



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TERMODYNAMICKÉ CYKLY VYUŽÍVANÉ V ENERGETICE

THERMODYNAMIC CYCLES USED IN POWER ENGINEERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Suchomel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Josef Suchomel**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Termodynamické cykly využívané v energetice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základem tepelné energetiky jsou základní termodynamické oběhy. Například Rankin Clausiův cyklus je základem oběhu všech tepelných a jaderných elektráren. Vedle tohoto základního oběhu jsou ale i další oběhy, které však nejsou tak rozšířené. V rámci práce student provede základní popis cyklu a jeho výhody a omezení.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše obvyklých i méně známých termodynamických cyklů,
- porovnání výhod a omezení těchto cyklů,
- aplikace cyklů v praxi.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-8-214-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Energetika je jednou z nejdůležitějších průmyslových oblastí. Mimo jiné se totiž zabývá výrobou elektrické energie, bez které si mnozí z nás život už nedokážou ani představit. Všechna energetická zařízení mohou být popsána na základě různých termodynamických cyklů. A právě těmito termodynamickými cykly se tato práce zabývá. Jsou v ní uvedeny jak nejdůležitější cykly, jako např. Rankin Clausiův cyklus, který je základním oběhem většiny elektráren, tak i méně známé, resp. téměř nové termodynamické cykly. Důraz celé práce je zaměřen i na výhody a omezení daných cyklů, a také na jejich aplikaci v praxi.

Klíčová slova

Termodynamický cyklus, termická účinnost, energetika, elektrická energie, Carnotův cyklus

ABSTRACT

Power engineering is one of the most important parts of industry. Among other things, it deals with production of electricity, without which many of us can no longer even imagine life. All energy devices can be described on the basis of different thermodynamic cycles. And with these thermodynamic cycles this thesis deals. It lists both, the most important cycles, such as Rankin Clausius cycle, which is the basic cycle of most of the power plants, as well as less known, resp. almost new thermodynamic cycles. The emphasis of the whole work is also focused on the advantages and limitations of the stated cycles and on their application in practise, too.

Key words

Thermodynamic cycle, thermal efficiency, power engineering, electricity, Carnot cycle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SUCHOMEL, Josef. *Termodynamické cykly využívané v energetice* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132085>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Termodynamické cykly využívané v energetice** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Josef Suchomel

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Markovi Balášovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Carnotův cyklus a přehled dalších termodynamických cyklů	12
1.1 Carnotův cyklus	12
1.1.1 Úvodní charakteristika	12
1.1.2 Průběh cyklu.....	12
1.1.3 Realizace cyklu	12
1.1.4 Obrácený Carnotův cyklus	13
1.1.5 Základní výpočty	14
1.2 Přehled dalších termodynamických cyklů	15
1.2.1 Rankin Clausiův cyklus a cykly od něho odvozené.....	15
1.2.2 Cykly spalovacích turbín.....	15
1.2.3 Cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel	15
1.2.4 Ostatní cykly	16
1.2.5 Cykly spalovacích motorů.....	16
1.3 Shrnutí kapitoly.....	16
2 Rankin Clausiův cyklus a cykly od něho odvozené	17
2.1 Rankin Clausiův cyklus	17
2.1.1 Úvodní charakteristika	17
2.1.2 Průběh cyklu.....	17
2.1.3 Realizace cyklu	17
2.1.4 Základní výpočty.....	18
2.1.5 Užití v praxi.....	18
2.1.6 Výhody a nevýhody cyklu.....	21
2.1.7 Modifikace Rankin Clausiova cyklu	21
2.1.7.1 Rankin Clausiův cyklus s přehřevem páry	21
2.1.7.2 Rankin Clausiův cyklus s přehřevem a znovupřehřevem páry	22
2.1.7.3 Superkritický Rankin Clausiův cyklus	23
2.1.8 Reálný Rankin Clausiův cyklus	24
2.2 Organický Rankin Clausiův cyklus (ORC)	25
2.3 Hygroskopický cyklus	25
2.4 Shrnutí kapitoly.....	26
3 Cykly spalovacích turbín	27
3.1 Braytonův cyklus	27
3.1.1 Úvodní charakteristika	27
3.1.2 Průběh cyklu.....	27
3.1.3 Realizace cyklu	27
3.1.4 Základní výpočty.....	28
3.1.5 Užití v praxi.....	28
3.1.6 Výhody a nevýhody cyklu.....	30
3.1.7 Modifikace Braytonova cyklu a reálný Braytonův cyklus.....	30
3.2 Humphreyho cyklus	32
3.3 Ericssonův cyklus	33

3.4	Shrnutí kapitoly	34
4	Cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel	36
4.1	Cyklus komprese par	36
4.1.1	Úvodní charakteristika	36
4.1.2	Průběh cyklu	36
4.1.3	Realizace cyklu	37
4.1.4	Základní výpočty	38
4.1.5	Užití v praxi	38
4.1.6	Výhody a nevýhody cyklu	40
4.1.7	Modifikace cyklu komprese par a reálný cyklus komprese par	40
4.2	Cyklus absorpce par	42
4.2.1	Úvodní charakteristika	42
4.2.2	Průběh a realizace cyklu	42
4.2.3	Výhody a nevýhody cyklu	43
4.2.4	Užití v praxi	43
4.3	Lindeho cyklus	43
4.4	Siemensův cyklus	44
4.5	Bell Colemanův cyklus	45
4.6	Vuilleumierův cyklus	46
4.7	Shrnutí kapitoly	46
5	Ostatní cykly	48
5.1	Paroplynový cyklus	48
5.1.1	Úvodní charakteristika	48
5.1.2	Průběh cyklu	48
5.1.3	Realizace cyklu	49
5.1.4	Základní výpočty	50
5.1.5	Užití v praxi	50
5.1.6	Výhody a nevýhody cyklu	52
5.2	Stirlingův cyklus.....	52
5.2.1	Úvodní charakteristika	52
5.2.2	Průběh a realizace cyklu	52
5.2.3	Užití v praxi	53
5.3	Kalinův cyklus.....	54
5.4	Grazský cyklus	55
5.5	Goswamiho cyklus	56
5.6	Allam Fetvedtův cyklus.....	56
5.7	Stoddardův cyklus	56
5.8	Lorenzův cyklus	56
5.9	Shrnutí kapitoly	57
	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64

ÚVOD

Elektrická energie je v současnosti jedna z nejdůležitějších a nejzákladnějších věcí každodenního života a málokdo si dokáže představit život bez ní. Elektrická energie vzniká v elektrárnách nebo v různých energetických zařízeních. Druhy těchto zařízení, jejich provoz, údržba, obsluha, kontrola, propočty jednotlivých procesů, návrh, konstrukce a realizace nových zařízení...toto všechno je možné sjednotit pod jeden název – energetika. A všechny procesy, které se odehrávají v těchto energetických zařízeních, je možné popsat na základě termodynamických cyklů. A právě na tyto termodynamické cykly, které mají uplatnění v energetice, je zaměřena tato bakalářská práce.

V první kapitole je popsán Carnotův cyklus, jakožto ideální teoretický cyklus, který dosahuje nejvyšší možné účinnosti. Carnotova cyklu ale bohužel v praxi není možné dosáhnout, další termodynamické cykly se mu tedy alespoň snaží maximálně přiblížit. Přehled těchto dalších termodynamických cyklů je uveden také v první kapitole.

Druhá kapitola se zaměřuje na Rankin Clausiův cyklus a na cykly, které jsou od něho odvozeny. Rankin Clausiův cyklus je jeden z nejdůležitějších a nejpoužívanějších cyklů, jedná se totiž o základní oběh většiny elektráren, např. jaderných, tepelných, solárních, atd. Cykly, které jsou od něho odvozeny, se snaží změnou média napravit některé nedokonalosti cyklu, příp. se zaměřují na použití tam, kde není tak silný zdroj tepla, aby byl schopen pohánět Rankin Clausiův cyklus.

V třetí kapitole je pozornost věnována cyklům spalovacích turbín. Spalovací turbíny jsou také nedílnou součástí výroby elektrické energie. Nejčastěji užívaný je Braytonův cyklus, který popisuje chod spalovací turbíny se spalováním za konstantního tlaku. Další cykly jsou většinou podobné Braytonovu cyklu a liší se od něj pouze v některých částech.

Čtvrtá kapitola zkoumá cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel. Tyto zařízení stojí za tím, že je možné uchovávat potraviny, aniž by se zkazily, a také se starají o naše okolní prostředí. Upravují teplotu prostředí, aby pro nás byla vhodná, ať už se jedná o vytápění, nebo o ochlazování prostoru. Nejčastěji užívaným cyklem je Cyklus komprese par, ale více, či méně užívaných cyklů existuje celá řada.

V páté a poslední kapitole se nachází cykly, které nebylo možné rozřadit do předchozích kapitol a pro které nebyly nalezeny žádné sjednocující znaky. Rozhodně se ale nejedná o cykly, kterým by neměla být věnována pozornost, ba naopak. Je zde např. Paroplynový cyklus, který dosahuje velké účinnosti. Dále se zde nachází i několik novějších cyklů, které dosahují jak vysoké účinnosti, tak i téměř nulových emisí. Tyto cykly mají velký potenciál a mohly by v budoucnu nahradit dříve zmiňované cykly.

1 Carnotův cyklus a přehled dalších termodynamických cyklů

Hlavní zdroje informací v této kapitole, není-li uvedeno jinak, jsou [1], [2], přednášky z předmětu Termomechanika pana prof. Štětiny a cvičení ze Semináře aplikované termomechaniky pana doc. Klimeše.

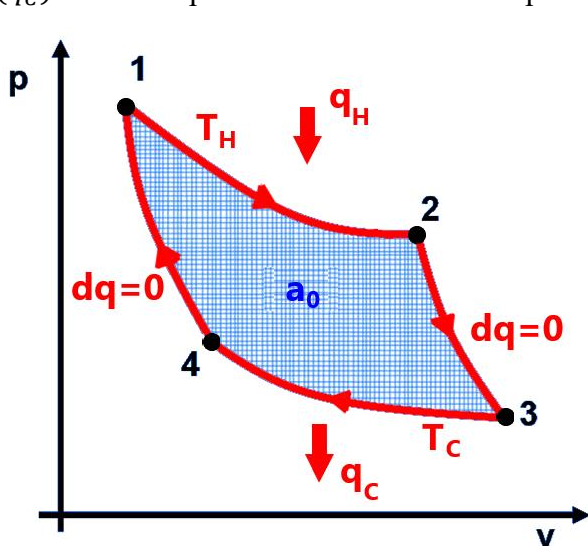
1.1 Carnotův cyklus

1.1.1 Úvodní charakteristika

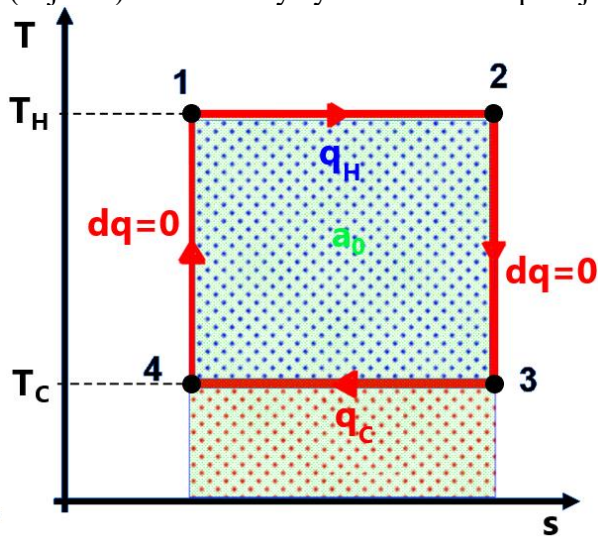
Carnotův cyklus je ideální teoretický vratný termodynamický cyklus. Tento cyklus definuje maximální možnou účinnost, které může přímý cyklus dosáhnout při přeměně tepla na práci. Obrácený Carnotův cyklus definuje maximální chladicí, resp. topný faktor, kterého může dosáhnout nepřímý cyklus při tvorbě tepla z mechanické práce. Jedná se o uzavřený cyklus, kdy do něj teplo dodáváme z vnějších zdrojů. Cyklus byl pojmenován po Nicolasovi Léonardovi Sadi Carnotovi, francouzském fyzikovi, který byl nazván jako „Otec termodynamiky“. [3] [4]

1.1.2 Průběh cyklu

Průběh Carnotova cyklu v p - v a T - s diagramu je znázorněn na obr. 1.1 a obr. 1.2. Carnotův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou adiabat. Na počátku má látka vysokou teplotu a vysoký tlak (stav 1). Následně probíhá izotermická expanze (1–2). Při této expanzi má látka stálou teplotu (T_H) a látce je dodáváno teplo (q_H). Poté probíhá adiabatická expanze (děj 2–3). Izotermická komprese (děj 3–4) probíhá opět při konstantní teplotě (T_C) za odebrání tepla látce (q_C). Nakonec proběhne adiabatická komprese (děj 4–1). Poté se celý cyklus neustále opakuje.



Obr. 1.1: p - v diagram Carnotova cyklu, upraveno dle [5].



Obr. 1.2: T - s diagram Carnotova cyklu, upraveno dle [5].

1.1.3 Realizace cyklu

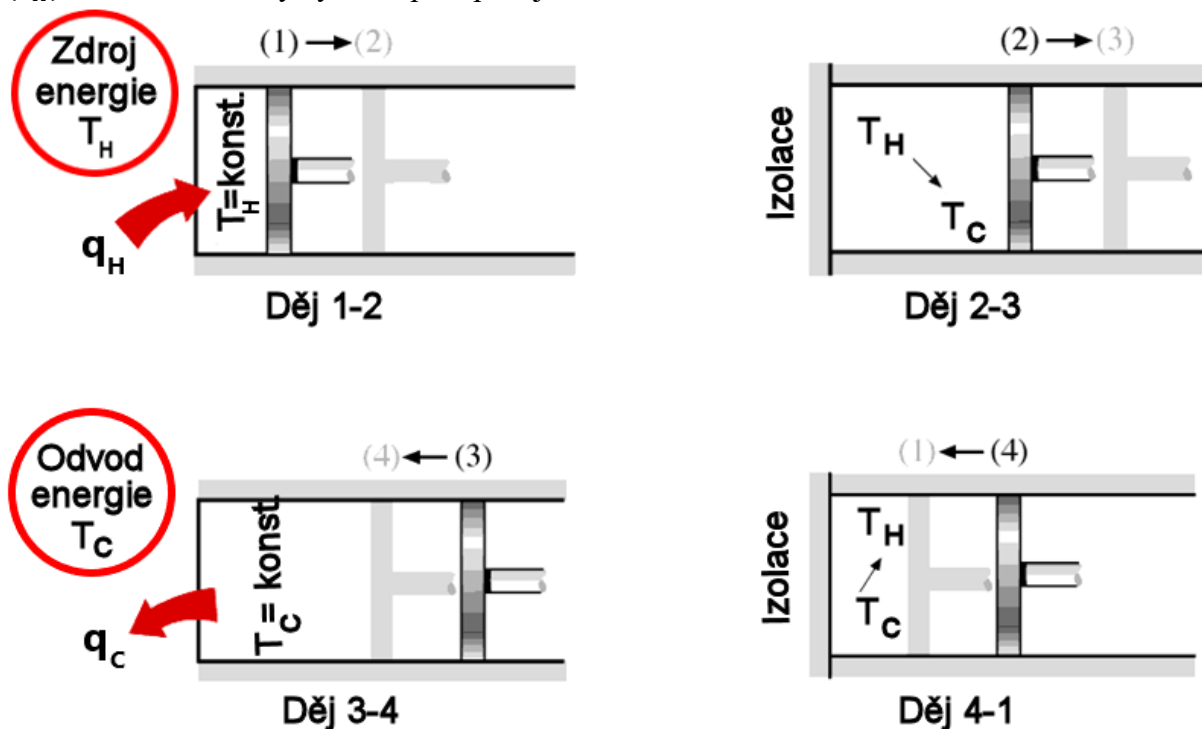
Realizace Carnotova cyklu je na obr. 1.3. Daný cyklus lze provést pouze teoreticky, jelikož není možné dosáhnout všech ideálních dějů. Možná teoretická realizace je např. v pístovém stroji, který je právě zobrazen na obr. 1.3.

Izotermická expanze (děj 1–2) musí proběhnout při velice pomalém pohybu pístu. Přívod tepla (q_H) je zajištěn ze zásobníku o konstantní teplotě (T_H). Válec musí být v dokonalém kontaktu se zásobníkem a stěny válce musí být dokonale tepelně vodivé. Jenom za dodržení těchto podmínek může nastat ideální izotermická expanze.

Adiabatická expanze (děj 2–3) musí naopak proběhnout při velice rychlém pohybu pístu. Celý válec musí být tepelně izolovaný a jeho stěny musí být tepelně nevodivé. Při splnění těchto podmínek neproběhne žádná výměna tepla mezi válcem a okolím, a tedy nastane ideální adiabatická expanze.

Izotermická komprese (děj 3–4) musí splnit úplně stejné podmínky jako izotermická expanze, aby proběhla ideálně. V tomto případě je potom teplota ve válci stejná jako je teplota zásobníku. Odvod tepla (q_C) nyní zajišťuje jiný zásobník tepla s konstantní nižší teplotou (T_C).

Poslední děj – adiabatická komprese (děj 4–1) musí opět splnit všechny podmínky stanovené u adiabatické expanze. Vzroste při tom teplota z teploty nižší (T_C) na teplotu vyšší (T_H). Následně se celý cyklus opět opakuje.

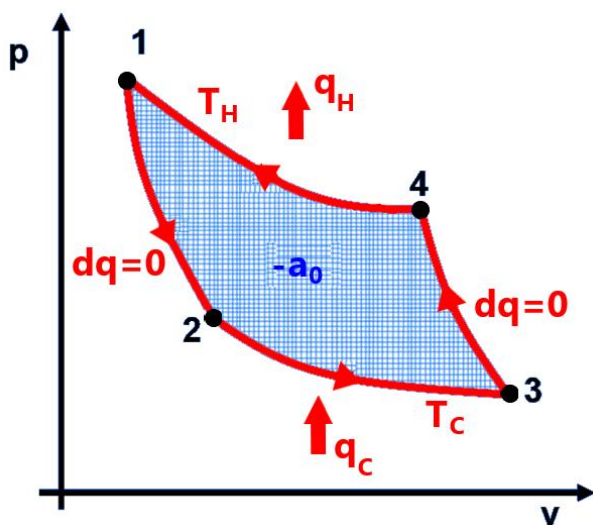


Obr. 1.3: Realizace Carnotova cyklu, upraveno dle [5].

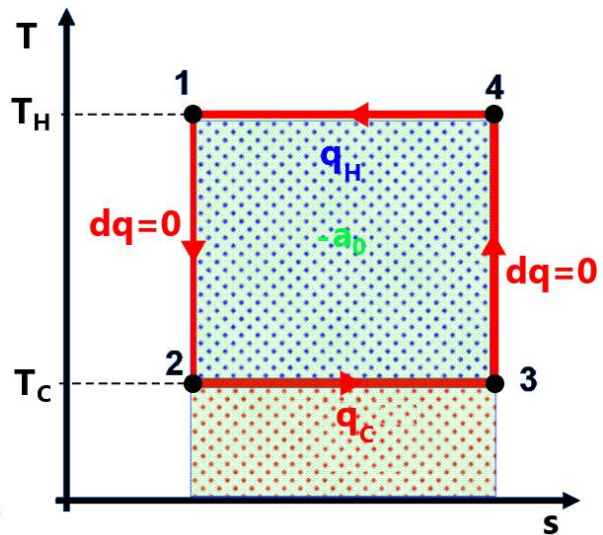
1.1.4 Obrácený Carnotův cyklus

Obrácený Carnotův cyklus má v p-v a T-s diagramu naprosto stejný průběh jako přímý Carnotův cyklus, probíhá pouze v opačném směru, jak jde vidět na obr. 1.4 a obr. 1.5. Tento cyklus tedy práci nekoná, ale spotřebovává, a přetváří ji na teplo.

Na počátku máme opět látku ve stavu 1, tzn. o vysoké teplotě a tlaku. Prvně proběhne adiabatická expanze (děj 1–2). Po ní nastane izotermická expanze (děj 2–3), kdy je látce dodáváno teplo (q_C) a látka má konstantní teplotu (T_C). Následuje adiabatická komprese (děj 3–4). A jako poslední probíhá izotermická komprese (děj 4–1) za odebrání tepla (q_H), kdy má látka konstantní teplotu (T_H). Poté se opět celý cyklus opakuje.



Obr. 1.4: p - v diagram obráceného Carnotova cyklu, upraveno dle [5].



Obr. 1.5: T - s diagram obráceného Carnotova cyklu, upraveno dle [5].

1.1.5 Základní výpočty

Pro přímý Carnotův cyklus platí vztahy:

$$q_H = r \cdot T_H \cdot \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \quad (1.1)$$

$$q_C = r \cdot T_C \cdot \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right) \quad (1.2)$$

$$a_0 = q_H - |q_C| = r \cdot T_H \cdot \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) - r \cdot T_C \cdot \ln \left(\frac{v_3}{v_4} \right) \quad (1.3)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_C|}{q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1.4)$$

Vztahy (1.1), (1.2) a (1.3) platí obměněné i pro obrácený Carnotův cyklus, dále pro něj platí:

$$\varepsilon_C = COP_C = \frac{q_C}{|q_H| - q_C} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_H = COP_H = \frac{|q_H|}{|q_H| - q_C} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (1.6)$$

1.2 Přehled dalších termodynamických cyklů

Cykly byly vyhledány z [1], [6], [7], [8].

Jako první byl uveden Carnotův cyklus, který je ideální a dosahuje nejvyšší možné účinnosti. V praxi ale není bohužel možné dosáhnout tohoto ideálního cyklu, jelikož jeho podmínky jsou, jak je patrné z části 1.1.3 o realizaci daného cyklu, nedosažitelné. Ostatní cykly se snaží co nejvíce přiblížit Carnotovu cyklu, a tedy i jeho maximální účinnosti (tento proces se nazývá jako tzv. Carnotizace). Na začátek je zde uveden přehled dalších termodynamických cyklů. Cykly byly rozděleny do jednotlivých skupin podle jejich společných vlastností.

1.2.1 Rankin Clausiův cyklus a cykly od něho odvozené

Rankin Clausiův cyklus je jeden z nejdůležitějších cyklů. V současné době si totiž život bez elektřiny dokážeme jen těžko představit. Elektrická energie vzniká v elektrárnách a právě Rankin Clausiův cyklus je základním oběhem většiny elektráren. Další cykly v této sekci jsou odvozené od Rankin Clausiova cyklu. Jedná se zpravidla o téměř totožný průběh cyklu, ale s modifikovaným pracovním médiem.

- **Rankin Clausiův cyklus**
- **Organický Rankin Clausiův cyklus (ORC)**
- **Hygroskopický cyklus**

1.2.2 Cykly spalovacích turbín

Plynové spalovací turbíny jsou zařízení, která spalováním směsi paliva a vzduchu vytváří mechanickou energii, kterou následně přetváří na elektrickou energii. Jedná se opět o velice důležité stroje. Celý proces uvnitř turbíny se dá popsat na základě několika termodynamických cyklů. Nejčastěji užívaný je první, ostatní dva jsou jeho upravenou modifikací, popř. se mu velmi podobají.

- **Braytonův cyklus**
- **Humphreyho cyklus**
- **Ericssonův cyklus**

1.2.3 Cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel

Chladicí zařízení a tepelná čerpadla zajišťují jak např. dlouhodobé uchovávání potravin, či zkapalňování plynů, tak se i primárně starají o tzv. tepelnou pohodu. Upravují tedy okolní prostředí tak, aby bylo vyhovující, ať už se jedná o vytápění v zimním období, nebo naopak chlazení v horkých letních dnech. Jedná se o nepřímé cykly. Cyklus chladicího zařízení může být naprosto stejně aplikován jako cyklus tepelného čerpadla. Jediný rozdíl je v tom, které teplo považujeme za užitečné, zda teplo odebírané z prostoru (cyklus chladicího zařízení), nebo teplo dodávané prostoru (cyklus tepelného čerpadla). Nejčastěji užívaným cyklem je první zmíněný. Následující mají také své užití, ale Cyklus komprese par jim dominuje.

- **Cyklus komprese par**
- **Cyklus absorpce par**
- **Lindeho cyklus**
- **Siemensův cyklus**
- **Bell Colemanův cyklus**
- **Vuilleumierův cyklus**

1.2.4 Ostatní cykly

Pro cykly této sekce nebyly nalezeny žádné sjednocující znaky. Nachází se tedy zde jako ostatní cykly. Vůbec se ale nejedná o nějaké méně cenné cykly, které by nenacházely uplatnění. První zmíněný cyklus se např. používá při výrobě elektrické energie. V této době se začíná rozšiřovat a jeho aplikace má do budoucna velký potenciál.

- **Paroplynový cyklus**
- **Stirlingův cyklus**
- **Kalinův cyklus**
- **Grazský cyklus**
- **Goswamiho cyklus**
- **Allam Fetvedtův cyklus**
- **Stoddardův cyklus**
- **Lorenzův cyklus**

1.2.5 Cykly spalovacích motorů

Následuje přehled cyklů spalovacích motorů. Tyto cykly mají jako svou jedinou aplikaci motor, který funguje na základě daného cyklu. Tato práce je ale výhradně zaměřena na cykly, které mají hlavní užití v energetice, proto těmto cyklům není věnována další pozornost a je uveden pouze přehled.

- **Ottův cyklus** – zážehové spalovací motory
- **Dieselův cyklus** – vznětové spalovací motory
- **Sabatův cyklus** – smíšený cyklus, kombinace Ottova a Dieselova cyklu
- **Obecný cyklus spalovacího motoru** – přeplňované spalovací motory
- **Atkinsonův cyklus** – modifikovaný Ottův cyklus
- **Millerův cyklus** – modifikovaný Atkinsonův cyklus, využívá přeplňování
- **Lenoirův cyklus** – pulzní tryskový motor
- **Diesel Braytonův cyklus** – pístový motor s turbodmychadlem

1.3 Shrnutí kapitoly

Tato kapitola se věnovala Carnotovu cyklu a přehledu dalších cyklů. Carnotův cyklus je teoretický ideální vratný termodynamický cyklus. Definuje maximální možnou účinnost pro přímé cykly, resp. maximální chladicí a topný faktor v případě obráceného Carnotova cyklu. Ideální Carnotův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou adiabat. Jedná se o izotermickou expanzi, při které je dodáváno teplo, adiabatickou expanzi, izotermickou kompresi, kdy je teplo naopak odebíráno, a adiabatickou kompresi. Realizace cyklu je možná pouze teoreticky, např. v pístovém motoru, kdy musí být splněno několik podmínek. Obrácený Carnotův cyklus má naprosto stejný průběh, ale v opačném směru. Práci nekoná, ale spotřebovává, a přetváří ji na teplo.

Dále byl uveden přehled dalších termodynamických cyklů, které se snaží co nejvíce přiblížit Carnotovu cyklu. Cykly byly rozděleny podle společných znaků na Rankin Clausiův cyklus a cykly od něho odvozené, cykly spalovacích turbín, cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel, ostatní cykly a na cykly spalovacích motorů.

2 Rankin Clausiův cyklus a cykly od něho odvozené

Hlavní zdroje informací v této kapitole, není-li uvedeno jinak, jsou [1], [2], přednášky z předmětu Termomechanika pana prof. Štětiny a cvičení ze Semináře aplikované termomechaniky pana doc. Klimeše.

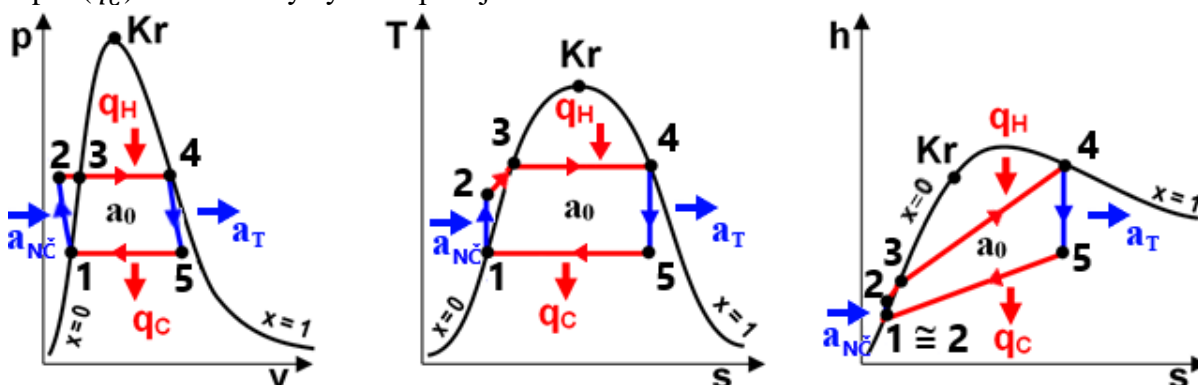
2.1 Rankin Clausiův cyklus

2.1.1 Úvodní charakteristika

Rankin Clausiův cyklus je teoretický termodynamický cyklus tepelných motorů, který přetváří teplo na mechanickou práci. Během cyklu mění pracovní látka své skupenství. Nejčastějším pracovním médiem je voda. Jedná se o ideální cyklus, kdy nejsou uvažovány ztráty způsobené třením. Cyklus je uzavřený a teplo je do něj dodáváno z vnějších zdrojů. Byl pojmenován podle dvou zakladatelích oboru termodynamiky – Williamovi Johnovi Macquornovi Rankinovi, skotském všestranném vzdělanci a profesorovi na Glasgowské univerzitě, a Rudolfovi Juliovi Emanuelovi Clausiovi, německém fyzikovi a matematikovi. [9] [10] [11]

2.1.2 Průběh cyklu

Průběh cyklu je znázorněn na obr. 2.1. Teoretický Rankin Clausiův cyklus se skládá ze dvou izobar a dvou adiabat. Na počátku se nachází sytá kapalina o stavu 1. Sytá kapalina je adiabaticky stlačována na kapalinu o stavu 2, přičemž spotřebovává práci ($a_{N\check{C}}$). Následně se kapalina izobaricky ohřívá zpět na sytou kapalinu o stavu 3 a dále se izobaricky-izotermicky vypařuje na sytou páru o stavu 4. Při ději 2–4 je látce dodáváno teplo (q_H). Sytá pára o stavu 4 adiabaticky expanduje na mokrou páru o stavu 5 a koná přitom práci (a_T). Následně mokrá pára izobaricky kondenzuje opět na sytou kapalinu o stavu 1. Při tomto ději je mokré páře odebráno teplo (q_C). Poté se celý cyklus opakuje.



Obr. 2.1: p - v , T - s a h - s diagram Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].

2.1.3 Realizace cyklu

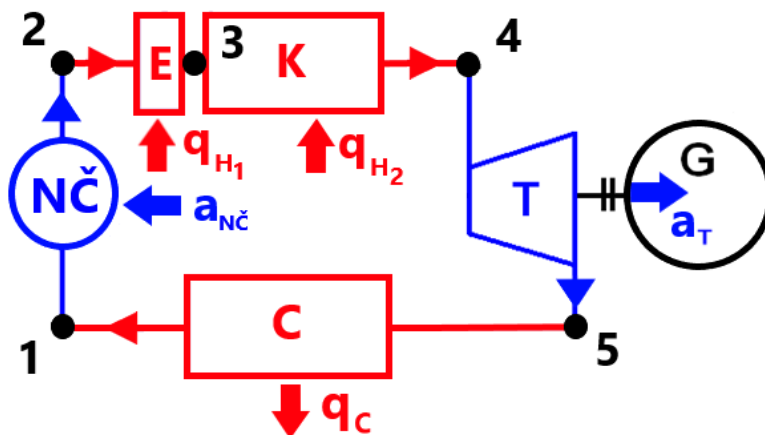
Cyklus je v praxi realizován užitím 4 komponent: napájecím čerpadlem (NČ), kotlem, který se skládá ze dvou částí – ekonomizéru (E) a kotle (K), turbínou (T) a kondenzátorem (C). Komponenty Rankin Clausiova cyklu jsou znázorněny na obr. 2.2.

Adiabatická komprese (děj 1–2) probíhá v napájecím čerpadle. Voda je zde stlačována na vyšší tlak. Tento děj spotřebovává práci ($a_{N\check{C}}$), proto je nutné zajistit pohon čerpadla.

Následuje izobarický ohřev (děj 2–4) v kotli. Z počátku se voda ohřívá v ekonomizéru na teplotu 100 °C, při tomto ději dodáváme látce teplo (q_{H_1}). Poté se látka vypařuje v kotli na sytou páru při dodávání tepla (q_{H_2}). Ekonomizér i kotel jsou v podstatě tepelné výměníky. Dodávané teplo můžeme získat z různých zdrojů, např. spalováním uhlí, popř. jiných paliv, štěpnou reakcí, zplyňováním biomasy, atd.

Poté probíhá adiabatická expanze (děj 4–5) v turbíně. Sytá pára naráží na lopatky turbíny a expanduje na mokrou páru. Turbína se roztáčí a koná práci (a_T). Následně je turbína propojena přes spojku na generátor (G), který z mechanické práce vytváří s určitou účinností elektrickou energii.

Poslední fází je izobarické ochlazování (děj 5–1) v kondenzátoru. Mokrý pára kondenzuje zpět na sytou kapalinu. Při kondenzaci odebíráme látce teplo (q_C). Kondenzátor je opět tepelný výměník, kdy odebírání tepla realizujeme ochlazováním látky studenou vodou nebo vzduchem. Voda k ochlazování se může brát z více zdrojů, např. z řeky, z chladicí věže, atd. Ochlazování vzduchem probíhá ve vzduchovém kondenzátoru, kdy kolem látky proudí studený vzduch a ochlazuje ji.



Obr. 2.2: Schéma Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].

2.1.4 Základní výpočty

$$q_H = h_4 - h_2 \quad (2.1)$$

$$q_C = h_1 - h_5 \quad (2.2)$$

$$a_T = h_4 - h_5 \quad (2.3)$$

$$a_{N\check{c}} = h_1 - h_2 \quad (2.4)$$

$$a_0 = a_T - |a_{N\check{c}}| = h_4 - h_5 - (h_2 - h_1) \approx a_T = h_4 - h_5 \quad (2.5)$$

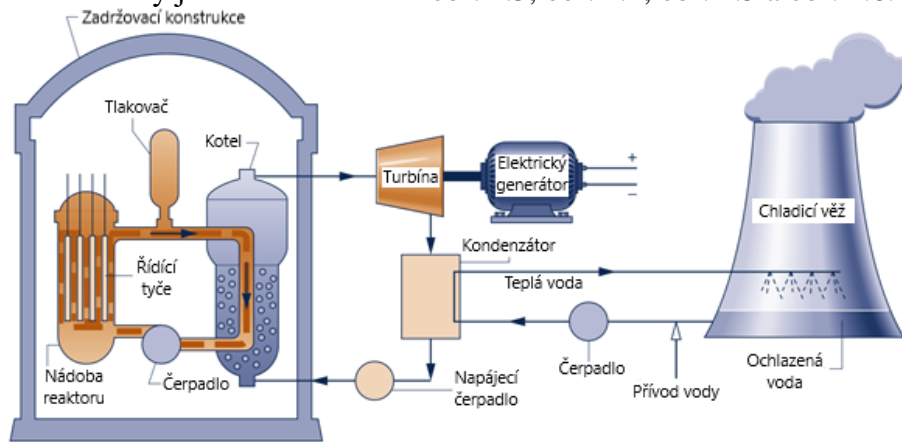
$$\eta_t = \frac{a_0}{q_H} \approx \frac{a_T}{q_H} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{2\approx 1}} \quad (2.6)$$

2.1.5 Užití v praxi

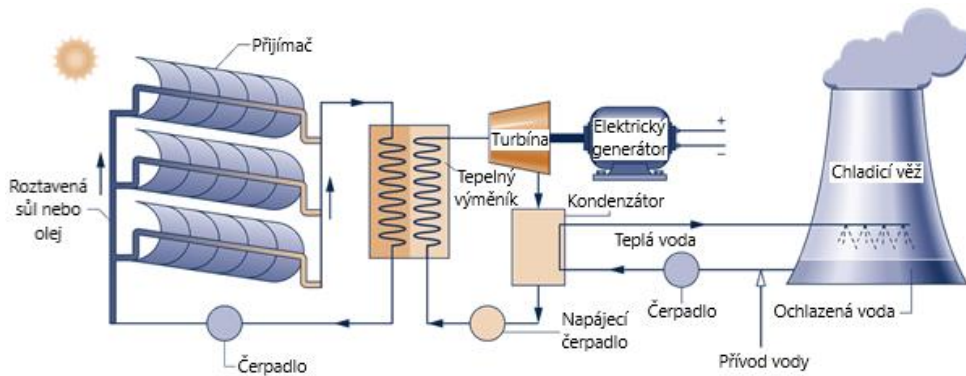
Většina elektráren má zpravidla 3 okruhy – primární, sekundární a terciální. Sekundární okruh je nejdůležitější, vyrábí elektrickou energii a jedná se zpravidla o Rankin Clausiův cyklus, popř. o jeho modifikaci.

Primární okruh zajišťuje přívod tepla do Rankin Clausiova cyklu. V jaderných elektrárnách se jedná o štěpnou reakci v reaktoru. Pracovní látka je stlačována čerpadlem do reaktoru, kde se reakcí ohřívá, popř. vypařuje. Následně je odvedena do parogenerátoru (kotle – tepelného výměníku), kde ohřívá látku v sekundárním okruhu, poté opět vstupuje do čerpadla a cyklus se opakuje. U solárních elektráren je okruh podobný s tím rozdílem, že se látka ohřívá v kolektorech slunečního záření. V tepelných elektrárnách je primární okruh otevřený a jedná se o přívod paliva a vzduchu, následné hoření v kotli a odvod zplodin. Při hoření se v kotli ohřívá látka sekundárního okruhu. U geotermálních elektráren je okruh také otevřený a skládá se pouze

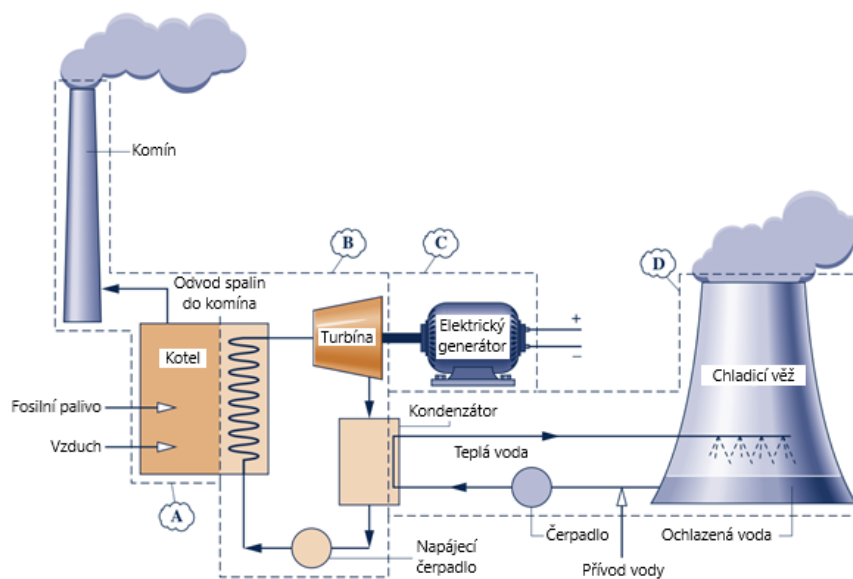
z čerpadla, které doopravuje horkou vodu do tepelného výměníku. Zde horká voda ohřeje látku sekundárního okruhu a vrací se ochlazená zpět do země. Schémata jaderné, solární, tepelné a geotermální elektrárny jsou znázorněna na obr. 2.3, obr. 2.4, obr. 2.5 a obr. 2.6.



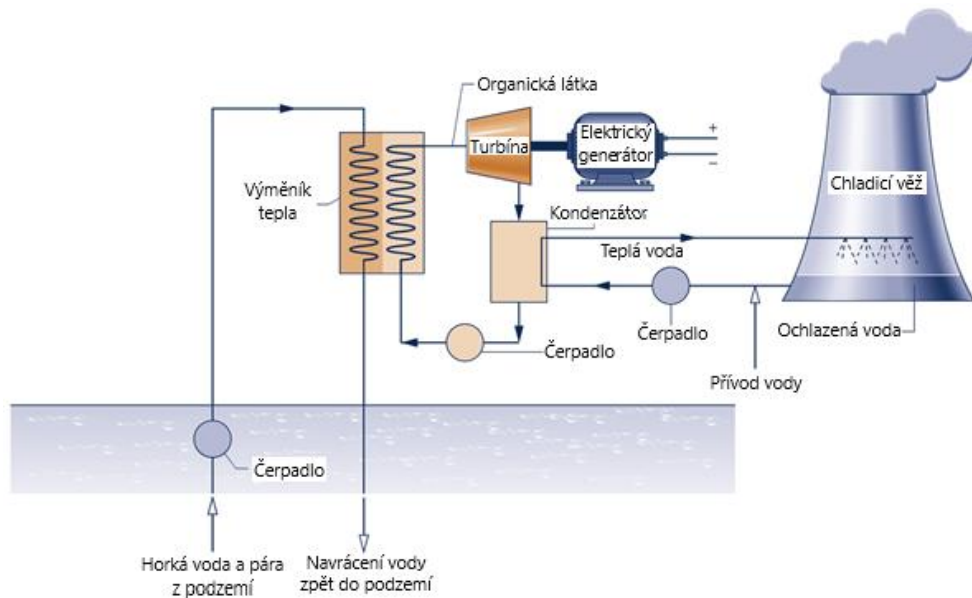
Obr. 2.3: Schéma jaderné elektrárny, upraveno dle [13].



Obr. 2.4: Schéma solární elektrárny, upraveno dle [13].

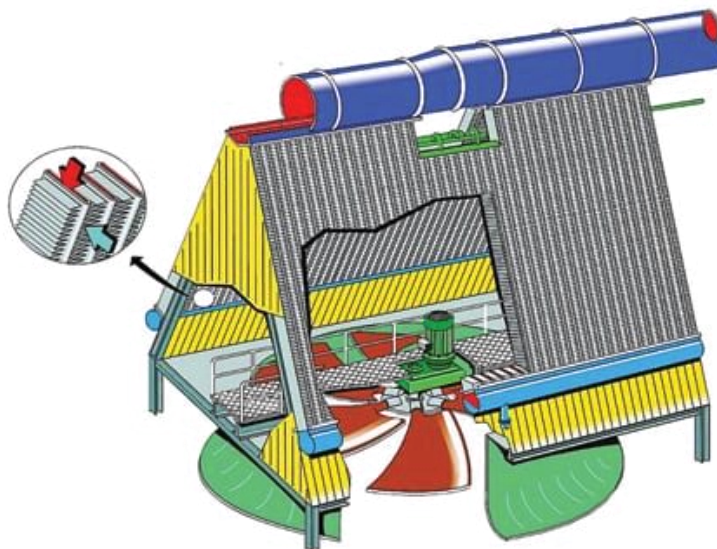


Obr. 2.5: Schéma tepelné elektrárny, upraveno dle [13].

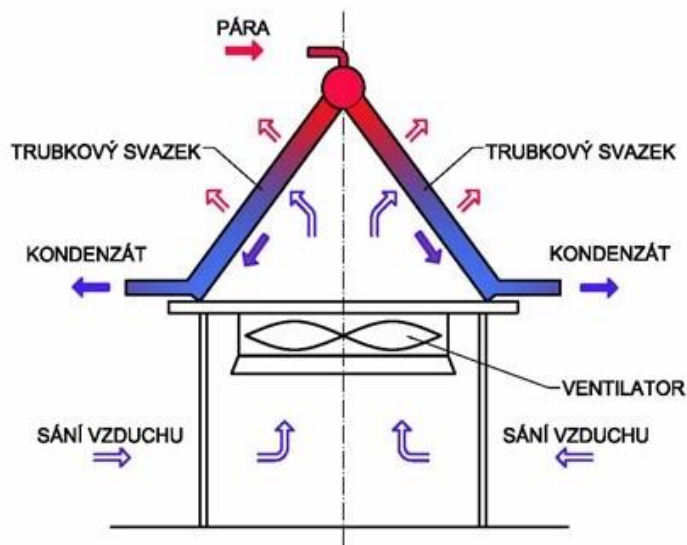


Obr. 2.6: Schéma geotermální elektrárny, upraveno dle [13].

Terciální okruh zajišťuje odvod tepla sekundárního okruhu. Nejčastěji se jedná o okruh s chladicí věží, popř. o vzduchem chlazený kondenzátor. V případě okruhu s chladicí věží je studená voda nasávána čerpadlem z řeky, popř. nádrže a čerpána do kondenzátoru sekundárního okruhu. Zde ochlazuje pracovní látku sekundárního okruhu. Následně je ohřátá voda vedena do chladicí věže k ochlazení. To probíhá tak, že voda projde sprchou, ze které kape do nádrže na dně chladicí věže. Přitom se kapičky vody ochlazují okolním prouděním vzduchu. Následně je studenější voda nasávána z nádrže čerpadlem a míchá se s vodou z řeky, popř. nádrže. Poté se okruh opakuje. V případě vzduchem chlazeného kondenzátoru terciální okruh v podstatě chybí. Jedná se pouze o speciální kondenzátor sekundárního okruhu, kterým neustále proudí studený vzduch, který ochlazuje pracovní látku sekundárního okruhu. Vzduchem chlazený kondenzátor je znázorněn na obr. 2.7 a obr. 2.8. [14]



Obr. 2.7: Vzduchem chlazený kondenzátor [13].



Obr. 2.8: Schéma vzduchem chlazeného kondenzátoru, upraveno dle [14].

2.1.6 Výhody a nevýhody cyklu

Hlavní výhoda Rankin Clausiova cyklu spočívá v době komprese. Na rozdíl od ostatních cyklů je požadována velmi malá práce k pohonu napájecího čerpadla. V této fázi cyklu se totiž jedná o kapalnou fázi. Práce potřebná pro pohon čerpadla pokrývá pouze několik málo procent z práce vykonané turbínou. [15]

Dále se jedná o poměrně jednoduchý a lehce realizovatelný cyklus, který dosahuje dostatečné účinnosti. Navíc se jako médium nejčastěji používá voda, tudíž dostupná a finančně nenáročná látka. Cyklus je také uzavřený, proto není nutné médium doplňovat (samozřejmě po nějaké delší době ano, protože se projevují určité ztráty pracovního média). [15]

Hlavní nevýhodou Rankin Clausiova cyklu je poměrně malý teplotní rozsah. Nejvyšší teplota v cyklu je při vstupu syté páry do turbíny, nejčastěji má teplotu okolo 300 °C. Nejnižší teplota je při kondenzaci mokré páry, obvykle se jedná o teplotu okolo 30 °C. Teoretická Carnotova účinnost je tedy okolo 45 %, reálně ale cyklus dosahuje obvykle účinnosti méně než 30 %. [15]

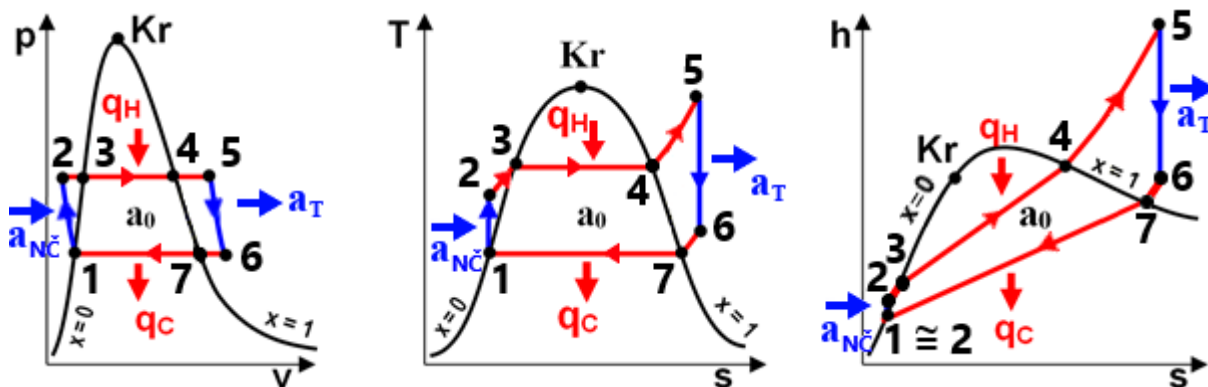
2.1.7 Modifikace Rankin Clausiova cyklu

2.1.7.1 Rankin Clausiův cyklus s přehřevem páry

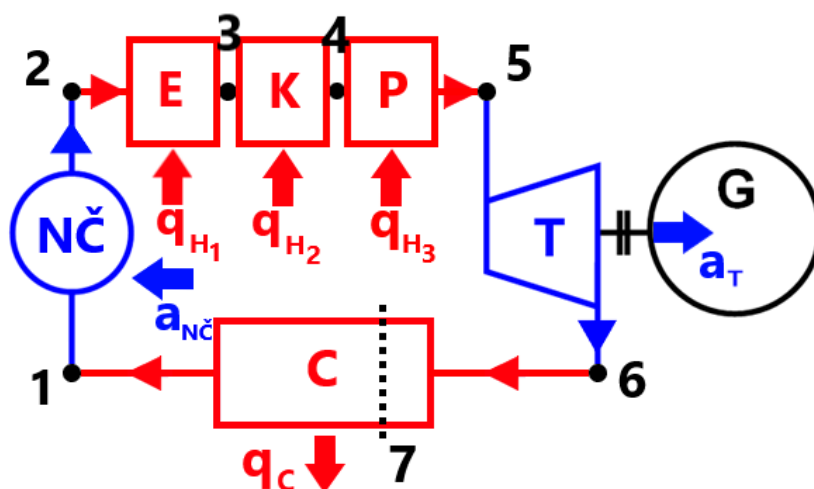
Průběh Rankin Clausiova cyklu s přehřevem páry je znázorněn na obr. 2.9. Komponenty cyklu jsou znázorněny ve schématu na obr. 2.10.

Průběh a realizace cyklu je v oblasti 1–4 totožná s původní verzí Rankin Clausiova cyklu. Poté ale sytá pára nevstupuje do turbíny, ale pokračuje izobarický ohřev (děj 4–5). Tento ohřev probíhá v přehříváku páry (P) za dodávání tepla (q_{H_3}). Pára se přehřívá na mnohem vyšší teplotu, obvykle okolo 550 °C. Následuje adiabatická expanze (děj 5–6) v turbíně (T), při které látka vykonává práci (a_T). Tato práce se opět přes generátor (G) převádí na elektrickou energii. Následně se pára izobaricky ochlazuje (děj 6–1) v kondenzátoru (C) při odebrání tepla (q_C). Nejprve se musí přehřátá pára ochladit na sytou páru (děj 6–7), a poté probíhá kondenzace syté páry na sytou kapalinu (děj 7–1).

Tato modifikace se provádí, protože při tomto cyklu vzniká větší práce (a_T), a tedy se i zvyšuje účinnost cyklu oproti původnímu Rankin Clausiově cyklu.



Obr. 2.9: p - v , T - s a h - s diagram Rankin Clausiova cyklu s přehřevem páry, upraveno dle [12].



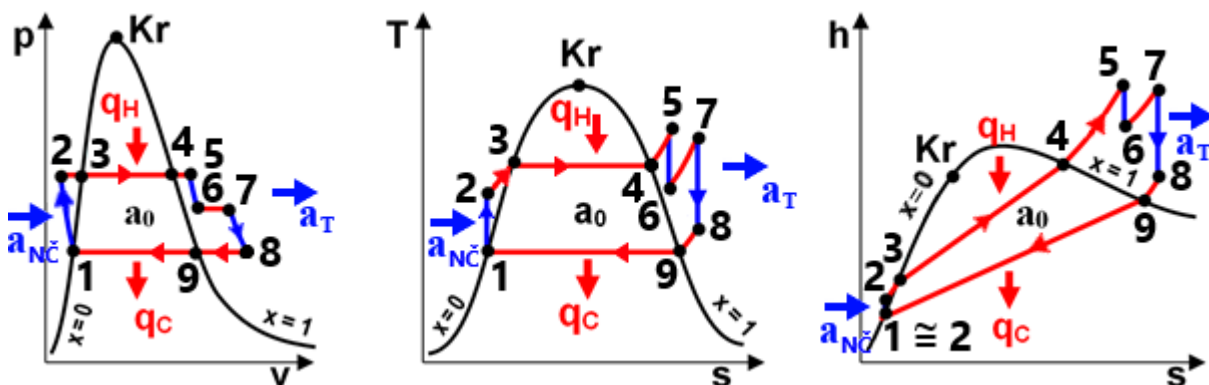
Obr. 2.10: Schéma Rankin Clausiova cyklu s přehřevem páry, upraveno dle [12].

2.1.7.2 Rankin Clausioův cyklus s přehřevem a znovupřehřevem páry

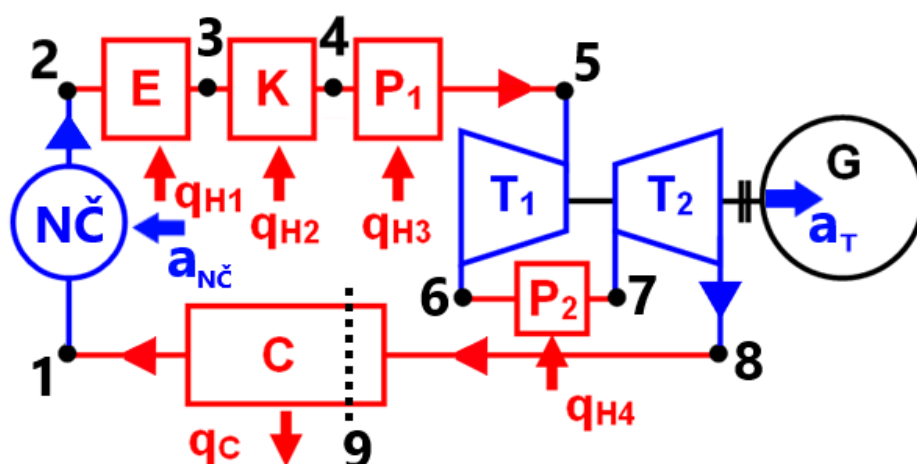
Průběh Rankin Clausiova cyklu s přehřevem a znovupřehřevem páry je znázorněn na obr. 2.11. Schéma s komponenty cyklu je vyobrazeno na obr. 2.12.

Průběh a realizace je v oblasti 1–5 totožná s předchozím Rankin Clausiovým cyklem s přehřevem páry. Přehřátá pára následně vstupuje do tzv. vysokotlaké turbíny (T_1). Zde adiabaticky expanduje (děj 5–6) a koná přitom práci. Následně se opět izobaricky ohřívá (děj 6–7) v přehříváku (P_2) za dodávání tepla (q_{H_4}). Poté pára vstoupí do tzv. nízkotlaké turbíny (T_2), proběhne další adiabatická expanze (děj 7–8) při vykonání práce. Celková vykonaná práce (a_T) je součtem prací z vysokotlaké a nízkotlaké turbíny, jelikož jsou obě turbíny na stejné hřídeli. Tato práce je opět odváděna do generátoru (G) a přetváří se na elektrickou energii. Děj 8–1 je stejný jako v přechozím cyklu, tedy izobarické ochlazování v kondenzátoru (C) na sytou páru (děj 8–9) a následná kondenzace na sytou kapalinu (děj 9–1) při odebrání tepla (q_C).

Při této modifikace Rankin Clausiova cyklu se adiabatická expanze prakticky rozdělí na dvě turbíny, přičemž se pára znovu přehřeje. Celková vykonaná práce se tedy v porovnání s předchozím cyklem s přehřevem ještě více zvětší, a tím se zvětší i celková účinnost cyklu.



Obr. 2.11: p - v , T - s a h - s diagram Rankin Clausiova cyklu s přehřevem a znovupřehřevem páry, upraveno dle [12].

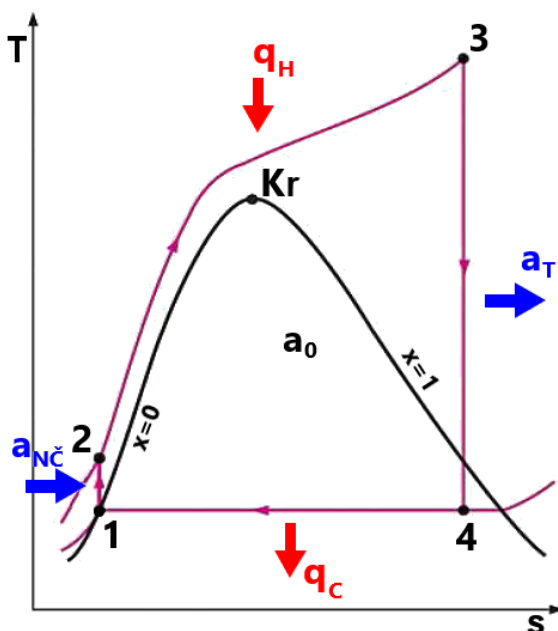


Obr. 2.12: Schéma Rankin Clausiova cyklu s přehřevem a znovupřehřevem páry, upraveno dle [12].

2.1.7.3 Superkritický Rankin Clausioův cyklus

Průběh superkritického Rankin Clausiova cyklu je znázorněn na obr. 2.13. Průběh a realizace cyklu je stejná jako u Rankin Clausiova cyklu s přehřevem páry. Izobarický ohřev (děj 2–3) probíhá při nadkritickém tlaku (tlak bývá obvykle větší než 22 MPa). Proto křivka ohřevu neprotíná křivky syté kapaliny a syté páry. Vyskytuje se nad kritickým bodem, kapalina se tedy mění na páru náhodně (není přesně daná hranice, kde se nachází pouze pára, popř. pouze kapalina).

Tato modifikace opět zvyšuje výstupní práci, a tím i účinnost. Rozvody a jednotlivé komponenty ale musí být navrženy tak, aby vydržely poměrně vysoké tlaky a vysoké teploty.



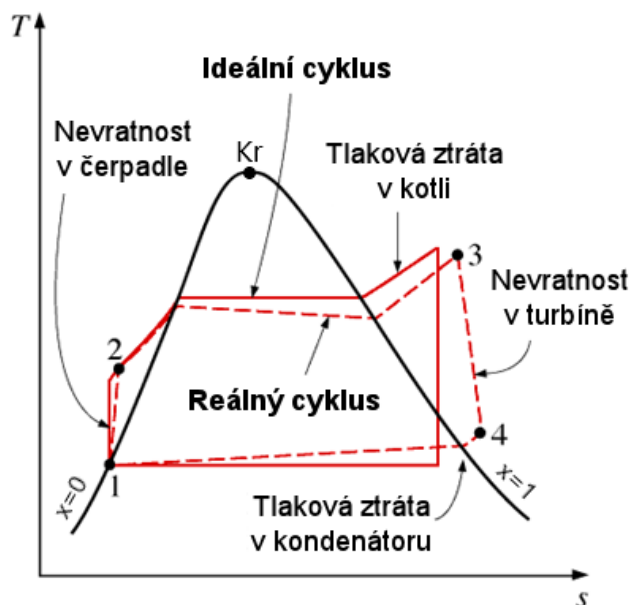
Obr. 2.13: T - s diagram superkritického Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].

2.1.8 Reálný Rankin Clausioův cyklus

Reálný průběh Rankin Clausiova cyklu je na obr. 2.14. Jedná se o modifikaci s přehřevem páry.

Při kompresi v napájecím čerpadle (děj 1–2) se ve skutečnosti nejedná o adiabatický, popř. izoentropický děj. Jde o nevratný děj, takže se musí měnit velikost entropie. Při ohřevu dané látky (děj 2–3) také v realitě nejde o izobarický děj. Nejsme schopni dokonale zatěsnit celou soustavu, proto se v některých místech tlak ztrácí, a proto také tlak při ohřevu mírně klesá. Při expanzi v turbíně (děj 3–4) opět nejde o adiabatický (izoentropický) děj. Stejně jako u komprese je to nevratný děj, proto se musí měnit hodnota entropie. Tato změna může být způsobena např. třením. A v případě ochlazování a kondenzace (děj 4–1) zase nejde o izobarický děj. V kondenzátoru nejsme schopni zajistit dokonalou těsnost obdobně jako u ohřevu. Tlak se tedy v některých místech ztrácí, a tím pádem i pomalu klesá.

Tyto reálné děje v reálném Rankin Clausiově cyklu způsobují zpravidla pokles celkové práce cyklu, a tím snižují i jeho účinnost v porovnání s ideálním cyklem.



Obr. 2.14: T-s diagram reálného Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].

2.2 Organický Rankin Clausiův cyklus (ORC)

Podkapitola 2.2 vychází ze zdrojů [16] a [17].

Organický Rankin Clausiův cyklus je Rankin Clausiův cyklus, který používá jako pracovní médium organické tekutiny namísto vody. Průběh a realizace celého cyklu je naprosto totožná s původním Rankin Clausiovým cyklem. Cykly se od sebe liší pouze v použitém médiu. ORC používá jako pracovní médium organické látky, jedná se zejména o chladiva (např. R134a) a uhlovodíky (např. butan, pentan a jejich deriváty). Tyto látky mají nižší teplotu varu oproti vodě, proto nepotřebují tak velký přísun tepla pro fázovou přeměnu, a tedy pro celkový průběh cyklu. Navíc výhodou organických látek je, že v porovnání s vodou nemohou způsobit korozi, a tedy poškození komponent (např. u turbíny to bývá velký problém) celého cyklu.

Cyklus se používá převážně k výrobě elektrické energie. Díky menšímu množství tepla potřebnému k fázové přeměně se používá zejména u menších elektráren nebo elektráren, které nejsou schopny zajistit tak velký přísun tepla. Používá se hlavně u geotermálních elektráren, kdy geotermální zdroj tepla není tak silný, aby byl schopen pohánět elektrárnu pracující dle klasického Rankin Clausiova cyklu. Častou oblastí použití jsou solární elektrárny, které také obvykle nejsou schopny zajistit stálý dostatečně silný zdroj tepla, příp. ještě elektrárny pracující s biomasou.

Jednou z nejdůležitějších oblastí rozvoje ORC je tzv. rekuperace odpadního tepla, tedy zpětné získání daného tepla. Využívá se tepla, které vzniká jako odpad při různých procesech, a toto teplo se dále využívá zpravidla k výrobě elektrické energie pomocí ORC. Toto odpadní teplo se může získávat např. z elektráren v podobě odpadního tepla z kotlů nebo kondenzátorů, z výfukových plynů spalovacích turbín, ale i z vozidel. Získané teplo se následně využije jako přísun tepla do ORC a celý proces se tím stává mnohem efektivnější. V této oblasti nachází ORC největší uplatnění a má také velký potenciál do budoucna.

2.3 Hygroskopický cyklus

Podkapitola 2.3 vychází ze zdrojů [18] a [19].

Hygroskopický cyklus je obměněný Rankin Clausiův cyklus, který používá jako pracovní látku vodu, která je ale navíc obohacena o hygroskopické sloučeniny. Jedná se o sloučeniny, které jsou schopny vázat na sebe vodu, nejčastěji jsou to soli, jako např. bromid lithný, síran měďnatý, chlorid sodný, hydroxid sodný, aj.

Cykly se opět liší převážně v použitém médiu. Průběh a realizace cyklu je tedy téměř totožná jako původní Rankin Clausiův cyklus. V hygroskopickém cyklu je voda s hygroskopickými látkami přivedena do speciální kondenzátoru. Odtud je po smísení s kondenzovanou párou část odvedena přes čerpadlo do kotle a část se po ochlazení vrací zpět do kondenzátoru. Hygroskopické soli ve vodě mají za následek zvýšení teploty varu, ale především snížení tlaku páry vystupující z turbíny, a tím i zvýšení teploty kondenzace páry. Je tedy potřeba odebrat páře menší teplo. Hygroskopický cyklus proto často využívá několik vzduchem chlazených kondenzátorů. K pohonu jejich ventilátorů je navíc potřeba menší energie, než kdyby byl použit vzduchem chlazený kondenzátor v klasickém Rankin Clausiově cyklu. Navíc není potřeba zajistit celý terciální okruh pro chlazení, tedy chladicí věž, čerpadlo a zejména neustálý přísun vody.

Hygroskopický cyklus tedy oproti Rankin Clausiově cyklu potřebuje menší množství tepla potřebného ke kondenzaci páry, postačující je použití vzduchem chlazených kondenzátorů a převážně není nutno zajistit celý terciální chladicí okruh s neustálým přívodem vody. Při realizaci je schopen dodat větší výkon, má menší náklady na instalaci a údržbu, výrazně menší spotřebu vody a menší dopad na životní prostředí v porovnání s Rankin Clausiovým cyklem realizovaným včetně terciálního okruhu.

Daný cyklus je možné použít jako náhradu Rankin Clausiova cyklu v jeho aplikaci. V současnosti se nejedná o častý jev, ale je to určitě velmi ambiciózní možnost. Největší rozmach tento cyklus nyní prožívá při použití v solárních elektrárnách vystavěných v pouštích nebo polopouštích. Zde jsou velice vhodné jeho klady oproti Rankin Clausiovu cyklu, zejména realizace bez nutnosti využít terciální okruh s neustálým přívodem vody.

2.4 Shrnutí kapitoly

Tato kapitola se zabývala Rankin Clausiovým cyklem a cykly od něho odvozenými. Rankin Clausiův cyklus je teoretický uzavřený cyklus, do kterého je teplo přiváděno z vnějšku. Skládá se v ideálním tvaru ze dvou adiabat a dvou izobar. Cyklus spočívá v kompresi vody napájecím čerpadlem, následném ohřevu v kotli, expanzi v turbíně a ochlazení v kondenzátoru. Hlavním užitkem je vzniklá práce, která roztáčí turbínu, a ta následně generuje elektrickou energii. Tento cyklus se nejčastěji používá jako sekundární okruh většiny elektráren. Jeho hlavní výhoda spočívá v malé práci potřebné pro pohon napájecího čerpadla, a tedy i celého cyklu. Nevýhodou je poměrně malý teplotní rozsah. Různými modifikacemi, jako přehřevem páry na vyšší teplotu, užitím více turbín s znovupřehřevem mezi nimi nebo výrazným zvýšením tlaku, je snaha tento teplotní rozsah zvětšit, zvýšit výstupní práci a účinnost cyklu. Je ale nutno uvést, že ve skutečnosti není možné dosáhnout tohoto ideálního cyklu, ale je třeba počítat s reálnými nevratnými ději jako tlakovými poklesy nebo nevratnostmi způsobenými třením.

Organický Rankin Clausiův cyklus i Hygroskopický cyklus má obdobný průběh a obdobnou realizaci jako Rankin Clausiův cyklus. Liší se převážně v použitém médiu. ORC používá organické látky, zejména chladiwa a uhlovodíky. Použití tohoto média má za následek nižší teplo potřebné k přeměně tekutiny na páru. Cyklu se využívá zejména v tzv. rekuperaci odpadního tepla. Hygroskopický cyklus používá jako médium vodu s hygroskopickými sloučeninami, zejména solemi. Tím snižuje teplo, které je potřebné odebrat páře pro kondenzaci, a umožňuje použití vzduchem chlazených kondenzátorů. Největší potenciál má při realizaci v solárních elektrárnách vystavěných v pouštích nebo polopouštích.

3 Cykly spalovacích turbín

Hlavní zdroje informací v této kapitole, není-li uvedeno jinak, jsou [1], [2], přednášky z předmětu Termomechanika pana prof. Štětiny a cvičení ze Semináře aplikované termomechaniky pana doc. Klimeše.

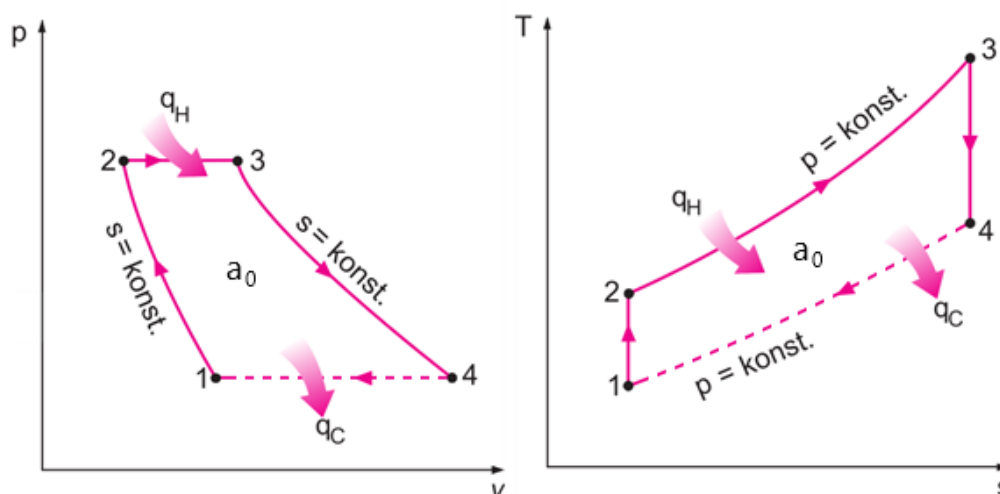
3.1 Braytonův cyklus

3.1.1 Úvodní charakteristika

Braytonův cyklus je termodynamický cyklus, který popisuje chod plynové spalovací turbíny se spalováním za konstantního tlaku. Jedná se o otevřený cyklus s vnitřním spalováním. Během cyklu pracovní látka nemění své skupenství. Jde o teoretický ideální cyklus, kdy uvažujeme všechny děje jako vratné, a tedy nebereme v úvahu ztráty během cyklu způsobené např. poklesem tlaku nebo třením. Cyklus byl pojmenován po Georgi Braytonovi, americkém inženýrovi, který tento cyklus původně navrhnul pro použití v pístových motorech. [20]

3.1.2 Průběh cyklu

Průběh cyklu je znázorněn na obr. 3.1. Teoretický Braytonův cyklus se skládá ze dvou adiabat a dvou izobar. Na počátku se nachází plyn o stavu 1. Ten je následně adiabaticky stlačován (děj 1–2), při tomto ději plyn spotřebovává práci. Poté probíhá izobarický ohřev (děj 2–3), plynu během toho dodáváme teplo (q_H). Následně probíhá adiabatická expanze (děj 3–4), při níž plyn koná práci. A nakonec probíhá izobarické ochlazování (děj 4–1), kdy plynu odebíráme teplo (q_C). Poté se již opět celý cyklus opakuje.



Obr. 3.1: p - v a T - s diagram Braytonova cyklu, upraveno dle [21].

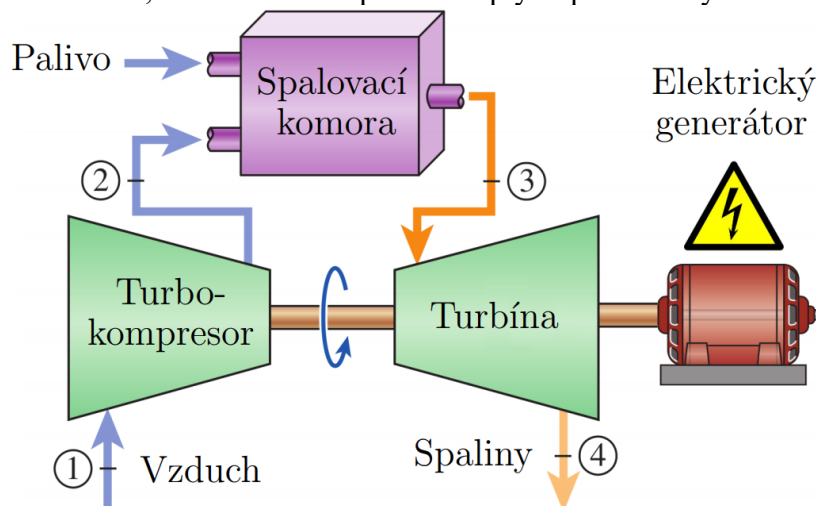
3.1.3 Realizace cyklu

Základní komponenty Braytonova cyklu jsou zobrazeny ve schématu na obr. 3.2. Jedná se obvykle o turbokompresor, spalovací komoru a turbínu. Vzduch je zpočátku nasáván do turbokompresoru a zde je adiabaticky stlačován (děj 1–2). Turbokompresor spotřebovává práci, a proto ho musíme pohánět. Následně vzduch vstupuje do spalovací komory, kde se smísí s přiváděným palivem, proběhne zážeh a směs se spaluje při konstantním tlaku (děj 2–3, nahrazovaný izobarickým ohřevem). Následně směs proudí do turbíny, kde adiabaticky expanduje (děj 3–4), roztáčí lopatky turbíny a ta koná práci. Poté spaliny odchází z turbíny do okolí a do turbokompresoru je nasáván nový vzduch. V diagramech je tento děj (4–1) kvůli uzavření cyklu, a tedy usnadnění výpočtů, nahrazován izobarickým ochlazováním.

Turbína a turbokompresor jsou na společné hřídeli. Část práce, kterou turbína vykoná, spotřebuje pro pohon turbokompresor a zbylá práce je odváděna do elektrického generátoru,

který ji přetváří na elektrickou energii. Na hřídeli ještě může být připevněn motor, který na začátku dodá pohon turbokompresoru, než ho je schopna pohánět turbína. Případně může být na této společně hřídeli přidáno i čerpadlo pro zajištění přísunu paliva do spalovací komory.

Daný cyklus je tedy otevřený. Vyskytuje se ale i jeho uzavřená forma, kdy spaliny neodcházejí do okolní atmosféry, ale vstupují do tepelného výměníku. Zde se ochladí a opět vstupují do turbokompresoru. Tepelný výměník je obdobný kondenzátoru v Rankin Clausiově cyklu, je napojen na okruh s vodou, která odebírá teplo směsi plynů proudící výměníkem.



Obr. 3.2: Schéma Braytonova cyklu [22].

3.1.4 Základní výpočty

$$q_H = c_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (3.1)$$

$$q_C = c_p \cdot (T_1 - T_4) \quad (3.2)$$

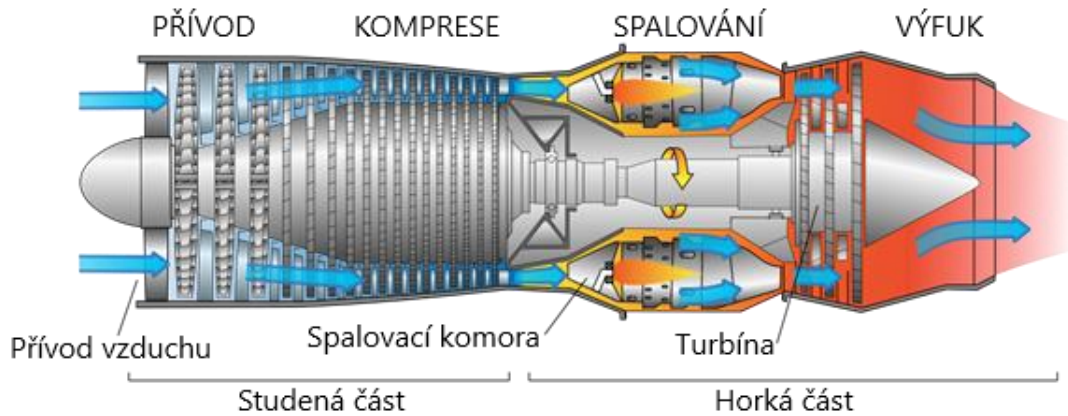
$$a_0 = q_H - |q_C| \quad (3.3)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_C|}{q_H} = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (3.4)$$

3.1.5 Užití v praxi

Na základě Braytonova cyklu pracují spalovací turbíny se spalováním za konstantního tlaku. Spalovací plynová turbína obvykle obsahuje jednu hřídel, na které je uložen turbokompresor a turbína. Turbokompresor a turbína jsou zpravidla několikastupňové, skládají se tedy z několika řad lopatek, umístěných na hřídeli za sebou. Počet stupňů turbokompresoru je nejčastěji přes 10, někdy i okolo 15. Turbína mívá okolo 5 stupňů. Spalovací komory se nachází také ve spalovací turbíně, ale jsou umístěny mimo hlavní hřídel. Bývá jich opět více. [22] [23]

Celá spalovací turbína vždy na vstupu nasává vzduch, stlačuje ho turbokompresorem, přivádí ho do spalovacích komor, kde probíhá smísení s palivem, vznícení, následně směs expanduje na turbíně a opouští spalovací turbínu. Turbína roztáčí společnou hřídel, je tedy zajištěn pohon turbokompresoru a na hřídel je napojen i generátor, který vytváří elektrickou energii. Popis plynové spalovací komory je na obr. 3.3.

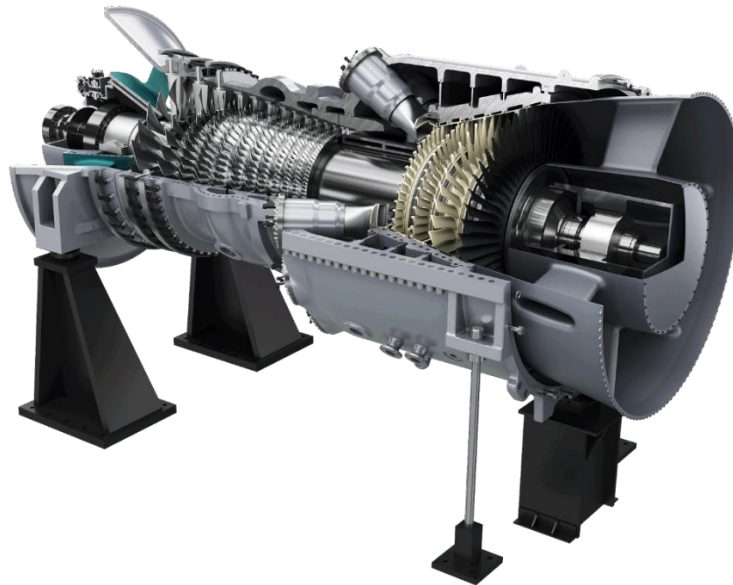


Obr. 3.3: Plynová spalovací turbína – popis, upraveno dle [24].

Příkladem může být např. plynová spalovací turbína SGT5-9000HL od firmy Siemens. Tato turbína má výstupní výkon 593 MW a dosahuje hrubé účinnosti 42,8 %. Teplota spalin na výstupu je 670 °C a turbína splňuje nejnovější normy na regulaci výfukových emisí. Kompresor této turbíny má 12 stupňů, turbína 4. Délka turbíny je 13 m, šířka 5,3 m a výška 5,5 m. Celá spalovací turbína váží 497 tun. Nejčastěji se tato spalovací turbína používá v kombinaci s parní turbínou v tzv. paroplynovém cyklu (viz dále). Tato sestava dosahuje výkonu 870 MW a účinnosti větší než 64 %. Plynová spalovací turbína SGT5-9000HL je vyobrazena na obr. 3.4 a obr. 3.5. [23]



Obr. 3.4: Plynová spalovací turbína SGT5-9000HL – pohled na přední část [23].



Obr. 3.5: Plynová spalovací turbína SGT5-9000HL – pohled na zadní část [23].

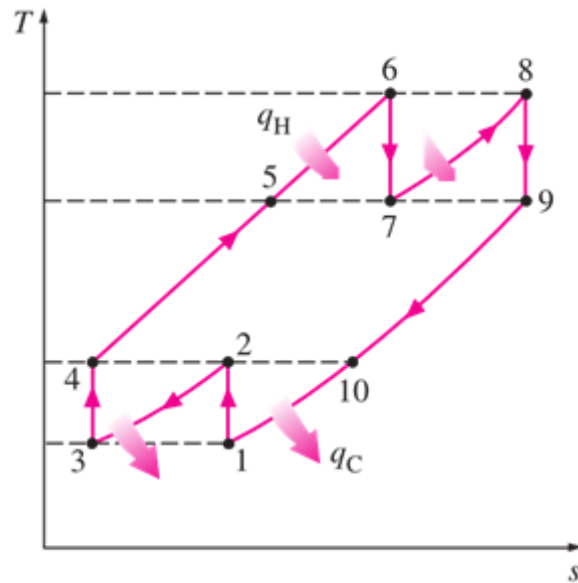
3.1.6 Výhody a nevýhody cyklu

Výhodou Braytonova cyklu je možnost dosáhnouti poměrně vysokých výkonů, a také vysokých účinností. Navíc se jedná o jednoduchou a kompaktní konstrukci, není potřeba zajistit chladicí věž, reaktor nebo např. stálý přívod vody, jako tomu bylo při Rankin Clausiově cyklu. [25]

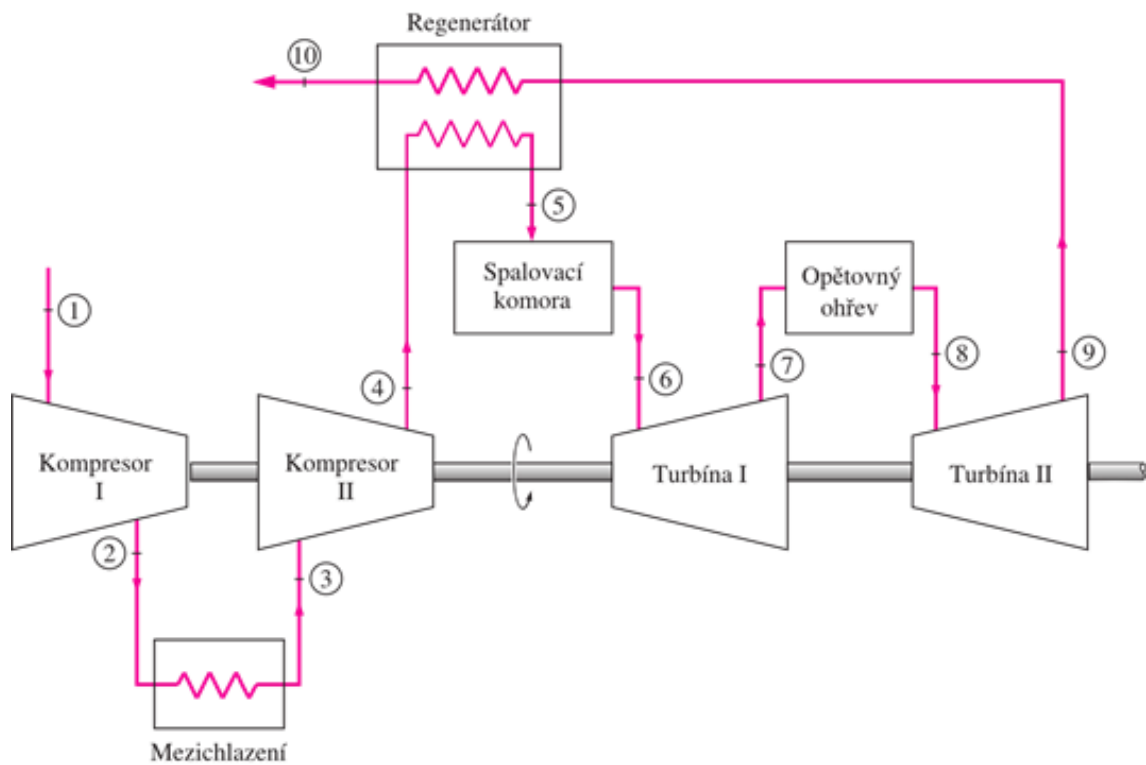
Nevýhodou je použití poměrně kvalitního a drahého paliva jako je kerosin nebo zemní plyn. Dále je v cyklu dosaženo vysokých teplot, z hlediska konstrukce jednotlivých částí je tedy kladen vysoký nárok na kvalitní a stálé materiály. Za nevýhodu se dá považovat i nevyužití vysoké teploty spalin, které odchází do okolí. Na druhou stranu se tato potenciální nevyužitá energie dá ještě dále použít, např. jako přívod tepla do parní turbíny při použití v paroplynovém cyklu. [25]

3.1.7 Modifikace Braytonova cyklu a reálný Braytonův cyklus

Existuje několik modifikací Braytonova cyklu. Na obr. 3.6 je zobrazen T-s diagram cyklu, který obsahuje všechny základní modifikace. Schéma s jednotlivými komponentami je na obr. 3.7. Tento cyklus využívá dva kompresory, kdy při přechodu mezi nimi je vzduch ještě ochlazen. Obsahuje i dvě turbíny a plyn je při přechodu mezi první a druhou turbínou naopak opětovně ohřán. Při výfuku plynu z druhé turbíny, plyn nevstupuje zpět do atmosféry, ale míří do regenerátoru. Jedná se o tepelný výměník, ve kterém výfukový plyn předává teplo plynu, který následně vstoupí do spalovací komory. Plyn je tedy ještě před vstupem do spalovací komory ohřán na vyšší teplotu. Tomuto jevu se říká regenerace. Tyto modifikace mají za následek zvýšení účinnosti oproti původnímu Braytonovu cyklu.



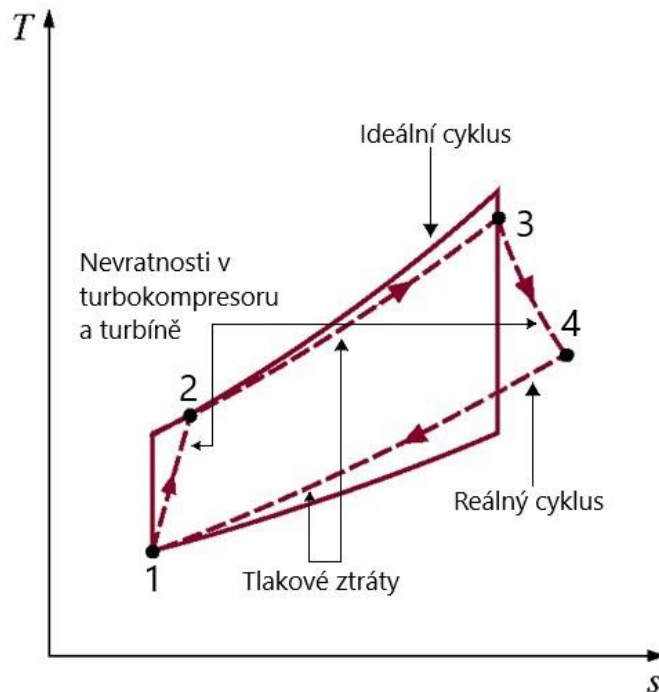
Obr. 3.6: T-s diagram modifikovaného Braytonova cyklu, upraveno dle [21].



Obr. 3.7: Schéma modifikovaného Braytonova cyklu [21].

Reálný Braytonův cyklus je zobrazen na obr. 3.8. Kompresi v turbokompresoru je ve skutečnosti děj nevratný, mění se tedy při něm entropie. Tato nevratnost je způsobena nejčastěji třením. Při ohřevu ve spalovací komoře se nejedná o izobarický děj, ale tlak mírně poklesá. Možný důvod je např. netěsnost sestavy, tím způsobený únik plynu a pokles tlaku. Expanze v turbíně je opět nevratný děj, kdy za změnou entropie stojí nejčastěji tření, stejně jako při kompresi v turbokompresoru. V případě uzavřeného cyklu při ochlazení plynu tlak opět po-

klesá ze stejných důvodů jako při ohřevu. U otevřeného cyklu naopak nejsme schopni dosáhnout toho, aby plyn vyexpandoval v turbíně až na tlak okolí, ale pouze na tlak mírně vyšší než je tlak nově nasávaného vzduchu.



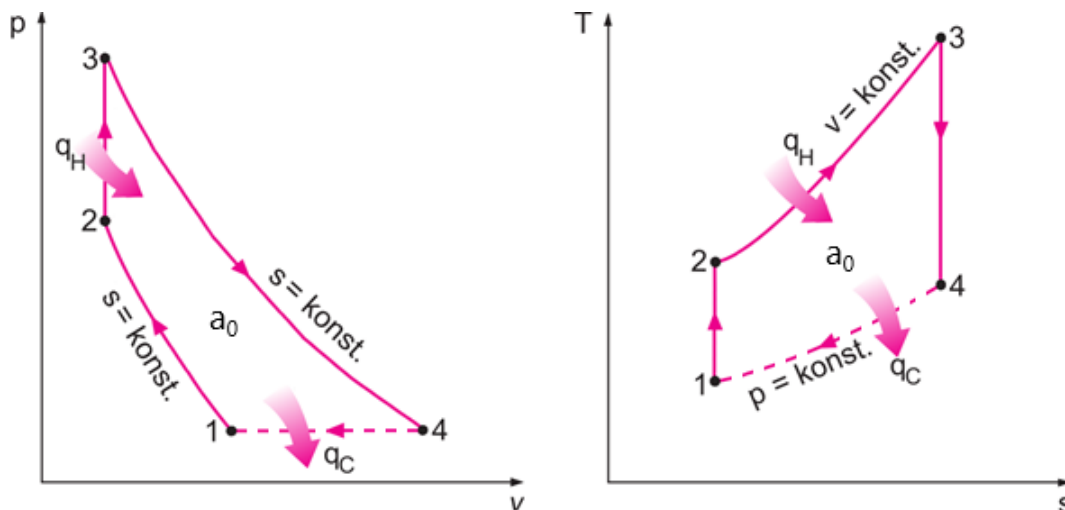
Obr. 3.8: Reálný Braytonův cyklus, upraveno dle [26].

3.2 Humphreyho cyklus

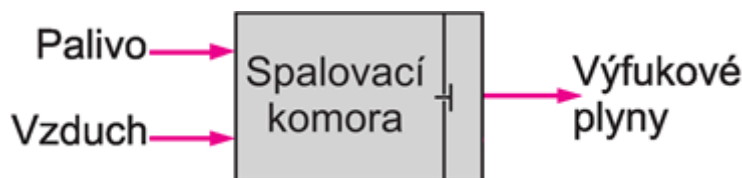
Humphreyho cyklus je termodynamický cyklus, který popisuje chod plynové spalovací turbíny za konstantního objemu. Jde o teoretický otevřený cyklus s vnitřním spalováním.

Průběh Humphreyho cyklu je na obr. 3.9. Má podobný průběh i realizaci jako Braytonův cyklus. Liší se pouze v tom, že v Humphreyho cyklu probíhá ohřev izochoricky a ne izobaricky. Jedná se tedy o izochorický ohřev, kdy je plynu neustále dodáváno teplo (q_H).

Realizací se liší právě v konstrukci spalovací komory. Spalovací komora je znázorněna na obr. 3.10. Rozdíl je v tom, že se v komoře nachází ještě navíc ventil. Po smísení paliva se vzduchem se směs zapálí. Hořením naroste v komoře tlak, tento nárůst způsobí otevření ventilu a spaliny začnou odcházet ze spalovací komory. Tímto je zajištěn konstantní objem v průběhu hoření. Tento děj je v diagramu nahrazován izochorickým ohřevem.



Obr. 3.9: p - v a T - s diagram Humphreyho cyklu, upraveno dle [21].



Obr. 3.10: Schéma spalovací komory Humphreyho cyklu [21].

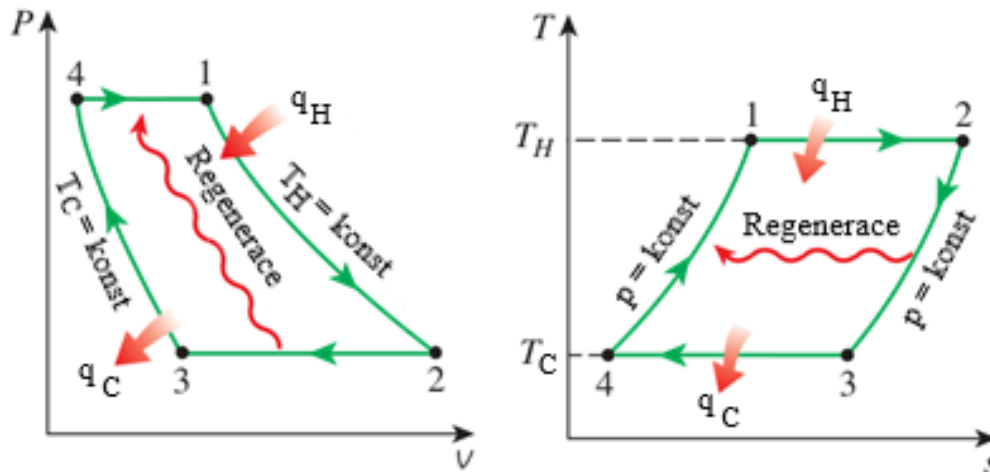
Humphreyho cyklus dosahuje lepší termické účinnosti oproti Braytonovu cyklu. Je proto teoreticky vhodnější pro použití u plynových spalovacích turbín. Konstrukce jeho spalovací komory je ale mnohem složitější. V praxi se proto téměř nepoužívá, i když dosahuje vyšší účinnosti, a dává se přednost Braytonovu cyklu.

3.3 Ericssonův cyklus

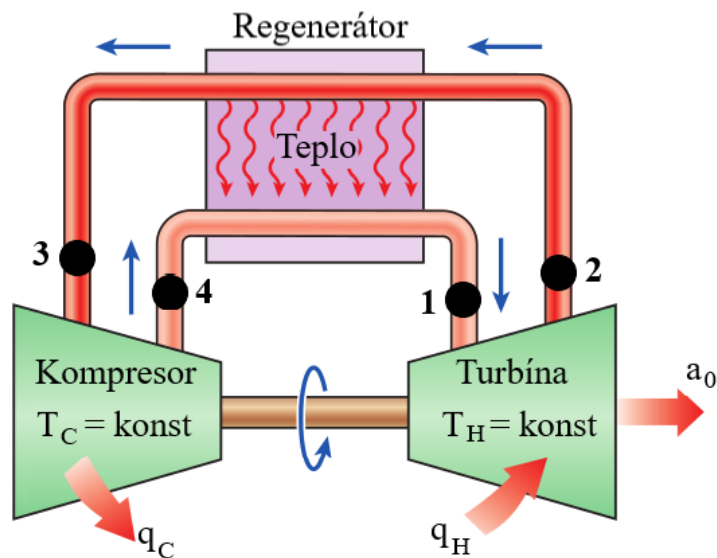
Podkapitola 3.3 vychází ze zdroje [27].

Ericssonův cyklus je teoretický uzavřený termodynamický cyklus, do kterého je teplo přidáváno z vnějších zdrojů. Cyklus vynalezl John Ericsson. Cyklus by měl teoreticky dosahovat účinnosti Carnotova cyklu.

Ericssonův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou izobar. Průběh cyklu a jeho realizace je zobrazena na obr. 3.11 a 3.12. Na počátku probíhá izotermická expanze (děj 1–2) v turbíně. Během tohoto děje je neustále konstantní teplota (T_H), do cyklu je zároveň dodáváno teplo (q_H) a turbína koná práci. Následuje izobarické ochlazování (děj 2–3) v regenerátoru. Plyn odevzdává teplo a předává je chladnějšímu plynu v další části cyklu. Poté probíhá izotermická komprese (děj 3–4) v kompresoru. Plyn je stlačován na vyšší tlak za konstantní teploty (T_C), plynu je během toho odebíráno teplo (q_C) a kompresor zároveň spotřebovává práci. Nakonec probíhá izobarický ohřev (děj 4–1) v regenerátoru. Plyn přijímá teplo od plynu v předchozí části cyklu. Následně se celý cyklus opět opakuje.



Obr. 3.11: *p-v a T-s diagram Ericssonova cyklu, upraveno dle [24].*



Obr. 3.12: *Schéma Ericssonova cyklu, upraveno dle [24].*

Ericssonův cyklus by se mohl realizovat v plynové spalovací turbíně. Díky izotermickým dějům a regeneraci tepla by dosahoval stejné účinnosti jako Carnotův cyklus. V praxi ale bohužel není možné tento cyklus zrealizovat, stejně jako Carnotův. Izotermické děje jsou totiž nerealizovatelné, není možné mít stále stejnou konstantní teplotu a zabránit veškerým tepelným ztrátám. Jedná se tedy pouze o teoretický cyklus, který poukazuje na výborné vlastnosti regenerace, a jak se s jejím použitím dá dosáhnout vysokých účinností.

3.4 Shrnutí kapitoly

Tato kapitola se týkala cyklů spalovacích turbín. Nejčastěji užívaným cyklem pro tuto aplikaci je Braytonův cyklus. Jedná se o otevřený cyklus s vnitřním spalováním, který popisuje chod spalovací turbíny se spalováním za konstantního tlaku. Na počátku je nasáván vzduch do turbokompresoru, kde dochází k adiabatické kompresi. Vzduch se poté smísí s palivem, směs se zapálí ve spalovací komoře a probíhá izobarické hoření. Směs následně adiabaticky expanduje v turbíně, načež spaliny odchází do okolí. Turbína koná při expanzi plynu práci, malou část této práce spotřebuje na pohon turbokompresor, zbylá většina se převádí na generátor, který vytváří elektrickou energii. Cyklus se v praxi používá v plynových spalovacích turbínách, které dosahují velkých výkonů a účinností, jako např. SGT5-9000HL od firmy Siemens. Výhodou

Braytonova cyklu je dosažení velkých výkonů a účinností při jednoduché a kompaktní konstrukci. Nevýhodou je nutnost použití kvalitního paliva, vyšší nároky na materiály konstrukce a nevyužití vysoké teploty spalin na výstupu. Modifikace zvyšují účinnost užitím většího počtu kompresorů a turbín s mezichlazením a opětovným ohřevem, popř. užitím regenerace. Reálný Braytonův cyklus bere v potaz nevratné děje jako poklesy tlaků nebo ztráty způsobené třením.

Humphreyho cyklus je obdobný Braytonovu, pouze využívá upravenou spalovací komoru s ventilem, který zajišťuje spalování za konstantního objemu. Díky tomu má vyšší účinnost oproti Braytonovu cyklu, ale vzhledem k složitější konstrukci se moc nepoužívá. Ericssonův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou adiabat. Jedná se o izotermickou expanzi v turbíně za dodávání tepla, izobarické ochlazení v regenerátoru, izotermickou kompresi v turbokompresoru za odebrání tepla a izobarický ohřev v regenerátoru, kde plyn přijímá teplo od plynu z předchozí části cyklu. Cyklus teoreticky dosahuje obrovských účinností (dosahuje Carnotova cyklu), ale v praxi není realizovatelný.

4 Cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel

Hlavní zdroje informací v této kapitole, není-li uvedeno jinak, jsou [1], [2], přednášky z předmětu Termomechanika pana prof. Štětiny a cvičení ze Semináře aplikované termomechaniky pana doc. Klimeše.

4.1 Cyklus komprese par

4.1.1 Úvodní charakteristika

Cyklus komprese par je ideální termodynamický cyklus, všechny děje tedy uvažujeme jako vratné. Jedná se o uzavřený nepřímý cyklus, kdy pracovní látka neustále cirkuluje a cyklus práci nekoná, ale naopak spotřebovává, a využívá ji k chlazení, popř. ohřívání daného prostoru. Pracovní látka během cyklu prochází fázovými přeměnami, mění tedy své skupenství. Pro chladicí zařízení a tepelná čerpadla je tento cyklus velice často používán, neboť je i velmi efektivní.

Pro chladicí zařízení i tepelné čerpadlo se jedná o totožný děj s totožnou realizací, pouze s rozdílným užitečným teplem. V případě chladicího zařízení je žádoucí teplo q_C , které se odebírá ochlazovanému prostoru, a tedy se daný prostor chladí. V případě tepelného čerpadla je cílené teplo q_H , které se dodává do ohřívajícího prostoru a vytápí ho.

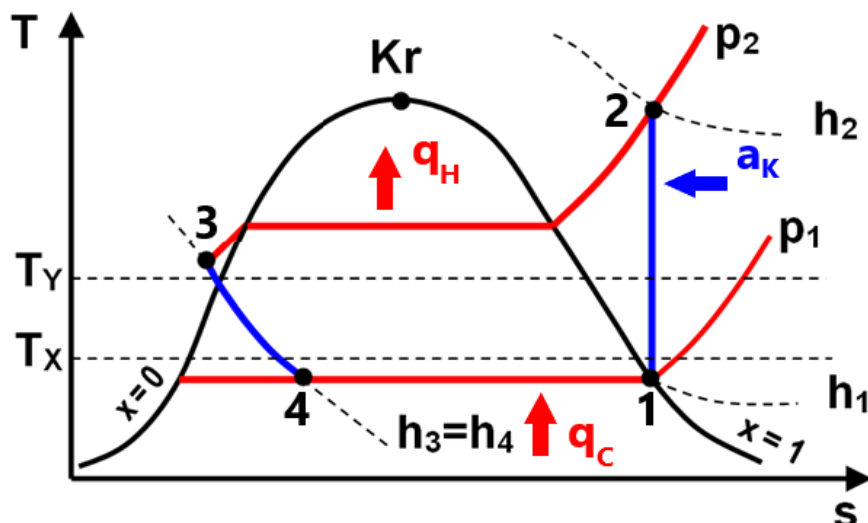
Pojmenování vzniklo dle charakteristických jevů cyklu, tedy dle vypařování dané látky (probíhá fázová přeměna) a stlačení látky v kompresoru.

4.1.2 Průběh cyklu

Průběh cyklu komprese par je vyobrazen v T-s diagramu na obr. 4.1. Celý ideální cyklus komprese par se skládá ze dvou izobar, jedné adiabaty a jedné izoentalpy.

Na počátku se nachází látka ve stavu syté páry (stav 1). Následně je látka adiabaticky stlačována na přehřátou páru (děj 1–2). Při tomto ději je nutno dodávat látce práci (a_K). Poté se látka nechá izobaricky ochladit a zkondenzovat (děj 2–3). Nejprve probíhá izobarické ochlazení na sytou kapalinu, vzápětí izobarická-izotermická kondenzace na sytou kapalinu, nakonec izobarické ochlazení na kapalinu. Při celém ději 2–3 je zapotřebí odebrat látce teplo (q_H). Následuje izoentalpický děj (3–4), při tomto ději poklesá tlak a teplota a látka se dostává ze stavu kapaliny do stavu mokré páry. Jako poslední probíhá izobarický ohřev (děj 4–1). Jedná se o izobarické-izotermické vypařování látky na stav syté páry při dodávání tepla (q_C). Poté se opět celý cyklus opakuje.

V diagramu jsou ještě vyznačeny dvě teploty – T_X a T_Y . V případě chladicího zařízení je T_Y teplota okolního prostředí, ve kterém probíhá kondenzace látky a T_X teplota ochlazovaného prostoru. V případě tepelného čerpadla je T_Y teplota vytápěného prostoru a T_X teplota okolního prostředí, ve kterém probíhá vypařování.

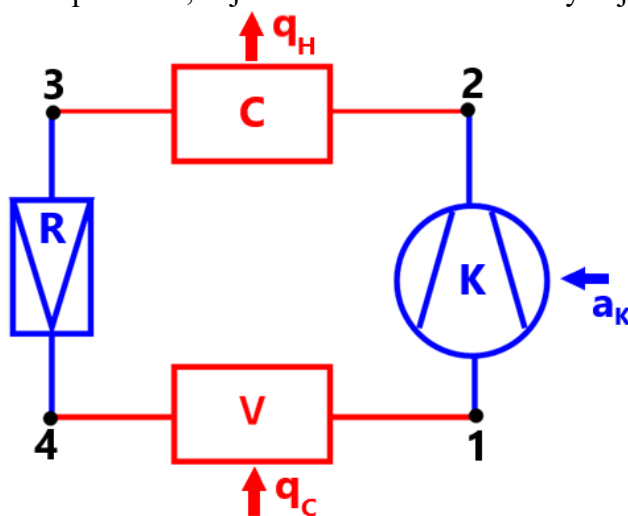


Obr. 4.1: T-s diagram Cyklu komprese par, upraveno dle [28].

4.1.3 Realizace cyklu

Schéma cyklu komprese par s danými komponentami je na obr. 4.2. Cyklus komprese par je z pravidla realizován užitím 4 komponent – kompresorem (K), kondenzátorem (C), redukčním (škrticím) ventilem (R) a výparníkem (V).

Adiabatická komprese probíhá v kompresoru. Látka je zde stlačována na přehřátou páru o vyšším tlaku i teplotě. Kompresor je nutno pohánět prací a_K . Izobarická ochlazování a izobarická-izotermická kondenzace probíhá v kondenzátoru. Jedná se o tepelný výměník, kdy látce odebíráme teplo (q_H). V případě chladicího zařízení se jedná o odpadní teplo, které látka odevzdává do okolí, v případě tepelného čerpadla je to naopak užitečné teplo, kterým ohříváme daný prostor. Látka se po tomto ději nachází ve stavu kapaliny. Poté probíhá tzv. škrcení látky v redukčním (škrticím) ventilu. Tento děj se nahrazuje dějem izoentalpickým. Klesá při něm tlak a teplota látky, a látka se tedy dostává do stavu mokré páry. Škrticí ventil bývá často nahrazován kapilárou, která má menší průřez než předchozí potrubí. Poslední částí cyklu je izobarické-izotermické vypařování, které probíhá ve výparníku. Látce se dodává teplo (q_C) a látka se vypařuje až na sytou páru. V případě chladicího zařízení je toto teplo užitečné, jelikož se odebírá ochlazenému prostoru, a tedy probíhá jeho chlazení. V případě tepelného čerpadla odebíráme teplo z okolního prostředí, nejedná se ale o hlavní užitný děj.



Obr. 4.2: Schéma Cyklu komprese par, upraveno dle [28].

4.1.4 Základní výpočty

$$q_H = h_3 - h_2 \quad (4.1)$$

$$q_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad (4.2)$$

$$a_K = h_1 - h_2 \quad (4.3)$$

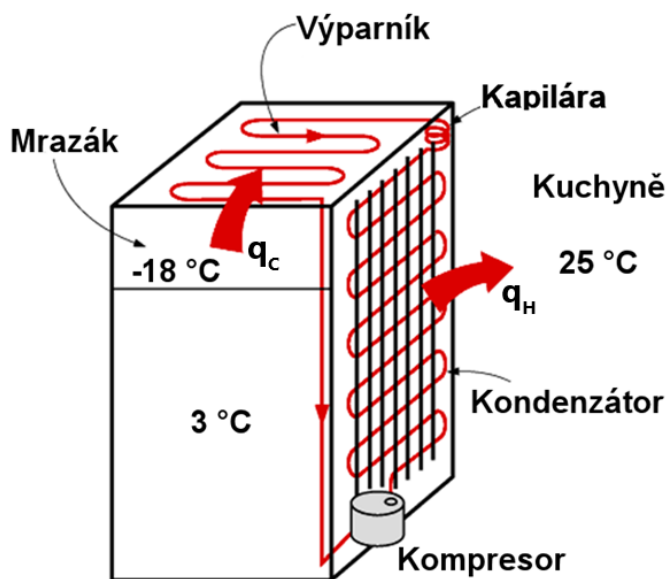
$$a_0 = q_c - |q_H| \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_C = COP_C = \frac{q_c}{|a_0|} = \frac{q_c}{|q_H| - q_c} = \frac{h_1 - h_3}{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_3)} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_H = COP_H = \frac{|q_H|}{|a_0|} = \frac{|q_H|}{|q_H| - q_c} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_3)} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (4.6)$$

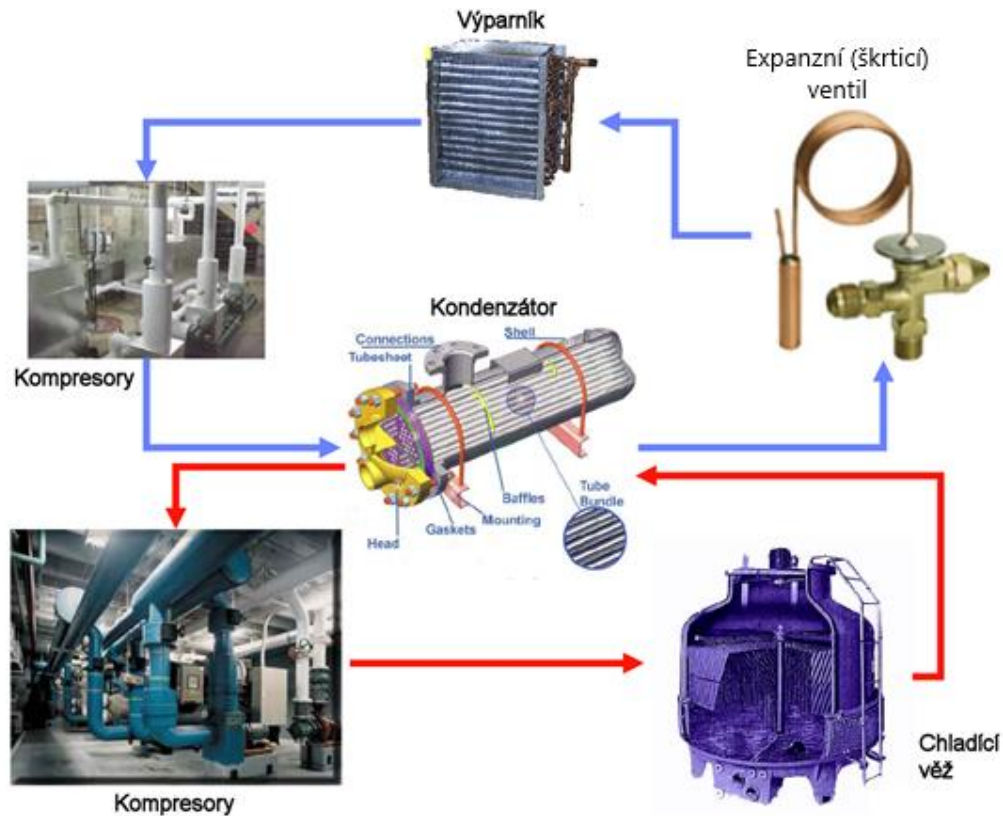
4.1.5 Užití v praxi

Cyklus komprese par je často využívaným cyklem pro chladicí zařízení a tepelná čerpadla. Na obr. 4.3 je znázorněno použití cyklu při provozu lednice. Jedná se o původní Cyklus komprese par. Kondenzátor se nachází zpravidla na vnější straně lednice – boční nebo zadní. Výparník je uvnitř lednice a odebírá teplo chlazenému vnitřnímu prostoru. Jako škrticí prvek se užívá obvykle kapilára. V těchto cyklech u lednic se používá jako pracovní látka chladivo, např. R-134a (CH_2FCF_3), R-717 (NH_3), R-744 (CO_2), atd. [29]



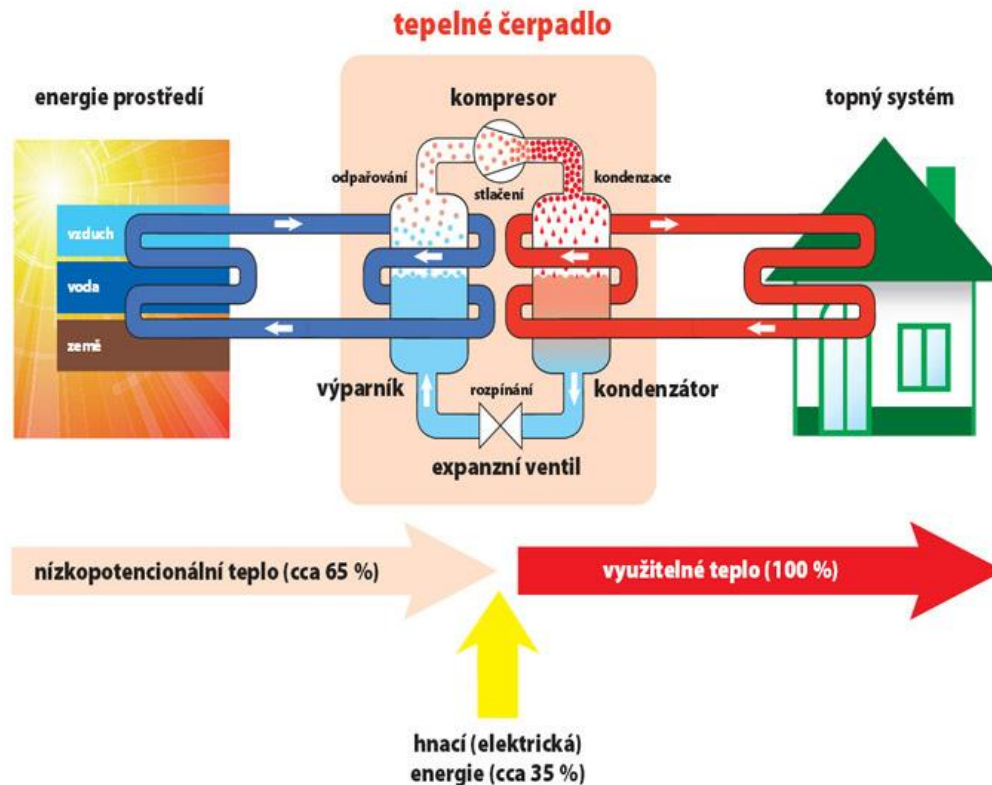
Obr. 4.3: Lednice s naznačeným cyklem, upraveno dle [28].

Další aplikací daného cyklu je klimatizační zařízení. Naznačený cyklus s komponentami je na obr. 4.4. Zobrazený cyklus je pravděpodobně realizován ve větších budovách, je zde tedy zapotřebí více kompresorů, stejně jako ostatních komponent. Kondenzátor je zde řešen formou dvouproudého tepelného výměníku, kde odebrání tepla zajišťuje další okruh s chladicí věží.



Obr. 4.4: Klimatizační zařízení, upraveno dle [28].

Na obr. 4.5 je zobrazena jedna z možností realizace tepelného čerpadla. Teplo, které je dodáváno do výparníku může pocházet ze země, z vody nebo ze vzduchu. Z kondenzátoru je odebíráno teplo, které slouží k vytápění rodinného domu. Z obrázku jde vidět i výhodná energetická bilance. Hnací energie, kterou je třeba dodat kompresoru, tvoří totiž asi pouze třetinu celkové energie, která je z cyklu získána. [30]



Obr. 4.5: Systém tepelného čerpadla [30].

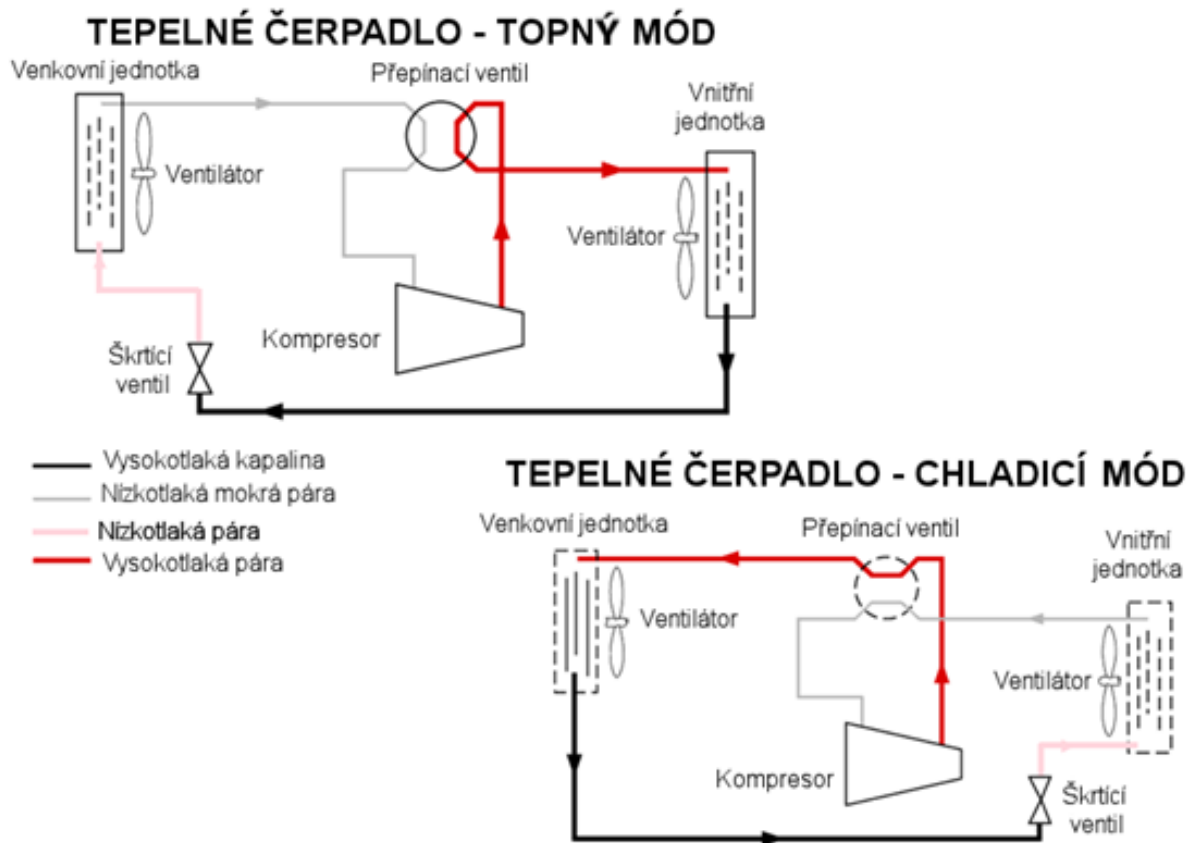
4.1.6 Výhody a nevýhody cyklu

Výhodou daného cyklu je, že se jedná o poměrně jednoduchý kompaktní cyklus, který ale také dosahuje poměrně vysokého chladicího, resp. topného faktoru. Cyklus navíc dosahuje vcelku velkého rozsahu teplot. Látky obíhající v cyklu je potřeba pouze malé množství, jsou tedy nízké provozní náklady. [31]

Na druhou stranu často jsou užívány jako pracovní látky chladiva, např. R-134a. Tyto chladiva jsou ale dosti drahá. Navíc jsou velice škodlivé pro životní prostředí, proto je kladen veliký důraz i na zajištění těsnosti a zabránění úniku daných látek do okolního prostředí. [31]

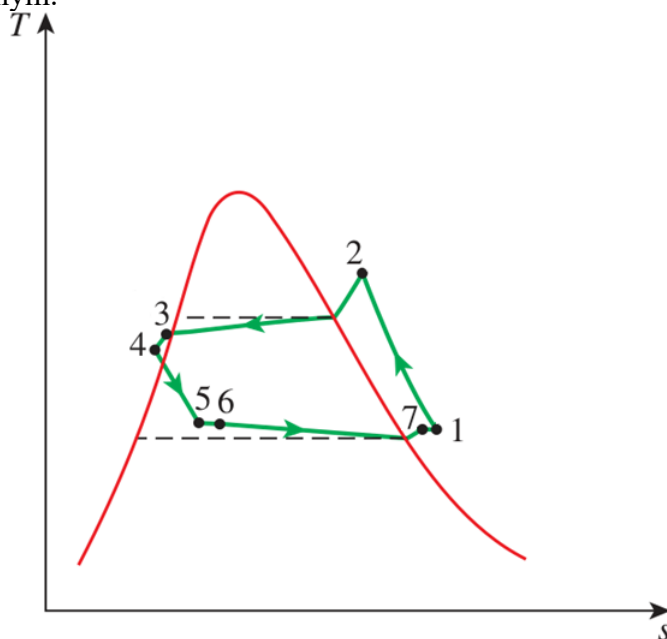
4.1.7 Modifikace cyklu komprese par a reálný cyklus komprese par

Na obr. 4.6 je schematicky znázorněno kombinované zařízení pro vytápění i chlazení, včetně označeného oběhu. Je to zařízení, které dokáže fungovat jako chladicí zařízení i jako tepelné čerpadlo. Pomocí přepínacího ventilu se vybere mód a určí směr proudění látky v oběhu. Jedná se vždy o popisovaný Cyklus komprese par, pouze se mění orientace proudění látky a venkovní a vnitřní výměník se mění z kondenzátoru na výparník a obráceně.



Obr. 4.6: Cyklus kombinovaného zařízení pro vytápění i chlazení, upraveno dle [28].

Reálný cyklus se skládá pouze z dějů nevratných. Odvod, resp. přívod, tepla není ve skutečnosti izobarický, ale tlak vlivem různých ztrát poklesá. Stejně při kompresi v kompresoru se nejedná o adiabatický děj, vlivem tření, příp. jiných vlivů se mění entropie a jedná se o nevratný děj. Stejně i při škrcení plynu nejde ve skutečnosti o izoentalpický děj. Entalpie se mírně mění a děj se stává nevratným.



Obr. 4.7: Reálný Cyklus komprese par, upraveno dle [29].

4.2 Cyklus absorpce par

4.2.1 Úvodní charakteristika

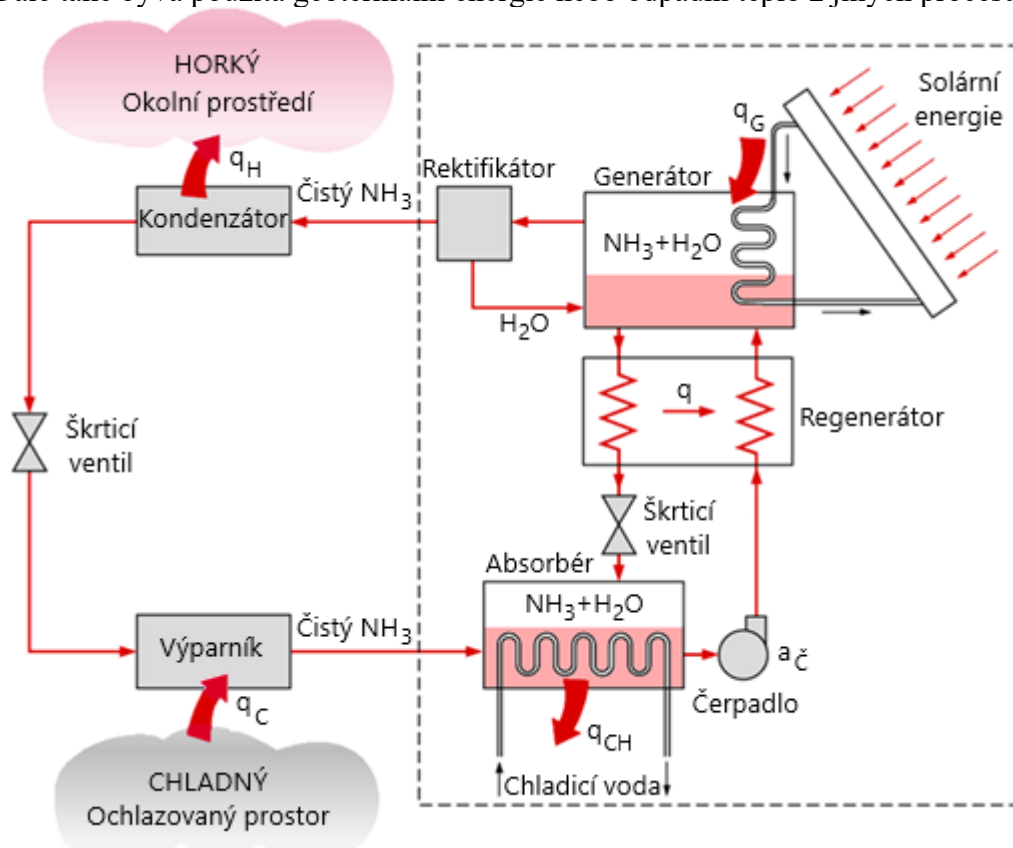
Cyklus absorpce par zahrnuje absorpci chladiva přenosovým médiem. Nejčastěji se využívá kombinace amoniaku (NH_3) jako chladiva a vody (H_2O) jako přenosového média. Cyklus se využívá pouze pro chladicí zařízení, u tepelných čerpadel se nevyužívá. Oproti Cyklu komprese par dosahuje menšího chladicího faktoru, proto se moc nepoužívá.

4.2.2 Průběh a realizace cyklu

Průběh a realizace cyklu absorpce par je velice podobná Cyklu komprese par. Schéma Cyklu absorpce par je znázorněno na obr. 4.8. Rozdíl oproti Cyklu komprese par je v tom, že Cyklus absorpce par nevyužívá kompresor, ale je nahrazen absorpčním mechanismem.

Z výparníku vychází páry čistého amoniaku a vstupují do absorbéru, zde se rozkládají a jsou absorbovány vodou. Při této reakci se uvolňuje teplo, je zde tedy zavedeno chlazení, které toto teplo odvádí (q_{CH}). Směs, která se díky chlazení nachází v kapalném stavu, je poté čerpadlem dopravována přes regenerátor do generátoru. V generátoru se směs vypařuje díky dodávanému teplu (q_G). Následně vstupuje do rektifikátoru, kde se oddělí páry amoniaku od par vody. Páry čistého amoniaku poté vstupují do kondenzátoru a pokračuje cyklus obdobným způsobem jako u Cyklu komprese par. Vodní pára se navrácí do generátoru, načež vstupuje celá směs s nízkým obsahem amoniaku do regenerátoru. Zde předává teplo chladnější směsi s vysokým obsahem amoniaku, která v předchozí části cyklu přechází od čerpadla do generátoru. Směs s nízkým obsahem amoniaku je následně škrcením upravena na tlak v absorbéru a vrací se do něj. Poté se daná část cyklu v absorpčním mechanismu opakuje.

Zdroj dodávaného tepla do generátoru může být solární energie, jak je uvedeno ve schématu. Dále také bývá použita geotermální energie nebo odpadní teplo z jiných procesů.



Obr. 4.8: Schéma Cyklu absorpce par, upraveno dle [28].

4.2.3 Výhody a nevýhody cyklu

Hlavní výhoda tohoto cyklu oproti Cyklu komprese par je v tom, že je stlačována kapalina v čerpadle, namísto páry v kompresoru. Práce spotřebovaná čerpadlem je tedy velice malá a často zanedbatelná.

Nevýhodou je to, že oproti Cyklu komprese par je zapotřebí mnohem složitější, větší a dražší konstrukce celého systému. Cyklus potřebuje zajistit chlazení, jeho údržba je vcelku náročná a celý cyklus dosahuje mnohem menšího chladicího faktoru.

4.2.4 Užití v praxi

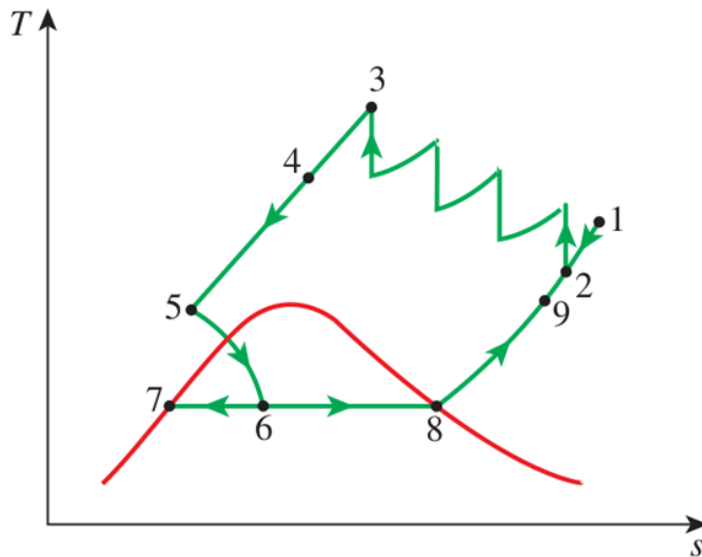
Díky výše zmíněným nevýhodám se cyklus často nevyužívá. Jeho užití je výhodné pouze u větších chladicích zařízení, kde je zajištěn dostatečný přísun tepla do generátoru, přičemž má toto teplo relativně nízkou cenu v porovnání s cenou elektřiny. Daný cyklus totiž spotřebovává velmi malou až zanedbatelnou elektrickou energii v porovnání se spotřebou tepla dodávaného do generátoru. Výhodné využití je tedy při zdroji tepla v podobě solární a geotermální energie a převážně při využití odpadního tepla. Je ale také zapotřebí, aby teplo mělo co nejvyšší teplotu, protože s klesající teplotou tohoto tepla výrazně klesá i chladicí faktor.

Cyklus dále nachází užití v malých lednicích, které jsou často umístěné v hotelích pro chlazení nápojů. Spotřeba elektřiny takových zařízení je totiž téměř nulová a odpadní teplo je bráno pouze z teplejšího okolního prostředí. Tato aplikaci tedy není rozměrná, ani nemá zajištěn přísun tepla o velké teplotě. Dle výše zmíněného tedy dosahuje velice malého chladicího faktoru. Náklady na pohon tohoto zařízení jsou ale minimální a pro chlazení nápojů je zařízení postačující, proto se jedná o vhodnou aplikaci daného cyklu.

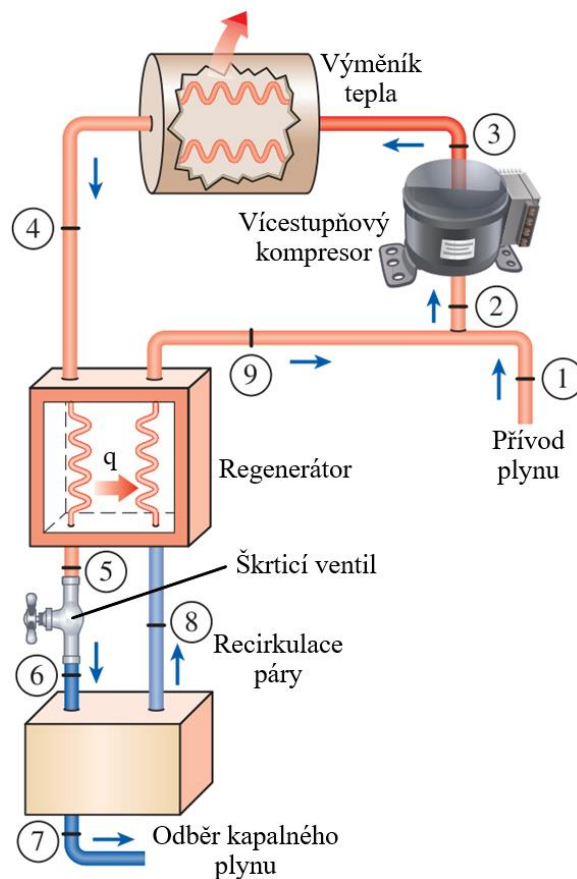
4.3 Lindeho cyklus

Lindeho cyklus je cyklus určený ke zkapalňování plynů. Zkapalňování plynů se provádí, protože plyny v kapalně fázi se mnohem lépe skladují a přepravují. Dále se zkapalněných plynů také využívá při ochlazování různých látek.

Na obr. 4.9 je znázorněn T-s diagram Lindeho cyklu, na obr. 4.10 jeho schéma. Na začátku přivádíme plyn, který chceme zkapalnit (stav 1). Ten se mísí s plynem předchozího cyklu, který celý nezkondenzoval (stav 2). Následně plyn vstoupí do vícestupňového kompresoru, kde probíhá izotermická komprese (děj 2–3). Izotermická komprese je realizována stlačováním plynu v jednotlivých stupních kompresoru a následným mezichlazením. Plyn poté vstupuje do tepelného výměníku, kde se izobaricky ochlazuje (děj 3–4). Následně se ještě izobaricky ochlazuje v regenerátoru, kde odevzdává teplo (děj 4–5). Poté je seškrčen ve škrticím ventilu (děj 5–6), kdy je škrcení nahrazeno izoentalpickým dějem. Dále vstupuje již mokrá pára do nádoby, kde je ze dna odebírán zkapalněný plyn (stav 7) a z vrchu nádoby odchází sytá pára (stav 8). Ta vstupuje do generátoru, kde přijímá teplo a izobaricky se ohřívá (děj 8–9). Nakonec se smísí s nově přiváděným plynem (stav 2) a celý cyklus se opět opakuje.



Obr. 4.9: T-s diagram Lindeho cyklu [29].



Obr. 4.10: Schéma Lindeho cyklu, upraveno dle [29].

4.4 Siemensův cyklus

Siemensův cyklus se používá k chlazení, příp. zkapalňování plynů. Byl patentován W. Siemensem v roce 1857. Je to téměř stejný cyklus jako Lindeho cyklus. Liší se pouze v tom, že Siemensův cyklus má na konci válec s pístem místo škrticího ventilu, který se nachází u Lindeho cyklu. Plyn tedy nejen expanduje, ale i koná práci. Tento cyklus je tedy účinnější než

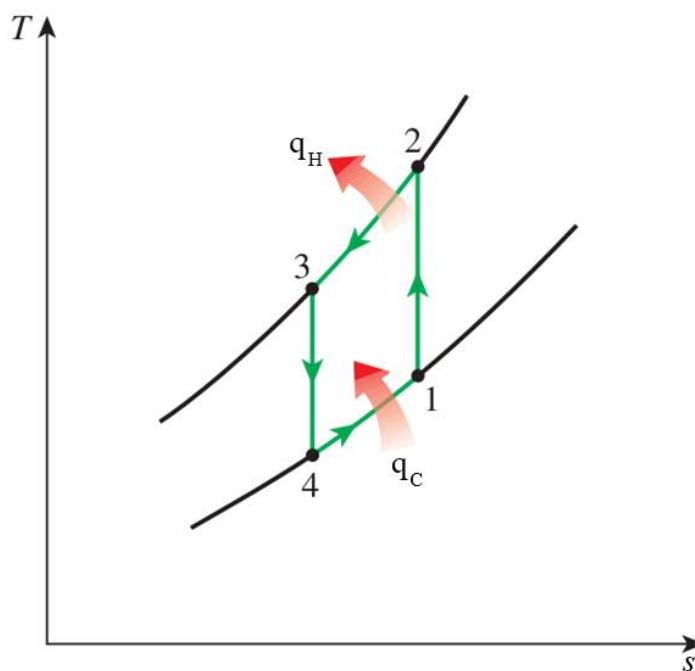
Lindeho cyklus. Díky vykonané práci sníží plyn ještě více svou teplotu a navíc může být využito vykonané práce, např. pro pohon kompresoru. Ale pohyblivý konec cyklu může být považován i za nevýhodu, např. z hlediska odběru zkapalněného plynu. [32]

4.5 Bell Colemanův cyklus

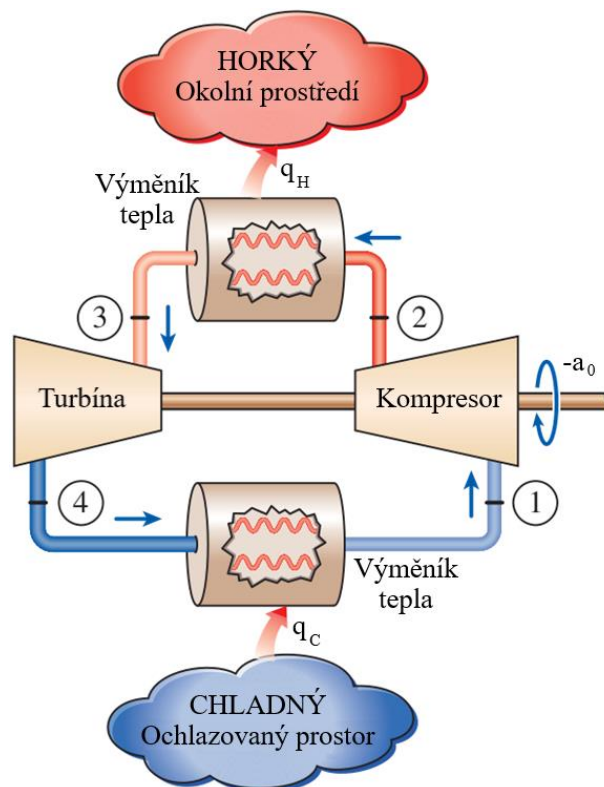
Bell Colemanův cyklus je obrácený Braytonův cyklus. Jedná se o stejný cyklus, který ale probíhá obráceně, proto práci nekoná, ale spotřebovává. Jeho hlavní užitek je odebírání tepla danému prostoru, a tím jeho chlazení. Jeho další název je Plynový chladicí cyklus, který se také často používá. Cyklus se používá zejména u chladicích zařízení, u tepelných čerpadel není použití obvyklé.

Průběh a realizace cyklu je znázorněna na obr. 4.11 a 4.12. Vzduch je zpočátku adiabaticky stlačován v kompresoru (děj 1–2), kdy kompresor spotřebovává práci. Poté vstupuje do výměníku tepla, kde odevzdává teplo (q_H) okolí, a tím se izobaricky ochlazuje (děj 2–3). Následně probíhá adiabatická expanze v turbíně (děj 3–4), kdy turbína koná práci. Nakonec plyn vstoupí do dalšího tepelného výměníku, kde přijímá teplo (q_C) z ochlazovaného prostoru, čímž ho ochlazuje, a zároveň se plyn izobaricky ohřívá (děj 4–1). Poté se celý cyklus opět opakuje.

Nevýhodou daného cyklu je, že dosahuje poměrně nízkého chladicího faktoru. Výhodou je, že se jedná o jednoduchý cyklus, který využívá lehkých komponent. Proto tento cyklus nachází uplatnění v chlazení u letadel. Zde existuje i jeho otevřená variace, kdy je do kompresoru vždy nasáván nový vzduch, který je stlačen, následně ochlazen od okolního studeného vzduchu, vyexpanduje v turbíně a studený vzduch je poté odváděn přímo do ochlazovaného prostoru v letadle.



Obr. 4.11: T - s diagram Bell Colemanova cyklu, upraveno dle [29].



Obr. 4.12: Schéma Bell Colemanova cyklu, upraveno dle [29].

4.6 Vuilleumierův cyklus

Vuilleumierův cyklus je ideální uzavřený termodynamický cyklus, do kterého je dodáváno teplo z vnějšku. Stroje sestavené jako aplikace Vuilleumierova cyklu mívají zpravidla dva nestejně velké písty ve dvou válcích. V praxi se cyklus používá pro tepelné čerpadlo, které dosahuje poměrně vysokého topného faktoru. Dále se využívá pro chladicí zařízení, a jelikož je schopný dosáhnout i velmi nízkých teplot, tak se může využít i pro zkapalňování plynů. [33]

4.7 Shrnutí kapitoly

Tato kapitola byla zaměřena na cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel. Cyklus chladicího zařízení může být úplně stejně aplikován i jako cyklus tepelného čerpadla. Záleží pouze na tom, které teplo je pro danou aplikaci užitečné, zda to, které je odebíráno prostoru, nebo to, které je dodáváno do prostoru.

Cyklus komprese par byl zmíněn jako první a nejpoužívanější cyklus. Jedná se o nepřímý cyklus, který nekoná práci, ale naopak ji spotřebovává, a díky tomu ochlazuje, popř. vytápí daný prostor. Cyklus se skládá ze dvou izobar, jedné adiabaty a jedné izoentalpy. Cyklus začíná adiabatickou kompresí v kompresoru, následně probíhá izobarické ochlazování a kondenzace v kondenzátoru, izoentalpické škrcení v redukčním ventilu a nakonec izobarické ohřívání a vypařování ve výparníku. V případě chladicího zařízení je užitečné teplo, které je dodáváno do výparníku odebíráním tepla z ochlazovaného prostoru. V případě tepelného čerpadla je to teplo, které odevzdává kondenzátor do okolního prostoru, a tím ho vytápí. Cyklus může být použitý v lednici, klimatizačním zařízení nebo tepelném čerpadle pro vytápění domu. Výhodou je velký topný, resp. chladicí faktor při jednoduché konstrukci. Nevýhodou je použití chladiv, která jsou poměrně drahá a škodlivá pro životní prostředí. Cyklus může být při vhodné konstrukci užíván zároveň jako chladicí zařízení i tepelné čerpadlo, kdy se funkce přepíná pomocí ventilu. Reálný cyklus se skládá pouze z nevratných dějů.

Cyklus absorpce par je obdobný, pouze používá místo kompresoru absorpční mechanismus, který využívá absorpci chladiva (např. amoniaku) v přenosovém médiu (např. voda). Oproti Cyklu komprese par je zapotřebí minimální práce pro pohon čerpadla. Ale cyklus je složitější a dosahuje nižšího chladicího faktoru. Proto se moc často nevyužívá. Jedna z aplikací je menší lednice, často užívaná v hotelích.

Lindeho cyklus se využívá ke zkapalňování plynů. To je prováděno pomocí vícestupňového kompresoru, následného stálého ochlazování a škrcení. Siemensův cyklus je obdobný, pouze používá místo škrticího ventilu válec s pístem. Bell Colemanův cyklus je obrácený Braytonův cyklus. Pomocí kompresoru, turbíny a dvou výměníků ochlazuje daný prostor. Často se využívá u chlazení v letadlech. Vuilleumierův cyklus je možné použít pro tepelné čerpadlo, chladicí zařízení i zkapalňování plynů.

5 Ostatní cykly

Hlavní zdroje informací v této kapitole, není-li uvedeno jinak, jsou [1], [2], přednášky z předmětu Termomechanika pana prof. Štětiny a cvičení ze Semináře aplikované termomechaniky pana doc. Klimeše.

5.1 Paroplynový cyklus

5.1.1 Úvodní charakteristika

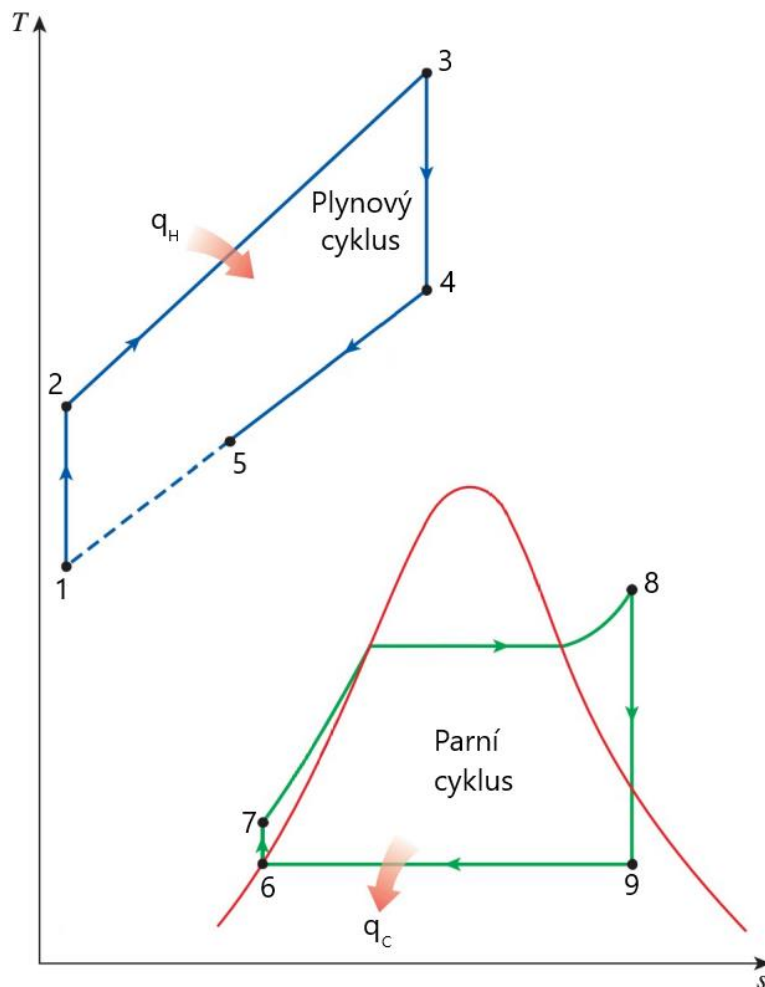
Paroplynový cyklus je teoretický termodynamický cyklus, který přetváří tepelnou energii na mechanickou práci, a následně na elektrickou energii. Jedná se o kombinaci dvou základních cyklů – Braytonova cyklu a Rankin Clausiova cyklu. Braytonův cyklus je otevřený a neprobíhá během něj fázová přeměna, proto se v paroplynovém cyklu označuje jako plynový cyklus. Rankin Clausiův cyklus je uzavřený a látka při cyklu mění své skupenství – vypařuje se a kondenzuje, proto je cyklus označován v paroplynovém cyklu jako cyklus parní. Odtud vznikl i název cyklu – paroplynový, jedná se totiž o kombinaci plynového a parního cyklu. Oba cykly se uvažují jako ideální vratné, nejsou tedy brány v potaz ztráty během cyklu.

Při použití tohoto cyklu výrazně zvýšíme účinnost, oproti použití každého cyklu zvlášť. Účinnost Braytonova, resp. Rankin Clausiova cyklu se pohybuje v intervalu 30–40 %, účinnost paroplynového cyklu dosahuje 60 nebo i více než 60 %. Využívá se toho, že z Braytonova cyklu odchází spaliny o poměrně vysoké teplotě a vysokém tlaku, v tomto cyklu se právě toto odpadní teplo použije jako zdroj tepla pro Rankin Clausiův cyklus. [34]

5.1.2 Průběh cyklu

Paroplynový cyklus je v T-s diagramu znázorněn na obr. 5.1. Braytonův plynový cyklus začíná ve stavu 1, dále probíhá adiabatická komprese (děj 1–2), při které plyn spotřebovává práci. Následuje izobarický ohřev (děj 2–3) za dodávání tepla (q_H). Poté plyn adiabaticky expanduje a koná práci. Nakonec probíhá izobarické ochlazení (děj 4–1), které se skládá z předávání tepla parnímu cyklu (děj 4–5), a následně výfuku do okolní atmosféry (nahrazováno dalším ochlazením (děj 5–1)).

Rankin Clausiův parní cyklus začíná ve stavu syté kapaliny (6), kapalina je poté adiabaticky stlačována do stavu kapaliny (děj 6–7), látka přitom spotřebovává práci. Následuje izobarický ohřev (děj 7–8), kdy je z počátku kapalina izobaricky ohřívána na sytou kapalinu, poté izobaricky-izotermicky vypařena na sytou páru a nakonec přehřívána až na přehřátou páru (8). Při celém ději 7–8 je látce neustále dodáváno teplo, toto teplo zajišťuje právě plynový cyklus, který je odevzdává v rámci ochlazení plynu. Parní cyklus pokračuje adiabatickou expanzí, kdy koná práci. Poslední částí je izobarická-izotermická kondenzace (děj 9–6), kdy je látce odebráno teplo (q_C). Dále se celý cyklus opět opakuje.

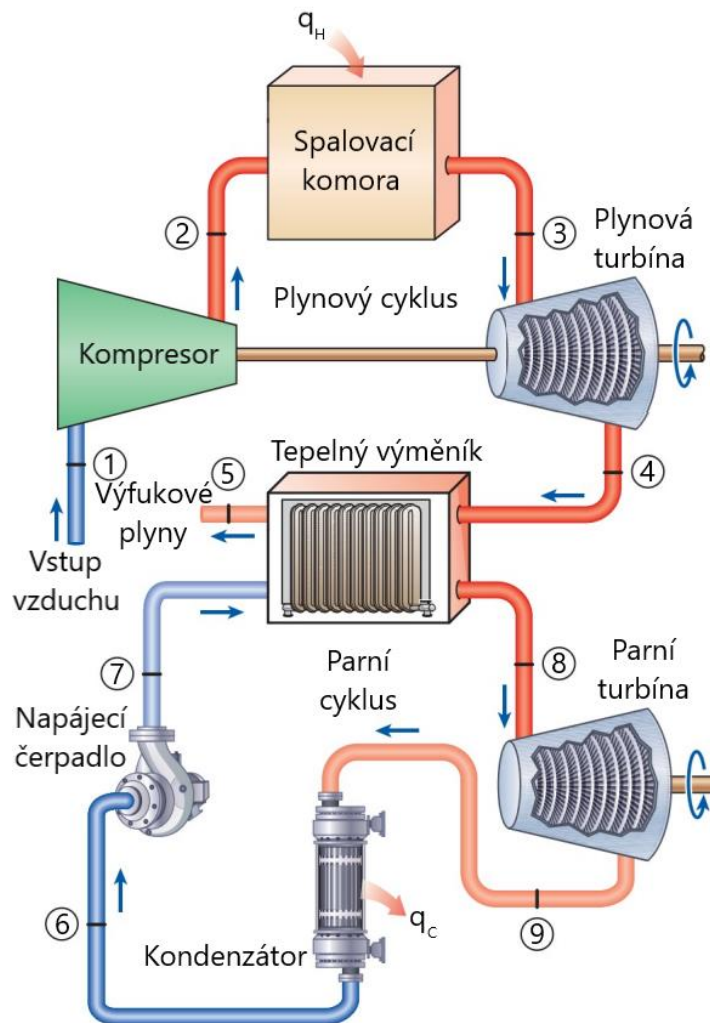


Obr. 5.1: T-s diagram Paroplynového cyklu, upraveno dle [13].

5.1.3 Realizace cyklu

Schéma paroplynového cyklu s jeho komponentami je vyobrazeno na obr. 5.2. Plynový cyklus na počátku nasává vzduch o stavu 1 do kompresoru, zde proběhne adiabatická komprese (děj 1–2), při které je nutno zajistit pohon kompresoru. Poté stlačený vzduch vstoupí do spalovací komory, kde se smísí s palivem, celá směs se vznítí a vystupuje ze spalovací komory (děj 2–3), tento děj je nahrazován izobarickým ohřevem za dodávání tepla (q_H). Následně směs vstupuje do plynové turbíny, naráží do jejich lopatek, roztáčí ji a adiabaticky expanduje (děj 3–4), zatímco turbína koná práci. Plyn potom vstoupí do tepelného výměníku, kde se mu izobaricky odebírá teplo, a toto teplo přijímá látka parního cyklu (děj 4–5). Nakonec ochlazené spaliny opouští cyklus a do kompresoru je nasáván nový vzduch (děj 5–1). Tento děj se ale v T-s diagramu nahrazuje dalším izobarickým ochlazením za účelem uzavření cyklu v diagramu, a tím usnadnění výpočtů.

Parní cyklus začíná ve stavu syté kapaliny (6), ta je následně adiabaticky stlačena v napájecím čerpadle na kapalinu (děj 6–7). Kapalina vstoupí do tepelného výměníku, zde izobaricky přijímá teplo ze spalin plynového cyklu a ohřívá se na sytou kapalinu, poté se vypařuje na sytou páru a nakonec přehřívá na přehřátou páru (děj 7–8). Přehřátá pára vstupuje do parní turbíny, kde ji roztáčí, a turbína koná práci, zatímco pára adiabaticky expanduje na mokrou páru (děj 8–9). Následně vstupuje mokrá pára do kondenzátoru, kde izobaricky-izotermicky kondenzuje na sytou kapalinu (děj 9–6) při odebírání tepla (q_C). Kondenzátor je zpravidla dvou-proudý tepelný výměník, kde látce odebírá teplo studená voda jiného oběhu, jehož součástí je obvykle i chladicí věž. Po kondenzaci se cyklus opět opakuje.



Obr. 5.2: Schéma Paroplynového cyklu, upraveno dle [13].

5.1.4 Základní výpočty

$$q_H = c_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (5.1)$$

$$q_C = h_6 - h_9 + c_p \cdot (T_1 - T_5) \quad (5.2)$$

$$a_0 = q_H - |q_C| \quad (5.3)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_C|}{q_H} = 1 - \frac{h_9 - h_6 + c_p \cdot (T_5 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} \quad (5.4)$$

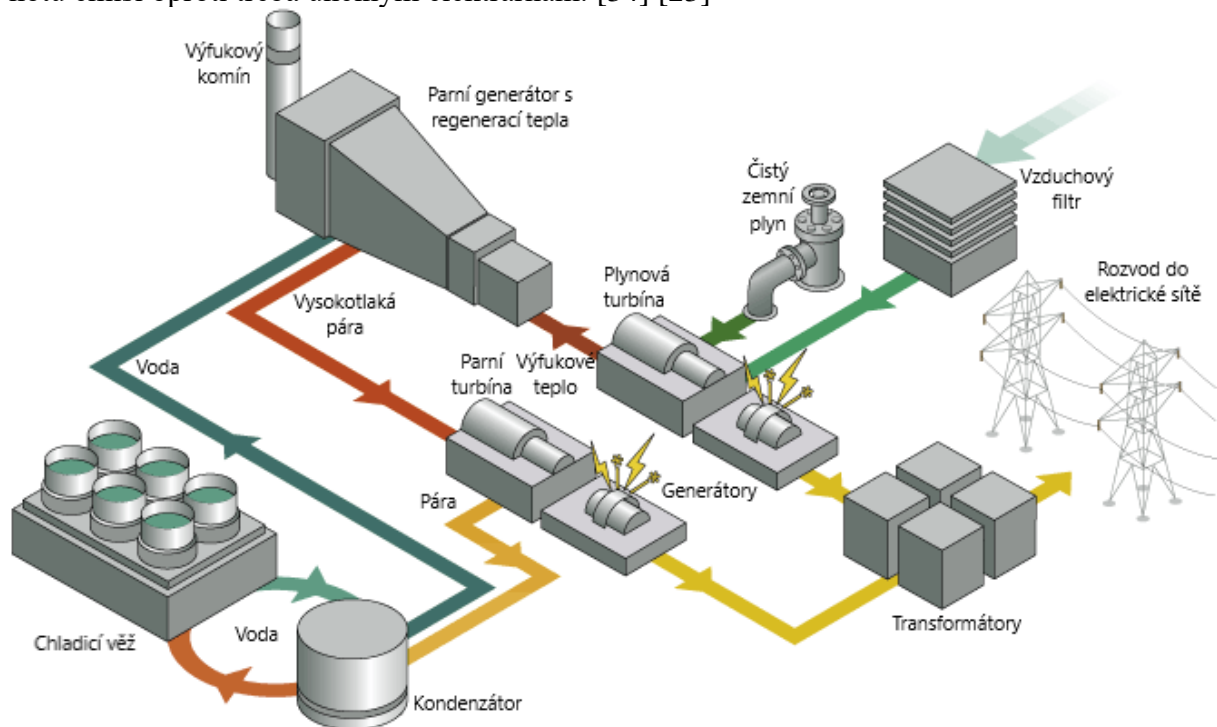
5.1.5 Užití v praxi

Na základě paroplynového cyklu pracuje tzv. paroplynová elektrárna. Schématické zobrazení s naznačenými oběhy je na obr. 5.3. Realistická simulace elektrárny je na obr. 5.4.

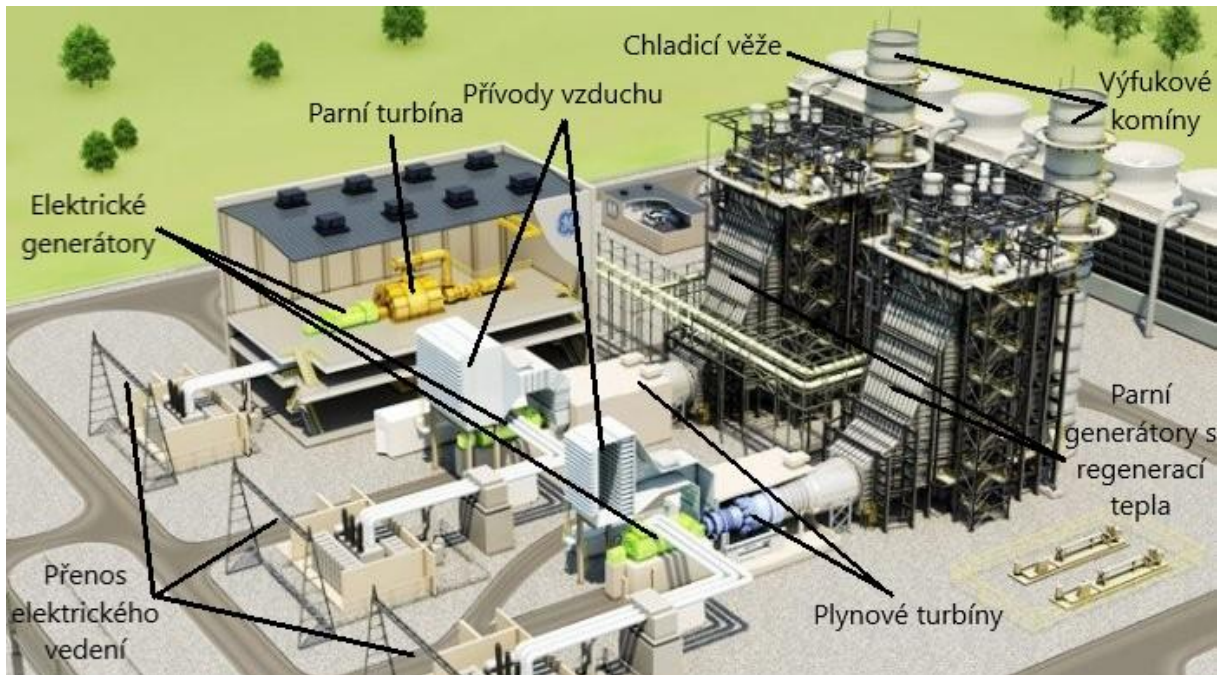
Z obrázků jde vidět, že vzduch je na začátku při nasávání filtrován od nežádoucích nečistot vzduchovým filtrem. Poté vstupuje do plynové turbíny, kde se mísí se zemním plynem, příp. jiným palivem, a probíhá spalování. Pro ještě větší efektivitu a zvýšení výkonu je výhodnější použít dvě plynové turbíny na jednu parní, jak je tomu na obr. 5.4. Výměník tepla, který zajišťuje přenos tepla z plynového do parního cyklu se nazývá parní generátor s regenerací tepla.

Toto zařízení se skládá z několika dlouhých potrubí, kterým proudí voda parního cyklu, zatímco kolem potrubí proudí spaliny z plynové turbíny a ohřívají tuto vodu v potrubí. Poté ochlazené spaliny odchází komínem zpět do okolí. Přehřátá pára vstupuje do parní turbíny, předává jí energii a odchází do kondenzátoru. V kondenzátoru zkondenzuje a vrací se do parního generátoru. Odvod tepla z kondenzátoru je zajištěn několika chladicími věžemi, příp. je možno použít i vzduchem chlazené kondenzátory. Plynová i parní turbína je napojena na generátor, který z rotace hřídele vytváří elektrickou energii. Ta je následně vedena do transformátorů, a poté již rozváděna do sítě. [34]

Paroplynové elektrárny dosahují mnohem větších výkonů a vyšší účinnosti, např. plynová spalovací turbína SGT5-9000HL, kterou jsem se zabýval u popisu Braytonova cyklu, dosahuje při použití v paroplynovém cyklu v sestavě dvou plynových turbín na jednu parní výkonu 1740 MW a účinnosti vyšší než 64 %. Paroplynové elektrárny mají také mnohem menší hodnotu emisí oproti třeba uhelným elektrárnám. [34] [23]



Obr. 5.3: Schéma paroplynové elektrárny, upraveno dle [35].



Obr. 5.4: Paroplynová elektrárna, upraveno dle [12].

5.1.6 Výhody a nevýhody cyklu

Hlavní výhodou paroplynového cyklu je jeho velice vysoká účinnost, která přesahuje 60 %. Dále se jedná o cyklus, který dosahuje vysokých výkonů při poměrně nízké hodnotě emisí. Je to tedy velice účinný, efektivní a ekologicky přijatelný cyklus. Navíc paroplynové elektrárny pracující dle tohoto cyklu se velice rychle vystaví, přičemž výstavba a celá realizace elektrárny není nijak příliš nákladná. Také jsou schopny uvést se opravdu rychle do plného provozu, náběh elektrárny je tedy v porovnání s např. jadernou, nebo tepelnou elektrárnou mnohem rychlejší. [34] [36]

Hlavní nevýhodou cyklu je použití poměrně drahého a ušlechtilého paliva do spalovací turbíny. Z tohoto důvodu se paroplynové elektrárny, založené na tomto cyklu, stále nevyužívají tolik jako např. uhelné elektrárny, kde jsou náklady na palivo výrazně menší. Paroplynové elektrárny často doplňují ostatní elektrárny, např. i solární a větrné, protože jsou schopny se při nějakém výpadku velice rychle uvést do provozu, jak bylo popsáno výše. [34] [36]

5.2 Stirlingův cyklus

5.2.1 Úvodní charakteristika

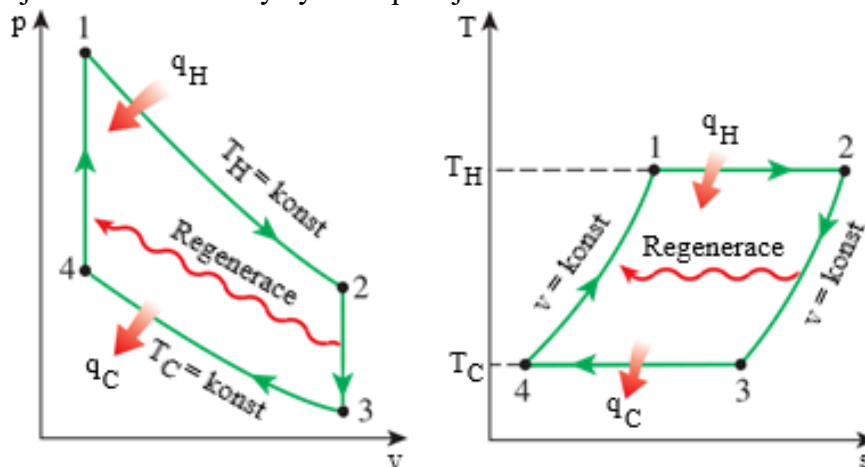
Stirlingův cyklus je teoretický ideální uzavřený termodynamický cyklus, do kterého je teplo dodáváno z vnějších zdrojů. Cyklus dosahuje velmi vysoké účinnosti, stejné jako Carnotův cyklus. Realizace jeho ideálního tvaru je bohužel nemožná. Cyklus byl formulován Robertem Stirlingem v roce 1816. [37]

5.2.2 Průběh a realizace cyklu

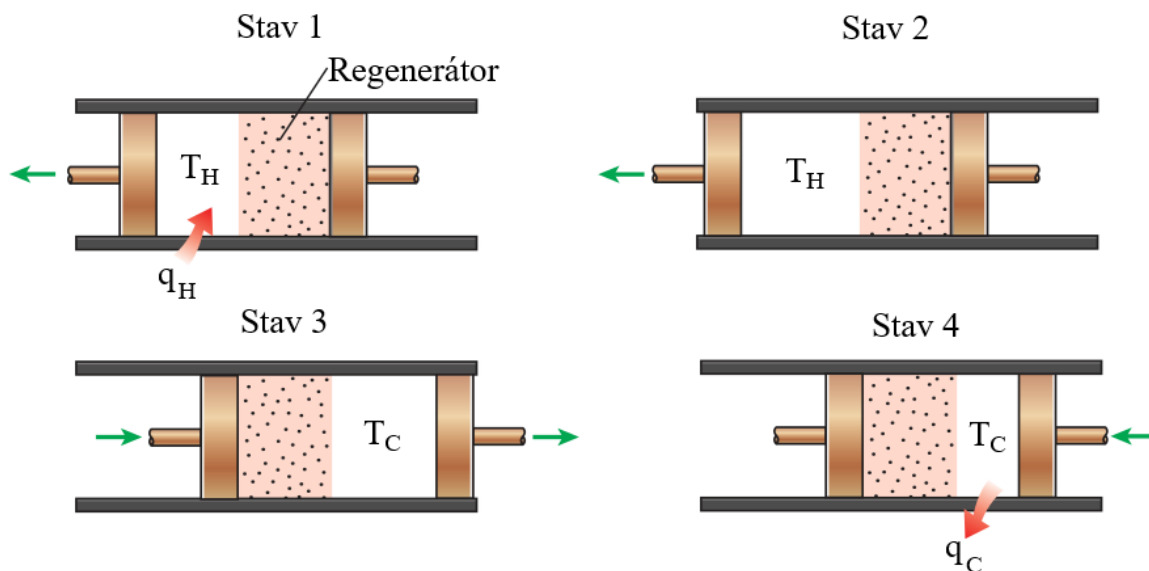
Ideální Stirlingův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou izochor. Průběh cyklu je zobrazen na obr. 5.5. Jeho teoretická realizace na pístovém motoru je znázorněna na obr. 5.6.

Cyklus začíná izotermickou expanzí (děj 1–2), kdy se udržuje konstantní teplota (T_H) a do cyklu je dodáváno teplo (q_H). Při expanzi se vysouvá levý píst. Poté nastává izochorická komprese (děj 2–3), kdy látka předává teplo regenerátoru a ochlazuje se. Oba písty se zároveň posouvají doprava, aby byl zachován stejný objem. Následuje izotermická komprese (děj 3–4), kdy má látka konstantní teplotu (T_C) a z cyklu je odebráno teplo (q_C). Pravý píst se stlačuje

doleva. Nakonec probíhá izochorická komprese (děj 4–1), kdy látka přijímá teplo z regenerátoru a ohřívá se. Oba písty se v tu dobu posouvají doleva zároveň, opět z důvodu dosažení izochorického děje. Následně se celý cyklus opakuje.



Obr. 5.5: p - v a T - s diagram Stirlingova cyklu, upraveno dle [24].



Obr. 5.6: Schéma teoretického provedení Stirlingova cyklu, upraveno dle [24].

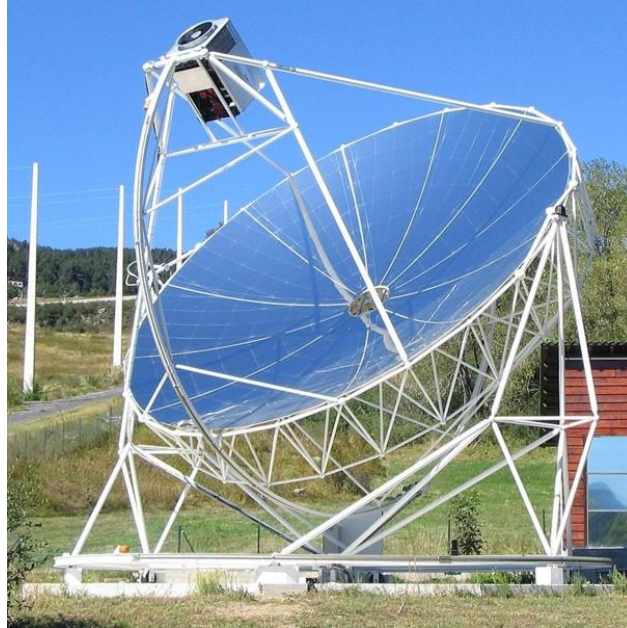
5.2.3 Užití v praxi

Ideální Stirlingův cyklus není realizovatelný, stejně jako Carnotův cyklus. Pokud jsou ale uvažovány reálné děje, Stirlingův cyklus nachází několik aplikací. Cyklus se používá u automobilových motorů, ale ne moc často, protože motory s vnitřním spalováním dosahují lepší účinnosti. Některé motory ale dle tohoto cyklu pracují, a také se objevuje hodně prototypů. Spalovací motory ale nejsou hlavním zájmem této práce. [38]

Stirlingův cyklus nachází uplatnění při výrobě elektrické energie z méně potenciálních zdrojů energie, převážně se jedná o rekuperaci odpadního tepla a geotermální energii. Dále se také využívá obrácený Stirlingův cyklus pro chladicí zařízení a tepelná čerpadla, kde dosahuje vysokých chladicích a topných faktorů. Zvláště energeticky výhodný je při chlazení na velmi nízké teploty, zde se jedná o tzv. Stirlingovy kryochladiče. [38]

Velký rozvoj v aplikaci nachází tento cyklus u solárních elektráren. Jedná se o určitý typ solárních elektráren, kdy se sluneční paprsky soustřeďují do jednoho místa. V tomto místě se nachází přijímač, který následně toto získané teplo předává do Stirlingova cyklu, který z něj

vytváří elektrickou energii. Jedna z konstrukcí je koncentrátor s přijímačem ve středu, jak je znázorněno na obr. 5.7. Další typ konstrukce je velké množství heliostatů, které usměřují paprsky na věž s přijímačem ve středu, jak je znázorněno na obr. 5.8. [38]



Obr. 5.7: Solární elektrárna - koncentrátor s přijímačem uprostřed [24].



Obr. 5.8: Solární elektrárna – heliostaty s věží uprostřed [24].

5.3 Kalinův cyklus

Podkapitola 5.3 vychází ze zdroje [39].

Kalinův cyklus je uzavřený termodynamický cyklus, do kterého je teplo dodáváno z vnějších zdrojů a u kterého probíhá fázová přeměna látky. Cyklus používá jako pracovní médium směs amoniaku a vody.

Průběh a realizace cyklus se blíží Rankin Clasiovu cyklu. Cyklus se také skládá z kotle, kondenzátoru, čerpadla a dalších komponent.

Cyklus se využívá zpravidla pro nízkoteplotní zdroje energie, např. pro geotermální nebo solární energii. Největší užití ale cyklus nachází při rekuperaci odpadního tepla. Využívá

Cyklus se má využívat pro elektrárny pracujícího dle daného cyklu. V současnosti ale ještě velké užití nemá, jedná se totiž o poměrně nový cyklus. Cyklus má ale obrovský potenciál. Dosahuje velkých bezpečností – více než 65 %, takže se přibližuje Carnotovu cyklu a navíc je ekologický, jelikož má téměř nulové emise. Nevýhodou je použití kvalitního paliva – zemního plynu a použití čistého kyslíku. Vzhledem k účinnosti by ale měl být cyklus stejně ekonomicky výhodný.

5.5 Goswamiho cyklus

Goswamiho cyklus je nový termodynamický cyklus, který používá parní binární směs, zpravidla se používá kombinace amoniaku s vodou. Tento cyklus dokáže kombinovaně vyrábět elektrickou energii i sloužit jako chladicí zařízení zároveň. Může vyrábět pouze elektrickou energii, nebo sloužit pouze jako chladicí zařízení, nebo sloužit jako kombinace obou. Jedná se v podstatě o kombinaci Rankin Clausiova cyklu a Cyklu absorpce par. Cyklus byl popsán Dr. Goswamim v roce 1998. [6] [41]

Cyklus má podobnou realizaci jako měl cyklus komprese par. Při výstupu páry čistého amoniaku se dále místo kondenzátoru nachází ohříváč, který ještě přehřeje páru. Navíc je expanzní ventil nahrazen turbínou. Přehřátá pára tedy expanduje v turbíně při konání práce. Poté vstupuje do výparníku, do kterého je dodáváno teplo. Toto teplo se právě odebírá prostoru, který je tím ochlazován. [41]

Daný cyklus zatím nemá žádnou početnou aplikaci v praxi. Stále se nachází ve fázi výzkumu. [6]

5.6 Allam Fetvedtův cyklus

Podkapitola 5.6 vychází ze zdroje [42].

Allam Fetvedtův cyklus je další nový termodynamický cyklus. Řeší obdobnou věc jako Gražský cyklus, zajistit spalování v plynové spalovací turbíně při nulových emisích. Je toho opět dosaženo použitím čistého zemního plynu s čistým kyslíkem. Cyklus vyvinuli Rodney Allam a Jeremy Fetvedt, po kterých také nese svůj název.

Realizace je podobná Gražskému cyklu. Do spalovací komory je nasáván čistý kyslík, který se zde smísí se zemním plynem a zapálí se. Hořením vzniká pouze vodní pára a oxid uhličitý. Směs expanduje v turbíně při konání práce. Poté je směs ochlazena v tepelném výměníku a je odstraněna přebytečná voda. Oxid uhličitý je následně stlačen v kompresoru, část je odebrána potrubím k dalšímu zpracování. Zbylá část pokračuje do tepelného výměníku, kde se ohřívá, a opět se vrací do spalovací komory. Poté se cyklus opakuje.

Cyklus má obdobné výhody a nevýhody, jaké byly zmíněny u Gražského cyklu. Dosahuje tedy velkých účinností a nulových emisí, ale potřebuje kvalitní palivo a čistý kyslík. Tento cyklus zatím prošel pouze testováním, reálná aplikace v elektrárně ještě není. Probíhá ale již celosvětově několik projektů na aplikaci tohoto cyklu.

5.7 Stoddardův cyklus

Stoddardův cyklus je uzavřený termodynamický cyklus, do kterého je teplo dodáváno z vnějších zdrojů. Jedná se o cyklus, který je podobný Stirlingovu cyklu. Médium během cyklu nekoná fázové přeměny. Obvyklým médiem je vzduch nebo další plyny. Cyklus má oproti Stirlingovu cyklu lepší uspořádání ventilů, co způsobuje jeho vyšší účinnost. Aplikaci má převážně u spalovacích motorů. [8]

5.8 Lorenzův cyklus

Lorenzův cyklus je velice podobný Carnotovu cyklu. Teplo je do něho také dodáváno z vnějších zdrojů. Průběh cyklu je velice podobný, skládá se ze dvou adiabát, místo dvou izoterm ale obsahuje děje, u kterých teplota není konstantní, ale narůstá, resp. klesá lineárně.

V energetice se používá obrácený Lorenzův cyklus, který je aplikován na chladicí zařízení a tepelná čerpadla. [6]

5.9 Shrnutí kapitoly

Obsahem této kapitoly byly cykly, pro které nebyly nalezeny žádné sjednocovací znaky, proto byla vytvořena tato kapitola. První byl rozebrán Paroplynový cyklus. Jedná se o kombinaci Braytonova (plynového) cyklu a Rankin Clausiova (parního) cyklu. Účinnost tohoto cyklu dosahuje hodnot kolem 60 %. Plynový cyklus se skládá z adiabatické komprese v kompresoru, izobarického hoření ve spalovací komoře, adiabatické expanze v turbíně a následného izobarického předání tepla parnímu cyklu a výfuku spalin, reprezentovaného izobarickým ochlazením. Parní cyklus sestává z adiabatické komprese v čerpadle, izobarického ohřevu v tepelném výměníku, kde látka přijímá teplo od plynového cyklu a postupně se ohřívá až na přehřátou páru, adiabatické expanze v turbíně a izobarického ochlazení v kondenzátoru. Při cyklu je využita velká teplota spalin na výstupu ze spalovací plynové turbíny, toto teplo je právě dodáváno Rankin Clausiově cyklu jako zdroj tepla pro ohřev. Užitečná je práce, kterou vytváří plynová a parní turbína a která je následně přeměněna na elektrickou energii. Cyklus se používá v paroplynové elektrárně. Hlavní výhodou je vysoká účinnost. Nevýhodou je použití poměrně kvalitního a dražšího paliva do spalovací turbíny.

Strlingův cyklus je teoretický cyklus, který dosahuje účinnosti Carnotova cyklu. Skládá se z izotermické expanze za dodávání tepla, izobarického ochlazení při regeneraci, izotermické komprese při odebrání tepla a izobarického ohřevu z regenerace. Využívá se obrácený pro chladicí zařízení a tepelná čerpadla a přímý zvláště pro solární elektrárny. Kalinův cyklus je obdobný Rankin Clausiově cyklu. Používá ale jiné médium a dosahuje vyšší účinnosti. Aplikaci nachází především u rekuperace odpadního tepla. Grázský cyklus je velice podobný Paroplynovému cyklu. Do spalovací turbíny je ale přiváděn čistý zemní plyn s kyslíkem. Cyklus dosahuje vyšší účinnosti a je velice ekologický. Goswamiho cyklus je kombinací Rankin Clausiova cyklu a Cyklu komprese par. Umožňuje vyrábět elektrickou energii a zároveň sloužit jako chladicí zařízení. Allam Fetvedtův cyklus je obdoba Grázského cyklu. Také dosahuje vysokých účinností při téměř nulových emisích. Stoddardův cyklus je účinnější modifikací Stirlingova cyklu a Lorenzův cyklus se v obráceném směru využívá u chladicích zařízení a tepelných čerpadel.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnovala termodynamickým cyklům využívaným v energetice. V první kapitole byl představen Carnotův cyklus. Jedná se o teoretický ideální vratný termodynamický cyklus. Definuje maximální možnou účinnost pro přímé cykly, resp. maximální chladicí a topný faktor v případě obráceného Carnotova cyklu. Ideální Carnotův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou adiabat. Dále byl uveden přehled dalších termodynamických cyklů, které se snaží co nejvíce přiblížit Carnotovu cyklu, a tyto cykly byly rozděleny do jednotlivých skupin podle jejich společných znaků.

Druhá kapitola se zabývala Rankin Clausiovým cyklem a cykly od něho odvozenými. Rankin Clausiův cyklus je teoretický uzavřený cyklus, do kterého je teplo přiváděno z vnějšku. Skládá se v ideálním tvaru ze dvou adiabat a dvou izobar. Hlavním užitekem je vzniklá práce, která roztáčí turbínu, a ta následně generuje elektrickou energii. Tento cyklus se nejčastěji používá jako sekundární okruh většiny elektráren. Organický Rankin Clausiův cyklus i Hygroskopický cyklus se liší od Rankin Clausiova cyklu převážně v použitém médiu. ORC používá organické látky, zejména chladiva a uhlovodíky, a Hygroskopický cyklus používá vodu s hygroskopickými sloučeninami, zejména solemi.

Třetí kapitola se týkala cyklů spalovacích turbín. Nejčastěji užívaným cyklem je Braytonův cyklus. Jedná se o otevřený cyklus s vnitřním spalováním. Hlavním užitekem je práce, která se převádí na generátor, a ten vytváří elektrickou energii. Cyklus se v praxi používá v plynových spalovacích turbínách, které dosahují velkých výkonů a účinností. Humphreyho cyklus je obdobný Braytonovu, pouze využívá upravenou spalovací komoru s ventilem, který zajišťuje spalování za konstantního objemu. Ericssonův cyklus se skládá ze dvou izoterm a dvou adiabat. Teoreticky dosahuje obrovských účinností, ale v praxi není realizovatelný.

Čtvrtá kapitola se věnovala cyklům chladicích zařízení a tepelných čerpadel. Cyklus chladicího zařízení a tepelného čerpadla je stejný, záleží pouze na tom, které teplo je pro danou aplikaci užitečné, zda teplo odebírané prostoru, nebo teplo dodávané prostoru. Cyklus komprese par je nejpoužívanějším cyklem. Jedná se o nepřímý cyklus, který nekoná práci, ale naopak ji spotřebovává, a díky tomu ochlazuje, popř. vytápí daný prostor. Cyklus se skládá z dvou izobar, jedné adiabaty a jedné izoentalpy. Může být použit např. v lednici, klimatizačním zařízení nebo tepelném čerpadle pro vytápění domu. Cyklus absorpce par je obdobný, pouze používá místo kompresoru absorpční mechanismus, který využívá absorpci chladiva (např. amoniaku) v přenosovém médiu (např. voda). Lindeho cyklus se využívá ke zkapalňování plynů. Siemensův cyklus je mu velice podobný. Bell Colemanův cyklus je obrácený Braytonův cyklus. Často se využívá u chlazení v letadlech. Vuilleumierův cyklus je možné použít pro tepelné čerpadlo, chladicí zařízení i zkapalňování plynů.

Obsahem páté a poslední kapitoly byly cykly, pro které nebyly nalezeny žádné sjednocovací znaky, byly tedy označeny jako ostatní. První byl rozebrán Paroplynový cyklus. Jedná se o kombinaci Braytonova (plynového) cyklu a Rankin Clausiova (parního) cyklu. Účinnost tohoto cyklu dosahuje hodnot kolem 60 %. Při cyklu je využita velká teplota spalin na výstupu z plynového cyklu, toto teplo je právě dodáváno do parního cyklu jako zdroj tepla. Užitečná je práce, kterou vytváří obě turbíny. Cyklus se používá v paroplynové elektrárně. Strilingův cyklus je teoretický cyklus, který dosahuje účinnosti Carnotova cyklu. Využívá se zvláště pro solární elektrárny. Kalinův cyklus je obdobný Rankin Clausiovu cyklu, používá ale jiné médium a dosahuje vyšší účinnosti. Aplikaci nachází především u rekuperace odpadního tepla. Grázský cyklus se podobá Paroplynovému cyklu, dosahuje ale vyšší účinnosti a je více ekologický. Goswamiho cyklus umožňuje vyrábět elektrickou energii a zároveň sloužit jako chladicí zařízení. Allam Fetvedtův cyklus je obdoba Grázského cyklu. Také dosahuje vysokých účinností při téměř nulových emisích. Stoddardův cyklus je účinnější modifikací Stirlingova cyklu a Lorenzův cyklus se v obráceném směru využívá u chladicích zařízení a tepelných čerpadel.

V celé bakalářské práci byla uvedena naprostá většina termodynamických cyklů, které jsou používané v energetice. Zajisté existují i cykly, které zde zachyceny nebyly, neboť je častým jevem, že má ten samý cyklus více názvů. Byl ale kladen důraz na to, aby zde byly zachyceny ty nejdůležitější, a také co největší počet těch méně známých. Bakalářská práce mně výrazně rozšířila povědomí o termodynamických cyklech. Informace o některých základních a často užívaných mi již byly předány během předchozího studia. Tato práce mi o nich ještě mnohem více rozšířila znalosti, ale především mně dala informace o pro mě dříve neznámých cyklech. Navíc mi bude sloužit jako výborný zdroj informací při mém dalším studiu energetiky. Cíle bakalářské práce se podařilo naplnit v plném rozsahu. Byly zmíněny obvyklé i méně známé termodynamické cykly, včetně jejich výhod a omezení, a důraz byl kladen i na aplikaci daných cyklů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [2] CENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. McGraw-Hill series in mechanical engineering. ISBN 978-0-07-352921-9.
- [3] Carnot cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle
- [4] Nicolas Léonard Sadi Carnot. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot
- [5] ŠTĚTINA, Josef. Tepelné cykly. *Termomechanika online: Termomechanika 6TT* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://docs.google.com/presentation/d/1IMZSIEJwCiMgnM8zSVagJq6wctGzjwyHysk_vVduCW0/edit#slide=id.p1
- [6] MARTINEZ, Isidoro. Thermal machines and heat engines. *Isidoro Martinez* [online]. Madrid: Ciudad Universitaria, 1995 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c17/Power.pdf>
- [7] Thermodynamic cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_cycle
- [8] Energy Conversion and Heat Engines (With a little bit of Thermodynamics). *Electropaedia* [online]. Chester: Woodbank Communications, 2005 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://www.mpoweruk.com/heat_engines.htm
- [9] Rankine cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle
- [10] Rudolf Clausius. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius
- [11] William John Macquorn Rankine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/William_John_Macquorn_Rankine
- [12] ŠTĚTINA, Josef. Oběhy parních zařízení. *Termomechanika online: Termomechanika 6TT* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://docs.google.com/presentation/d/1QtBI8pcpgRV6AeTjVXdyeYe0AZstymoigmx_Weyx4So/edit#slide=id.p1
- [13] KLIMEŠ, Lubomír. Rankinův cyklus a výroba elektrické energie. *6TT Termomechanika: 0AT Seminář aplikované termomechaniky* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://docs.google.com/presentation/d/1omYPabDenhoje2IYiXjfRrHNgsUPf_BSDfLFCrMvctw/edit#slide=id.p1

- [14] Vzduchem chlazené kondenzátory (ACC) a vzduchové chladiče (AC). *FANS, a.s.* [online]. Praha: FANS, a.s., 2016 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [https://www.fansct.com/cz/vzduchem-chlazene-kondenzatory-\(acc\)-a-vzduchove-chladice-\(ac\)/](https://www.fansct.com/cz/vzduchem-chlazene-kondenzatory-(acc)-a-vzduchove-chladice-(ac)/)
- [15] PALAMWAR, Anil. 01 regenerative feed heating. *Slideshare* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/anilpalamwar/01-regenerative-feed-heating>
- [16] Organic Rankine Cycle – ORC: What is Organic Rankine Cycle?. *Ormat Technologies Inc.: unparalleled renewable energy expertise* [online]. Reno: Ormat, 2019 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.ormat.com/en/company/news/view/?ContentId=8819>
- [17] Organic Rankine cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle
- [18] RUBIO, Francisco Javier. The Hygroscopic cycle for CSP. *Renewable Energy Focus* [online]. Elsevier, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/32641/the-hygroscopic-cycle-for-csp/>
- [19] Hygroscopic Cycle. *Hygroscopic Cycle* [online]. Iberg, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.hygroscopiccycle.com/>
- [20] Brayton cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Brayton_cycle
- [21] ŠTĚTINA, Josef. Spalovací turbíny. *Termomechanika online: Termomechanika 6TT* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1U9xFUXeVwMdpQy00H9KECZEMGt1C6EzyUsy6HeaeT6U/edit#slide=id.p1>
- [22] Projekt 3: Braytonův cyklus plynové turbíny. *6TT Termomechanika* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/0B_K6h3Imr4fXQWJ6MklQWUplNGs/view
- [23] SGT5-9000HL. *Siemens Energy* [online]. Siemens Energy, 2020 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt5-9000hl.html>
- [24] KLIMEŠ, Lubomír. Termodynamické cykly. *6TT Termomechanika: 0AT Seminář aplikované termomechaniky* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://docs.google.com/presentation/d/1twr_rkbr5rdbAP0mcGVlyespwWg6vHcs0Cb2l_pv-gU/edit#slide=id.p1
- [25] ZEMAN, Radek. Braytonův cyklus. *OnlineSchool.cz* [online]. Radek Zeman, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/termomechanika/braytonuv-cyklus/>
- [26] GREER, Carmel. Chapter 8 Gas Power Cycles. *SlidePlayer* [online]. SlidePlayer.com Inc, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/6413216/>
- [27] Thermodynamic Ericsson Cycle - Gas a Working Fluid. *Bright Hub Engineering* [online]. Bright Hub PM, 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/thermodynamics/4083-the-ericsson-or-brayton-cycle-in-thermodynamics/>

- [28] ŠTĚTINA, Josef. Oběhy chladicích zařízení. Termomechanika online: Termomechanika 6TT [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://docs.google.com/presentation/d/1AcQKx_bWPyZq7fpjFp9Q3QjbEqpkj-VyCSTxW2vDrs4/edit#slide=id.p1
- [29] KLIMEŠ, Lubomír. Nepřímé cykly chladicích zařízení a tepelných čerpadel. 6TT Termomechanika: 0AT Seminář aplikované termomechaniky [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1kGxxBECHa2dUXgnB4Dggkx2HYFjjobnqq5rf7FOoYac8/edit#slide=id.p1>
- [30] Tepelná čerpadla voda/voda - podzemní voda. Solarenavi [online]. Třeboň: SOLAR ENVI a.s., 2014 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.solarenavi.cz/a-48-tepelna-cerpadla-voda-voda-podzemni-voda.html>
- [31] Advantages and Disadvantages of Vapor Compression Refrigeration Cycle over Air Refrigeration System. Mecholic [online]. Mecholic, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.mecholic.com/2017/09/advantages-vapor-compression-refrigeration.html>
- [32] Technical Information. Kryolab [online]. Lund: Lunds Universitet, 2014 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: http://kryolab.fysik.lu.se/dokument/e_techn.html
- [33] XIE, Yingbai a Xuejie SUN. Thermodynamic Analysis of a Waste Heat Driven Vuilleumier Cycle Heat Pump. MDPI [online]. Basel: MDPI, 1996 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1099-4300/17/3/1452/htm>
- [34] VOBOŘIL, David. Paroplynová elektrárna – princip funkce. OEnergetice.cz [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/paroplynova-elektrarna-princip-funkce>
- [35] CUTISHTANU, Aron. Combined cycle power station. Pinterest [online]. Pinterest, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.pinterest.com/acutishtanu/combined-cycle-power-station/>
- [36] O paroplynové energetice. Skupina ČEZ [online]. Praha: ČEZ, a. s., 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/paroplynové-a-plynové-zdroje/informace-o-paroplynové-energetice>
- [37] Stirling engine - History. Stirling engine [online]. Stirlingshop.com [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <http://stirlingshop.com/html/history.html>
- [38] Stirling engine - Applications. Stirling engine [online]. Stirlingshop.com [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: http://stirlingshop.com/html/applications_.html
- [39] Technology. Kalina: Electricity from heat [online]. Hawthorn: Kalina, 2015 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <http://www.kalinapower.com/technology/>
- [40] SANZ, Wolfgang. Graz Cycle – A Zero Emission Power Plant for CCS (Carbon Capture and Storage). Graz Cycle [online]. Graz: Graz University of Technology, 2016 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <http://www.graz-cycle.tugraz.at/>
- [41] GOSWAMI, Yogi. Thermodynamic Cycles for CSP. Indian Institute of Technology Jodhpur [online]. Jodhpur: IIT Jodhpur, 2019 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://iitj.ac.in/CSP/material/19dec/thermodynamic.pdf>
- [42] The Allam-Fetvedt Cycle. NET Power [online]. NET Power, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://netpower.com/technology/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
T	Termodynamická teplota	K
T_H	Nejvyšší termodynamická teplota v cyklu (horká)	K
T_C	Nejnižší termodynamická teplota v cyklu (chladná)	K
q	Měrné teplo	$J \cdot kg^{-1}$
q_H	Měrné teplo o vyšší teplotě (horké)	$J \cdot kg^{-1}$
q_C	Měrné teplo o nižší teplotě (chladné)	$J \cdot kg^{-1}$
q_G	Měrné teplo dodávané do generátoru	$J \cdot kg^{-1}$
q_{CH}	Měrné teplo odebírané chladicí vodou	$J \cdot kg^{-1}$
a	Měrná práce	$J \cdot kg^{-1}$
a_0	Měrná práce cyklu	$J \cdot kg^{-1}$
$a_{NČ}$	Měrná práce napájecího čerpadla	$J \cdot kg^{-1}$
a_T	Měrná práce turbíny	$J \cdot kg^{-1}$
a_K	Měrná práce kompresoru	$J \cdot kg^{-1}$
$a_{Č}$	Měrná práce čerpadla	$J \cdot kg^{-1}$
p	Tlak	Pa
v	Měrný objem	$m^3 \cdot kg^{-1}$
s	Měrná entropie	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
h	Měrná entalpie	$J \cdot kg^{-1}$
r	Měrná plynová konstanta	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_p	Měrná tepelná kapacita při přenosu tepla za konstantního tlaku	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_v	Měrná tepelná kapacita při přenosu tepla za konstantního objemu	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
x	Poměrná suchost páry	—
η_t	Termická účinnost	— (%)
ε_C	Chladicí faktor	—
COP_C	Chladicí faktor (Coefficient of Performance)	—
ε_H	Topný faktor	—
COP_H	Topný faktor (Coefficient of Performance)	—
Kr	Kritický bod	
ORC	Organický Rankin Clausiův cyklus	

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1: p-v diagram Carnotova cyklu, upraveno dle [5].
Obr. 1.2: T-s diagram Carnotova cyklu, upraveno dle [5].
Obr. 1.3: Realizace Carnotova cyklu, upraveno dle [5].
Obr. 1.4: p-v diagram obráceného Carnotova cyklu, upraveno dle [5].
Obr. 1.5: T-s diagram obráceného Carnotova cyklu, upraveno dle [5].
Obr. 2.1: p-v, T-s a h-s diagram Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].
Obr. 2.2: Schéma Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].
Obr. 2.3: Schéma jaderné elektrárny, upraveno dle [13].
Obr. 2.4: Schéma solární elektrárny, upraveno dle [13].
Obr. 2.5: Schéma tepelné elektrárny, upraveno dle [13].
Obr. 2.6: Schéma geotermální elektrárny, upraveno dle [13].
Obr. 2.7: Vzduchem chlazený kondenzátor [13].
Obr. 2.8: Schéma vzduchem chlazeného kondenzátoru, upraveno dle [14].
Obr. 2.9: p-v, T-s a h-s diagram Rankin Clausiova cyklu s přehřevem páry, upraveno dle [12].
Obr. 2.10: Schéma Rankin Clausiova cyklu s přehřevem páry, upraveno dle [12].
Obr. 2.11: p-v, T-s a h-s diagram Rankin Clausiova cyklu s přehřevem a znovupřehřevem páry, upraveno dle [12].
Obr. 2.12: Schéma Rankin Clausiova cyklu s přehřevem a znovupřehřevem páry, upraveno dle [12].
Obr. 2.13: T-s diagram superkritického Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].
Obr. 2.14: T-s diagram reálného Rankin Clausiova cyklu, upraveno dle [12].
Obr. 3.1: p-v a T-s diagram Braytonova cyklu, upraveno dle [21].
Obr. 3.2: Schéma Braytonova cyklu [22].
Obr. 3.3: Plynová spalovací turbína – popis, upraveno dle [24].
Obr. 3.4: Plynová spalovací turbína SGT5-9000HL – pohled na přední část [23].
Obr. 3.5: Plynová spalovací turbína SGT5-9000HL – pohled na zadní část [23].
Obr. 3.6: T-s diagram modifikovaného Braytonova cyklu, upraveno dle [21].
Obr. 3.7: Schéma modifikovaného Braytonova cyklu [21].
Obr. 3.8: Reálný Braytonův cyklus, upraveno dle [26].
Obr. 3.9: p-v a T-s diagram Humphreyho cyklu, upraveno dle [21].
Obr. 3.10: Schéma spalovací komory Humphreyho cyklu [21].
Obr. 3.11: p-v a T-s diagram Ericssonova cyklu, upraveno dle [24].
Obr. 3.12: Schéma Ericssonova cyklu, upraveno dle [24].
Obr. 4.1: T-s diagram Cyklu komprese par, upraveno dle [28].
Obr. 4.2: Schéma Cyklu komprese par, upraveno dle [28].
Obr. 4.3: Lednice s naznačeným cyklem, upraveno dle [28].
Obr. 4.4: Klimatizační zařízení, upraveno dle [28].
Obr. 4.5: Systém tepelného čerpadla [30].
Obr. 4.6: Cyklus kombinovaného zařízení pro vytápění i chlazení, upraveno dle [28].
Obr. 4.7: Reálný Cyklus komprese par, upraveno dle [29].
Obr. 4.8: Schéma Cyklu absorpce par, upraveno dle [28].
Obr. 4.9: T-s diagram Lindeho cyklu [29].
Obr. 4.10: Schéma Lindeho cyklu, upraveno dle [29].
Obr. 4.11: T-s diagram Bell Colemanova cyklu, upraveno dle [29].
Obr. 4.12: Schéma Bell Colemanova cyklu, upraveno dle [29].
Obr. 5.1: T-s diagram Paroplynového cyklu, upraveno dle [13].

- Obr. 5.2: Schéma Paroplynového cyklu, upraveno dle [13].
- Obr. 5.3: Schéma paroplynové elektrárny, upraveno dle [35].
- Obr. 5.4: Paroplynová elektrárna, upraveno dle [12].
- Obr. 5.5: p-v a T-s diagram Stirlingova cyklu, upraveno dle [24].
- Obr. 5.6: Schéma teoretického provedení Stirlingova cyklu, upraveno dle [24].
- Obr. 5.7: Solární elektrárna - koncentrátor s přijímačem uprostřed [24].
- Obr. 5.8: Solární elektrárna – heliostaty s věží uprostřed [24].
- Obr. 5.9: Schéma Graského cyklu, upraveno dle [40].