



ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Bakalářská práce

Distribuovaná výroba elektřiny a tepla (malé kogenerace)

Jakub Sýkora

2015

Vedoucí práce: Ing. Martin Beneš, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Sýkora** Jakub

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Distribuovaná výroba elektřiny a tepla (malé kogenerace)

Pokyny pro vypracování:

1. Princip kogenerace.
2. Technické parametry zařízení, výrobci.
3. Pořizovací ceny a provozní parametry.
4. Výpočet výrobních nákladů.

Seznam odborné literatury:

1. Dvorský E., Hejtmánková P.: Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. BEN-technická literatura, Praha, 2005.
2. Ibler Z.: Technický průvodce energetika. BEN-technická literatura, Praha.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Beneš, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2015



Prohlášení

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

V Praze dne 21. 5. 2015

Abstrakt

Tato práce se zabývá kombinovanou výrobou elektřiny a tepla v lokálních decentralizovaných zdrojích se spalovacími motory a mikroturbínami. Cílem je zhodnocení výhodnosti instalace kogenerační jednotky v objektu lázní a optimalizace jejího provozního režimu. První část práce je věnována teorii kogenerace, druhá konkrétnímu výpočtu.

Abstract

Topic of this thesis is cogeneration in distributed local plants using combustion engines and microturbines. The main goal of thesis is to evaluate economic benefits of CHP unit in health resort and its operation mode optimization. The first part is focused on the theory of cogeneration while the second one is based on particular computations.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 1 |
| 1 Princip kogenerace | 2 |
| 1.1 Kogenerace se spalovacím motorem | 2 |
| 1.1.1 Zážehový motor | 3 |
| 1.1.2 Vznětový motor | 3 |
| 1.1.3 Získávání tepla | 3 |
| 1.2 Kogenerace se spalovací turbínou | 4 |
| 1.2.1 Princip spalovacích turbín | 4 |
| 1.2.2 Mikroturbíny | 4 |
| 1.2.3 Získávání tepla | 5 |
| 1.3 Trigenerace | 6 |
| 1.3.1 Absorpční chlazení | 6 |
| 2 Parametry kogeneračních jednotek a jejich výrobci | 7 |
| 2.1 Energetické parametry | 7 |
| 2.2 Enviromentální parametry | 7 |
| 2.3 Výrobci | 8 |
| 3 Návrh a dimenzování kogenerační jednotky | 10 |
| 3.1 Potřeba a spotřeba tepla | 10 |
| 3.2 Potřeba a spotřeba elektřiny | 10 |
| 3.3 Denní doba provozu | 11 |
| 4 Ekonomické vyhodnocení provozu KJ | 12 |
| 4.1 Investice | 12 |
| 4.2 Provozní náklady | 12 |
| 4.2.1 Náklady na palivo | 12 |
| 4.2.1.1 Variabilní složka | 12 |
| 4.2.1.2 Fixní složka | 12 |
| 4.2.2 Náklady na opravy a údržbu | 13 |
| 4.2.3 Mzdové náklady | 13 |
| 4.3 Daňové odpisy | 13 |
| 4.4 Výnosy z prodané elektřiny | 13 |
| 4.5 Ekonomické hodnocení investice | 14 |
| 4.5.1 Čistá současná hodnota | 14 |
| 4.5.2 Vnitřní výnosové procento | 14 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.5.3 | Ekvivalentní hotovostní tok | 15 |
| 5 | Modelový příklad | 16 |
| 5.1 | Provozní náklady | 16 |
| 5.1.1 | Náklady na palivo | 16 |
| 5.1.2 | Servisní náklady | 18 |
| 5.2 | Provozní výnosy | 18 |
| 5.3 | Ekonomické podmínky | 19 |
| 5.4 | Optimalizace roční provozní doby | 19 |
| 5.5 | Výsledky výpočtů | 19 |
| 5.5.1 | Podmínky výhodnosti investice | 22 |

| | |
|--------------|-----------|
| Závěr | 23 |
|--------------|-----------|

Seznam použité literatury

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod

V době, kdy se energetika obrací směrem k málo vyzpytatelným obnovitelným zdrojům, musí klasické zdroje pro zachování konkurenceschopnosti zvyšovat svou efektivitu. Jednou z nejsnazších cest je kombinovaná výroba elektřiny a tepla využíváním odpadního tepla z oběhů klasických elektráren. Takovéto zdroje zároveň mohou dodávat elektřinu v době, kdy příroda nedovolí výrobu v obnovitelných zdrojích, a i když v danou chvíli není teplo potřeba, je možné ho uložit pro pozdější využití v řádu hodin.

Dalším trendem současné energetiky je decentralizace, která při vhodném rozvržení výroby kopírujícím lokální spotřebu snižuje zatížení vedení a s tím spojené ztráty. Spojením těchto trendů se dostaneme k tématu této práce - malým kogeneracím. Pod tímto pojmem zde rozumím kogenerační jednotky o elektrickém výkonu v řádu stovek kilowatt, které nachází své uplatnění v rekreačních, sportovních a zdravotnických zařízeních, nebo v menších průmyslových podnicích. Jejich využití je možné i jako záložní zdroj v případě přerušení dodávky elektřiny.

V tomto segmentu prozatím dominují kogenerační jednotky na zemní plyn, především se spalovacími motory, které dosahují celkových účinností i přes 90%. Další v pořadí jsou malé spalovací turbíny, jejichž vývoj jde stále velmi rychle dopředu a do budoucna mají, zvláště díky své jednoduchosti, obrovský potenciál pro rozvoj. V první kapitole práce je shrnutý princip funkce kogeneračních jednotek, v další pak výčet jejich nejdůležitějších parametrů a výrobců, kteří je na český trh dodávají. Druhá polovina práce je zaměřena na konkrétní uplatnění kogenerace v objektu lázní a zhodnocení výhodnosti takové investice.

Kapitola 1

Princip kogenerace

Principem kogenerace je současná výroba elektřiny a tepla. Její výhodou je zvýšení celkové účinnosti oproti oddělené výrobě. Existuje mnoho kogeneračních technologií, z nichž každá je vhodná pro jiné aplikace, kdy potřebujeme různé množství tepla o daných teplotách.

Používané kogenerační technologie pro výkony od desítek MW elektrického výkonu výše jsou oběhy s parními turbínami, plynovými turbínami, případně kombinované cykly. Základní podmínkou smysluplnosti těchto zdrojů je velká spotřeba tepla, jako jsou technologické procesy ve velkých průmyslových podnicích, nebo zásobování měst teplem.

Pro výkony v řádech stovek kW až jednotek MW se používají jednotky se spalovacími motory a mikroturbínami. Tyto jsou vhodné pro dodávku tepla do menších podniků, nemocnic, sportovních areálů, nebo plaveckých bazénů.

V rodinných domech s odběry v řádu jednotek kW nachází uplatnění spalovací motory, mikroturbíny a strilingovy motory. Takto malé jednotky však dosahují poměrně nízkých účinností a vzhledem k vysokým pořizovacím cenám nejsou příliš výhodné.

1.1 Kogenerace se spalovacím motorem

Kogenerační jednotky se spalovacími motory vycházejí z motorů využívaných v dopravě. Díky tomuto masovému rozšíření u nich došlo a stále dochází k inovacím vedoucím k vyšším výkonům a efektivitě.

Mezi jejich výhody patří dlouhodobý spolehlivý provoz bez větších servisních zásahů, velké výkonové rozpětí a možnost fungovat jako záložní zdroj elektřiny při výpadku sítě.

Pro kogeneraci jsou používány výhradně čtyřtákní plynové motory a to většinou zážehové. Vznětové motory se kvůli obtížnému zapalování paliva používají pouze pro největší výkony. U obou je princip podobný, rozdíl je ve způsobu zapalování palivové směsi. Činnost čtyřtákního motoru se dá rozložit do čtyř fází:

- sání – píst jde dolů
- komprese – píst jde nahoru
- expanze – píst jde dolů
- výfuk – píst jde nahoru

■ 1.1.1 Zážehový motor

Tepelný oběh v zážehových motorech se nazývá Ottův podle jeho vynálezce Nicolause Otta, který jej v roce 1876 poprvé sestrojil.

Při sání je do válce nasávána směs paliva a vzduchu. Ta je poté stlačena a zapálena elektrickou jiskrou ze zapalovací svíčky. Tím dojde k expanzi a tlačení pístu dolů, tedy konání užitečné práce. Ve čtvrté fázi se otevře výfukový ventil, spálená směs je vytlačena z válce a celý cyklus se může opakovat.

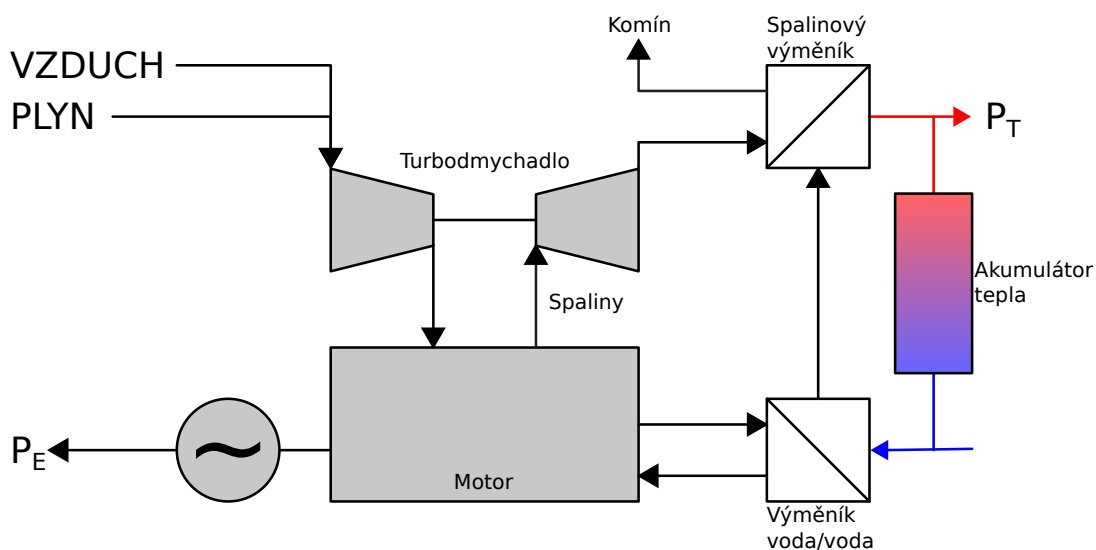
■ 1.1.2 Vznětový motor

Vznětový, neboli Dieselův motor, byl vynalezen Rudolfem Dieselem roku 1897. Od zážehového se liší tím, že při použití kapalného paliva je při sání do válce nasáván pouze vzduch, do kterého je při kompresi vstříknuto palivo a dojde k samovznícení. Při použití plynného paliva je nasávána už jeho směs se vzduchem a pro samovznícení je třeba do stlačené směsi vstříknout zapalovací olej, nebo naftu.

■ 1.1.3 Získávání tepla

Většina tepelné energie z motoru odchází v chladící vodě při teplotě kolem 100 °C. Další významné množství tepla odchází ve spalinách, které dosahují teplot přes 500 °C. Výměníky se řadí v sérii od nejnižší po nejvyšší teplotu, aby se tepelný potenciál využil co nejefektivněji. Pro vyrovnání spotřeby tepla se do systému instaluje akumulátor tepla, který se v době přebytku dodávaného tepla nad spotřebovávaným nabíjí a při nedostatku opět vybíjí.

Schéma kogenerační jednotky se spalovacím motorem je na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Schéma KJ se spalovacím motorem

■ 1.2 Kogenerace se spalovací turbínou

Jednotky s plynovou spalovací turbínou a zvláště ty malého výkonu nazývané mikroturbíny, jsou další možností řešení kogenerační jednotky v decentralizované výrobě. Jejich hlavní výhodou je jednodušší konstrukce s minimem pohyblivých částí a vysoká teplota spalin dovolující jejich použití pro technologické účely, především přímé sušení spalinami bez použití dalšího teplotnosného média. Navzdory tomu jejich elektrická účinnost stále nedosahuje hodnot jako u pístových spalovacích motorů.

■ 1.2.1 Princip spalovacích turbín

Tepelný oběh ve spalovacích turbínách nazývaný Braytonův cyklus po Georgovi Braytonovi, který si nechal svou zdokonalenou spalovací turbínu patentovat roku 1872. První verze byla patentována Johnem Berberem již v roce 1791.

Spalovací turbína má 3 části - kompresor, spalovací komoru a turbínu. Vzduch je nejprve nasáván do kompresoru, kde dochází k jeho stlačování. Ve spalovací komoře je smíchán s palivem a zapálen. Následně v turbíně dochází k expanzi zapálené směsi a uvolnění mechanické energie. Generátor bývá instalován na společné hřídeli s kompresorem a turbínou.

■ 1.2.2 Mikroturbíny

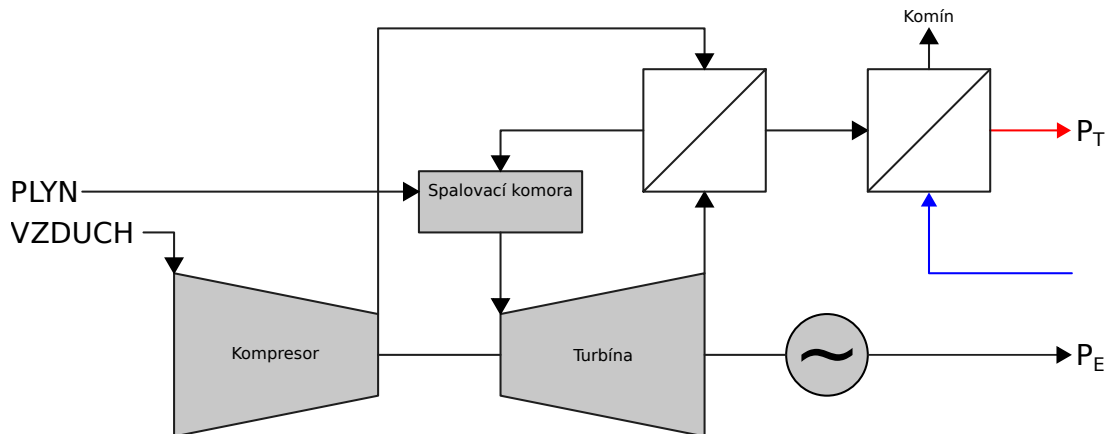
Mikroturbína je speciální označení spalovací turbíny malého výkonu, přibližně do 200 kWe, a kompaktních rozměrů. Oproti velkým plynovým turbínám pracují s vyš-

ším kompresním poměrem a většími otáčkami, dosahujícími u některých modelů až 100 000 ot/min. Z toho důvodu se u nich používají vysokofrekvenční generátory a následně je kmitočet upraven na síťový pomocí měničů. Na jediné hřídeli bez převodovky bývají použita vzduchová ložiska, čímž odpadá veškeré olejové hospodářství. Použití radiálních kompresorů a turbín místo axiálních spoří místo a díky malým rozměrům se snižují ztráty sáláním, tedy roste účinnost.

■ 1.2.3 Získávání tepla

Veškeré teplo odchází z turbíny spaliny o teplotě až 500 °C. Pro zvýšení elektrické účinnosti se zařazuje rekuperátor pro předehřívání vzduchu, který snižuje teplotu odcházejících spalin na cca 300 °C, tedy stále dostatečnou pro nejrůznější technologické procesy, nebo i výrobu páry.

Schéma kogenerační jednotky se spalovací turbínou je na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Schéma KJ se spalovací turbínou

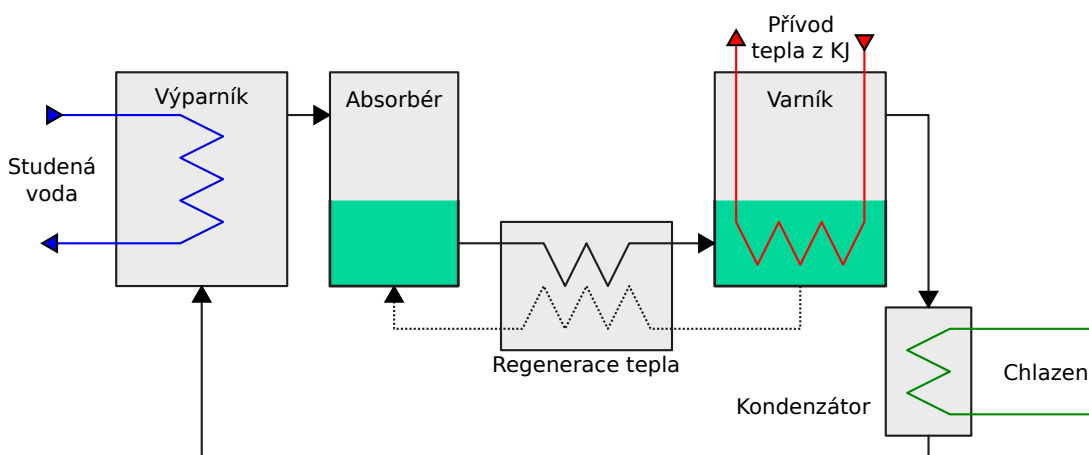
1.3 Trigenerace

Cestou k vyššímu využití kogenerační jednotky během celého roku může být trigenerace, tedy kombinovaná výroba elektřiny, tepla a chladu. Tepelný oběh odvádějící teplo může být realizován pomocí absorpční nebo kompresorové chladicí jednotky. Pro pohon kompresoru je nutná mechanická energie, o kterou snižujeme vyrobenou elektrickou energii. Absorpční jednotka, která má jinak horší parametry než kompresorová, pro svou funkci využívá tepelnou energii a proto je její použití výhodnější i přes vyšší investiční výdaje.

1.3.1 Absorpční chlazení

Absorpční chlazení je založeno na principu schopnosti vzájemné absorpce dvou látek, chladiva a absorbentu, čímž odpadá nutnost komprese. Jako kombinace chladivo-absorbent se používají buď voda-bromid lithný (LiBr), nebo amoniak-voda pro velmi nízké teploty. Schéma činnosti absorpčního chlazení je na obrázku 1.3.

Chladivo (voda) je v absorbéru pohlceno absorbentem (LiBr) a v kapalném stavu je pomocí oběhového čerpadla přečerpáno na vyšší tlak kolem 10kPa. Ve varníku je směsi dodáváno teplo z kogenerační jednotky a díky různé teplotě varu chladiva (46 °C při 10kPa) a absorbentu se chladivo vypařuje a odchází do kondenzátoru, kde je ochlazováno chladicí vodou, která odvádí teplo do chladících věží, a kondenzuje. Kondenzát protéká přes škrťací ventil do oblasti nízkého tlaku kolem 1kPa, kde snižuje svou teplotu cca na 6 °C, ve výparníku se vypařuje, čímž ochlazuje studenou vodu vracující se z okruhu klimatizace, a přichází zpět do absorbéru.[2]



Obrázek 1.3: Schéma absorpční chladicí jednotky

Kapitola 2

Parametry kogeneračních jednotek a jejich výrobci

Pro rozhodnutí o vhodnosti nasazení dané kogenerační jednotky je důležité znát mnoho parametrů. Jsou to především parametry energetické, enviromentální a ekonomické.

2.1 Energetické parametry

Elektrický výkon P_E je hodnota, kterou je jednotka schopna dodávat do sítě. Pohybuje se v regulačním rozsahu od P_{Emin} do P_{Emax} . Jmenovitý výkon P_{En} je nejvyšší hodnota, při které je jednotka schopna trvalého provozu. U většiny jednotek se spalovacím motorem, zvláště u menších, se jmenovitá hodnota rovná maximální a je při ní dosahováno nejlepší účinnosti. Pro odlišení od tepelného výkonu se k jednotkám přidává e , jsou to tedy kWe (MWe) – kilowatt (megawatt) elektrický.

Tepelný výkon P_T udává hodnotu, kterou je možné užitečně využít k dodávce tepla. Je závislý na dodávaném P_E . Pokud nedokážeme zajistit dostatečný odběr tepla, musíme nevyužitě mařit v chladiči. K jednotkám výkonu se pro odlišení přidává t – kWt (MWt) - kilowatt (megawatt) tepelný. Důležitá je i kvalita tepelné energie, charakterizovaná teplotou nosného média, většinou vody, na výstupu z KJ.

Modul teplárenské výroby σ je poměrem P_E a P_T a je důležitý spíše pro porovnání různých kogeneračních technologií mezi sebou.

Celková účinnost η_C je dána poměrem výstupní a vstupní energie energetického systému, tedy vyrobenou elektrickou energií E spolu s využitelným teplem Q a spalným teplem dodaným v palivu Q_{pal} .

$$\eta_C = \frac{E + Q}{Q_{pal}}$$

2.2 Enviromentální parametry

S provozem jednotky nevyhnutelně dochází k ovlivňování okolního prostředí, především emisí škodlivin do ovzduší a hluk. Hlavními sledovanými složkami spalin jsou oxid uhelnatý, oxid uhličitý, oxidy dusíku, oxid siřičitý a těkavé organické sloučeniny. Oxid uhelnatý CO vzniká při nedokonalém spalování a je přímo životu nebezpečný. Oxid uhličitý CO_2 není přímo škodlivý, ale jeho zvyšující se koncentrace v atmosféře je považována za hlavní příčinu globálního oteplování.

Oxidy dusíku NO_x , zastoupeny oxidem dusnatým NO , dusičitým NO_2 a dusným N_2O , jsou buď životu přímo nebezpečné, nebo jejich reakcí s vodou mohou vznikat vysoce korozivní kyseliny.

Těkavé organické sloučeniny (*VOC - volatile organic compounds*) jsou skupinou různorodých látek obsahující uhlík, především směsi uhlovodíků s určitou těkavostí, které v ovzduší za působení slunečního světla reagují, čímž vznikají další nebezpečné produkty. [1]

■ 2.3 Výrobci

Největším výrobcem kogeneračních jednotek se spalovacím motorem je v České republice třebíčská firma TEDOM a.s., která působí již od roku 1990. Do svých kogeneračních jednotek osazují jak motory vlastní výroby, tak i od renomovaných světových výrobců jako jsou Caterpillar, Liebherr, nebo MWM. Ve své nabídce mají tři produktové řady. V řadě MICRO jsou to mikrokogenerace o výkonu 7 až 48 kWe. Ve střední řadě CENTO nabízí jednotky mezi 50 kWe a 500 kWe. Nejvyšší řada QUANTO zahrnuje jednotky od 400 kWe až po největší s výkonem 9 MWe.

Dalším českým výrobcem je firma MOTORGAS s.r.o. Ta nabízí kogenerační jednotky s motory MAN v rozmezí 30 až 400 kWe, s motory WAUKESHA v rozmezí od 250 do 1000 kWe a s motory Jenbacher s výkony 527 až 2000 kWe.

Největším světovým výrobcem mikroturbín je americká společnost CAPSTONE, nabízející KJ s výkony 30, 65, 200 kWe a dále pak 600, 800 a 1000 kWe tvořené více 200 kW turbínami. Další výrobci, jako je švédský TURBEC se svou turbínou T100 o výkonu 100kWe, nebo americký INGERSOLL-RAND se svou 250 kWe, bohužel své výrobky do České republiky běžně nedodávají.

Některé jednotky dostupné na českém trhu včetně orientačních cen jsou uvedeny v tabulce 2.1.

| Výrobce | Typ | $P_E[kW]$ | $P_T[kW]$ | $\eta_{celk}[\%]$ | Cena [Kč] |
|----------|-------------|-----------|-----------|-------------------|------------|
| VISSMANN | EM-140/207 | 140 | 207 | 90,4 | 3 396 000 |
| TEDOM | Cento T120 | 125 | 177 | 88,0 | 2 540 000 |
| TEDOM | Cento T200 | 200 | 253 | 88,8 | 3 365 000 |
| TEDOM | Quanto D400 | 400 | 456 | 90,1 | 6 400 000 |
| TEDOM | Quanto D600 | 600 | 698 | 90,6 | 8 790 000 |
| TEDOM | Quanto D800 | 800 | 918 | 90,7 | 10 100 000 |
| MOTORGAS | MGM 100 | 99 | 131 | 85,3 | 2 290 000 |
| MOTORGAS | MGM 105 | 104 | 137 | 85,5 | 2 290 000 |
| MOTORGAS | MGM 160 | 160 | 214 | 83,4 | 3 210 000 |
| MOTORGAS | MGM 180 | 180 | 236 | 84,4 | 3 340 000 |
| MOTORGAS | MGM 200 | 200 | 257 | 85,0 | 3 340 000 |
| MOTORGAS | MGM 250 | 253 | 314 | 83,4 | 4 040 000 |
| MOTORGAS | MGM 400 | 404 | 500 | 86,6 | 5 290 000 |
| MOTORGAS | MGM 500 | 500 | 603 | 86,9 | 5 880 000 |
| MOTORGAS | MGM 530 | 530 | 634 | 86,8 | 6 000 000 |
| CAPSTONE | C200 | 190 | 279 | 76,5 | 7 140 000 |
| CAPSTONE | C600 | 570 | 851 | 77,3 | 19 220 000 |
| CAPSTONE | C800 | 760 | 1146 | 77,7 | 24 270 000 |
| CAPSTONE | C1000 | 950 | 1438 | 77,9 | 29 370 000 |

Tabulka 2.1: Přehled některých kogeneračních jednotek dostupných na českém trhu

Kapitola 3

Návrh a dimenzování kogenerační jednotky

Při výběru vhodné kogenerační jednotky je třeba zvážit několik aspektů, především:

- zda se jedná o nový samostatný zdroj, nebo jen rozšíření stávajícího
- jaké jsou požadavky na dodávku tepla a elektřiny z hlediska výkonů a ročního rozložení
- jaké jsou možnosti připojení k elektrické síti

3.1 Potřeba a spotřeba tepla

Průběhy potřeby je třeba znát ve formě ročních diagramů trvání potřeby a také denních diagramů. Právě tyto mají hlavní roli při návrhu KJ, neboť provozovat jednotku bez spotřeby tepla je neefektivní. Pokud již v místě zdroj tepla je, můžeme diagramy vytvořit snadno sledováním spotřeby paliva v průběhu roku. Pokud tato data k dispozici nemáme, musíme přistoupit k jejich odhadu.

Denní diagramy jsou pro nás důležité hlavně v technologických provozech, kdy může velmi kolísat v závislosti na prováděných činnostech. Pokud teplo využíváme pro vytápění a ohřev teplé vody, je jeho odběr v rámci dne rovnoměrnější. Instalací akumulátoru tepla do systému můžeme kolísání v průběhu dne vyhladit a jednotku spouštět když je to výhodné, například v době vysoké výkupní ceny elektřiny.

V ročním diagramu, rozděleného například po jednotlivých měsících, vidíme rozložení spotřeby v topné a mimo topnou sezonu. Pokud je teplo využíváno pro technologie, není pokles v letních měsících tak výrazný.

Podle charakteru diagramů se následně dá zvolit skladba kogeneračního systému z více menších jednotek, z nichž provozujeme v daný okamžik potřebný počet, nebo jednu velkou jednotku provozovanou v době nízkého odběru jen několik málo hodin denně. Pro vykrytí špiček a jako zálohu v případě výpadku KJ je nutné mít další zdroj tepla, například plynový kotel, nebo zdroj který byl v místě provozován předtím.

3.2 Potřeba a spotřeba elektřiny

Pokud chceme využívat vyrobenou elektřinu pro vlastní spotřebu, je třeba znát rovněž diagramy její potřeby a provoz jednotky upravit podle nich, neboť elektřina se

na rozdíl od tepla nedá ve větším množství skladovat. V neprůmyslových objektech však potřeba elektřiny většinou není dostatečná a tak se dodává do sítě. Kogenerační jednotky menšího výkonu nebývá problém do sítě připojit, neboť vedení v místě připojení bývá dostatečně dimenzované.

■ 3.3 Denní doba provozu

Pokud chceme jednotku provozovat v obydlené oblasti, je nutné splňovat hygienické limity hluku stanovené nařízením vlády 272/2011 Sb., které jsou pro noční dobu od 22 do 6 hodin sníženy o 10dB. I přes kvalitní odhlučnění jednotek je velice obtížné tyto limity splnit a proto je možné je provozovat maximálně 16 hodin denně.

Kapitola 4

Ekonomické vyhodnocení provozu KJ

4.1 Investice

Hlavní částí investičních výdajů je pořízení vlastní kogenerační jednotky, včetně příslušenství navazujících na jednotku, jako jsou spalinový výměník, výfukový tlumič, nebo akumulátor tepla. Dále je potřeba provést stavební úpravy strojovny, odhlučnění, připojení k systému zásobování teplem, vybudování přípojky k elektrické síti včetně transformátoru a napojení na plynovod.

4.2 Provozní náklady

4.2.1 Náklady na palivo

Palivové náklady tvoří většinu provozních nákladů KJ. Cena paliva tedy zásadně ovlivňuje celkové náklady v průběhu provozu jednotky. V případě zemního plynu je cena tvořena fixní a variabilní složkou.

4.2.1.1 Variabilní složka

Variabilní složka ceny plynu se skládá z ceny komodity, ceny za služby operátora trhu, za pevnou roční cenu za odebraný plyn a daně z plynu.

Cena komodity je určena dodavatelem, cena za služby operátora trhu a pevná roční cena za odebraný plyn je regulována ERÚ. Daň z plynu je stanovena zákonem č. 261/2007 Sb. a pro výrobu tepla je její výše 30,60 Kč/MWh spalného tepla.

4.2.1.2 Fixní složka

Fixní složka má také regulovanou a neregulovanou část. Regulovaná pevná roční cena za denní rezervovanou pevnou distribuční kapacitu je určena vzorcem

$$(a + b \cdot \ln(k)) \quad [\text{Kč}/\text{m}^3] \quad (1)$$

kde k je denní rezervovaná distribuční kapacita plynu v m^3 a a a b jsou koeficienty pro distribuční soustavu stanovené ERÚ. Neregulovanou část si určuje sám dodavatel.

■ 4.2.2 Náklady na opravy a údržbu

Mikroturbíny nejsou díky své jednoduché konstrukci a absenci olejového hospodářství příliš náročné na údržbu. Náklady na jejich údržbu se pak pohybují mezi 0,15 - 0,20 Kč/kWh vyrobené elektrické energie.[5] Výrobce Capstone uvádí dokonce hodnotu \$0.003/kWh, tedy přibližně 0.07 Kč/kWh.

Spalovací motory vyžadují o trochu více péče a doplňování provozních kapalin. Náklady na jejich údržbu se pohybují mezi 0,17 - 0,30 Kč/kWh vyrobené elektrické energie.[5]

Pokud jsou dodrženy předepsané servisní úkony, kogenerační jednotky se spalovacími motory dosahují životnosti přibližně 60 000 hodin, mikroturbíny pak 80 000 hodin. I po této době je však stále podstatná část dílů jednotky v dobrém stavu a po generální opravě může dále fungovat .

■ 4.2.3 Mzdové náklady

Kogenerační jednotky o výkonu v řádech stovek kWe se uvažují jako bezobslužné, kdy základní dohled zajišťuje stávající personál.

■ 4.3 Daňové odpisy

Kogenerační jednotky, jakožto „generátorová soustrojí se zážehovými a spalovacími motory a ostatní generátorová soustrojí do 2,5 MW elektrického výkonu“ jsou zařazeny do 2. odpisové skupiny, tedy doba odepisování je 5 let. V případě lineárního odepisování je v prvním roce odepsáno 11% pořizovací ceny a v dalších čtyřech letech 22.25%.

■ 4.4 Výnosy z prodané elektřiny

Pokud elektřinu nespotřebujeme, můžeme jí prodávat. Mimo výkupní cenu získáváme také zelený bonus. Jeho výši stanovuje ERÚ pro každý rok a odvíjí se od instalovaného elektrického výkonu výroby a ročních provozních hodin.

Výkupní cena elektřiny se sjednává s obchodníkem a je ovlivněna především režimem provozu. Pro špičkový provoz může výkupní cena přesahovat i 1300 Kč/MWh,

| | 200 kW | 1000 kW | 5000 kW |
|--------------|--------|---------|---------|
| 3000 hod/rok | 1640 | 1180 | 830 |
| 4400 hod/rok | 1180 | 780 | 500 |
| 8400 hod/rok | 250 | 170 | 75 |

Tabulka 4.1: Výše zeleného bonusu pro rok 2015 [Kč/MWh] [6]

naopak při provozu 24 hodin denně nepřekročí 900 Kč/MWh. Pro zajištění co nejvýhodnějších cen je vhodné zařadit KJ do tzv. *virtuální elektrárny*, která se navenek jeví jako větší výrobce s lepší vyjednávací pozicí a zároveň může zajišťovat dálkové ovládání jednotky v dobách, kdy potřebuje dodávat drahou špičkovou nebo regulační energii.

■ 4.5 Ekonomické hodnocení investice

Pro rozhodnutí, zda se vyplatí realizovat danou investici existuje množství kritérií. Uvedu zde ty, které v následující kapitole použiji.

■ 4.5.1 Čistá současná hodnota

Čistá současná hodnota (Net Present Value) vyjadřuje současnou hodnotu všech budoucích finančních toků souvisejících s investicí.

$$NPV = \sum_{t=0}^{T\ddot{z}} CF_t \cdot (1 + r)^{-t} \quad (2)$$

Realizujeme investice s nejvyšší nezápornou čistou současnou hodnotou.

■ 4.5.2 Vnitřní výnosové procento

Vnitřní výnosové procento (Internal Rate of Return) je taková míra požadované výnosnosti, pro kterou je čistá současná hodnota nulová.

$$\sum_{t=0}^{T\ddot{z}} CF_t \cdot (1 + IRR)^{-t} = 0 \quad (3)$$

Realizujeme investici s nejvyšším vnitřním výnosovým procentem, pokud je vyšší než náš požadovaný. Nevýhodou tohoto kritéria je možnost existence více řešení, nebo naopak nemusí existovat žádné.

■ 4.5.3 Ekvivalentní hotovostní tok

Obě předchozí kritéria mohla vzájemně porovnávat pouze investice se stejnou životností. Pokud lze zajistit opakování ekonomických důsledků porovnávaných investic, je možné porovnat ekvivalentní hotovostní toky za jedno období, nejčastěji roční. Získáme ho vynásobením současné hodnoty hotovostních toků anuitou za dobu životnosti investice.

$$RCF = a_T \cdot \sum_{t=0}^{Tz} CF_t \cdot (1+r)^{-t} \quad (4)$$

Kapitola 5

Modelový příklad

Jako modelový příklad zde uvedu instalaci KJ v objektu lázní, kde je teplo celoročně využíváno pro ohřev bazénové vody, ohřev teplé vody a ohřev slatinných koupelí s denní spotřebou 13 GJ. V topném období je dále potřeba až 22 GJ denně. V současnosti je dodávka tepla zajištěna třemi plynovými kotli, které budou zachovány i po instalaci KJ pro krytí špiček a jako záloha v případě poruchy KJ. S výrobou chladu se nepočítá.

Veškerá vyrobená elektřina bude vzhledem k poměrně nízké spotřebě v objektu dodávána do sítě. Spotřeby tepla v GJ v jednotlivých měsících jsou v následující tabulce a diagramu 5.1.

| Měsíc | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Spotř. | 1070 | 980 | 990 | 720 | 580 | 420 | 400 | 390 | 540 | 780 | 950 | 940 |

Průměrné tepelné výkony v jednotlivých měsících jsou zobrazeny v diagramu 5.2), kde je zvýrazněno roční minimum 145 kW. Při uvažování letního provozu 8 hodin denně tedy vychází tepelný výkon jednotky 435 kW. Při pohledu na dostupné modely KJ (tabulka 2.1) se nejvíce blíží Tedom Quanto D400, Motorgas MGM400, nebo dvojice mikroturbín Capstone C200.

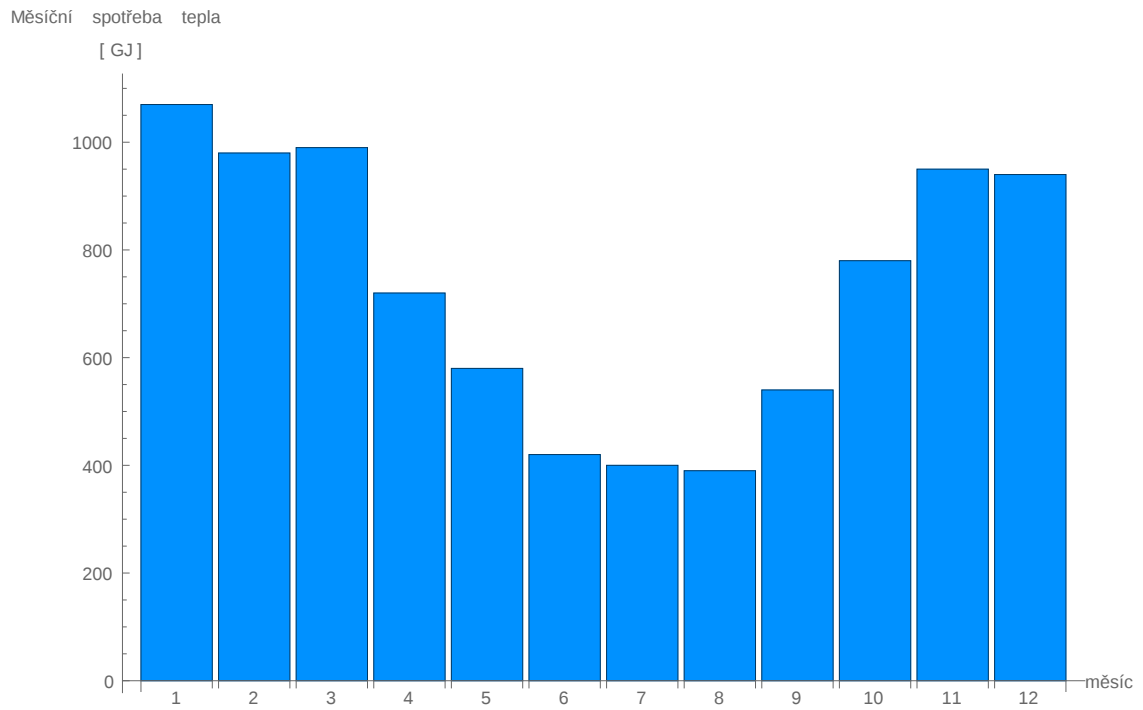
5.1 Provozní náklady

V předchozí kapitole byly popsány různé druhy nákladů, nyní uvedu jejich výši pro daný případ instalace.

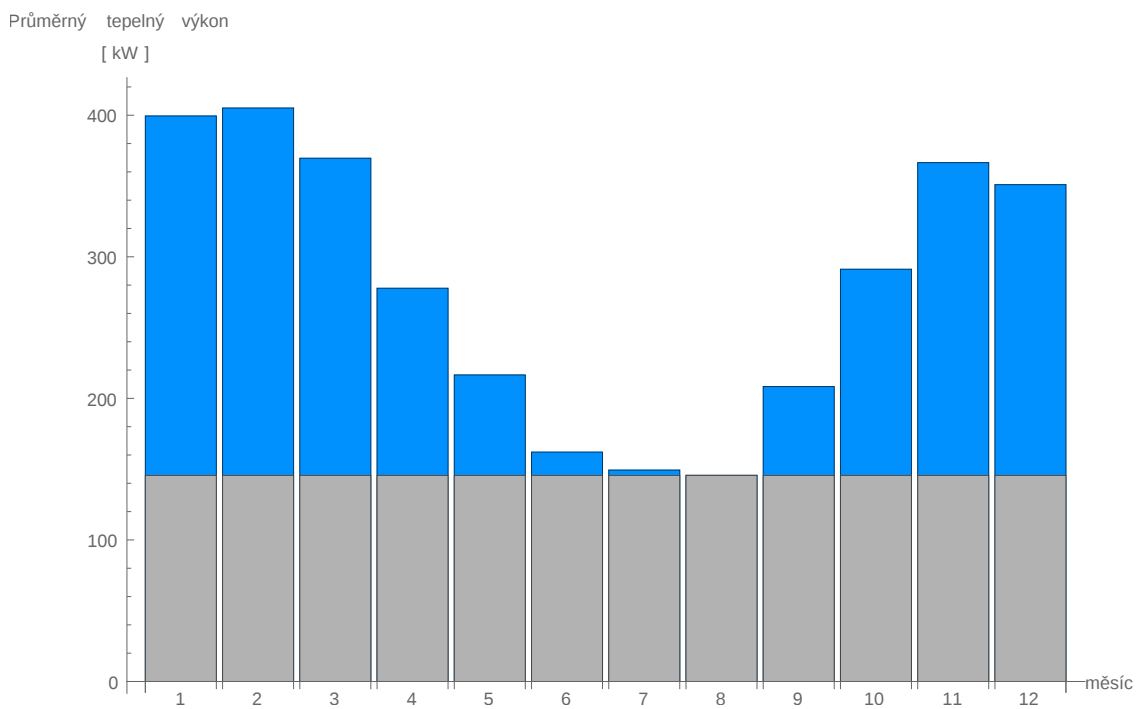
5.1.1 Náklady na palivo

Pro výpočet fixní složky plynu je nezbytné určit správný objem denní rezervované kapacity. Měsíc s největším odběrem tepla je únor, kdy je průměrně denně potřeba 35 GJ. Pokud by KJ s tepelným výkonem 450 kW pracovala 16 hodin, vyrobí cca 26 GJ tepla. Zbývajících 9 GJ je vyrobeno plynovým kotlem. Celkem je nutno v palivu přivést

$$Q_{pal} = \frac{Q_{KJ}}{\eta_{T,KJ}} + \frac{Q_{Kot}}{\eta_{Kot}} = \frac{26}{0.48} + \frac{9}{0.90} \doteq 64.2GJ$$



Obrázek 5.1: Spotřeby tepla v jednotlivých měsících



Obrázek 5.2: Průměrný tepelný výkon v jednotlivých měsících

1 m^3 plynu odpovídá přibližně 10.5 kWh spalného tepla, 26.45 m^3 tedy odpovídá 1 GJ a výsledná denní rezervovaná kapacita je tedy 1698 m^3 , s rezervou může být uvažována 1800 m^3 . Regulovaná roční cena za rezervovanou kapacitu vznikne dosažením koeficientů dané distribuční soustavy do vzorce 1. V distribuční soustavě E.ON je tedy

$$(326.9484 - 6.5753 \cdot \ln(1800)) \cdot 1800 \doteq 277.67 \cdot 1800 = 499793 \text{ Kc}$$

Fixní část daná distributorem je přibližně 45 Kč/ m^3 = 81 000 Kč/1800 m^3 , celková výše fixní platby je 580 793 Kč/rok.

Největší část variabilní složky tvoří cena komodity, která při ročním odběru 15 TJ bude přibližně 200 Kč/GJ, tedy 720 Kč/MWh. Regulovanou položkou je pevná roční cena za odebraný plyn, která je v distribuční soustavě E.ON pro rok 2015 79.72 Kč/MWh. Daň z plynu je 30.60 Kč/MWh. Po připočítání ceny za služby operátora trhu se dostáváme k celkové částce 840 Kč/MWh.

$$N_{pal} = 580793 + 840 \cdot Q_{pal} \text{ [Kč; MWh]} \quad (5)$$

■ 5.1.2 Servisní náklady

Podle kapitoly 4.2.2 s přihlédnutím k pořizovací ceně jednotek jsem odhadl servisní náklady v následující výši a cenu generální opravy jako 40% pořizovací ceny:

| Typ | N_{servis} [Kč/hod] | Životnost [hod] | C_{GO} [Kč] |
|-------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| Quanto D400 | 90 | 60 000 | 2 560 000 |
| MGM 400 | 80 | 60 000 | 2 116 000 |
| 2x C200 | 27 | 80 000 | 5 712 000 |

Tabulka 5.1: Servisní náklady uvažovaných KJ

Servisní náklady stávajících plynových kotlů uvažovat nebudu, neboť se výrazným způsobem nezmění.

■ 5.2 Provozní výnosy

Pro tento daný příklad budu uvažovat cenu elektřiny 1400 Kč/MWh při provozu 3000 hodin/rok a 1000 Kč při provozu 4400 hodin/rok. Roční provozní doba byla zvolena právě na hraniční hodnoty, kdy je možné získat vyšší zelený bonus.

■ 5.3 Ekonomické podmínky

Během celé doby provozu budu uvažovat inflaci ve výši 2% ročně na ceny plynu, elektřiny i servisních prací. Diskont bude 8%.

■ 5.4 Optimalizace roční provozní doby

Náklady a především výnosy z provozu jednotky závisí na provozním režimu. S dobou provozu se mění výše zeleného bonusu, cena za elektřinu i její vyrobené množství a v neposlední řadě i celková životnost jednotky. Pro nalezení nejlepší varianty jsem zvolil kritérium ekvivalentního hotovostního toku.

Výše zeleného bonusu se mění podle tabulky 4.1. Cena elektřiny byla aproximována funkcí $1205 + 295 \cdot \text{ArcTan}(4.23 - \frac{\text{hodiny}}{869})$, která prochází body [0h, 1600 Kč], [3000h, 1400 Kč], [4400h, 1000 Kč], [8000h, 800 Kč]. RCF se pak počítá z hotovostního toku úspory oproti stávajícím kotlům.

Průběh závislosti RCF na roční době provozu pro jednotku MGM 400 je na obrázku 5.3.

■ 5.5 Výsledky výpočtů

V následující tabulce jsou uvedeny množství vyrobené elektřiny a tepla a struktura provozních nákladů a výnosů.

| | | | | |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|-----------------|
| 3000 hodin/rok | Quanto D400 | MGM 400 | 2x C200 | Stávající kotel |
| Výroba tepla KJ [MWh] | 1368 | 1500 | 1674 | 0 |
| Výroba tepla kotel [MWh] | 1065 | 933 | 759 | 2433 |
| Výroba elektřiny [MWh] | 1200 | 1212 | 1140 | 0 |
| Spotřeba plynu [MWh] | 4024 | 4169 | 4522 | 2704 |
| N_{pal} [Kč] | 3 961 299 | 4 082 482 | 4 379 387 | 2 851 904 |
| N_{ser} [Kč] | 270 000 | 240 000 | 81 000 | 0 |
| N_{prov} [Kč] | 4 231 299 | 4 322 482 | 4 460 387 | 2 851 904 |
| V_{el} [Kč] | 1 680 000 | 1 696 800 | 1 596 000 | 0 |
| V_{ZB} [Kč] | 1 416 000 | 1 430 160 | 1 345 200 | 0 |
| V_{prov} [Kč] | 3 096 000 | 3 126 960 | 2 941 200 | 0 |
| EBITDA [Kč] | -1 135 299 | -1 195 522 | -1 519 187 | -2 851 904 |
| EBITDA bez podpory [Kč] | -2 551 299 | -2 625 682 | -2 864 387 | -2 851 904 |

Tabulka 5.2: Bilance vyrobené energie a provozních výnosů a nákladů při provozní době 3000h/rok

| | | | | |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|-----------------|
| 4400 hodin/rok | Quanto D400 | MGM 400 | 2x C200 | Stávající kotel |
| Výroba tepla KJ [MWh] | 2006 | 2200 | 2433 | 0 |
| Výroba tepla kotel [MWh] | 427 | 233 | 0 | 2433 |
| Výroba elektřiny [MWh] | 1760 | 1778 | 1672 | 0 |
| Spotřeba plynu [MWh] | 4641 | 4852 | 5366 | 2704 |
| N_{pal} [Kč] | 4 479 017 | 4 656 751 | 5 088 610 | 2 851 904 |
| N_{ser} [Kč] | 396 000 | 352 000 | 117 742 | 0 |
| N_{prov} [Kč] | 4 875 017 | 5 008 751 | 5 206 352 | 2 851 904 |
| V_{el} [Kč] | 1 760 000 | 1 777 600 | 1 672 000 | 0 |
| V_{ZB} [Kč] | 1 372 800 | 1 386 528 | 1 304 160 | 0 |
| V_{prov} [Kč] | 3 132 800 | 3 164 128 | 2 976 160 | 0 |
| EBITDA [Kč] | -1 742 217 | -1 844 623 | -2 230 192 | -2 851 904 |
| EBITDA bez podpory [Kč] | -3 115 017 | -3 231 151 | -3 534 352 | -2 851 904 |

Tabulka 5.3: Bilance vyrobené energie a provozních výnosů a nákladů při provozní době 4400h/rok

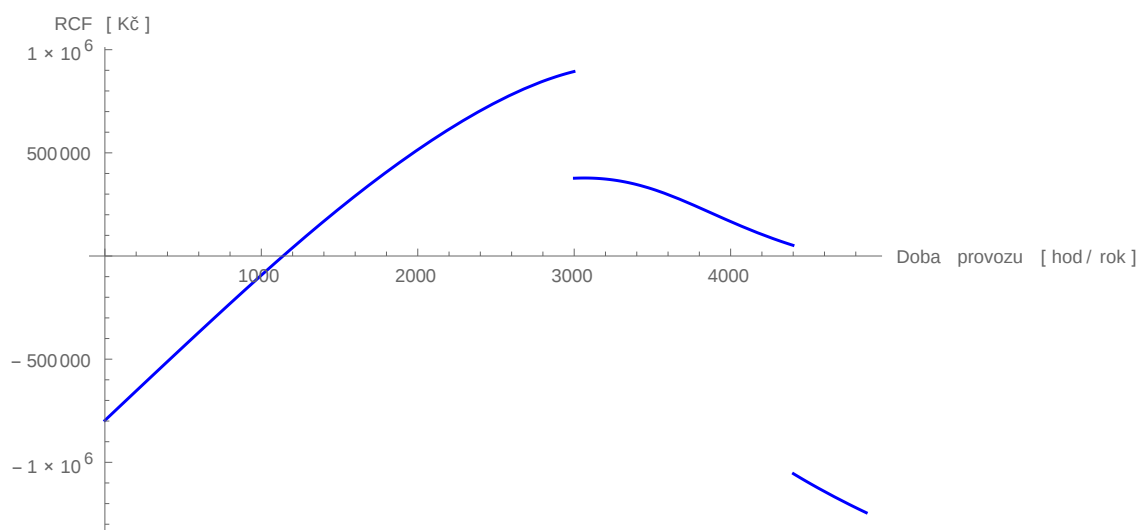
Zde je vidět, že všechny varianty s podporou zeleným bonusem přinesou úsporu celkových výdajů na teplo. Bez podpory se nevyplatí a nebudu je již dále uvažovat.

Pro jejich porovnání zahrneme do úvahy výši investičních výdajů a současnou hodnotu úspor.

| | 3000 hod/rok | | | 4400 hod/rok | | |
|---------|--------------|--------|----------|--------------|-------|------------|
| | NPV [Kč] | IRR | RCF [Kč] | NPV [Kč] | IRR | RCF [Kč] |
| D400 | 10 210 871 | 17.72% | 859 604 | 548 457 | 8.55% | 50 155 |
| MGM 400 | 10 524 218 | 15.53% | 885 983 | 538 288 | 8.53% | 49 225 |
| 2x C200 | -2 577 566 | 7.12% | -209 756 | -13 300 265 | 0.66% | -1 135 107 |

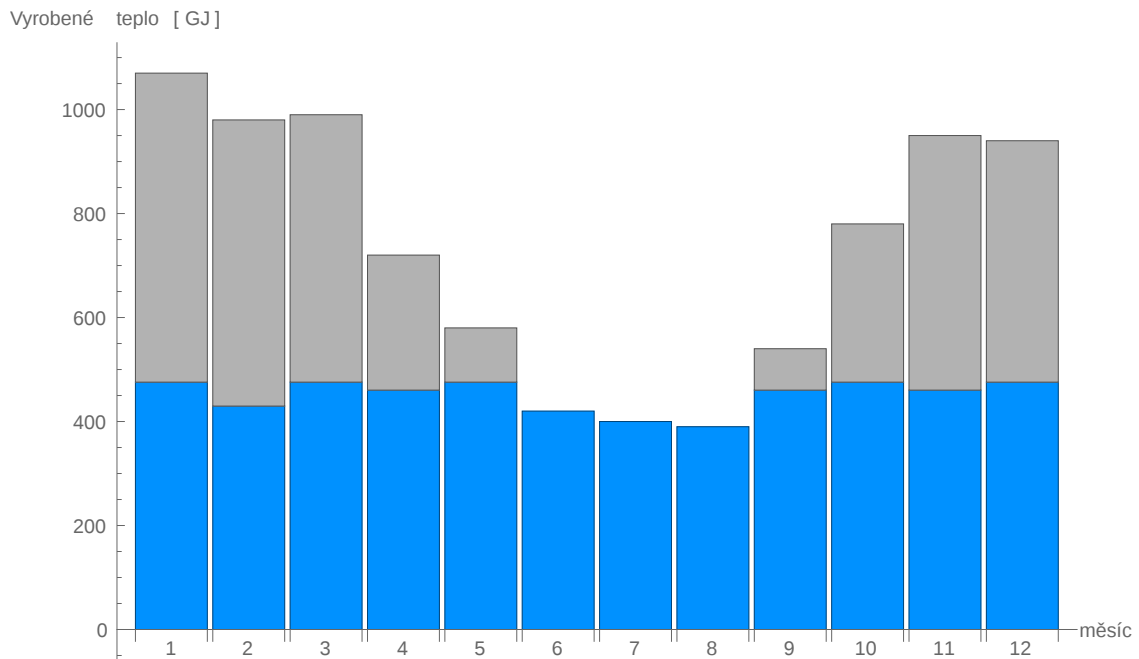
Tabulka 5.4: Ukazatele efektivity investic do různých KJ

Nejlépe v tomto srovnání dopadla jednotka MGM 400, která díky nejnižším investičním výdajům těsně porazila jednotku Quanto D400. Z tabulky a obrázku 5.3 je patrné, že provozovat v tomto případě jednotky více než 3000 hodin ročně není výhodné, především z důvodu poklesu zelených bonusů, nižší ceny elektřiny a vyšší spotřeby plynu. Tento pokles je výraznější, než vliv vyšší výroby elektřiny a prodloužení životnosti jednotky.



Obrázek 5.3: Závislost RCF na době provozu pro MGM 400

Dále je vidět, že mikroturbíny i přes velmi nízké servisní náklady a dlouhou životnost zatím nedokáží spalovacím motorům konkurovat. To je způsobeno především obrovskými investičními výdaji a nižší účinností, tedy vyššími náklady na palivo. Pokud se mají mikroturbíny více rozšířit, je nutné, aby poklesla jejich cena minimálně o 20%.



Obrázek 5.4: Podíl KJ na celkové výrobě tepla v jednotlivých měsících při provozní době 3000 hod/rok

■ 5.5.1 Podmínky výhodnosti investice

Minimální cena elektřiny při provozu 3000 hodin za rok, při které se vyplatí realizace kogenerační jednotky MGM 400, tedy kdy je $NPV=0$, je 713 Kč/MWh. Pokud by se snížil zelený bonus, musí být zachována podmínka součtu ceny elektřiny a zeleného bonusu

$$C_E + ZB \geq 1893 \text{Kč/MWh}$$

Při zachování uvažované hodnoty cen elektřiny, zeleného bonusu a fixní části ceny zemního plynu, je maximální variabilní cena zemního plynu 1039 Kč/MWh.

Závěr

V práci jsem shrnul základní technická specifika kogeneračních jednotek a princip návrhu konkrétní instalace. Ukázalo se, že instalace kogenerační jednotky může být při dostatečném výkonu výhodná. Jednotky se spalovacími motory zatím porázejí mikroturbíny na celé čáře, zejména díky výrazně nižším investičním výdajům a stále také vyšší účinnosti. V technologiích, kdy je potřeba tepla o vyšší teplotě, jim již mohou mikroturbíny být přinejmenším rovnocennými soupeři. Pokud bude i nadále pokračovat podpora těchto zdrojů a poroste jejich celkový instalovaný výkon, určitě se stanou důležitým prvkem energetiky pro vyrovnávání nestability výroby v obnovitelných zdrojích.

Seznam použité literatury

- [1] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 281 s. ISBN 80-730-0118-7.
- [2] JAROSLAV KRBEK, Bohumil Polesný. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz*. 1. vyd. Praha: GAS, 2007. ISBN 978-807-3281-519.
- [3] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [4] ŠUROVSKÝ, Jan. *Mikroturbína: [energetická revoluce pro 21. století : malý zdroj elektřiny - velký skok pro lidstvo]*. 1. vyd. Praha: Instalace Praha, 2003, 220 s.
- [5] ČESKÁ ENERGETICKÁ AGENTURA. *Typový projekt kogenerace pro sektor komerčních služeb*. 2000.
- [6] *Energetický regulační věštník*. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2014.

Seznam obrázků

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Schéma KJ se spalovacím motorem | 4 |
| 1.2 | Schéma KJ se spalovací turbínou | 5 |
| 1.3 | Schéma absorpční chladicí jednotky | 6 |
| 5.1 | Spotřeby tepla v jednotlivých měsících | 17 |
| 5.2 | Průměrný tepelný výkon v jednotlivých měsících | 17 |
| 5.3 | Závislost RCF na době provozu pro MGM 400 | 21 |
| 5.4 | Podíl KJ na celkové výrobě tepla v jednotlivých měsících při provozní době 3000 hod/rok | 22 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Přehled některých kogeneračních jednotek dostupných na českém trhu | 9 |
| 4.1 | Výše zeleného bonusu pro rok 2015 [Kč/MWh] [6] | 14 |
| 5.1 | Servisní náklady uvažovaných KJ | 18 |
| 5.2 | Bilance vyrobené energie a provozních výnosů a nákladů při provozní době 3000h/rok | 20 |
| 5.3 | Bilance vyrobené energie a provozních výnosů a nákladů při provozní době 4400h/rok | 20 |
| 5.4 | Ukazatele efektivity investic do různých KJ | 21 |