



Bakalářská práce

Výpočetní model parní elektrárny

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

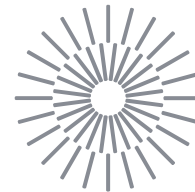
Filip Klikar

Vedoucí práce:

Ing. Ondřej Burian

Katedra energetických zařízení

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Výpočetní model parní elektrárny

<i>Jméno a příjmení:</i>	Filip Klikar
<i>Osobní číslo:</i>	S20000047
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra energetických zařízení
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vytvořit v programovacím jazyce Python zjednodušený výpočetní model tepelného oběhu parní elektrárny. Pro řešení práce nejsou nutné předchozí znalosti programovacího jazyka Python, vedoucí práce provede intenzivní zaškolení formou krátkého kurzu během semestru. Finální topologie oběhu bude vybrána po konzultaci s vedoucím práce.

1. Proveďte krátkou rešerši k tématu tepelných oběhů parních elektráren.
2. Krátce popište zadaný tepelný oběh. V případě zadání konkrétního fungujícího zařízení popište i to.
3. Vyřaďte z oběhu nedůležité větve pro zjednodušení výpočtu.
4. Sestavte bilanční rovnice pro jednotlivé potrubní větve.
5. Sestavte bilanční rovnice pro jednotlivé aparáty.
6. Vytvořte v programovacím jazyce Python výpočetní model tepelného oběhu. Pro výpočet neznámých parametrů řešte sestavené bilanční rovnice řešičem lineárních rovnic z knihovny Scipy. Termofyzikální vlastnosti vody a vodní páry určíte z knihovny Coolprop. Výstupem výpočetního modelu by měl být kompletní výpočet energetických a hmotových toků ve všech potrubních větvích. Hlavním řešeným parametrem pak bude celková tepelná účinnost oběhu.
7. Výpočetní model validujte pomocí známých parametrů tepelného oběhu.
8. Vypracujte závěrečné zhodnocení sestaveného modelu.

Rozsah grafických prací: tabulky, obrázky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: 25
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] BEČVÁŘ, Josef. Tepelné turbíny. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968. Řadastrojírenské literatury.
[2] KADRNOŽKA, Jaroslav a Ladislav OCHRANA. Teplárenství. Brno: CERM, 2001. ISBN80-7204-222-X.
[3] KERCELLI, L. I. a V. J. RYŽKIN. Tepelné elektrárny: Teplovie električeskie stancii. Díl I.. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Burian
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

5. dubna 2023

Filip Klikar

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Ondřeji Burianovi za odborné konzultace a za výuku programování v Pythonu. Děkuji také své rodině za podporu během studia.

Anotace

Tato práce se zaměřuje na tvorbu výpočetního modelu v programovacím jazyce Python pro výpočet tepelné účinnosti parní elektrárny. První kapitola se věnuje popisu základních termodynamických procesů v tepelném oběhu parních elektráren. Druhá kapitola se zabývá metodami zvyšování tepelné účinnosti a zkoumá vliv jednotlivých zařízení v tepelném oběhu na účinnost. V třetí kapitole je proveden rozbor výpočtu tepelného oběhu Jaderné elektrárny Temelín. Dále je zde popsána tvorba výpočetního modelu a prezentovány výsledky citlivostní analýzy prováděné s použitím tohoto modelu.

Klíčová slova:

tepelný oběh, účinnost, parní elektrárna

Anotation

This thesis focuses on the development of a computational model in Python programming language to calculate the thermal efficiency of a steam power plant. The first chapter is devoted to the description of the basic thermodynamic processes in the heat cycle of steam power plants. The second chapter deals with methods of increasing thermal efficiency and examines the effect of individual devices in the thermal cycle on efficiency. The third chapter analyses the calculation of the thermal cycle of the Temelín Nuclear Power Plant. It also describes the development of the computational model and presents the results of the sensitivity analysis performed using this model.

Keywords:

thermal cycle, efficiency, steam power plant

Obsah

Úvod	9
1 Tepelné oběhy parních elektráren	10
1.1 Carnotův cyklus.....	10
1.2 Rankin-Clausiusův oběh vodní páry	11
2 Zařízení a procesy parních elektráren a jejich vliv na účinnost oběhu ..	13
2.1 Čerpadla.....	13
2.2 Parogenerátor	14
2.3 Parní turbína	14
2.4 Přihřívání a separace páry	15
2.5 Regenerace napájecí vody.....	16
2.6 Kondenzace	18
2.7 Napájecí nádrž a termický odplyňovač.....	19
3 Výpočet tepelného oběhu.....	20
3.1 Jaderná elektrárna Temelín	20
3.2 Výpočet tepelné účinnosti	21
3.2.1 Bilance hmotnostních průtoků	21
3.2.2 Bilance energií.....	22
3.2.3 Výpočet.....	24
3.3 Struktura programu	25
3.4 Výpočetní model	26
3.5 Citlivostní analýza tepelného oběhu.....	28
3.5.1 Modifikace teploty vstupní páry.....	28
3.5.2 Modifikace teploty v kondenzátoru.....	29
3.5.3 Přenastavení odvodu kondenzátu z NTO	30
3.5.4 Vliv počtu NTO na účinnost	31
3.5.5 Vliv separace – přihřívání na účinnost.....	31
4 Závěr.....	33
Seznam použitých zdrojů	34
Přílohy	35

Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
h	Měrná entalpie	[J·kg ⁻¹]
ṁ	Hmotnostní průtok	[Kg·s ⁻¹]
P*	Tlak	[Pa]
P*	Výkon	[W]
q	Měrné teplo	[J·kg ⁻¹]
Q	Teplo	[J]
s	Měrná entropie	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
T	Teplota	[°C; K]
u	Měrná vnitřní energie	[J·kg ⁻¹]
v	Měrný objem	[m ³ ·kg ⁻¹]
w	Měrná práce	[J·kg ⁻¹]
x	Suchost mokré páry	[-]
α	Poměrný hmotnostní průtok	[-]
η	Tepelná účinnost	[-]

*Symboly pro tlak a výkon jsou v obsahu práce vždy rozpoznatelné

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Název
KČ	Kondenzátní čerpadlo
NČ	Napájecí čerpadlo
NN	Napájecí nádrž
NT	Nízkotlaký díl turbíny
NTO	Nízkotlaký ohřívák
PG	Parogenerátor
SP	Separátor – přihřívák
TO	Termický odplyňovač
VT	Vysokotlaký díl turbíny
VTO	Vysokotlaký ohřívák
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor

Úvod

Elektrická energie se v dnešní společnosti stává stále důležitějším pilířem ekonomiky a moderního životního stylu. Její role a význam v našem každodenním životě rostou v souladu s technologickým pokrokem a narůstajícími potřebami společnosti. Elektrická energie je klíčovým zdrojem pohonné síly pro průmysl, obchod, dopravu, domácnosti a mnoho dalších odvětví.

V současné době se v energetickém odvětví potýkáme s problémem – jak se vypořádat se současným trendem snižování emisí skleníkových plynů. Procesy, které vedou ke snižování produkce skleníkových plynů, budou do budoucna znamenat omezení současných zdrojů elektrické energie z fosilních zdrojů a zároveň zvýšení celkové spotřeby elektrické energie. Rostou tak nároky na získání více elektrické energie bez navýšení emisí skleníkových plynů. K vyřešení této problematiky bude potřeba stavět více bezemisních zdrojů elektrické energie a zvýšit energetickou efektivitu. Cílem všech energetických centrálen je proto maximální využití dodávané energie. Nejinak je tomu u parních elektráren.

Parní elektrárny jsou významným zdrojem elektřiny, a proto je důležité zkoumat možnosti zvýšení jejich tepelné účinnosti. Na tepelnou účinnost má vliv řada faktorů, které si v této práci blíže představíme. Porozumění těmto faktorům a jejich vzájemnému působení je klíčové pro identifikaci oblastí, ve kterých lze dosáhnout vylepšení tepelné účinnosti a zvýšení výkonu parních elektráren. V rámci této práce bude proveden výpočet tepelné účinnosti specificky pro tepelný oběh Jaderné elektrárny Temelín.

Cílem práce je vytvořit výpočetní model v programovacím jazyce Python, který umožní provádět citlivostní analýzu tepelného oběhu a zkoumat různé scénáře a modifikace tohoto oběhu. Tento model umožní nejen úpravu termofyzikálních parametrů, ale i změnu v zapojení vybraných zařízení bez nutnosti zásahu do zdrojového kódu. Výstupem výpočetního modelu budou podrobné informace o hmotnostních tocích a termofyzikálních parametrech ve všech potrubních větvích. Hlavním sledovaným parametrem bude tepelná účinnost, která nám poskytne přehled o energetické efektivitě systému. Součástí výstupu bude také T-s diagram, který názorně zobrazí aktuální stav tepelného oběhu.

1 Tepelné oběhy parních elektráren

Tepelný oběh je soubor několika termodynamických dějů, po jejichž doběhnutí se pracovní látka dostane do počátečního stavu cyklu. Tepelné oběhy rozdělujeme na přímé a obrácené. V přímých obězích je soubor termodynamických dějů značen složenou uzavřenou čarou a děj v diagramu probíhá po směru hodinových ručiček. Z přímých oběhů získáme mechanickou práci. Průběh děje v obrácených oběhů se na rozdíl od oběhů přímých značí v diagramu proti směru hodinových ručiček a práce je zde spotřebovávána. Pro popis parních elektráren se používají oběhy přímé. [1], [2]

K popsání všech tepelných oběhů se vychází z prvního termodynamického zákona v prvním (1-1) i druhém (1-2) tvaru a druhého termodynamického zákona (2).

$$dq = du + dw \quad (1-1)$$

$$dq = dh + dw_t \quad (1-2)$$

$$ds \geq \frac{dq}{T} \quad (2)$$

Dále jsou pro popis termodynamických dějů důležité vztahy pro vnitřní energii (3), objemovou práci (4) a technickou práci (5).

$$u = h - P \cdot v \quad (3)$$

$$dw \leq P \cdot dv \quad (4)$$

$$dw_t \leq -v \cdot dP \quad (5)$$

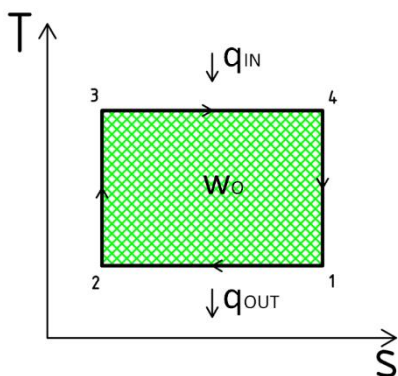
V reálném oběhu parní elektrárny dochází také k procesu směšování látek o různých termodynamických vlastnostech. Pro kontinuální směšování platí základní rovnice (6) a (7), kde indexy „1“ a „2“ značí dílčí proudy a výsledná směs je bez indexu.

$$m \dot{=} m_1 \dot{+} m_2 \quad (6)$$

$$h \cdot m \dot{=} h_1 \cdot m_1 \dot{+} h_2 \cdot m_2 \quad (7)$$

1.1 Carnotův cyklus

Carnotův oběh je tvořen dvěma izotermami a dvěma izoentropami. Jedná se o tepelný oběh s největší možnou účinností pro danou dvojici teplot a vztahujeme k němu ostatní tepelné oběhy.



Obrázek 1: Přímý Carnotův oběh

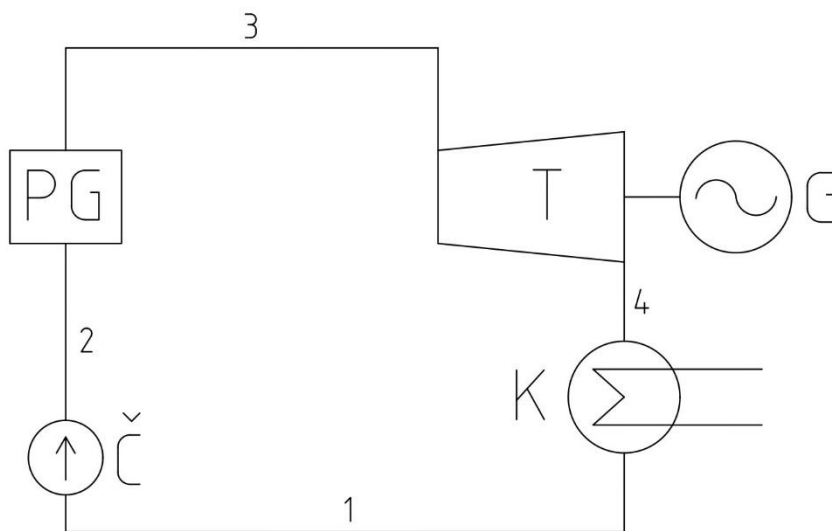
Carnotův oběh je zobrazen v diagramu na obr. 1. V oblasti 1 – 2 probíhá izotermická komprese pracovní látky. V této oblasti je zároveň od systému odebíráno teplo q_{OUT} . Během tohoto odběru tepla má pracovní látka cyklu nejmenší teplotu. V oblasti 2 – 3 probíhá izoentropická neboli adiabatická vratná komprese, následně je pracovní látka podrobena izotermické expanzi v oblasti 3 – 4, kde je pracovní látce o maximální teplotě dodáváno teplo q_{IN} . Nakonec probíhá v oblasti 1 – 4 izoentropická expanze. Vykonaná práce carnotova oběhu w_0 je rozdílem dodaného a odebraného tepla a dá se vyjádřit plochou 1 – 2 – 3 – 4 – 1. Účinnost Carnotova oběhu se vyjádří

jako podíl vykonané práce ku dodanému teplu. Po úpravě dle druhého termodynamického zákona (2) lze účinnost vyjádřit následovně (8). [2]

$$\eta = \frac{w_o}{q_{IN}} = \frac{q_{IN} - q_{OUT}}{q_{IN}} = \frac{T_3(s_4 - s_3) - T_1(s_1 - s_2)}{T_3(s_4 - s_3)} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (8)$$

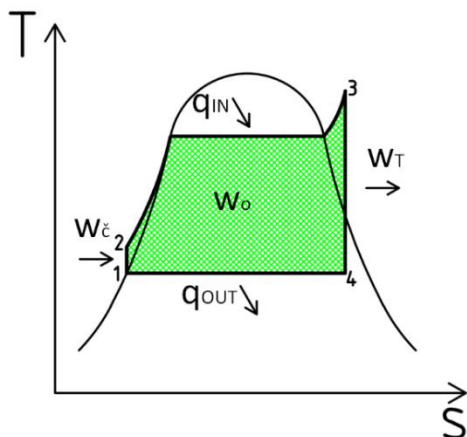
1.2 Rankin-Clausiiův oběh vodní páry

Jedná se o idealizovaný tepelný oběh, který se používá pro popis parní elektrárny s úplnou kondenzací vodní páry.



Obrázek 2: Zjednodušené schéma parní elektrárny

Ve schématu (obr. 2) značí Č čerpadlo, které dopraví vodu pod vysokým tlakem do parogenerátoru PG. V parogenerátoru se voda nejprve ohřeje na bod varu, následně probíhá v oblasti mokré páry za konstantní teploty dodávání tepla pracovní látce nutného k vyvolání přeměny kapalného skupenství na plynné. Jakmile se pracovní látka dostane do stavu syté páry nastává dalším přívodem tepla přehřívání páry. Celý tento proces ohřívání se děje za konstantního tlaku. Přehřátá pára se po výstupu z parogenerátoru dopraví do turbíny T. V turbíně pára expanduje a dodá část své energie parním lopatkám, které roztočí turbínu pohánějící generátor elektrické energie G. Z turbíny se pára dopraví do kondenzátoru K, kde se za konstantního tlaku ochlazuje až do stavu syté vody, aby mohla být opět načerpána čerpadlem a celý cyklus se opakuje. [3]



Grafické znázornění oběhu je znázorněno na obr. 3. Pro zjednodušení následného výpočtu jsou veškeré termodynamické jevy považovány za vratné.

Obrázek 3: Idealizovaný tepelný oběh parní elektrárny v T-s diagramu

V oblasti 1-2 probíhá práce čerpadla. Při výpočtu se pracuje s modelem ideální kapaliny, změna objemu je tedy nulová. Práci lze pomocí (1-2) a (5) vyjádřit jako (9).

$$w_{\xi} = -(h_2 - h_1) = - \int_{(1)}^{(2)} v \cdot dP = -v \cdot (P_2 - P_1) \quad (9)$$

Ohřev vody probíhá v oblasti 2-3 a jedná se o izobarický děj. Velikost dodaného tepla se dá pomocí (1-2) vyjádřit jako (10).

$$q_{IN} = \int_{(2)}^{(3)} dh = h_3 - h_2 \quad (10)$$

V oblasti 3-4 se dá práce turbíny beze ztrát popsat pomocí adiabatické vratná expanze, zasahuje-li expanze do oblasti mokré páry jako na obr. 2, nelze pracovat s modelem ideálního plynu, v takovém případě lze vztah vyjádřit pomocí (1-2) jako (11).

$$w_T = \int_{(3)}^{(4)} dh = h_3 - h_4 \quad (11)$$

V posledním kroku v oblasti 4-1 probíhá kondenzace, která je popsána jako izobarické ochlazení. Pro odvedené teplo platí (12).

$$q_{OUT} = \int_{(4)}^{(1)} dh = h_1 - h_4 \quad (12)$$

Celkovou vykonanou práci tepelného oběhu lze vyjádřit jako rozdíl mezi vstupním a výstupním teplem.

$$w_o = q_{IN} + q_{OUT} = (h_3 - h_2) + (h_1 - h_4) \quad (13)$$

Účinnost Rankin-Clausiova oběhu bude rovna podílu celkové vykonané práce a dodaného tepla.

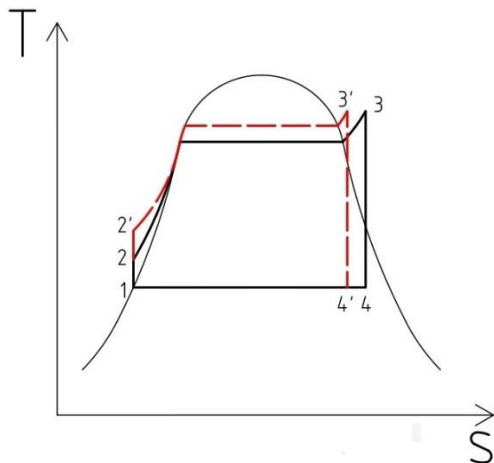
$$\eta = \frac{w_o}{q_{IN}} = \frac{(h_3 - h_2) + (h_1 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \quad (14)$$

2 Zařízení a procesy parních elektráren a jejich vliv na účinnost oběhu

Tato kapitola se zabývá jednotlivými oblastmi tepelného oběhu parních elektráren. Stručně je zde popsána funkce jednotlivých zařízení a dále se zaměřuje na jejich vliv na účinnost. Je zde popsán především vliv na tepelnou účinnost, ale zmíněny jsou i případné vlivy změny stavu na účinnost termodynamickou. Rozdíl mezi účinností tepelnou a termodynamickou je, že termodynamická účinnost vyjadřuje pouze kvalitu turbíny, zatímco tepelná účinnost popisuje efektivitu celého oběhu [1].

2.1 Čerpadla

Čerpadla v hlavním proudu tepelného oběhu jsou rozdělena do dvou částí. Za kondenzátorem se nachází kondenzátní čerpadla, která zvyšují tlak kondenzátu na úroveň tlaku v napájecí nádrži. Za napájecí nádrží jsou umístěna napájecí čerpadla, která slouží k přepravě napájecí vody z napájecí nádrže do parogenerátoru. Čerpadla v obou těchto částech oběhu mají samostatný pohon.



Obrázek 4: Vliv vyššího tlaku vstupní páry na tepelný oběh

Jedním způsobem k ovlivnění účinnosti je volba zdroje pohonu čerpadel. Ke zvýšení efektivity lze místo elektromotoru použít pohon parní turbínou, která pro svůj provoz odebírá páru z vhodného místa tepelného oběhu. Druhým způsobem ke zvýšení účinnosti je zvýšení tlaku vstupní páry, čehož lze docílit pomocí vyššího výkonu čerpadel.

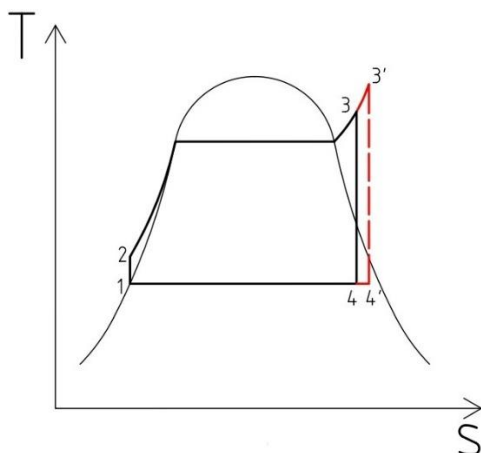
Vliv tlaku vstupní páry na účinnost není lineární. Účinnost nejprve roste, později však nabývá maxima a začne klesat. Růst účinnosti se se vzrůstajícím tlakem zastaví v momentě, kdy je tečna k izotermě v bodě stavu maximální teploty cyklu rovnoběžná s příslušnou částí izobary o nejmenším tlaku tepelného oběhu. S narůstajícím tlakem se také zvyšují namáhání v některých

dílech zařízení, což zvyšuje nároky na konstrukci a dimenzování. Mezi další omezení patří nárůst některých ztrát, které mají negativní vliv na účinnost cyklu, pevnostní omezení materiálu při vysokých teplotách a vyšší vlhkost páry v posledních stupních parní turbíny snižující termodynamickou účinnost oběhu. Vliv zvýšení tlaku na tepelný oběh je znázorněn v T-s diagramu na obr. 4.

Je také nutné brát v úvahu, že zvýšení výkonu čerpadel zároveň zvýší spotřebu energie na jejich pohon a tím může být vliv na celkovou účinnost kontraproduktivní. Velikost vstupního tlaku se také musí volit současně s velikostí teploty, jelikož se jedná o vázané parametry. Při zvýšení tlaku dochází ke zvýšení teploty syté páry, která bývá vstupním médiem do vysokotlakého dílu turbíny u jaderných elektráren. Vstupní parametry je nutné volit na základě tlaku v kondenzátoru a přípustné vlhkosti mokré páry. Teplotu vstupní páry lze ovlivnit prostřednictvím parogenerátoru. [1], [4]

2.2 Parogenerátor

Parogenerátor je tepelný výměník, který slouží k přenosu tepla mezi dvěma izolovanými oběhy. Cílem parogenerátoru je ohřev a fázová přeměna napájecí vody. Produktem parogenerátoru může být buď sytá, nebo přehřátá pára. U jaderných elektráren s tlakovodním reaktorem plní parogenerátor i bezpečnostní funkci, jelikož odděluje radioaktivní a neaktivní pracovní látky. Parogenerátor není součástí oběhu jaderné elektrárny s varným reaktorem, jelikož se jedná o jednookruhový systém.



Obrázek 5: Vliv vyšší teploty vstupní páry na oběh

Účinnost skrze parogenerátor lze ovlivnit zvýšením teploty topného média v parogenerátoru, čímž se zvýší i teplota vstupní páry. Zvýšení teploty vstupní páry má na rozdíl od tlaku vždy pozitivní vliv na účinnost tepelného oběhu. Výhodou vyšší teploty je také snížení vlhkosti páry v posledních stupních parní turbíny a s tím související nárůst termodynamické účinnosti. Zde jsme však limitováni horní hranicí teploty materiálových možností. U jaderných elektráren s tlakovodním reaktorem se teplota vyrobené páry pohybuje kolem 300°C a z bezpečnostních a z technických (prostup tepla v parogenerátoru) důvodů zde není prostor na navýšení [5]. Vliv zvýšení teploty na tepelný oběh je znázorněn v T-s diagramu na obr. 5. [1], [4]

2.3 Parní turbína

Parní turbína je parní motor konající rotační pohyb. Princip parní turbíny spočívá v přeměně tepelné energie obsažené v páře na energii kinetickou vyvozuující točivý moment. V turbínách probíhá adiabatická expanze a tlak postupně klesá. Turbíny se mohou skládat z vícero těles a jednotlivá tělesa rozdělujeme dle tlaku páry na vysokotlaké, středotlaké a nízkotlaké. Tělesa turbíny bývají převážně mnohostupňová s několika stupni řazenými za sebou. Každý stupeň parní turbíny se skládá z rozváděcího a oběžného kola. Rozváděcí kola jsou stacionární ústrojí a na výstupu z rozváděcího kola má pára vyšší rychlost než na vstupu. To se děje kvůli expanzi páry v mezilopatkových prostorech rozváděcího ústrojí, což má za výsledek přeměnu vnitřní energie páry na energii kinetickou. Účelem rozváděcího ústrojí je nejen zvýšení rychlosti páry, ale také nasměrování toku páry na lopatky oběžného kola tak, aby pára proudila tečně k profilu oběžných lopatek. Oběžná kola transformují kinetickou energii páry na práci turbíny.

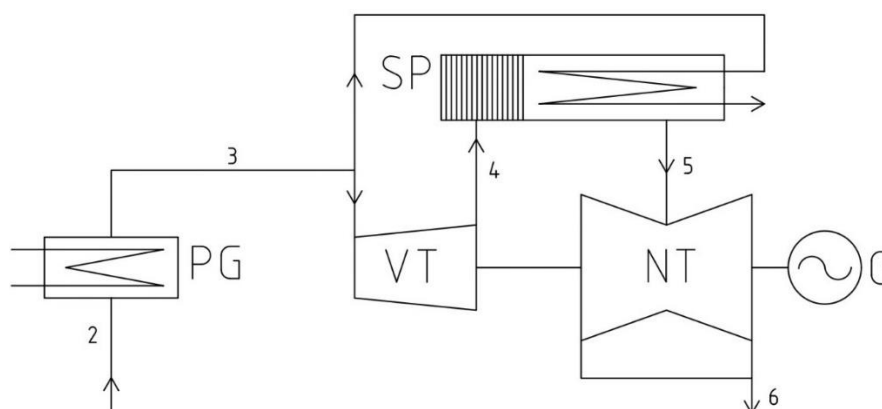
Většina parních turbín je stavěna v axiálním provedení, ve kterém proudí pára směrem osy rotace. Ke snížení axiálního namáhání na uložení turbíny se používají dvou Proudá tělesa, v nichž se pára přivádí doprostřed turbíny a expanduje směrem ke krajům, dojde tak k vyrovnání axiálních sil, které již není třeba externě kompenzovat. Pro parní elektrárny se používá kondenzační odběrová turbína.

Za účelem zvýšení účinnosti se velikost lopatek na jednotlivých stupních parní turbíny postupně zvětšuje spolu se snižujícím se tlakem. S expanzí vzrůstá i objem páry a větší lopatky tak umožní využít co nejvíce energie z expandující páry. Velikost lopatek je omezena maximální dovolenou odstředivou silou působící na lopatky oběžného kola. Je-li objem pracovní látky příliš velký, je možné rozdělit tok páry do vícero nízkotlakých dílů turbíny. Pro dosažení maximální termodynamické účinnosti je nutné páru odvlhčit, protože při vysokých otáčkách turbíny by docházelo k brždění rotoru v důsledku nárazů oběžných

lopatek do kapének vody a tímto hrozí i riziko erozního opotřebení lopatek. K odstranění kapiček vody mezi jednotlivými tělesy parní turbíny se mimo jiné používá systém separace a přehřívání. [6]

2.4 Přehřívání a separace páry

U oběhů s vysokými hodnotami tlaku admisní páry je nutné zavést přehřívání páry. Pokud by přehřívání zavedeno nebylo, expanze by skončila hluboko v oblasti mokré páry, což by mělo negativní vliv na účinnost parní turbíny a životnost parních lopatek. [7]

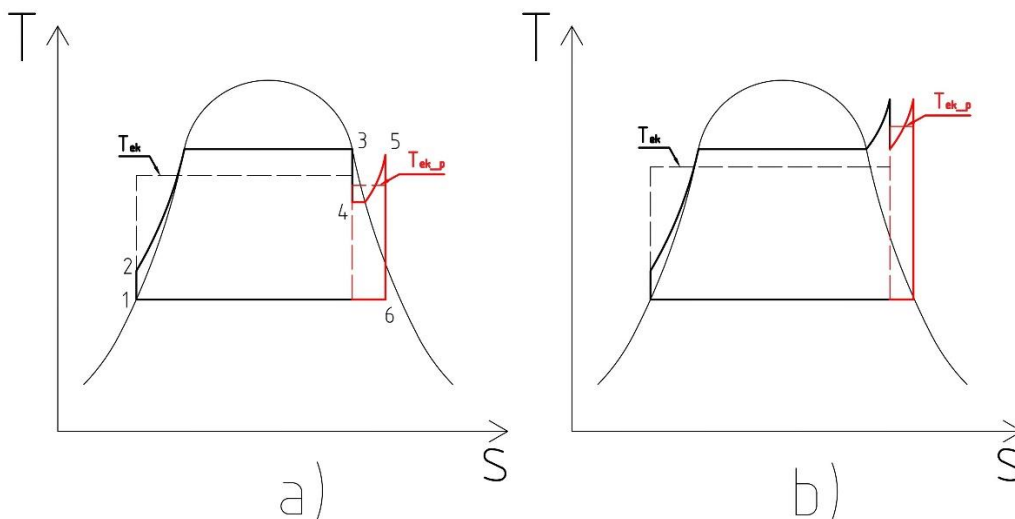


Obrázek 6: Část schématu parní elektrárny s přehřívákem a separátorem (vytvořeno dle [4])

Ve schématu (obr. 6) je zobrazena část oběhu se separátorem a přehřívákem. Část přehřáté páry z parogenerátoru PG se dopraví do vysokotlakého dílu turbíny VT, kde pára expanduje a dodává energii parním lopatkám. Po výstupu z VT je pára dopravena do separátoru a přehříváku SP. Separátor odvlhčí páru a v přehříváku dochází v ideálním případě k izobarickému ohřevu. K ohřevu se používá odběrová pára z parogenerátoru. Z přehříváku putuje pára do nízkotlakého dílu parní turbíny NT, kde dochází opět k přeměně části tepelné energie na práci turbíny. Toto schéma zobrazuje způsob přehřívání, který se používá v jaderných elektrárnách s tlakovodním reaktorem. U spalovací elektrárny se proces separace nepoužívá, jelikož je výstupním médiem z vysokotlakého dílu turbíny přehřátá pára a proces přehřívání probíhá přímo v kotli.

Přehřívání může mít pozitivní vliv na tepelnou účinnost celkového oběhu. Aby však byla tepelná účinnost celkového oběhu s přehříváním vyšší než účinnost bez přehřívání, musí být ekvivalentní teplota přídavného přehřívacího cyklu $T_{ek,p}$ větší než ekvivalentní teplota základního cyklu bez přehřívání T_{ek} . Ekvivalentní teplotou rozumíme maximální teplotu náhradního Carnotova cyklu se stejnou účinností jako má reálný oběh. Zároveň se však při zvyšování teploty páry na vstupu do přehříváku snižuje termodynamická účinnost parní turbíny vlivem vyšší vlhkosti mokré páry v posledních stupních nízkotlakého dílu parní turbíny. Vliv přehřívání na tepelný oběh je spolu s náhradními Carnotovými oběhy zobrazen v T-s diagramu na obr. 7.

Jednou z možností jak využít větší účinnost z větší teploty páry na vstupu do přehříváku a zároveň minimalizovat snížení termodynamické účinnosti nízkotlakého dílu turbíny, je použití dvou přehřívacích zařízení. Ovšem při použití každého dalšího přehříváku se celková konstrukce zařízení komplikuje a je finančně nákladnější.



Obrázek 7: T-s diagram tepelného oběhu s přehříváním a) pro jaderné elektrárny b) pro spalovací elektrárny

U jaderných elektráren neslouží přehřívání ke zvýšení tepelné účinnosti, ale především k odstranění vlhkosti mokré páry. Jak je patrné z obr. 7a), ekvivalentní teplota přehřívacího cyklu je menší než ekvivalentní teplota cyklu základního, tepelná účinnost je tedy po zavedení přehřívání nižší. Pro správnou funkci oběhu je zde ale proces separace – přehřívání nezbytný.

U spalovacích elektráren mívá přehřívací cyklus vyšší ekvivalentní teplotu než cyklus základní, jak je zobrazeno na obr. 7b), proces přehřívání tudíž zvyšuje účinnost celého oběhu. Děje se tak z důvodu upřednostnění části oběhu s nejvyšší účinností, celý cyklus se tak přiblíží k ideálnímu Carnotovu cyklu, proto se pro proces přehřívání někdy používá pojem carnotizace. Carnotizaci lze provést i skrze upozadění části cyklu s nejmenší účinností, k tomu se používá proces regenerace napájecí vody. [4]

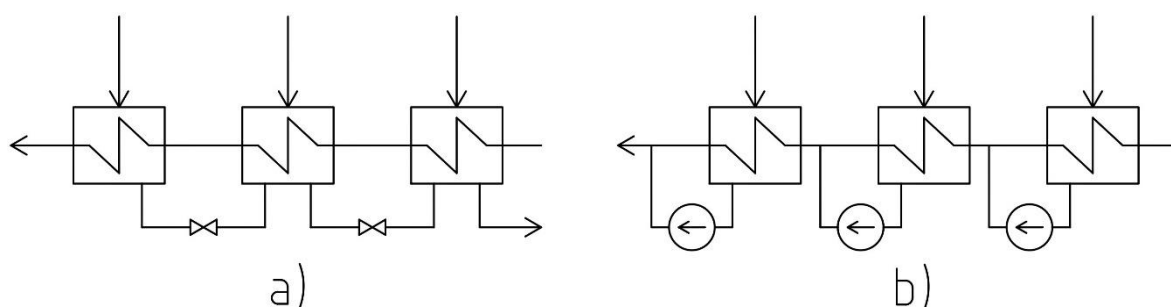
2.5 Regenerace napájecí vody

Ke zvýšení účinnosti oběhu se používá proces regenerace. Jedná se o postupný ohřev kondenzátu (napájecí vody) před vstupem do parogenerátoru. K ohřevu se používá většinou odběrová pára z parní turbíny. U velkých tepelných bloků bývá 6 – 8 (výjimečně 9) ohříváků. K ideálnímu rozmístění ohříváků se volí taková místa, aby byl přírůstek entalpie případně teploty stejný v každém ohříváku. K dosažení tohoto ideálního stavu jsme však limitováni různými entalpickými spády odběrové páry, mezi jednotlivými stupni parní turbíny.

Regenerační systém se rozděluje dle tlaku vody v hlavním proudu na vysokotlakou regeneraci a nízkotlakou regeneraci. Nízkotlaké ohříváče postupně snižují teplotní a entalpický spád v úseku od kondenzátoru k napájecí nádrži. Napájecí nádrž s odplyňovačem je posledním stupněm nízkotlaké regenerace. Vysokotlaké ohříváky se nacházejí mezi napájecí nádrží a parogenerátorem s cílem ohřátí napájecí vody a snížení teplotního a entalpického spádu v této oblasti. Vysokotlaké ohříváky jsou obvykle nákladnější a konstrukčně složitější, proto se používají v menším množství než ohříváky nízkotlaké a mezi jednotlivými stupni vysokotlaké regenerace bývá ze stejného důvodu také větší entalpický a teplotní spád. Ve velkých tepelných blocích se používají 1 – 3 vysokotlaké ohříváky. [4]

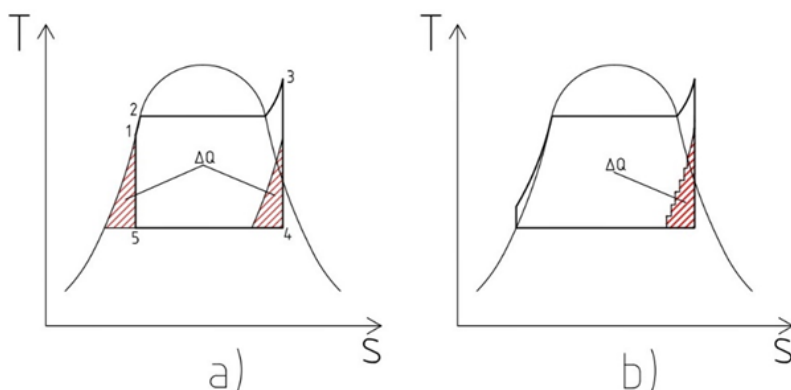
Ohříváky jsou tepelné výměníky typu pára – voda. Topná pára z turbíny dodá napájecí vodě veškeré skupenské teplo a změní své skupenství z plynného na kapalné. Výsledný kondenzát z topné páry je pak nutné odvést pryč. K tomuto odvodu se používají dva

způsoby. Jedním způsobem je kaskádování, jedná se o postupný odvod kondenzátu z tlakově výše umístěného ohříváku k ohříváku s nižším tlakem. Konečnou stanicí kaskádování bývá kondenzátor pro kondenzát z nízkotlakých ohříváků a napájecí nádrž pro kondenzát z ohříváků vysokotlakých. Kaskádování (obr. 8a)) je jednoduchý, ale z důvodu míšení dvou odběrů topného média s rozdílnými teplotami také termodynamicky méně výhodný způsob odvodu vody z topné páry. Ke tlakovému vyrovnání mezi jednotlivými ohříváky se kondenzát přepouští skrze redukční ventil, kde dochází k expanzi kondenzátu a část kondenzátu se odpaří, což představuje ztrátu, jelikož zde není využita uvolněná energie z expandující páry. Ke snížení vlivu tohoto nežádoucího jevu je možné topný kondenzát podchladiť pod teplotu syté vody, vyžaduje to však vyšší investiční náklady. Druhým konstrukčně složitějším způsobem odvodu kondenzátu je přečerpávání (obr. 8b)), kde čerpadlo dopraví kondenzát do hlavního proudu napájecí vody před ohřívák. V praxi se pak setkáme s kombinací obou způsobů. U vysokotlakých ohříváčů bývá volen pouze způsob kaskádování až do napájecí nádrže, protože tlaková výše je pro přečerpávání značně velká.



Obrázek 8: Odvod kondenzátu z topné páry a) kaskádování b) přečerpávání (vytvořeno dle [1])

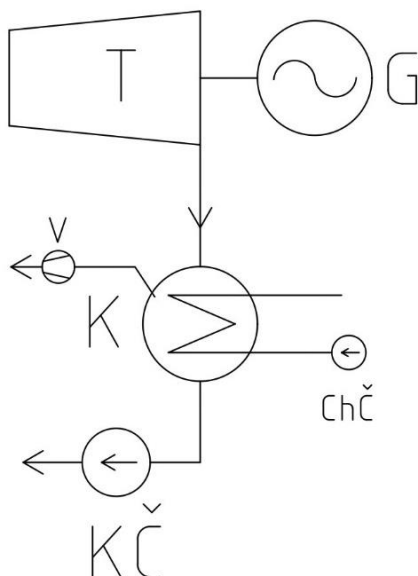
Vliv regenerace na tepelný oběh je zobrazen v T-s diagramu na obr. 9. Při nekonečném množství ohříváku (obr. 9a)) je levá křivka ohraničující odebrané teplo ΔQ shodná s příslušnou částí levé mezní křivky syté vody. Tepelný oběh s regenerací se dá pak vyjádřit plochou 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 1. Z diagramu je patrné, že proces regenerace upozadí část oběhu s nejmenší účinností, tato skutečnost se v praxi projevuje nižší spotřebou tepla z parogenerátoru potřebného na ohřev napájecí vody. Parogenerátor pak dodává většinu tepla pouze na fázovou přeměnu pracovní látky, což je hlavní důvod zvýšení účinnosti oběhu s regenerací. Pro konečný počet ohříváků je odebrané teplo ΔQ zobrazeno na obr. 9b). Se zvyšujícím se počtem ohříváků se křivka ohraničující odebrané teplo přibližuje ideálnímu stavu s nekonečným počtem ohříváků. Se zvyšujícím se počtem ohříváků se tedy zvyšuje i tepelná účinnost cyklu, avšak přírůstek účinnosti klesá s každým dalším ohřívákem.



Obrázek 9: Tepelný oběh s regenerací a) s nekonečně stupni regenerace b) se šesti stupni regenerace (vytvořeno dle [1])

Postupný odběr páry také snižuje nároky na velikost lopatek v posledních stupních parní turbíny. To nám umožňuje zvýšit průtok v prvních stupních turbíny a dosáhnout tak vyšších výkonů. [1]

2.6 Kondenzace



Obrázek 10: Schéma oblasti kondenzace

Kondenzační zařízení je tepelný výměník, který slouží k odvodu tepla emisní páry a realizuje fázovou přeměnu páry na kondenzát. Schéma oblasti kondenzačního zařízení je zobrazeno na obr. 10.

Pára je po výstupu z turbíny dopravena tlakovým spádem do kondenzátoru K. Kondenzace páry probíhá prostřednictvím chladicí vody, která je poháněná čerpadlem ChČ a proudí trubkovým systémem v kondenzátoru. V jaderných elektrárnách se pro oběh chladicí vody někdy používá název terciální okruh elektrárny. Teplo z chladicí vody je odváděno buď do atmosféry prostřednictvím chladících věží, nebo do vody prostřednictvím přírodních vodních systémů.

Přítomnost i malého množství vzduchu v kondenzátoru, který se do kondenzátoru dostane skrze netěsnosti podtlakové části turbíny a kondenzačního zařízení, zvyšuje celkový tlak a snižuje součinitel prostupu tepla, což má negativní vliv na účinnost oběhu. Součástí

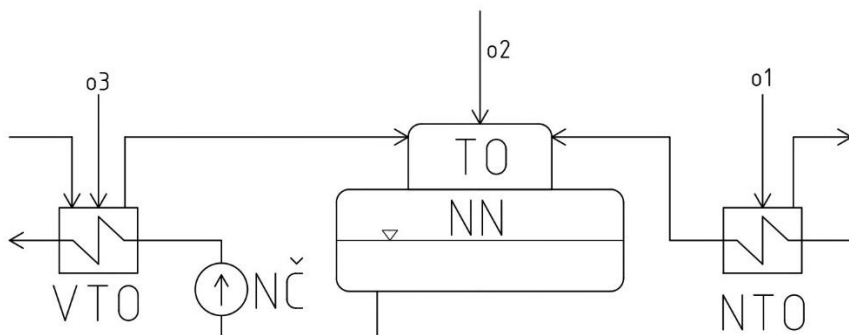
kondenzátoru je proto vývěva V, která má za úkol odsávat vzduch ze zařízení. Kondenzátor se také skládá ze sběrné nádrže, ze které je výsledný kondenzát pracovní látky kontinuálně odváděn pomocí kondenzátního čerpadla KČ.

Zvýšení účinnosti skrze kondenzátor lze provést snížením teploty v kondenzátoru, jejímž důsledkem se sníží i tlak emisní páry, čímž se zvýší tlakový spád v oblasti parní turbíny. Na T-s diagramu dle obr. 3 tato modifikace způsobí posun křivky 4 – 1 směrem k nižší teplotě, tudíž dojde ke snížení hodnoty odvedeného tepla q_{OUT} a o to větší práci vykoná každý kilogram páry expandující v turbíně. K tomuto zvýšení účinnosti lze použít tři způsoby. Jedním ze způsobů je zvýšení průtoku chladicí kapaliny. Nevýhodou tohoto způsobu je větší spotřeba elektrické energie potřebná na pohon čerpadel pro chladicí kapalinu. Druhým způsobem je zrychlení odvodu tepla zvětšením teplosměnné plochy kondenzátoru, tento způsob však požaduje zvýšené pořizovací náklady. Posledním a zároveň nejefektivnějším způsobem ke zvýšení tepelné účinnosti je snížení teploty chladicí kapaliny, zde jsme však limitováni klimatickými podmínkami okolí. Z tohoto zároveň vyplývá, že v zimním období bude mít parní elektrárna vyšší účinnost než v obdobím letním.

Při snižování tlaku v kondenzátoru výkon nejprve vzrůstá, později však dosahuje maxima a začne klesat. Děje se tak z důvodu vyšší spotřeby tepla potřebného na regeneraci kondenzátu, pro jeho ohřátí se zvýší odběr páry do prvního regeneračního ohříváku, což má za následek snížení průtoku páry posledními stupni turbíny a s tím související snížení výkonu. [1], [7]

2.7 Napájecí nádrž a termický odplyňovač

Napájecí nádrž se nachází v oblasti mezi vysokotlakými a nízkotlakými ohříváky a slouží k dobré funkci napájecích čerpadel, pro nestacionární provozní režimy a pro krytí neočekávaných ztrát vody. Nad nádrží se nachází termický odplyňovač, který má za úkol odstranit nežádoucí plyny z napájecí vody.



Obrázek 11: Zjednodušené schéma napájecí nádrže s odplyňovačem

Ve schématu na obr. 11 je zobrazena část oběhu s napájecí nádrží a odplyňovačem. Kondenzát z nízkotlakých ohříváků NTO je přiváděn do vrchní části termického odplyňovače TO, kde dochází k jeho ohřevu. K ohřevu se používá odběrová pára ve schématu značena jako o2. Na rozdíl od vysokotlakých a nízkotlakých ohříváku neprobíhá ohřev v odplyňovači skrze tepelný výměník, pára tu bývá vháněna přímo do systému. K dosažení dobrého odplynění je potřeba zajistit dostatečnou kontaktní plochu mezi vodou a topnou parou a musí být zajištěna určitá doba styku, ohřívána voda bývá proto do systému rozstříkovaná ve formě malých kapek. K dosažení dostatečné doby kontaktu lze použít kaskádovou formu spádu kondenzátu z odplyňovače do napájecí nádrže NN. Napájecí voda je následně z nádrže přečerpána napájecím čerpadlem NČ do oblasti vysokotlaké regenerace VTO a dále do oběhu. Kondenzát topné páry z VTO bývá kaskádově dopraven až do termického odplyňovače, kde prochází stejným procesem jako kondenzát z hlavního proudu po nízkotlaké regeneraci.

Pro oblast regenerace je důležitá volba teploty napájecí vody. Teplotu je nutné volit s ohledem na počet stupňů nízkotlaké a vysokotlaké regenerace a na teplotní spády v jednotlivých ohřívácích. [1], [4]

3 Výpočet tepelného oběhu

V této kapitole je popsán postup výpočtu tepelného oběhu a metoda aplikace výpočtu do výpočetního modelu. Během výpočtu bylo pracováno s řadou zjednodušení. U jednotlivých zařízení je předpokládána 100% účinnost. Mezi další zjednodušení patří zanedbání tlakových a tepelných ztrát. Teplota výstupního kondenzátu z kondenzátoru je volený parametr, tudíž nedochází k automatické změně stavových veličin po změně hmotnostního průtoku. Dále se při výpočtu zanedbává příkon všech čerpadel, krom čerpadel napájecích, k jejichž pohonu je využita odběrová pára. U přečerpávacích čerpadel je zanedbána změna energie po změně tlaku vody.

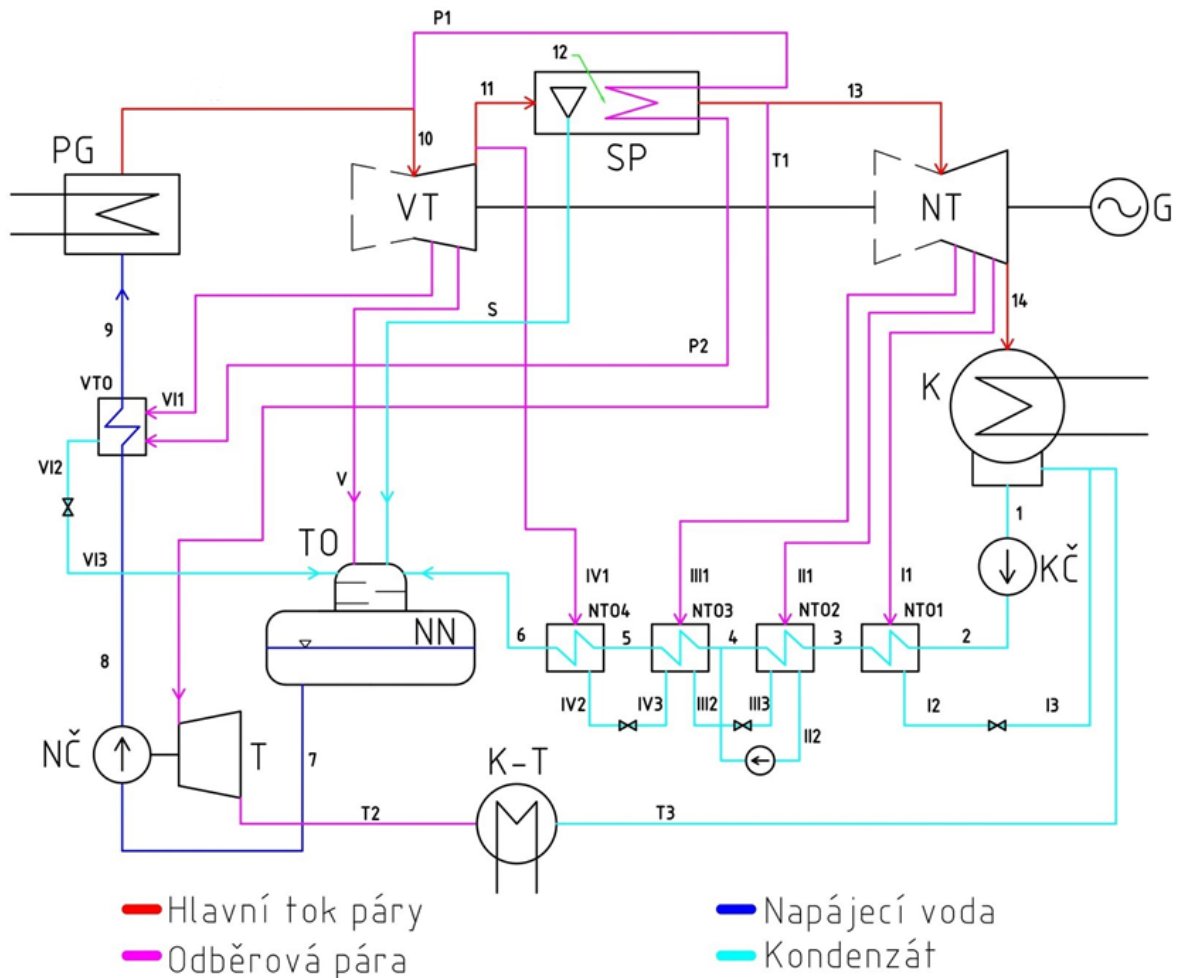
Jako předloha výpočetního modelu byl využit tepelný oběh sekundárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín.

3.1 Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín je elektrárna s největším instalovaným výkonem v České republice a produkuje zhruba 20 % veškeré elektřiny v ČR (20,67 % za rok 2022 [8], [9]). Elektrárna je složena ze dvou výrobních bloků s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V320. Oba reaktory mají instalovaný elektrický výkon 1125 MW. Stavba jaderné elektrárny Temelín začala roku 1987. První elektřinu vyrobil první blok v roce 2000 a do provozu byla elektrárna uvedena v letech 2002 až 2003. [10]

Součástí sekundárního bloku Jaderné elektrárny Temelín je parní turbína tvořena jedním vysokotlakým dílem a třemi paralelně řazenými nízkotlakými díly. Podél turbíny se nachází horizontální separátor – přihřívák, do kterého putuje pára po výstupu z vysokotlakého dílu turbíny. Pod každým nízkotlakým dílem turbíny se nachází kondenzátor. Systém regenerace kondenzátu a napájecí vody je tvořen čtyřmi nízkotlakými ohříváky, napájecí nádrží s termickým odplyňovačem a jedním stupněm vysokotlaké regenerace. Druhý nízkotlaký ohřívák má přečerpávací odvod kondenzátu z topné páry, zbylé tepelné výměníky regeneračního systému používají kaskádový odvod kondenzátu. Součástí oběhu jsou 4 napájecí čerpadla poháněna parními turbínami, které pro svůj pohon využívají odběrovou páru z oblasti na výstupu z přihříváku. [11]

Pro zjednodušení výpočtu byli z oběhu vyřazeny nedůležité větve a vybrané paralelně umístěné zařízení byli nahrazeny za jedno ekvivalentní zařízení, toto zjednodušení se týká například nízkotlakých dílů turbíny nebo napájecích čerpadel. Zjednodušené schéma sekundárního bloku je zobrazeno na obr. 12.



Obrázek 12: Zjednodušené schéma tepelného oběhu jaderné elektrárny Temelín (vytvoreno dle [11])

Pro tepelný oběh, který je zobrazen na obr. 12, byl proveden veškerý výpočet. Dle schématu byli vytvořeny bilanční rovnice a indexace konkrétních stavových veličin odpovídá popisům jednotlivých potrubních větví.

3.2 Výpočet tepelné účinnosti

Pro výpočet tepelné účinnosti je nejprve nutné sestavit hmotnostní bilanční rovnice pro potrubní větve tepelného oběhu a energetické bilanční rovnice pro jednotlivá zařízení. Neznámou všech rovnic budou poměrné hodnoty hmotnostních průtoků (15).

$$\alpha_i = \frac{m_i}{m} \quad (15)$$

3.2.1 Bilance hmotnostních průtoků

Nejprve si vyjádřím bilanční rovnice relativních hmotnostních průtoků v hlavních větvích tepelného oběhu, které jsou ve schématu na obr. 12 označeny indexy 1 – 14.

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_p - \alpha_{VI1} - \alpha_{V1} - \alpha_{IV1} - \alpha_s - \alpha_{III1} - \alpha_{II1} \quad (16)$$

$$\alpha_3 = \alpha_1 \quad (17)$$

$$\alpha_4 = \alpha_3 \quad (18)$$

$$\alpha_5 = \alpha_4 + \alpha_{II1} + \alpha_{III1} + \alpha_{IV1} \quad (19)$$

$$\alpha_6 = \alpha_5 \quad (20)$$

$$\alpha_7 = \alpha_6 + \alpha_{VI1} + \alpha_{V1} + \alpha_S \quad (21)$$

$$\alpha_{10} = 1 - \alpha_P \quad (22)$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{10} - \alpha_{VI1} - \alpha_{V1} - \alpha_{IV1} \quad (23)$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{11} - \alpha_S \quad (24)$$

$$\alpha_{13} = \alpha_{12} - \alpha_T \quad (25)$$

$$\alpha_{14} = \alpha_{13} - \alpha_{III1} - \alpha_{II1} - \alpha_{I1} \quad (26)$$

Hmotnostní průtok ve větvi S bude roven průtoku odseparovaného kondenzátu, který se vyjádří dle rozdílu suchostí před separátorem a za ním.

$$\Delta x = x_{12} - x_{11} \quad (27)$$

$$\alpha_S = (1 - \alpha_P - \alpha_{VI} - \alpha_V - \alpha_{IV}) \cdot \Delta x \quad (28)$$

3.2.2 Bilance energií

Pro zjištění hmotnostního průtoku potřebného pro funkci napájecího čerpadla byla sestavena energetická bilanční rovnice hlavní větve na jedné straně a větve T na straně druhé. Pro zjednodušení bylo pracováno s předpokladem konstantní hustoty v oblasti 7 – 8. Hustota pro výpočet byla vyjádřena jako aritmetický průměr z hustot skutečných. Dalším předpokladem je stejná teplota v kondenzátoru K–T a v hlavním kondenzátoru K, entalpie ve větvi T2 bude tady stejná jako entalpie v potrubní větvi 14.

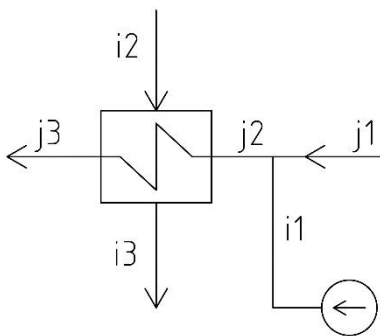
$$\frac{2 \cdot (P_8 - P_7)}{\rho_8 - \rho_7} = \alpha_T \cdot (h_{13} - h_{14}) \quad (29)$$

Pro přehřívák bude bilanční rovnice vypadat následovně (30).

$$\alpha_P \cdot (h_{P1} - h_{P2}) = \alpha_{12} \cdot (h_{13} - h_{12}) \quad (30)$$

V termickém odplyňovači s napájecí nádrží probíhá směšování a energetická bilanční rovnice bude vypadat následovně (31).

$$\alpha_7 \cdot h_7 = \alpha_6 \cdot h_6 + \alpha_S \cdot h_S + \alpha_V \cdot h_V + \alpha_{VI1} \cdot h_{VI3} + \alpha_P \cdot h_{VI3} \quad (31)$$



V případě, že se před ohřívákem vyskytuje směšování, tak v této oblasti vzniknou 3 bilanční rovnice. Energetická pro tepelný výměník a hmotnostní a energetická v oblasti míšení. Za účelem zjednodušení výpočetního programu je v takovém případě již předem provedeno dosažení neznámých veličin z prostřední větve, která je v ilustračním schématu na obr. 13 označena indexem j2, do rovnice pro ohřívák. Tato situace se ve výchozím tepelném oběhu vyskytuje u nízkotlakého ohříváku NTO3.

Obrázek 13: Ilustrační schéma tepelného výměníku a směšování

Hmotnostní rovnice směšování:

$$\alpha_{j2} = \alpha_{j1} + \alpha_{i1} \quad (32)$$

Energetická rovnice pro směšování:

$$h_{j2} \cdot \alpha_{j2} = h_{j1} \cdot \alpha_{j1} + h_{i1} \cdot \alpha_{i1} \quad (33)$$

Energetická rovnice pro tepelný výměník:

$$\alpha_{i2} \cdot (h_{i2} - h_{i3}) = \alpha_{j2} \cdot (h_{j3} - h_{j2}) \quad (34)$$

(32) dosadím do (33) a vyjádřím h_{j2} .

$$h_{j2} = \frac{h_{j1} \cdot \alpha_{j1} + h_{i1} \cdot \alpha_{i1}}{\alpha_{j1} + \alpha_{i1}} \quad (35)$$

(32) a (35) dosadím do (34) a získám jednu ekvivalentní bilanční rovnici.

$$\alpha_{i2} \cdot (h_{i2} - h_{i3}) = \alpha_{j1} \cdot (h_{j3} - h_{j1}) + \alpha_{i1} \cdot (h_{j3} - h_{i1}) \quad (36)$$

Pro konkrétní ohříváky tepelného oběhu Jaderné elektrárny Temelín budou energetické bilanční rovnice vypadat následovně (37) – (41).

NTO1:

$$\alpha_2 \cdot (h_3 - h_2) = \alpha_{I1} \cdot (h_{I1} - h_{I2}) \quad (37)$$

NTO2:

$$\alpha_3 \cdot (h_4 - h_3) = \alpha_{II1} \cdot (h_{II1} - h_{II2}) + \alpha_{III1} \cdot (h_{III3} - h_{II2}) + \alpha_{IV1} \cdot (h_{III3} - h_{II2}) \quad (38)$$

NTO3:

$$\alpha_4 \cdot (h_5 - h_4) + \alpha_{II1} \cdot (h_5 - h_{II2}) = \alpha_{III1} \cdot (h_{III1} - h_{III2} + h_{II2} - h_5) + \alpha_{IV1} \cdot (h_{IV3} - h_{III2} + h_{II2} - h_5) \quad (39)$$

NTO4:

$$\alpha_5 \cdot (h_6 - h_5) = \alpha_{IV1} \cdot (h_{IV1} - h_{IV2}) \quad (40)$$

VTO:

$$\alpha_8 \cdot (h_9 - h_8) = \alpha_{VI1} \cdot (h_{VI1} - h_{VI2}) + \alpha_P \cdot (h_{P2} - h_{IV2}) \quad (41)$$

3.2.3 Výpočet

Celkem bylo sestaveno 20 bilančních rovnic o 20 neznámých. Pro nalezení neznámých hodnot byla využita maticová metoda řešení. Rovnice v maticovém tvaru bude vypadat následovně (42).

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \Delta x \\ 1-\Delta x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta x & \Delta x & \Delta x & 0 & 0 & 0 \\ 1-\Delta x & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\Delta x & 1-\Delta x & 1-\Delta x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_1 & A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_6 & A_7 & A_8 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{10} & A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{14} \\ 0 & -h_{VI3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_6 & -h_7 & -h_5 & -h_{VI3} & -h_{VI1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{15} & 0 & 0 & A_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_P \\ \alpha_{I10} \\ \alpha_{I11} \\ \alpha_{I12} \\ \alpha_{I13} \\ \alpha_T \\ \alpha_{I14} \\ \alpha_4 \\ \alpha_1 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_5 \\ \alpha_{VI1} \\ \alpha_{VI1} \\ \alpha_{III1} \\ \alpha_{III1} \\ \alpha_{II1} \\ \alpha_{I1} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Pro konstanty $A_1 - A_{17}$, B_1 a B_2 z rovnice (42) platí:

$$\begin{aligned} A_1 &= h_{P2} - h_{VI2} & A_{11} &= h_{II2} - h_{III3} \\ A_2 &= h_{VI1} - h_{VI2} & A_{12} &= h_{II2} - h_{II1} \\ A_3 &= h_6 - h_5 & A_{13} &= h_3 - h_2 \\ A_4 &= h_{IV2} - h_{I11} & A_{14} &= h_{I2} - h_{I1} \\ A_5 &= h_5 - h_4 & A_{15} &= h_{P2} - h_{I10} \\ A_6 &= h_{III2} - h_{III3} + h_5 - h_{II2} & A_{16} &= h_{I3} - h_{I2} \\ A_7 &= h_{III2} - h_{III1} + h_5 - h_{II2} & A_{17} &= h_{I3} - h_{I4} \\ A_8 &= h_5 - h_{II2} & B_1 &= h_9 - h_8 \\ A_9 &= h_4 - h_3 & B_2 &= \frac{2 \cdot (P_8 - P_7)}{\rho_8 - \rho_7} \\ A_{10} &= h_{II2} - h_{III3} \end{aligned}$$

V této fázi výpočtu jsou poměrné hodnoty hmotnostních průtoků známe. Pro vyjádření celkového hmotnostního toku je nejprve potřeba dopočítat hodnotu dodaného měrného tepla prostřednictvím parogenerátoru.

$$q_{IN} = h_{10} - h_9 \quad (43)$$

Celkový hmotnostní tok se následně vyjádří jako podíl tepelného výkonu ku dodanému měrnému teplu.

$$m' = \frac{P}{q_{IN}} \quad (44)$$

Dle rovnice (15) lze nyní vyjádřit i zbylé hodnoty hmotnostních toků pro jednotlivé potrubní větve.

Cílem výpočtu je vyjádřit tepelnou účinnost oběhu. Nejprve je však nutné dopočítat práci parní turbíny.

Práce vysokotlakého dílu turbíny:

$$w_{VT} = \alpha_{10} \cdot (h_{10} - h_{VI1}) + (\alpha_{10} - \alpha_{VI1}) \cdot (h_{VI1} - h_V) + (\alpha_{10} - \alpha_{VI1} - \alpha_V) \cdot (h_V - h_{11}) \quad (45)$$

Práce nízkotlakého dílu turbíny:

$$w_{NT} = \alpha_{13} \cdot (h_{13} - h_{III1}) + (\alpha_{13} - \alpha_{III1}) \cdot (h_{III1} - h_{II1}) + (\alpha_{13} - \alpha_{III1} - \alpha_{II1}) \cdot (h_{II1} - h_{I1}) + (\alpha_{13} - \alpha_{III1} - \alpha_{II1} - \alpha_{I1}) \cdot (h_{I1} - h_{14}) \quad (46)$$

Nyní už zbývá jen vyjádřit tepelnou účinnost oběhu jako podíl vykonané práce ku dodanému teplu.

$$\mu = \frac{w_{VT} + w_{NT}}{q_{IN}} \quad (47)$$

3.3 Struktura programu

Výpočetní program byl sestaven v programovacím jazyce Python. Jedná se o open source nástroj s možností využití velkého počtu knihoven umožňující přístup k velkému množství různých funkcí. Struktura vytvořeného programu by se dala rozdělit do tří pomyslných částí.

První část slouží k vyjádření hodnot stavových veličin v jednotlivých větvích. Na základě volených veličin se v programu dopočítají zbylé parametry. Za tímto účelem byla použita knihovna Coolprop, která pomocí dvou vhodných a známých veličin umožňuje získat neznámé termofyzikální parametry pro konkrétní látku, v tomto případě vodu a vodní páru. V rámci zjednodušení se u veškerých kompresí a expanzí předpokládá izoetropická změna stavu. Pro veškeré ohřevy a ochlazení je počítáno jako s izobarickými ději.

Druhá část programu plní účel výpočtu neznámých veličin ze sestavených bilančních rovnic. Výsledkem výpočtu budou poměrné hmotnostní průtoky. K výpočtu sestavené maticové rovnice byly využity funkce z knihovny numpy. Obecný princip zápisu výpočtu v programovacím jazyce Python je stručně popsán na obr. 14.

```
# Vložení používané knihovny
import numpy as np
# Matice koeficientů
A = np.array([[a11, a12, ..., a1n],
              [a21, a22, ..., a2n],
              ...,
              [am1, am2, ..., amn]])
# Vektor konstant
B = np.array([b1, b2, ..., bm])
# Využití funkce numpy.linalg.solve() k vyřešení soustavy lineárních rovnic
X = np.linalg.solve(A, B)
# Výsledkem bude vektor s hodnotami hledaných neznámých
```

Obrázek 14: Zápis výpočtu v Pythonu

Součástí této části je také proces změny bilančních rovnic po případném přenastavení oblasti nízkotlaké regenerace, ať už skrze odstranění vybraných ohříváku nebo přenastavením odvodu kondenzátu z topné páry, případně kombinací obou těchto způsobů modifikace tepelného oběhu. Závěrem této části je výpočet tepelné účinnosti oběhu.

Třetí část programu se zabývá vizuální stránkou výpočetního modelu. Výsledkem výpočtu je tepelná účinnost, jejíž hodnota je zobrazena na T-s diagramu vodní páry. K tvorbě diagramu byli využity funkce z knihovny matplotlib. Diagram se vždy přizpůsobí aktuálnímu přenastavení volených parametrů stejně jako tabulka hmotnostních průtoků a tabulka stavových veličin pro jednotlivé větve tepelného oběhu, které jsou také zobrazeny po spuštění výpočtu. Tabulky byly vytvořeny pomocí knihovny tabulate. Volené parametry a modifikace oběhu se mění za pomoci widgetů z knihovny ipywidgets. Pro funkci této knihovny je nutné využít platformu Jupyter Notebook.

3.4 Výpočetní model

Vizualizace rozhraní výpočetního modelu je zobrazena na obr. 15. Pomocí widgetů lze měnit jednotlivé parametry.

Teplota na výstupu z jednotlivých NTO je automaticky nastavena tak, aby byl na každém ze čtyř ohříváků stejný teplotní spád. Po změně hodnoty T_1 se tedy mění i teploty na výstupu z nízkotlakých ohříváků tak, aby teplotní spády odpovídaly ideálnímu stavu. Při zadání ΔT_1 se ΔT_1 přičte k T_1 , ale teploty na výstupu z NTO zůstanou neměnné. Tyto modifikace fungují analogicky pro veličiny T_{10} a ΔT_{10} , kde je namísto NTO zacházeno s teplotním spádem pro VTO. Teploty na výstupu z ohříváků se změni i po modifikaci teploty v napájecí nádrži T_7 . Pro veličinu ΔT_{13} se stanoví hodnota, o jakou bude nižší teplota na vstupu do nízkotlakého dílu turbíny v porovnání s vysokotlakou částí.

Tepelný výkon:

P [MW]

Suchost:

X_{12} [-] X_{p2} [-] X_{14} [-]

Teploota vstupní páry:

T_{10} [°C] 280.00 ΔT_{10} [°C] ΔT_{13} [°C]

Kondenzátor:

T_1 [°C] 40.00 ΔT_1 [°C]

Napájecí nádrž:

T_7 [°C] 180.00 ΔT_7 [°C]

Kondenzátní čerpadlo:

P_2 [MPa] 1.20

Separátor-přihřívák:

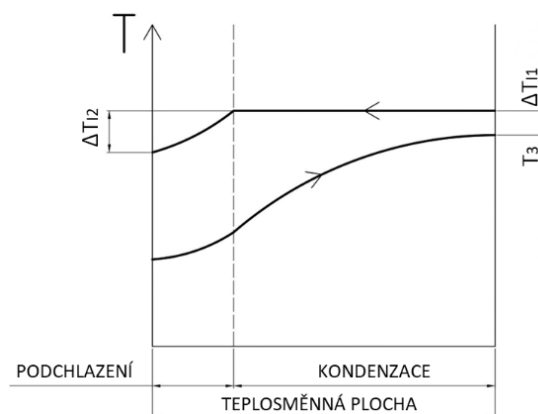
Separátor Přihřívák

Ohříváky:

NT01	NT02	NT03	NT04	VTO
<input checked="" type="checkbox"/> Aktivní	ΔT_3 [°C] <input type="text" value="0"/>	ΔT_{11} [°C] <input type="text" value="4"/>	ΔT_{12} [°C] <input type="text" value="0"/>	Odvod: Kaskádový <input type="text"/>

Obrázek 15: Rozhraní výpočetního modelu

Veškeré modifikace pro ohříváky byly seřazeny do překlikávacích karet. U nízkotlakých ohříváku lze měnit odvod kondenzátu z topné páry a také lze jednotlivé ohříváky úplně vyřadit z oběhu. Dále je zde možné měnit hodnoty teplot topného média a hlavního proudu kondenzátu. Vysvětlení volených teplot pro NTO1 je uvedeno na obr. 16. Parametr ΔT_3 se přičte k automaticky dopočítané T_3 . U ostatních ohříváků se teploty mění analogicky. U NTO4 nelze měnit teplotu topné páry, protože odběr probíhá z potrubní větve s pevně danými parametry.



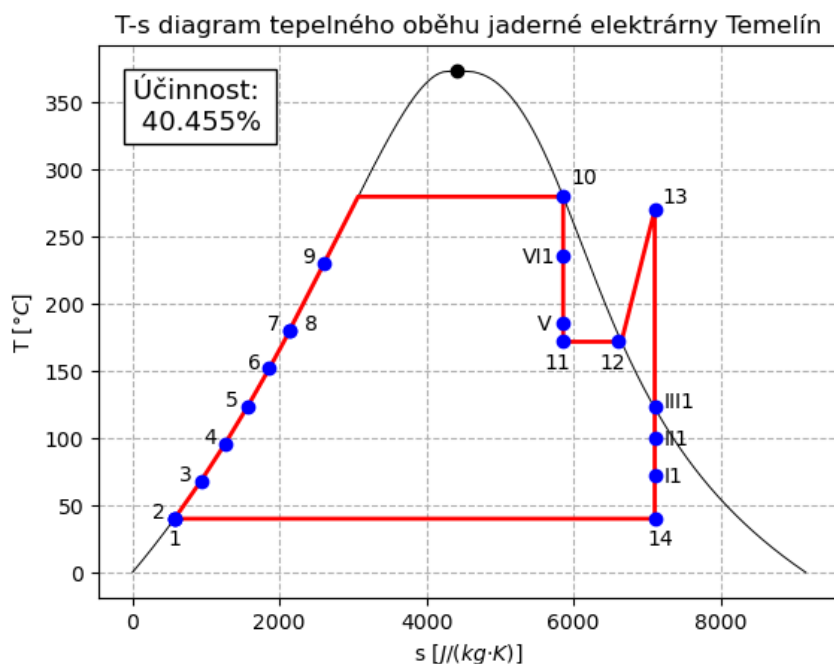
Obrázek 16: průběh teplot ve výměníku NTO1

Po spuštění programu jsou veškeré widgety nastaveny na výchozí hodnoty. Jedná se o orientační hodnoty, které byly zvoleny na základě zdrojů [4] a [10]. V tabulce 1 jsou zobrazeny veškeré hodnoty po spuštění výpočtu z výchozích hodnot.

Tabulka 1: Parametrické hodnoty oběhu pro výchozí stav

	T [°C]	s [J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	h [kJ·kg ⁻¹]	P [MPa]	x [-]	α [-]	\dot{m} [kg·s ⁻¹]
1	40	572	168	0,0074	0,00	0,549	958,1
2	40	572	168	1,2000	-	0,549	958,1
3	68	930	286	1,2000	-	0,549	958,1
4	96	1261	403	1,2000	-	0,549	958,1
5	124	1570	521	1,2000	-	0,652	1137,4
6	152	1861	641	1,2000	-	0,652	1137,4
7	180	2139	763	1,2000	-	1,000	1744,0
8	181	2139	769	6,4166	-	1,000	1744,0
9	230	2603	991	6,4166	-	1,000	1744,0
10	280	5858	2780	6,4166	1,00	0,809	1411,1
11	172	5858	2417	0,8285	0,83	0,724	1261,9
12	172	6604	2749	0,8285	0,99	0,606	1056,9
13	270	7103	2992	0,8285	-	0,598	1043,7
14	40	7103	2213	0,0074	0,85	0,511	891,4
P1	280	5858	2780	6,4166	1,00	0,191	333,0
P2	280	4463	2008	6,4166	0,50	0,191	333,0
S	172	6650	2770	0,8285	0,00	0,118	205,1
T1	270	7103	2992	0,8285	0,83	0,008	13,1
I1	72	7103	2390	0,0340	0,91	0,031	53,6
II1	100	7103	2559	0,1014	0,96	0,026	45,5
III1	128	7103	2740	0,2545	-	0,031	53,3
IV1	172	5858	2417	0,8285	0,83	0,046	80,6
V	186	5858	2470	1,1489	0,84	0,019	33,3
VI1	236	5858	2644	3,1179	0,91	0,020	35,3
I2	72	979	301	0,0340	0,00	0,031	53,6
II2	100	1307	419	0,1014	0,00	0,103	179,6
III2	128	1613	538	0,2545	0,00	0,077	134,3
IV2	172	2060	727	0,8285	0,00	0,046	80,2
VI2	236	2665	1019	3,1179	0,00	0,211	368,0
I3	40	979	295	0,0074	0,05	0,031	53,6
II3	-	-	-	-	-	-	-
III3	100	1613	533	0,1014	0,05	0,077	134,3
IV3	128	2060	717	0,2545	0,08	0,046	80,2
VI3	180	2665	1006	1,2000	0,10	0,211	368,0

Na obr. 17 je zobrazen T-s diagram tepelného oběhu z výchozího stavu spolu s tepelnou účinností oběhu.



Obrázek 17: T-s diagram výchozího stavu

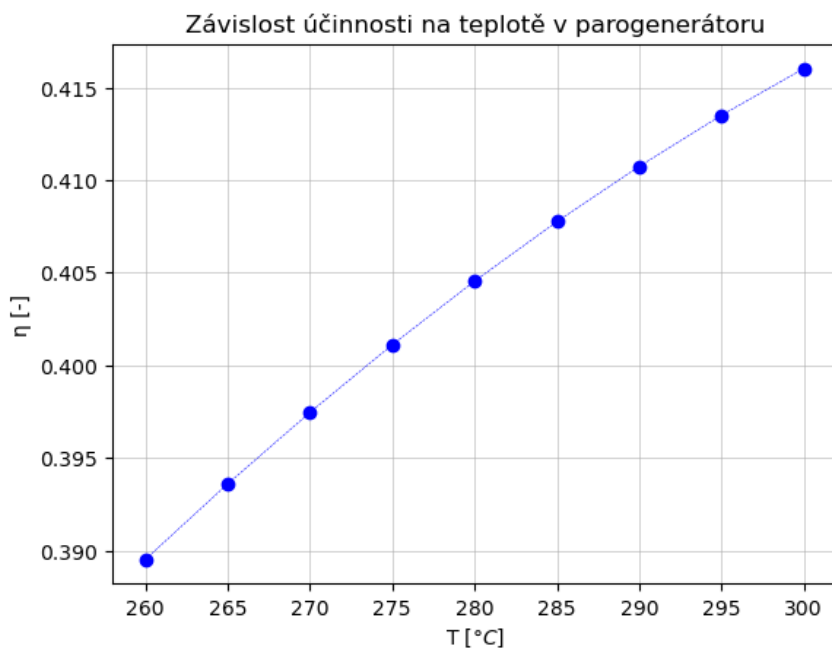
Tepelná účinnost z výchozího stavu hodnot vyjde 40,455%. Účinnost skutečného oběhu bude však mnohem nižší. Kvůli zavedeným zjednodušením, které jsou popsány výše, dochází k nadhodnocení energetické efektivity systému.

3.5 Citlivostní analýza tepelného oběhu

Pomocí vytvořeného výpočetního modelu je možné provádět dílčí modifikace tepelného oběhu a následně pozorovat jejich vliv na celkovou tepelnou účinnost. V této podkapitole jsou provedeny citlivostní analýzy pro vybrané modifikace.

3.5.1 Modifikace teploty vstupní páry

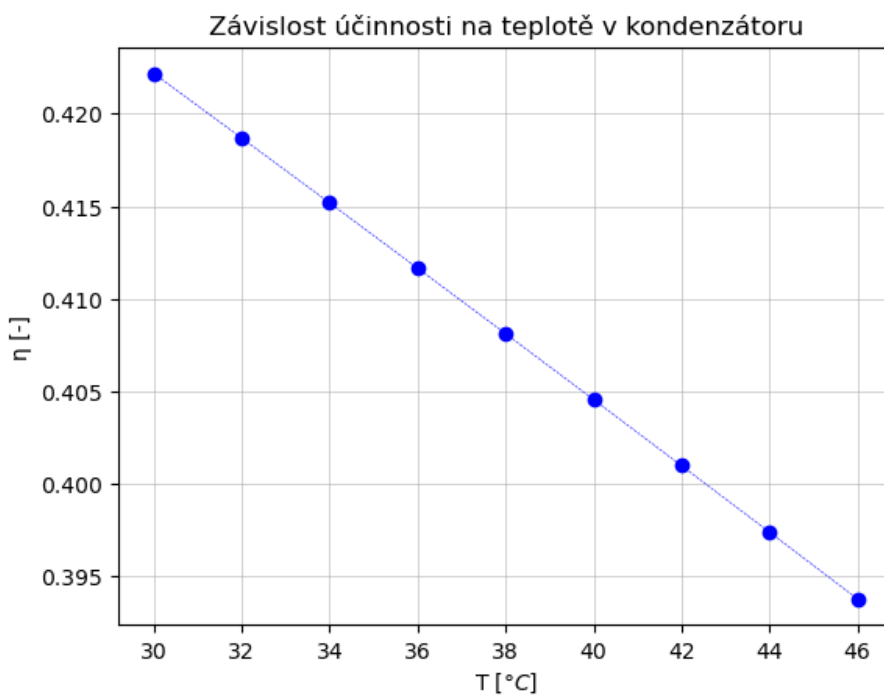
Pro první citlivostní analýzu byla vybrána změna vstupní teploty v parogenerátoru. Pro provedení modifikace byl zvolen interval $(260 - 300)^{\circ}\text{C}$ s krokem 5°C . Modifikace byla prováděna skrze parametr ΔT_{PG} . Výsledky jsou graficky zobrazeny na obr. 18.



Obrázek 18: Závislost účinnosti na teplotě v parogenerátoru

3.5.2 Modifikace teploty v kondenzátoru

Dále byl zjišťován vliv výstupní teploty z kondenzátoru na celkovou účinnost. Společně se změnou teploty skrze parametr ΔT_K byla měněna i suchost x_{14} , tak aby zůstala entropie s_{14} neměnná. Modifikace byla prováděna v intervalu (30 – 46)°C s krokem 2°C. Výsledky jsou graficky zobrazeny na obr. 19.

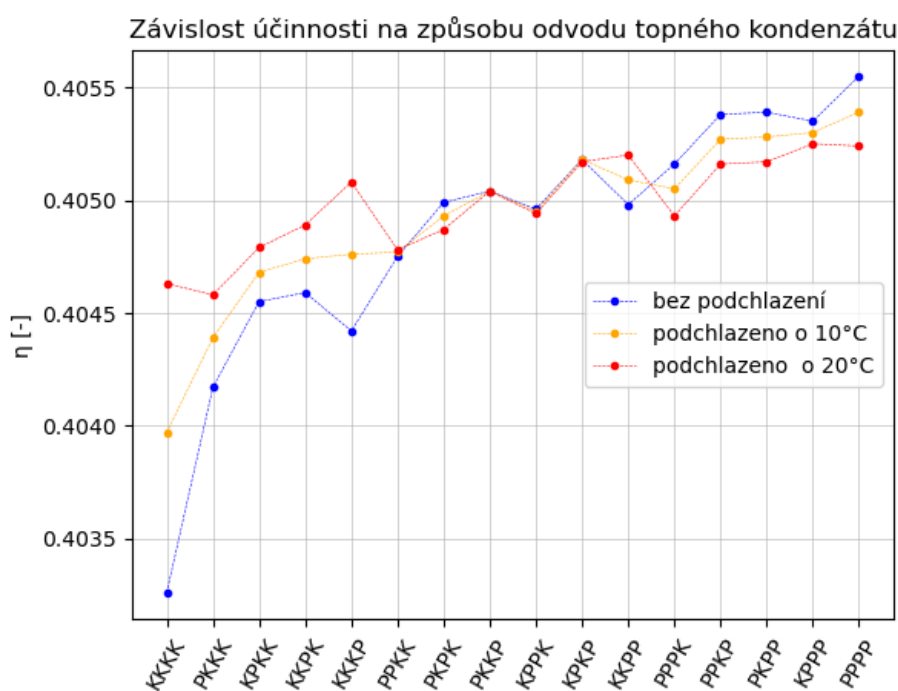


Obrázek 19: Závislost účinnosti na teplotě v kondenzátoru

Dle výsledků je patrná nepřímá úměrnost mezi teplotou v kondenzátoru a celkovou tepelnou účinností. Tato skutečnost odpovídá známým poznatkům z teorie.

3.5.3 Přenastavení odvodu kondenzátu z NTO

Jak již bylo zmíněno, krom parametrických změn stavových veličin lze provádět i modifikace přenastavením samotného oběhu. V oblasti nízkotlaké regenerace lze například změnit odvod kondenzátu z topné páry na kaskádový nebo přečerpání. V následném kroku byl zjišťován vliv odvodu kondenzátu na tepelnou účinnost oběhu. Pro čtyři nízkotlaké ohříváky existuje celkem 16 teoretických způsobů zapojení. Nejdříve byla provedena analýza všech zapojení bez jiných parametrických změn, poté bylo u všech NTO zavedeno podchlazení nejdříve o 10°C a následně o 20°C. Veškeré tyto modifikace jsou spolu s výslednými účinnostmi graficky zobrazeny na obr. 20. Vodorovná osa v grafu značí kombinaci odvodů, K pro kaskádový a P pro přečerpání, které jsou řazeny chronologicky dle číslování ohříváků (nepozměněný oběh bude mít značku KPKK atd.).

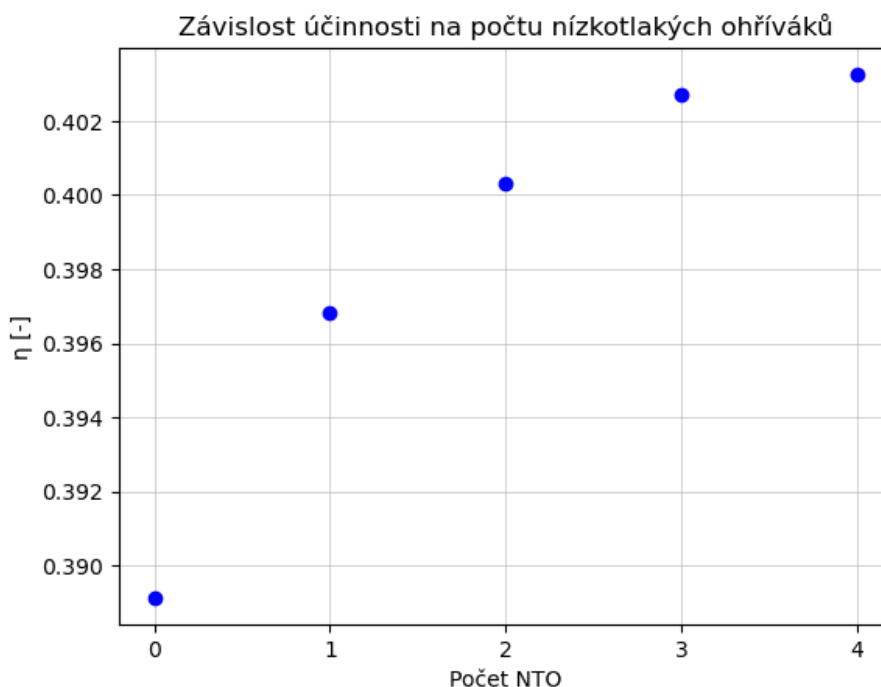


Obrázek 20: Závislost účinnosti na způsobu odvodu topného kondenzátu

Z výsledků je patrný trend zvyšující se účinnosti s přibývajícím počtem ohříváků s přečerpávacím způsobem odvodu. Dále je patrné, že podchlazení má pozitivní vliv na účinnost u ohříváků s kaskádovým odvodem kondenzátu. Naopak u ohříváků s odvodem přečerpávacím má zavedení podchlazovačů negativní vliv na celkovou tepelnou účinnost. Výsledky z této analýzy nelze použít na konkrétní porovnání dvou konkrétních kombinací odvodu kondenzátu z topné páry, protože bylo počítáno s řadou zjednodušení, která mohou mít různý vliv na změnu účinnosti pro různé kombinace. Veškerá zavedená zjednodušení jsou popsána výše.

3.5.4 Vliv počtu NTO na účinnost

Krom změny odvodu kondenzátu lze nízkotlaké ohříváky úplně vyřadit z tepelného oběhu. V dalším kroku je zjišťován vliv počtu NTO na celkovou tepelnou účinnost. Za účelem co nejmenšího zkreslení výsledků byly veškeré ohříváky pro všechny zjišťované případy přenastaveny na kaskádový odvod topného kondenzátu. Zároveň byly měněny teploty na výstupech z ohříváků tak, aby hodnota vždy odpovídala ideálnímu stavu s rovnoměrnými přírůstky teplot a entalpií. Tepelný spád mezi napájecí nádrží a kondenzátorem zůstal nepozměněn. Výsledky jsou graficky zobrazeny na obr. 21.

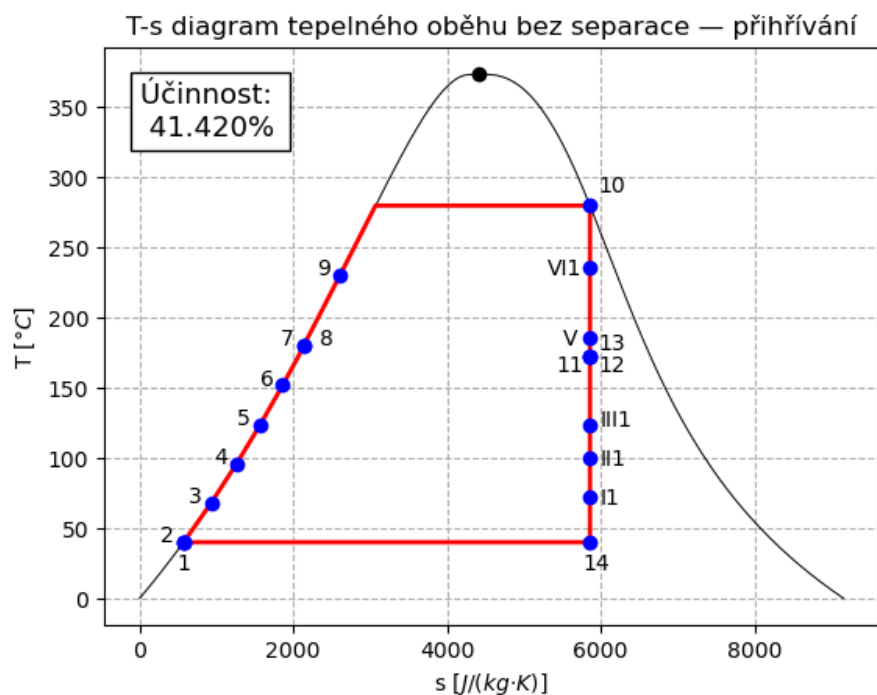


Obrázek 21: Závislost účinnosti na počtu nízkotlakých ohříváků

Z výsledků je krom zvyšující se účinnosti s přibývajícím počtem ohříváků též patrné, že s každým dalším ohřívákem se snižuje přírůstek tepelné účinnosti. Tato skutečnost je v souladu se známou teorií.

3.5.5 Vliv separace – přihřívání na účinnost

Nízkotlaké ohříváky nejsou jediná zařízení, která lze ve výpočetním modelu z tepelného oběhu vyřadit. Další zařízení, které lze takto vyřadit z oběhu je separátor – přihřívák. V následném kroku je provedena analýza vlivu tohoto zařízení na tepelný oběh. Výsledný oběh po vyřazení separátoru – přihříváku je zobrazen v T-s diagramu na obr. 22.



Obrázek 22: T-s diagram tepelného oběhu bez separace – přehřívání

Z výsledku je patrné, že primární funkcí separace – přehřívání u jaderných elektráren s tlakovodním reaktorem skutečně není zvýšení účinnosti, jelikož je celková tepelná účinnost větší bez použití tohoto zařízení. Z výsledků stavových veličin je patrný i primární účel tohoto zařízení a to je snížení vlhkosti páry v posledních stupních parní turbíny. Bez separace a přehřívání by suchost dosahovala jen 68,8 %, což je příliš velká vlhkost pro provoz. Suchost páry spolu s dalšími stavovými veličinami na výstupu z nízkotlakého dílu turbíny jsou zobrazeny v tabulce 2.

Tabulka 2: stavové veličiny na výstupu z nízkotlakého dílu turbíny bez SP

index	T [°C]	s [J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	h [kJ·kg ⁻¹]	P [MPa]	x [-]	α [-]	m [kg·s ⁻¹]
14	40	5858	1823	0,0074	0,688	0,618	1078,2

4 Závěr

Cílem této práce bylo sestavit výpočetní model pro výpočet tepelné účinnosti parní elektrárny v programovacím jazyce Python, který se osvědčil jako vhodný nástroj na tvorbu modelů tohoto typu. Python poskytuje přístup k široké škále knihoven, které usnadnily proces tvorby výpočetního modelu a samotného výpočtu. Výpočet byl proveden pro zjednodušený tepelný oběh sekundárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín.

Vytvořený výpočetní model umožňuje modifikovat termofyzikální parametry v různých částech tepelného oběhu a odebrat určitá zařízení. Z tepelného oběhu je možné odebrat separátor, příhřívák a nízkotlaké ohříváky. U nízkotlakých ohříváků lze navíc měnit způsob odvodu kondenzátu z topné páry. Veškeré tyto modifikace je možné kombinovat a pozorovat jejich vliv na tepelnou účinnost. Závěr třetí kapitoly této práce se zaměřuje na citlivostní analýzu vybraných dílčích modifikací, které byly provedeny pomocí vytvořeného modelu. Výsledky provedených analýz jsou v souladu se známými teoretickými poznatky z druhé kapitoly.

Výstupem z výpočetního modelu jsou také podrobné informace o hmotnostních tocích a termofyzikálních parametrech v jednotlivých potrubních větvích. Výsledná hodnota tepelné účinnosti je zobrazena na T-s digramu aktuálního stavu tepelného oběhu.

Výpočet nevede k přesnému určení reálné účinnosti Jaderné elektrárny Temelín při konkrétním provozním stavu, ale pouze k tepelné účinnosti oběhu, která je získána s použitím několika zjednodušení a se zanedbáním tlakových a tepelných ztrát. Při výpočtu nebyly zohledněny ztráty na konkrétních zařízeních ani vlastní spotřeba elektrické energie. Z důvodu těchto zjednodušení dochází k nadhodnocení energetické efektivity systému. Skutečná účinnost oběhu je tedy mnohem nižší než vypočítaná tepelná účinnost.

Pro další vývoj modelu je možné přiblížit ho k reálným podmínkám. Jednou z možností je započítat účinnosti reálných zařízení do sestavených bilančních rovnic a zahrnout tlakové a tepelné ztráty do výpočtu termofyzikálních parametrů. To by vedlo k dosažení přesnějšího výpočtu výsledné účinnosti.

Seznam použitých zdrojů

- [1] J. Kadrnožka, *Tepelné elektrárny a teplárny*. SNTL, 1984.
- [2] I. Středa, *Základy rovnovážné termodynamiky*. Technická univerzita v Liberci, 2018.
- [3] J. Mayer, *Energetické stroje: Vysokošk. příručka pro strojní fak.* SNTL, 1969.
- [4] L. Krajíc, *Parní turbíny a příslušenství*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [5] J. Škorpík, *Jaderná energetika, Transformační technologie*. 2022. [Online]. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika_2022.html
- [6] J. Bečvář, *Tepelné turbíny*. SNTL, 1968.
- [7] J. Doležal, *Jaderné a klasické elektrárny*. České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [8] „Domácnosti v roce 2022 rekordně šetřili elektřinou“, Energetický regulační úřad. [cit. 2023-02-16]. [Online]. Dostupné z: https://www.eru.cz/domacnosti-v-roce-2022-rekordne-setrily-elektřinou#_ftn1
- [9] „České jádro dodalo nejvíc elektřiny v historii“, ČEZ. [cit. 2023-02-16]. [Online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/ceske-jadro-dodalo-nejvic-elektřiny-v-historii-170146>
- [10] „Jaderná elektrárna Temelín“, ČEZ. [cit. 2023-02-01]. [Online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete>
- [11] M. Novák, *Jaderná elektrárna Temelín*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019-2020. [PDF]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~novakm42/clovek_a_energie-KKE-CE_2019_2020/CE_7_cviceni_podklady.pdf.

Přílohy

Příloha č.1 – CD (Obsah – zdrojový kód výpočetního modelu)