

Uplatnění spalovací turbíny v rámci obnovy elektrárny Prunéřov II

Monika Vitvarová

Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou uplatnění spalovací turbíny v rámci připravované obnovy tří bloků uhelné elektrárny Prunéřov II na výkon 3x250MW, zejména možnosti využití tepla spalín za spalovací turbínou v regeneračním ohřevu napájecí vody parního cyklu (tzv. feedwater repowering). Základním palivem je hnědé uhlí, zemní plyn je v lokalitě k dispozici pouze jako doplňkové palivo. V práci jsou představeny koncepční varianty řešení problému, výsledky získané při modelových výpočtech a přínos spalovací turbíny pro ekonomiku nových bloků. Začlenění spalovací turbíny do parního cyklu má za následek zvýšení využití primárních energetických zdrojů.

1. Úvod

V poslední době je stále větší pozornost věnována problematice vyčerpatelnosti zásob fosilních paliv ve vazbě na intenzitu jejich těžby a využití. Proto je při obnově stávajících a výstavbě nových fosilních elektráren kladen důraz na nejvyšší účinnost přeměny primárního zdroje energie na elektřinu a na palivovou diverzifikaci. V České republice je základním zdrojem energie pro výrobu tepla a elektřiny uhlí tvořící 60 % spotřebovaných energetických zdrojů. S nárůstem ceny uhlí a nejistoty zajištění jeho dlouhodobé dodávky, alespoň na 20 let, se energetika snaží zaměřit na další zdroje energie. Z fosilních paliv jde především o zemní plyn a z obnovitelných zdrojů o biomasu.

1.1 Rekonstrukce uhelné elektrárny Prunéřov II

Elektrárna Prunéřov II se nachází v oblasti severočeské uhelné pánve. Je uspořádána do pěti parních bloků se svorkovým výkonem 210 MWe. Základním palivem je hnědé uhlí o výhřevnosti 9,75 MJ/kg a pro najíždění a stabilizaci práškových kotlů se používá zemní plyn. Stávající zařízení elektrárny se blíží k vyčerpání životnosti, a proto se zvažuje její obnova. Z důvodu omezených zásob hnědého uhlí v lokalitě je navrhována rekonstrukce pouze tří bloků se zvýšeným svorkovým výkonem bloku 250 MWe.

S cílem dosáhnout vyšší využití primárních energetických zdrojů a snížit spotřebu uhlí je pro novou elektrárnu ověřována možnost použití zemního plynu nejen k najíždění a stabilizaci kotlů, ale i k výrobě elektřiny ve dvou blocích se spalovacími turbínami. Výkon spalovacích turbín je limitován na cca 2 x 60 MWe maximální kapacitou plynové přípojky 30 000 Nm³/hod. Spalovací turbíny mohou být provozovány jako autonomní zařízení pro výrobu elektřiny bez vazby na uhelné bloky. Výhodnější je však využití tepla spalín ze spalovací turbíny v parním oběhu uhelného bloku, tzv. repowering.

Pro zcela nový blok, lze využít tyto typy repoweringu:

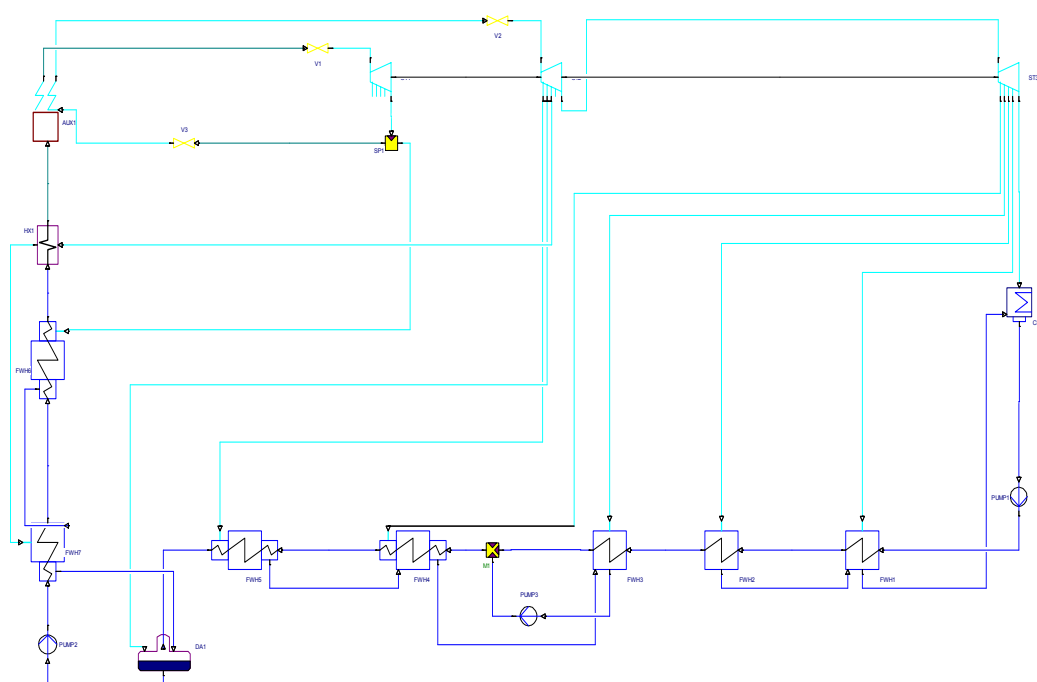
- 1) Hot wind box repowering využívá spaliny z turbíny jako spalovací vzduch pro kotel.
- 2) Paralell repowering využívá spaliny k výrobě přídavné páry expandující v turbíně parního cyklu uhelného bloku.
- 3) Feedwater repowering využívá spaliny pro ohřev napájecí vody místo série regeneračních ohříváků napájecí vody napájené z odběrů z turbíny.

2. Návrh začlenění spalovací turbíny do parního cyklu - feedwater repowering

2.1 Koncepce parního oběhu a oběhu s využitím spalovací turbíny

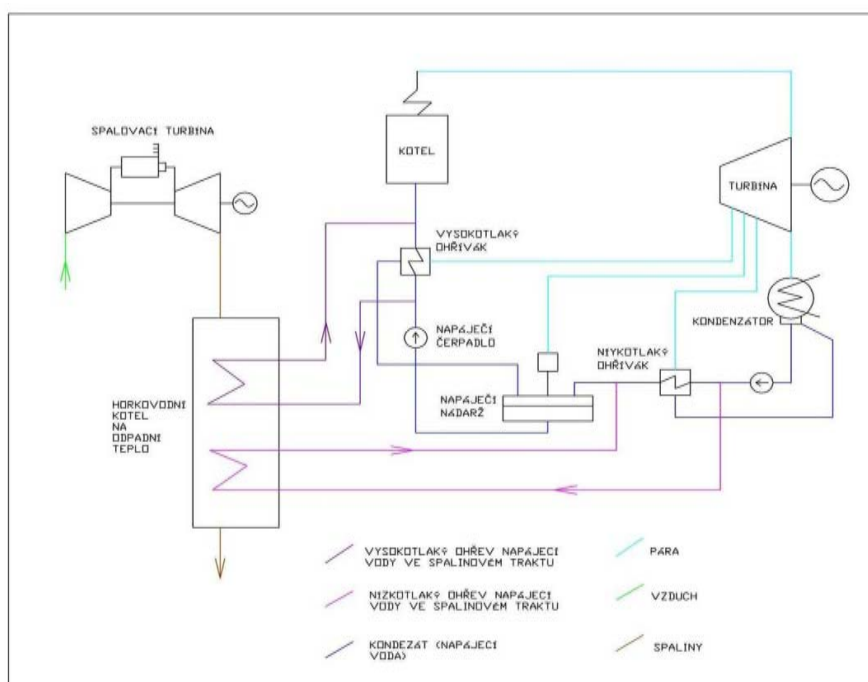
Tento příspěvek je zaměřen pouze na variantu feedwater repoweringu (dále FR) pro dva nové parní bloky, resp. na ověření jeho výhodnosti. Pro zachování variability provozních stavů byla přijata podmínka, že parní i plynový oběh mohou pracovat jak nezávisle na sobě, tak i ve vzájemné vazbě formou FR. V obou režimech bude zachován výkon parního bloku 250 MWe a dodržena teplota napájecí vody 249,6 °C.

Při řešení byly proto modelovány dvě koncepce tepelného schématu elektrárny pomocí programu GATECYCLE, který se používá pro výpočty parních a plynových oběhů. Základní bylo tepelné schéma samostatného parního oběhu uhlénního bloku, viz. Obr. 2.1, pro který byla výpočtem stanovena hrubá účinnost 42,4 %.



Obr.2.1- Návrh schématu obnoveného bloku elektrárny Pruněřov II

Při modelování druhé koncepce bylo toto základní schéma doplněno o spalovací turbínu předřazenou horkovodnímu kotli na odpadní teplo (dále KNOT), který umožňuje FR. Princip propojení KNOT s parním oběhem je znázorněn na jednoduchém schématu viz. Obr. 2.1. V programu GATECYCLE je KNOT namodelován pomocí dvou ekonomizérů, které nahrazují vysokotlakou a nízkotlakou část kotle. Pro úvodní výpočty byla zvolena spalovací turbína **SIEMENS V64,3** s výstupní teplotou spalin 539 °C a průtokem spalin 189 kg/s. V KNOT se pro parní cykl ohřívá maximálně 90% z celkového průtoku napájecí vody.



Obr. 2.2.1- Zjednodušené znázornění feedwater repoweringu pro uhelný blok

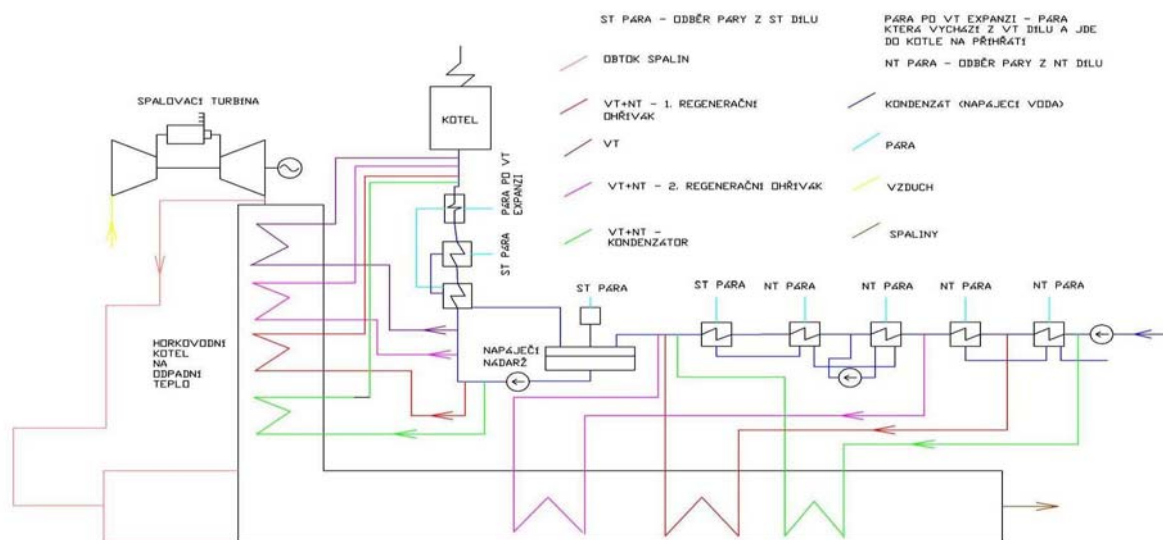
2.2 Využití tepla spalin v regeneračním ohřevu napájecí vody - FR

Skupiny regeneračních ohřevů napájecí vody jsou na obr. 2.2.1 zjednodušeně nahrazeny jedním společným regeneračním ohřevákem. Využití tepla spalin pro ohřev napájecí vody lze realizovat buď pouze u vysokotlaké regenerace (dále VT), kde odběr napájecí vody pro KNOT je proveden za napájecím čerpadlem a ohřátá voda se vrací do parního oběhu před kotlem. Druhou možností je rozdělení tepla spalin mezi vysokotlakou a nízkotlakou regeneraci (dále VT+NT). Při variantě zapojení VT+NT bylo navíc ověřeno několik variant odběru napájecí vody z nízkotlaké regenerace do KNOT, u kterých se ohřátá voda vrací do napájecí nádrže, viz Obr.2.2.2.

Pro turbínu Siemens V64,3 a zvolený průtok napájecí vody přes KNOT bylo v programu GATECYCLE modelováno 5 různých variant využití tepla spalin pro ohřev napájecí vody, znázorněných na Obr. 2.2.2 a charakterizovaných v Tab. 2.2 následujícími vybranými parametry: M_w – průtok napájecí vody do kotle, M_{sp} – průtok spalin kotlem na odpadní teplo, η_c - účinnost parního cyklu uhelného bloku, M_{pv} – množství spotřebovaného uhlí a S_{celk} – součet teplosměnných ploch KNOT (nízkotlaké a vysokotlaké) potřebných pro předání tepla spalin.

Nejvýhodnější variantou je rozdělení tepla spalin mezi nízkotlakou a vysokotlakou regeneraci s místem odběru z nízkotlaké regenerace za 1. regeneračním ohřevákem a obtokem nadbytečných spalin přes oblast vysokotlaké regenerace (v Tab.2.2 Varianta VT+NT -1. reg. ohřevák+obtok VT). U této varianty byla vypočtena nejnižší spotřeba uhlí, nejvyšší účinnost parního cyklu, nejvyšší průtok spalin KNOT a tím i nejvyšší možné využití celkového průtoku spalin ze spalovací turbíny; zároveň je však největší potřebná teplosměnná plocha KNOT a konstrukční složitost. Právě s ohledem na zjednodušení řešení byla pro další rozbor

zvolena jiná varianta FR zapojení s využitím tepla pro nízkotlakou i vysokotlakou regeneraci s odběrovým místem za 2. regeneračním ohřívákem (VT+NT zapojení za 2. reg. ohřívák).



Obr. 2.2.2 - Znázornění zapojení regeneračního ohřevu vody do kotle na odpadní teplo

Tab. 2.2

Rozdělení tepla mezi regenerační ohřev	Místo odběru napájecí vody z parního oběhu	M_w [kg/s]	M_{sp} [kg/s]	η_c [%]	S_{celk} [m ²]	M_{pv} [kg/s]
VT	Napájecí čerpadlo	168,8	133,0	42,84	13183	56,2
VT+NT	kondenzátor	171,0	140,1	42,43	13032	56,9
VT+NT	1.reg. ohřívák	169,5	139,8	42,71	16743	56,4
VT+NT	2.reg. ohřívák	168,0	138,6	43,00	19619	55,9
VT+NT	1.reg. ohřívák+obtok VT	165,7	146,8	43,44	19510	55,2

2.3 Výběr plynové turbíny pro navržený typ zapojení

Dalším krokem byl výběr nejvhodnější spalovací turbíny pro zvolenou variantu využití tepla spalin. Z katalogu firem, vyrábějících a dodávajících spalovací turbíny, byly proto vybrány spalovací turbíny, které splňují limitní podmínku na spotřebu zemního plynu, což je 15 000 Nm³/hod. Jejich přehled je v Tab. 2.3. Následně byly tyto turbíny začleněny do modelů

v programu GATECYCLE a porovnány. Výběrovými kritérii byly maximální výkon a účinnost a nejnižší měrná spotřeba paliva, měrné investiční náklady a potřebná teplosměnná plocha.

Tab. 2.3 Spalovací turbíny – základní technické informace

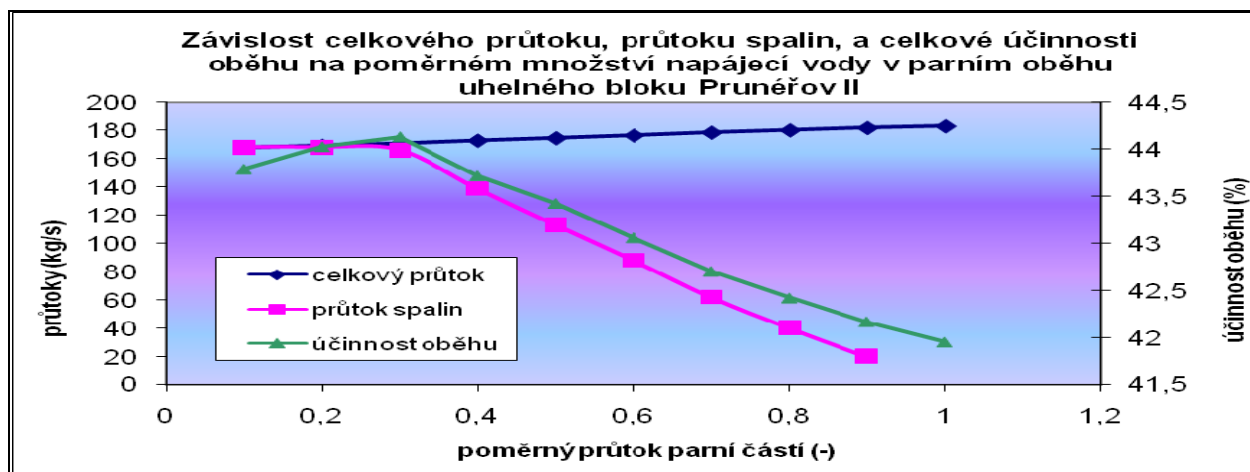
Název turbíny	Výkon [MWe]	Měrná spotřeba paliva [10 ⁻³ kg/s/MWe]	T _{sp} [°C]	η _T [%]	n _i [\$/MWe]	S _{celk} [m ²]
Trent 60 DWE	58	50,22	420	40,69	354328	20070
GE PG6581	41	67,45	548	31,24	313537	14445
GE LM5000	34	58,34	439	35,59	421000	10430
ABB GT 8C	51	63,05	524	33,51	350784	19619
SIEMENS V64,3	62	60,68	539	34,38	370968	20538

Pro další výpočty byla vybrána spalovací turbína firmy Rolls-Royce Trent 60 DWE s výkonem 58 MWe, spotřebou paliva 2,913 kg/s, spotřebou demineralizované vody 3,596 kg/s a účinností 40,49 %. Tato turbína byla zvolena pro svoji nejnižší měrnou spotřebu paliva, vysokou účinnost a užitečný výkon i relativně nízké měrné investiční náklady.

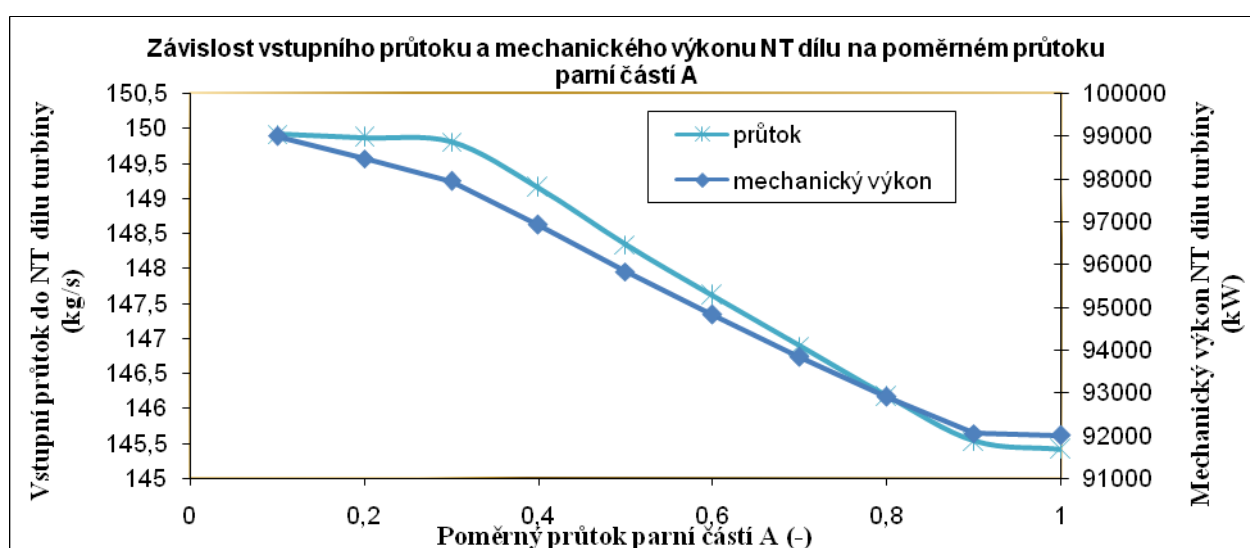
3. Vliv přerodělování průtoku napájecí vody mezi regeneračními ohříváky a kotlem na odpadní teplo na komponenty cyklu

Pro vybranou spalovací turbínu a variantu zapojení KNOT byl dále podrobně zkoumán vliv změny průtoku napájecí vody přes KNOT na celkový průtok, účinnost cyklu, úsporu paliva a komponenty parního oběhu, zvláště na NT díl parní turbíny. Při těchto výpočtech byl celkový průtok napájecí vody dělen v různých poměrech mezi parní regeneraci a spalínovou regeneraci v KNOT. Poměrný průtok parní částí regenerace $A = m_{pp}/(m_{sp} + m_{pp})$ se měnil od 0.10 do 1.0.

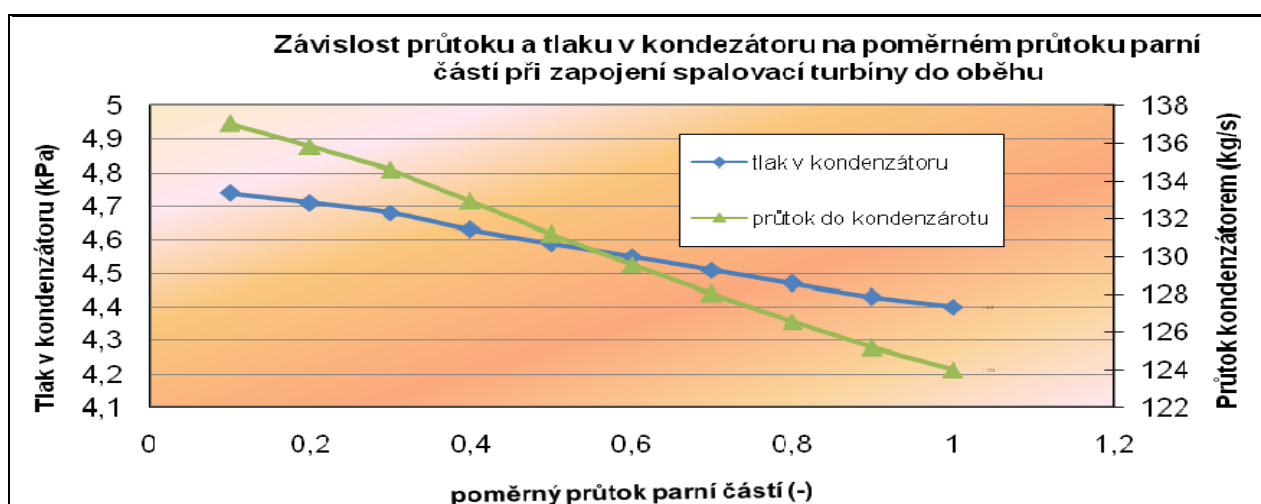
Využití spalin ze spalovací turbíny pro regenerační ohřev napájecí vody zvyšuje účinnost parního oběhu, viz. Graf 3.1. Zároveň zvyšuje průtok nízkotlakým dílem parní turbíny, viz. Graf 3.2, a kondenzátorem, viz. Graf 3.3. Účinnost narůstá s rostoucím průtokem spalin kotlem na odpadní teplo, se snižujícím se poměrným průtokem A a dosahuje svého maxima. Maximální hodnoty je dosaženo při 70% průtoku napájecí vody spalínovým traktem KNOT, kdy je využit nominální průtok plynové turbíny, dosažena požadovaná teplota napájecí vody a nejvyšší úspora uhlí viz. Graf 3.4. Se zvyšujícím se průtokem napájecí vody přes KNOT roste mechanický výkon NT dílu parní turbíny, ale zároveň se zvyšuje i průtok páry posledním stupněm NT. To je způsobeno snižováním průtoku páry do odběrů pro regenerační ohříváky vody. Zvýšený průtok do kondenzátoru při konstantním průtoku a teplotě chladicí vody zvyšuje tlak v kondenzátoru.



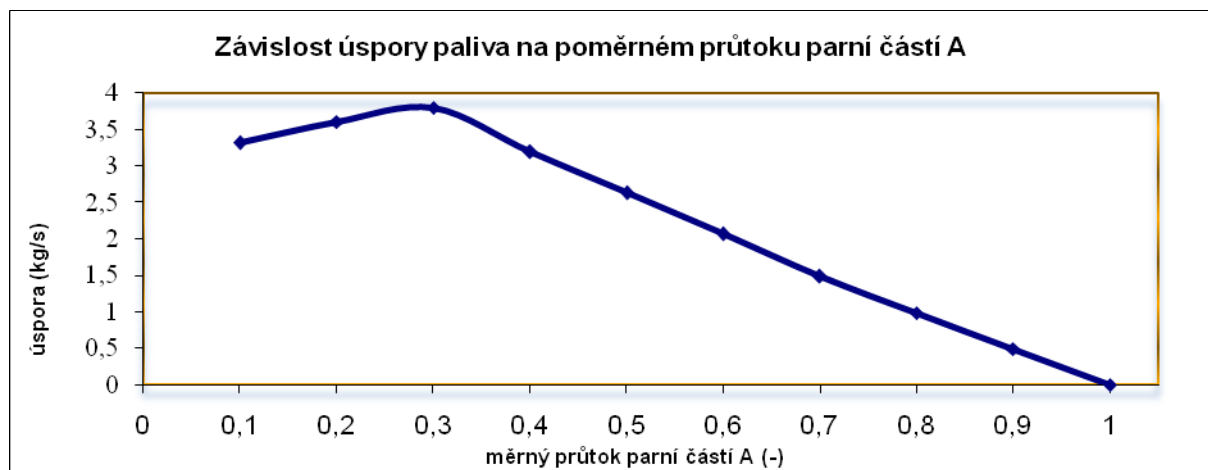
Graf 3.1



Graf 3.2



Graf 3.3



Graf 3.4

4. Ekonomická bilance zvolené plynové turbíny v daném oběhu

4. 1 Kritéria hodnocení technicko-ekonomické efektivity

- 1) Kritérium **čisté současné hodnoty**, které udává celkové množství financí, které přinese hodnocený projekt při respektování časové hodnoty peněz

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_P-1} CF_t \times (1+d)^{-t} \quad (3)$$

- 2) Kritérium **vnitřního výnosového procenta**, které vyjadřuje měrnou výnosnost projektu při respektování časové hodnoty peněz

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_P-1} CF_t \times (1+IRR)^{-t} = 0 \quad (4)$$

- 3) Kritérium **dobu návratnosti**, které udává dobu, za kterou jsou uhrazeny investiční výdaje do projektu

$$\sum_{t=0}^{T_P-1} CF_t \times (1+d)^{-t} = 0 \quad (5)$$

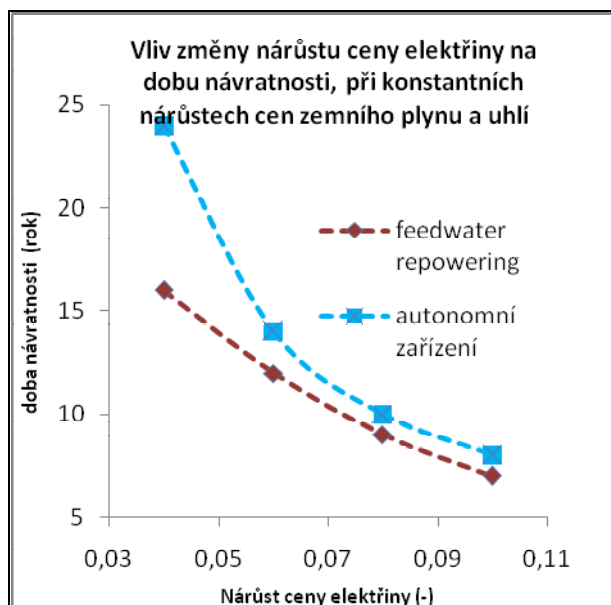
Pro ekonomickou bilanci bylo zvoleno ekonomické kritérium doby návratnosti, u něhož se zkoumá vliv změny nárůstu cen zemního plynu, elektřiny a uhlí na dobu návratnosti pro spalovací turbínu Trent 60 DWE zapojenou ve feedwateru repoweringu a jako autonomní zařízení.

4.2 Základní předpoklady ekonomické analýzy

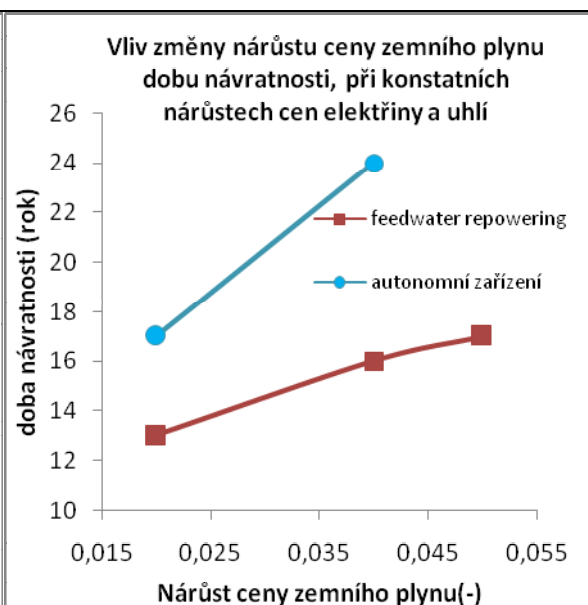
Základními předpoklady pro ekonomickou analýzu jsou realizace celé investice pomocí úvěru, který je úročen fixním úrokem 6% po celou dobu splácení a bude splácen po dobu odpisování celého zařízení a to podle Zákona o dani z příjmu 10 let, jelikož turbosoustrojí i KNOT a s ním související potrubní trasy se nacházejí ve 3. odpisové skupině. Odpisy budou lineární s koeficienty pro první rok $K_1=5,5\%$ a po další roky $K_2=10,5\%$. Energetický průmysl je relativně málo rizikový, a proto byla stanovena hodnota diskontní sazby ve výši 8%. Doba životnosti zařízení je 25 let. Cena turbosoustrojí je uvedena v devizové měně (dolarech) a byla přepočítána na české koruny pomocí devizového kurzu dolaru ze dne 8.4.2008 ve výši 15,919 Kč/\$. Dále se pro tento výpočet zohledňuje růst cen zemního plynu,

uhlí a elektřiny pomocí každoročního skokového nárůstu. Cena elektřiny je stanovena na 1200 Kč/MWe. Uvažuje se daň z příjmu právnických osob ve výši 19%.

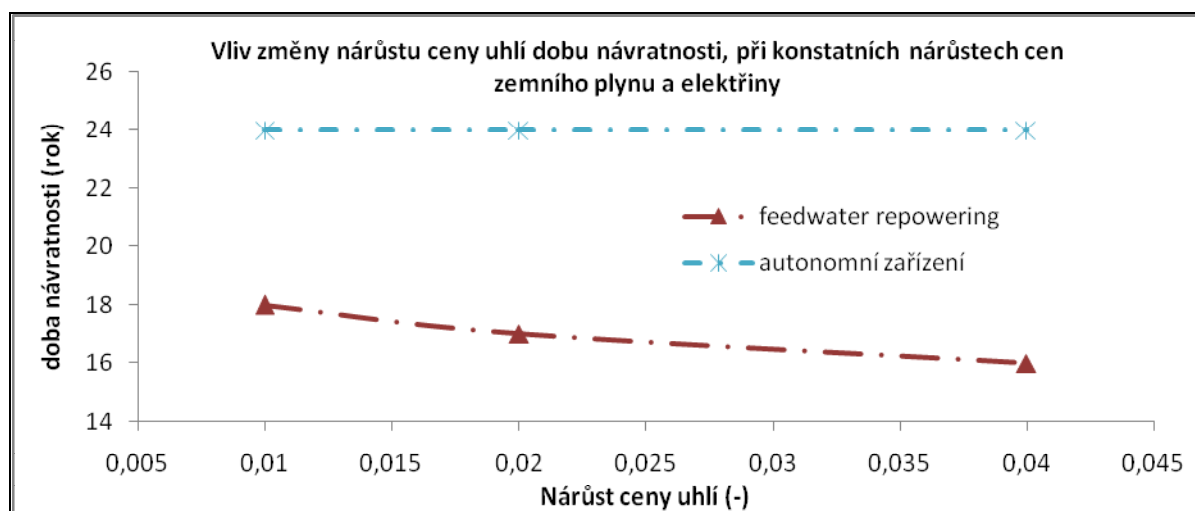
4.3 Závislosti změny nárůstu cen na době návratnosti



Graf 4.3.1



Graf 4.3.2



Graf 4.3.3

U obou dvou variant se projevuje závislost na výši nárůstu cen elektřiny, zemního plynu a uhlí. Čím rychlejší bude nárůst ceny elektřiny oproti nárůstu cen zemního plynu a uhlí, tím budou mít obě varianty bližší hodnoty doby návratnosti, která klesá viz graf 4.3.1. To způsobuje snižování ekonomické efektivity zapojení v repoweringu vůči samostatnému zařízení. Při rychlejším růstu ceny uhlí oproti růstu cen zemního plynu a elektřiny, zůstává doba návratnosti samostatné plynové konstantní, v repoweringu klesá s malým gradientem, viz graf 4.3.3.. Při zvyšování ceny zemního plynu dochází ke zvyšování doby návratnosti a ke

snižování ekonomické efektivnosti využívání zemního plynu až do doby, kdy se ani využití spalovací turbíny v repoweringu nevyplatí, viz graf 4.3.2.

5. Závěr:

Využití spalovací turbíny v parním oběhu navyšuje při zachování konstantního svorkového výkonu a teploty napájecí vody účinnost parního cyklu a snižuje spotřebu primárního paliva - uhlí - za cenu spotřeby dražšího paliva zemního plynu. Jako nejvýhodnější zapojení spalovací turbíny pro FR byla zvolena varianta dvoutlakého horkovodního KNOT s odběrem napájecí vody za druhým regeneračním výměníkem. Z technického porovnání byla vybrána spalovací turbína firmy Rolls-Royce o výkonu 58 MWe se vstřikem demineralizované vody do spalovací komory s účinností 40,69 %. Nejvyšší účinnost a tedy i nejnižší spotřeba uhlí byla modelovými výpočty stanovena při průtoku 70% napájecí vody přes KNOT. Se zvyšujícím se průtokem napájecí vody přes KNOT se zvyšuje i průtok páry posledním stupněm NT a kondenzátorem, což způsobuje zvyšování tlaku v něm, při konstantních parametrech chladící vody. Z ekonomického porovnání vyplynulo, že při trendu rostoucích cen uhlí a elektřiny má zapojení do repoweringu vyšší ekonomickou efektivitu, než samostatná spalovací turbína. Tento pozitivní vliv bude tím větší, čím bude růst rychleji ceny elektřiny a uhlí oproti ceně zemního plynu.

Použitá literatura:

- [1] Ing. Zdeněk Hrdina: *Tepelné schéma*, autocadový výkres, Praha, 2007
- [2] ÚJV Řež, a. s. – divize Energoprojekt, materiály s informacemi k obnově elektrárny Pruněrov II, , Praha, 2007
- [3] Zbyněk Ibler a kolektiv : *Technický průvodce energetika, 1. díl* , Technická literatura BEN, Praha, 2002
- [4] Zbyněk Ibler a kolektiv : *Energetika v příkladech – technický průvodce energetika . 2. díl*, Technická literatura BEN, Praha, 2003
- [5] Doc. Ing. Tomáš Dlouhý : *Kritéria technicko ekonomické efektivnosti s využitím toku hotovosti*, Provoz a ekonomie energetických zařízení přednáška č. 5, Praha, 2008
- [6] *Simple Cycle Prices*, Gas Turbine World 2007-08 GTW Handbook, Combustion, Energy & Steam Specialists Ltd, 2008, str. 30-32
- [7] *Simple Cycle Ratings*, Gas Turbine World 2007-08 GTW Handbook, Combustion, Energy & Steam Specialists Ltd, 2008, str. 61-70
- [8] *Combined Cycle Ratings*, Gas Turbine World 2007-08 GTW Handbook, Combustion, Energy & Steam Specialists Ltd, 2008, str. 74-81

Použité symboly:

CF_t - tok hotovosti v roce t

t - rok porovnání

d - diskontní sazba

m_{pp} - průtok napájecí vody parní regenerací

m_{sp} - průtok napájecí vody spalínovou regenerací v KNOT