

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301      Strojní inženýrství

Studijní zaměření: 2301R016      Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Návrh energetického zdroje

Autor:                      **Tomáš VRÁNA**  
Vedoucí práce:        **Ing. Pavel ŽITEK**

Akademický rok 2017/2018

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne: 21.5.2018

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval Ing. Pavlu Žitkovi za cenné rady, ochotu a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Velice děkuji také svému konzultantovi Ing. Michalu Buršíkovi za velmi užitečné a věcné rady a za pomoc při zpracování bakalářské práce. Velký dík patří i celé firmě Doosan Škoda Power a.s., která mi poskytla zázemí a potřebné informace.

Tomáš Vrána

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ**

Katedra energetických strojů a zařízení

Akad. rok: 2017/2018

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení: Tomáš Vrána  
Osobní číslo: S15B0395P  
Studijní program: B2301  
Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

Název tématu: **NÁVRH ENERGETICKÉHO ZDROJE**

Zásady pro vypracování:

Navrhněte nový, technicko-ekonomicky nejvýhodnější energetický zdroj pro Českou Republiku.

Proveďte analýzu energetické situace zadaného státu a navrhněte nejvýhodnější řešení pro pokrytí rostoucí poptávky po elektrické energii.

V analýze se zaměřte na všechny běžně dostupné energetické zdroje (vyjma jaderné energie) v dané lokalitě, které dokáží pokrýt průměrný nárůst spotřeby elektrické energie z předchozích dvou let na stejné období v budoucnu.

Stanovte nejvýhodnější zdroj vzhledem k dostupnosti paliva, výkupním cenám elektřiny a obvyklým účinnostem. Proveďte ekonomické vyhodnocení.

Pro nejvýhodnější zdroj proveďte návrh a výpočet tepelného cyklu s uvažováním všech jeho obvyklých součástí. Připravte hmotově-tepelný diagram.

Rozsah grafických prací: Schéma tepelných oběhů dle rozsahu zadání.

Rozsah kvalifikační práce: 30 – 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Tepelné turbíny; J. Bečvář a kol.
- Parní turbíny – návrh a výpočet; Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- Parní turbína – Tepelný a pevnostní výpočet; prof. Ing. Jan Škopek, CSc.
- Technický průvodce energetika, Zbyněk Ibler a kol.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Žitek

Konzultant bakalářské práce: Ing. Michal Buršík

Datum zadání bakalářské práce: 20. 10. 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 21. 5. 2018

L.S.

---

děkan

---

vedoucí katedry

V Plzni dne

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Vrána	Jméno Tomáš	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 – Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Žitek	Jméno Pavel	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Návrh energetického zdroje		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	53	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	35	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	2
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Analýza tuzemské energetické situace až do roku 2020 následovaná polemikou nad možnými energetickými zdroji, které je možné v České republice efektivně vybudovat. Dále pak kompletní návrh a výpočet termodynamického cyklu pro vybraný zdroj.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	energetická bilance, termodynamický cyklus, spalovna odpadů, elektrárna, kondenzátor, parní turbína, kotel, přehřátá pára

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Vrána		Name Tomáš	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 – Design of Power Machines and Equipment			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Žitek		Name Pavel	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KKE			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLÓMA</b>	<b>BACHELOR</b>		<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design of power plant			

<b>FACULTY</b>	Mechanical engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	53	<b>TEXT PART</b>	35	<b>GRAPHICAL PART</b>	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	An analysis of the domestic energy situation up to 2020 followed by a discussion of the possible energy sources that can be effectively built in the Czech Republic. Furthermore, the entire design and calculation of thermodynamic cycle for the selected source.
<b>KEY WORDS</b>	Balance of electricity, thermodynamic cycle, waste incinerator, power plant, condenser, steam turbine, boiler, superheated steam

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>SOUČASNÁ ENERGETICKÁ SITUACE ČESKÉ REPUBLIKY .....</b>	<b>15</b>
2.1	ENERGETICKÉ ZDROJE.....	15
2.2	ROZMÍSTĚNÍ ZDROJŮ.....	17
<b>3</b>	<b>MOŽNOSTI ZDROJŮ .....</b>	<b>19</b>
3.1	JADERNÁ ELEKTRÁRNA .....	19
3.2	UHELNÁ ELEKTRÁRNA.....	20
3.3	OBNOVITELNÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	21
3.4	PAROPLYNOVÁ STANICE.....	22
3.5	STANICE SPALUJÍCÍ ORGANICKÉ ZBYTKY .....	24
<b>4</b>	<b>SOUČASNÁ SITUACE A VÝHLED DO BUDOUCNA.....</b>	<b>25</b>
4.1	BILANCE ELEKTRINY V ČESKÉ REPUBLICE .....	25
4.2	VÝVOJ BILANCE ELEKTRINY .....	26
<b>5</b>	<b>VÝBĚR VHODNÉHO ZDROJE .....</b>	<b>28</b>
5.1	NÁVRH SPALOVEN KOMUNÁLNÍHO ODPADU.....	28
5.2	POKRYTÍ ZBYLÉHO MNOŽSTVÍ ELEKTRINY .....	31
5.3	SPALOVNA BRNO.....	32
<b>6</b>	<b>VÝPOČET BILANČNÍHO SCHÉMA CYKLU .....</b>	<b>34</b>
6.1	ZÁKLADNÍ POPIS BILANČNÍHO SCHÉMA.....	34
6.2	SEZNAM FUNKCÍ PRO VÝPOČTY S PÁROU.....	35
6.3	VÝPOČET VSTUPNÍ PÁRY DO TURBÍNY.....	36
6.4	VÝPOČET VÝSTUPNÍ PÁRY Z TURBÍNY.....	36
6.5	VÝPOČET NAPÁJECÍ VODY NA VÝSTUPU Z KONDENZÁTORU .....	37
6.6	VÝPOČET NAPÁJECÍ VODY NA VÝSTUPU Z NAPÁJECÍHO ČERPADLA.....	38
6.7	VÝPOČET NAPÁJECÍ VODY NA VÝSTUPU Z NAPÁJECÍ NÁDRŽE.....	38
6.8	VÝPOČET TOPNÉ PÁRY V ODBĚRU ČÍSLO 1.....	38
6.9	VÝPOČET TOPNÉ PÁRY NA VSTUPU DO ODPLYŇOVÁKU .....	39
6.10	VÝPOČET NAPÁJECÍ VODY NA VSTUPU DO ODPLYŇOVÁKU .....	39
6.11	VÝPOČET NAPÁJECÍ VODY NA VÝSTUPU Z NTO2.....	39
6.12	VÝPOČET KONDENZÁTU TOPNÉ PÁRY NA VÝSTUPU Z PŘEČERPÁVACÍHO ČERPADLA..	40
6.13	VÝPOČET TOPNÉ PÁRY V ODBĚRU ČÍSLO 2 .....	40
6.14	VÝPOČET TOPNÉ PÁRY NA VSTUPU DO NTO2.....	41
6.15	VÝPOČET KONDENZÁTU TOPNÉ PÁRY NA VÝSTUPU Z NTO2 .....	41
6.16	VÝPOČET NAPÁJECÍ VODY NA VÝSTUPU Z NTO1.....	41
6.17	VÝPOČET TOPNÉ PÁRY V ODBĚRU ČÍSLO 3 .....	42
6.18	VÝPOČET TOPNÉ PÁRY NA VSTUPU DO NTO1.....	42
6.19	VÝPOČET KONDENZÁTU TOPNÉ PÁRY NA VÝSTUPU Z NTO1 .....	42



6.20	VÝPOČET NAPÁJECÍ VODY NA VÝSTUPU Z KONDENZÁTNÍHO ČERPADLA .....	43
6.21	VÝPOČET HMOTNOSTNÍCH PRŮTOKŮ .....	43
6.22	VÝPOČET HMOTNOSTNÍHO PRŮTOKU CHLADÍČÍ VODY .....	46
6.23	SHRNUTÍ.....	47
6.24	SOUHRN PARAMETRŮ.....	48
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>50</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Energetický mix České republiky .....	15
Obrázek 2: Rozmístění energetických zdrojů.....	18
Obrázek 3: Schéma tepelné elektrárny .....	20
Obrázek 4: Mapa slunečního svitu České republiky.....	21
Obrázek 5: Schéma plynové turbíny .....	22
Obrázek 6: Schéma paroplynové stanice.....	23
Obrázek 7: Schéma termodynamického cyklu .....	34

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Výčet největších uhelných elektráren.....	16
Tabulka 2: Největší obnovitelné zdroje České republiky.....	16
Tabulka 3: Paroplynové elektrárny na území ČR.....	17
Tabulka 4: Bilance elektřiny mezi lety 2008 až 2016.....	25
Tabulka 5: Počet obyvatel v jednotlivých aglomeracích.....	28
Tabulka 6: Souhrn hodnot pro energii vyprodukovanou spálením odpadu .....	29
Tabulka 7: Instalované výkony elektráren.....	31
Tabulka 8: Souhrn hodnot pro paroplynovou elektrárnu .....	32
Tabulka 9: Souhrn hodnot pro spalovnu Brno.....	33
Tabulka 10: Kompletní výčet parametrů cyklu dle křížů.....	48

## Seznam příloh

[1] Heat Balance Diagram

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotky	Název
BRKO	[-]	Biologicky rozložitelná část komunálního odpadu
GJ	[-]	Gigajoule
GWh	[-]	Gigawatt hodinový
h	[kJ/kg]	Entalpie
$h_{iz}$	[kJ/kg]	Entalpie izoentropická
MPO	[-]	Ministerstvo průmyslu a obchodu
$MW_e$	[-]	Megawatt elektrický
NAPJE	[-]	Národní akční plán pro jadernou energetiku
OECD	[-]	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
p	[bar]	Tlak
s	[kJ/kgK]	Entropie
T	[°C]	Teplota

# 1 Úvod

Energie. Skalární veličina, jednotka Joule [J], má mnoho podob a popisuje schopnost těles konat práci. Nevzniká, nezaniká, pouze se přeměňuje z jedné formy do druhé. Jedním z neznámějších druhů energie, kterou jsme si jako lidstvo implementovali do své společnosti, je energie elektrická. Ta v dnešní době doslova hýbe světem a každodenní život si bez ní dokážeme jen velmi těžko představit. Také kvůli jejímu širokému využití a postupnému použití v čím dál širším spektru strojů její spotřeba neustále roste. Vyrobit zdroj elektrické energie je poměrně jednoduchý úkol a dnes dokáže malé dynamo, jakožto malý stroj přeměňující mechanickou energii na elektrickou, vytvořit i žák osmé třídy. Bohužel, nebo možná bohudík, nežijeme v období průmyslové revoluce, kdy byla výroba elektrické energie ještě v plenkách, a nebylo podstatné, za jakých podmínek se elektřina vyrábí, je tedy potřeba na zdroje elektrické energie pohlížet i z jiného pohledu, modernějšího. V současnosti se o zásobování elektrickou energií starají především velmi výkonné a moderní elektrárny, které musí splňovat širokou škálu norem ohledně produkce odpadů, bezpečnosti, ochrany životního prostředí a dalších, což se výrazně projevuje na ceně. To, zda se daná elektrárna vyplatí postavit, je ta nejzákladnější otázka, která je odvislá od typu elektrárny, politicko-ekonomické situace v regionu a dostupnosti moderních technologií a paliv.

Obecně rozlišujeme několik různých konstrukcí elektráren. Celosvětově nejrozšířenějším typem jsou elektrárny souhrnně nazvané tepelné. Základní princip takového zařízení je ve své podstatě velmi jednoduchý. V zařízení produkujícím tepelnou energii, nejčastěji kotli, se vnitřní energie paliva přemění na energii tepelnou, ta se dále zpracovává v turbíně a v generátoru připojenému k turbíně se přímo generuje elektrická energie. Samozřejmě v důsledku požadavků investora se provádějí různé změny a vylepšení, která mají za následek snížení emisí, zmenšení potřebné plochy elektrárny nebo zvýšení účinnosti. Mezi takto charakterizované zdroje řadíme především elektrárny uhelné, jaderné, spalující plyn, biomasu nebo komunální odpad. V posledních letech také zaznamenala velký boom výroba takzvané zelené elektřiny. Ta pochází z energetických zdrojů, které označujeme jako obnovitelné. Přeměňují tedy na elektrickou energii takové druhy energií, které se běžně vyskytují na Zemi a které jsou řízené geofyzikálními procesy. Člověk již od pradávna využíval energii vody, přičemž největší rozkvět zaznamenala vodní energetika v minulém století, kdy byl bohužel využit prakticky veškerý její potenciál na území České republiky. Avšak zdroje, které v dnešní době zažívají onen zmíněný boom, jsou především solární a fotovoltaické elektrárny využívající energii ze Slunce, větrné nebo elektrárny využívající energii moře (ty ale na našem území logicky nenajdeme). Mezi obnovitelné zdroje elektrické energie se ale řadí i dříve zmíněné spalovny biologického materiálu (biomasy, komunálního odpadu nebo bioplynu).

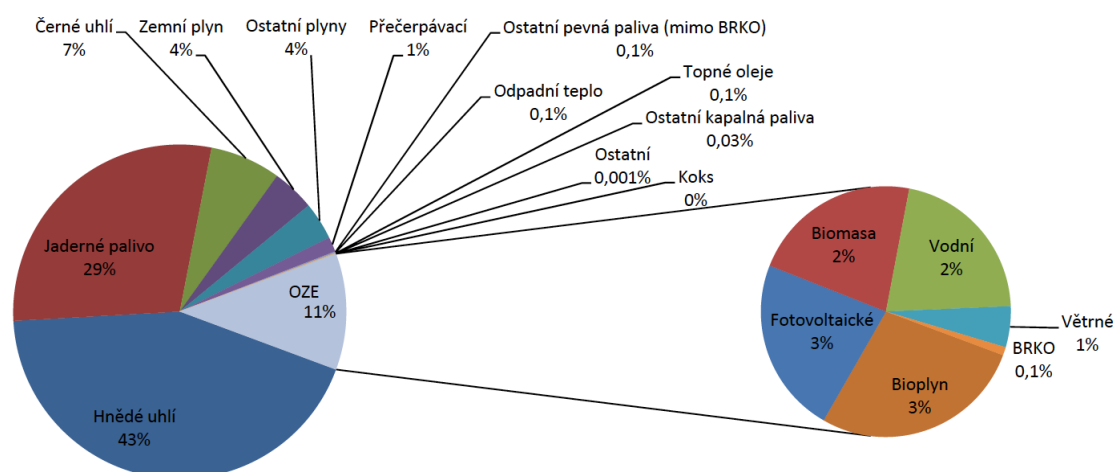
Tato bakalářská práce vznikla jako reakce na zvyšující se poptávku po elektrické energii, kterou bude v budoucnu potřeba řešit výstavou nového zdroje, bude-li si Česká republika chtít udržet současný standard a energetickou samostatnost. Na základě současných dat a dat získaných v minulých dvou letech se pokusíme navrhnout ideální zdroj pro pokrytí ztráty v roce 2020, oproti roku 2015 s ohledem na statistický vývoj cen elektřiny tak, aby stavba a provoz takto vybudovaného zdroje byl co možná nejprofitabilnější. Dále provedeme základní tepelné výpočty a navrhneme pro danou elektrárnu tepelný cyklus.

## 2 Současná energetická situace České republiky

Pro úspěšné a správné nadimenzování energetického zdroje je základním krokem zhodnocení situace na trhu s elektřinou. Jako zdroj dat nám převážně poslouží výroční zprávy vypracované Energetickým regulačním úřadem, jehož povinnost vypracovávat tyto zprávy je zakotvena v §17 odst. 7 písm. m) zákona č. 458/2000 Sb. Pro účely práce budeme využívat zpráv z let 2007 až 2016, které jsou veřejně dostupné na internetových stránkách úřadu.

### 2.1 Energetické zdroje

Nynější energetická výrobní síť České republiky je z většiny tvořena elektrárnami uhelnými a jadernými, které dohromady tvoří více než 75 % tuzemského energetického mixu. Další jsou obnovitelné zdroje se zastoupením přibližně 10 %. Zbýlá procenta jsou rozdělena mezi malé zdroje, jako jsou plynové nebo přečerpávací elektrárny. Kompletní energetický mix je zobrazen na obrázku (viz. Obrázek 1).



Obrázek 1: Energetický mix České republiky

Tepelné elektrárny spalující uhlí, ať už černé nebo hnědé, pokrývají 43 % celkové výroby elektrické energie. Výčet největších uhelných elektráren, včetně použitého paliva, výkonu a počtu výrobních bloků je poté uveden v následující tabulce (viz. Tabulka 1). Jedná se o elektrárny s celkovým instalovaným výkonem nad 350 MW<sub>e</sub>, což přibližně odpovídá celkové roční výrobě nad 2 000 GWh. Jedná se o devět elektráren, z nichž pět vlastní přímo společnost ČEZ a.s. (Pruněřov II, Tušimice II, Ledvice, Mělník III a Pruněřov I), dvě vlastní dceřiné společnosti ČEZ a.s. (Počerady a Dětmárovice). Elektrárna Chvaletice je pak majetkem společnost Sev.en EC a.s. a elektrárnu Opatovice provozuje Elektrárna Opatovice a.s. Nejnovější, a tedy nejmodernější z vyjmenovaných elektráren, je elektrárna Ledvice, která byla uvedena do komerčního provozu v létě roku 2017. Jedná se o jednu z nejnovějších a nejmodernějších uhelných elektráren v Evropě, kde byl použit tzv. „nadkritický“ blok, který vyniká nejen mimořádnými parametry páry (teplota přes 600 °C a tlak více než 27 MPa), ale také, pro blok využívající fosilní paliva, vysokou účinností dosahující 42,5 %.

Tabulka 1: Výčet největších uhelných elektráren

Elektrárna	Celkový instalovaný výkon [MW <sub>e</sub> ]	Palivo	Počet bloků
Pruněřov II	1050	Hnědé uhlí	5
Počerady	1000	Hnědé uhlí	5
Chvaletice	820	Hnědé uhlí	4
Dětmarovice	800	Černé uhlí	4
Tušimice II	800	Hnědé uhlí	4
Ledvice	660	Hnědé uhlí	1
Mělník III	500	Hnědé uhlí	1
Pruněřov I	440	Hnědé uhlí	4
Opatovice	378	Hnědé uhlí	6

Dalším typem elektrárny, jejíž výroba pokrývá skoro třetinu celkové tuzemské výroby elektrické energie, je jaderná elektrárna. Konkrétně se jedná o 29 % energetického mixu. V současné době jsou na území České republiky postaveny pouze dvě jaderné elektrárny o celkovém počtu šesti jaderných reaktorů. Dva jaderné reaktory o celkovém výkonu 2 110 MW<sub>e</sub> v jaderné elektrárně Temelín a čtyři jaderné reaktory o celkovém výkonu 2 040 MW<sub>e</sub> v jaderné elektrárně Dukovany. Do budoucna se dle národního akčního plánu pro jadernou energetiku tvořeného ministerstvem průmyslu a obchodu plánuje dostavba dalších dvou bloků v jaderné elektrárně Temelín a jednoho bloku v jaderné elektrárně Dukovany.

Neméně významným typem energetických zdrojů jsou dnes zdroje souhrnně klasifikované jako obnovitelné, jež během posledních několika let zaznamenaly obrovský nárůst výstavby. V největší míře se jedná o elektrárny fotovoltaické, větrné, vodní a elektrárny na biomasu a bioplyn. Zatímco v roce 2007 byl podíl těchto zdrojů méně než 4 % celkové výroby elektřiny, dnes tyto zdroje zastupují 11 %, přičemž bioplynové a fotovoltaické vyrobí po 3 %, vodní a spalující biomasu po 2 % a větrné 1 % celkové tuzemské výroby. Výčet největších obnovitelných zdrojů je v tabulce pod textem (viz. Tabulka 2), přičemž měřítkem pro výběr byl celkový instalovaný výkon. Pro fotovoltaické elektrárny minimálně 30 MW<sub>e</sub>, pro vodní 300 MW<sub>e</sub> a pro větrné 15 MW<sub>e</sub>.

Tabulka 2: Největší obnovitelné zdroje České republiky

Typ elektrárny	Elektrárna	Instalovaný výkon [MW <sub>e</sub> ]	Roční výroba [GWh]
Fotovoltaická	Ralsko	38,3	40
Fotovoltaická	Vepřek	35,1	40,4
Přečerpávací	Dlouhé stráně	650	403
Přečerpávací	Dalešice	450	273
Akumulační	Orlík	364	300
Větrná	Kryštofovy Hamry	42	99,1
Větrná	Horní Loděnice	18	33,7



Posledním, neméně energeticky významným, zdrojem jsou paroplynové tepelné elektrárny. Jedná se o tzv. „špičkové nebo pološpičkové zdroje“, jež v našich podmínkách nejsou designované na nepřetržitý provoz, ale jsou spuštěny jen v případě potřeby. V současnosti jsou na našem území tři paroplynové elektrárny, z nichž pouze dvě jsou v nepřetržitém provozu. Jedná se o elektrárny Počerady, Vřesová a Alpiq Kladno. Elektrárna Počerady byla postavena jako pološpičkový zdroj, který je v případě potřeby schopen najet na plný výkon během jediného dne. Bohužel v průběhu výstavby klesla cena elektřiny a společnost ČEZ a.s., která je vlastníkem elektrárny, je nucena elektrárnu provozovat jako operativní zálohu, která je v případě potřeby schopná velmi rychlého najetí na nominální výkon. Zbylé dvě elektrárny, Vřesová a Alpiq Kladno, jsou v nepřetržitém provozu. Elektrárna Vřesová patřící Sokolovské uhelné zásobuje pouze elektrickou energií, zatímco Alpiq Kladno mimo elektřiny zásobuje blízké okolí i teplem a teplou vodou. Jedná se tedy o tzv. „kombinovaný zdroj“, který díky spojení dvou cyklů (spalovacího a parního s teplofikací) dosahuje celkové účinnosti až 90 %. Elektrárna Vřesová má oproti ostatním konkurenční výhodu, nespaluje totiž samotný zemní plyn, ale směs zemního plynu a energoplynu získaného tlakovým zplyňováním hnědého uhlí, které se v bezprostřední blízkosti těží. Není tedy závislá na dodávkách a cenách zemního plynu, neboť je do 70 % výkonu schopna spalovat samotný energoplyn. Výkony a konfigurace těchto paroplynových elektráren jsou uvedeny v tabulce pod textem (viz. Tabulka 3).

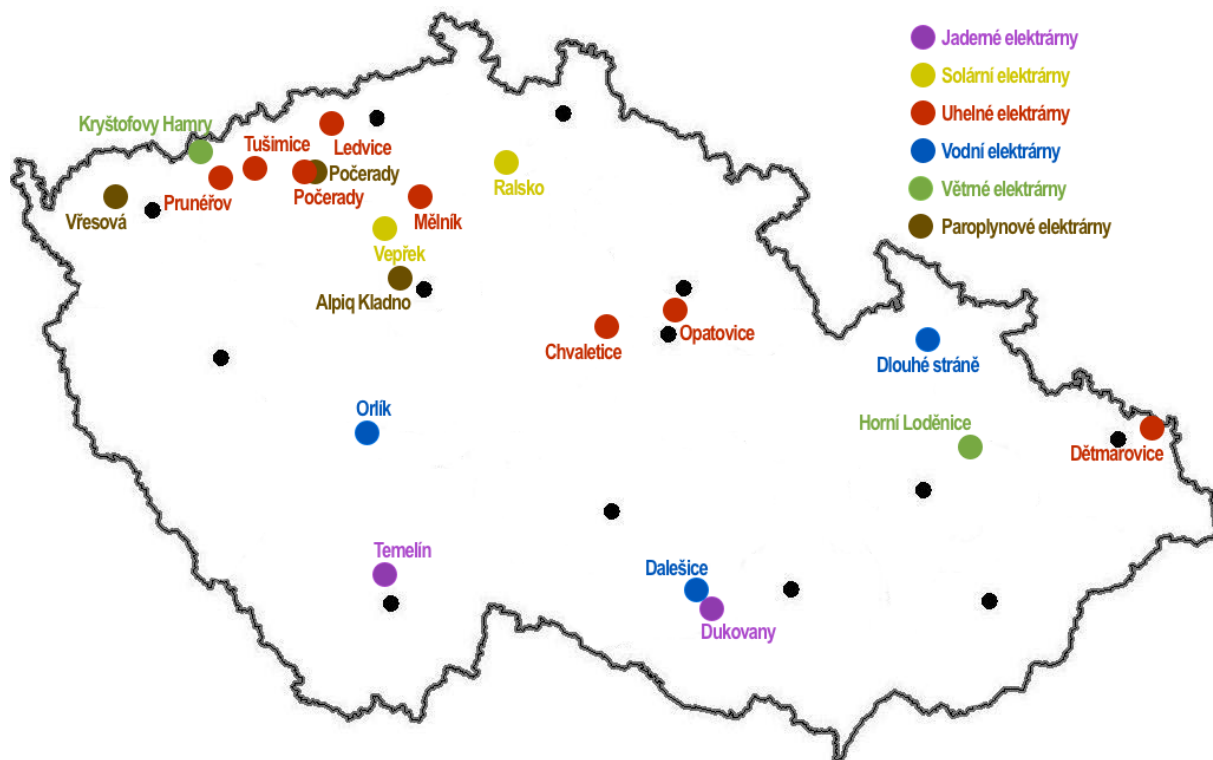
Tabulka 3: Paroplynové elektrárny na území ČR

Elektrárna	Palivo	Výkon [MW <sub>e</sub> ]	Typ turbíny
Počerady	zemní plyn	838	2x plynová 1x parní
Vřesová	energoplyn zemní plyn	400	2x plynová 2x parní
Alpiq Kladno	zemní plyn topný olej	110	1x plynová 1x parní

## 2.2 Rozmístění zdrojů

Pro každý typ elektrárny se před její výstavbou strategicky plánuje lokace, kde bude elektrárna umístěna. Je jasné, že majitel, potažmo provozovatel, chce co možná nejvíce snížit náklady na výrobu elektřiny, což mimo jiné znamená i snížit dopravu paliva na minimum. Právě kvůli tomu je nutné umístění elektrárny určit velmi pečlivě. Z toho důvodu se obecně uhelné elektrárny staví v nejbližší blízkosti uhelného dolu, zdroje využívající Slunce v místech s co možná největší koncentrací slunečního záření, spalovny biomasy a bioplynu v okolí velkých měst, lesů nebo zemědělských družstev. Umístění vodních elektráren závisí na místních geologických podmínkách, stejně tak umístění jaderných elektráren. Paroplynové stanice je možné bez větších problémů vystavět kdekoliv (avšak nejlépe v blízkosti plynovodu), vzhledem k nezávislosti na geografické i demografické situaci v regionu. Všechny tepelné elektrárny však ke svému provozu potřebují kontinuální dodávku vody z důvodu chlazení. Přítomnost vodního zdroje v blízkém okolí je tedy jedním ze společných jmenovatelů ovlivňující výslednou polohu daného zdroje.

Princip popsáný výše se samozřejmě projevuje i na území České republiky, což dokládá grafické znázornění polohy největších elektráren pod textem (viz. Obrázek 2). Z obrázku je jasně patrné, že největší koncentrace uhelných elektráren je v severozápadní části Čech v oblasti s hojným výskytem podzemního hnědého uhlí. Elektrárna Dětmarovice, spalující černé uhlí, se logicky nachází v oblasti Ostravy, kde jsou černouhelné doly. Podobný princip jako u uhelných elektráren je vidět i u rozmístění paroplynových elektráren. Vřesová a Počerady se nachází v bezprostřední blízkosti hnědouhelných dolů, Alpiq Kladno pak v blízkosti Prahy, kudy vede jeden z plynovodů zásobující Prahu. Obě znázorněné fotovoltaické elektrárny se nachází v nížinách v okolí polabské nížiny, kde společně s jižní Moravou panují v rámci České republiky nejlepší podmínky pro výstavbu právě fotovoltaické elektrárny. Stejně jako fotovoltaické jsou i větrné elektrárny závislé na přírodních podmínkách, proto jsou vystavovány na vyvýšených místech v lokalitách s příznivými povětrnostními podmínkami. Akumulační vodní elektrárna Orlík se nachází na řece Vltavě, kde je součástí tzv. „Vltavské kaskády“. Tu tvoří celkem devět vodních akumulčních elektráren, z nichž je právě Orlík největší. Přecherčavací elektrárna Dlouhé stráně pak leží v Jeseníkách a elektrárna Dalešice v okolí jaderné elektrárny Dukovany, kde slouží mimo jiné jako zdroj technické vody.



Obrázek 2: Rozmístění energetických zdrojů

### 3 Možnosti zdrojů

V následujících kapitolách budou představeny možnosti zdrojů, které vzhledem k povaze práce a možnostem České republiky je možné vybudovat. Jeden z uvedených zdrojů elektrické energie bude následně analyzován pro pokrytí konkrétního množství elektřiny a napočítán jeho termodynamický cyklus.

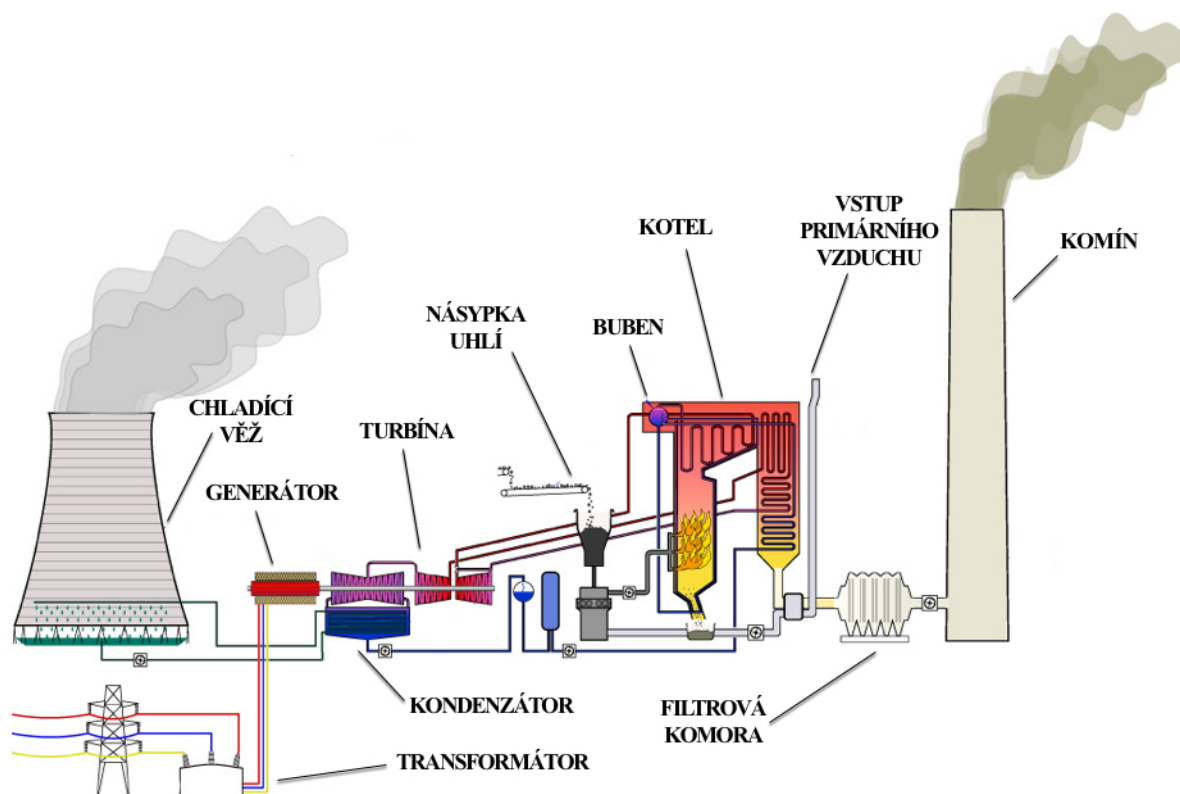
#### 3.1 Jaderná elektrárna

Jaderná elektrárna je z technologického hlediska tou nejsložitější. V jejím areálu se nachází velké množství elektrostrojního zařízení, což z takového zdroje dělá stavbu zatíženou vysokými investičními náklady. Společně s investičními náklady, jsou velkou finanční zátěží také náklady v průběhu provozu. Převážně z důvodu zabezpečení, kontroly a řízení takto složitého a potenciálně nebezpečného zařízení. Avšak tyto enormní náklady kompenzuje, oproti ostatním typům zdrojů elektrické energie, relativně levné palivo, množství vyrobené elektřiny a provozní doba. A i přes to, že investice na výstavbu jaderné elektrárny dosahují až pěti tisíc eur na kilowatt instalovaného výkonu, jedná se v současné době o jeden z nejvýhodnějších zdrojů elektrické energie.

Celosvětově jaderná energetika zaznamenala velký vzestup ke konci minulého století, přičemž v posledních letech je tendence od jaderné energetiky spíše ustupovat hlavně kvůli nástupu obnovitelné energie. S energií získanou z jaderné reakce se také pojí velký problém ohledně bezpečnosti. Zdroj je vnímán jako bezpečnostní hrozba a jeho okolí tedy musí být přísně hlídáno, dokonce včetně bezletové zóny. Dále je s výstavbou spojeno velké množství povolení nutných k zahájení výstavby, což je také hlavní důvod, proč v této práci tento zdroj **nebudeme** uvažovat za možnou variantu a to jednoduše proto, že bychom ve stanoveném období nebyli schopni zdroj v rámci běžného schvalovacího řízení postavit.

### 3.2 Uhelná elektrárna

Tepelná elektrárna spalující uhlí je celosvětově nejrozšířenějším zdrojem elektrické energie. Ve světě tvoří přibližně 40 % veškeré výroby elektřiny a podobné zastoupení má uhelná energetika i v České republice. Její oblíbenost je zakotvena již od průmyslové revoluce, kdy objev energetického využití uhlí znamenal obrovský technologický pokrok. Důvody pro velkou oblibu tohoto typu elektráren, především v minulosti, byla snadná dostupnost uhlí, poměrně jednoduchá konstrukce (oproti současným moderním zdrojům) a možnost výstavby výkonově velkých bloků na malém území, které mohly zásobovat celá města. Ilustrační schéma uhelné elektrárny je vyobrazeno pod textem (viz. Obrázek 3).



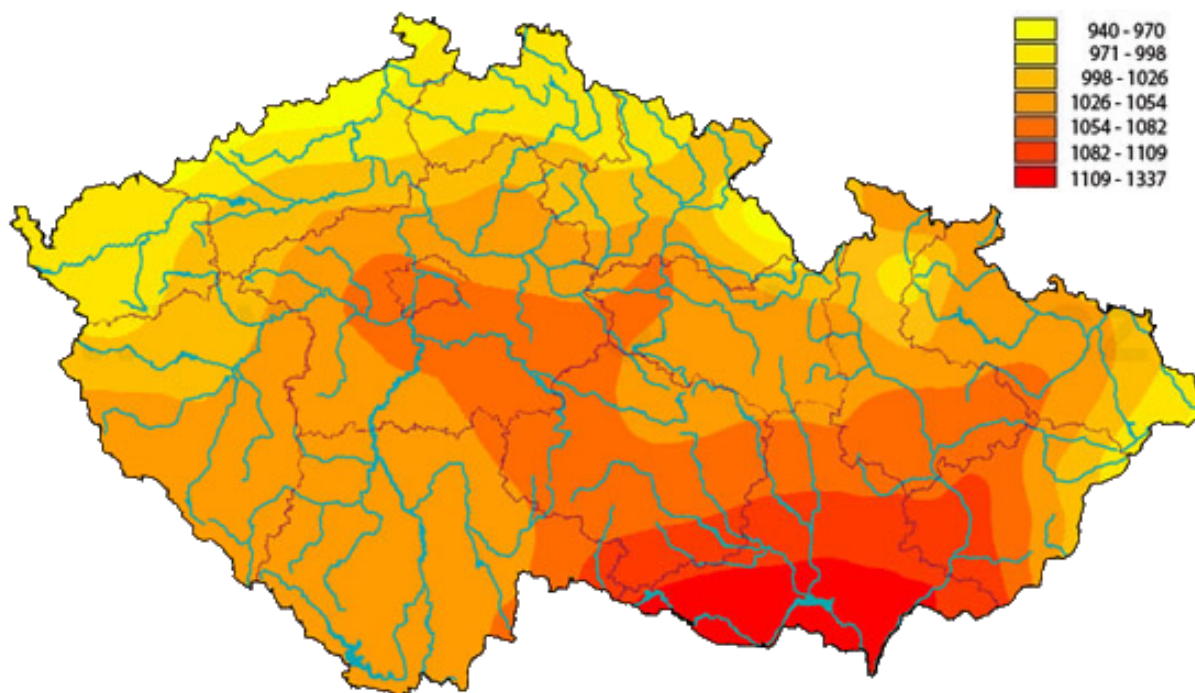
Obrázek 3: Schéma tepelné elektrárny

V současné době je ale od tohoto typu elektráren postupně upouštěno. Zejména proto, že uhelné elektrárny produkují velké množství skleníkových plynů, především pak oxidu uhličitého, se kterým zatím nedokážeme efektivně hospodařit a emise tohoto plynu jsou tedy Achillovou patou energie z uhlí. Na provoz stroje s takto vysokými emisemi skleníkových plynů je potřeba finančně velmi nákladných licencí, což dělá z toho typu elektrárny čím dál tím méně rentabilní projekt a hledají se tedy alternativní, více ekologické, varianty výroby elektřiny.

### 3.3 Obnovitelné zdroje elektrické energie

Takzvané obnovitelné zdroje energie jsou v současné době vnímány jako budoucnost energetiky. Jejich nespornou výhodou oproti konvenčním elektrárnám je fakt, že ve většině případů neprodukují žádné emise a využívají geofyzikálních principů na Zemi. Mezi takto označované zdroje obecně patří elektrárny větrné, vodní, geotermální, sluneční nebo fotovoltaické. Jak samotné názvy některých elektráren napovídají, větrné elektrárny využívají energie větru a vodní energie vody. Geotermální zpracovává tepelnou energii z nitra planety. Sluneční i fotovoltaická elektrárna pak přeměňují energii ze slunce, avšak každá jiným způsobem. Zatímco sluneční využívá energie fotonů ze slunce tak, že ji přímo přeměňuje na teplo, které se poté dále zpracovává, fotovoltaická tuto energii využije při takzvaném fotovoltaickém jevu, během kterého se přímo v křemíkovém článku produkuje elektrický proud.

Bohužel některé dříve jmenované není možné v našich podmínkách efektivně provozovat. Pro vybudování geotermální elektrárny nemáme na našem území žádné vhodné vulkanicky aktivní oblasti, které jsou pro tento typ elektrárny základní surovinou. Stejně tak na území České republiky nenajdeme vhodnou lokalitu ani pro výstavbu sluneční elektrárny. A i přes značně rozsáhlou výstavbu fotovoltaických polí v minulých letech, ideální podmínky pro tento typ elektrárny na našem území také nenajdeme. Uspokojivé podmínky jsou jen na velmi omezeném území. Tento fakt dokládá také mapa slunečního osvětlení území České republiky na obrázku pod textem (viz. Obrázek 4), jejíž škála je ve wattech na metr čtvereční zemského povrchu. Na druhou stranu se zde vyskytuje poměrně rozsáhlá říční síť, jejíž potenciál byl ve velké míře již vyčerpán především vltavskou kaskádou a na malých tocích se výstavba zatím nejeví přijatelná z ekonomického hlediska.



Obrázek 4: Mapa slunečního svitu České republiky

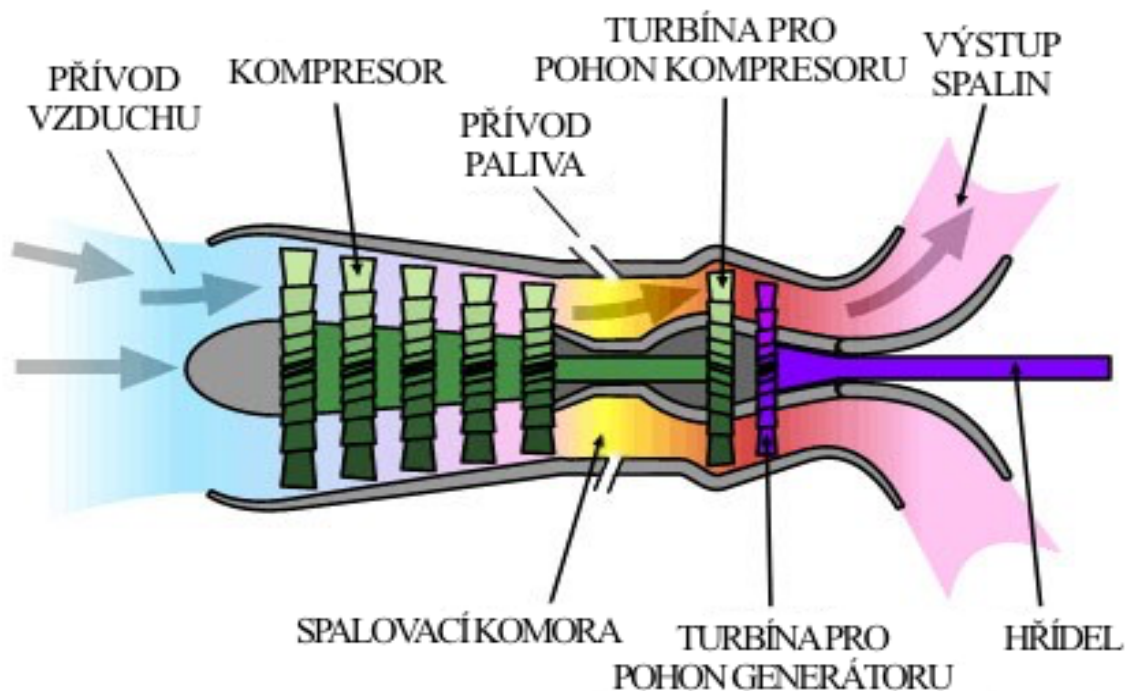
Obecně se ale většina obnovitelných zdrojů elektrické energie potýká s jednou, avšak z pohledu energetiky významnou, nevýhodou. Takovéto zdroje jsou velmi závislé na stabilitě dodávek vstupní energie (sluneční, větrné, atd.). V současné době stále ještě neexistují dostatečně velké, komerčně dostupné, vysokokapacitní baterie, které by takto velké množství elektrické energie dokázaly uchovávat a v případě potřeby poskytnout pokrývat nestabilitu těchto zdrojů způsobenou bezvětřím nebo nízkou intenzitou slunečního záření. Z tohoto důvodu nemohou tyto zdroje konstantně produkovat elektřinu a v přenosové síti tak vznikají rázy, které ji velmi zatěžují a které je druhotně nutné opět poměrně nákladně vyrovnávat. Uvedený nedostatek se netýká pouze vodních elektráren, u kterých je možné energii vody uchovávat v přehradách.

Je tedy možné pokrýt obnovitelnou a poměrně levnou elektřinou relativně velké množství poptávky po elektrické energii, avšak není možné pokrýt veškerou poptávku. Především právě kvůli nestabilitě dodávek elektrické energie je nutné vedle obnovitelných zdrojů stavět i klasické, které těmito nedostatky netrpí.

### 3.4 Paroptynová stanice

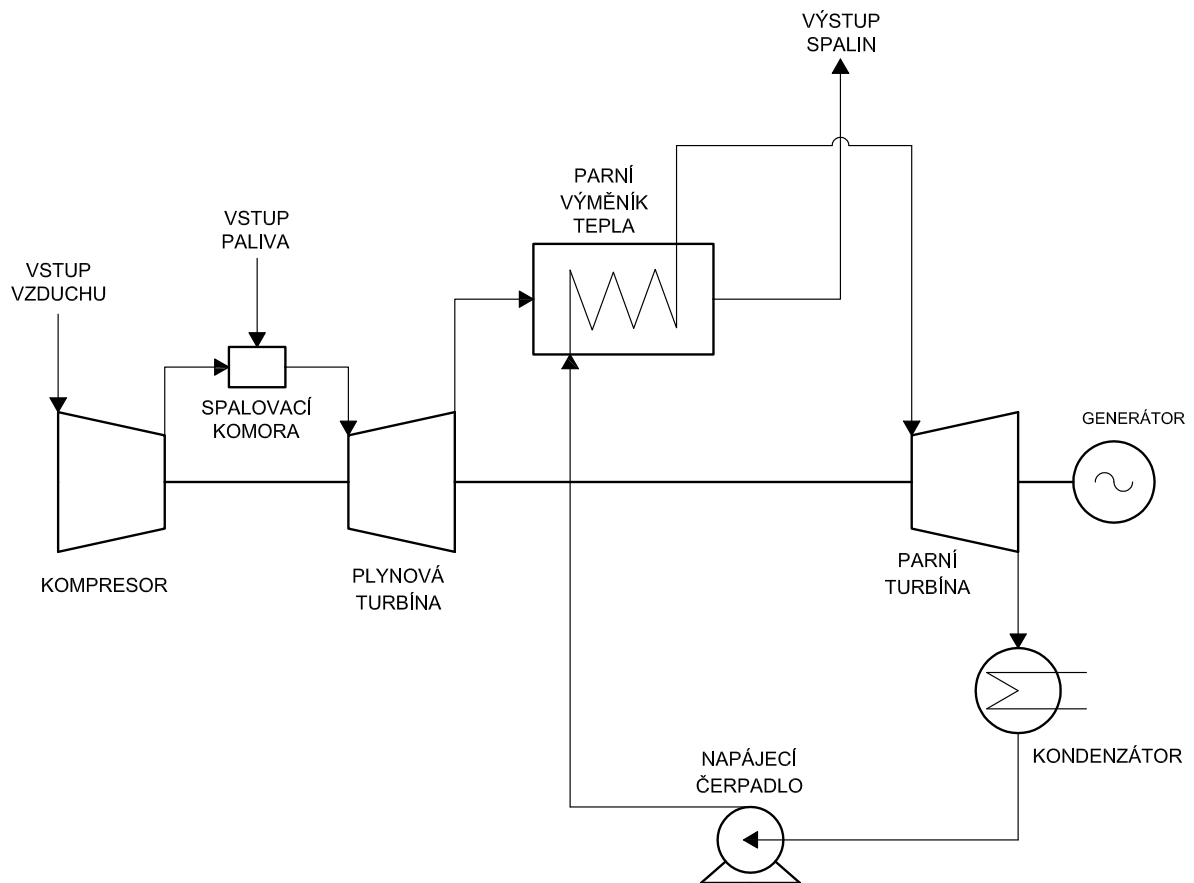
Paroptynová stanice, z anglického CCPP (Combined Cycle Power Plant), označuje elektrárnu využívající současně dva druhy termodynamických cyklů – plynový a parní. Jedná se o zdroj, který jako primární palivo využívá zemního, energetického nebo jiného spalitelného plynu.

Základem je plynový (Ericsson-Brightonův) cyklus, využívající spalovací turbíny, jejíž schéma je vyobrazeno na obrázku pod textem (viz. Obrázek 5). Na začátku zařízení se nachází kompresor, který stlačuje vstupní vzduch. Ten poté vstupuje do spalovací komory, kde se stlačený vzduch smísí s palivem, a proběhne spálení paliva, čímž se uvolní velké množství plynných spalin a tepla, které dále pohání turbínu. Ta je poté připojena na elektrický generátor. Bohužel tento typ zařízení jeví jednu zásadní ekonomickou nevýhodu, a sice nevyužívání, ve spalovací komoře vzniklého, odpadního tepla spalin. Jedná se o nezanedbatelnou hodnotu vzhledem k tomu, že teplota spalin dosahuje i 600°C.



Obrázek 5: Schéma plynové turbíny

Z tohoto důvodu je za plynovou turbínu zařazen parní okruh s parní turbínou, který takto vzniklé odpadní teplo dodatečně zužitkuje a sníží tak tzv. komínovou ztrátu. Tímto způsobem lze dosáhnout poměrně vysoké účinnosti až 60 %, které zbylé elektrárny dosahují jen výjimečně. Nevýhodou paroplynových stanic je potřeba poměrně velkého množství spalovaného plynu, což značí nutnost vybudování takového zdroje v okolí plynovodu nebo uhelného dolu (z důvodu dodávek uhlí ke zplynění). Na druhou stranu se vedle jaderné energetiky rozhodně jedná o jednu z možných koncepcí budoucích zdrojů elektrické energie hlavně díky velkým zásobám zemního plynu, poměrně nízkým emisím a právě vysoké účinnosti především ve spojení s dodávkami tepla do domácností. Základní schéma paroplynové stanice v tzv. „single shaft“ provedení je zobrazeno pod textem (viz. Obrázek 6).



Obrázek 6: Schéma paroplynové stanice

### 3.5 Stanice spalující organické zbytky

Energetické zdroje, jež jako palivo využívají organické zbytky se i přes to, že produkují emise oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), považují za obnovitelné. Využívají totiž paliva, které má krátkou dobu obnovy. Na rozdíl od zdrojů zmíněných v odstavci 3.3 však nevyužívají energie Země (popřípadě Slunce), spalují totiž převážně dřevěnou štěpku, bioplyn nebo jinak využívají biologicky rozložitelnou část komunálního odpadu (tzv. BRKO).

Pracují na podobném principu jako elektrárny uhelné, rozdíly jsou v podstatě jen v použitém typu kotle. Speciálním typem takového zařízení je spalovna odpadů. Ta může spalovat různé druhy odpadů včetně odpadů charakterizovaných jako nebezpečné, mezi které se řadí především zdravotnické pomůcky. Avšak nejvíce používanou je spalovna komunálního odpadu, která je již v některých městech v České republice postavena. Jedná se o poměrně elegantní, jednoduché a nakonec i prospěšné využití komunálního odpadu, který by se jinak pouze uložil na skládku a jinak nevyužil. Bohužel je komunální odpad velice různorodým palivem, z čehož je jen část spalitelná. Z toho důvodu je ho potřeba velké množství, které musí být spáleno, aby bylo vyrobeno potřebné množství elektřiny nebo tepla. V praxi se nejčastěji používá roštový typ kotle, výjimečně také kotle fluidní. Palivo v kotli musí kvůli důkladnému vyhoření zůstat až několik desítek minut.

Přes tyto komplikace, které stavbu spaloven prodražují, jsou investiční náklady poměrně nízké. Pracuje se s relativně nízkými parametry páry a svoz odpadu je zpoplatněn, což výrazně snižuje celkové náklady na provoz daného zařízení.



## 4 Současná situace a výhled do budoucna

### 4.1 Bilance elektřiny v České republice

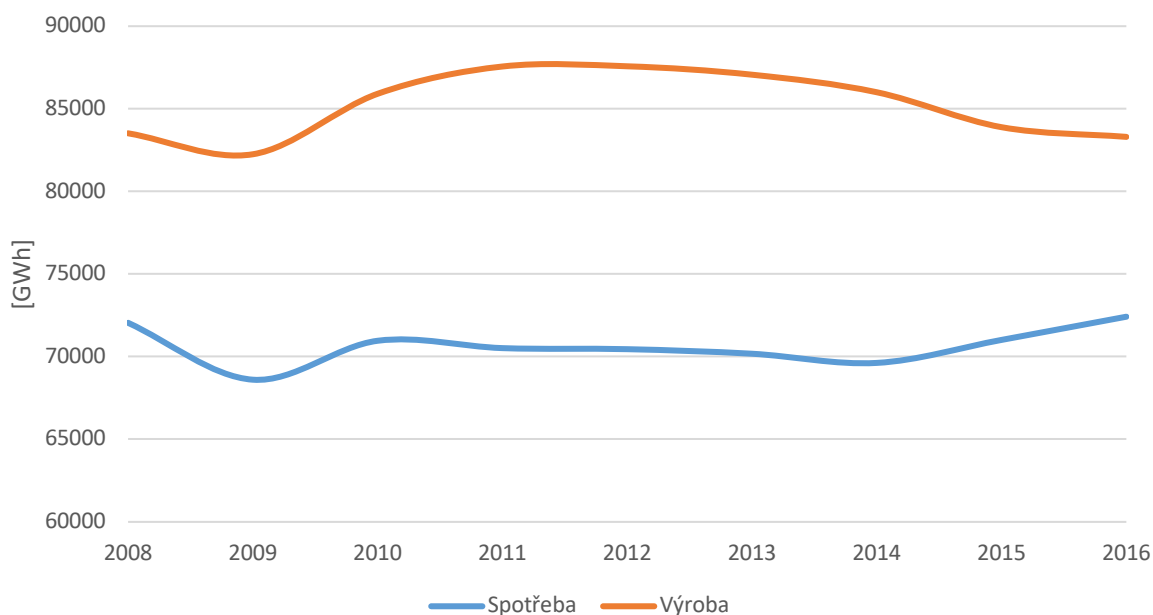
Bilance elektrické energie definuje předpoklady k vytvoření této bakalářské práce, přičemž jedním z nich je rostoucí poptávka po elektrické energii. Je potřeba důkladné analýzy dat, s daty získanými v této kapitole budeme dále pracovat v průběhu celé práce. Bilance elektřiny vyjadřuje současný i minulý stav výroby a spotřeby elektrické energie na území České republiky.

Data ze zpráv ERÚ potvrzují úvodní předpoklad pro vytvoření této bakalářské práce, a sice že spotřeba elektřiny se meziročně stále navyšuje, zatímco výroba klesá. Jedná se o nepříjemný fakt, který bude mít v případě jeho neřešení za následek postupnou ztrátu soběstačnosti České republiky v oblasti dodávek elektrické energie. I přes fakt, že od roku 2000 se každoročně vyrobí přibližně o 10 až 20 tisíc GWh více, než činí spotřeba (především díky uvedení do provozu jaderné elektrárny Temelín), od roku 2012 tento přebytek každoročně klesá v průměru o 1 230 GWh ročně. Zatímco v roce 2012 bylo vyrobeno o 17 120 GWh elektrické energie více než bylo spotřebováno, v roce 2016 činily rezervy již jen 10 974 GWh. Elektřina vyrobená navíc se samozřejmě prodává do zahraničí. To ale s sebou nese nevýhodu, že klesající výrobou a vzrůstající poptávkou nepřichází Česká republika jen o svou suverenitu, ale jedná se také o ekonomickou ztrátu.

Veškerá získaná data ukazující současný i minulý stav bilance elektrické energie jsou uvedena v tabulce pod textem (viz. Tabulka 4). Je zde viditelný pokles v přebytku vyrobené elektrické energie od roku 2012.

Tabulka 4: Bilance elektřiny mezi lety 2008 až 2016

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Výroba	83518	82250	85910	87561	87574	87065	86003	83888	83302
Spotřeba	72049	68606	70962	70517	70453	70177	69622	71014	72418
Rozdíl	10469	13644	14948	17044	17121	16888	16381	12874	10884



Graf 1: Bilance elektřiny

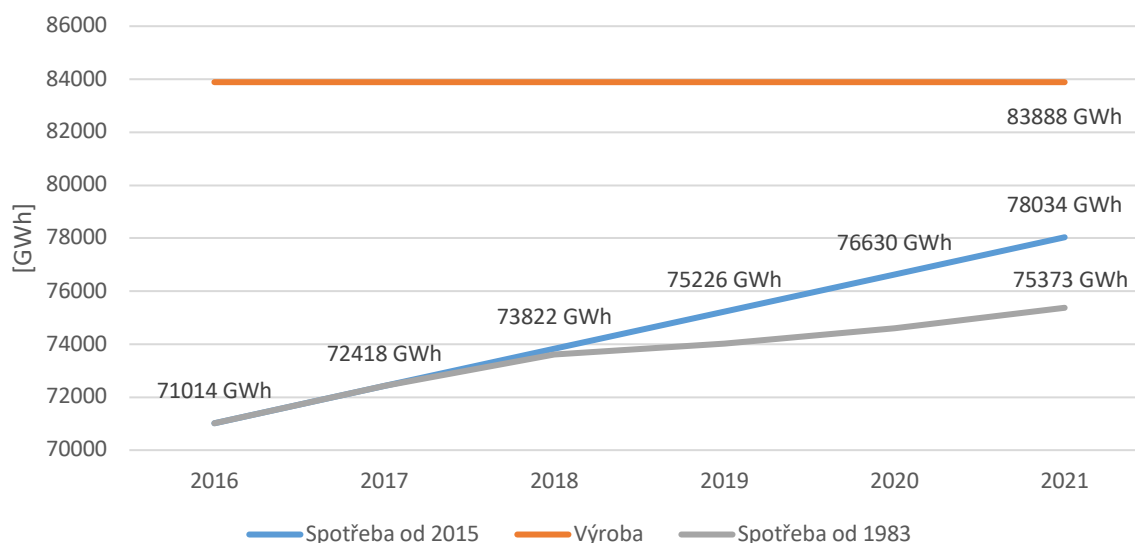
Z tabulky a grafu je jasně patrné, že i přes poměrně slušný současný stav, kdy se vyrobí o necelých 11 000 GWh ročně více elektřiny, než spotřebuje, trend naznačuje velký nárůst spotřeby a s tím i blížící se problémy. Nebudeme-li schopni vyrábět dostatečné množství elektřiny pro naši spotřebu, budeme nuceni chybějící elektřinu nakupovat od sousedních států. Ty budou samozřejmě se vzrůstající poptávkou navyšovat jednotkové ceny, což se může velmi negativně promítnout na vyšších finančních zatíženích jak podniků, tak i domácností.

## 4.2 Vývoj bilance elektřiny

Pro správné nadimenzování námi navrhovaného zdroje je bezpodmínečně důležité, aby byla známa hodnota potřebného výkonu, jenž by měl navrhovaný zdroj pokrývat. Pro tento výpočet je nutné nejdříve vypracovat výhledovou bilanci elektřiny do požadovaného roku 2020, z čehož se dále dle disponibility zdrojů určí požadovaný výkon pro daný typ elektrárny.

Předpovídat vývoj, kterým se bude výroba a hlavně i spotřeba elektrické energie ubírat, je prakticky nemožné. Ze statistického hlediska lze ale nalézt nástroje, které poměrně spolehlivě dokáží budoucí vývoj předpovědět. Pro účely práce nebude použit žádný profesionální software, pouze lineární extrapolace. Ta je vzhledem k požadavkům práce dostačující. Při výpočtech bylo vycházeno z dat z let 2015 a 2016. Roky 2017 a 2018 jsou uvažovány jako roky „nula“, bakalářská práce v nich vznikala a data pro tyto roky nebyla k dispozici. Lineární extrapolace bude provedena pomocí nástroje Microsoft Excel na dva roky, tedy na roky 2019 a 2020.

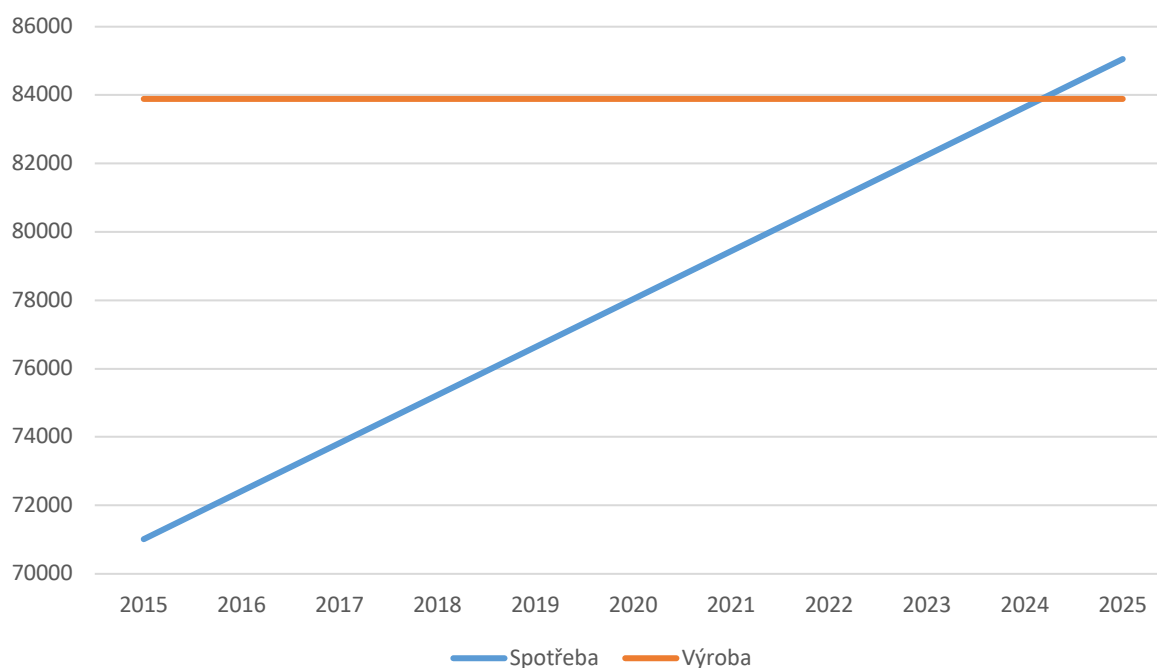
Samozřejmě vypracovávat lineární extrapolaci na základě tak malého souboru vstupních dat může do výpočtu vnést poměrně velkou chybu. Z tohoto důvodu je pro porovnávací účely vytvořena i statistika mimo zadání práce, která vychází ze všech dostupných dat, tedy od roku 1983 do roku 2016. Extrapolační křivky jsou zobrazeny v grafu pod textem (viz. Graf 2). Zároveň je v grafu zobrazena křivka výroby elektřiny, která je z důvodu zanedbání kolísání, způsobeného většinou odstavováním zdrojů, konstantní.



Graf 2: Vývoj bilance elektřiny

V rámci srovnání daných dvou scénářů je z grafu jasně patrné, že odchylka způsobená výběrem jiného souboru dat je 2 661 GWh. Modrá křivka vyjadřující lineární extrapolaci na základě dat od roku 2015 zaznamenává celkový nárůst spotřeby o 9,5 %, zatímco šedá pouze o 6 %. Pro účely práce bude tedy použit odhad vystupující v grafu pod modrou barvou, jenž by se v porovnání s dalším mohl označit jako „horší varianta“. Budeme tedy v budoucích kapitolách hledat ideální řešení pro pokrytí 7 020 GWh elektřiny ročně, které odpovídá rozdílu v hodnotách výroby (modré křivky) mezi lety 2016 a 2021.

V případě, že by se problém vzrůstající spotřeby elektřiny neřešil, obě křivky se protnou v mezi lety 2024 a 2025, jak dokládá Graf 3. V takovém případě, jak již bylo řečeno, bychom byli nuceni nakupovat elektrickou energii od jiných zemí a ztratili tak svou soběstačnost.



Graf 3: Lineární aproximace do doby protnutí křivek výroby a spotřeby

## 5 Výběr vhodného zdroje

V rámci práce je snaha najít spíše modernější a ekologičtější způsob výroby elektřiny než se uchýlit k sice osvědčeným, ale poněkud zastaralým možnostem. Z toho důvodu se, pokud to situace umožní, nebude vedle jaderné elektrárny uvažovat ani možnost uhelné elektrárny. To tento problém přivádí do v České republice prakticky netknutého pole energetiky, a sice do oblastí energeticky využitelného odpadu s celorepublikovým rozhledem. Na našem území se sice již pár spaloven komunálního odpadu nachází, avšak potenciál tohoto odvětví výroby elektrické energie ještě není vyčerpán.

### 5.1 Návrh spaloven komunálního odpadu

Za předpokladu, že by se v každém městě nad 90 000 obyvatel, tedy Praha, Brno, Ostrava, Plzeň, Liberec, Olomouc, Ústí nad Labem, Hradec Králové, České Budějovice a Pardubice, postavila spalovna komunálního odpadu, jsme dle následujících výpočtů schopni ročně vyprodukovat bezmála 3 500 GWh elektrické energie. Vycházejíc ze statistik instituce „World Energy Council“, průměrný obyvatel zemí OECD, vyprodukuje průměrně 2,15 kilogramu komunálního odpadu denně. Budeme-li tedy počítat, že jsme schopni svázat odpad z oblastí o rádiu 20 kilometrů, s průměrnou hustotou obyvatelstva v České republice získáme následující počty obyvatel v jednotlivých aglomeracích.

Tabulka 5: Počet obyvatel v jednotlivých aglomeracích

Město	Počet obyvatel	Rozloha [km <sup>2</sup> ]	Počet obyvatel příměstské části
Praha	1 272 690	496	101 080
Brno	384 277	230	136 458
Ostrava	302 456	214	138 586
Plzeň	169 688	138	148 694
Liberec	102 247	106	152 950
Olomouc	100 043	103	153 349
Ústí nad Labem	95 003	94	154 546
Hradec Králové	94 242	106	152 950
České Budějovice	93 883	56	159 600
Pardubice	91 073	83	156 009
<b>Celkem</b>	<b>2 705 602</b>		<b>1 454 222</b>

Počet obyvatel v příměstských částech byl získán pomocí jednoduchého vzorce:

$$X_p = (\pi \cdot r^2 - A) \cdot \Omega \quad (5.1.1)$$

kde  $X_p$  vyjadřuje počet obyvatel v příměstských oblastech,  $r$  dojezdovou vzdálenost,  $A$  rozlohu města a  $\Omega$  hustotu obyvatelstva.

Celkem se, po sečtení počtu obyvatel v aglomeracích i v příměstských oblastech, jedná o **4 159 824** obyvatel. Při již zmíněné průměrné denní produkci odpadu (2,15 kilogramu) se jedná o **8 944** tun odpadu denně a **3 264 560** tun ročně. Výhřevnost komunálního odpadu se udává v rozmezí **9-12 GJ/tuna** v závislosti na oblasti, ze které odpad pochází. Jelikož námi požadovaný odpad pochází převážně z měst, dá se předpokládat vysoký obsah papíru a dalších lehce spalitelných a výhřevných složek. Budeme tedy uvažovat výhřevnost 11 GJ/tuna. Elektrárna má předpokládanou celkovou účinnost 35 %.

Množství vyrobené elektřiny je vyčteno dle vzorce:

$$E_1 = \Psi \cdot H \cdot \eta \cdot \frac{1}{3600} \quad (5.1.2)$$

$$E_1 = 3\,264\,560 \cdot 11 \cdot 0,35 \cdot \frac{1}{3600}$$

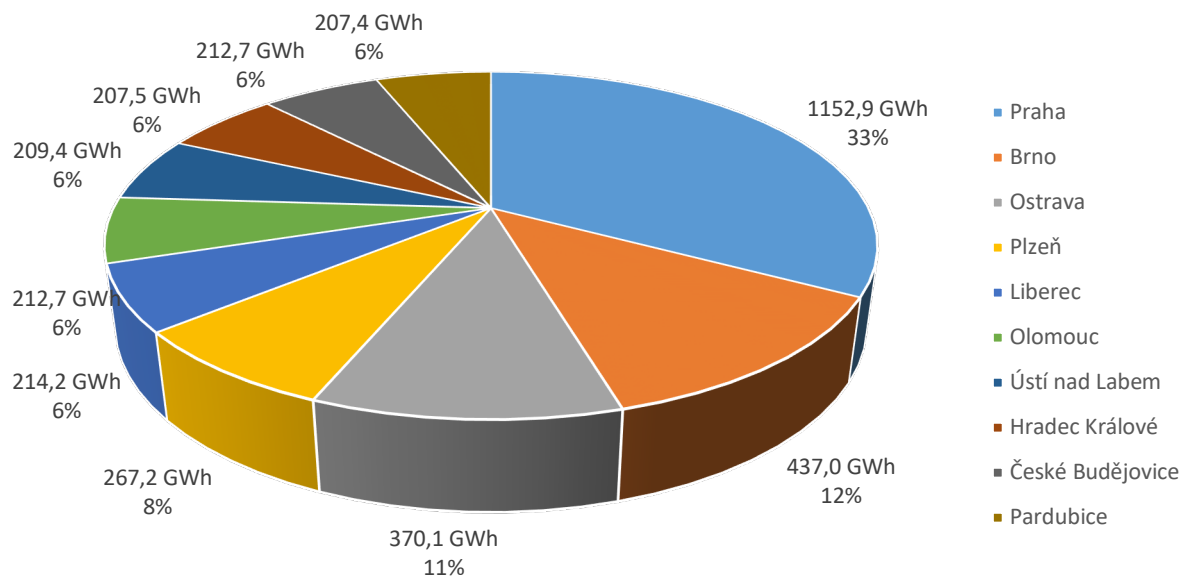
kde  $\Psi$  je celková roční produkce odpadu v tunách,  $H$  výhřevnost odpadu v gigajoulech na tunu a  $\eta$  termická účinnost v procentech. Po číselném dosazení do rovnice (5.1.2) získáme roční úhrn výroby elektrické energie spálením vyprodukovaného odpadu.

$$E_1 = 3\,491,3 \text{ GWh}$$

Tabulka 6: Souhrn hodnot pro energii vyprodukovanou spálením odpadu

	Hodnota	Jednotka
Celkový počet obyvatel	4 159 824	[osob]
Denní produkce odpadu per capita	2,15	[kg]
Celková denní produkce odpadu	8 944	[t]
Celková roční produkce odpadu	3 264 560	[t]
Výhřevnost odpadu	11	[GJ/t]
Termická účinnost	35	[%]
Celkové množství vyrobené elektřiny	3 491	[GWh]

Zastoupení jednotlivých měst na výrobě elektřiny spalováním odpadu je graficky vyjádřeno na grafu (viz. Graf 3).



Graf 4: Zastoupení měst na výrobě elektřiny z odpadu

V následující tabulce (viz. Tabulka č. 7) jsou vypsány instalované výkony elektráren postavených v jednotlivých městech. Nacházejí se zde i celkové počty obyvatel pro vizualizaci a porovnání rozdílů mezi městy.

Tabulka 7: Instalované výkony elektráren

Město	Celkový počet obyvatel	Instalovaný výkon [MW]
Praha	1 373 770	149
Brno	520 735	56
Ostrava	441 042	48
Plzeň	318 382	35
Liberec	255 197	28
Olomouc	253 392	27
Ústí nad Labem	249 549	27
Hradec Králové	247 192	27
České Budějovice	253 483	27
Pardubice	247 082	27

Z těchto výpočtů je patrné, že i kdybychom energeticky využili veškerý komunální odpad získaný z těchto deseti měst, byli bychom schopni vyprodukovat pouze 3 491 GWh, což znamená jen necelou polovinu potřebného objemu elektrické energie. Zbylé množství musíme tedy pokrýt jiným způsobem.

## 5.2 Pokrytí zbylého množství elektřiny

Zbylé množství elektřiny z původních 7 020 GWh, tedy 3 529 GWh, by bylo pokryto z paroplynového zdroje umístěného u jednoho z měst, kam by v rámci ušetření financí zároveň dodával teplo do domácností. Z toho důvodu by musel být provozován v topném období, které je od 1.9. do 31.5. To znamená 6 600 hodin provozu. Ve zbytku roku by se jednalo o pološpičkový zdroj, celkový počet hodin provozu na nominální výkon ročně bude tedy šplhat až k 7 000 hodin. V takovém případě by bylo zapotřebí zdroj dimenzovat na elektrický výkon 504 MW, který je vypočten dle vzorce:

$$P_z = \frac{E_2}{n} \quad (5.2.1)$$

$$P_z = \frac{3\,529\,000}{7\,000}$$

kde  $E_2$  vyjadřuje potřebný roční úhrn vyrobené elektřiny a  $n$  počet hodin provozu na nominální výkon. Po číselném dosazení do rovnice (5.1.3) získáme potřebný výkon paroplynové elektrárny.

$$P_z = 504,143 \text{ MW}$$

Tabulka 8: Souhrn hodnot pro paroplynovou elektrárnu

	Hodnota	Jednotka
Potřebná produkce elektřiny	3529	[GWh]
Hodin v provozu za rok	7000	[hod]
Elektrický výkon	526	[MW]

### 5.3 Spalovna Brno

Konkrétně se budeme v rámci práce zabývat spalovnou odpadů pro Brno. Jedná se o spalovnu dimenzovanou na objem odpadu od **520 735** obyvatel, tedy přibližně **1 120** tun odpadu denně. Takováto spalovna ročně vyrobí množství elektřiny odpovídající:

$$E_3 = X_B \cdot O \cdot H \cdot \eta \cdot \frac{365}{3\,600\,000} \quad (5.3.1)$$

$$E_3 = 520\,735 \cdot 2,15 \cdot 11 \cdot 0,35 \cdot \frac{365}{3\,600\,000}$$

kde  $X_B$  vyjadřuje počet obyvatel v Brně včetně dojezdové vzdálenosti,  $O$  denní produkci odpadu,  $H$  výhřevnost odpadu a  $\eta$  termickou účinnost.

$$E_3 = 437 \text{ GWh}$$

což při hodinách provozu na nominální výkon, které v případě spalovny činí přibližně 7750 (z důvodu zjednodušení nebyl brán v úvahu provoz na částečný výkon) hodin znamená, že elektrický výkon je dle (5.2.1) roven:

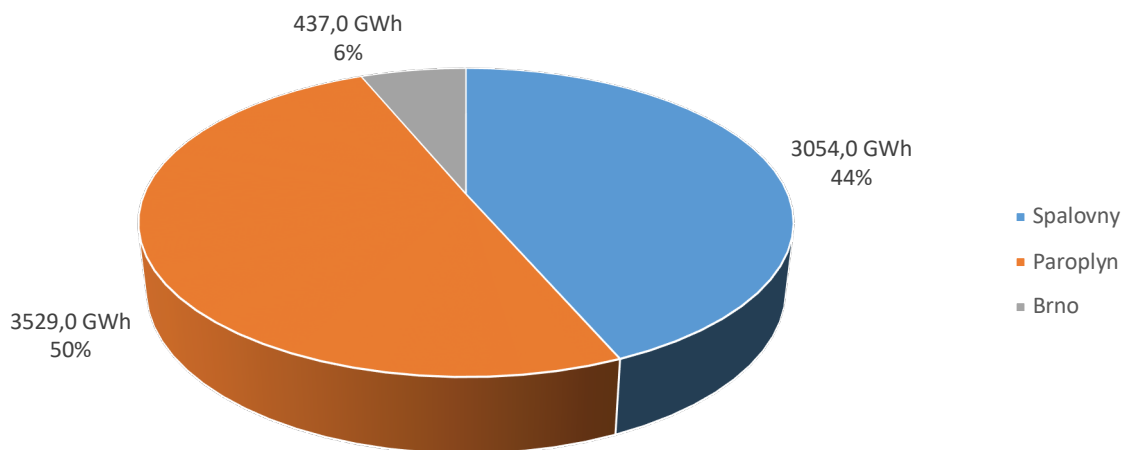
$$P_B = 56 \text{ MW}$$



Z čehož vyplývá, že cyklus dané spalovny budeme v dalších částech práce dimenzovat na elektrický výkon, který musí elektrárna poskytnout do sítě, 56 MW.

Tabulka 9: Souhrn hodnot pro spalovnu Brno

	Hodnota	Jednotka
Počet obyvatel ve městě	384 277	[osob]
Počet obyvatel v příměstské části	136 458	[osob]
Celkový počet obyvatel	520 735	[osob]
Denní produkce odpadu	1 120	[t]
Roční produkce odpadu	408 647	[t]
Roční úhrn výroby elektřiny	437	[GWh]
Celkový počet výrobních hodin	7 750	[hod]
Elektrický instalovaný výkon	56	[MW]



Graf 5: Zastoupení elektráren v celkové výrobě elektřiny

## 6 Výpočet bilančního schéma cyklu

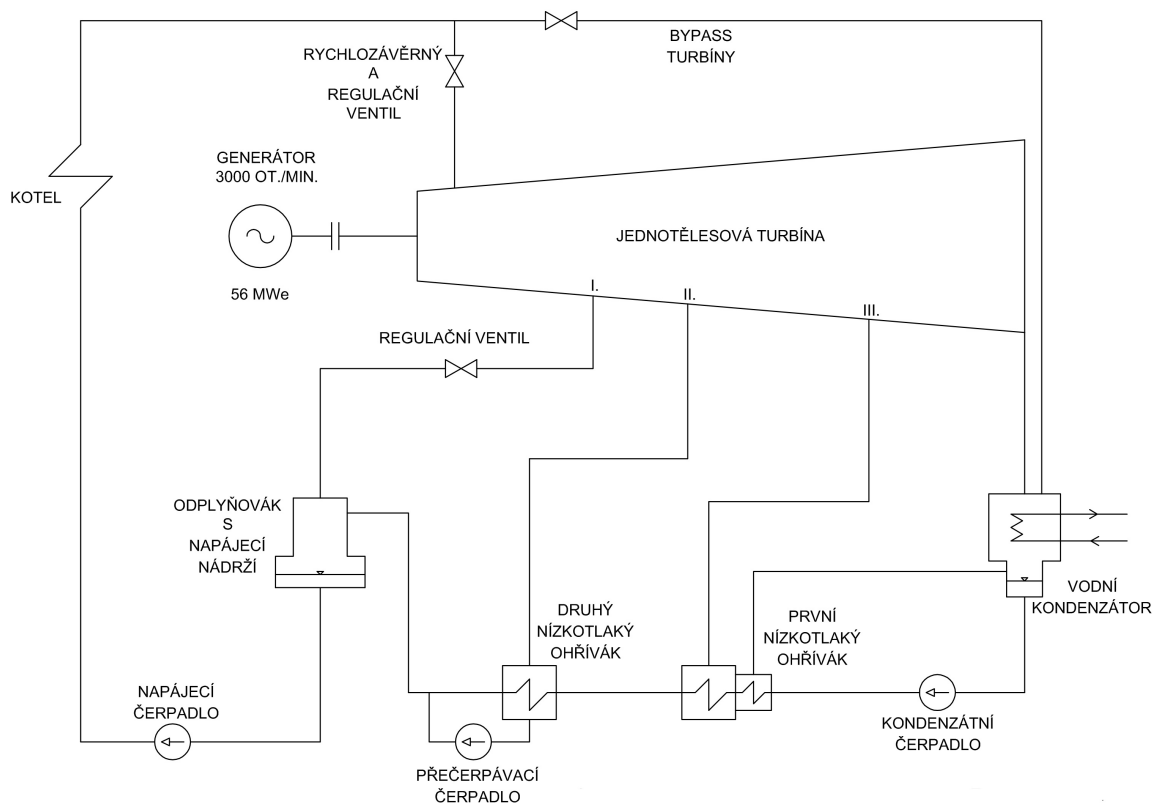
### 6.1 Základní popis bilančního schéma

Bilanční schéma cyklu, z anglického „Heat Balance Diagram“, je grafickým znázorněním termodynamického cyklu a jeho parametrů v důležitých částech. Uvádí se zde hmotnostní tok média, entalpie, teplota a tlak. V praxi se mimo jiné využívá k dimenzování jednotlivých komponent nebo výpočtům výkonů.

Ke korektnímu výpočtu jednotlivých uzlových bodů je potřeba již některé hodnoty znát. Nejčastěji se jedná o parametry páry, jež produkuje kotel. V případě této práce to není jinak a byly na základě již realizovaných projektů určeny tyto hodnoty:

- elektrický výkon generátoru: 56 MWe
- teplota admisní páry: 490 °C
- tlak admisní páry: 80 bar
- teplota napájecí vody: 120 °C

Z těchto čtyř vstupních parametrů se budou dále vypočítávat parametry v uzlových bodech námi navrženého cyklu, jehož ilustrační schéma je zobrazeno na obrázku (viz. Obrázek 7).



Obrázek 7: Schéma termodynamického cyklu

Jedná se o carnotizovaný Rankin-Claussiův cyklus sestávající se z kotle, jakožto zdroje tepla, jednotělesové parní turbíny, vodního kondenzátoru, dvou nízkotlakých ohříváků (příčemž první je doplněn o podchlazovač) a odplyňováku s napájecí nádrží. O cirkulaci média se starají tři čerpadla: kondenzátní, přečerpávací a napájecí. Turbína je plnootáčková, je přímo připojena na elektrický generátor, její nominální otáčky jsou tedy  $3000 \text{ s}^{-1}$ , což odpovídá frekvenci sítě 50 Hz.

## 6.2 Seznam funkcí pro výpočty s párou

Z důvodu zjednodušení a lepší orientace budou v této kapitole vyjmenovány, očíslovány a okomentovány veškeré termodynamické funkce potřebné pro výpočty páry, jež byly použity v práci. Na tyto funkce se budeme odkazovat pomocí jejich čísla s tím, že pokud není napsáno jinak, jsou použity parametry odpovídající dané kapitole. Číselné vyjádření funkcí je pak provedeno pomocí výpočetních tabulek pro software Microsoft Excel<sup>®</sup> jménem „X Steam Tables“, které odpovídají normě IAPWS IF-97.

$$\text{Entalpie závislá na tlaku a suchosti} \quad h_{px}(p_x; x_x) \quad (6.2.1)$$

$$\text{Entalpie závislá na tlaku a teplotě} \quad h_{pT}(p_x; T_x) \quad (6.2.2)$$

$$\text{Entropie závislá na tlaku a entalpii} \quad s_{ph}(p_x; h_x) \quad (6.2.3)$$

$$\text{Saturační tlak závislý na teplotě} \quad p_{sat\_T}(T_x) \quad (6.2.4)$$

$$\text{Suchost závislá na tlaku a entropii} \quad x_{ps}(p_x; s_x) \quad (6.2.5)$$

$$\text{Teplota závislá na tlaku a entalpii} \quad T_{ph}(p_x; h_x) \quad (6.2.6)$$

### 6.3 Výpočet vstupní páry do turbíny

Prvním krokem ve výpočtu je určení parametrů páry vstupující do turbíny. Z kotle, jak bylo zmíněno již dříve, vystupuje pára o teplotě  $T_1 = 490$  °C a tlaku  $p_1 = 80$  bar. Entalpie této páry se určí dle vztahu (6.2.2).

$$h_1 = 3374,5 \frac{kJ}{kg}$$

Před turbínou se nachází soustava regulačních a jednoho rychlozávěrného ventilu. V těchto ventilech dochází k tlakové ztrátě o velikosti **2 %**. Tato hodnota byla zvolena na základě praxe. Jedná se o izoentalpický děj, to znamená, že entalpie páry zůstává stejná jako před ventily. Teplota je počítána dle vztahu (6.2.6) a entropie dle (6.2.3)

$$h_2 = 3374,5 \frac{kJ}{kg}$$

$$p_2 = 78,4 \text{ bar}$$

$$T_2 = 489,2 \text{ °C}$$

$$s_2 = 6,70275 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

### 6.4 Výpočet výstupní páry z turbíny

Parametry páry na výstupu z turbíny jsou závislé na teplotě chladicí vody v kondenzátoru. V tomto případě uvažujeme, že chladicí vodu odebíráme z řeky, a tedy je vstupní teplota chladicí vody  $T_{20} = 10$  °C s tím, že v kondenzátoru se chladicí voda ohřeje o **9 °C**. To znamená, že výstupní teplota chladicí vody je tedy  $T_{21} = 19$  °C. Teplotu v kondenzátoru a tudíž i na výstupu z turbíny tedy určíme jako:

$$T_3 = T_{21} + \delta_k \tag{6.4.1}$$

kde  $\delta_k$  je koncový rozdíl teplot, jež je na základě použitého kondenzátoru oceněn na **3 °C**. Po číselném dosazení do rovnice (6.4.1) získáme teplotu  $T_3$ .

$$T_3 = 21 \text{ °C}$$

Této teplotě pak odpovídá saturační tlak dle vztahu (6.2.4).

$$p_3 = 0,026 \text{ bar}$$

V turbíně probíhá izoentropický děj s vnitřní termodynamickou účinností  $\eta_t = 90,1$  %. Entalpie páry na výstupu z turbíny je počítána dle rovnice (6.4.2).

$$h_3 = h_2 - (h_2 - h_{3iz}) \cdot \eta_t \tag{6.4.2}$$

kde  $h_{3iz}$  je takzvaná „entalpie izoentropická“, která odpovídá entalpii páry prošlé turbínou při zanedbání vnitřní termodynamické účinnosti. Pro získání této hodnoty je nutné získat nejdříve suchost dle vztahu (6.2.5) s parametry s indexy „3“, přičemž entropie páry na vstupu do turbíny i na výstupu je stejná.

$$s_3 = 6,70275 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$x_3 = 0,7687$$

Poté jsme již schopni určit hodnotu entalpie izoentropické ze vztahu (6.2.1) a parametrů s indexy „3“.

$$h_{3is} = 1974,7 \frac{kJ}{kg}$$

Dosažením do rovnice (6.4.2) získáme entalpii páry na výstupu z turbíny.

$$h_3 = 2113,3 \frac{kJ}{kg}$$

## 6.5 Výpočet napájecí vody na výstupu z kondenzátoru

Kondenzát, později označovaný jako napájecí voda, vzniklá kondenzací páry v kondenzátoru má shodnou teplotu i tlak jako pára vstupující do kondenzátoru, tedy:

$$T_4 = 22 \text{ °C}$$

$$p_4 = 0,026 \text{ bar}$$

entalpie kondenzátu je však odlišná z důvodu přesunu parametrů z pravé mezní křivky na levou, tedy sytou kapalinu. Entalpie takové kapaliny je určena ze vztahu (6.2.1) s tím, že suchost páry je 0 %.

$$h_4 = 92,289 \frac{kJ}{kg}$$

## 6.6 Výpočet napájecí vody na výstupu z napájecího čerpadla

Pro další postup výpočtu je nutné postupovat z druhé strany cyklu („od konce“). Je tedy potřeba získat parametry napájecí vody na výstupu z napájecího čerpadla. Počítáme s tlakovými ztrátami v potrubních trasách a v kotli o velikosti 30 %. Entalpie páry je vypočtena ze vztahu (6.2.2).

$$T_{19} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{19} = 104 \text{ bar}$$

$$h_{19} = 510,98 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.7 Výpočet napájecí vody na výstupu z napájecí nádrže

V odplynováku dochází k varu napájecí vody z důvodu uvolnění rozpuštěných plynů v kapalině. V rámci zjednodušení výpočtu je zanedbán nárůst teploty v napájecím čerpadle. Parametry napájecí vody na výstupu z napájecí nádrže jsou určeny dle vztahů (6.2.4) a (6.2.1), přičemž suchost páry je 0 %.

$$T_{18} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{18} = 1,987 \text{ bar}$$

$$h_{18} = 503,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.8 Výpočet topné páry v odběru číslo 1

Parametry topné páry v odběru číslo 1, která vede do odplynováku, jsou závislé na tlaku v odplynováku  $p_{17} = p_{18} = 1,987 \text{ bar}$ . Při započítání tlakových ztrát ve škrtícím ventilu a potrubních trasách, jež čítají 5 %, můžeme vypočítat i entalpii páry v odběru stejným postupem jako v odstavci 6.4.

$$p_{16} = 2,086 \text{ bar}$$

$$s_{16} = 6,70275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$x_{16} = 0,9264$$

$$h_{16is} = 2546,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{16} = 121,5^\circ\text{C}$$

$$h_{16} = 2628,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.9 Výpočet topné páry na vstupu do odplynováku

Mezi odběrem číslo 1 a vstupem páry do odplynováku prochází pára škrtícím ventilem, kde vzniká tlaková ztráta. Tlak páry na vstupu do odplynováku je stejný jako tlak kapaliny na výstupu, entalpie páry je pak stejná jako na výstupu z turbíny. Teplota vstupující páry je dopočtena dle vztahu (6.2.6).

$$p_{17} = 1,987 \text{ bar}$$

$$h_{17} = 2628,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{17} = 120 \text{ °C}$$

## 6.10 Výpočet napájecí vody na vstupu do odplynováku

Vzhledem k tomu, že se napájecí voda ohřívá na požadovanou teplotu i v odplynováku, nachází se tedy v cyklu celkem tři zdroje tepla, jež ohřívají napájecí vodu. Mezi tyto zdroje (odplynovák, NTO1 a NTO2) je nárůst teploty rozdělen rovnoměrně. Stejně tak tlak ve větvi napájecí vody mezi kondenzátním čerpadlem a odplynovákem je dle praxe zvýšen o 5 barů. Rozdíl teplot, které musí jednotlivé výměníky vytvořit je daný následujícím vztahem.

$$\Delta T = \frac{T_{18} - T_4}{3} \quad (6.10.1)$$

kde  $T_{18}$  je teplota napájecí vody na výstupu z napájecí nádrže a  $T_4$  teplota kondenzátu na výstupu z kondenzátoru. Dle vzorce (6.10.1) je vypočtena teplota kondenzátu na vstupu do odplynováku, entalpie pak dle vztahu (6.2.2).

$$T_{15} = T_{18} - \Delta T$$

$$T_{15} = 87,3 \text{ °C}$$

$$p_{15} = 6,987 \text{ bar}$$

$$h_{15} = 366,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.11 Výpočet napájecí vody na výstupu z NTO2

Parametry napájecí vody na výstupu z nízkotlakého ohříváku (NTO2), tedy hodnoty s indexem „14“, jsou shodné s hodnotami na vstupu do odplynováku, tedy hodnoty s indexem „15“.

$$T_{14} = 87,3 \text{ °C}$$

$$p_{14} = 6,987 \text{ bar}$$

$$h_{14} = 366,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.12 Výpočet kondenzátu topné páry na výstupu z přečerpávacího čerpadla

Zkondenzovaná topná pára použitá na ohřev napájecí vody v NTO2 se pomocí přečerpávacího čerpadla vrací zpět do okruhu napájecí vody, má tedy opět shodné parametry jako napájecí voda v těchto místech.

$$T_{13} = 87,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{13} = 6,987 \text{ bar}$$

$$h_{13} = 366,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.13 Výpočet topné páry v odběru číslo 2

Stejně jako v případě odběru č.1 jsou parametry páry v tomto odběru závislé na tlaku v NTO2, kde je tlak odpovídající tlaku na mezi sytosti pro teplotu napájecí vody procházející NTO2. Tlak topné páry tedy je určen ze vztahu (6.2.4).

$$p_{11} = 0,7381 \text{ bar}$$

kde hodnota teploty  $T_{11} = 91,3 \text{ } ^\circ\text{C}$  bude vysvětlena v následující kapitole. K tlaku  $p_{11}$  jsou poté připočítány ztráty v potrubní trase, jež činí 5 %, z čehož jsou následně určeny ostatní parametry odběrové páry. Výpočet je opět shodný s výpočtem v kapitole 6.4.

$$p_{10} = 0,7750 \text{ bar}$$

$$s_{10} = 6,70275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$x_{10} = 0,8808$$

$$h_{10is} = 2392,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{10} = 2489,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{16} = 92,9^\circ\text{C}$$



## 6.14 Výpočet topné páry na vstupu do NTO2

Topná pára směřující do NTO2 z odběru číslo 2 prochází potrubím, kde ztratí 5 % své tlakové energie. Jedná se o izoentalpický děj  $h_{11} = h_{10} = 2489,6 \frac{kJ}{kg}$ . V předešlé kapitole již bylo určeno, že tlak na vstupu do ohříváku je roven tlaku na mezi sytosti pro teplotu  $T_{11} = 91,3 \text{ °C}$ , jež byla získána jako součet výstupní teploty napájecí vody z ohříváku  $T_{14} = 87,3 \text{ °C}$  a koncového teplotního rozdílu, který byl v tomto případě zvolen jako  $\delta = 4 \text{ °C}$ . Tlak je určen dle (6.2.4).

$$T_{11} = 91,3 \text{ °C}$$

$$p_{11} = 0,7381 \text{ bar}$$

## 6.15 Výpočet kondenzátu topné páry na výstupu z NTO2

V nízkotlakém ohříváku probíhá kondenzace topné páry, která tím předává svou energii napájecí vodě. Výstupní kondenzát má shodnou teplotu s výstupní teplotou napájecí vody z ohříváku, tedy:

$$T_{12} = 87,3 \text{ °C}$$

tlak kondenzátu poté odpovídá tlaku na mezi sytosti pro teplotu  $T_{12}$  dle (6.2.4) a entalpie média dle vztahu (6.2.2).

$$p_{12} = 0,6337 \text{ bar}$$

$$h_{12} = 365,61 \frac{kJ}{kg}$$

## 6.16 Výpočet napájecí vody na výstupu z NTO1

V rámci návrhu počítáme, že reálná vzdálenost mezi oběma nízkotlakými ohříváky je relativně malá, tlakové ztráty v potrubní trase mezi ohříváky jsou tedy zanedbány. Parametry napájecí vody jsou dle vztahů (6.10.1) a (6.2.2).

$$p_{14} = 6,987 \text{ bar}$$

$$T_9 = 54,5 \text{ °C}$$

$$h_9 = 228,73 \frac{kJ}{kg}$$

### 6.17 Výpočet topné páry v odběru číslo 3

Při výpočtu parametrů topné páry v odběru číslo 3 postupujeme stejným způsobem jako v případě odběru číslo 2. Je nutné získat potřebný tlak páry v odběru. Ten je získán jako tlak na mezi sytosti pro teplotu  $T_7 = 58,5$  °C, jejíž vyjádření bude opět uvedeno v následující kapitole, ke kterému jsou připočítány tlakové ztráty v potrubí, jež byly opět určeny na 5 %.

$$p_6 = 0,1949 \text{ bar}$$

$$s_6 = 6,70275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$x_6 = 0,8289$$

$$h_{6is} = 2204,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_6 = 2320,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_6 = 59,5^\circ\text{C}$$

### 6.18 Výpočet topné páry na vstupu do NTO1

Topná pára z odběru číslo 3 postupuje potrubím, čímž ztratí 5 % své tlakové energie. Její teplota těsně před ohřívákem je opět dána jako součet teploty výstupní napájecí vody z ohříváku  $T_9 = 54,5$  °C a koncového teplotního rozdílu  $\delta = 4$  °C. Entalpie je shodná s entalpií v odběru, tlak páry je poté vypočten na základě vztahu (6.2.4).

$$T_7 = 58,5 \text{ °C}$$

$$p_7 = 0,1856 \text{ bar}$$

$$h_7 = 2320,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

### 6.19 Výpočet kondenzátu topné páry na výstupu z NTO1

Topná pára přivedená do NTO1 v ohříváku kondenzuje a tvoří kondenzát, který je dále veden přímo do kondenzátoru. Z toho důvodu jsou parametry kondenzátu shodné s parametry napájecí vody na výstupu z kondenzátoru.

$$T_8 = 22 \text{ °C}$$

$$p_8 = 0,026 \text{ bar}$$

$$h_8 = 92,289 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.20 Výpočet napájecí vody na výstupu z kondenzátního čerpadla

Kondenzátní čerpadlo má za úkol cirkulovat napájecí vodu v cyklu a zároveň zvýšit její tlak na tlak požadovaný v odplynováku. Stejně jako u napájecího čerpadla zanedbáváme nárůst teploty. Tlak je v celé větvi stejný, a sice dle praxe zvýšený o 5 bar oproti saturačnímu tlaku v odplynováku. Entalpie je určena vztahem (6.2.2).

$$T_5 = 22 \text{ °C}$$

$$p_5 = 6,9867 \text{ bar}$$

$$h_5 = 92,940 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## 6.21 Výpočet hmotnostních průtoků

Při výpočtu celkového hmotnostního průtoku i hmotnostního průtoku jednotlivých větví cyklu se vychází z požadovaného výkonu, který je zvýšen o celkové mechanické ztráty na turbosoustrojí. Vzhledem k faktu, že se v práci nevěnujeme návrhu průtočné části turbíny, ani jejím komponentům, je tato hodnota určena na základě praxe, kdy se u turbín podobných parametrů pohybuje v rozmezí 200 až 400 kW. V rámci výpočtu budeme uvažovat horní hranici z důvodu rezervy.

$$P_t = P_p + P_z \quad (6.21.1)$$

kde  $P_t$  značí potřebný celkový výkon turbíny,  $P_p$  výkon požadovaný dodavatelem a  $P_z$  mechanické ztráty v turbosoustrojí. Po dosazení do rovnice získáme celkový výkon, který je potřeba, aby turbína poskytla.

$$P_t = 56\,000 + 400 = 56\,400 \text{ kW}$$

Dále se počítá s jednotkovým množstvím páry a určuje se tedy jaký výkon poskytne 1 kg páry. Z takto získaného výkonu na kilogram páry se jednoduše dopočítá požadovaný hmotnostní průtok. Označíme-li celkový hmotnostní průtok cyklem jako „1“ a jednotlivé odběry jako  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  a výstup z turbíny jako  $X_4$ , získáme následující rovnici o čtyřech neznámých.

$$1 = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \quad (6.21.2)$$

Jednotlivé hmotnostní průtoky ve větvích cyklu ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ) pak lze získat pomocí tepelných bilancí v jednotlivých komponentách cyklu. Tyto komponenty mají vlastní hodnoty účinnosti přenosu tepla, které v rámci práce budeme uvažovat u všech komponent za shodné, a sice  $\eta = 0,95$ . Získáme tak tři rovnice pro tři neznámé, z čehož je možné následně získat i čtvrtou neznámou. U větvi s párou je počítáno s entalpickým spádem, v případě větvi s vodou pak se vztahem založeným na součiniteli měrné tepelné kapacity.

$$\Delta h = c_p \Delta T \quad (6.21.3)$$

Vzhledem k závislosti tohoto koeficientu na teplotě je v rámci výpočtu počítáno se střední hodnotou teploty získanou jako aritmetický průměr mezi počáteční a koncovou teplotou. Základní rovnice pro tepelnou bilanci ve výměníku je:

$$\sum_k X \cdot \Delta h \cdot \eta = \sum_m Y \cdot \Delta T \cdot c_p L_T \left( \frac{\sum_n T}{n} \right) \quad (6.21.4)$$

kde  $X$  značí hmotnostní průtok média odevzdávajícího ve výměníku teplo,  $\Delta h$  entalpický spád tohoto média,  $\eta$  účinnost tepelné výměny,  $Y$  hmotnostní průtok média přijímajícího ve výměníku teplo,  $\Delta T$  tepelný spád tohoto média a  $c_p L_T$  měrnou tepelnou kapacitu střední teploty tohoto média.

Po dosazení rovnice (6.21.2) do rovnice (6.21.4) získáme soustavu rovnic, které vyjadřují jednotlivé tepelné výměny ve výměnících ODPLYŇOVÁK (6.21.5), NTO2 (6.21.6) a NTO1 (6.21.7):

$$X_1 \cdot (h_{17} - h_{18}) \cdot \eta = (1 - X_1) \cdot (T_{18} - T_{15}) \cdot C_p L_T \left( \frac{T_{18} + T_{15}}{2} \right) \quad (6.21.5)$$

$$X_2 \cdot (h_{11} - h_{12}) \cdot \eta = (1 - X_1 - X_2) \cdot (T_{14} - T_9) \cdot C_p L_T \left( \frac{T_{14} + T_9}{2} \right) \quad (6.21.6)$$

$$X_3 \cdot (h_7 - h_8) \cdot \eta = (1 - X_1 - X_2) \cdot (T_9 - T_5) \cdot C_p L_T \left( \frac{T_9 + T_5}{2} \right) \quad (6.21.7)$$

po číselném dosazení do rovnic (6.21.5), (6.21.6) a (6.21.7):

$$X_1 \cdot (2628,3 - 503,79) \cdot 0,95 = (1 - X_1) \cdot (120 - 87,3) \cdot 4,221867 \quad (6.21.8)$$

$$X_2 \cdot (2489,6 - 365,61) \cdot 0,95 = (1 - X_1 - X_2) \cdot (87,3 - 54,5) \cdot 4,188894 \quad (6.21.9)$$

$$X_3 \cdot (2320,2 - 92,289) \cdot 0,95 = (1 - X_1 - X_2) \cdot (54,5 - 22) \cdot 4,178855 \quad (6.21.10)$$

z čehož plyne, že:

$$X_1 = 0,0640$$

$$X_2 = 0,0597$$

$$X_3 = 0,0562$$

$$X_4 = 0,8201$$

Tímto jsme získali jednotkové hmotnostní průtoky v jednotlivých větvích cyklu. To znamená, že je nyní možné vypočítat pomocí právě spočítaných jednotkových hmotnostních průtoků a entalpických spádů v turbíně jednotkový výkon, tedy výkon, který v turbíně vyprodukuje jeden kilogram páry. Vycházíme totiž z rovnice pro výkon turbíny:

$$P = \dot{m} \cdot a_t \quad (6.21.11)$$

kde  $P$  je výkon turbíny,  $\dot{m}$  hmotnostní průtok páry procházející turbínou a  $a_t$  technická práce turbíny. V případě, kdy hmotnostní průtok je roven 1, pak je výkon turbíny roven její technické práci, která se dále vypočítá dle rovnice (6.21.11).

$$a_t = \Delta h \quad (6.21.12)$$

kde  $\Delta h$  je entalpický spád na turbíně. Po dosazení do rovnic (6.21.11) a (6.21.12) získáme následující rovnici pro výpočet jednotkového výkonu.

$$P_j = 1 \cdot (h_2 - h_{16}) + (1 - X_1) \cdot (h_{16} - h_{10}) + (1 - X_1 - X_2) \cdot (h_{10} - h_6) + (1 - X_1 - X_2 - X_3) \cdot (h_6 - h_3) \quad (6.21.13)$$

kde  $P_j$  vyjadřuje jednotkový výkon páry. Po číselném dosazení do rovnice (6.21.13) jednotkový výkon, tedy výkon vyprodukovaný turbínou po průchodu jednoho kilogramu páry.

$$P_j = 1 \cdot (3374,5 - 2628,3) + (1 - 0,0640) \cdot (2628,3 - 2489,6) + (1 - 0,0640 - 0,0597) \cdot (2489,6 - 2320,2) + (1 - 0,0640 - 0,0597 - 0,0562) \cdot (2320,2 - 2113,3) \quad (6.21.14)$$

$$P_j = 1194,1 \text{ kW}$$

Pomocí zjištěného  $P_j$ , je nyní možné získat celkový hmotnostní průtok páry. Tento údaj je jeden z nejdůležitějších v celém výpočtu, definuje totiž objem páry, kterou musí kotel zajistit pro generaci potřebného výkonu turbínou.

$$\dot{m}_c = \frac{P_t}{P_j} \quad (6.21.15)$$

$$\dot{m}_c = 47,23 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

kde  $\dot{m}_c$  vyjadřuje právě celkový hmotnostní průtok páry cyklem. Z celkového hmotnostního průtoky se dále vypočítají hmotnostní průtoky v jednotlivých větvích a to dle vzorce:

$$\dot{m}_k = X_k \cdot \dot{m}_c \quad (6.21.16)$$

kde  $\dot{m}_k$  je hmotnostní průtok větví a  $X_k$  již dříve vypočítané poměrové součinitele.

$$\dot{m}_1 = 3,02 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_2 = 2,82 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_3 = 2,66 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_4 = 38,73 \frac{kg}{s}$$

## 6.22 Výpočet hmotnostního průtoku chladicí vody

Opět, stejně jako při výpočtu hmotnostních průtoků v předchozí kapitole, vycházíme z předpokladu, že poměr hmotnostních průtoků chladicí vody a páry v kondenzátoru je v ideálním případě roven poměru entalpických spádů těchto dvou větví. V celé práci nepočítáme s ideálními parametry, zavedeme tedy i zde účinnost výměny tepla ve výměníku  $\eta = 0,95$ . Entalpický spád u chladicí vody je podobně jako v předchozích kapitolách výrazně výhodnější počítat jako  $\Delta h = c_p \Delta T$ . Rovnice popisující výměnu tepla v kondenzátoru je tedy následující:

$$\dot{m}_4 \cdot (h_3 - h_4) = \eta \cdot \dot{m}_{ch} \cdot (T_{21} - T_{20}) \cdot c_p L_T \left( \frac{T_{21} + T_{20}}{2} \right) \quad (6.22.1)$$

kde  $\dot{m}_4$  je hmotnostní průtok páry kondenzátorem,  $h_3$  entalpie páry na vstupu do kondenzátoru,  $h_4$  entalpie kondenzátu na výstupu z kondenzátoru,  $\dot{m}_{ch}$  hmotnostní průtok chladicí vody kondenzátorem,  $T_{21}$  teplota chladicí vody na výstupu z kondenzátoru,  $T_{20}$  teplota chladicí vody na vstupu do kondenzátoru a  $c_p L_T$  měrná tepelná kapacita vody pro střední hodnotu teploty chladicí vody. Po dosazení do rovnice (6.22.1) získáme hmotnostní průtok chladicí vody:

$$38,73 \cdot (2113,3 - 92,289) = 0,95 \cdot \dot{m}_{ch} \cdot (19 - 10) \cdot 4,19083$$

$$\dot{m}_{ch} = 2184,5 \frac{kg}{s}$$

## 6.23 Shrnutí

Celkový hmotnostní průtok páry vycházející z kotle o teplotě 490 °C a tlaku 80 bar, je 47,23 kilogramu páry za sekundu. Tato pára je skrz regulační a rychlozávěrné ventily vedena do turbíny, kde vykonává práci, a odkud je postupně odebírána pro účely regenerace, a tedy zvýšení účinnosti cyklu.

První odběr, který zásobuje teplem odplynovák s napájecí nádrží, kde se kondenzát ohřívá na teplotu varu, je osazen na tlaku 2,086 bar, čemuž odpovídá teplota 121,5 °C a hmotnostní průtok nutný pro dostatečné vytápění je 3,02 kilogramu páry za sekundu.

Druhý odběr, zásobující teplem nízkotlaký ohřívák číslo 2, ve kterém se kondenzát ohřívá z 54,5 °C na 87,3 °C, se nachází na tlaku 0,7750 bar. To značí teplotu páry 92,9 °C a potřebný hmotnostní průtok páry pro vytápění je 2,82 kilogramu páry za sekundu.

Poslední odběr vytápí nízkotlaký ohřívák číslo 1. Zde se kondenzát ohřívá z původních 22 °C na 54,5 °C. Po započtení tlakových ztrát na vedení a výsledného teplotního rozdílu se musí odběr z turbíny nacházet na tlaku 0,1949 bar. Hmotnostní průtok výměníkem je 2,66 kilogramu páry za sekundu.

Za posledním stupněm průtočné části turbíny vychází pára z tělesa turbíny a je dále vedena do vodního kondenzátoru. Zde je zajištěna kondenzace přivedené páry díky cirkulující chladicí vodě, která se přivádí z řeky. Pára vstupující do kondenzátoru má teplotu 22 °C, čemuž odpovídá saturační tlak 0,026 bar. Hmotnostní průtok páry kondenzátorem pak činí 38,73 kilogramu páry za sekundu. Chladicí voda má na vstupu do kondenzátoru výpočetní teplotu 10 °C a v kondenzátoru se ohřeje o 9 °C, tedy na výsledných 19 °C. Pro udržení kondenzace páry je potřebný hmotnostní průtok chladicí vody 2 184,5 kilogramu vody za sekundu.

O cirkulaci média v cyklu se starají celkem tři hlavní čerpadla. První v pořadí je kondenzátní čerpadlo. Je umístěno hned za kondenzátorem a jeho úkolem je navýšit tlak kondenzátu z původních 0,026 na 6,9 bar. Druhým v pořadí je přečerpávací čerpadlo, které se stará o zvýšení tlaku kondenzátu z nízkotlakého ohříváku číslo 2, aby mohl být tento kondenzát zaveden do odplynováku. Toto čerpadlo zvyšuje tlak kondenzátu z 0,738 na 6,99 bar. Posledním čerpadlem v cyklu je napájecí čerpadlo. To se stará o zvýšení tlaku napájecí vody na výstupu z napájecí nádrže z původních 1,99 na 104 bar.

Kompletní tepelně hmotový diagram (HBD) je vymodelován v programu AutoCAD a přiložen v příloze.

## 6.24 Souhrn parametrů

V následující tabulce jsou přehledně uspořádané parametry dle čísla kříže. Hodnoty tlaků, které jsou uvedeny v závorkách jsou pouze informativní, v praxi se neuvádějí a pro výpočet cyklu nejsou podstatné. Jsou totiž velmi závislé na dispozičním řešení elektrárny, které je v našem případě neznámé. Hodnoty uvedené v závorkách jsou dopočteny jen podle ostatních parametrů.

Tabulka 10: Kompletní výčet parametrů cyklu dle křížů

Číslo kříže	Hmotnostní průtok [kg/s]	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie [kJ/kg]
1	47,23	490	80	3 374,5
2	47,23	489,2	78,4	3 374,5
3	38,73	22	0,026	2 113,3
4	41,39	22	0,026	92,289
5	41,39	22	(6,9867)	92,940
6	2,66	59,5	0,1949	2 320,2
7	2,66	58,5	0,1856	2 320,2
8	2,66	22	0,026	92,289
9	41,39	54,5	(6,9867)	228,7
10	2,82	92,9	0,7750	2 489,6
11	2,82	91,3	0,7381	2 489,6
12	2,82	87,3	(0,6337)	365,61
13	2,82	87,3	(6,9867)	366,11
14	41,39	87,3	(6,9867)	366,11
15	44,21	87,3	(6,9867)	366,11
16	3,02	121,5	2,086	2 628,3
17	3,02	120	1,987	2 628,3
18	47,23	120	1,987	503,79
19	47,23	120	(104)	510,98



## 7 Závěr

Úvodem práce byl proveden základní rozbor současných aktivních zdrojů elektrické energie. Zaměřili jsme se na druhy zdrojů, jejich možnosti, výkony a rozmístění. Byla objevena poměrně velká centralizace zdrojů, většina elektráren je umístěna v severní části Čech. Umístění především uhelných elektráren na severu Čech je sice logické, avšak způsobuje se tím nerovnoměrné zatížení přenosové soustavy.

Dále byly představeny základní principy, s jejich výhodami a nevýhodami, jednotlivých možností elektráren, jejichž stavba by v našich podmínkách měla smysl. Mezi vhodné zdroje patřily elektrárny jaderné a uhelné, stejně jako obnovitelné zdroje, mezi které patří vodní, fotovoltaické nebo větrné elektrárny. Dalšími volbami byla paroplynová stanice a spalovny biomasy nebo komunálního odpadu. Bylo však rozhodnuto, že jaderný zdroj bude vynechán z možností kvůli velkým komplikacím s výstavbou tohoto zdroje.

Následovala analýza energetické situace v České republice. Nejdříve jsme se věnovali bilanci elektřiny po současnost. Bylo vycházeno ze dvou souborů dat, které navzájem sloužily jako porovnání dvou různých scénářů. Zjistili jsme, že tuzemskému energetickému trhu velice pomohla výstavba jaderné elektrárny Temelín, jejíž vliv přetrvává doteď a prakticky zajistila současnou příznivou situaci. Momentálně totiž naše zdroje ročně vyrobí o přibližně deset tisíc gigawatt hodin elektrické energie více než je spotřebováno. Pokračováním byl nastíněn přibližný vývoj bilance elektřiny. Z čehož byla určena velikost zdroje, který bude v dalších kapitolách podrobně zkoumán tak, aby pokryl stoupající poptávku po elektrické energii. Také bylo určeno přibližné datum, do kdy je potřeba tento zdroj vybudovat, aby se obě křivky výroby a spotřeby elektřiny neprotuly a Česká republika tak neztratila energetickou soběstačnost.

Po analýze energetické situace České republiky, jsme přistoupili k návrhu zdroje, který by rostoucí spotřebu elektrické energie vykompenzoval. Bohužel bylo v rámci výpočtů nalezeno tak velké číslo potřebného výkonu, že by se vybudování tak obrovského zdroje nevyplatilo. Z toho důvodu bylo navrženo řešení rozdělit potřebný výkon do několika samostatných výrobních zdrojů. Nejlepší možností se jevila spalovna komunálního odpadu. Díky vybudování spaloven komunálního odpadu v deseti největších městech České republiky bychom byli schopni pokrýt skoro polovinu potřebného výkonu. Zbýlé množství je možné pokrýt například paroplynovou stanicí s teplofikací, která by snížila jinak vysoké náklady na provoz paroplynové elektrárny. Na konec byl proveden ukázkový návrh spalovny komunálního odpadu pro město Brno.

V poslední kapitole jsme se věnovali návrhu a konkrétnímu výpočtu termodynamického cyklu pro námi zvolenou spalovnu komunálního odpadu v Brně. Cyklus jsme navrhli jako jednoduchý carnotizovaný Rankine – Clausiův cyklus, který se sestával z kotle, jednotělesové parní turbíny, vodního kondenzátoru, dvou nízkotlakých ohříváků a odplyňováku s napájecí nádrží. Postupně byly napočítány všechny důležité hodnoty v uzlových bodech jako je entalpie, tlak, teplota a hmotnostní průtok daného média.

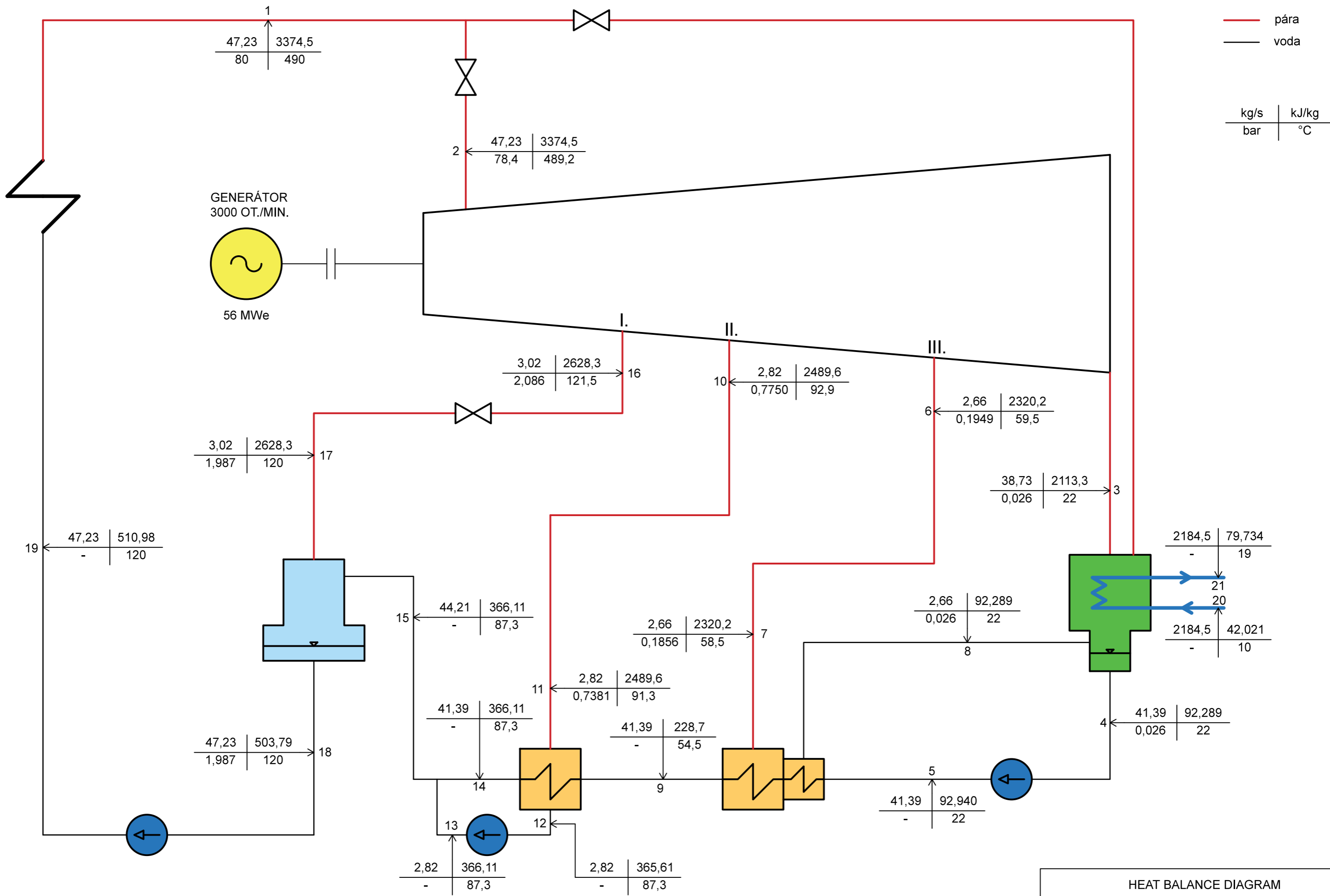
Na konec bylo vymodelováno bilanční schéma celého termodynamického cyklu, kde jsou veškeré důležité veličiny číselně vyobrazeny a cyklus přehledně zobrazen.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-862-6.
- [2] KRAJÍČ, Ladislav. *Parní turbíny a příslušenství*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. ISBN 978-80-261-0731-6.
- [3] ŠKOPEK, Jan. *Parní turbína: tepelný a pevnostní výpočet*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. ISBN 978-80-7043-256-3.
- [4] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: Západočeská univerzita, c2008. ISBN 978-80-7043-706-.
- [5] BEČVÁŘ, Josef. *Tepelné turbíny*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968.
- [6] *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/elektrina/statistika-a-sledovani-kvality/rocnizpravy-o-provozu>
- [7] *ZEROCO2.NO* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.zeroco2.no/capture/sources-of-co2/single-cycle-steam-turbine-power-plant>
- [8] *Solární elektrárny* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=solarni\\_elektrarny&site=energie](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=solarni_elektrarny&site=energie)
- [9] *Quora* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Whats-the-difference-between-steam-turbine-and-gas-turbine>
- [10] *World Energy Council* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-resources-2016/>
- [11] FIEDLER, Jan. *Parní turbíny: návrh a výpočet*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN isbn80-214-2777-9.
- [12] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 9788073000264.

## **Příloha číslo 1**

Teplotně hmotový diagram (Heat balance diagram)



HEAT BALANCE DIAGRAM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	TOMÁŠ VRÁNA	2017/18
------------------	-------------	---------