

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF

EXPANZNÍ TURBÍNA

EXPANSION TURBINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Miloslav Hlavinka

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Miloslav Hlavinka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Expanzní turbína

v anglickém jazyce:

Expansion Turbine

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popište použití expanzní turbíny pro redukci tlaku zemního plynu v paroplynové elektrárně

Cíle bakalářské práce:

- obecný popis paroplynového cyklu
- expanzní turbína a její použití v PPC
- konkrétní návrh expanzní turbíny
- ekonomické zhodnocení použití turbíny

Seznam odborné literatury:

Firemní literatura

Janotková, E.: Termomechanika, skripta VUT 2005

Fiedler, J.: Parní turbíny, návrh a výpočet, Akad. nakladatelství CERM, 2005

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 17.10.2011



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Obsahem bakalářské práce je rozebrání problému expanzní turbíny a její využití v paroplynovém cyklu. V úvodní části práce jsou popsány jednotlivé části cyklů, z nichž se paroplynový cyklus skládá, a to Brayton cyklus a Rankine-Clausius cyklus. Následně je popsán paroplynový cyklus. Dále je součástí práce stručný popis zemního plynu, jak se k nám dostává. Je zde popsána konvenční redukční stanice jak na redukcí tlaku zemního plynu, tak i technologické páry.

Hlavní částí práce je popis expanzní turbíny, rozdělení turbín, účinnost a popis parní i plynové expanzní turbíny. Je zde popsána paroplynová teplárna Červený Mlýn a součástí provozu. V ekonomickém zhodnocení je na příkladu ukázáno nahrazení konvenční redukční stanice v teplárně Červený Mlýn redukční stanicí s expanzní turbínou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Brayton cyklus, Rankine-Clausius cyklus, paroplynový cyklus, zemní plyn, konvenční redukční stanice, expanzní turbína, paroplynová teplárna

ABSTRACT

The content of this bachelor thesis is the analysis of a problem of expansion turbines and their usage in the gas-steam cycle. In the first part the respective parts of the combined cycle are described, Brayton cycle and Rankine-Clausius cycle. The gas-steam cycle is described subsequently. In the second part the natural gas is briefly described and how it gets to us. There is described the conventional natural gas reduction station and the conventional process steam reduction station.

The main part is a description of the expansion turbine, division of turbines, calculation of efficiency and a description of steam and natural gas expansion turbine. Then there is a description of the steam-gas heating plant Červený mlýn and its parts. As an example of the economic evaluation the replacement of conventional reduction station at heating plant Červený mlýn by expansion turbine is shown.

KEY WORDS

Brayton cycle, Rankine-Clausius cycle, combined cycle, natural gas, conventional reduction stations, expansion turbine, steam-gas heating plant

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLAVINKA, Miloslav. *Expanzní turbína*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce

V Brně dne 20. 5. 2012

Miloslav Hlavinka

Obsah

ÚVOD	13
1. Plynový cyklus	14
1.1. Brayton cyklus]	14
1.2. Regenerace tepla	15
2. Parní cyklus	15
2.1. Rozdělení parních turbín	16
2.1.1. Protitlaková turbína	16
2.1.2. Kondenzační turbína	16
2.1.3. Turbína s odběrem páry	16
2.2. Regenerace tepla	17
3. Paroplynový cyklus	17
3.1. Pracovní látky	17
3.2. Uspořádání prvku v paroplynovém zařízení	18
3.3. Vícetlakový tepelný oběh parní turbíny	18
3.4. Využití	18
3.5. Účinnost	19
4. Zemní plyn	20
5. Konvenční redukční stanice	21
5.1. Redukce zemního plynu	22
5.2. Redukce technologické páry	22
6. Expanzní turbína	22
6.1. Rozdělení expanzních turbín	23
6.1.1. Rovnotlaká turbína	23
6.1.2. Přetlaková turbína	23
6.2. Účinnost expanzních turbín	24
6.3. Parní expanzí turbína	24
6.4. Plynová expanzní turbína	25
6.5. Údržba	26
7. Paroplynový cyklus v praxi	26
7.1. Zařízení	26
7.1.1. Plynová turbína V64.3A	27
7.1.2. Výměňková stanice	28
7.1.3. Spalinový kotel	28
7.1.4. Protitlaková parní turbína GE40	29
7.1.5. Rozvodna 110kV	30
7.1.6. By-pasový komín a emise	31
7.1.7. Akumulátor tepla	31
7.1.8. Horkovodní kotle	32
7.2. Paliva	32
7.2.1. Zemní plyn	32

7.2.2. Lehké topné oleje.....	32
8. Ekonomické zhodnocení.....	32
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	40
SEZNAM TABULEK.....	40

ÚVOD

V současné době roste poptávka po elektrické energii a je velice pravděpodobné, že bude dále růst i v budoucnu. Na druhé straně je snaha snížit negativní vliv na životní prostředí. Snahou je také snížit i náklady na její výrobu. V dnešní době se kromě jaderné a „ekologické“ energie stále používají fosilní paliva. Jednou z možností, jak dosáhnout nižších emisí i nákladů, je využití paroplynového cyklu. Až se snahou o ekologizaci energetiky v 80. letech minulého století zaznamenává použití paroplynových zařízení prudký nárůst. Během posledních let vzrostlo použití o několik set nových paroplynových zařízení. Paroplynový cyklus dosahuje velké účinnosti oproti konvenčním parním a plyným oběhům. Další výhodou je i jednoduchá přestavba z konvenčního zařízení na paroplynový cyklus. Takováto přestavba se odehrála i v Brně na teplárně Červený mlýn, kde se z uhelné výtopny stal moderní paroplynový kogenerační zdroj vyrábějící teplo i elektrickou energii. V poslední době začínáme pociťovat díky fotovoltaickým elektrárnám i další výhodu paroplynového zařízení, a to je velice rychlý náběh na maximální výkon, což nám umožní pokrýt mrak, který zastíní fotovoltaické pole. To je jeden z důvodů, proč započala i výstavba nové paroplynové elektrárny v Počeradech.

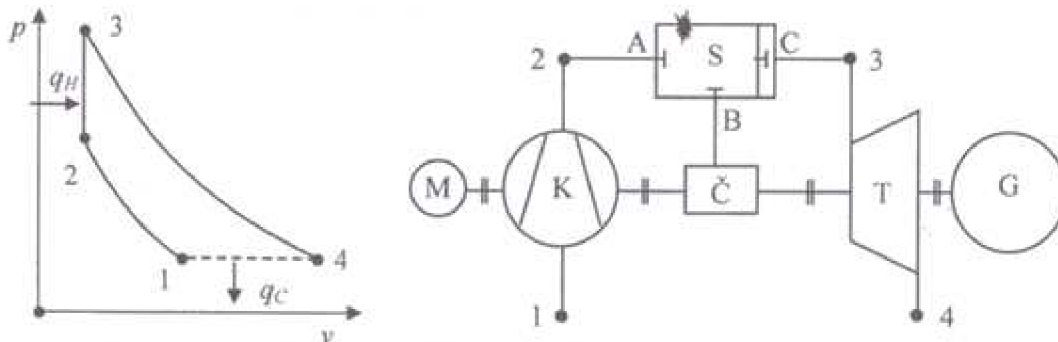
Další možností, jak snížit náklady a minimalizovat negativní vliv na životní prostředí, je nahrazení konvenčních redukčních stanic expanzními turbínami. Zemní plyn se k nám dostává síti vysokotlakého potrubí. V místě spotřeby nebo při přechodu do nízkotlakého potrubí se musí tlak redukovat. Tato redukce se obvykle provádí soustavou škrtec ventilů. Zde probíhá expanze, ale bez vyprodukovaní práce. Plyn se ochladí a musí se ohřívat, aby se zajistilo, že se v něm nebude nacházet žádná jiná fáze než plynná. Když se místo škrtec ventilů použije expanzní turbína, která pohání generátor, tak se energie uchovaná ve vysokotlakém plynu či páře může použít k vytvoření elektrické energie. Toto řešení nám sníží náklady na provoz takového zařízení, což se v dnešní době začíná čím dál tím častěji uplatňovat.

Důležitou částí této práce je popsat jednotlivé cykly, Brayton cyklus, Rankine-Clausius cyklus a možnosti zvýšení účinnosti regenerací tepla. Dále je zde popsán paroplynový cyklus. V ekonomickém zhodnocení je na ukázce zjednodušeně vypočítána návratnost investice do plynové expanzní turbíny.

1. Plynový cyklus

[1], [10]

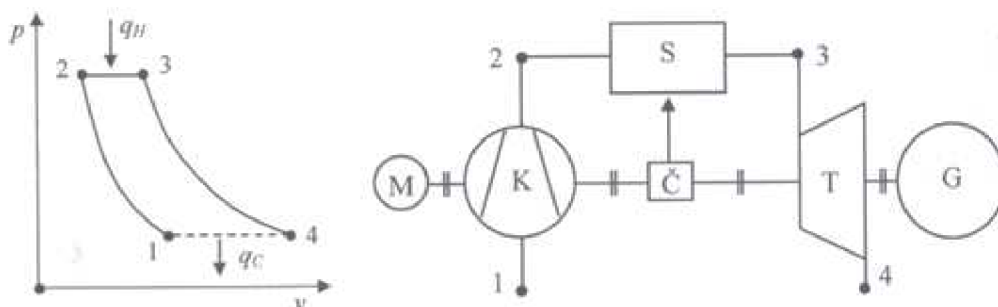
V plynovém cyklu se používá buď Brayton nebo Humphrey cyklus. Brayton cyklus je spalování za stálého tlaku, zatímco Humphrey cyklus je spalování za konstantního objemu. Ve většině zařízení se využívá Brayton cyklus.



Obr. 1 Humphrey cyklus, schéma zařízení a zobrazení cyklu v diagramu

1.1. Brayton cyklus

[1], [2],[6],[10]



Obr. 2 Brayton cyklus, schéma zařízení a zobrazení cyklu v diagramu

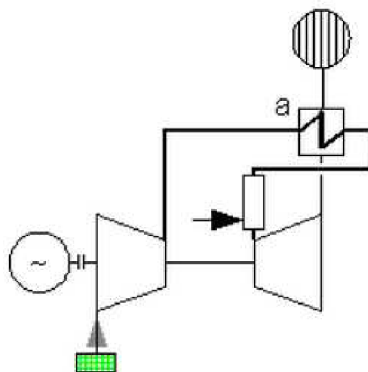
V Brayton cyklu se nasátý vzduch stlačí v axiálním turbokompresoru. Následně je stlačený vzduch přiváděn do spalovací komory. Ve spalovací komoře dochází k hoření paliva, které je dodáváno kontinuálně palivovým čerpadlem. Spaliny poté expandují v turbíně. Po expanzi jsou odvedeny do komína. Pokud jsou dostatečně teplé, mohou se dále využít na předehřev vzduchu. Jako palivo se nejčastěji používá zemní plyn. V poslední době se začíná používat plyn z bioplynových stanic a také plyn získaný zplyňováním uhlí.

Plynové turbíny mají rychlý start, díky tomu jsou vhodné k pokrytí odběrových špiček, ale přesto se u nás jako samostatné celky v podstatě nevyskytují. Důvodem je vysoká cena paliva.

1.2. Regenerace tepla

[6]

Regenerace tepla je možnost jak zvýšit tepelnou účinnost Brayton cyklu. Využije se teplo spalin na předehřev plynu proudícího z kompresoru. Použitím regenerace tepla se může zvýšit tepelná účinnost turbíny na zemní plyn až na 40%.

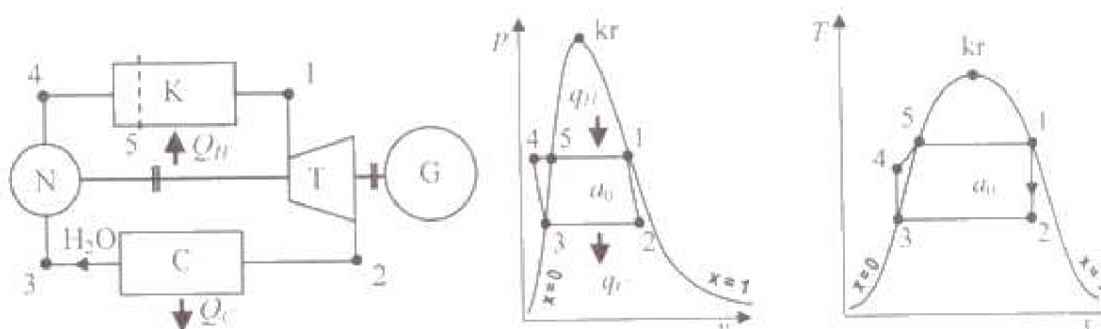


Obr. 3 Schéma spalovací turbíny s výměníkem spaliny - vzduch pro regeneraci tepla

2. Parní cyklus

[1], [4], [5], [7], [10], [11], [12]

V energetice je nejčastěji používán Rankine-Clausius oběh. Pracovní látkou v tomto oběhu je obvykle chemicky upravená voda. Oběh je uskutečňován v několika zařízeních.



Obr. 4 Rankine-Clausius cyklus, schéma zařízení a zobrazení cyklu v diagramech

Pomocí napájecího turbočerpadla se zvýší tlak vody. Jelikož je voda v podstatě nestlačitelná, tak rozdíl mezi tlakem původním p_1 a tlakem po stlačení p_2 je minimální. A proto je i práce turbočerpadla velmi malá vzhledem ke zbytku oběhu.

Takto stlačená voda se vžene do parního kotle, kde dochází ke spalování fosilních paliv. Parní kotel má dvě části. V první části se kapalina ohřívá na mez sytosti. V další části kotle dochází k varu a následně vroucí kapalina přechází do syté páry.

Poté je přehřátá pára přivedena potrubím do parní turbíny, kde expanduje.

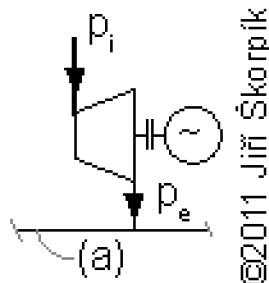
Z turbíny pára putuje do kondenzátoru. Zde proběhne změna skupenství. Pára zde kondenzuje na vodu, čímž se dostáváme zpět na začátek oběhu. Aby pára zkondenzovala, musí být teplo odebráno pomocí teplosměnných ploch, ve kterých proudí chladicí voda. Tato voda buď dále slouží k vytápění, nebo se odvádí do chladících věží.

2.1. Rozdělení parních turbín

2.1.1. Protitlaková turbína

[6]

Jak název sám vypovídá za turbínou se nachází kondenzátor s vysokým tlakem (většinou větším než 0,1 MPa) nebo parovod. Tento způsob se obvykle používá v teplárenství.

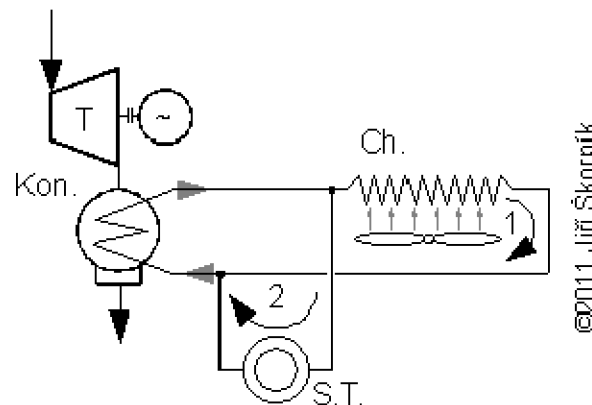


Obr. 5 Schéma protitlakové turbíny

2.1.2. Kondenzační turbína

[6]

Zde po parní turbíně následuje kondenzátor. Kondenzátor je tlaková nádoba, ve které pára vycházející z parní turbíny kondenzuje na kapalinu. V kondenzátoru bývá obvykle podtlak, někdy až 0,002 MPa, aby došlo ke snížení teploty kondenzace (u vody 15 °C). Někdy se říká, že pára expanduje do vakua. Turbína může pracovat i v režimu potlačené kondenzace, kdy je teplota kondenzace mnohem vyšší. Toto se používá často v teplárnách, kde se teplo používá k vytápění.



Obr. 6 Schéma kondenzační turbíny

2.1.3. Turbína s odběrem páry

[6]

V této turbíně se odebírá část páry před posledním stupněm turbíny. Tyto odběry se mohou nacházet po celé délce turbíny. Takovýto odběr může být buď regulovaný, nebo neregulovaný. U turbíny s regulovaným odběrem se reguluje množství odebrané páry regulačním ventilem. Regulační ventil může být součástí turbíny, nebo se může nacházet mimo turbínu. Turbína s regulovaným množstvím odebrané páry se využívá v teplárenství k zásobování parovodu parou o vyšších parametrech, než jaké jsou na výstupu z turbíny. Turbína s neregulovaným odběrem se používá v energetice, kde se využívá odebraná pára k regeneraci tepla.



Obr. 7 Schéma turbín s jedním regulovaným odběrem (vlevo) a s jedním neregulovaným odběrem (vpravo)

2.2. Regenerace tepla

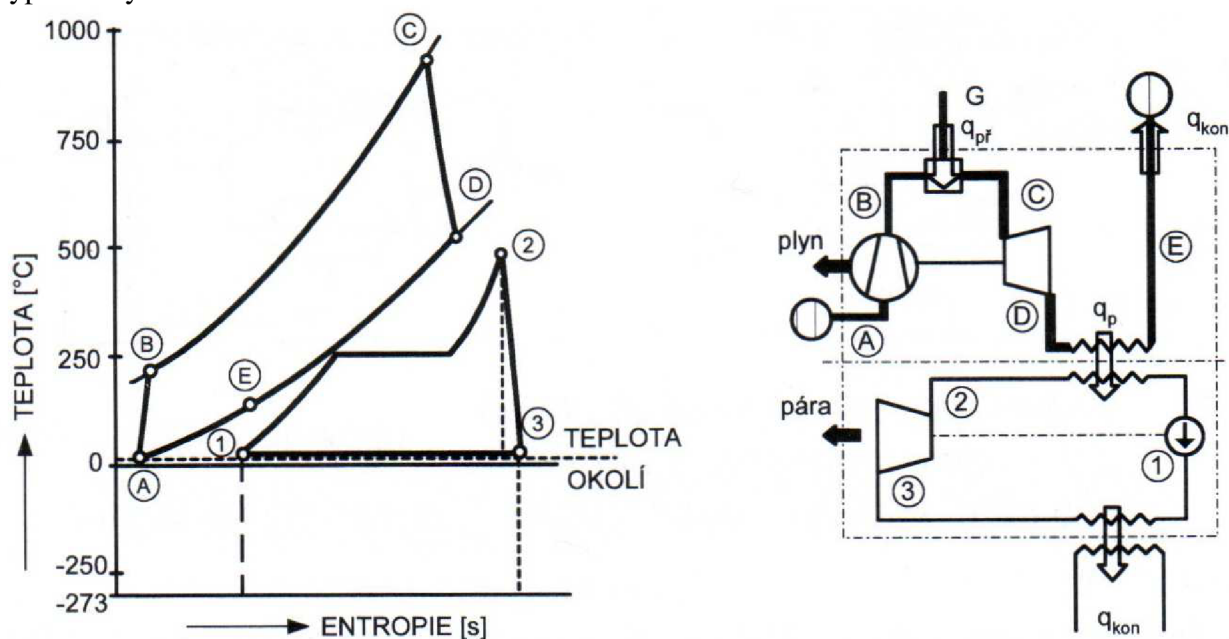
[6]

Zvyšuje tepelnou účinnost Rankine-Clausius cyklu. V tomto procesu se část páry odebere z turbíny a použije se na předehřátí napájecí vody.

3. Paroptynový cyklus

[13], [14], [15], [16], [17], [18], [28], [19]

Je to kombinace Rankine-Clausius cyklu s Brayton cyklem. Je vhodný na výrobu tepla a elektrické energie. Spojení parní a plynové turbíny je provedeno pomocí parogenerátoru. Parogenerátor se nachází za výfukem horkých spalin z plynové turbíny. Díky spalinám se nemusí voda přeměňovat na páru v kotli, jak je tomu u samostatné parní turbíny, a tak má paroptynový oběh velkou termickou účinnost. Také se sníží množství škodlivin vypouštěných do ovzduší.



Obr. 8 Paroptynový cyklus, diagram a schéma

3.1. Pracovní látky

[15]

V oběhu tepelné turbíny jsou pracovní látkou vzduch, proudící do kompresoru, palivo a vzduch ve spalovací komoře turbíny, spaliny ve spalovací turbíně a v parogenerátoru. V oběhu parní turbíny jsou pracovní látkou voda a vodní pára vytvořená v parogenerátoru.

3.2. Uspořádání prvku v paroplynovém zařízení [15]

Vzduch je nasáván do kompresoru, kde se stlačí na požadovaný tlak. Poté je stlačený vzduch vehnán do spalovací komory. Ve spalovací komoře se stlačený vzduch smísí s palivem a zažehne se. Takto vzniklé spaliny prochází skrz turbínu. V turbíně roztáčí hřídel, která může být napojena na převodovku a poté je napojena na elektrický generátor. Spaliny pak následně putují do parogenerátoru, kde se výjimečně používá dodatečného spalování. Následně jsou spaliny vypouštěny skrz sady filtru v komínu do ovzduší. V parogenerátoru vzniká pára pro pohon parní turbíny. Parní turbína roztáčí generátor elektrického proudu. Pára, po průchodu parní turbínou, je odvedena do kondenzátoru. V kondenzátoru je teplo vodní páry odevzdáno chladicí vodě, která skončí v chladících věžích. Zkapalněná vodní pára se znovu použije v parogenerátoru. Tento cyklus je uzavřený.

Paroplynový cyklus může fungovat i pouze jako plynný cyklus. Při spouštění proplyněného zařízení se nejprve musí rozběhnout plynná část cyklu a až při dostatečném množství horkých spalin se může připojit parní cyklus.

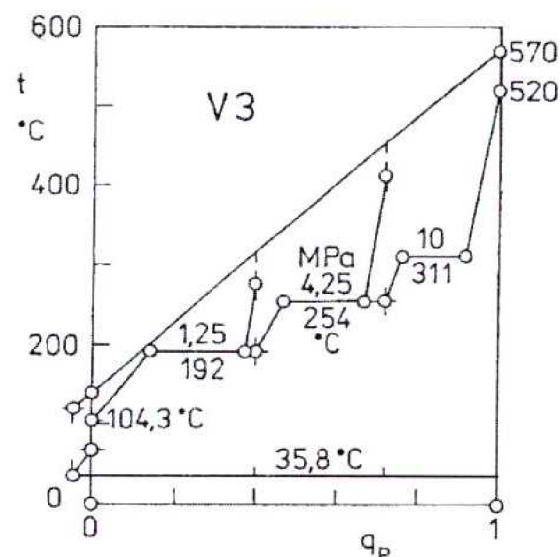
3.3. Vícetlakový tepelný oběh parní turbíny [15]

Abychom mohli zvýšit tepelnou účinnost paroplynového zařízení, tak musíme snížit střední teplotní rozdíl Δt_s mezi teplotou spalin t_{sp} a teplotou mokré páry t_p . Teplota spalin musí zůstat zachována.

$$\Delta t_s = \int_0^1 (t_{sp} - t_p) dq_p$$

K tomu, abychom toho dosáhli, slouží vícetlakové parní generátory a parní turbíny. Ohřátí vody o nižším tlaku a o vyšším tlaku probíhá ve stejném teplotním rozsahu spalin. Expanze páry probíhá ve vícetlakové turbíně.

Například při řazení teplosměnných ploch V3, pára nejprve expanduje z tlaku 10 MPa a teploty 520 °C na tlak 4,25 MPa. Poté se přivede přehřátá pára z parogenerátoru a smísí se s párou v parní turbíně. Dále pára expanduje znovu na nižší tlak, a to na 1,25 MPa, kde se znovu přivede přehřátá pára z parogenerátoru. Takovéto vícetlakové turbíny jsou dražší než jednotlakové turbíny, zato jsou zde ale úspory paliva, díky vyšší termické účinnosti. Tato úspora se projeví hlavně u velkých výkonů, kde i malé zvýšení tepelné účinnosti přináší velké úspory.



Obr. 9 Diagram třístupňové komprese

3.4. Využití

[14], [15], [16], [18]

S rozvojem proudových motorů v letectví během 30. let minulého století se začíná uvažovat o jejich využití v energetice. Pro energetiku ale měly význam spalovací turbíny až od vyššího výkonu. Až se snahou o ekologizaci energetiky v 80. letech minulého století zaznamenává použití paroplynových zařízení prudký nárůst. Nejvíce paroplynových zařízení

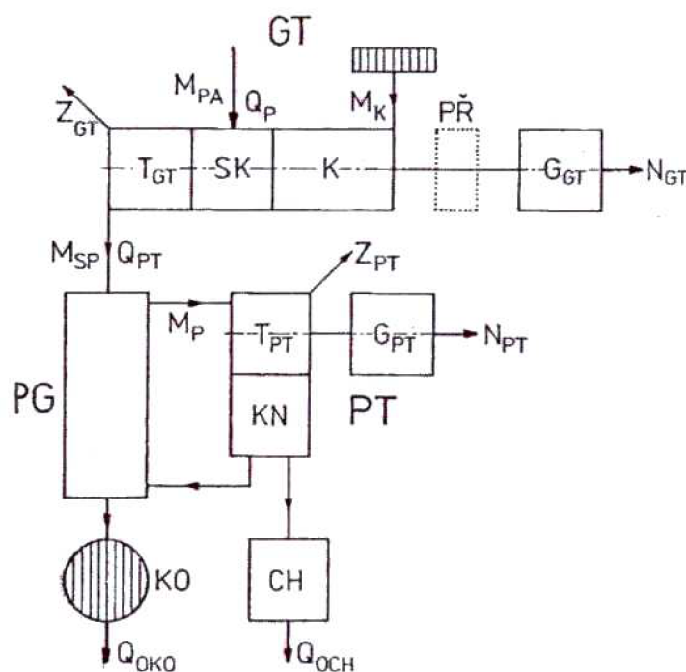
se nachází v USA a v Japonsku, v Evropě jsou v Itálii, ve Španělsku a ve Spojeném Království Velké Británie a Severního Irsku. V České republice se v roce 2011 začala stavět nová paroplynová elektrárna v Počeradech. V Brně se nachází jedna paroplynová teplárna Červený mlýn.

Další výhodou je i relativně rychlá výstavba oproti uhelné nebo jaderné elektrárně, výstavba trvá okolo 40 měsíců, v závislosti na složitosti zařízení. Paroplynová zařízení jsou vhodná jako teplárny, kdy parní turbína je s odběrem páry. Jsou vhodná na pokrývání špiček spotřeby díky velice rychlému náběhu na maximální výkon.

3.5. Účinnost

[15]

Pro výpočet účinnosti volíme paroplynové zařízení v jednoduchém uspořádání. V jednoduchém paroplynovém uspořádání pracuje plynová turbína v jednoduchém tepelném oběhu. V parním generátoru nedochází k dalšímu spalování a pouze se zde ochlazují spaliny.



Obr. 10 Paroplynové zařízení v jednoduchém uspořádání

Legenda

GGT	Elektrický generátor plynové turbíny
GPT	Elektrický generátor parní turbíny
GT	Plynová turbína jako celek
CH	Chladicí věž
K	Kompresor
KN	Kondenzátor vodní páry
KO	Komín
MK	Tok vzduchu v sání kompresoru
MP	Tok páry parní turbínou
MPA	Tok paliva do spalovací komory
MSP	Tok spalin parním generátorem
NGT	Výkon plynové turbíny
NPT	Výkon parní turbíny
PG	Parogenerátor

PŘ	Převodovka
PT	Parní turbína jako celek
SK	Spalovací komora
TGT	Parní turbína
TPT	Plynová turbína
QOKO	Odvedené teplo ve spalínách
QOCH	Odvedené teplo ve směsi vzduchu a stržené vodní páry vycházející z CH
QP	Přivedené teplo
QPT	Teplo v horkých spalínách za TGT
ZGT	Ztráty v plynové turbíně
ZPT	Ztráty v parní turbíně

Užitečný výkon paroplynového zařízení se počítá jako

$$N = N_{GT} + N_{PT}$$

Poté můžeme spočítat tepelnou účinnost paroplynového zařízení jako

$$\eta_t = \frac{N}{Q_P} = \frac{N_{GT} + N_{PT}}{Q_P} = \frac{N_{GT}}{Q_P} + \frac{N_{PT}}{Q_P}$$

První sčítanec vyjadřuje účinnost samostatného oběhu plynové turbíny. Druhý sčítanec ji v paroplynovém cyklu zvyšuje. Potom dostaneme

$$\frac{N}{Q_P} = \frac{Q_{PT}}{Q_P} \cdot \frac{N_{PT}}{Q_{PT}} = \frac{Q_P - N_{GT} - Z_{GT}}{Q_P} \cdot \frac{N_{PT}}{Q_P} = \left(1 - \frac{N_{GT}}{Q_P} - \frac{Z_{GT}}{Q_P}\right) \cdot \frac{N_{PT}}{Q_P}$$

Kde poslední člen $\frac{N_{PT}}{Q_P}$ je tepelná účinnost samotné parní turbíny. Potom dostáváme celkovou účinnost vyjádřenou pomocí dílčích tepelných účinností a ztrát jako

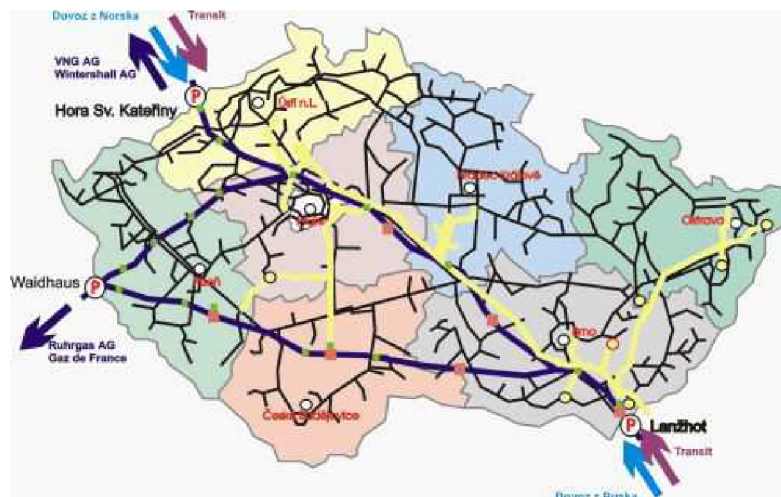
$$\eta_t = \eta_{GT} + (1 - \eta_{GT} - \xi_{GT}) \cdot \eta_{PT}$$

Kde η_t je celková termická účinnost, η_{GT} je účinnost plynové turbíny, ξ_{GT} jsou ztráty plynové turbíny a η_{PT} je tepelná účinnost parní turbíny. V současné době se celková termická účinnost paroplynového zařízení pohybuje maximálně kolem 60%. Ale tato zařízení jsou značně složitější, než jako je uspořádání na obrázku výše. Obvykle mají několik tlakových hladin a také přehřev páry.

4. Zemní plyn

[3], [20], [21]

Zemní plyn se dělí na naftový a krabonský. Zemní plyn naftový je uložen v pórovitých horninách, kde je nahromaděn nad vrstvami ropy či vody. Zemní plyn naftový se těží vrty hlubokými asi 3 km. Zemní plyn karbonský se nachází při ložiscích černého uhlí. Při těžbě uhlí je odsáván, ale může se i těžit hloubkovými vrty. Po vytěžení se zemní plyn musí upravit, aby mohl být následně používán již bez úprav. Následně se zemní plyn musí přepravit. Buď je přepravován tankery, kde je plyn zkapalněn, nebo vysokotlakým potrubím, kde tlak může být až 10 MPa.



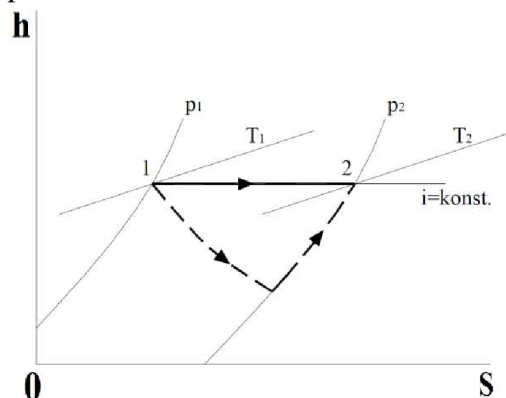
Obr. 11 Mapa přepravy zemního plynu po České republice

V České republice se těží zemní plyn pouze na jižní Moravě ale jen v malém množství. Do České republiky se dováží plyn z Ruska a Norska. V České republice jsou dvě předávací stanice, pro „ruský“ plyn v Lanžhotě a pro „norský“ plyn v Hoře Svaté Kateřiny. V těchto stanicích se redukuje tlak na vnitrostátní síť, kterou je dopravován k přímým odběratelům. Po České republice zajišťuje přepravu zemního plynu firma RWE Transgas, a.s.. Vysokotlaké potrubí má tlak nad 4 MPa. Regionální distribuční společnosti provozují středotlaké a nízkotlaké sítě. Ve středotlakých rozvodných sítích má zemní plyn tlak 0,3 MPa a v nízkotlakých rozvodných sítích je přetlak 2 kPa.

5. Konvenční redukční stanice

[9], [21], [22]

Redukce tlaku v konvenčních redukčních stanicích se provádí škrcením. Škrcení je z pohledu termomechaniky nevratná expanze tlaku plynu, pomocí náhlého zúžení průřezu potrubí, za konstantní entalpie. Během škrcení se nekoná žádná vnější práce.



Obr. 12 Diagram škrcení plynu

Při průchodu plynu zúženým místem dochází ke změně teploty, která je způsobena změnou tlaku při konstantní entalpii. Tomuto jevu se říká Jouleův - Thomsonův efekt. Průběh teplot mezi stavem 1 a 2 je popsán v rovnicí:

$$\int_0^1 c_p dT = \int_0^2 c_p dT$$

U ideálních plynů se teplota nemění, ale u reálného plynu může teplota klesnout nebo vzrůst v závislosti na měrném teple c_p .

5.1. Redukce zemního plynu

[22]

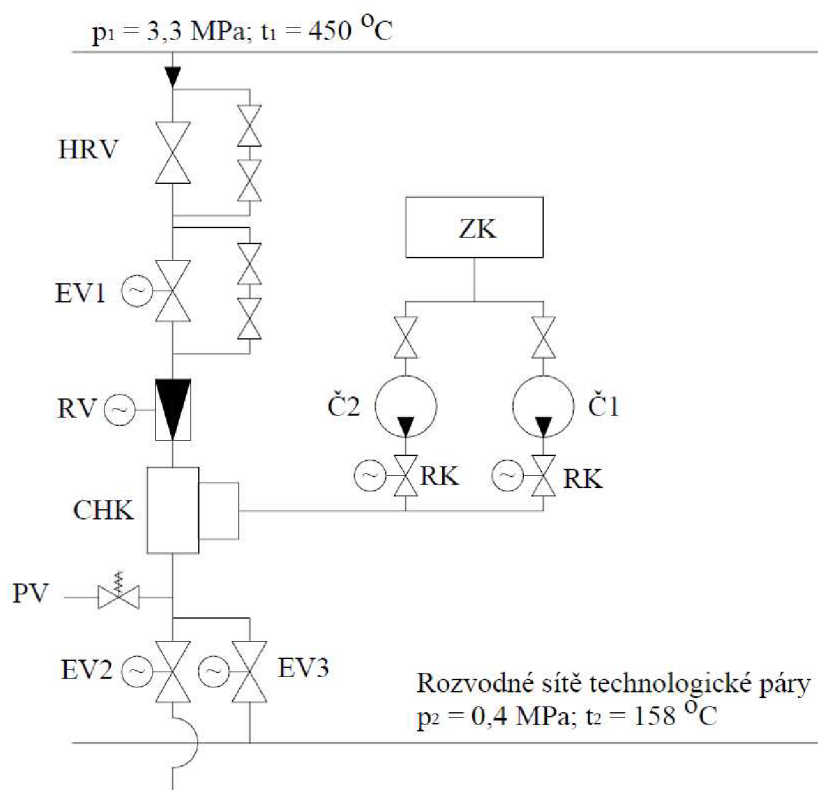
Většina plynu se používá o nižším tlaku, než jaký se nachází ve vysokotlakém či středotlakém plynovodu. Proto musíme tento tlak snížit na požadovanou hodnotu. Toto snížení tlaku se může uskutečnit škrcením, neboli redukcí tlaku. Redukce tlaku se provádí pomocí redukčních ventilů. Redukční ventil funguje na principu změny průtočného průřezu a tím i změny hmotnostního toku. Redukční ventily nejsou finančně náročné na pořízení ani na provoz. Můžeme jimi redukovat jak tlak zemního plynu, tak i tlak páry.

5.2. Redukce technologické páry

[22]

Redukce tlaku par v redukčních stanicích patří stále k nejhojněji používanému řešení. Není finančně náročné na údržbu ani provoz. Redukční stanice jsou spolehlivé a bezpečné. Mohou být provozovány v automatickém nebo poloautomatickém režimu.

Pára proudí přes hlavní redukční ventil do redukční stanice, kde proudí přes elektroarmaturu do zástříkové komory. Zde se upraví technologická pára na požadovanou teplotu. Dále pára proudí přes elektroarmatury do nízkotlaké rozvodné sítě.



Obr. 13 Schéma konvenční redukční stanice technologické páry

6. Expanzní turbína

[22], [25]

Mnoho inovací v „zelené“ energii je založeno na znovuzískání jinak promarněné energie. Spousta energie se promrhá při snižování tlaku. Toto snížení tlaku se obvykle

provádí v redukčních ventilech nebo regulátorech tlaku, které sníží tlak plynu izoentalticky. Ve vysokotlakém plynu je uložena spousta energie v entalpické podobě, která je už zaplacená. Tradiční regulační zařízení tuto energii promrhá. Tuto energii lze využít, je-li redukční armatura nahrazena expanzní turbínou.

6.1. Rozdělení expanzních turbín

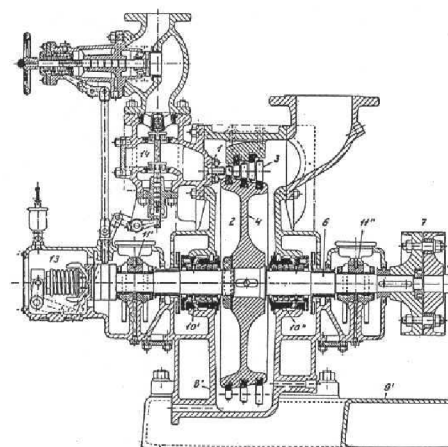
[22]

- Podle pracovní látky:
 - Parní turbíny
 - Plynové turbíny
- Podle způsobu transformace energie:
 - Turbíny rovnotlaké (akční)
 - Turbíny přetlakové (reakční)
- Podle směru pracovního proudění:
 - Axiální turbíny
 - Radiální turbíny
- Podle počtu stupňů:
 - Turbíny jednostupňové
 - Turbíny vícestupňové
- Podle vstupního tlaku:
 - Vysokotlaké turbíny
 - Nízkotlaké turbíny
- Podle výstupního tlaku:
 - Kondenzační turbíny
 - Protitlaké turbíny
 - Odběrové turbíny

6.1.1. Rovnotlaká turbína

[22]

Při proudění média rotorem je tlak v jedné řadě rotorových lopatek konstantní. Tlak klesá pouze v dýze. Rovnotlaké turbíny jsou obvykle parní. Rovnotlaká turbína může mít až čtyři rychlostní stupně. Při konstantním tlaku se zvýší využití kinetické energie až čtyřikrát. Vratné satorové lopatky jsou umístěny za prvním rychlostním stupněm. Pracovní látka je navedena do dalšího rychlostního stupně v požadovaném úhlu za pomoci vratných satorových lopatek.



Obr. 14 Třívěncová rovnotlaká turbína

6.1.2. Přetlaková turbína

[22]

U přetlakových turbín probíhá expanze na statoru i rotoru. Na rozdíl od rovnotlakých turbín zde dochází k sekundárním ztrátám kolem lopatek rotoru.

6.2. Účinnost expanzních turbín

[22]

U expanzních turbín se používá několik účinností. Využití celkové energie v termodynamickém oběhu se počítá pomocí přímé tepelné účinnosti η_c . Kde, P_G je získaný výkon a P_{TP} je energie přivedená do turbíny hmotnostním tokem páry či plynu.

$$\eta_c = \frac{P_G}{P_{TP}}$$

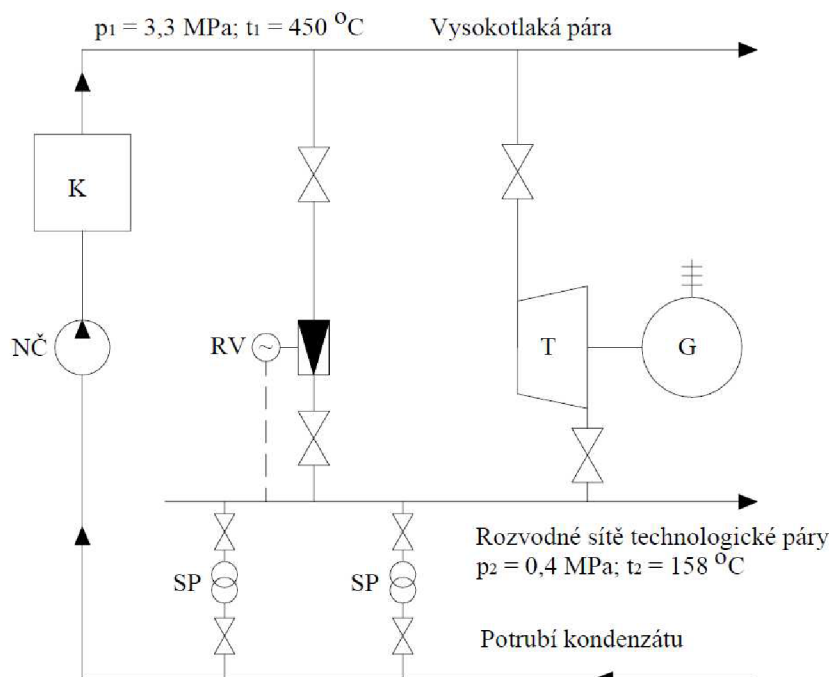
Porovnávací účinnost η_{id-R} porovnává výkon na spojce reálného stroje P_R s výkonem ideálního stroje P_{id} . Pomocí porovnávací činnosti zjistíme ztráty samotné turbíny.

$$\eta_{id-R} = \frac{P_R}{P_{id}}$$

6.3. Parní expanzní turbína

[22]

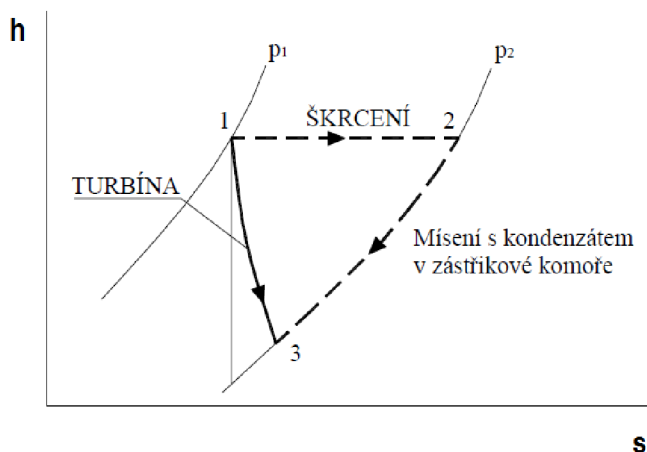
Využívají se v k redukci tlaku technické páry. Při použití parní expanzní turbíny se kromě vyrobeného tepla vyrobí i elektřina, kterou můžeme následně využít. Tím vzroste i účinnost celku. Výroba tepla a elektřiny se nazývá kogenerace.



Obr. 15 Schéma redukční stanice s protitlakou turbínou

Zde je expanzní parní turbína nainstalována paralelně spolu s konvekční redukcční stanicí, aby se zajistila nepřetržitá dodávka technické páry. Redukčním ventilem RV se zajišťuje dostatečný tlak pro protitlakovou turbínu. V případě snížení toku páry se může redukcční ventil úplně zavřít. Naopak, když je odběr páry větší než je hltnost turbíny, tak se otevře redukcční ventil, aby nedošlo k přetížení turbíny.

Na obr. 15 je pro názornost nakreslen i spalínový kotel K a napájecí čerpadlo NČ, SP jsou spotřebiče páry. Při použití expanzní turbíny v zapojení dle obr. 15 vzroste využití paliva z 35% až na 85%.



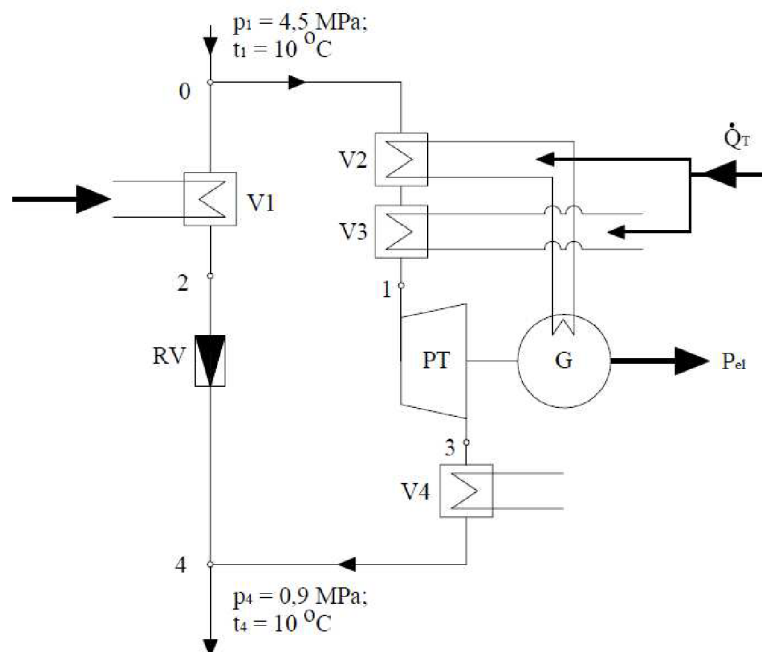
Obr. 16 Diagram expanze

Průběh tlakových změn je zakreslen v obr. 16 v h-s diagramu. Tlak páry klesá z bodu 1 expanzí v turbíně do bodu 2 a z bodu 1 do bodu 3 škrcením, je-li otevřen redukční ventil.

6.4. Plynová expanzní turbína

[22], [24], [26]

Dodávaný plyn k nám proudí ve vysokotlakém plynovodu, kde se tlak pohybuje v rozmezí 2 až 7 MPa. Většina plynu je ale potřeba ve středotlakých a nízkotlakých rozvodech. Expanzní turbína je naistalována paralelně s konvekční redukční stanicí, aby se zajistila kontinuální dodávka plynu. I zde po snížení tlaku plynu dochází k poklesu teplot, a proto je nutné plyn předehřívát. Teplota plynu by neměla být pod $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ke snížení nákladů můžeme využít k předehřevu plynu odpadní teplo z turbíny.



Obr. 17 Schéma redukční stanice na zemní plyn

Plyn proudící do plynové expanzní turbíny PT je předehříván ve výměníku V2, který zároveň slouží jako chladič oleje expanzní turbíny a generátoru G. Po výměníku V2 následuje hlavní předehříváč V3. Po expanzi v turbíně se musí plyn dohřát ve výměníku V4. V paralelní větvi je před redukčním ventilem RV umístěn výměník V1, který předehřeje plyn.

6.5. Údržba

[22], [24], [26]

Expanzní turbíny nejsou náročné na údržbu. Nejsou tu žádné části, které mají krátkodobou životnost. Musí se kontrolovat místa s očekávaným výskytem problému. Například vstupní plyn může způsobovat erozi na lopatkách nebo na statorovém kole. Pravidelně by se měl kontrolovat systém mazání.

7. Paroplynový cyklus v praxi

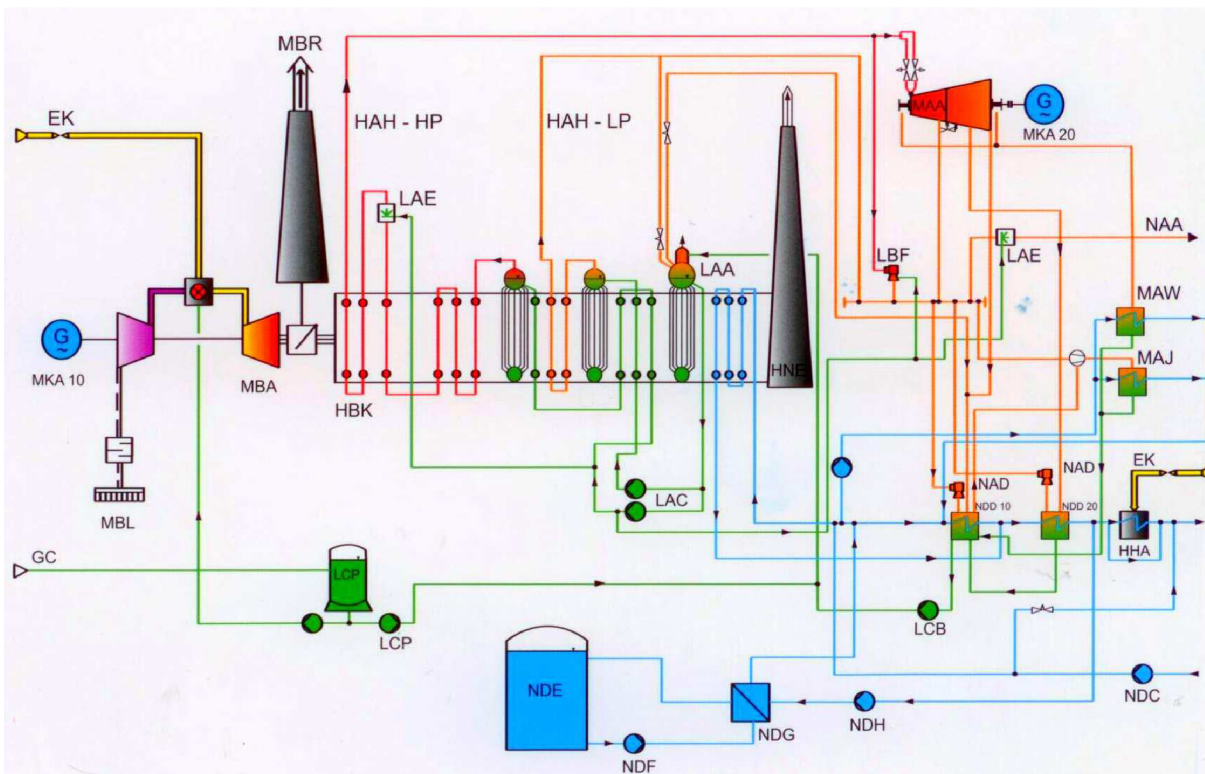
[27]

Paroplynová teplárna Červený mlýn se nachází v Brně-Králově Poli. Je v provozu od listopadu roku 1999, kdy paroplynová teplárna nahradila starou uhelnou výtopnu, která již nesplňovala emisní limity. Teplárna dodává teplo v horké vodě i v páře do brněnského systému centrálního zásobování teplem.

7.1. Zařízení

[27], [28], [29], [30]

Paroplynový cyklus je sestaven ze spalovací turbíny, spalínového kotle, výměňkové a čerpací stanice oběhové vody, spalínového kotle a parní turbíny, chladicího systému, akumulátoru tepla, rozvodny, by-passového komínu a horkovodního kotle.



Obr. 18 Schéma paroplynové teplárny Červený mlýn Brno

Legenda

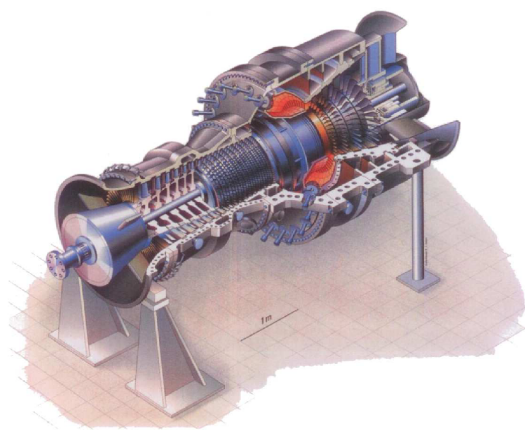
EK	Zdroj zemního plynu
GC	Demineralizovaná voda
HAH – HP	Vysokotlaká přehřátá pára
HAH – LP	Nízkotlaká přehřátá pára
HBK	Spalinový kotel
HHA	Horkovodní kotle
HNE	Komín
LAA	Napájecí nádrž

LAC	Napájecí čerpadla
LAE	Vstřík napájecí vody pro chlazení
LBF	Vysokotlaká redukční stanice
LCB	Kondenzátní čerpadla
LCP	Zásobní nádrž a čerpadla demineralizované vody
MAA	Parní turbína
MAJ	Odsávání paro-vzdušné směsi
MAW	Kondenzátor ucpávkových par
MBA	Plynová turbína s kompresorem
MBL	Sací zařízení spalovací turbíny
MBR	By-passový komín s klapkou
MKA 10	Synchronní generátor plynové turbíny
MKA 20	Synchronní generátor parní turbíny
NAA	Vývod nízkotlaké páry do brněnského centrálního systému zásobováním teplem
NAD	Nízkotlaká redukce páry
NDC	Čerpadla oběhové vody
NDD 10	Základní horkovodní výměník
NDD 20	Špičkový horkovodní výměník
NDE	Akumulační nádrž horké vody
NDH	Cirkulační čerpadla vloženého okruhu
NDF	Akumulační čerpadla
NDG	Akumulační výměníky

7.1.1. Plynová turbína V64.3A

[27], [28], [29], [30]

V teplárně Červený mlýn se nachází spalovací turbína firmy Siemens. Jde o jednohřídelovou, vysokootáčkovou a jednotělesovou plynovou turbínu s kruhovou spalovací komorou pro těžké pracovní podmínky. Je dvoupalivová, základním palivem je zemní plyn a náhradním palivem jsou lehké topné oleje. Na studeném konci (na straně kompresoru) je přes převodovku uložen dvoupólový synchronní 50 Hz generátor. Kompresor a turbína jsou uloženy na stejné hřídeli ve dvou ložiscích. Ložiska se nachází mimo tlakové oblasti. Aby se zajistila konstantní teplota spalin na výstupu, tak jsou rozváděcí lopatky prvního stupně kompresoru natáčivé. Plynová turbína je vybavena kruhovou spalovací komorou s 24 hybridními hořáky, patent Siemens. Během předsměšovacího režimu spalování zemního plynu dosahuje velmi nízkých emisí NO_x , bez vstříkávání vodní páry nebo vody. Stroj je opatřen akustickým krytem a hasícím zařízením s CO_2 .



Obr. 19 Turbína Siemens V64.3A

Tab. 1 Parametry turbíny Siemens V64.3A

Parametry turbíny Siemens V64.3A	
Jmenovitý výkon při spalování zemního plynu	69,7 MW
Otáčky turbíny	5413 min ⁻¹
Kompresor	
Počet stupňů	17
Průtok vzduchu	188,5 kg/s
Kompresní poměr	16,7
Turbína	
Počet stupňů	4
Průtok spalin	192 kg/s
Výstupní teplota spalin	kolem 571 °C
Teplota okolního vzduchu	4 °C
Barometrický tlak	986,8 hPa
Účinnost	36,2%
Generátor	
Jmenovité otáčky	3000 min ⁻¹
Jmenovitý zdánlivý výkon	75 MVA
Účinník	0,8
Napětí	10,5 kV

7.1.2. Výměňíková stanice

[27], [28], [29], [30]

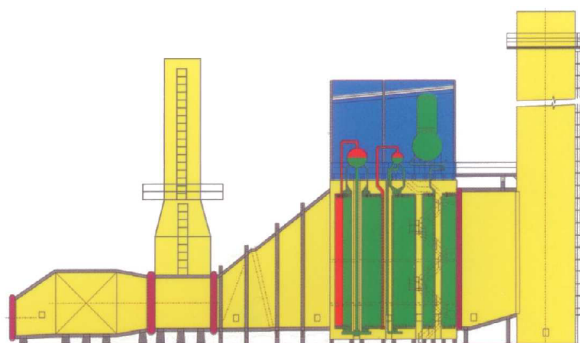
Slouží k přenosu tepla, které je v páře, do topné vody. Výměňíková stanice se skládá ze dvou horizontálních povrchových výměňíků typu pára-voda, a to ze základního ohříváku a ze špičkového ohříváku. Jejich celkový tepelný výkon je 85 MW_t. Výměňíková stanice může používat buď páru z paroplynového cyklu, nebo cizí páru z brněnského centrálního systému zásobováním teplem. Při připojení síťového ohříváku vody ve spalínovém kotli a ohřevu pomocí dvou horkovodních kotlů vzroste tepelný výkon na 125 MW_t (při ohřevu vody z 70 °C na 130 °C).

7.1.3. Spalínový kotel

[27], [28], [29], [30]

Spalínový kotel využívá horké spaliny v přetlaku vystupující z plynové turbíny. Je bez přídavného spalování. Ale je možno ho dodatečně domontovat a to až o výkonu 15 MW_t. Spalínový kotel je navržen jako třítlakový s přirozeným oběhem ve všech výparníkových plochách. Je složen z ohříváku síťové vody, vysokotlakového, nízkotlakového parního okruhu a okruhu pro termické odplynění. Parametry vysokotlakého okruhu závisí na výkonu tepelné turbíny.

Přívodní kanál spalin je složen z tlumiče hluku a by-passové klapky. By-passová klapka je také odhlučňena a je na ni napojen dvouplášťový komín. Všechny výhřevné plochy, kromě výhřevných ploch nízkotlakového parního oběhu, jsou žebrované. Snížení teploty spalin na minimální možnou hodnotu má na konci spalínového kotle za úkol ohřívák síťové vody.



Obr. 20 Třítlakový spalínový kotel

Přehřátá vysokotlaká pára (3,5-6,4 MPa) je vedena do vysokotlaké části turbíny a do parní vysokotlaké redukční stanice. Parní vysokotlaká redukční stanice nám zaručuje provoz spalínového kotle i v případě, není-li parní turbína v provozu. Poté je redukována i nízkotlaká pára (0,9 MPa) a vypouští se do brněnského centrálního systému zásobování teplem. Když je turbína v provozu, tak nízkotlaká pára je přiváděna do nízkotlaké části turbíny nebo rovnou do brněnského centrálního systému zásobování teplem.

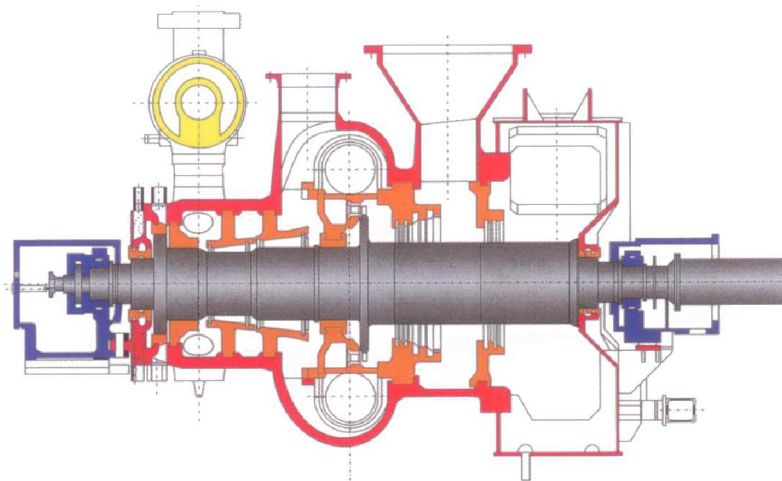
Tab. 2 Parametry třítlakového spalínového kotle

Parametry třítlakového spalínového kotle, ALSTOM Power	
Palivo	Zemní plyn
Teplota napájecí vody	105 °C
Teplota vstupních spalín do kotle	Kolem 571 °C
Vysokotlaká pára	
Tlak	6,4 MPa
Teplota	500°C
Průtok	26,67 kg/s
Nízkotlaká pára	
Tlak	0,92 MPa
Teplota	220 °C
Průtok	4,82 kg/s
Odplyňovací část	
Tlak	0,12 MPa
Teplota	105 °C
Síťový ohřívák vody	
Teplota	60/90 °C
Průtok	90 kg/s

7.1.4. Protitlaková parní turbína GE40

[27], [28], [29], [30]

V teplárně Červený mlýn je nainstalovaná protitlaková parní turbína. Turbína má jeden regulovaný odběr a jeden neregulovaný odběr páry. Turbína je jednotělesová vysokootáčková, ve vysokotlakové části bez regulačního stupně se dvěma skupinami přetlakových lopatek, v nízkotlakové části s jednověncovým regulačním stupněm a dvěma skupinami přetlakových lopatek. Součástí turbíny je i generátor s převodovkou. Generátor je chlazený vzduchem. Parametry turbíny závisí na tlaku a teplotě vysokotlaké admisní páry. Teplota se pohybuje v rozmezí 420 - 495 °C a tlak v rozmezí 3,0 - 6,4 MPa. Nízkotlaká admisní pára vstupuje přes regulovaný odběr. Pára z neregulovaného odběru proudí do špičkového ohříváku oběhové vody. Výstupní pára o tlaku 0,05 - 0,062 MPa je vedena do základního ohříváku oběhové vody.



Obr. 21 Protitlaková parní turbína

Tab. 3 Parametry dvoutlakové parní turbíny GE40

Parametry dvoutlakové parní turbíny GE40, ALSTOM Power	
Maximální výkon	24 MW
Jmenovitý výkon	21 MW
Otáčky turbíny	6010 min ⁻¹
Generátor	
Jmenovitý zdánlivý výkon generátoru	30 MVA
Otáčky	1500 min ⁻¹
Účinnost	0,8
Napětí	6,3 kV
Vysokotlaká pára	
Jmenovitý tlak	6,2 MPa
Jmenovitá teplota	495 °C
Maximální průtok	25,8 kg/s
Přídavná nízkotlaká pára	
Jmenovitý tlak	0,9 MPa
Jmenovitá teplota	210 °C
Maximální průtok	4,5 kg/s
Regulovaný odběr	
Jmenovitý tlak	0,9 MPa
Rozmezí tlaku	0,8-1,0 MPa
Maximální průtok páry	15,55 kg/s
Neregulovaný odběr	
Tlak	0,138 MPa
Průtok	18,7 kg/s
Výstupní pára	
Tlak	0,063 MPa
Průtok	13,65 kg/s

7.1.5. Rozvodna 110kV

[27], [28], [29], [30]

Teplárna jako kogenerační jednotka je schopna vyrábět elektrickou energii. K tomu, aby mohla teplárna vyvážet elektrickou energii slouží rozvodna 110 kV s podélným dělením.

Vývody generátorů parní a plynové turbíny jsou napojeny do rozvodny přes blokové transformátory. Pro vlastní spotřebu teplárny je elektrická energie zajištěna zpětně pomocí transformátorů vlastní spotřeby. Pro případ výpadku je zde 22 kV rozvodna napájená z distribuční sítě. Z rozvodny 110 kV je veden kabel do rozvodny Medláanky.

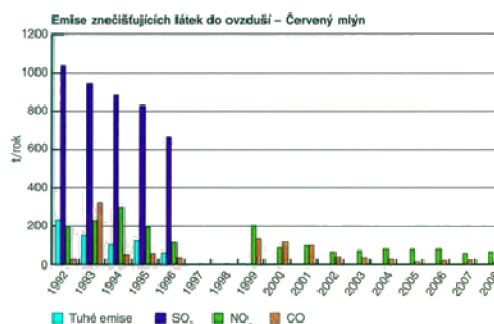
Tab. 4 Parametry rozvodny 110kV

Parametry rozvodny 110kV	
Jmenovité napětí	110 kV
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Jmenovitý proud	2500 A
Jmenovitý krátkodobý proud	40 kA
Jmenovitý nárazový proud	2,5 x 40 kA
Výkonový vypínač	
Krátkodobý zkratový vypínací proud	≤40 kA
Krátkodobý zkratový zapínací proud	2,5 x 40 kA

7.1.6. By-passový komín a emise

[27], [28], [29], [30]

By-passový komín byl postaven až v roce 2004. Je nainstalován mezi spalovací turbínu a spalínový kotel. Díky tomu nezávisí provoz spalovací turbíny na spalínovém kotli. By-passový komín je vysoký 41 m. Komín není v teplárně nejvyšší, o 4 m je vyšší spalínový komín, který je z betonu. Hodnota spalin je neustále monitorována. Díky přechodu na paroplynový cyklus emise výrazně klesly. Stanovené emisní limity jsou splňovány, ale skutečné hodnoty se nacházejí hluboce pod limitem.



Obr. 22 Diagram množství emisí v závislosti na čase

7.1.7. Akumulátor tepla

[27], [28], [29], [30]

Akumulátor tepla je beztlaká nádrž. S okruhem síťové vody je spojena čtyřmi paralelně zapojenými deskovými výměníky. Každý výměník má tepelný výkon 15 MW_t. Slouží k pokrývání špiček, a tím i zvýšení ekonomie celého provozu.

Tab. 5 Parametry akumulátoru tepla

Parametry akumulátoru tepla	
Objem nádrže	5600 m ³
Průměr nádrže	19 m
Výška nádrže	21,6 m
Teplota vody vybitého akumulátoru	55 – 70 °C
Teplota vody nabitého akumulátoru	95 °C
Obvyklý nabíjecí výkon	30 MW _t /h
Obvyklý vybíjecí výkon	20 MW _t /h

7.1.8. Horkovodní kotle

[27], [28], [29], [30]

V teplárně Červený mlýn jsou nainstalované dva horkovodní kotle. Jsou identické, každý o výkonu 28 MW_t s účinností 94,1 %. Palivem kotlů je zemní plyn. Kotle dodávají teplo do brněnského centrálního systému zásobováním teplem, v případě odstávky paroplynového cyklu nebo když je potřeba vyššího výkonu.

7.2. Paliva

[27], [28], [29], [30]

Jako hlavní palivo slouží nyní zemní plyn, v minulosti bylo možné použít i lehké topné oleje pro spalovací turbínu. Ta je vybavena kruhovou spalovací komorou s 24 hybridními hořáky. Tyto hořáky umožňují spalovat jak zemní plyn, tak i lehké topné oleje.

7.2.1. Zemní plyn

[27], [28], [29], [30]

Hlavním a jediným palivem teplárny Červený mlýn je v současnosti zemní plyn. Zemní plyn do teplárny proudí z vysokotlaké distribuční sítě. Plyn ze středotlaké distribuční sítě se používá jako záloha pro horkovodní kotle. Tlak vysokotlakého plynu se redukuje ve vysokotlaké redukční stanici na provozní tlak spalovací turbíny a horkovodních kotlů. Ohřev plynu pro spalovací turbínu zajišťuje nízkotlaká plynová kotelná. Kotelna předeřevu plynu se nachází v samostatné budově. O předeřev plynu se starají tři kotle THERM DUA50. Potrubí z předeřívací stanice je vedeno do redukční stanice, kde je napojeno na výměník pro ohřev plynu.

7.2.2. Lehké topné oleje

[27], [28], [29], [30]

Lehké topné oleje se používaly pouze při garančních testech a jako rezervní palivo. Skladovaly se v nádržích o objemu 5000 m³. V současné době se nepoužívají a ani se neuvažuje o jejich používání, proto jsou zásobní nádrže v současné době prázdné.

8. Ekonomické zhodnocení

[1]

Nahrazením konvenční plynové redukční stanice plynovou expanzní turbínou, při předpokládané spotřebě 28000 m³/hod zemního plynu a redukcí tlaku z 4 MPa na 2 MPa. Za předpokladu, že pořizovací cena je 15 000 000 Kč/MW_e plynové expanzní turbíny a je-li výkupní cena jedné megawatyhodiny 1000 Kč, bude návratnost investice, při průměrném vytížení turbíny 20 hodin denně, po 360 dní v roce, 2,083 roku - jak ukazuje výpočet dále.

Parametry zemního plynu CH₄

$$M = 16,042 \text{ kg/kmol}$$

$$r = 518,77 \text{ J/kg.K}$$

$$\kappa = 1,3$$

Počáteční parametry

$$p_1 = 4 \text{ MPa}$$

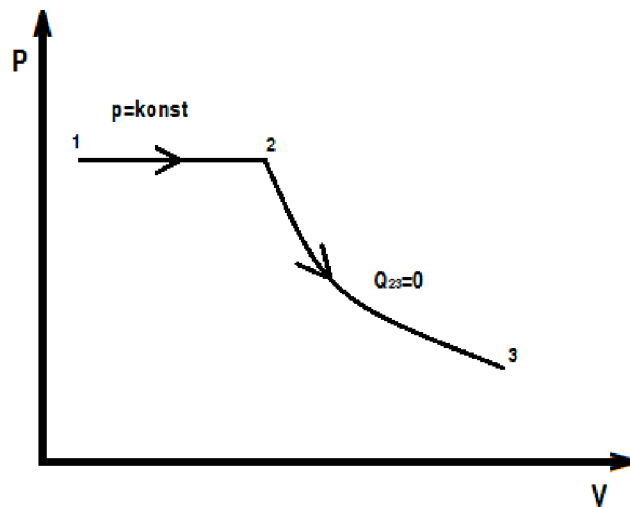
$$t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{M} = 3,5 \text{ kg/s}$$

Koncové parametry

$$p_3 = 2 \text{ MPa}$$

$$t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$



Obr. 23 p-V diagram přehřevu a expanze

Adiabatická expanze

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_2 = T_3 \cdot \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = (273,15 + 30) \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}}$$

$$T_2 = 355,73K$$

$$t_2 = 82,58 \text{ } ^\circ C$$

Izobarický ohřev

$$p \cdot v = r \cdot T$$

$$v = \frac{r \cdot T}{p}$$

$$v_1 = \frac{r \cdot T_1}{p_1} = \frac{518,77 \cdot (273,15 + 20)}{4 \cdot 10^6}$$

$$v_1 = 0,038 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{r \cdot T_2}{p_2} = \frac{518,77 \cdot 355,73}{4 \cdot 10^6}$$

$$v_2 = 0,046 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_3 = \frac{r \cdot T_3}{p_3} = \frac{518,77 \cdot (273,15 + 30)}{2 \cdot 10^6}$$

$$v_3 = 0,079 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Tepelný příkon

$$q_{12} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot p_1 \cdot (v_2 - v_1) = \frac{1,3}{1,3-1} \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot (0,046 - 0,038)$$

$$q_{12} = 140\,690,26 \text{ J/kg}$$

$$Q_{12} = \dot{M} \cdot q_{12} = 3,5 \cdot 140\,690,26$$

$$Q_{12} = 492\,415,88 \text{ W}$$

Teoretický výkon expanzní turbíny

$$a_{123} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot p_2 \cdot v_2 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{1,3}{1,3-1} \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot 0,046 \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} \right]$$

$$a_{123} = 118\,210,22 \text{ J/kg}$$

Je- účinnost celku $\mu = 60\%$, potom je skutečný výkon

$$\dot{P}_T = a_{123} \cdot \dot{M} = 118\,210,22 \cdot 3,5$$

$$\dot{P}_T = 413\,735,58 \text{ W}$$

$$\mu = \frac{\dot{P}_G}{\dot{P}_T} \cdot 100$$

$$\dot{P}_G = \frac{\mu \cdot \dot{P}_T}{100} = \frac{60 \cdot 413\,735,58}{100}$$

$$\dot{P}_G = 248\,251,46 \text{ W} = 248 \text{ kW}$$

Požizovací cena turbíny

$$por = por_{MW} \cdot \dot{P}_G = 15\,000\,000 \cdot \frac{248,251}{1000} = 3\,723\,621 \text{ Kč}$$

Roční prodej elektrické energie

$$vyr = vyk_{MWh} \cdot prac_{Rok} \cdot prac_{Den} \cdot \dot{P}_G = 1000 \cdot 360 \cdot 20 \cdot \frac{248,251}{1000} = 1\,787\,338 \text{ Kč}$$

Návratnost investice

$$navr = \frac{por}{vyr} = \frac{3\,723\,621}{1\,787\,338} = 2,083 \text{ roku} = \underline{\underline{2 \text{ roky } 30 \text{ dnů}}}$$

Návratnost expanzní turbíny tedy bude 2,08 roku.

ZÁVĚR

Tato práce má pomocí rozšířené rešerše posloužit k seznámení čtenáře se zatím nejdokonalejším způsobem transformace energie získané z fosilních paliv a s využitím expanzních turbín. V současné době roste poptávka po elektrické energii a je velice pravděpodobné, že bude dále růst i v budoucnu. Také musíme vzít v úvahu trend snižování negativního vlivu na životní prostředí při výrobě energie, snahou je také maximalizovat využití energie obsažené v mediu na elektrické či tepelné energie, a tím i snížení nákladů. Využití paroplynového cyklu v dnešní době znamená nejefektivnější výroba elektrické energie a tepla zároveň. V takovém případě dosahuje kogenerační zdroj velmi vysoké celkové účinnosti - až k 87 %.

Paroplynové elektrárny a teplárny jsou díky rychlé stavbě a nízkým investičním nákladům a vysoké účinnosti mnohem výhodnější než ostatní zdroje na fosilní paliva. Jedinou nevýhodou je vysoká cena používaného paliva. V budoucnu by se měl snad tento problém eliminovat integrovaným zplynováním biomasy a uhlí.

Jelikož je už tlaková energie v plynu zaplacená, tak by měla být maximálně využita, abychom snížili náklady. Tato energie, jinak promrhaná v konvekční redukční stanici, může být částečně využita při expanzi v expanzní turbíně. Nutno podotknout, že plynová expanzní turbína nemá pouze výhody, jelikož redukovaný zemní plyn je hořlavý, a proto musí být dodržovány maximální bezpečnostní opatření a zabezpečení proti vzniku požáru.

Součástí paroplynového cyklu je výroba vysokotlaké páry. Část energie uložené ve vysokotlaké páře je využita parní turbínou na výrobu elektrické energie. Nevyužitá část energie se může dále proměnit na elektrickou energii v parní expanzní turbíně.

Celá práce směřuje k ukázce využití plynové expanzní turbíny v ekonomickém zhodnocení. V ekonomickém zhodnocení je vypočtena návratnost investice do ukázkové plynové expanzní turbíny. Tato turbína by nahradila stávající konvenční redukční stanici na zemní plyn v paroplynové teplárně Červený mlýn. Turbína je pro zjednodušení beze ztrát, probíhá zde pouze adiabatická expanze. Plynová expanzní turbína o výkonu 248kW_e v ceně přibližně 3,7 milionů Kč, by se teplárně navrátila zhruba do dvou let, při stejných nákladech na údržbu jako má stávající konvenční redukční stanice.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [2] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace, *Transformační technologie*, 2006. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>.
- [3] ŠKORPÍK, Jiří. Fosilní paliva, jejich využití v energetice a ekologické dopady, *Transformační technologie*, 2011. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/fosilni-paliva-jejich-vyuziti-v-energetice-a-ekologicke-dopady.html>.
- [4] ŠKORPÍK, Jiří. Lopatkový stroj, *Transformační technologie*, 2009. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/lopatkovy-stroj.html>.
- [5] ŠKORPÍK, Jiří. Transformace energie v lopatkových strojích, *Transformační technologie*, 2009. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/transformace-energie-v-lopatkovych-strojich.html>.
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelná turbína a turbokompresor, *Transformační technologie*, 2011. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelna-turbina-a-turbokompresor.html>, 2011.
- [7] ŠKORPÍK, Jiří. Parní turbína v technologickém celku, *Transformační technologie*, 2011. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/parni-turbina-v-technologickem-celku.html>.
- [8] ŠKORPÍK, Jiří. Turbokompresor v technologickém celku, *Transformační technologie*, 2011. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/turbokompresor-v-technologickem-celku.html>.
- [9] ŠKORPÍK, Jiří. Škrceň plynů a par, *Transformační technologie*, 2006. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/skrceeni-plynu-a-par.html>.
- [10] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace, *Transformační technologie*, 2006. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>.
- [11] FIEDLER, Jan. *Parní turbíny: návrh a výpočet*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 66 s. ISBN 80-214-2777-9.
- [12] ŠTĚTINA, Josef. *OBĚHY PARNÍCH ZAŘÍZENÍ* [online]. [cit. 2012-04-29]. ISBN 978-807-3281-519. Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/sew/category/odbortermomechaniky/termomechanika/>
- [13] UNIVERSAL GMBH. *Combined Cycle Systems For the Utility Industry* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.universalaet.com/docs/combined-cycle-systems-jbc.pdf>
- [14] NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORIES. *GAS TURBINES IN SIMPLE CYCLE & COMBINED CYCLE APPLICATIONS* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/handbook/1.1.pdf>
- [15] VÁCLAV KONEČNÝ, Miloš Zachystal. *Návrh paroplynového zařízení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007. ISBN 978-807-0435-328.
- [16] DOLEŽAL, Martin. *Tepelné a paroplynové elektrárny* [online]. 2010 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=1790

- [17] JAROSLAV KRBEK, Bohumil Polesný. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz* [online]. 1. vyd. Praha: GAS, 2007 [cit. 2012-04-29]. ISBN 978-807-3281-519. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf
- [18] IBLER, Z. a kol.: *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [19] Combined cycle power plants. *Cogeneration News&Technologies* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://cogeneration.net/combined-cycle-power-plants/>
- [20] Přeprava a uskladnění. GAS S.R.O. *Zemní plyn* [online]. 2007 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.zemniplyn.cz/doprava/default.htm#cpu>
- [21] V. Koza (2004) <http://zemniplyn.wz.cz>
- [22] ČESKÁ ENERGETICKÁ AGENTURA. *Expanzní turbína* [online]. Praha: Česká energetická agentura [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_893.pdf
- [23] IMMS MACHINERY INTERNATIONAL, INC., GAS TECHNOLOGY SERVICES, INC. *FUNDAMENTALS OF THE TURBOEXPANDER: "BASIC THEORY AND DESIGN"* [online]. SANTA MARIA, CALIFORNIA: SIMMS MACHINERY INTERNATIONAL, INC., GAS TECHNOLOGY SERVICES, INC., 2009 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_893.pdf
- [24] HEDMAN, Bruce A. ENERGY AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS, Inc., an ICF International Company. *Waste Energy Recovery Opportunities for Interstate Natural Gas Pipelines* [online]. Energy and Environmental Analysis, Inc., an ICF International Company, 2008 [cit. 2012-04-29].
- [25] POŽIVIL, Jaroslav. Use of Expansion Turbines in Natural Gas Pressure Reduction Stations. *Acta Montanistica Slovaca* [online]. 2004, roč. 9, č. 3 [cit. 2012-04-29]. ISSN 1335-178. Dostupné z: <http://actamont.tuke.sk/pdf/2004/n3/27pozivil2.pdf>
- [26] Turboexpanders: Harnessing the Hidden Potential of Our Natural Gas Distribution System. RHEUBAN, Jacob. *Jacobrheuban.com* [online]. 2009 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://jacobrheuban.com/2009/03/09/turboexpanders-harnessing-the-hidden-potential-of-our-natural-gas-distribution-system/>
- [27] *Paroplynová teplárna Červený Mlýn*. Brno: Teplárny Brno, a.s.
- [28] Česká republika. Rozhodnutí o integrované prevenci a omezení znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů. In: *§ 13 odst. 3 zákona o integrované prevenci*. Brno: Odbor životního prostředí, 2006. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf>
- [29] Česká republika. Žádost o vydání integrovaného povolení. In: *§ 13 odst. 3 zákona o integrované prevenci*. Brno: Teplárny Brno, a.s. – provoz Červený Mlýn, 2006. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf>
- [30] Česká republika. Vyjádření k žádosti o vydání integrovaného povolení společnosti. In: *§ 13 odst. 3 zákona o integrované prevenci*. Praha: CENIA, 2006, <http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis Zkratky
V3	Řazení tří teplosměrných ploch
RV	Redukční ventil
K	Spalinová kotel
NČ	Napájecí čerpadlo
SP	Spotřebič páry
PT	Plynová expanzní turbína
V2	Tepelný výměník
G	Generátor
V3	Hlavní přehříváč
V4	Tepelný výměník
V1	Tepelný výměník
NO _x	Oxidy dusíku
CO ₂	Oxid uhličitý

Symbol	Jednotka	Popis
p_i	[Pa]	Tlak
Δt_s	[°C]	Střední teplotní rozdíl
t_{SP}	[°C]	Teplota spalin
t_p	[°C]	Teplota mokré páry
N	[W]	Užitečný výkon paroplynového zařízení
N_{GT}	[W]	Užitečný výkon plynové turbíny jako celku
N_{PT}	[W]	Užitečný výkon parní turbíny jako celku
η_t	[-]	Tepelná účinnost
Q_{PT}	[W]	Teplo v horkých spalinách za parní turbínou
Q_p	[W]	Přivedené teplo
Z_{GT}	[W]	Ztráty v plynové turbíně
η_{GT}	[-]	Tepelná účinnost plynové turbíny
ξ_{GT}	[-]	Ztráty plynové turbíny
η_{PT}	[-]	Tepelná účinnost parní turbíny
c_p	[J/kg.K]	Měrné teplo
η_c	[-]	Přímá tepelná účinnost
P_G	[W]	Získaný výkon
P_{TD}	[W]	Přivedená energie do expanzní turbíny
η_{id-R}	[-]	Porovnávací účinnost
P_R	[W]	Reálný výkon stroje
P_{id}	[W]	Ideální výkon stroje

M	[kg/kmol]	Molární hmotnost
r	[J/kg.K]	Měrná plynová konstanta
κ	[-]	Poissonova konstanta
t_i	[°C]	Teplota
\dot{M}	[kg/s]	Hmotnostní průtok
T_i	[K]	Teplota
v_i	[m ³ /kg]	Měrný objem
q_{12}	[J/kg]	Měrné teplo
\dot{Q}_{12}	[W]	Tepelný příkon
a_{123}	[J/kg]	Měrná technická práce expanzní turbíny
η	[-]	Celková účinnost
\dot{P}_τ	[W]	Teoretický výkon expanzní turbíny
\dot{P}_G	[W]	Skutečný výkon expanzní turbíny
por	[Kč]	Pořizovací cena
por	[Kč/MW _e]	Cena jedné MW _e plynové expanzní turbíny
vyr	[Kč]	Cena vyrobené elektřiny za provoz během roku
vyk_{MWh}	[Kč/MWh _e]	Cena jedné megawatthodiny
$prac_{Rok}$	[-]	Počet dní kolik turbína pracuje během jednoho roku
$prac_{Den}$	[-]	Počet hodin kolik turbína pracuje během jednoho dne
$navr$	[rok]	Návratnost investice

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Humphrey cyklus, schéma zařízení a zobrazení cyklu v diagramu	14
Obr. 2 Brayton cyklus, schéma zařízení a zobrazení cyklu v diagramu	14
Obr. 3 Schéma spalovací turbíny s výměníkem spaliny - vzduch pro regeneraci tepla	15
Obr. 4 Rankine-Clausius cyklus, schéma zařízení a zobrazení cyklu v diagramech ...	15
Obr. 5 Schéma protitlakové turbíny	16
Obr. 6 Schéma kondenzační turbíny	16
Obr. 7 Schéma turbín s jedním regulovaným odběrem (vlevo) a s jedním neregulovaným odběrem(vpravo)	17
Obr. 8 Paroplynový cyklus, diagram a schéma.....	17
Obr. 9 Diagram třístupňové komprese	18
Obr. 10 Paroplynové zařízení v jednoduchém uspořádání.....	19
Obr. 11 Mapa přepravy zemního plynu po České republice.....	21
Obr. 12 Diagram škrcení plynu	21
Obr. 13 Schéma konvenční redukční stanice technologické páry.....	22
Obr. 14 Třívěncová rovnotlaká turbína	23
Obr. 15 Schéma redukční stanice s protitlakou turbínou	24
Obr. 16 Diagram expanze.....	25
Obr. 17 Schéma redukční stanice na zemní plyn	25
Obr. 18 Schéma paroplynové teplárny Červený mlýn Brno	26
Obr. 19 Turbína Siemens V64.3A.....	27
Obr. 20 Třítlakový spalínový kotel	28
Obr. 21 Protitlaková parní turbína.....	30
Obr. 22 Diagram množství emisí v závislosti na čase.....	31
Obr. 23 p-V diagram přehřevu a expanze	33

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry turbíny Siemens V64.3A	28
Tab. 2 Parametry třítlakového spalínového kotle.....	29
Tab. 3 Parametry dvoutlakové parní turbíny GE40	30
Tab. 4 Parametry rozvodny 110kV	31
Tab. 5 Parametry akumulátoru tepla	31