda a je přihřívána malou částí páry vzniklou v parogenerátoru. Tato přehřátá pára vstupuje do tří nízkotlakých dílů, ze kterých vystupuje do kondenzátoru, kde odevzdává nízkopotenciálové teplo chladicí vodě a kondenzuje. Poté se jako napájecí voda vrací zpět do parogenerátoru přes několik čerpadel a regeneračních ohříváčů, kde je ohřívána párou odebíranou z různých odběrů na turbíně i jinde.

Zjednodušené schéma sekundárního okruhu obsahující všechna důležitá potrubí a zařízení se nachází v Příloze 1.

5.3 T-s diagram

Z hodnot teplot a entropie v tabulce (Příloha 2) vytvořím T-s diagram sekundárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín.



Graf 3 – T-s diagram Jaderné elektrárny Temelín

5.4 Výpočet

Z parních tabulek [4] určím suchost páry x před a za separátorem (SP). Před separátorem v bodě 3 je suchost $x_3 = 0,86$, za separátorem v bodě 4 je suchost $x_4 = 0,982$. Poměrný odběr zkondenzované části páry ze separátoru β_{SP} bude roven rozdílu suchostí:

$$\beta_{SP} = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{NTO4})(x_4 - x_3). \quad (17)$$

Pro přehříváč (P) sestavím energetickou bilanční rovnici. Odebraná pára zde zkondenzuje a teplo předá páře, která bude izobaricky přehřívána:

$$\beta_P \cdot (h_2 - h_k(272,8 \text{ °C})) = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{NTO4} - \beta_{SP}) \cdot (h_5 - h_4). \quad (18)$$

V regeneračních ohřevcích dochází také k předávání kondenzačního tepla, navíc je zde i vyměňováno teplo obou kondenzátů. Díky konstrukci ohříváčů má kondenzát z odběru teplotu o 10 °C větší, než je teplota vstupujícího ohřívaného kondenzátu. Pro vysokotlaký ohříváč (VTO) sestavím rovnici:

$$\beta_{VTO} \cdot (h_{o1} - h_k(195 \text{ °C})) + \beta_P \cdot (h_k(272,8 \text{ °C}) - h_k(195 \text{ °C})) = 1 \cdot (h_{15} - h_{14}). \quad (19)$$

Termickým odplyňovačem (TO) se do oběhu vrací kondenzát z více zařízení a k odplynění je do něj přiveden druhý odběr, který odevzdá energii až na hodnotu entalpie vystupujícího kondenzátu:

$$\beta_{TO} \cdot (h_2 - h_{13}) + (\beta_P + \beta_{VTO})(h_k(195 \text{ °C}) - h_{13}) = \beta_{SP} \cdot (h_{13} - h_k(166,3 \text{ °C})) + (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP})(h_{13} - h_{12}). \quad (20)$$

Bilanční rovnice pro čtvrtý nízkotlaký ohříváč (NTO4):

$$\beta_{NTO4} \cdot (h_3 - h_k(124 \text{ °C})) = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP})(h_{12} - h_{11}). \quad (21)$$

Bilanční rovnice pro třetí nízkotlaký ohřivač (NTO3):

$$\begin{aligned} \beta_{NTO3} \cdot (h_{o3} - h_k(100 \text{ °C})) + \beta_{NTO4} \cdot (h_k(124 \text{ °C}) - h_k(100 \text{ °C})) = \\ = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP})(h_{11} - h_{10}) . \end{aligned} \quad (22)$$

Ve druhém nízkotlakém ohřivači (NTO2) bude teplota obou výstupních kondenzátů shodná, protože bude kondenzát z NTO4, NTO3 a NTO2 doplňován po předání tepla v NTO2 zpět do oběhu za tento ohřivač. Bilanční rovnice NTO2:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO2} \cdot (h_{o4} - h_k(90 \text{ °C})) + (\beta_{NTO4} + \beta_{NTO3})(h_k(100 \text{ °C}) - h_k(90 \text{ °C})) = \\ = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2})(h_{10} - h_9) . \end{aligned} \quad (23)$$

Bilanční rovnice prvního nízkotlakého ohřivače NTO1:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO1} \cdot (h_{o5} - h_k(46,5 \text{ °C})) = \\ = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2})(h_9 - h_8) . \end{aligned} \quad (24)$$

Dále potřebuji určit velikost odběru pro turbonapáječku. Měrná práce čerpadla se určí jako rozdíl tlaků mezi vstupem a výstupem děleno hustotou čerpané látky. Také potřebuji znát účinnost čerpadla, která je pro tuto konkrétní turbonapáječku 81 %.

$$0,81 \cdot \beta_{TBN} \cdot (h_5 - h_6) = \frac{p_{14} - p_{13}}{\rho_{13}} . \quad (25)$$

Hustota kondenzátu se mění s teplotou, která se zde však změní pouze o 1 °C, lze tedy považovat hustotu vody v čerpadle za konstantní a podle tabulek [4] při daných parametrech páry rovnu $\rho_{13} = 883 \text{ kg.m}^{-3}$.

Vyřešením této soustavy rovnic dostanu poměrné odběry všech zařízení (Tab. 1). Práci vykonanou oběhem jednoho kilogramu pracovní látky určím součtem všech dílčích prací, které vykonali všechny části turbíny mezi odběry. Pro přehlednost určím zvlášť práci vysokotlakého a nízkotlakého dílu turbíny:

$$\begin{aligned} a_{VT} = & (1 - \beta_P) \cdot (h_2 - h_{o1}) + \\ & (1 - \beta_P - \beta_{VTO}) \cdot (h_{o1} - h_{o2}) + \\ & (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO}) \cdot (h_{o2} - h_3) , \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} a_{NT} = & (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP} - \beta_{NTO4} - \beta_{TBN}) \cdot (h_5 - h_{o3}) + \\ & (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP} - \beta_{NTO4} - \beta_{TBN} - \beta_{NTO3}) \cdot (h_{o3} - h_{o4}) + \\ & (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP} - \beta_{NTO4} - \beta_{TBN} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2}) \cdot \\ & \cdot (h_{o4} - h_{o5}) + \\ & (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP} - \beta_{NTO4} - \beta_{TBN} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2} - \beta_{NTO1}) \cdot \\ & \cdot (h_{o5} - h_6) . \end{aligned} \quad (27)$$

Dodané měrné teplo q_1 stanovím jako:

$$q_1 = 1 \cdot (h_{16} - h_{15}) . \quad (28)$$

Nyní určíme celkovou účinnost tepelného oběhu po dosazení:

$$\eta = \frac{a_{VT} + a_{NT}}{q_1} = 35,2 \% . \quad (29)$$

Od vykonané práce turbínou by se měla odečítat spotřebovanou práci všech čerpadel. Vzhledem k započítání použití turbonapáječky, která vykonává největší práci, je možné práci zbývajících kondenzátního čerpadla a menších čerpadel zanedbat.

Maximální možná účinnost tepelného oběhu pracujícího mezi stejnými teplotami $t_2 = 36,3 \text{ }^\circ\text{C}$ a $t_1 = 278 \text{ }^\circ\text{C}$ je:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 43,9 \% . \quad (30)$$

Tepelný oběh v sekundárním okruhu Jaderné elektrárny Temelín dosahuje 80,2 % maximální možné účinnosti.

Při jmenovitém tepelném výkonu předávaném v parogenerátoru, který je $P_1 = 3129 \text{ MW}$, určíme jmenovité velikosti celkového hmotnostního toku \dot{m}_1 :

$$\dot{m}_1 = \frac{P_1}{q_1} = \frac{3129 \cdot 10^6}{1819 \cdot 10^3} = 1720 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} . \quad (31)$$

Tato naše vypočítaná hodnota odpovídá hodnotě ve schématu [10], kde je hmotnostní průtok na výstupu parogenerátoru roven $1720,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Hmotnostní tok odběru i určíme jako:

$$\dot{m}_i = \beta_i \cdot \dot{m}_1 \quad (32)$$

a uspořádám do tabulky (Tab. 1):

Název odběru	Poměrný odběr [-]	Hmotnostní tok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
SP	0,0878	151
P	0,0915	157
VTO	0,0757	130
TO	0,0432	74,3
NTO4	0,0703	121
NTO3	0,0272	46,8
NTO2	0,0274	47,2
NTO1	0,0293	50,4
TBN	0,0142	24,5

Tab. 1 - Výsledné poměrné odběry a hmotnostní toky

Výkon na hřídeli turbíny bez započítání mechanických ztrát stanovím z tepelného výkonu předávaného v parogenerátoru a termické účinnosti oběhu:

$$P_{mech} = P_1 \cdot \eta = 1101 \text{ MW} . \quad (33)$$

Elektrický výkon na svorkách alternátoru je při tomto jmenovitém výkonu dle technologického schématu [10] 1080 MW, rozdíl 21 MW (1,9 %) případně na nezapočítané ztráty potrubí a tepelných výměníků, mechanické ztráty turbíny a ztráty alternátoru.

5.4.1 Bez separátoru

Nyní určíme, jak se změní účinnost celého oběhu, pokud by nebyl používán separátor a v přihříváči by byla přihřívána přímo mokrá pára bez odseparování vlhkosti. Odběr separátoru bude tedy nulový, rovnici (17) proto nahradím touto rovnicí:

$$\beta_{SP} = 0 \quad (34)$$

a v rovnici (18) nahradím hodnotu entalpie páry s odseparovanou vlhkostí h_4 hodnotou entalpie páry před separací h_3 , rovnice bude vypadat následovně:

$$\beta_P \cdot (h_2 - h_k(272,8 \text{ °C})) = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{NTO4} - \beta_{SP}) \cdot (h_5 - h_3) . \quad (35)$$

Dále vyřeším soustavu rovnic pro tyto dvě rovnice a rovnice (19) až (25), které zůstanou stejné. Nejvíce se změní velikost odběru přihříváče, z hodnoty 0,0915 na hodnotu 0,1928, což je více než dvojnásobek. Dále určíme podle rovnic (26) a (27) práci vykonanou turbínou. Dodané teplo q_1 se nezmění, podle rovnice (29) stanovím novou účinnost celého oběhu bez separátoru:

$$\eta_{bezSP} = \frac{a_{VT} + a_{NT}}{q_1} = 34,1 \% . \quad (36)$$

To je oproti hodnotě 35,2 % znatelný pokles, vyráběný výkon by tak byl nižší:

$$P_{bezSP} = \frac{\eta_{bezSP}}{\eta} P = 0,968 P . \quad (37)$$

Vyráběný výkon se tak sníží o 3,2 %.

5.4.2 Bez prvního nízkotlakého ohříváče

Pokud nebude funkční odběr páry z posledního odběru, nebude se ohřívát kondenzát v prvním regeneračním ohřevu NTO1 a jeho teplotní spád převezme druhý regenerační ohřev NTO2. Kdyby převzal NTO2 pouze část a zbylou část převzal NTO3, účinnost by se zhoršila ještě více, proto tuto možnost nebudu uvažovat. Pro výpočet účinnosti se změní rovnice (23), ve které místo počáteční entalpie kondenzátu h_9 musí být entalpie před NTO1 h_8 , tedy:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO2} \cdot (h_{04} - h_k(90 \text{ °C})) + (\beta_{NTO4} + \beta_{NTO3})(h_k(100 \text{ °C}) - h_k(90 \text{ °C})) = \\ = (1 - \beta_P - \beta_{VTO} - \beta_{TO} - \beta_{SP} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2})(h_{10} - h_8) . \end{aligned} \quad (38)$$

V rovnici (24) přímo určíme odběr do NTO1 jako nulový:

$$\beta_{NTO1} = 0 . \quad (39)$$

Vyřeším novou soustavu rovnic, ve které jsem rovnice (23) a (24) nahradil rovnicemi (38) a (39). Z hodnot poměrných odběrů se změní pouze odběr do NTO2, téměř se zdvojnásobí,

z 0,0274 na 0,0545. Opět podle rovnic (26) a (27) určím práci vykonanou turbínou a nová účinnost podle (29) bude rovna:

$$\eta_{bezNTO1} = \frac{a_{VT} + a_{NT}}{q_1} = 35 \% . \quad (40)$$

Tento pokles je způsoben jen menším průtokem předposledním stupněm nízkotlakého dílu turbíny, proto není moc vysoký. Vyráběný výkon se změní následovně:

$$P_{bezNTO1} = \frac{\eta_{bezNTO1}}{\eta} P = 0,994 P , \quad (41)$$

poklesne tedy o 0,6 %.

6 Mělník III

Provoz Elektrárny Mělník I byl zahájen již v roce 1960 a postupně byla celá elektrárna rozšířena o technologické celky Mělník II (zprovozněno 1971) a Mělník III (zprovozněno 1981). Elektrárna Mělník I byla přestavěna v osmdesátých letech na teplárnu, vytápějící Prahu, dva bloky Elektrárny Mělník II byly odstaveny a dva bloky 220 MW jsou po rekonstrukci v provozu. Elektrárna Mělník III je jednobloková s projektovaným výkonem 500 MW, což je největší uhelný blok v České republice do zprovoznění nového zdroje v Ledvicích [7]. 500MW blokem elektrárny Mělník III se budu zabývat dále.

6.1 Princip funkce

V klasické tepelné elektrárně vzniká tepelná energie na rozdíl od jaderné elektrárny z chemické energie uložené v palivu (nejčastěji uhlí) a přeměna probíhá při hoření v kotli elektrárny. Zde je energie ve výparníku předávána vodě, která se zde odpařuje, a v přehříváku a přihříváku páře, která se zde přehřívá (v přihříváku už při nižším tlaku po průchodu vysokotlakým dílem turbíny).

Následným tepelným oběhem mezi kotlem a turbínou se budu zabývat podrobněji. Turbína stejně jako v jaderné elektrárně předává mechanickou energii alternátoru a elektrická energie je vyváděna přes blokový transformátor [5, s. 25].

6.2 Tepelný oběh

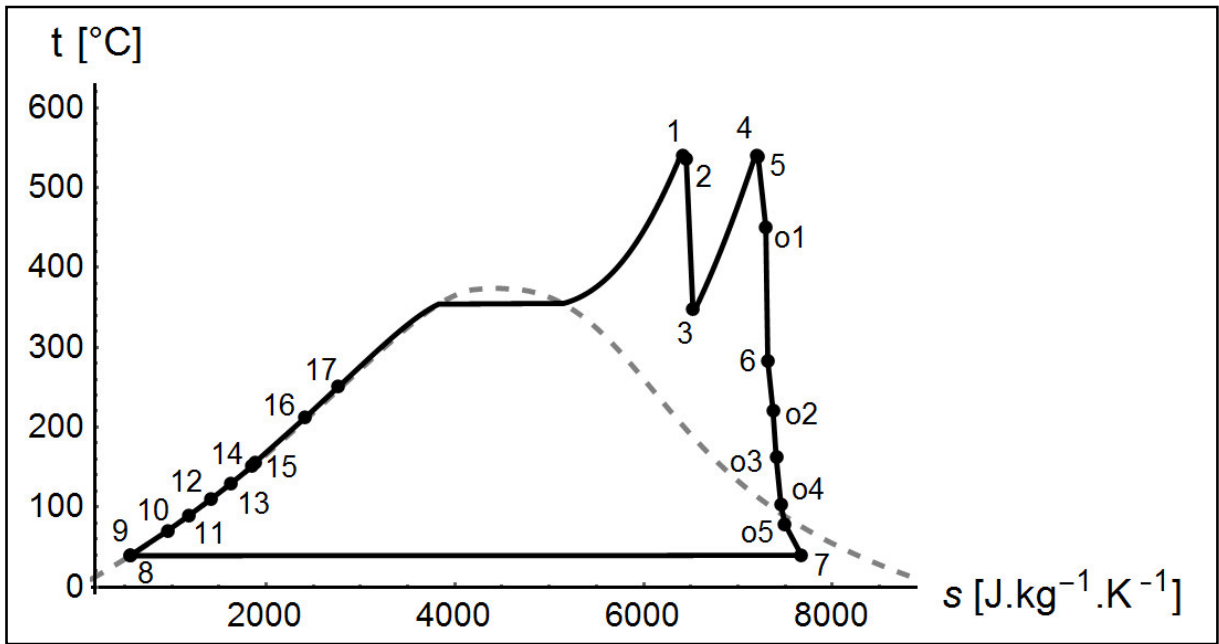
Tepelný oběh v tepelných elektrárnách se obecně příliš neliší od oběhu v tlakovodních jaderných elektrárnách. Největší rozdíl je v dosažení vyšších teplot a tlaků a možnost zavést páru zpět do kotle kvůli přihřívání. Realizací přihřívání stále ještě přehřáté páry přímo v kotli a ne z odběru odpadáva potřeba separovat vlhkost. Po přihřátí směřuje pára do středotlakého dílu a z něj už bez přihřívání páry do dvou stejných nízkotlakých dílů turbíny.

Právě z důvodu dosažení vyššího tlaku jsou v tepelných elektrárnách zpravidla používány třístupňové turbíny. Vysokotlaký díl turbíny byl v elektrárně původně dvouproudý, kvůli provozním problémům byl nahrazen jednoproudým dílem. Z odběrů páry z turbíny je opět napájecí voda v regeneračních ohříváčích ohřívána.

Zjednodušené schéma tepelného oběhu obsahující nejdůležitější zařízení a potrubí se nachází v Příloze 3.

6.3 T-s diagram

Z parametrů páry obsažených v tabulce (Příloha 4) vytvořím T-s diagram elektrárny Mělník III (Graf 4).



Graf 4 – T-s diagram elektrárny Mělník III

6.4 Výpočet

Sestavím bilanční rovnici nejprve pro druhý vysokotlaký ohřivač (VTO2):

$$\beta_{VTO2} \cdot (h_3 - h_k(216,8 \text{ °C})) = 1 \cdot (h_{17} - h_{16}) \quad (42)$$

a pro první vysokotlaký ohřivač (VTO1):

$$\begin{aligned} \beta_{VTO1} \cdot (h_{o1} - h_k(160,7 \text{ °C})) + \beta_{VTO2} \cdot (h_k(216,8 \text{ °C}) - h_k(160,7 \text{ °C})) = \\ = 1 \cdot (h_{16} - h_{15}). \end{aligned} \quad (43)$$

Dále sestavím bilanční rovnice pro termický odplyňovač (TO):

$$\begin{aligned} \beta_{TO} \cdot (h_6 - h_{14}) + (\beta_{VTO2} + \beta_{VTO1}) \cdot (h_k(160,7 \text{ °C}) - h_{14}) = \\ = (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO}) \cdot (h_{14} - h_{13}) \end{aligned} \quad (44)$$

a pro nízkotlaké ohřivače, ve kterých bude teplota vystupujícího odběru pouze o 5 °C vyšší než teplota vstupujícího kondenzátu. Pro NTO4:

$$\beta_{NTO4} \cdot (h_{o2} - h_k(115,2 \text{ °C})) = (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO}) \cdot (h_{13} - h_{12}), \quad (45)$$

pro NTO3:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO3} \cdot (h_{o3} - h_k(94,5 \text{ °C})) + \beta_{NTO4} \cdot (h_k(115,2 \text{ °C}) - h_k(94,5 \text{ °C})) = \\ = (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO}) \cdot (h_{12} - h_{11}), \end{aligned} \quad (46)$$

pro NTO2:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO2} \cdot (h_{o4} - h_{11}) + (\beta_{NTO4} + \beta_{NTO3}) \cdot (h_k(94,5 \text{ °C}) - h_{11}) = \\ = (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2}) \cdot (h_{11} - h_{10}) \end{aligned} \quad (47)$$

a pro NTO1:

$$\begin{aligned} & \beta_{NTO1} \cdot (h_{o5} - h_k(49 \text{ }^\circ\text{C})) + \beta_{ohřev} \cdot (h_k(109 \text{ }^\circ\text{C}) - h_k(49 \text{ }^\circ\text{C})) = \\ & = (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2}) \cdot (h_{10} - h_9). \end{aligned} \quad (48)$$

Také sestavím rovnici pro turbonapáječku TBN, účinnost této turbonapáječky v elektrárně Mělník je horší než v elektrárně Temelín, přibližně 75 %:

$$0,75 \cdot \beta_{TBN} \cdot (h_6 - h_7) = \frac{p_{15} - p_{14}}{\rho_{14}}. \quad (49)$$

Hustotu čerpané látky lze opět považovat za konstantní a dle tabulek [4] rovnou $\rho_{14} = 901 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Navíc je v tepelné elektrárně nutné přihřívát vzduch vstupující do kotle kvůli rosnému bodu spalin. Stanovit velikost poměrného odběru páry pro ohřev vzduchu je relativně komplikované, použiji tedy známou jmenovitou hodnotu hmotnostního průtoku odebírané páry vztáženou k jmenovité hodnotě celkového hmotnostního průtoku:

$$\beta_{ohřev} = \frac{\dot{m}_{ohřev}}{\dot{m}_{celk}} = \frac{8,11}{431,6}. \quad (50)$$

Vyřešením soustavy všech těchto rovnic opět dostanu poměrné odběry páry do jednotlivých zařízení, výsledek zapíši do tabulky (Tab. 2). Dále určím práci vykonanou oběhem jednoho kilogramu látky jako součet všech dílčích prací vykonaných párou mezi jednotlivými odběry. Výpočet rozdělím na práci vykonanou vysokotlakým, středotlakým a nízkotlakým dílem:

$$a_{VT} = 1 \cdot (h_2 - h_3), \quad (51)$$

$$\begin{aligned} a_{ST} = & (1 - \beta_{VTO2}) \cdot (h_5 - h_{o1}) + \\ & (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1}) \cdot (h_{o1} - h_6), \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} a_{NT} = & (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO} - \beta_{TBN} - \beta_{ohřev}) \cdot (h_6 - h_{o2}) + \\ & (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO} - \beta_{TBN} - \beta_{ohřev} - \beta_{NTO4}) \cdot (h_{o2} - h_{o3}) + \\ & (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO} - \beta_{TBN} - \beta_{ohřev} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3}) \cdot \\ & \cdot (h_{o3} - h_{o4}) + \\ & (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO} - \beta_{TBN} - \beta_{ohřev} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2}) \cdot \\ & \cdot (h_{o4} - h_{o5}) + \\ & (1 - \beta_{VTO2} - \beta_{VTO1} - \beta_{TO} - \beta_{TBN} - \beta_{ohřev} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2} - \\ & - \beta_{NTO1}) \cdot (h_{o5} - h_7). \end{aligned} \quad (53)$$

Dodané měrné teplo q_1 je rovno:

$$q_1 = 1 \cdot (h_1 - h_{17}) + (1 - \beta_{VTO2}) \cdot (h_4 - h_3). \quad (54)$$

Výslednou účinnost určím jako poměr mezi vykonanou prací a dodaným teplem:

$$\eta = \frac{a_{VT} + a_{ST} + a_{NT}}{q_1} = 43,8 \%. \quad (55)$$

Maximální účinnost tohoto tepelného oběhu mezi teplotami $t_2 = 38,9 \text{ }^\circ\text{C}$ a $t_1 = 540,8 \text{ }^\circ\text{C}$ je:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 61,7 \% . \quad (56)$$

Tento tepelný oběh tak dosahuje 71 % maximální možné účinnosti.

Podle jmenovitého tepelného výkonu kotle 1195 MW určím jmenovitý hmotnostní tok páry \dot{m}_1 :

$$\dot{m}_1 = \frac{P_1}{q_1} = \frac{1195 \cdot 10^6}{1819 \cdot 10^3} = 436,4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} . \quad (57)$$

Tato hodnota odpovídá hodnotě jmenovitého průtoku páry 435,3 kg.s⁻¹ z technologického schématu elektrárny [11]. Podle vypočítaného jmenovitého hmotnostního toku určím opět i jmenovité průtoky odběrů (Tab. 2):

Název odběru	Poměrný odběr [-]	Hmotnostní tok [kg·s ⁻¹]
VTO2	0,0821	35,8
VTO1	0,0829	36,2
TO	0,0281	12,3
NTO4	0,0276	12
NTO3	0,0284	12,4
NTO2	0,0249	10,9
NTO1	0,0377	16,5
TBN	0,0451	19,7
ohřev	0,0186	8,13

Tab. 2 - Výsledné poměrné odběry a hmotnostní toky

Výkon na hřídeli turbíny bez mechanických ztrát určím z tepelného výkonu předávaného v kotli a termické účinnosti oběhu:

$$P_{mech} = P_1 \cdot \eta = 523,4 \text{ MW} \quad (58)$$

Elektrický výkon na svorkách alternátoru je při tomto jmenovitém výkonu dle technologického schématu [11] 500 MW, rozdíl 23,4 MW (4,4 %) je vyšší, než v Jaderné elektrárně Temelín. To bude způsobeno použitím vyšších teplot a tlaků, což povede k vyšším ztrátám, a také starší technologií s nižším výkonem, u které bývají ztráty zpravidla vyšší. Také poskytnutá dokumentace této elektrárny je nejstarší a nemusí být tak dostatečně přesná.

6.4.1 Bez turbonapáječky

Nyní určím účinnost, pokud by nebyla využívána turbonapáječka a veškerou její práci vykonávala elektronapáječka. Změní se proto pouze rovnice pro turbonapáječku (49), ve které pevně stanovím odběr turbonapáječky jako nulový:

$$\beta_{TBN} = 0 . \quad (59)$$

Soustavu rovnic zde znovu řešit nemusím, změní se pouze dle (59) odběr turbonapáječky na nulový. Zvýší se však práce vykonaná nízkotlakým dílem turbíny, protože skrz něj bude protékat hmotnostní tok vyšší o původní odběr turbonapáječky. Proto je nutné přepočítat rovnici (53) s novou hodnotou β_{TBN} . Od vykonané práce turbínou musím ale odečíst práci vykonanou elektronapáječkou, při účinnosti přeměny energie vyráběné turbínou na elektrickou a zpět na mechanickou 90 %, bude rovnice pro elektronapáječku následující:

$$a_{ELN} = \frac{p_{15} - p_{14}}{q_{14}} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1}{0,9}, \quad (60)$$

Novou účinnost oběhu určíme podle:

$$\eta_{bezTBN} = \frac{a_{VT} + a_{ST} + a_{NT} - a_{ELN}}{q_1} = 43,7 \%. \quad (61)$$

To není příliš velký rozdíl, vyráběný výkon (s odečtením spotřebovaného výkonu elektronapáječkou) se změní takto:

$$P_{bezTBN} = \frac{\eta_{bezTBN}}{\eta} P = 0,997 P, \quad (62)$$

což je pokles o 0,3 %.

6.4.2 Bez prvního vysokotlakého ohřevu

Pokud nebude funkční odběr páry ze středotlakého dílu směřující do prvního vysokotlakého ohřevu, musí jeho teplotní spád převzít následující druhý vysokotlaký regenerační ohřev VTO2. Pro výpočet účinnosti se změní rovnice (42), ve které místo počáteční entalpie kondenzátu h_{16} bude entalpie před VTO1 h_{15} , tím se změní také teplota kondenzátu odběru:

$$\beta_{VTO2} \cdot (h_3 - h_k(160,7^\circ\text{C})) = 1 \cdot (h_{17} - h_{15}). \quad (63)$$

V rovnici (43) přímo určím odběr směřující do VTO1 jako nulový:

$$\beta_{VTO1} = 0. \quad (64)$$

Vypočítám znovu soustavu rovnic, s rovnicemi (63) a (64) místo rovnic (42) a (43). Z hodnot poměrných odběrů se nejvíce změní odběr do VTO2, z 0,0821 na 0,174. Opět podle rovnic (51), (52) a (53) určím práci vykonanou turbínou, nová účinnost podle (55) bude rovna:

$$\eta_{bezVTO1} = \frac{a_{VT} + a_{ST} + a_{NT}}{q_1} = 43,6 \%. \quad (65)$$

Pokles je způsoben větším prvním odběrem, proto se zmenší práce vykonaná dalšími částmi turbíny. Celkový výkon se změní takto:

$$P_{bezVTO1} = \frac{\eta_{bezVTO1}}{\eta} P = 0,995 P, \quad (66)$$

poklesne o 0,5 %.

7 Nový zdroj Ledvice

V lokalitě Ledvic vedle povrchového dolu Bílina byly postaveny první bloky uhelné elektrárny v letech 1966 – 1969. V roce 2008 zde byla zahájena stavba nového moderního bloku o výkonu 660 MW s nadkritickými parametry páry. Budova kotelny je svou výškou 150 m nejvyšší budovou v České republice [9]. Stavba měla být dokončena v roce 2012, kvůli problémům s kvalitou oceli kotle je blok uváděn do provozu až nyní. V současnosti se řeší problém s odvodem strusky z kotle, která v něm vzniká ve větším množství kvůli špatné kvalitě spalovaného uhlí.

Nový zdroj pracuje s párou nadkritických parametrů, čímž je vylepšena účinnost oproti starším blokům. Spaliny nového bloku jsou zbavovány jak prachových částic, tak škodlivých chemických látek, takže blok splňuje stále se zpřísňující požadavky na šetrnost k životnímu prostředí [6].

7.1 Princip funkce

Tepelná elektrárna využívající nadkritické parametry páry je nejmodernějším typem tepelné elektrárny. Oproti klasické tepelné elektrárně je zde dosahováno vyšších teplot při vyšších tlacích, základní princip funkce je obdobný. To vede k zvýšení účinnosti a ekonomičnosti provozu, použitá technologie a zařízení jsou však dražší [6].

7.2 Tepelný oběh

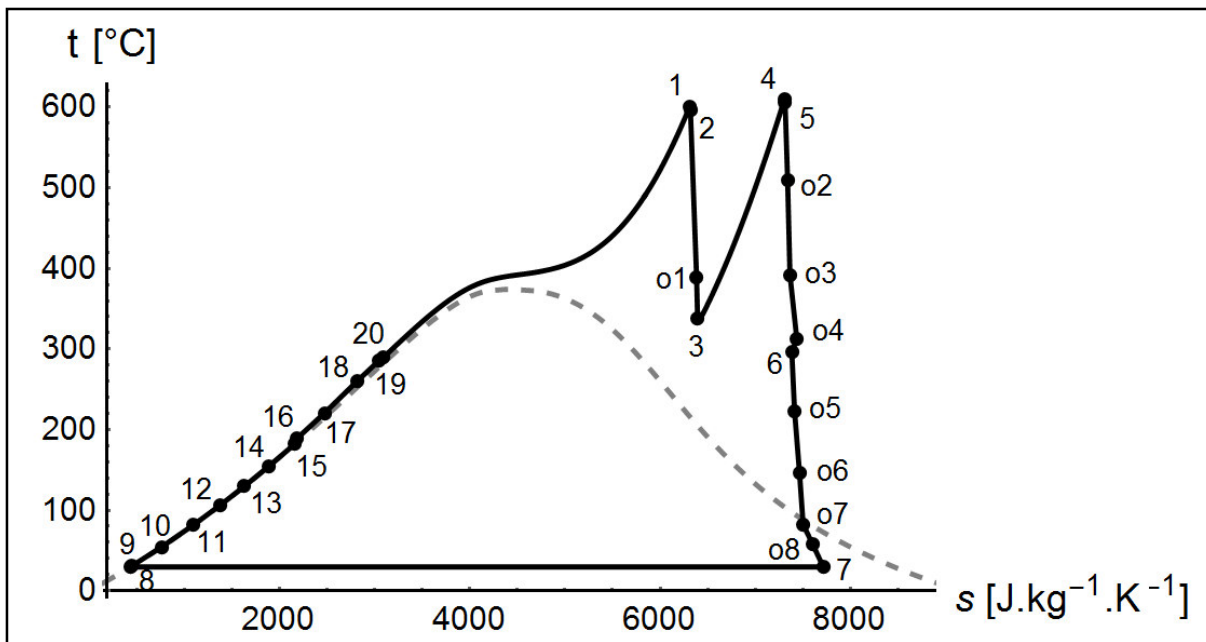
Nadkritická tepelná elektrárna využívá oproti klasické vyšší parametry páry, jinak se tepelný oběh v elektrárně nový zdroj Ledvice nebude příliš od tepelného oběhu v elektrárně Mělník III lišit. Je zde zařazeno více regeneračních ohřevů pro lepší rozložení tepelného spádu. Spalinové teplo je navíc využíváno k ohřevu kondenzátu v nízkotlaké regeneraci, tento další tepelný výměník se označuje jako EKO GAVO. Odběr páry pro vysokotlaký regenerační ohřev je zde realizován i z vysokotlakého dílu.

Turbonapáječka z důvodu vysokých nákladů a malého zvýšení účinnosti není instalována, je zde použita elektronapáječka využívající vyráběnou elektrickou energii. Vysokotlaký díl turbíny je jednoproudý, nízkotlaké díly jsou dva stejné, stejně jako v elektrárně Mělník III.

Zjednodušené schéma tepelného oběhu elektrárny nový zdroj Ledvice se nachází v Příloze 5.

7.3 T-s diagram

Stejně jako v předchozích kapitolách vytvořím T-s diagram (Graf 5) z parametrů páry v tabulce (Příloha 6).



Graf 5 – T-s diagram elektrárny Ledvice

7.4 Výpočet

Podle zjednodušeného schématu (Příloha 5) sestavím bilanční rovnice, nejprve pro vysokotlaké ohříváče.

Ve čtvrtém vysokotlakém ohříváči (VTO4) nedochází k úplné kondenzaci odebírané páry, ale pouze k předání části tohoto tepla. Entalpie zde klesne na předem neznámou hodnotu h_x a zcela nez kondenzovaná pára pokračuje do prvního vysokotlakého ohříváče (VTO1), kde předá zbytek tepla. Zde dojde k dalšímu poklesu entalpie na hodnotu entalpie kondenzátu o teplotě o 10 °C vyšší, než je teplota přiváděné ohřívávané vody, stejně jako v ostatních vysokotlakých ohřevcích. Do VTO4 směřuje odběr ze středotlakého dílu, který je označen jako druhý, první odběr, který je z vysokotlakého dílu, směřuje do VTO3.

Bilanční rovnice pro VTO4:

$$\beta_{VTO4} \cdot (h_{o2} - h_x) = 1 \cdot (h_{20} - h_{19}), \quad (67)$$

pro VTO3:

$$\beta_{VTO3} \cdot (h_{o1} - h_k(269,9 \text{ °C})) = 1 \cdot (h_{19} - h_{18}), \quad (68)$$

pro VTO2:

$$\begin{aligned} \beta_{VTO2} \cdot (h_3 - h_k(230,5 \text{ °C})) + \beta_{VTO3} \cdot (h_k(269,9 \text{ °C}) - h_k(230,5 \text{ °C})) = \\ = 1 \cdot (h_{18} - h_{17}) \end{aligned} \quad (69)$$

a pro VTO1:

$$\begin{aligned} \beta_{VTO4} \cdot (h_x - h_k(198,6 \text{ °C})) + (\beta_{VTO3} + \beta_{VTO2}) \cdot \\ \cdot (h_k(230,5 \text{ °C}) - h_k(198,6 \text{ °C})) = 1 \cdot (h_{17} - h_{16}). \end{aligned} \quad (70)$$

Bilanční rovnice pro termický odplyňovač (TO):

$$\begin{aligned} \beta_{TO} \cdot (h_{o3} - h_{15}) + (\beta_{VTO4} + \beta_{VTO3} + \beta_{VTO2}) \cdot (h_k(198,6 \text{ }^\circ\text{C}) - h_{15}) = \\ = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO}) \cdot (h_{15} - h_{14}). \end{aligned} \quad (71)$$

Dále sestavím rovnice pro nízkotlaké ohřivače. V nich bude teplota vystupujícího odběru pouze o 5 °C vyšší než teplota vstupujícího kondenzátu. Pro NTO5:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO5} \cdot (h_{o4} - h_k(134,7 \text{ }^\circ\text{C})) = \\ = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO}) \cdot (h_{14} - h_{13}), \end{aligned} \quad (72)$$

pro NTO4:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO4} \cdot (h_{o5} - h_k(111,2 \text{ }^\circ\text{C})) + \beta_{NTO5} \cdot (h_k(134,7 \text{ }^\circ\text{C}) - h_k(111,2 \text{ }^\circ\text{C})) = \\ = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO}) \cdot (h_{13} - h_{12}), \end{aligned} \quad (73)$$

pro NTO3:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO3} \cdot (h_{o6} - h_{12}) + (\beta_{NTO5} + \beta_{NTO4}) \cdot (h_k(111,2 \text{ }^\circ\text{C}) - h_{12}) = \\ = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{EKOGAVO}) \cdot \\ \cdot (h_{12} - h_{11}), \end{aligned} \quad (74)$$

pro NTO2:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO2} \cdot (h_{o7} - h_k(59,3 \text{ }^\circ\text{C})) = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \\ - \beta_{NTO5} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{EKOGAVO}) \cdot (h_{11} - h_{10}) \end{aligned} \quad (75)$$

a pro NTO1:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO1} \cdot (h_{o8} - h_{10}) + \beta_{NTO2} \cdot (h_k(59,3 \text{ }^\circ\text{C}) - h_{10}) = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \\ - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{EKOGAVO}) \cdot (h_{10} - h_9). \end{aligned} \quad (76)$$

Velikost odběru (EKOGAVO) překlenujícího NTO3 a NTO2, který využívá na ohřev kondenzátu spalínové teplo, se nedá určit jednoduchou bilanční rovnicí. Pro jeho stanovení využiji hodnotu jmenovitého průtoku odběrem vztaženou k jmenovitému celkovému průtoku z technologického schématu [12]:

$$\beta_{EKOGAVO} = \frac{\dot{m}_{EKOGAVO}}{\dot{m}_{celk}} = \frac{165}{464,5}. \quad (77)$$

Ohřev vzduchu vstupujícího do kotle není ve schématu této elektrárny vyznačen, je tedy realizován jinak mimo tento tepelný oběh. Turbonapáječka není v této elektrárně instalována. Dosazením a vyřešením soustavy těchto rovnic získám hodnotu $h_x = 3043 \text{ kJ.kg}^{-1}$ a poměrné hodnoty všech odběrů (Tab. 3).

Práce vykonaná místo turbonapáječky elektronapáječkou však není zanedbatelná. Při výpočtu účinnosti proto odečtu tuto práci od vykonané práce turbínou. Měrnou práci elektronapáječky určím jako podíl rozdílu tlaků a hustoty, kterou opět považuji za konstantní a rovnu $\rho_{15} = 883 \text{ kg.m}^{-3}$. Při účinnosti čerpání tohoto čerpadla rovné přibližně 80 % (zahrnuje i ztráty způsobené přeměnou na elektrickou energii a zpět na mechanickou) určím měrnou práci elektronapáječky podle:

$$a_{ELN} = \frac{p_{16} - p_{15}}{q_{15}} \cdot \frac{1}{0,8}. \quad (78)$$

Měrnou práci turbíny rozdělím opět na jednotlivé díly a vypočítám dílčí práce jednotlivých úseků mezi odběry:

$$a_{VT} = 1 \cdot (h_2 - h_{o1}) + (1 - \beta_{VTO3}) \cdot (h_{o1} - h_3), \quad (79)$$

$$a_{ST} = (1 - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2}) \cdot (h_4 - h_{o2}) + (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2}) \cdot (h_{o2} - h_{o3}) + (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO}) \cdot (h_{o3} - h_{o4}) + (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5}) \cdot (h_{o4} - h_6), \quad (80)$$

$$a_{NT} = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5}) \cdot (h_6 - h_{o5}) + (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5} - \beta_{NTO4}) \cdot (h_{o5} - h_{o6}) + (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3}) \cdot (h_{o6} - h_{o7}) + (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2}) \cdot (h_{o7} - h_{o8}) + (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO} - \beta_{NTO5} - \beta_{NTO4} - \beta_{NTO3} - \beta_{NTO2} - \beta_{NTO1}) \cdot (h_{o7} - h_{o8}). \quad (81)$$

Dodané měrné teplo q_1 je rovno:

$$q_1 = 1 \cdot (h_1 - h_{20}) + (1 - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2}) \cdot (h_4 - h_3) + \beta_{EKOGAVO} \cdot (h_{12} - h_{10}). \quad (82)$$

Výslednou účinnost opět stanovím podle:

$$\eta = \frac{a_{VT} + a_{ST} + a_{NT} - a_{ELN}}{q_1} = 49,5 \%. \quad (83)$$

Maximální účinnost oběhu mezi odpovídajícími teplotami $t_2 = 29,6 \text{ }^\circ\text{C}$ a $t_1 = 610 \text{ }^\circ\text{C}$ je:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 65,7 \%. \quad (84)$$

Tento tepelný oběh tak dosahuje 75,3 % maximální možné účinnosti.

Pro určení jmenovitého hmotnostního toku páry potřebuji znát teplo předávané v kotli bez tepla předávaného v nízkotlaké regeneraci (EKOGAVO):

$$q_{bezEKOGAVO} = 1 \cdot (h_1 - h_{20}) + (1 - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2}) \cdot (h_4 - h_3). \quad (85)$$

Ze jmenovitého tepelného výkonu kotle 1286 MW nyní určím jmenovitý hmotnostní tok páry \dot{m}_1 :

$$\dot{m}_1 = \frac{P_1}{q_{bezEKOGAVO}} = \frac{1286 \cdot 10^6}{2759 \cdot 10^3} = 466 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (86)$$

kteřý odpovídá hodnotě jmenovitého průtoku páry $464,5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ z technologického schématu elektrárny [12]. Podle vypočítaného hmotnostního toku \dot{m}_1 stanovím jmenovité průtoky odběrů (Tab. 3):

Název odběru	Poměrný odběr [-]	Hmotnostní tok [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
VTO4	0,0536	25
VTO3	0,0614	28,6
VTO2	0,0810	37,7
TO	0,0316	14,7
NTO5	0,0328	15,3
NTO4	0,0301	14
NTO3	0,0145	6,74
NTO2	0,0165	7,68
NTO1	0,0284	13,2
EKOGAVO	0,355	165

Tab. 3 - Výsledné poměrné odběry a hmotnostní toky

Výkon na hřídeli turbíny bez zahrnutí mechanických ztrát určím z měrné práce vykonané turbínou a jmenovitého hmotnostního toku:

$$P_{mech} = (a_{VT} + a_{ST} + a_{NT}) \cdot \dot{m}_1 = 675,6 \text{ MW} . \quad (87)$$

U tohoto oběhu není možné použít výpočet pomocí účinností, protože ta je snížena prací elektronapáječky. Její spotřebovaný výkon je však odebírán až z vyrobené elektrické energie turboalternátorem až za turbínou. Podle technologického schématu [12] je jmenovitý elektrický výkon 660 MW, rozdíl 15,6 MW (2,3 %) opět připadne na nezapočítané ztráty potrubí a tepelných výměníků, mechanické ztráty turbíny a ztráty alternátoru.

7.4.1 Bez využití tepla spalin EKOGAVO

Zde se podívám, jak se změní účinnost, pokud by nebylo využito teplo spalin v nízkotlaké regeneraci (EKOGAVO). Změním pouze rovnici (77), ve které stanovíme odběr EKOGAVO jako nulový:

$$\beta_{EKOGAVO} = 0 \quad (88)$$

a vyřeším znovu soustavu rovnic s rovnicí (88) místo rovnice (77). Zvýší se poměrné odběry směřující do NTO2 (z 0,0165 na 0,033) a do NTO3 (z 0,0145 na 0,0295), protože musí ohřát i část kondenzátu, která byla ohřívána spalinami. Znovu určím práci vykonanou nízkotlakým dílem turbíny podle rovnice (81), která bude nově nižší. Pokud však nově stanovím i dodané teplo podle rovnice (82), tak z důvodu nulové hodnoty $\beta_{EKOGAVO}$ bude q_1 odpovídat hodnotě $q_{bezEKOGAVO}$ z rovnice (85). Výsledná účinnost bez využití EKOGAVO bude:

$$\eta_{bezEKOGAVO1} = \frac{a_{VT} + a_{ST} + a_{NT} - a_{ELN}}{q_{bezEKOGAVO}} = 50,4 \% . \quad (89)$$

Účinnost se tak zvýšila, což je způsobeno právě snížením dodaného tepla. Pokud teplo spalin budu považovat za dodané, ale nevyužité, použiji při výpočtu účinnosti hodnotu q_1 z výpočtu s využitím EKOGAVO:

$$\eta_{bezEKOGAVO2} = \frac{a_{VT} + a_{ST} + a_{NT} - a_{ELN}}{q_1} = 49,1 \% . \quad (90)$$

Nyní stanovím změnu výkonu elektrárny, s využitím rovnice (87) sestavím následující rovnici:

$$P_{bezEKOGAVO} = \frac{\eta_{bezEKOGAVO2}}{\eta} P = 0,992 P , \quad (91)$$

výkon bez využití tepla spalin poklesne o 0,8 %.

7.4.2 Bez čtvrtého nízkotlakého ohřevu

Bez funkčního prvního odběru páry z nízkotlakého dílu turbíny směřujícího do NTO4 převezme teplotní spád NTO5. Změní se tak rovnice (72) pro NTO5, ve které místo počáteční entalpie kondenzátu h_{13} musí být entalpie před NTO4 h_{12} a entalpie kondenzátu odběru při teplotě 111,2 °C:

$$\begin{aligned} \beta_{NTO5} \cdot (h_{o4} - h_k(111,2 \text{ °C})) = \\ = (1 - \beta_{VTO4} - \beta_{VTO3} - \beta_{VTO2} - \beta_{TO}) \cdot (h_{14} - h_{12}) . \end{aligned} \quad (92)$$

Rovnici (73) nahradím rovnicí, ve které určím odběr do NTO4 jako nulový:

$$\beta_{NTO4} = 0 . \quad (93)$$

Vypočítám novou soustavu rovnic, místo rovnic (72) a (73) vezmu rovnice (92) a (93). Největší rozdíl oproti předchozí hodnotě bude v hodnotě velikosti odběru NTO5, z 0,0328 na 0,0609. Mírně se také změní odběry do NTO3 a NTO2. Podle rovnic (79), (80) a (81) určím práci vykonanou turbínou, nová účinnost bude rovna:

$$\eta_{bezNTO4} = \frac{a_{VT} + a_{ST} + a_{NT} - a_{ELN}}{q_1} = 49,3 \% . \quad (1)$$

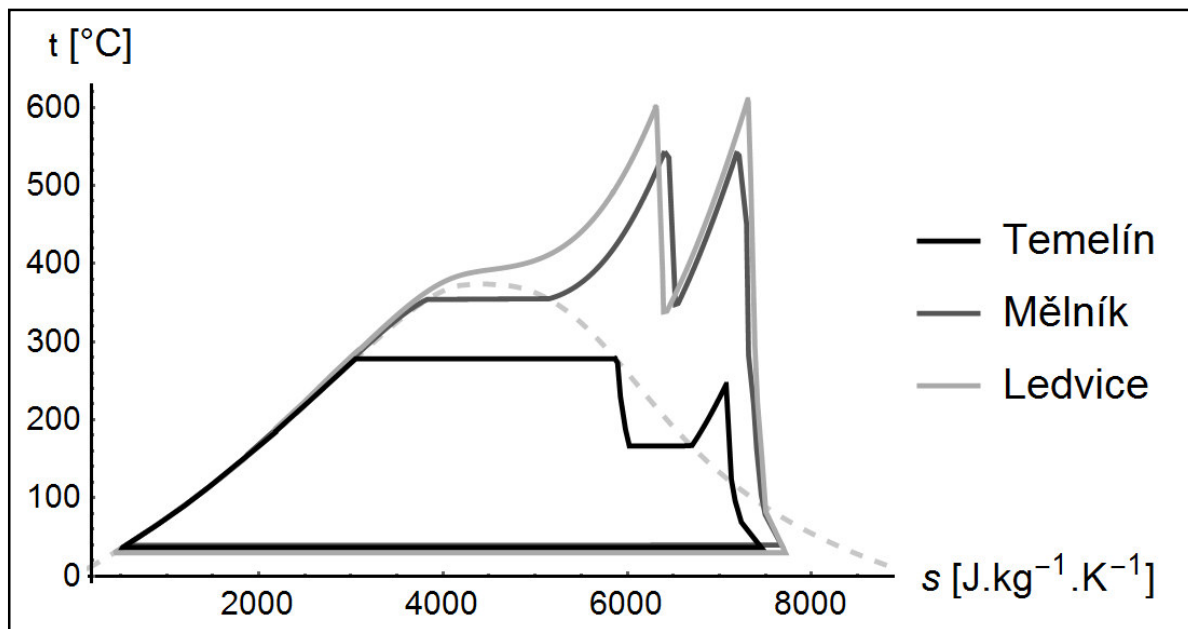
Tento pokles je opět způsoben menším hmotnostním tokem částí turbíny, tentokrát prvním stupněm nízkotlakého dílu. Vyráběný výkon se změní následovně:

$$P_{bezNTO4} = \frac{\eta_{bezNTO4}}{\eta} P = 0,997 P , \quad (2)$$

poklesne tedy o 0,3 %.

8 Srovnání

V této kapitole srovnám tepelné oběhy všech tří elektráren mezi sebou a porovnáím vliv výpadku jednotlivých zařízení na účinnost oběhu. Nejprve pro základní srovnání zobrazím v jednom grafu T-s diagramy elektráren:



Graf 6 – T-s diagramy všech elektráren

Z T-s diagramů elektráren v Grafu 6 není možné přímo porovnat účinnosti tepelných oběhů elektráren, protože jsou v oběhu zařazeny různé odběry a všechna pracovní látka tak nevykoná celý oběh. Lze však z Grafu 6 vidět, že tepelný oběh Temelína je nejrozdílnější, je zde dosahováno mnohem nižších teplot a nedochází zde v parogenerátoru k přehřívání páry, což je omezení dané technologií tlakovodních reaktorů. Diagramy elektráren Mělník a Ledvice jsou si podobné, Ledvice jsou však novější a je zde tak dosahováno vyšších teplot a vyšších tlaků pro dosažení vyšší účinnosti. Nový zdroj v Ledvicích je označován jako nadkritický, protože zde nedochází ke klasickému vypařování vody, ohřev probíhá při jejich nadkritických parametrech (nad mezní křivkou páry).

Pro srovnání termických účinností jednotlivých elektráren a vlivu výpadku zařízení na tuto účinnost umístím tyto hodnoty vypočítané v předchozí části do společné tabulky (Tab. 4). Tepelné elektrárny mají termickou účinnost vyšší, což je způsobeno zejména přiváděním tepla při vyšší teplotě a použitím vyšších tlaků. Elektrárna Ledvice využívá nadkritických parametrů páry, dosahuje se v ní nejvyšších teplot při nejvyšších tlacích, její účinnost je tak nejvyšší. S vyšším rozmezím teplot a tlaků také přibývá více regeneračních ohřevů pro rozložení teplotních spádů, napájecí voda je ohřívána na vyšší teplotu, což také zlepšuje účinnost. V tepelných elektrárnách se využívá navíc také středotlaký díl turbíny pro rozložení tlakového spádu.

Elektrárna	Termická účinnost [%]	Pokles výkonu [%]
Temelín	35,2	-
Temelín bez SP	34,1	3,2
Temelín bez NTO1	35	0,6
Mělník	43,8	-
Mělník bez TBN	43,7	0,3
Mělník bez VTO1	43,6	0,5
Ledvice	49,5	-
Ledvice bez EKOGAVO	49,1	0,8
Ledvice bez NTO4	49,3	0,3

Tab. 4 – Termické účinnosti elektráren a vliv výpadku vybraných zařízení

Z tabulky (Tab. 4) je také vidět, že největší vliv na účinnost z vybraných zařízení má v Temelíně použitý separátor, bez kterého by výstupní výkon klesl o 3,2 %. Větší vliv na účinnost v elektrárně Ledvice má vyžití spalinového tepla. Střední vliv na účinnost mají první nízkotlaké a vysokotlaké ohřevy. Další nízkotlaké ohřevy mají vliv na účinnost menší, stejně jako použití turbonapáječky.

9 Závěr

Cílem této práce bylo srovnat tepelné oběhy a účinnosti vybraných elektráren. Pro tento výpočet jsou nutné znalosti základů termodynamiky, které jsem shrnul v první části práce. K tomu jsem dodal potřebné informace k tepelným diagramům a jejich využití. Dále jsem se zabýval už pouze Rankin-Clausiovým oběhem s vodou jako pracovní látkou, který je využíván v jaderných a tepelných elektrárnách.

Účinnost tohoto oběhu však není vysoká, proto se vylepšuje pomocí různých metod, mezi které patří zvyšování rozmezí pracovních teplot, přihřívání páry a regenerační ohřev kondenzátu (Carnotizace). Tato vylepšení komplikují výpočet účinnosti, proto jsme si představili základní metodu, ve které se sestavují energetické bilance použitých tepelných výměníků. Teoretickou část jsem uzavřel popisem dalších důležitých zařízení, která se v tepelných obězích elektráren vyskytují.

V praktické části práce jsem se věnoval Jaderné elektrárně Temelín, elektrárně Mělník III a nový zdroj Ledvice. Nejprve jsem vysvětlil základní principy funkce těchto elektráren, poté jsem řešil jejich tepelné oběhy. Sestavil jsem zjednodušená tepelná schémata (Přílohy 1,3,5) s parametry páry v jednotlivých místech (Přílohy 2,4,6) dle projektových technologických schémat [10, 11, 12], do kterých jsem z parních tabulek doplnil hodnoty entropie.

Následně jsem vypočítal poměrné odběry ze sestavených rovnic. Poměr vykonané měrné práce a přivedeného měrného tepla určuje termickou účinnost elektráren, hodnoty těchto účinností jsem pro srovnání zapsal do tabulky (Tab. 4). Do této tabulky jsem doplnil i účinnosti elektráren a pokles výkonu při výpadku vybraných zařízení.

Na závěr jsem pro jednotlivé elektrárny stanovil ze známých tepelných výkonů jmenovité hodnoty průtoků páry oběhem a výkony vyráběné turbínou. Jmenovité hodnoty průtoků vždy téměř přesně odpovídaly hodnotám z technologických schémat elektráren, vyráběné výkony byly vždy o několik procent vyšší, protože byl určován výkon vyráběný turbínou, do kterého nebyly započteny mechanické a elektrické ztráty turbíny a alternátoru. Díky zanedbání malých ztrát v potrubích a tepelných výměnících se výpočet značně zjednodušil, výsledky jsou však i přesto odpovídající, použitá metoda se osvědčila.

K řešení soustavy rovnic a dalším výpočtům jsem použil program Mathematica. Díky sestavení rovnic v programu jsem mohl výpočet vždy lehce upravit a určit vliv výpadku vybraných zařízení, použití takového výpočetního nástroje se v tomto případě vyplatilo.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HEJZLAR, Radko. *Termodynamika*. Dot. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998, 166 s. ISBN 80-01-01127-5.
- [2] *Sborník přednášek pro LETNÍ UNIVERZITU*. Jaderná elektrárna Temelín, 16. 7. 2015 [cit. 2015-12-07].
- [3] Temelín. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2015 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete.html
- [4] Parní tabulky. *Euromatic* [online]. Praha: Euromatic, 2013 [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: www.euromatic.cz/index_cz.htm
- [5] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [6] ŠKODA PRAHA INVEST. *NOVÝ 660MWe BLOK S NADKRITICKÝMI PARAMETRY PÁRY V ELEKTRÁRNĚ LEDVICE*. 2011 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: www.skodapraha.cz/files/PP-Ledvice-cz.pdf
- [7] Elektrárna Mělník. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/melnik.html
- [8] WOLFRAM RESEARCH, INC. *Mathematica 10.0.1* [software], 2016. Dostupné z: www.wolfram.com/mathematica/pricing/
- [9] Elektrárna Ledvice. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2016 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/ledvice.html
- [10] Technologické schéma Jaderné elektrárny Temelín. *Škoda Power*, 23. 9. 2009.
- [11] Technologické schéma elektrárny Mělník III. *Elektrárna Mělník*, 15. 9. 1998.
- [12] Technologické schéma elektrárny Nový zdroj Ledvice. *Škoda Power*, 5. 3. 2009.
- [13] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. Praha: SNTL, 1984, 608 s.
- [14] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Státní energetická koncepce*. Praha, 2014, 145 s.

Seznam použitých zkratk

EKOGAVO – tepelný výměník využívající spalinové teplo

ELN – elektronapáječka

G – generátor (alternátor)

HK – hlavní kondenzátor

K – kotel

KČ – kondenzátní čerpadlo

K-TBN – kondenzátor turbonapáječky

NT – nízkotlaký díl turbíny

NTO – nízkotlaký ohřev

OHŘ – ohřev vzduchu

P – přehříváč

PG – parogenerátor

PŘI – přehřívání páry

SP – separátor

ST – středotlaký díl turbíny

TBN – turbonapáječka

TO – termický odplyňovač

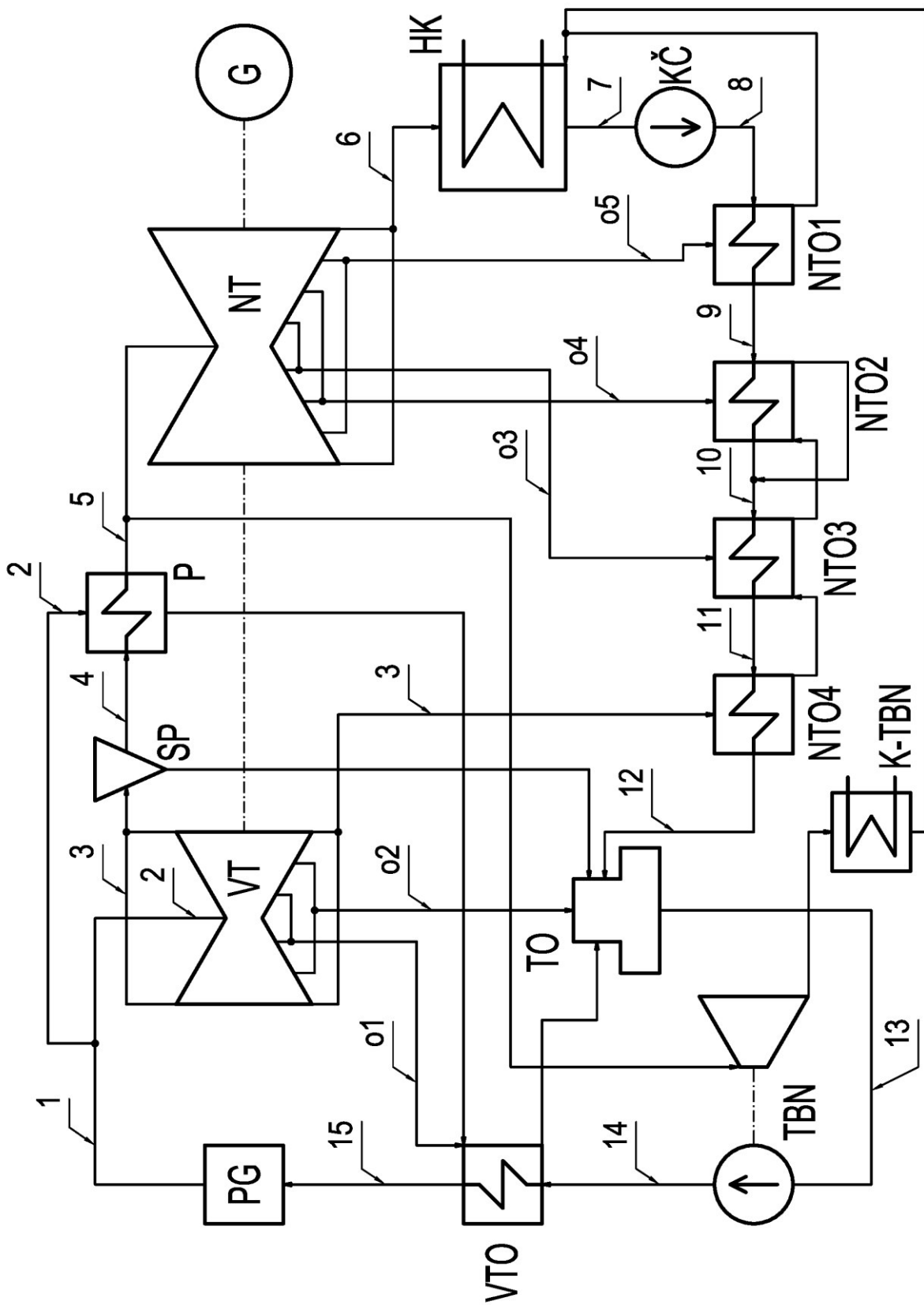
VT – vysokotlaký díl turbíny

VTO – vysokotlaký ohřev

Přílohy

Seznam příloh:

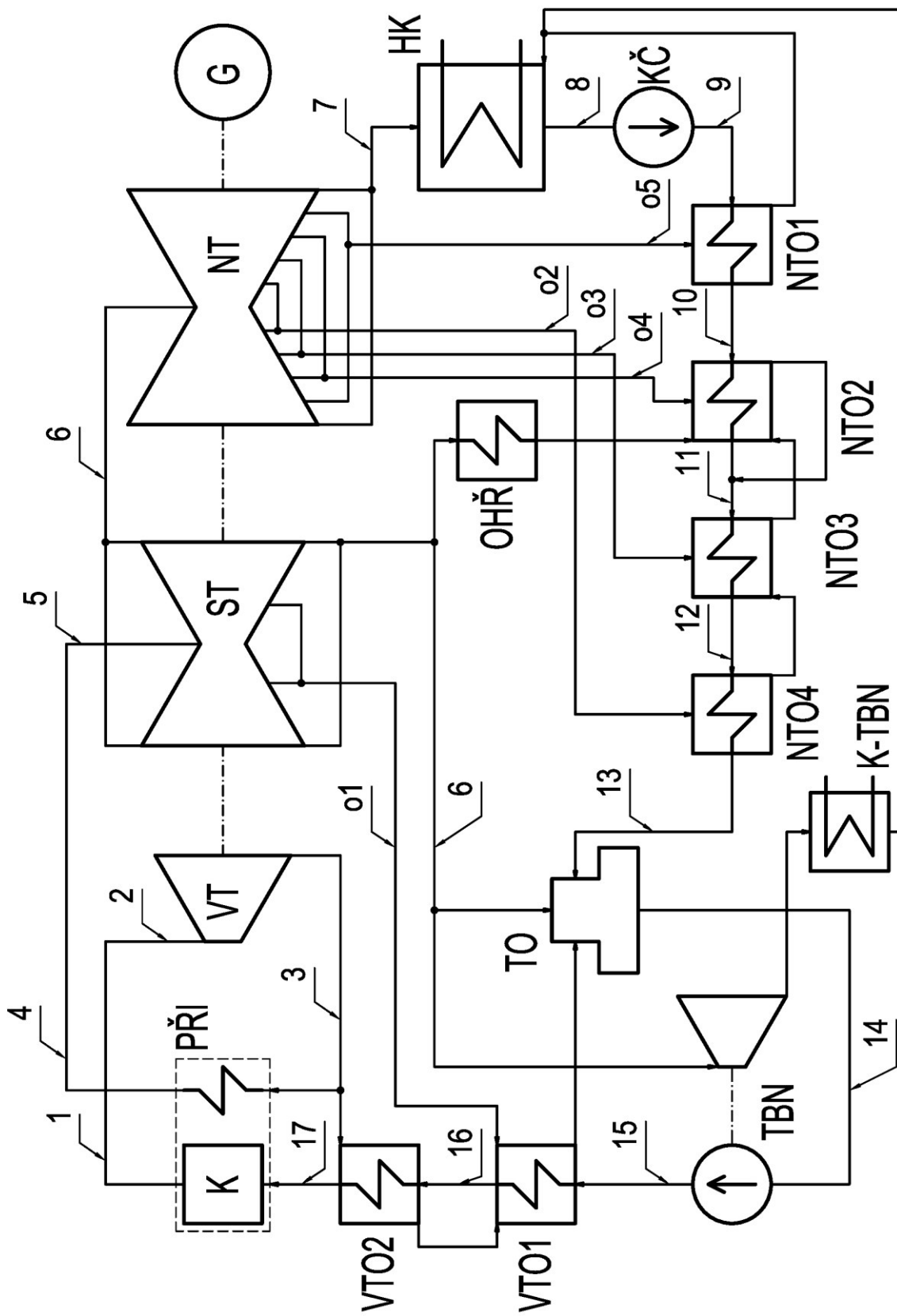
- Příloha 1 - Zjednodušené technologické schéma sekundárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín
- Příloha 2 - Tabulka parametrů páry v příslušných místech schématu (Příloha 1) a entalpií kondenzátu při určitých teplotách Jaderné elektrárny Temelín
- Příloha 3 - Zjednodušené technologické schéma tepelného oběhu elektrárny Mělník III
- Příloha 4 - Tabulka parametrů páry v příslušných místech schématu (Příloha 3) a entalpií kondenzátu při určitých teplotách elektrárny Mělník III
- Příloha 5 - Zjednodušené technologické schéma tepelného oběhu elektrárny nový zdroj Ledvice
- Příloha 6 - Tabulka parametrů páry v příslušných místech schématu (Příloha 5) a entalpií kondenzátu při určitých teplotách elektrárny nový zdroj Ledvice
- Příloha 7 - Výpočet termické účinnosti Jaderné elektrárny Temelín v programu Mathematica
- Příloha 8 - Výpočet termické účinnosti elektrárny Mělník III v programu Mathematica
- Příloha 9 - Výpočet termické účinnosti elektrárny nový zdroj Ledvice v programu Mathematica



Příloha 1 – Zjednodušené technologické schéma sekundárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín

Příloha 2 – Tabulka parametrů páry v příslušných místech schématu (Příloha 1) a entalpií kondenzátu při určitých teplotách Jaderné elektrárny Temelín

označení	t [°C]	p [MPa]	s [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	h [kJ·kg ⁻¹]
1	278	6,22	5867	2779
2	272,8	5,74	5895	2779
3	166,5	0,727	6022	2469
4	166,3	0,724	6582	2714
5	245	0,72	7073	2943
6	36,3	0,0061	7454	2297
7	36,3	0,0061	523	152
8	36,5	2,5	524	154
9	63,6	2	876	268
10	90	1,6	1196	380
11	114	1,4	1461	479
12	160	1,2	1938	674
13	184	1,11	2183	783
14	185	7,7	2181	788
15	223	6,1	2542	960
o1	229	2,75	5926	2655
o2	188	1,21	5980	2535
o3	123	0,205	7130	2712
o4	96	0,088	7171	2584
o5	68,7	0,029	7238	2441
$h_k(272,8\text{ °C})$	272,8	-	-	1199
$h_k(195\text{ °C})$	195	-	-	830
$h_k(166,3\text{ °C})$	166,3	-	-	703
$h_k(124\text{ °C})$	124	-	-	521
$h_k(100\text{ °C})$	100	-	-	419
$h_k(90\text{ °C})$	90	-	-	377
$h_k(46,5\text{ °C})$	46,5	-	-	194,7



Příloha 3 – Zjednodušené technologické schéma tepelného oběhu elektrárny Mělník III

Příloha 4 – Tabulka parametrů páry v příslušných místech schématu (Příloha 3) a entalpií kondenzátu při určitých teplotách elektrárny Mělník III

označení	t [°C]	p [MPa]	s [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	h [$kJ \cdot kg^{-1}$]
1	540,8	16,82	6420	3405
2	535,7	15,55	6452	3405
3	347,8	4,37	6523	3078
4	540,7	4,12	7195	3538
5	538,3	3,91	7214	3534
6	282,8	0,593	7316	3026
7	39,4	0,00715	7674	2387
8	38,9	0,00715	558	162,9
9	39	1,2	555	163,3
10	70,2	1	955	293,9
11	89,5	0,9	1184	374,7
12	110,2	0,8	1419	462,2
13	129,7	0,7	1630	545,1
14	151,1	0,5	1853	636,8
15	155,7	20	1881	669,9
16	211,8	19,5	2413	912,7
17	250,5	19	2764	1089
o1	450,4	1,969	7295	3359
o2	220,9	0,320	7371	2908
o3	162,3	0,175	7405	2796
o4	103,1	0,0853	7455	2684
o5	78,5	0,0446	7497	2593
$h_k(216,8 \text{ °C})$	216,8	-	-	929,5
$h_k(160,7 \text{ °C})$	160,7	-	-	678,3
$h_k(115,2 \text{ °C})$	115,2	-	-	483,4
$h_k(109 \text{ °C})$	109	-	-	458
$h_k(94,5 \text{ °C})$	94,5	-	-	395,9
$h_k(49 \text{ °C})$	49	-	-	205,2

Příloha 6 – Tabulka parametrů páry v příslušných místech schématu (Příloha 5) a entalpií kondenzátu při určitých teplotách elektrárny nový zdroj Ledvice

označení	t [°C]	p [MPa]	s [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	h [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]
1	600	27,11	6309	3474
2	597	26,33	6319	3472
3	338,2	5,05	6394	3036
4	610	4,80	7308	3692
5	606,5	4,65	7313	3685
6	297,0	0,574	7384	3057
7	29,58	0,00418	7716	2330
8	29,60	0,00415	431	124,0
9	30,54	1,5	443,9	129,3
10	54,3	1,45	758,6	228,6
11	81,811	1,4	1096	343,7
12	106,2	1,4	1376	446,3
13	129,7	1,35	1631	545,9
14	154,7	1,35	1889	653,0
15	182,2	1,05	2161	772,8
16	188,6	34	2180	818,4
17	220,5	33	2472	957,1
18	259,8	32	2813	1134
19	285,0	31	3040	1253
20	289,9	30	3087	1277
o1	389,1	7,25	6383	3124
o2	509,9	2,57	7340	3484
o3	391,8	1,17	7365	3244
o4	311,8	0,574	7437	3087
o5	223,3	0,299	7413	2914
o6	145,9	0,131	7465	2766
o7	82,40	0,0522	7503	2620
o8	57,47	0,0177	7605	2491
$h_k(269,9\text{ °C})$	269,9	-	-	1184,6
$h_k(230,5\text{ °C})$	230,5	-	-	992,6
$h_k(198,6\text{ °C})$	198,6	-	-	846,1
$h_k(134,7\text{ °C})$	134,7	-	-	566,5
$h_k(111,2\text{ °C})$	111,2	-	-	466,4
$h_k(59,3\text{ °C})$	59,3	-	-	248,2

Příloha 7 – Výpočet termické účinnosti Jaderné elektrárny Temelín v programu Mathematica

```
(*Tabulka parametrů páry s veličinami:
  teplota [°C], tlak [MPa], entropie [J/(kg*K)], entalpie [kJ/kg]*)
tab = {{278, 6.22, 5867, 2779}, {272.8, 5.74, 5895, 2779},
  {166.5, 0.727, 6022, 2469}, {166.3, 0.724, 6582, 2714},
  {245, 0.72, 7073, 2943}, {36.3, 0.0061, 7454, 2297}, {36.3, 0.0061, 523, 152},
  {36.5, 2.5, 524, 154}, {63.6, 2, 876, 268}, {90, 1.6, 1196, 380},
  {114, 1.4, 1461, 479}, {160, 1.2, 1938, 674}, {184, 1.11, 2183, 783},
  {185, 7.7, 2181, 788}, {223, 6.1, 2542, 960}, {278, 6.22, 5867, 2779}};

odbery = {{229, 2.75, 5926, 2655}, {188, 1.21, 5980, 2535},
  {123, 0.205, 7130, 2711.6}, {96, 0.088, 7171, 2584}, {68.7, 0.029, 7238, 2441}};

h = Flatten[Take[tab, All, -1]]; (*vyjádření pouze entalpií*)

ho = Flatten[Take[odbery, All, -1]]; (*vyjádření pouze entalpií odběrů*)
hk = {1199(*272.8°C*), 830(*195°C*), 703(*166.3°C*),
  521(*124°C*), 419(*100°C*), 377(*90°C*), 194.7(*46.5°C*)};
(*entalpie kondenzátu při daných teplotách*)

(*rovnice pro jednotlivá zařízení:*)

suchostpredSP = 0.86;
suchostzaSP = 0.982;

rceSP = oSP == (suchostzaSP - suchostpredSP) * (1 - oP - oVTO - oTO - oNTO4);
rceP = oP * (h[[2]] - hk[[1]]) == (1 - oP - oVTO - oTO - oNTO4 - oSP) * (h[[5]] - h[[4]]);
rceVTO = oVTO * (ho[[1]] - hk[[2]]) + oP * (hk[[1]] - hk[[2]]) == h[[15]] - h[[14]];
rceTO = oTO * (ho[[2]] - h[[13]]) + (oP + oVTO) * (hk[[2]] - h[[13]]) ==
  (1 - oTO - oP - oVTO - oSP) * (h[[13]] - h[[12]]) + oSP * (h[[13]] - hk[[3]]);
rceNTO4 = oNTO4 * (h[[3]] - hk[[4]]) == (1 - oTO - oP - oVTO - oSP) * (h[[12]] - h[[11]]);
rceNTO3 = oNTO3 * (ho[[3]] - hk[[5]]) + oNTO4 * (hk[[4]] - hk[[5]]) ==
  (1 - oTO - oP - oVTO - oSP) * (h[[11]] - h[[10]]);
rceNTO2 = oNTO2 * (ho[[4]] - hk[[6]]) + (oNTO3 + oNTO4) * (hk[[5]] - hk[[6]]) ==
  (1 - oTO - oP - oVTO - oSP - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2) * (h[[10]] - h[[9]]);
rceNTO1 = oNTO1 * (ho[[5]] - hk[[7]]) ==
  (1 - oTO - oP - oVTO - oSP - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2) * (h[[9]] - h[[8]]);
rceTBN = 0.81 * oTBN * (h[[5]] - h[[6]]) == (tab[[14]][[2]] - tab[[13]][[2]]) * 1.13;
(*bezSP: rceSP=oSP==0;
rceP=oP*(h[[2]]-hk[[1]])==(1-oP-oVTO-oTO-oNTO4-oSP)*(h[[5]]-h[[3]]);*)
(*bezNTO1: rceNTO2=oNTO2*(ho[[4]]-hk[[6]])+(oNTO3+oNTO4)*(hk[[5]]-hk[[6]])==
  (1-oTO-oP-oVTO-oSP-oNTO4-oNTO3-oNTO2)*(h[[10]]-h[[8]]);
rceNTO1=oNTO1==0;*)

rce = {rceSP, rceP, rceVTO, rceTO, rceNTO4, rceNTO3, rceNTO2, rceNTO1, rceTBN};
promenne = {oSP, oP, oVTO, oTO, oNTO4, oNTO3, oNTO2, oNTO1, oTBN};

res = Solve[rce, promenne][[1]] (*řešení soustavy rovnic*)

doVT = (1 - oP);
doNT = (1 - oP - oVTO - oTO - oSP - oTBN - oNTO4);

aVT = doVT * (h[[2]] - ho[[1]]) +
  (doVT - oVTO) * (ho[[1]] - ho[[2]]) + (doVT - oVTO - oTO) * (ho[[2]] - h[[3]]);
aNT = doNT * (h[[5]] - ho[[3]]) + (doNT - oNTO3) * (ho[[3]] - ho[[4]]) + (doNT - oNTO3 - oNTO2) *
  (ho[[4]] - ho[[5]]) + (doNT - oNTO3 - oNTO2 - oNTO1) * (ho[[5]] - h[[6]]);
a = aVT + aNT /. res; (*určení vykonané práce*)

q = 1 * (h[[16]] - h[[15]]); (*určení dodaného tepla*)
```

$$\eta = 100 * \frac{a}{q} \text{ (*výpočet účinnosti*)}$$

$$\eta_{\max} = 100 * ((\text{tab}[[1]][[1]] - \text{tab}[[6]][[1]]) / (\text{tab}[[1]][[1]] + 273.15))$$

(*výpočet maximální možné účinnosti*)

$$\frac{\eta}{\eta_{\max}} * 100 \text{ (*výpočet poměru dosažené a maximální účinnosti*)}$$

$$P1 = 3129000. ;$$

$$P1 / q \text{ (*výpočet celkového hmotnostního toku*)}$$

$$(\text{promenne} * P1 / q) / . \text{res} \text{ (*výpočet jmenovitých odběrů*)}$$

$$P1 * \eta / 100000 \text{ (*výpočet vyráběného výkonu*)}$$

Příloha 8 – Výpočet termické účinnosti elektrárny Mělník III v programu Mathematica

```
(*Tabulka parametrů páry s veličinami:
   teplota [°C], tlak [MPa], entropie [J/(kg*K)], entalpie [kJ/kg]*)
tab = {{540.75, 16.817, 6420, 3405}, {535.7, 15.551, 6452, 3405},
      {347.8, 4.372, 6523, 3078}, {540.69, 4.115, 7195, 3538},
      {538.34, 3.912, 7214, 3534}, {282.8, 0.593, 7316, 3026},
      {39.4, 0.00715, 7674, 2387}, {38.9, 0.00715, 558, 162.9},
      {39, 1.2, 555, 163.3}, {70.2, 1, 955, 293.9}, {89.5, 0.9, 1184, 374.7},
      {110.2, 0.8, 1419, 462.2}, {129.7, 0.7, 1630, 545.1}, {151.1, 0.5, 1853, 636.8},
      {155.7, 20, 1881, 669.9}, {211.8, 19.5, 2413, 912.7}, {250.5, 19, 2764, 1089}};

odbery = {{450.4, 1.969, 7295, 3359},
          {220.9, 0.3197, 7371, 2908}, {162.3, 0.1746, 7405, 2796},
          {103.1, 0.0853, 7455, 2684}, {78.5, 0.0446, 7497, 2593}};

h = Flatten[Take[tab, All, -1]];
(*vyjádření pouze entalpií*)

ho = Flatten[Take[odbery, All, -1]];
(*vyjádření pouze entalpií odběrů*)

hk = {929.5(*216.8°C*), 678.3(*160.7°C*),
      483.4(*115.2°C*), 395.9(*94.5*), 205.2(*49°C*)};
hOHREV = 458(*109°C*);
(*entalpie kondenzátu při daných teplotách*)

(*rovnice pro jednotlivá zařízení:*)

rceVTO2 = oVTO2 * (h[[3]] - hk[[1]]) == h[[17]] - h[[16]];
rceVTO1 =
  oVTO1 * (ho[[1]] - hk[[2]]) + oVTO2 * (hk[[1]] - hk[[2]]) == h[[16]] - h[[15]];
rceTO = oTO * (h[[6]] - h[[14]]) + (oVTO2 + oVTO1) * (hk[[2]] - h[[14]]) ==
  (1 - oVTO2 - oVTO1 - oTO) * (h[[14]] - h[[13]]);
rceNTO4 = oNTO4 * (ho[[2]] - hk[[3]]) == (1 - oVTO2 - oVTO1 - oTO) * (h[[13]] - h[[12]]);
rceNTO3 = oNTO3 * (ho[[3]] - hk[[4]]) + oNTO4 * (hk[[3]] - hk[[4]]) ==
  (1 - oVTO2 - oVTO1 - oTO) * (h[[12]] - h[[11]]);
rceNTO2 = oNTO2 * (ho[[4]] - h[[11]]) + (oNTO4 + oNTO3) * (hk[[4]] - h[[11]]) ==
  (1 - oVTO2 - oVTO1 - oTO - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2) * (h[[11]] - h[[10]]);
rceNTO1 = oNTO1 * (ho[[5]] - hk[[5]]) + oOHREV * (hOHREV - hk[[5]]) ==
  (1 - oVTO2 - oVTO1 - oTO - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2) * (h[[10]] - h[[9]]);
rceTBN = 0.75 * oTBN * (h[[6]] - h[[7]]) == (tab[[15]][[2]] - tab[[14]][[2]]) * 1.11;
rceOHREV = oOHREV == 29200 / 1567000;
(*bez TBN: rceTBN=oTBN=0;*)
(*bez VTO1: rceVTO2=oVTO2*(h[[3]]-hk[[2]])==h[[17]]-h[[15]];
rceVTO1=oVTO1=0;*)

rce =
  {rceVTO2, rceVTO1, rceTO, rceNTO4, rceNTO3, rceNTO2, rceNTO1, rceTBN, rceOHREV};

promenne = {oVTO2, oVTO1, oTO, oNTO4, oNTO3, oNTO2, oNTO1, oTBN, oOHREV};

res = NSolve[rce, promenne][[1]] (*řešení soustavy rovnic*)

doNT = oVTO2 + oVTO1 + oTO;
```

```

aVT = h[[2]] - h[[3]];
aST = (1 - oVTO2) * (h[[5]] - ho[[1]]) + (1 - oVTO2 - oVTO1) * (ho[[1]] - h[[6]]);
aNT = (1 - doNT - oTBN - oOHREV) * (h[[6]] - ho[[2]]) +
      (1 - doNT - oTBN - oOHREV - oNTO4) * (ho[[2]] - ho[[3]]) +
      (1 - doNT - oTBN - oOHREV - oNTO4 - oNTO3) * (ho[[3]] - ho[[4]]) +
      (1 - doNT - oTBN - oOHREV - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2) * (ho[[4]] - ho[[5]]) +
      (1 - doNT - oTBN - oOHREV - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2 - oNTO1) * (ho[[5]] - h[[7]]);
a = aVT + aST + aNT / .res; (*určení vykonané práce*)
(*bez TBN: aELN=(tab[[15]][[2]]-tab[[14]][[2]])*1.11/0.75/0.9;
a=aVT+aST+aNT-aELN/.res;*)

q = h[[1]] - h[[17]] + (1 - oVTO2) * (h[[4]] - h[[3]]) / .res;
(*určení dodaného tepla*)

η = 100 *  $\frac{a}{q}$  (*výpočet účinnosti*)

ηmax = 100 *  $\frac{\text{tab}[[1]][[1]] - \text{tab}[[8]][[1]]}{\text{tab}[[1]][[1]] + 273.15}$  (*výpočet maximální možné účinnosti*)

 $\frac{\eta}{\eta_{\text{max}}}$  * 100 (*výpočet poměru dosažené a maximální účinnosti*)

P1 = 1195000.;

P1 / q (*výpočet celkového hmotnostního toku*)

(promenne * P1 / q) / .res (*výpočet jmenovitých odběrů*)

P1 * η / 100000 (*výpočet vyráběného výkonu*)

```

Příloha 9 – Výpočet termické účinnosti elektrárny nový zdroj Ledvice v programu Mathematica

```
(*Tabulka parametrů páry s veličinami:
  teplota [°C], tlak [MPa], entropie [J/(kg*K)], entalpie [kJ/kg]*)

tab = {{600, 27.107, 6308.8, 3474.1}, {597, 26.326, 6318.5, 3472.3},
  {338.19, 5.0491, 6393.7, 3036.1}, {610, 4.7967, 7307.5, 3691.7},
  {606.5, 4.6528, 7313.3, 3684.7}, {297.02, 0.57427, 7384.2, 3056.5},
  {29.577, 0.004181, 7716, 2330.1}, {29.602, 0.004145, 431, 123.99},
  {30.541, 1.5, 443.9, 129.33}, {54.3, 1.45, 758.6, 228.59},
  {81.811, 1.4, 1096.3, 343.74}, {106.19, 1.4, 1375.6, 446.27},
  {129.69, 1.35, 1630.7, 545.88}, {154.67, 1.35, 1888.6, 652.97},
  {182.17, 1.05, 2160.7, 772.77}, {188.62, 34, 2179.7, 818.43},
  {220.48, 33, 2472.2, 957.05}, {259.81, 32, 2813.2, 1134.3},
  {285.03, 31, 3040.3, 1253.4}, {289.91, 30, 3086.6, 1277}};

odbery = {{389.13, 7.2536, 6383.4, 3124.4}, {509.87, 2.5701, 7339.9, 3483.8},
  {391.82, 1.1707, 7364.9, 3244.2}, {311.8, 0.57427, 7437.4, 3087.2},
  {223.32, 0.29926, 7412.8, 2913.7}, {145.87, 0.13126, 7465.2, 2766},
  {82.401, 0.052216, 7503.1, 2620.3}, {57.47, 0.017723, 7604.5, 2490.5}};

h = Flatten[Take[tab, All, -1]];(*vyjádření pouze entalpií*)

ho = Flatten[Take[odbery, All, -1]];(*vyjádření pouze entalpií odběrů*)

hk = {1184.6(*269.9°C*), 992.6(*230.5*), 846.1
  (*198.6*), 566.5(*134.7*), 466.4(*111.2*), 248.2(*59.3*)};
(*entalpie kondenzátu při daných teplotách*)

(*rovnice pro jednotlivá zařízení:*)

rceVTO4 = oVTO4 * (ho[[2]] - hx) == h[[20]] - h[[19]];
rceVTO3 = oVTO3 * (ho[[1]] - hk[[1]]) == h[[19]] - h[[18]];
rceVTO2 =
  oVTO2 * (h[[3]] - hk[[2]]) + oVTO3 * (hk[[1]] - hk[[2]]) == h[[18]] - h[[17]];
rceVTO1 = oVTO4 * (hx - hk[[3]]) + (oVTO3 + oVTO2) * (hk[[2]] - hk[[3]]) ==
  h[[17]] - h[[16]];
rceTO = oTO * (ho[[3]] - h[[15]]) + (oVTO4 + oVTO3 + oVTO2) * (hk[[3]] - h[[15]]) ==
  (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2 - oTO) * (h[[15]] - h[[14]]);
rceNTO5 = oNTO5 * (ho[[4]] - hk[[4]]) ==
  (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2 - oTO) * (h[[14]] - h[[13]]);
rceNTO4 = oNTO4 * (ho[[5]] - hk[[5]]) + oNTO5 * (hk[[4]] - hk[[5]]) ==
  (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2 - oTO) * (h[[13]] - h[[12]]);
rceNTO3 = oNTO3 * (ho[[6]] - h[[12]]) + (oNTO4 + oNTO5) * (hk[[5]] - h[[12]]) ==
  (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2 - oTO - oNTO5 - oNTO4 - oNTO3 - oEKOAVO) *
  (h[[12]] - h[[11]]);
rceNTO2 = oNTO2 * (ho[[7]] - hk[[6]]) == (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2 -
  oTO - oNTO5 - oNTO4 - oNTO3 - oEKOAVO) * (h[[11]] - h[[10]]);
rceNTO1 = oNTO1 * (ho[[8]] - h[[10]]) + oNTO2 * (hk[[6]] - h[[10]]) ==
  (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2 - oTO - oNTO5 - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2 - oNTO1) *
  (h[[10]] - h[[9]]);
rceEKOAVO = oEKOAVO == 165.09 / 464.48;
(*bezEKOAVO: rceEKOAVO=oEKOAVO==0;*)
(*bezNTO4: rceNTO5=
  oNTO5*(ho[[4]]-hk[[5]])==(1-oVTO4-oVTO3-oVTO2-oTO)*(h[[14]]-h[[12]]);
rceNTO4=oNTO4==0;*)
```

```

rce = {rceVTO4, rceVTO3, rceVTO2, rceVTO1, rceTO,
       rceNTO5, rceNTO4, rceNTO3, rceNTO2, rceNTO1, rceEKOAVO};

promenne =
  {oVTO4, oVTO3, oVTO2, oTO, oNTO5, oNTO4, oNTO3, oNTO2, oNTO1, oEKOAVO, hx};

res = NSolve[rce, promenne][[1]] (*řešení soustavy rovnic*)

doNTO = oVTO4 + oVTO3 + oVTO2 + oTO + oNTO5

aVT = h[[2]] - ho[[1]] + (1 - oVTO3) * (ho[[1]] - h[[3]]);
aST = (1 - oVTO3 - oVTO2) * (h[[4]] - ho[[2]]) +
  (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2) * (ho[[2]] - ho[[3]]) + (1 - oVTO4 - oVTO3 - oVTO2 - oTO) *
  (ho[[3]] - ho[[4]]) + (1 - doNTO) * (ho[[4]] - h[[6]]);
aNT = (1 - doNTO) * (h[[6]] - ho[[5]]) + (1 - doNTO - oNTO4) * (ho[[5]] - ho[[6]]) +
  (1 - doNTO - oNTO4 - oNTO3) * (ho[[6]] - ho[[7]]) +
  (1 - doNTO - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2) * (ho[[7]] - ho[[8]]) +
  (1 - doNTO - oNTO4 - oNTO3 - oNTO2 - oNTO1) * (ho[[8]] - h[[7]);
aELN =  $\frac{1}{0.8}$  * (tab[[16]][[2]] - tab[[15]][[2]]) * 1.13;
a = aVT + aST + aNT - aELN /. res; (*určení vykonané práce*)

q = h[[1]] - h[[20]] + (1 - oVTO3 - oVTO2) * (h[[4]] - h[[3]]) +
  (oEKOAVO) * (h[[12]] - h[[10]]) /. res; (*určení dodaného tepla*)

 $\eta = 100 * \frac{a}{q}$  (*výpočet účinnosti*)

 $\eta_{\max} = 100 * \frac{\text{tab}[[4]][[1]] - \text{tab}[[8]][[1]]}{\text{tab}[[4]][[1]] + 273.15}$  (*výpočet maximální možné účinnosti*)

 $\frac{\eta}{\eta_{\max}}$  * 100 (*výpočet poměru dosažené a maximální účinnosti*)

qbezEKO = h[[1]] - h[[20]] + (1 - (oVTO3) - (oVTO2)) * (h[[4]] - h[[3]]) /. res;
(*určení dodaného tepla bez EKOAVO*)

P1 = 1286000;

P1 / qbezEKO (*výpočet celkového hmotnostního toku*)

(Take[promenne, 10] /. res) * P1 / qbezEKO (*výpočet jmenovitých odběrů*)

(aVT + aST + aNT /. res) * P1 / qbezEKO / 1000 (*výpočet vyráběného výkonu*)

```