



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

HODNOCENÍ KOGENERAČNÍCH SYSTÉMŮ U JEDNOTEK EVO

EVALUATION OF COGENERATION UNITS IN WASTE-TO-ENERGY PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Chýlek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Ferdan

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Martin Chýlek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Ferdan
Akademický rok:	2015/16

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:

Hodnocení kogeneračních systémů u jednotek EVO

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET) se stala obecně uznávaným prostředkem vedoucím k úsporám ve spotřebě primární energie a ke snížení zatížení životního prostředí. Potřeby elektrické energie a užitného tepla v moderní době jsou neoddiskutovatelné. Obě formy energie lze vyrábět buď odděleně, potom je zpravidla výroba elektrické energie zatížena značnými energetickými ztrátami, a nebo za vhodných podmínek i sdruženě (kombinovaně), kdy lze užitečně využít menší či větší část odpadního tepla z výroby elektřiny. KVET je pak hojně využívána u zařízení na energetické využití odpadů (EVO), jejichž hodnocení bude náplní této práce.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat stručný úvod do problematiky kogenerace a energetického využití odpadů.

Popsat různé možnosti společné výroby tepla a elektřiny u jednotek EVO.

Seznámit se s legislativou hodnocení KVET.

Sestavit různé druhy variant uspořádání technologie.

Namodelovat jednotlivé varianty v softwaru W2E.

Aplikovat výpočet KVET a UPE u navržených modelových příkladů.

Seznam literatury:

Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 453/2012 Sb. ze dne 13. 12. 2012 o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů. Sbírka zákonů ČR. Částka 169/2012.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Smyslem této bakalářské práce je seznámení se s legislativou hodnocení KVET a objevení jejích problematických bodů. Dalším cílem je vytvoření obecného modelu spalovny a aplikace výpočtu uvedeného v legislativě na různé varianty uspořádání technologie. Závěr práce se věnuje analýze získaných výsledků a vyvození patřičných závěrů.

Klíčová slova

Kogenerace, KVET, UPE, energetické využití odpadů, spalovna, parní turbína, W2E

Abstract

The purpose of this bachelor thesis is familiarization with legislation of evaluating combined heat and power generation systems and discover it's questionable spots. Another objective is to make universal model of incineration plant and to apply calculation mentioned in legislation on various options of technology. The end of thesis is devoted to analysis of results.

Key words

Cogeneration, combined heat and power generation, primary energy saving, waste to energy treatment, incineration plant, steam turbine, W2E

Bibliografická citace

CHÝLEK, M. *Hodnocení kogeneračních systémů u jednotek EVO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Ferdan.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedených zdrojů. Dále prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, a že nedošlo k porušení autorských práv (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 26. 5. 2016

.....

Podpis

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Tomáši Ferdanovi za cenné připomínky, rady, trpělivost a vstřícnost při vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Kogenerace.....	13
2.1	Princip kogenerace	13
2.2	Typy kogenerační výroby.....	13
3	Energetické využití odpadu.....	15
3.1	Spalovna odpadu	15
3.2	Vedlejší produkty spalování odpadu	16
4	Parní turbíny.....	17
4.1	Kondenzační turbína	17
4.2	Protitlaková turbína	18
4.3	Odběrová turbína.....	18
5	Legislativa hodnocení KVET.....	19
5.1	Způsob stanovení celkové účinnosti a určení množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla	19
5.2	Způsob určení úspory primární energie při kombinované výrobě elektřiny a tepla	20
6	Postup vytváření modelu a počítání	21
6.1	Vytváření modelu v softwaru W2E.....	21
6.2	Postup měření a výpočtu úspory primární energie, celkové účinnosti a množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla.....	25
6.3	Zapisování a počítání hodnot	27
7	Vyhodnocení vypočtených hodnot.....	28
8	Vliv rozmlžení vstupních parametrů.....	31
9	Závěr	34
	Seznam použitých zdrojů	35
	Seznam použitých symbolů a zkratk	36
	Přílohy	39

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Srovnání využití energie v palivu	13
Obr. 2: Hierarchie nakládání s odpady	15
Obr. 3: Schéma kondenzační turbíny	17
Obr. 4: Schéma protitlakové turbíny	18
Obr. 5: Schéma odběrové turbíny	18
Obr. 6: Schéma kotle	21
Obr. 7: HRSG	22
Obr. 8: Schéma kondenzační odběrové turbíny	22
Obr. 9: Výměník	23
Obr. 10: Mísení výstupních proudů	23
Obr. 11: Schéma technologického odběru	24
Obr. 12: Prodej ostré páry	24
Obr. 13: Napájecí voda pro kompenzaci prodeje	25
Obr. 14: Závislost UPE na E_{SV} pro prvních pět stavů	29
Obr. 15: Závislost UPE na E_{SV} pro zbylé stavy	30
Obr. 16: Vliv rozmlžení E_{SV} na UPE	31
Obr. 17: Vliv rozmlžení $Q_{UŽ}$ na UPE	31
Obr. 18: Vliv rozmlžení Q_{PAL_KJ} na UPE	32
Obr. 19: Vliv rozmlžení C_{SKUT} na UPE	32
Obr. 20: Vliv rozmlžení η_{E_NEKVET} na UPE	33

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Popisy jednotlivých křivek.....	28
Tabulka 2: Základní sazba ročního zeleného bonusu.....	30
Tabulka 3: Vliv rozmlžení vstupních parametrů na hodnotu UPE	33

1 Úvod

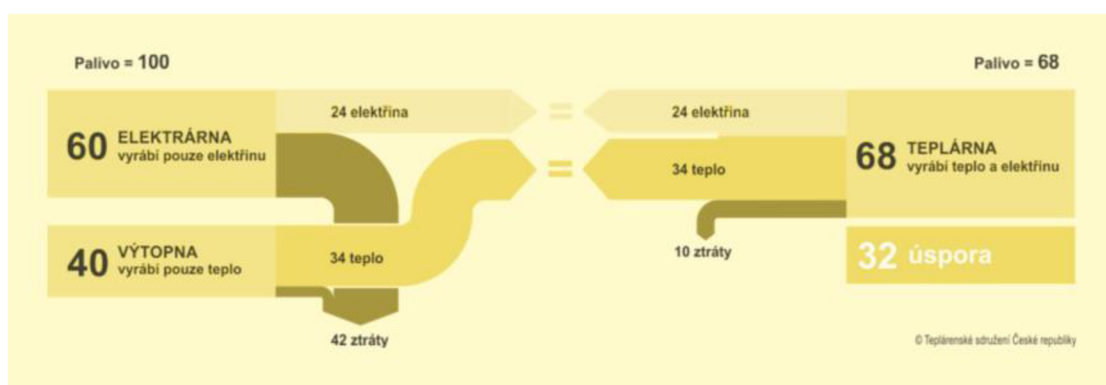
Na Zemi vzniká denně velké množství odpadu a nabízí se otázka, co s ním. Variant je několik a každá z nich má své výhody a nevýhody. Nejlepší by samozřejmě bylo, kdyby se veškerý odpad recykloval nebo vůbec nevytvořil, což by znamenalo vysokou úsporu primárních zdrojů. Bohužel v praxi je taková představa daleko od reality. Vzniká určitá složka odpadu, která nejde recyklovat, ať už kvůli jeho znečištění, nebo jeho stavu. Je několik možností, jak s touto složkou odpadu naložit. Nabízí se skládkování, což je ovšem nejhorší způsob, jak se odpadu zbavit. Skládky znečišťují ovzduší, vodu a svým vzhledem hyzdí krajinu. Odpad se přitom po určité úpravě může stát palivem s relativně dobrou výhřevností. Díky tomu je ho možno využít ve spalovnách pro výrobu energie.

U výroby energie je velice důležitým parametrem její účinnost. V současné době už technologie dovolují velice vysokou účinnost při výrobě elektřiny a tepla, avšak nevyšší účinnosti lze dosáhnout, když se elektřina a teplo vyrábí kombinovaně. Tento typ výroby se nazývá kogenerace. Pro svou vysokou účinnost je tato výroba podporována ze strany státu. V legislativě jsou zakotveny podmínky, které určují přidělení finanční podpory. Bohužel současná forma vyhlášky není dokonalá a obsahuje určité nesrovnalosti a nedokonalosti, které dokáží výrazně zkreslit výpočet důležitých parametrů.

V této práci bude zpracována problematika získávání jednotlivých parametrů legislativy a určení problémových bodů výpočtu. K získání hodnot potřebných k výpočtu bude potřeba softwarový model. Bude vytvořen model spalovny, která pracuje v režimu kogenerace. Pomocí tohoto modelu budou simulovány různé podmínky reálného provozu a získaná data budou předmětem další analýzy.

2 Kogenerace

Slovo kogenerace pochází z anglického výrazu co-generation a znamená společnou výrobu elektřiny a tepla. Je to efektivní, spolehlivý a především ekologicky šetrný způsob výroby elektrické energie, při které dochází současně k výrobě tepla. Hlavní výhodou kogenerace je především vysoká účinnost využití energie obsažené v palivu. Vysoké úspory paliva (Obr. 1) vedou ke snížení nákladů na výrobu elektřiny a tepla. S vysokou účinností je samozřejmě spojeno i zmenšení množství emisí a skleníkových plynů unikajících do ovzduší. Díky velkému výkonovému rozsahu se v energetice otevírá příležitost k decentralizaci výroby elektřiny a tepla. Decentralizace výroby energie by znamenala rozvoj zařízení se spíše menšími výkony, které by lépe reagovaly na požadavky koncových spotřebitelů. K významným nevýhodám patří snad jen poměrně vysoké pořizovací náklady. [1,2]



Obr. 1: Srovnání využití energie v palivu [1]

2.1 Princip kogenerace

Jak už bylo řečeno, kogenerace se od obyčejné výroby elektřiny liší především efektivním využitím tepla, které při klasické výrobě elektřiny vzniká. Nejprve se vyrobí elektrická energie, následně se využije odpadní teplo pro vytápění, ohřev vody nebo pro technologické účely. Pokud by se teplo vyrobené v kotli využilo přímo pro výše zmíněné účely, aniž by nejdříve prošlo zařízením pro výrobu elektřiny (např. turbína s generátorem), nelze celý systém považovat za kogeneraci.

Kogenerační jednotky jsou vyráběny v širokém výkonovém rozsahu (od jednotek kWe až po stovky MWe). To znamená, že mohou být využity jak pro zásobování velkých měst, přes průmyslové podniky až po rodinné domy. Kogenerační jednotky mohou využívat rozličná paliva jako je uhlí, zemní plyn, topné oleje nebo biomasa. [1]

2.2 Typy kogenerační výroby

Parní kombinovaná výroba elektřiny a tepla se provádí prostřednictvím páry vyrobené v parním kotli spalováním různých paliv (uhlí, biomasa, odpad). Pára se přivádí na protitlakovou nebo kondenzační odběrovou turbínu, kterými se pohání generátor elektrické energie. U odběrové turbíny je pára odebírána po částečné expanzi za jiným, než posledním stupněm turbíny. Po délce turbíny může být takových odběrů několik, každý z nich má jiné parametry páry. V případě protitlakové turbíny se pára odebírá až po úplné expanzi za posledním stupněm turbíny. [2,3,4]

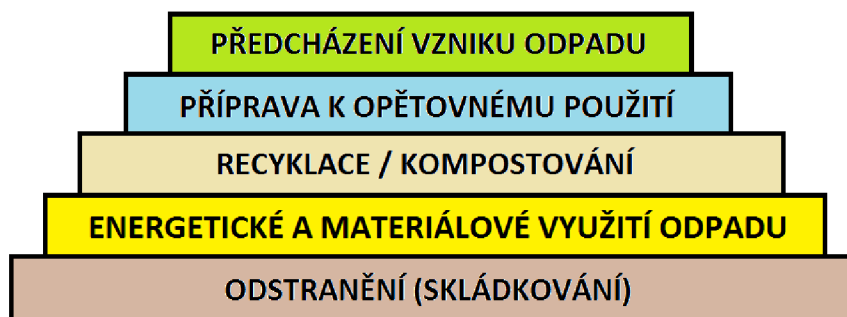
Paroplynová kombinovaná výroba elektřiny a tepla se skládá ze spalovací a parní turbíny. Ve spalovací turbíně se spaluje zemní plyn nebo bioplyn. Vzniklé spaliny mají dostatečně vysokou teplotu, aby vytvořily páru s potřebnými parametry pro parní turbínu. Elektrická energie se vyrábí v generátorech připojených na obě turbíny. Tepelná energie se získává ve výměníku, ve kterém kondenzuje pára přiváděná z posledního stupně parní turbíny. [2,3,4]

Kogenerační jednotka se spalovacím motorem se skládá ze zážehového spalovacího motoru, který pohání generátor a z výměníků pro využití tepla. Tyto jednoty se instalují především tam, kde je potřeba menšího instalovaného výkonu, např. nemocnice, hotely, průmyslové provozy atd. V motorech se spaluje především zemní plyn, bioplyn nebo důlní plyn. Užitečné teplo se získává ze dvou výměníků. Jeden z nich je výměník motorového okruhu, který zajišťuje chlazení motoru. Emise ze spalování plynu jsou nejdříve vyčištěny a poté odevzdají svoji tepelnou energii ve spalinovém výměníku. [2,3]

Vyhláška č. 37/2016 Sb. o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů kromě výše uvedených klasifikuje jako zařízení pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla také následující: plynová turbína s dodávkou tepla, mikroturbína, Stirlingův motor, palivový článek, parní stroj a organický Rankinův cyklus. Jejich využití není tak rozšířené jako u výše uvedených. [5]

3 Energetické využití odpadu

Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 stanovila novou hierarchii nakládání s odpady a ta se stala také součástí odpadového zákona v České Republice a je zobrazena na následujícím obrázku (Obr 2.). [6]



Obr. 2: Hierarchie nakládání s odpady [6]

Energetické využití odpadu (především spalování s využitím energie je až na předposledním místě, avšak skládkování, které je ze všech způsobů likvidace odpadu nejhorší, je bohužel v České Republice ten nejrozšířenější způsob nakládání s odpady. Směrnice Evropského parlamentu a Rady po členských státech požaduje, aby omezily skládkování odpadů. Jediný možný způsob jak zpracovat zbytkový odpad po vytrídění všech využitelných složek, je energetické využití. [6]

3.1 Spalovna odpadu

Termické zpracování odpadu znamená využití odpadu jako paliva v zařízení k tomu určeném. Pokud je uvolněná energie po spalování dále využita pro výrobu elektřiny nebo tepla, jedná se o tzv. energetické využití odpadu. Pokud je odpad pouze spálen, bez dalšího využití energie, tak se jedná pouze o odstranění odpadu a v hierarchii nakládání s odpady je tento způsob řazen až na poslední místo. Princip fungování spalovny s energetickým využitím energie v palivu by mohl být přirovnán k uhelné elektrárně s tím rozdílem, že místo fosilních paliv (neobnovitelných zdrojů) se spaluje nevytríditelná složka komunálního odpadu. [7]

Přivezený odpad se ukládá do různých zásobníků podle druhu odpadu. Obsluha jeřábu poté plní drtící zařízení požadovanou směsí odpadu. Z drtiče je odpad přesunován dopravníkem přímo do kotle, kde je spalován na speciálních roštích pro docílení co možná nejlepšího spalování. Odpad prochází na roštu fází zahřívání, vysoušení, zplyňování, hoření a dohoření. Teplota v ohništi dosahuje 850-1100 °C, což je nutná podmínka pro dostatečnou destrukci všech organických složek. Produkt zbylý po spálení odpadu se nazývá škvára. Ta je uhašena, zchlazena a dopravena do zásobníku škváry. Přehřátá pára vzniklá v kotli prochází protitlakovou nebo kondenzační odběrovou turbínou. To zajišťuje výrobu elektřiny a podle typu turbíny i odběr páry např. pro vytápění části města nebo technologické účely. Nezbytnou součástí celého procesu je samozřejmě čištění spalin. To se provádí v několika stupních a zajišťuje redukci oxidů dusíku, těžkých kovů, kyselých složek a mechanických nečistot ve spalinách. Je nutno zmínit, že se ačkoliv mezi širokou veřejností často setkáváme s odporem vůči zařízením na energetické využití odpadu, především z obav o zvýšené množství emisí, mají tato zařízení velmi přísné emisní limity, které jsou několikrát přísnější než například u uhelné elektrárny. [7]

3.2 Vedlejší produkty spalování odpadu

Jak už bylo řečeno, produktem spalování je škvára. Z té se po ochlazení vyberou barevné kovy, které přišly do ohniště s odpadem. Kovy následně směřují do hutí, kde se znovu využijí. Čistá škvára se používá k pomocným stavebním účelům (podsypy při budování cest apod.) a nevyužitelný zbytek je ukládán na skládku. Kromě škváry z kotle vzniká v procesu čištění spalin popílek. Ten se nechá promývat procesní vodou z pračky spalin, přičemž se z něj odstraní rozpustné soli a extrahovatelné kovy. Takto upravený popílek se také používá ke stavebním účelům. [8]

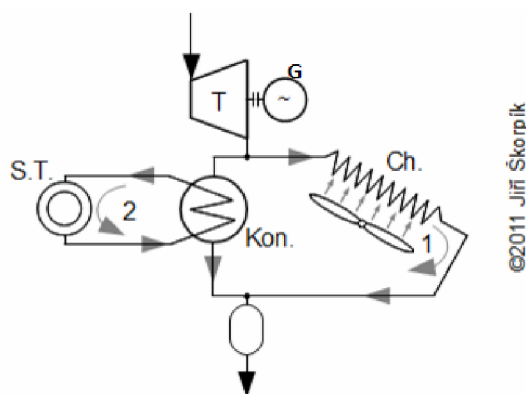
4 Parní turbíny

Kogenerace je dobře realizovatelná pomocí parních turbín, protože umožňují efektivní využití energie v palivu. Energie paliva se spálením předá páře, která je pracovní látkou turbíny a zároveň z ní lze pomocí tepelných výměníků získat teplo.

Parní turbína je tepelný lopatkový rotační motor, v němž se mechanická energie získává expanzí vodní páry. Turbína se zpravidla nachází na společné hřídeli s generátorem elektrické energie. Pracovní látkou je tedy nejčastěji vodní pára. V uhelných elektrárnách může být pára o teplotě kolem 535 °C a tlaku 16 MPa, u nadkritických elektráren až 650 °C a 28 MPa. Ve spalovnách jsou parametry páry nižší. To je dáno horší výhřevností odpadu a potřebou udržovat určitou maximální hodnotu teploty v kotli pro správné spalování odpadu. Vliv na teplotu v kotli má také jev zvaný vysokoteplotní koroze, který je způsoben vyšším obsahem chloru v palivu. Teplota páry ve spalovně se pohybuje od 235 °C do 400 °C a tlak se pohybuje od 1,3 do 4 MPa. Podle zapojení turbíny hovoříme o kondenzační, protitlakové nebo odběrové turbíně. [4]

4.1 Kondenzační turbína

Pro kondenzační odběrové turbíny je typické, že kondenzátor je zapojen přímo za turbínou (Obr. 3). Minimální teploty kondenzace se pohybují už od 15°C, tomu odpovídá tlak zhruba 0,002 MPa. Tomuto způsobu se říká expanze do vakua. Pokud ale chceme využívat tepelnou energii v kondenzátu, je potřeba, aby jeho teplota při výstupu z turbíny byla 80-90 °C. Takovému způsobu kondenzace říkáme, že turbína pracuje v režimu s potlačenou kondenzací. [4]

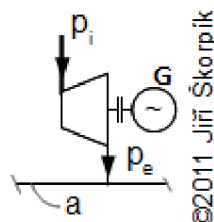


- 1 - chladicí smyčka kondenzátoru pro udržování co nejnižšího tlaku kondenzace
- 2 - chladicí smyčka pro případ potlačené kondenzace
- T - parní turbína
- Ch. - chladičí zařízení
- Kon. - kondenzátor
- S.T. - spotřebič tepla
- G - generátor

Obr. 3: Schéma kondenzační turbíny [4]

4.2 Protitlaková turbína

U tohoto typu turbíny není na výstupu kondenzátor, ale parovod (Obr. 4). Pára se dále využívá na další účely, jako vytápění nebo průmyslové potřeby. Tlak páry v protitlaku (na výstupu z turbíny) se pohybuje v rozmezí 0,1-0,25 MPa. [4]

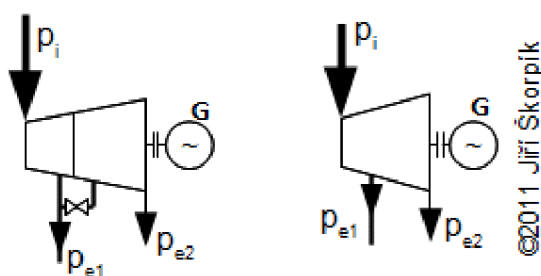


a - parovod
p_i - vstupní tlak
p_e - výstupní tlak
G - generátor

Obr. 4: Schéma protitlakové turbíny [4]

4.3 Odběrová turbína

Část páry se odebírá po částečné expanzi za jiným než posledním stupněm turbíny. Takových odběrů může být po délce turbíny realizováno několik. Podle regulace rozlišujeme regulovaný a neregulovaný odběr páry (Obr. 5). Regulovaný odběr se používá pro topné nebo technologické účely, které vyžadují páru o vyšším tlaku než je výstupní tlak turbíny. Výhodou této technologie je možnost provozovat turbínu jako kondenzační (když není potřeba odběru páry), nebo jako odběrovou (když je potřeba odběru). Neregulované odběry se používají především k regeneraci tepla. [4]



Vlevo turbína s regulovaným odběrem, vpravo turbína s neregulovaným odběrem.

Obr. 5: Schéma odběrové turbíny [4]

5 Legislativa hodnocení KVET

Legislativa je základní zdroj, ze kterého se vychází při určování parametrů kombinované výroby elektřiny a tepla. V následující kapitole budou uvedeny základní definice a vztahy pro jejich výpočet.

Původní Vyhláška č. 453/2012 Sb. ze dne 13. 12. 2012 o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů byla zrušena dne 29. 1. 2016 a byla nahrazena Vyhláškou č. 37/2016 Sb. (Vyhláška o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů s účinností od 29. 1. 2016), se kterou bude pracováno v této bakalářské práci. Stěžejní části vyhlášky jsou přílohy 1 a 2, které určují způsob určení množství elektřiny z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a způsob výpočtu úspory primární energie. Dalším užitým legislativním dokumentem je Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 9/2015, které upravuje výši podpory pro elektřinu z kombinované výroby elektřiny a tepla. [5,9]

5.1 Způsob stanovení celkové účinnosti a určení množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla

Celková účinnost kogenerační jednotky η_{celk} se stanoví podle vzorce

$$\eta_{\text{celk}} = \frac{(E_{\text{sv}} + Q_{\text{už}})}{Q_{\text{PAL KJ}}} \quad (1.1)$$

Kde:

E_{sv} je množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů [MWh]

$Q_{\text{už}}$ je množství užitečného tepla (např. teplo dodané do soustavy zásobování tepelnou energií, teplo použité pro přímé vytápění nebo potřeby sušení) [MWh]

$Q_{\text{PAL KJ}}$ je množství celkového paliva [MWh]

Podle § 3 odst. 6 je referenční hodnota celkové účinnosti nejméně 75 % pro protitlakovou turbínu a nejméně 80 % pro kondenzační odběrovou turbínu. Pokud je celková účinnost nižší než tato referenční hodnota, vypočítá se množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla podle následujícího vzorce:

$$E_{\text{KVET}} = Q_{\text{už}} \cdot C_{\text{SKUT}} \quad (1.2)$$

Kde:

E_{KVET} je množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla [MWh]

$Q_{\text{už}}$ je množství užitečného tepla [MWh]

C_{SKUT} je poměr elektřiny a tepla [-]

$$C_{SKUT} = \frac{(E_{SV1} - E_{SV2})}{Q_{U\check{Z}}} \quad (1.3)$$

Kde:

E_{SV1} je množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu s nejvyšší v běžném provozu dosažitelnou výrobou užitečného tepla $Q_{U\check{Z}}$ a současně při nejvyšší v běžném provozu dosažitelné spotřebě paliva [MWh]

E_{SV2} je množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu vycházejícím z provozního stavu měření E_{SV1} , kdy je zastavena dodávka užitečného tepla a dodávka paliva je snížena takovým způsobem, aby produkce jiného než užitečného tepla byla totožná s provozním stavem při stanovení E_{SV1} [MWh]

$Q_{U\check{Z}}$ je množství užitečného tepla [MWh].

Podrobnější postup pro určování E_{SV1} a E_{SV2} bude popsán v kapitole 6. [5]

5.2 Způsob určení úspory primární energie při kombinované výrobě elektřiny a tepla

Výše úspory primární energie (UPE) při kombinované výrobě elektřiny a tepla se pro kogenerační jednotku vypočte podle vzorce:

$$UPE = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{\eta_q^T}{\eta_r^V} + \frac{\eta_{er}^T}{\eta_r^E} \right)} \right] \cdot 100 \quad (1.4)$$

Příčemž dílčí účinnosti výroby tepla η_q^T a elektřiny η_e^T se stanoví podle vzorců:

$$\eta_q^T = \frac{Q_{U\check{Z}}}{Q_{PAL\ KVET}} \quad (1.5)$$

$$\eta_e^T = \frac{E_{KVET}}{Q_{PAL\ KVET}} \quad (1.6)$$

$Q_{PAL\ KVET}$ je část množství celkového paliva připadající na výrobu elektřiny pocházející z kombinované výroby elektřiny a tepla, mechanické energie a užitečného tepla [MWh] a stanoví se soustavou dalších výpočtů, jejichž základem jsou E_{SV} (množství vyrobené elektřiny) a $Q_{PAL\ KJ}$ (množství celkového paliva).

η_r^V je harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu tepla
 η_r^E je harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny

Tyto hodnoty jsou tabulkové a jsou uvedeny v Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2015/2402. Pro komunální a průmyslový odpad (neobnovitelný) a obnovitelný/biologicky rozložitelný odpad je hodnota $\eta_r^E = 0,25$ a $\eta_r^V = 0,8$ pro zařízení s rokem výstavby od r. 2016. [5,10]

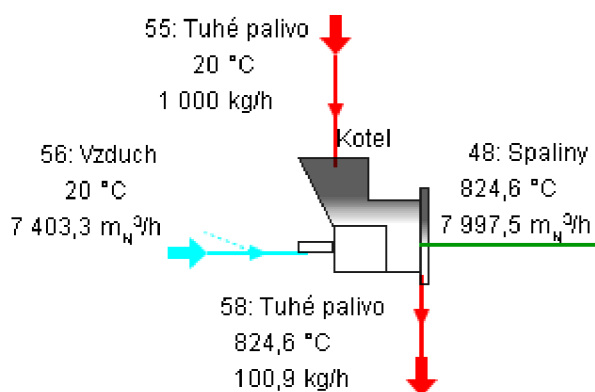
6 Postup vytváření modelu a počítání

Jelikož nebyly k dispozici parametry z reálného provozu, bylo potřeba zajistit tyto parametry z modelu, který věrohodně simuluje skutečné podmínky. K vytvoření tohoto modelu posloužil software, který dokáže vytvořit model spalovny s využitím energie. Hlavním programem použitým k modelování byl software W2E (Waste to Energy). Je to nástroj pro modelování a simulaci technologických procesů v oblasti energetického využití odpadů a biomasy. [11]

6.1 Vytváření modelu v softwaru W2E

Po seznámení se s pracovním prostředím softwaru bylo potřeba vytvořit funkční model spalovny odpadu s kondenzační odběrovou turbínou. Model se vytváří vkládáním jednotlivých bloků, definováním jejich vlastností a parametrů a posléze spojováním těchto bloků jednotlivými proudy.

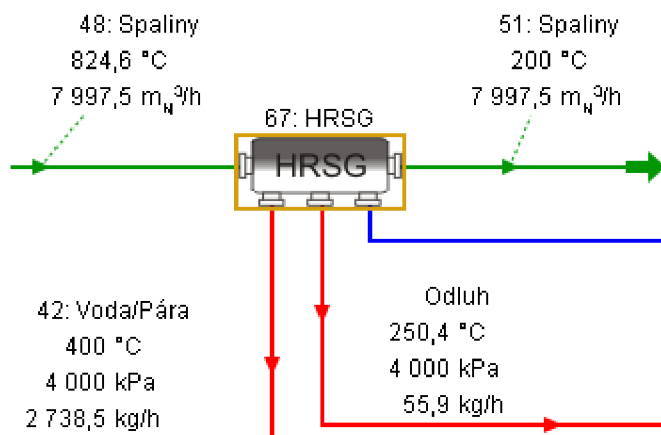
Jako první byl vložen blok, který simuluje kotel ve spalovně (Obr. 6). Hlavní vstupní parametry jsou vlastnosti paliva, a to konkrétně jeho průtok a LHV (výhřevnost). Hodnota výhřevnosti byla stanovena na 10 MJ/kg a hodnota průtoku 1000 kg/h. Další zadané hodnoty byly vlastnosti vzduchu, konkrétně teplota, tlak a množství. Ze zadaných hodnot software vypočítá příslušné parametry výstupního proudu - 48:Spaliny. Proudů a bloků jsou automaticky číslovány pro lepší orientaci ve schématu.



Obr. 6: Schéma kotle

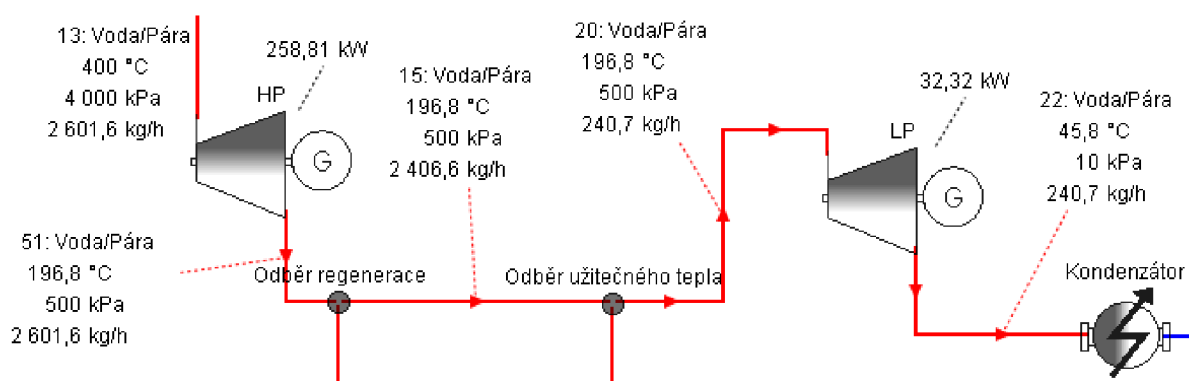
Dalším blokem ve schématu je blok s názvem HRSG (heat recovery steam generator), který zastupuje kotel a odpadní teplo (Obr. 7). Skládá se ze tří částí: ekonomizér - základní ohřev, výparník - vypařování média a přehřívák - přehřívání suché páry. Tento blok má tři výstupní proudy. Hlavní z nich je proud ostré páry, který dále postupuje směrem k turbíně. Další proudy jsou spaliny ochlazené na teplotu 200°C a odluh. V modelu byla hodnota odluhu nastavena na 2 %. Odluh se provádí kontinuálně při provozu zařízení a v systému plní funkci odsolování kotelní vody. Jediné parametry, které zadáváme, jsou teplota a tlak páry na výstupu, procenta odluhu a teplota spalin na výstupu. Ostatní parametry dopočítá software. Modrý proud,

který vstupuje do HRSG, je kondenzát, který se vrací z celého procesu zpět. V modelu jeho parametry vzniknou až na konci celého procesu.



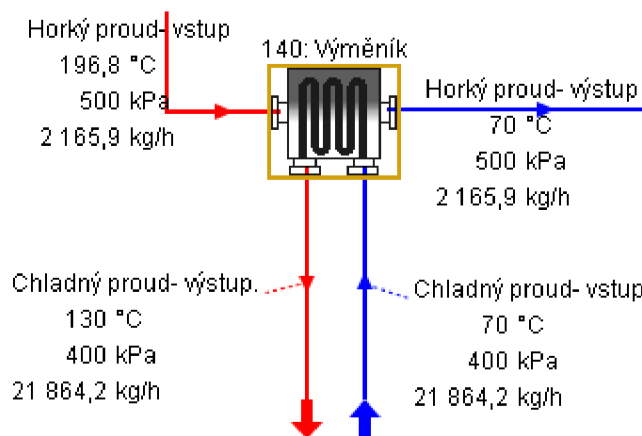
Obr. 7: HRSG

Následuje vytvoření kondenzační odběrové turbíny. Toho bylo docíleno vložení dvou bloků turbín, které symbolizují stupně turbíny. Mezi těmito stupni je odběr páry, který by ve skutečnosti byl realizován pouze jedním rozdělovačem, ovšem ve schématu jsou pro názornost namodelovány dva rozdělovače (Obr. 8). První je odběr pro regeneraci napájecí vody a druhý je pro odběr užitečného tepla. Jelikož se jedná o kondenzační odběrovou turbínu, za druhý stupeň turbíny byl umístěn kondenzátor. Zadávané parametry byly účinnosti a výstupní tlaky jednotlivých stupňů turbín a množství páry, které odchází do odběrů. U kondenzátoru byla definována pouze výstupní teplota.



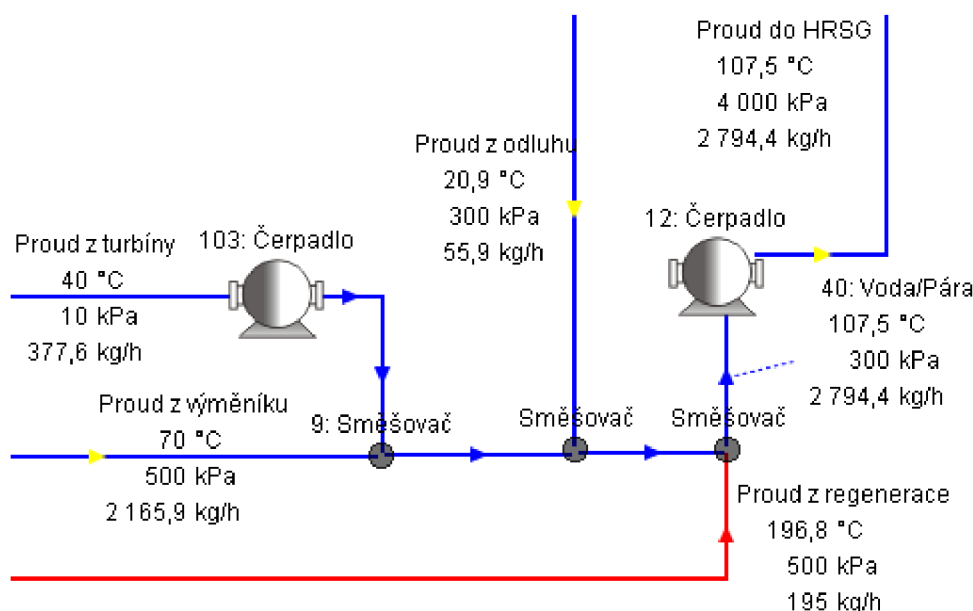
Obr. 8: Schéma kondenzační odběrové turbíny

Do proudu užitečného odběru tepla byl umístěn výměník (Obr. 9), který můžeme chápat jako např. teplo dodané do centrální soustavy zásobování teplem (CZT). V CZT se jako teplotné médium používá pára, nebo horká voda. Zpravidla z provozu na výrobu tepla (teplárna, spalovna atd.) odchází pára do výměnkových stanic. V nich se z páry získává horká voda, která je dále horkovody rozváděna po městě. Pomocí horké vody se v předávací stanici ohřeje voda, která má konečnou teplotu pro použití v domácnosti. Výměník ve schématu tedy znázorňuje výměnkovou stanici. Byl zadán tlak a teplota chladného proudu, což jsou parametry horkovodu a teplota výstupu horkého proudu.



Obr. 9: Výměník

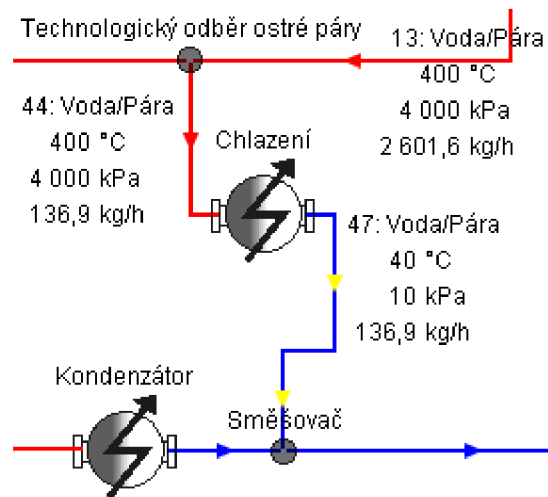
Proudy z turbíny, výměníku, regenerace a odluhu se spojí ve směšovačích a přes čerpadla se vrací jako napájecí voda zpět do HRSG (Obr. 10).



Obr. 10: Mísení výstupních proudů

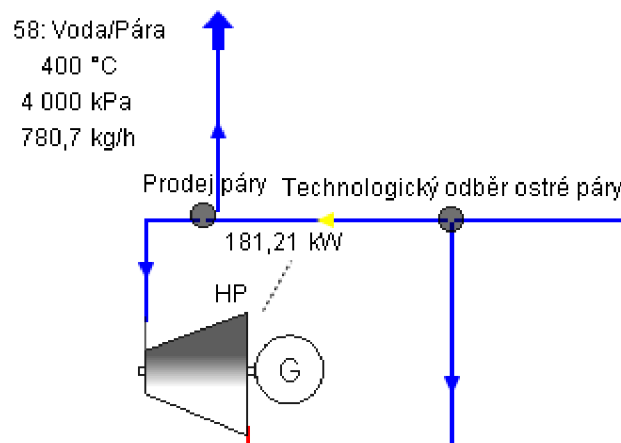
Dále bylo potřeba vytvořit technologický odběr ostré páry (Obr. 11) a prodej ostré páry (Obr. 12), které budou posléze sloužit k sestavování různých konfigurací simulace provozu spalovny. Konfigurace se budou provádět změnami průtoků do jednotlivých odběrů.

Technologický odběr byl vytvořen ještě před turbínou a odebírá dané procento z celkového průtoku páry. Blok Chlazení symbolizuje technologický proces, který má za následek ochlazení a zkondenzování páry. Kondenzát je přiveden za kondenzátor turbíny a pomocí směšovače je přidán do hlavního proudu.



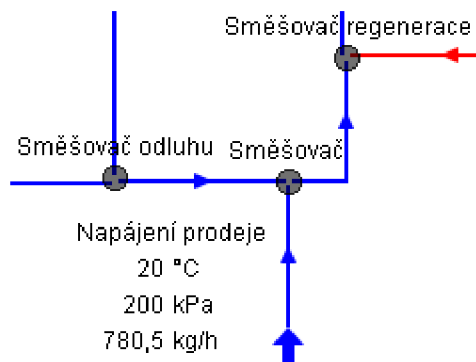
Obr. 11: Schéma technologického odběru

Obdobným způsobem byl realizován odběr prodeje ostré páry. Byl umístěn mezi technologický odběr a turbínu. Opět lze měnit množství páry, která odchází do prodeje.



Obr. 12: Prodej ostré páry

Bylo potřeba kompenzovat množství páry odebrané prodejem páry, proto byl přidán další směšovač před proud z regenerace, který doplní chybějící páru napájecí vodou (Obr. 13).



Obr. 13: Napájecí voda pro kompenzaci prodeje

Tímto bylo schéma hotovo a mohlo se použít k simulaci různých provozních stavů. Celé schéma je zobrazeno v Příloze 2. V následující kapitole bude popsán postup měření a výpočtu úspory primární energie a množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla.

6.2 Postup měření a výpočtu úspory primární energie, celkové účinnosti a množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla.

V softwaru Mathcad byla vytvořena posloupnost vzorců přesně podle vyhlášky 37/2016 Sb. (Příloha 1). Ve vzorcích se mění pouze pět vstupních parametrů, zbytek výsledků je konstantní, nebo je výsledkem výpočtů.

Proměnné vstupní parametry:

$$E_{SV} - \text{celkové množství vyrobené elektřiny [MWh] (P1.1)}$$

Tato hodnota byla získána sečtením elektrických výkonů obou stupňů turbíny.

$$Q_{UŽ} - \text{množství užitečného tepla [MWh] (P1.2)}$$

Část páry za kotlem (5-15 %) je odebírána do technologického odběru a část páry (10-30 %) do prodeje. Jelikož jsou tyto odběry ještě před turbínou, nelze teplo v nich obsažené počítat jako teplo z kombinované výroby elektřiny a tepla. $Q_{UŽ}$ je tedy jenom teplo získané ve výměníku (Obr. 9) z odběru za prvním stupněm turbíny.

$$Q_{PAL_KJ} - \text{celkové množství energie spotřebované na výrobu elektřiny} \\ \text{mechanické energie a užitečného tepla [MWh] (P1.5)}$$

Vynásobením průtoku paliva a LHV (výhřevnost paliva) bylo získáno Q_{PAL_KJ} . Ovšem tuto hodnotu je potřeba snížit o teplo, které odejde oběma odběry před turbínou (technologický odběr a prodej páry).

M_{P1} - množství páry, které prošlo prvním stupněm turbíny [t] (P1.6)

M_{P2} - množství páry, které prošlo druhým stupněm turbíny [t] (P1.7)

Jak je uvedeno v kapitole 5.1, k výpočtu je potřeba znát hodnoty E_{SV1} a E_{SV2} tyto hodnoty se zjistí měřením ze dvou specifických stavů, které bylo nutno namodelovat.

Vyhláška 37/2016 Sb. říká, že E_{SV1} je: „množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu s nejvyšší v běžném provozu dosažitelnou výrobou užitečného tepla $Q_{UŽ}$ a současně při nejvyšší v běžném provozu dosažitelné spotřebě paliva.“ [5]

V softwarovém modelu bylo tohoto stavu docíleno tak, že v odběru užitečného tepla bylo pouze 10 % průtoku posláno na druhý stupeň turbíny (minimální množství pro zajištění správné funkce turbíny) a zbytek páry šel do výměníku. Tím bylo zajištěno maximální možné dodávky užitečného tepla. Hodnota E_{SV1} je potom celkové množství elektřiny vyrobené na svorkách generátorů v tomto režimu.

E_{SV2} je: „množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu vycházejícím z provozního stavu měření E_{SV1} , kdy je zastavena dodávka užitečného tepla a dodávka paliva je snížena takovým způsobem, aby produkce jiného než užitečného tepla byla totožná s provozním stavem při stanovení E_{SV1} .“ V modelu to znamenalo úplně vymazat blok Výměník, který reprezentuje spotřebič užitečného tepla, a zachovat průtoky páry na druhý stupeň turbíny a do odběrů. Aby celý systém správně fungoval, bylo potřeba snížit hodnotu průtoku paliva v kotli, jinak by přes regeneraci proudilo příliš horké páry a napájecí voda by se změnila v páru. Hodnota E_{SV2} se potom rovná celkovému množství elektřiny vyrobené v této konfiguraci systému. [5]

Je zřejmé, že hodnota E_{SV2} bude menší než hodnota E_{SV1} . Jejich rozdíl podělený hodnotou užitečného tepla je jeden z nejdůležitějších parametrů při realizaci výpočtu a označuje se C_{SKUT} (rovnice 1.3).

$E_{SV\eta E_NEKVET}$ - v legislativě se tato hodnota označuje E_{SV} , ovšem v této práci bylo zavedeno označení $E_{SV\eta E_NEKVET}$ (viz. Příloha 1, rovnice P3.1). Původní označení je nepřesné, neboť v případě kondenzační odběrové turbíny se tato hodnota získává jinak než E_{SV} . Je to „množství elektřiny při nejvýše dosažitelném elektrickém výkonu v obvyklém provozu a současně provozované bez dodávky užitečného tepla.“ V modelu to znamenalo odstranění bloku Výměník a poslání veškeré možné páry na turbínu. $E_{SV\eta E_NEKVET}$ je potom množství elektřiny naměřené na svorkách generátorů v tomto režimu. [5]

Následně bylo potřeba zadat hodnoty, které se nemění pro všechny konfigurace schématu.

i_{VST} - entalpie páry na vstupu [MJ/kg] (P1.9)

i_{VST1} - entalpie páry na výstupu z prvního stupně turbíny [MJ/kg] (P1.10)

i_{VST2} - entalpie páry na výstupu z druhého stupně turbíny [MJ/kg] (P1.11)

Entalpie páry závisí pouze na tlakovém rozdílu a ne na průtoku. Jelikož tlakový rozdíl před a za jednotlivými stupni turbíny zůstal po celou dobu nezměněn, entalpie páry byla také konstantní po celou dobu.

η_r^V - výsledná harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu tepla [-] (P3.8)

η_r^E - výsledná harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny [-] (P3.9)

Harmonizované referenční hodnoty udává Nařízení komise v přenesené pravomoci 2015/2402 ze dne 12. října 2015. Pro komunální a průmyslový odpad (neobnovitelný) a obnovitelný/biologicky rozložitelný odpad je hodnota $\eta_r^E = 0,25$ a $\eta_r^V = 0,8$ pro zařízení s rokem výstavby od r. 2016. [5,10]

6.3 Zapisování a počítání hodnot

Všechny vypočítané hodnoty (Příloha 1) byly zapisovány do tabulek (Příloha 3-13) a to pro různé konfigurace. Nejdříve byly všechny varianty počítány bez změny E_{SV1} a E_{SV2} , poté s jejich změnou. To umožnilo zjistit, zda je potřeba při každé změně systému znovu měřit tyto dvě hodnoty. Celá tabulka má 99 sloupců. Předmětem dalších kapitol bude analýza a vyhodnocení těchto dat.

7 Vyhodnocení vypočtených hodnot

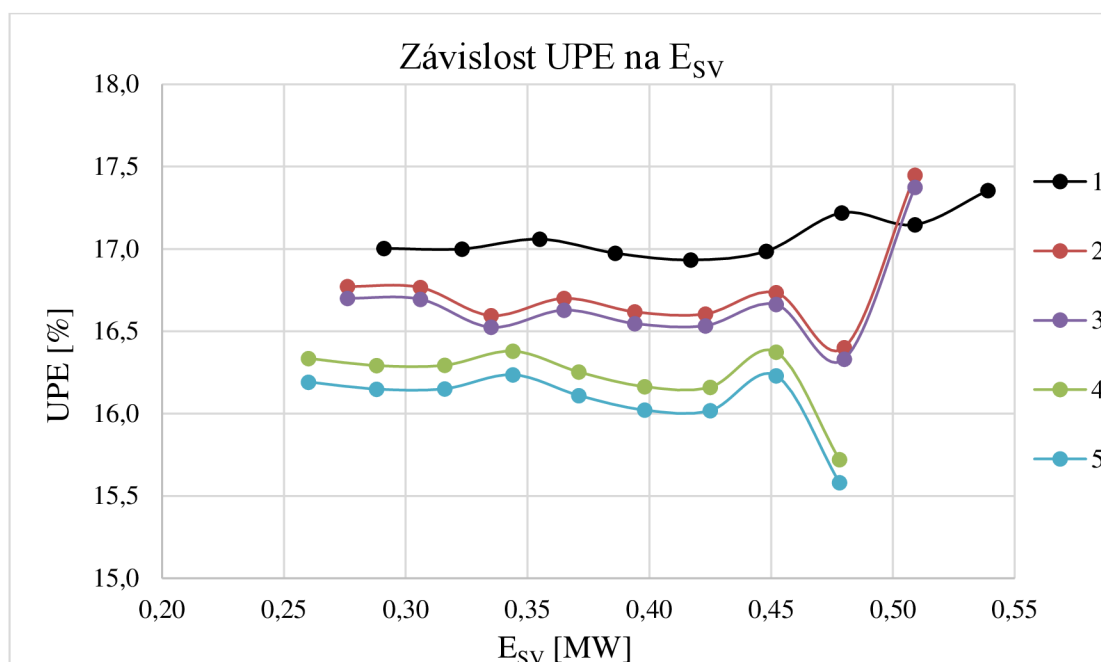
Následující kapitola bude věnována analýze vypočtených a naměřených hodnot. Jednotlivé provozní stavy vytvoří křivky, které bude možno zanást do grafů a porovnat jejich průběhy (Obr. 14,15).

Pro lepší přehlednost v grafech bude legenda křivek umístěna do tabulky (Tabulka 1) a v samotných grafech budou křivky pouze očíslovány. Význam jednotlivých čísel je uveden v následující tabulce.

Tabulka 1: Popisy jednotlivých křivek

Číslo křivky	Název křivky
1	5 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$
2	10 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$
3	10 % technologický odběr, 0 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$
4	15 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$
5	15 % technologický odběr, 0 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$
6	5 % technologický odběr, 20 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$
7	5 % technologický odběr, 20 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$
8	5 % technologický odběr, 30 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$
9	5 % technologický odběr, 30 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$
10	5 % technologický odběr, 40 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$
11	5 % technologický odběr, 40 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$

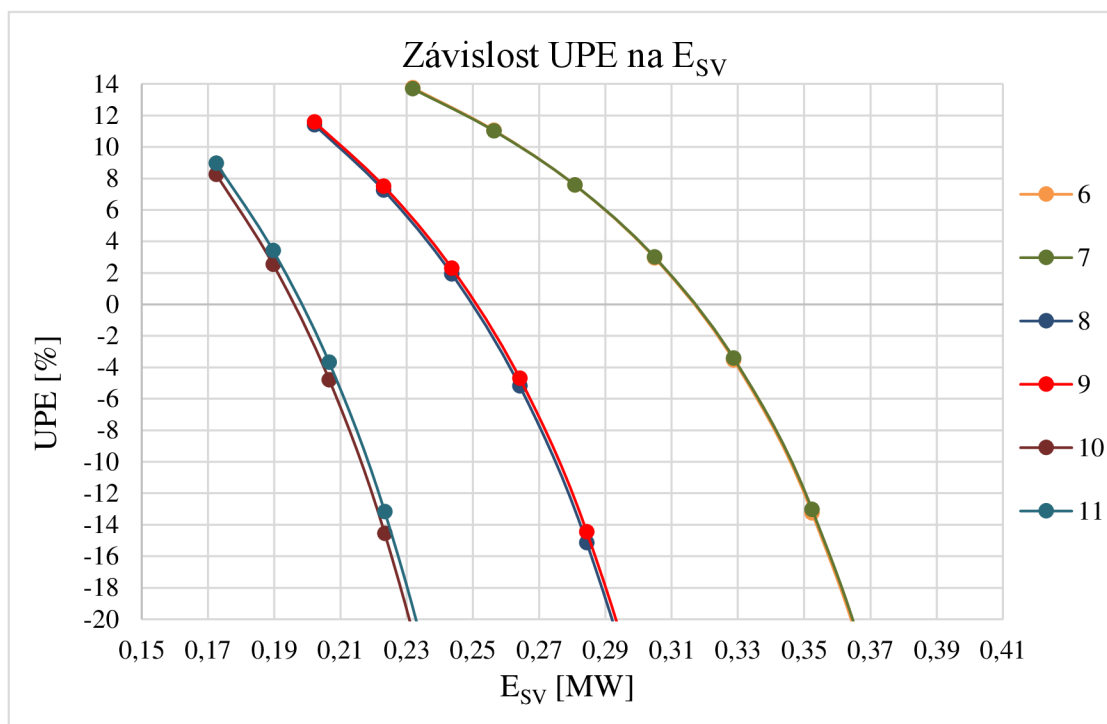
Jednotlivé body křivek byly vytvořeny tak, že každý z jedenácti provozních stavů byl namodelován a vypočítán postupně pro různé množství páry jdoucí na druhý stupeň turbíny. Na druhý stupeň turbíny je třeba poslat minimálně 10 % páry pro zajištění správné funkce a maximálně 90 %, aby byl dostatek páry pro regeneraci. Množství páry na turbínu bude měněno po deseti procentech. Z toho vyplývá, že každá křivka má 9 bodů (10 %-90 % po 10 %).



Obr. 14: Závislost UPE na E_{SV} pro prvních pět stavů

Z grafu je patrné, že čím více páry odchází do technologického odběru, tím je hodnota UPE menší. Protože parametr UPE vychází z účinnosti výroby elektřiny a tepla (rovnice 1.4), je ochuzen o páru, která je odebrána už před turbínou. Křivky se změnou E_{SV} a bez změny E_{SV} mají podle očekávání stejný tvar a hodnota UPE se pro každou takovou dvojici liší o řádově desetiny procent. Procentuální rozdíl se zvětšuje s narůstajícím množstvím páry odcházející před turbínou. Koncové hodnoty křivek se skokově mění. To je způsobeno velkou citlivostí výpočtu na zadané hodnoty a znamená to, že nejspíše došlo k drobné odchylce při modelování. Tento jev bude blíže rozebrán v kapitole 8.

Druhý graf byl vytvořen pro stavy, ve kterých byl simulován prodej páry. Tyto stavy mají už poměrně vysoké procento páry odcházející před turbínou (25-45 %), proto je jejich grafické vyjádření značně odlišné od prvních pěti stavů. Křivky nejsou v grafu zobrazeny celé, protože se jejich hodnoty postupně dostávají hluboko do záporných čísel. Všechny hodnoty jsou uvedeny v Přílohách 3-13. Rozdíl mezi hodnotami pro stav se změnou $E_{SV1,2}$ a bez změny $E_{SV1,2}$ není bohužel z grafu na první pohled patrný. Po nahlédnutí do Příloh 3-13 lze vidět, že se liší o desetiny procent pro křivky 6 a 7 a až o několik procent pro křivky 10 a 11. Takový rozdíl už je významný, proto lze říct, že pokud se množství páry, která proudí do turbíny, změní o více, než 25 % je třeba provést nové měření parametrů E_{SV1} a E_{SV2} .



Obr. 15: Závislost UPE na E_{sv} pro zbylé stavy

Parametr UPE je velice důležitý pro určení podpory Energetického regulačního úřadu. V následující tabulce (Tabulka 2) jsou uvedeny základní sazby ročního zeleného bonusu na elektřinu z KVET pro výrobu elektřiny s celkovým instalovaným výkonem kogeneračních jednotek nad 5 MWe.

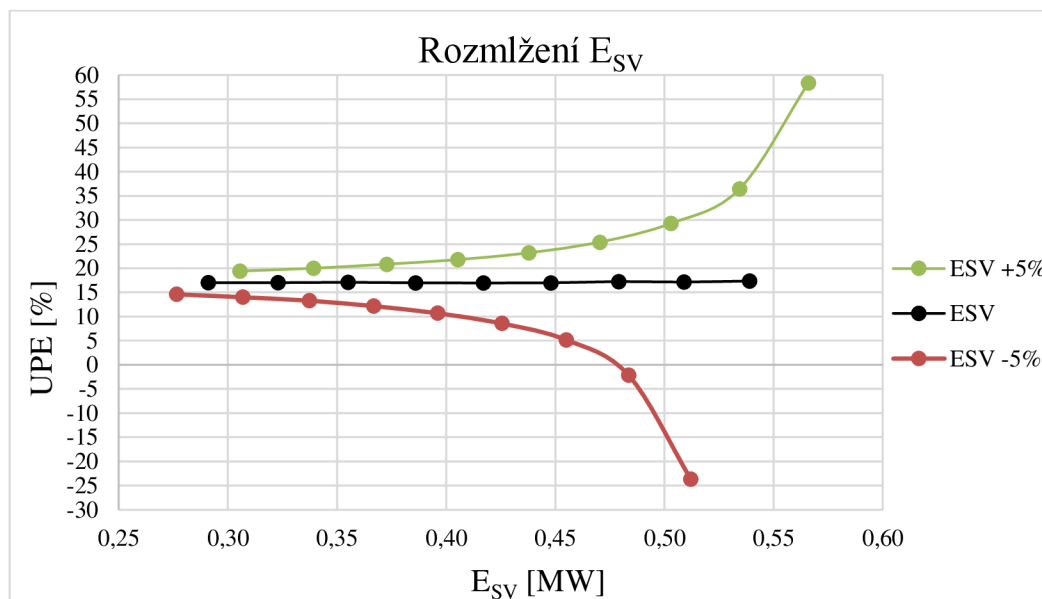
Tabulka 2: Základní sazba ročního zeleného bonusu [9]

Podporovaný druh energie	Datum uvedení do provozu		Instalovaný výkon [kW]		UPE [%]		Účinnost výroby energie [%]		Zelené bonusy [Kč/MWh]
	od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	od	do (včetně)	od	do (včetně)	
Elektřina z KVET	-	31.21. 2015	5000	-	10	15	-	-	45
	-	31.21. 2015	5000	-	15	-	-	45	60
	-	31.21. 2015	5000	-	15	-	45	75	140
	-	31.21. 2015	5000	-	15	-	75	-	200

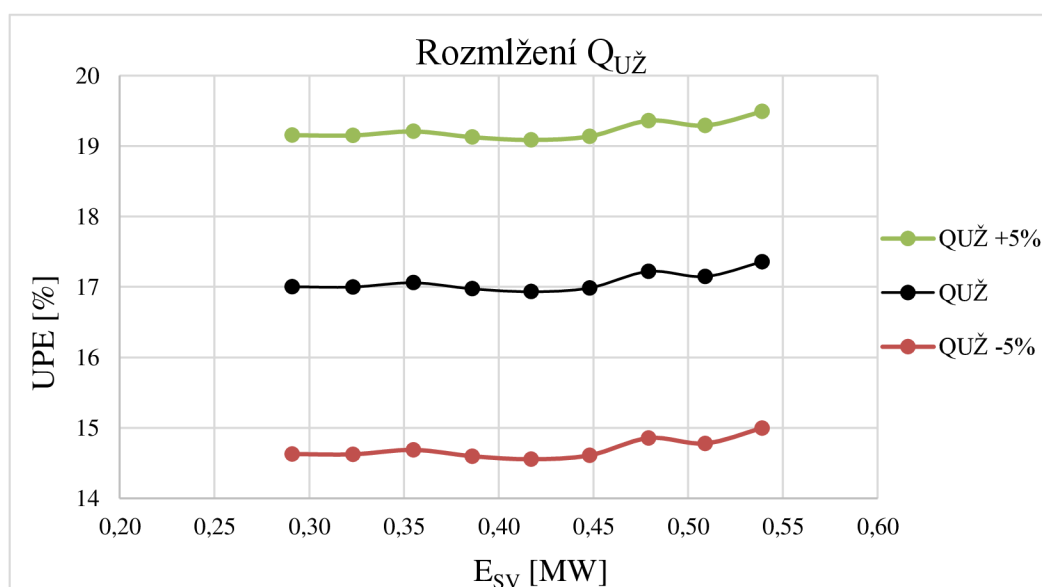
Pokud je UPE menší než 10 %, nedostane dané zařízení žádné zelené bonusy. To je v našem případě pro většinu ze stavů 6-11. Je tedy zjevné, že pokud se před turbínou odebírá 25 a více procent páry, je tento způsob výroby elektřiny velice nevýhodný. Pokud ovšem UPE přesáhne hodnotu 10 %, může zařízení ročně získat až řádově několik milionů korun. Pro hodnotu UPE je tedy nejlepší, aby co nejméně páry odcházelo před turbínou pryč.

8 Vliv rozmlžení vstupních parametrů

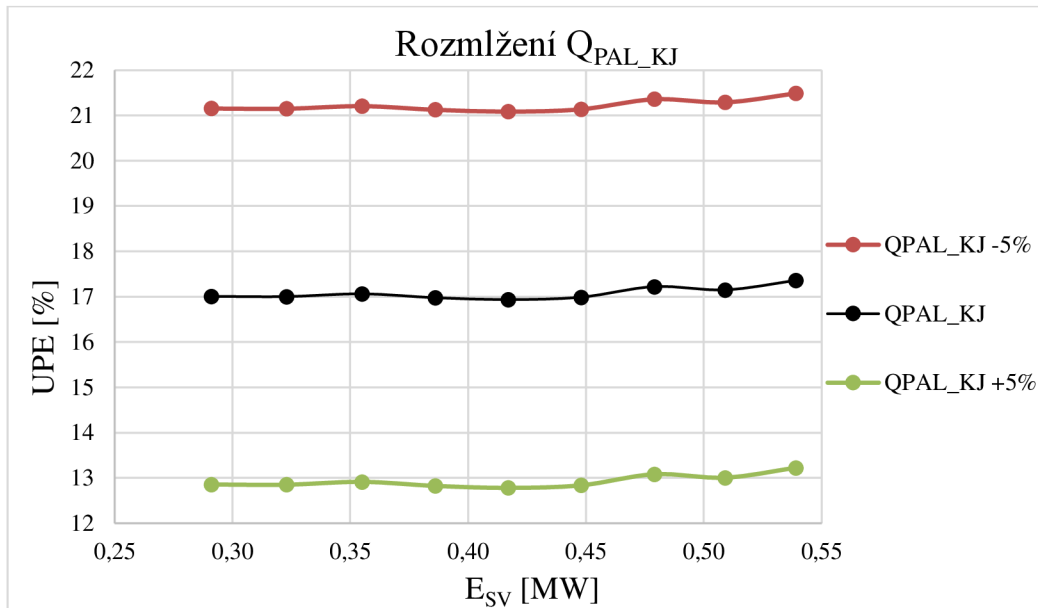
V předchozí kapitole se parametr UPE měnil mnohdy pouze o desetiny procent. Nabízí se tedy otázka, jak velký vliv na něj mají různé vstupní veličiny. V následující kapitole je v grafech zobrazen vliv rozmlžení pěti vstupních parametrů. Některé z nich (E_{SV} , $QU_{\dot{Z}}$ a Q_{PAL_KJ}) jsou hodnoty, které se získávají z provozu a mohou být tedy přímo ovlivněny chybou měření. Hodnoty C_{SKUT} (rovnice 1.3) a η_{E_NEKVET} (rovnice P3.1) nejsou měřeny přímo, ale jsou počítány z jiných parametrů. Jsou tedy nepřímě ovlivněny chybou měření. Jednotlivé hodnoty byly zvýšeny nebo sníženy o 5 % a výsledné hodnoty byly zaneseny do grafů (Obr. 16-20) a výsledky zapsány do tabulky (Tabulka 3).



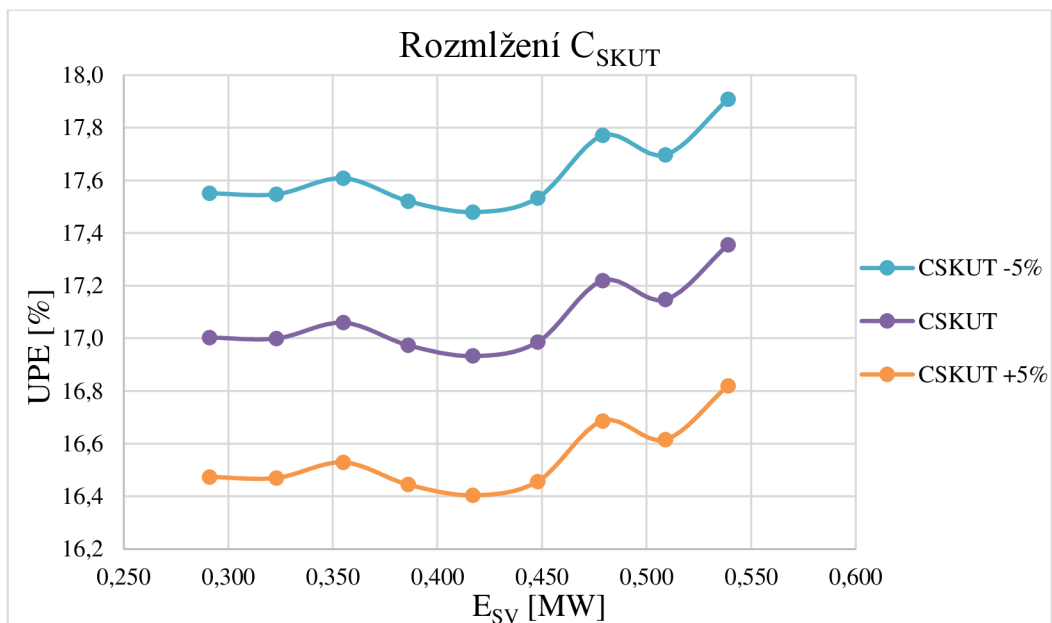
Obr. 16: Vliv rozmlžení E_{SV} na UPE



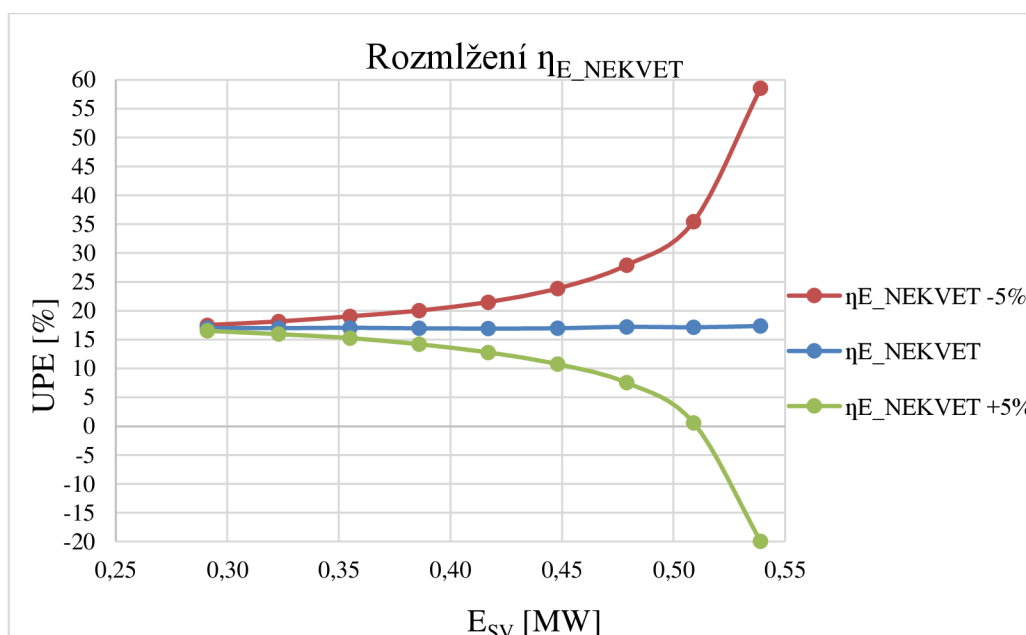
Obr. 17: Vliv rozmlžení $QU_{\dot{Z}}$ na UPE



Obr. 18: Vliv rozmlžení Q_{PAL_KJ} na UPE



Obr. 19: Vliv rozmlžení C_{SKUT} na UPE



Obr. 20: Vliv rozmlžení η_{E_NEKVET} na UPE

Tabulka 3: Vliv rozmlžení vstupních parametrů na hodnotu UPE

Rozmlžený parametr	Změna UPE [%]
E_{SV}	2 - 40
$Q_{U\dot{Z}}$	2 - 3
Q_{PAL_KJ}	4 - 5
C_{SKUT}	0,4 - 0,6
η_{E_NEKVET}	0,5 - 42

Největší vliv mají parametry E_{SV} a η_{E_NEKVET} . E_{SV} je množství elektřiny vyrobené kogenerační jednotkou a η_{E_NEKVET} se počítá z $E_{SV}\eta_{E_NEKVET}$ (Příloha 1 rovnice P3.1), což je taky množství elektřiny, ale měřené ve specifickém nastavení systému. Můžeme tedy říci, že největší vliv na hodnotu UPE má výroba elektrické energie a její účinnost. Bylo očekáváno, že C_{SKUT} bude mít významný vliv na UPE, ovšem můžeme vidět, že předpoklad byl chybný. Jelikož se C_{SKUT} počítá z E_{SV1} a E_{SV2} , vysvětluje se tímto i fakt, že není potřeba znovu měřit hodnoty $E_{SV1,2}$ pokud se množství páry vstupující do systému nezmění o více jak 25 %.

Můžeme říci, že UPE je parametr velice citlivý na změnu všech vstupních parametrů. To je ovšem velký problém, protože v praxi nelze výstupní parametry změřit přesně a v reálném provozu tyto hodnoty neustále kolísají. Provozovatel daného zařízení potom může získat velice odlišné výsledky při několika měřeních. Současný stav legislativy určující podporu pro tato zařízení obsahuje v tomto ohledu velký nedostatek, jelikož je celý výpočet kolísajícími vstupními parametry velice ovlivněn. Tohle bude nutno v legislativě v budoucnu určitě odstranit pro zajištění její jednoznačnosti a jednoduchosti.

9 Závěr

V prvních kapitolách se práce zabývá nastíněním základních pojmů z oblasti kombinované výroby elektřiny a tepla. Popisuje princip kogenerace, její výhody a nevýhody a také užití tohoto způsobu výroby elektřiny a tepla v praxi. Posléze se práce věnuje energetickému využití odpadu, zejména tedy popisu zařízení pro spalování odpadu s využitím energie tímto procesem uvolněné. Následuje stručný popis parních turbín, které jsou nejhojněji využívaným stroji v oblasti výroby elektřiny a tepla.

Po rešeršní části následuje studie přibližující stav současné české legislativy v oblasti podpory výroby elektřiny a tepla v režimu kogenerace. Cílem práce bylo analyzovat Vyhlášku č. 37/2016 Sb. Ministerstva průmyslu a obchodu o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a stanovit její problémové body. Při výpočtu byly nalezeny nesrovnalosti, z nichž jako největší problém se jeví nemožnost přesně změřit vstupní parametry výpočtu.

Celá problematika počítání a aplikování legislativy je uskutečněna za pomoci softwarového modelu, který umožnil nasimulovat podmínky podobné reálnému provozu. Díky takto získaným hodnotám bylo možno provést celý výpočet opakovaně pro různé konfigurace systému, kterých by v praxi bylo velice obtížné dosáhnout. Práce popisuje celou tvorbu schématu a zadávání potřebných parametrů pro správné fungování celého modelu.

V koncové části se práce věnuje vyhodnocení a analýze získaných dat. Závislosti jsou vyneseny do grafů a z jejich průběhů jsou vyvozeny patřičné závěry. Důraz je kladen především na parametr UPE, který je nejdůležitější při přidělování podpory Energetického regulačního úřadu. Posléze je zkoumána závislost rozmlnění vstupních parametrů na celkový výpočet.

Cílem této práce bylo především seznámení se s legislativou a vytvoření obecného modelu spalovny. Získané hodnoty budou podkladem k dalšímu studiu dané problematiky v rámci výzkumného projektu č. TE02000236 "Waste-to-Energy (WTE) Competence Centre" a případně v rámci diplomové práce na ÚPI.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET) - proč je výhodná. *Kombinovaná výroba - efektivní a ekologické využití paliva* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/?id=0505#>
- [2] Kogenerace – princip, technologie a výhody. *O energetice.cz* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody/>
- [3] KOMBINOVANÁ VÝROBA ELEKTRINY A TEPLA. *EkoWATT* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/kombinovana-vyroba-elektřiny-a-tepla>
- [4] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné turbíny a turbokompresory, *Transformační technologie*, 2011-02, [last updated 2014-02]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-turbiny-a-turbokompresory.html>. English version: Heat turbines and turbocompressors. Web: http://www.transformacni-technologie.cz/en_tepelne-turbiny-a-turbokompresory.html.
- [5] Vyhláška č. 37/2016 Sb. ze dne 21. ledna 2016 o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů. Sbírka zákonů ČR. Částka 14/2016.
- [6] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic. 2008. Úřední věstník Evropské unie L 312/3.
- [7] Technologický proces. *SAKO Brno* [online]. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/stranka/cz/62/technologicky-proces/>
- [8] Jak to chodí ve spalovně odpadů? *KIC Odpady* [online]. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://www.kic-odpady.cz/jak-to-chodi.html>
- [9] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 9/2015 ze dne 29. prosince 2015, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie. Energetický regulační věstník. Částka 10/2015.
- [10] EVROPSKÁ UNIE. NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU) 2015/2402 ze dne 12. října 2015, kterým se přezkoumávají harmonizované referenční hodnoty účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny a tepla za použití směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU a kterým se zrušuje prováděcí rozhodnutí Komise 2011/877/EU. In: (EU) 2015/2402. 2015. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R2402&from=CS>
- [11] Waste to Energy (W2E) Software. *Ústav procesního inženýrství* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.upei.fme.vutbr.cz/w2e/>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	Jednotky
C_{SKUT}	Poměr elektřiny a tepla	-
E_{KVET}	Množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla	MWh
E_M	Množství mechanické energie	MWh
E_{NEKVET}	Množství elektřiny nepocházející z kombinované výroby elektřiny a tepla	MWh
E_{SV}	Množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů	MWh
E_{SV1}	Množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu s nejvyšší v běžném provozu dosažitelnou výrobou užitečného tepla $Q_{U\check{Z}}$ a současně při nejvyšší v běžném provozu dosažitelné spotřebě paliva	MWh
E_{SV2}	Množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu vycházejícím z provozního stavu měření E_{SV1} , kdy je zastavena dodávka užitečného tepla a dodávka paliva je snížena takovým způsobem, aby produkce jiného než užitečného tepla byla totožná s provozním stavem při stanovení E_{SV1}	MWh
$E_{SV1}E_{NEKVET}$	Množství elektřiny kogenerační jednotky pracující při nejvýše dosažitelném elektrickém výkonu v obvyklém provozu a současně provozované bez dodávky užitečného tepla	MWh
i_{VST}	Entalpie páry na vstupu	MJ/kg
$i_{V\check{Y}ST1}$	Entalpie páry na výstupu z prvního stupně turbíny	MJ/kg
$i_{V\check{Y}ST2}$	Entalpie páry na výstupu z druhého stupně turbíny	MJ/kg
LHV	Výhřevnost paliva	MJ/kg
M_{P1}	Množství páry, které prošlo prvním stupněm turbíny	t
M_{P2}	Množství páry, které prošlo druhým stupněm turbíny	t
Q_{PAL_KJ}	Množství celkového paliva	MWh
Q_{PAL_KVET}	Část množství celkového paliva připadající na výrobu elektřiny pocházející z kombinované výroby elektřiny a tepla, mechanické energie a užitečného tepla	MWh

Q_{PAL_NEKVET}	Část množství celkového paliva připadající na výrobu elektřiny nepocházející z kombinované výroby elektřiny a tepla	MWh
$Q_{UŽ}$	Množství užitečného tepla	MWh
η_{E_NEKVET}	Účinnost kogenerační jednotky pro výrobu elektřiny nepocházející z kombinované výroby elektřiny a tepla	-
η_e^T	Elektrická účinnost kombinované výroby elektřiny a tepla	-
η_q^T	Účinnost tepla z kombinované výroby elektřiny a tepla	-
η_{celk}	Celková účinnost kogenerační jednotky	-
η_r^E	Harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny	-
η_r^V	Harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu tepla	-
CZT	Centrální zásobování teplem	
EVO	Energetické využití odpadu	
HRSG	Angl. Heat Recovery Rteam Generator; kotel na odpadní teplo	
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla	
UPE	Úspora primární energie	
W2E	Angl. Waste to energy; Energetické využití odpadu	
WTE	Angl. Waste to energy; Energetické využití odpadu	

Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1 - Příklad celého výpočtu podle legislativy

Příloha 2 - Celkové schéma v softwaru W2E

Příloha 3 - 5 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$

Příloha 4 - 10 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$

Příloha 5 - 10 % technologický odběr, 0 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$

Příloha 6 - 15 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$

Příloha 7 - 15 % technologický odběr, 0 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$

Příloha 8 - 5 % technologický odběr, 20 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$

Příloha 9 - 5 % technologický odběr, 20 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$

Příloha 10 - 5 % technologický odběr, 30 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$

Příloha 11 - 5 % technologický odběr, 30 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$

Příloha 12 - 5 % technologický odběr, 40 % prodej, bez změny $E_{SV1,2}$

Příloha 13 - 5 % technologický odběr, 40 % prodej, se změnou $E_{SV1,2}$

Příloha 1 - Příklad celého výpočtu podle legislativy

Výpočet je proveden pro jeden namodelovaný provozní stav.

Celková účinnost kogenerační jednotky

E_{SV} - celkové množství vyrobené elektřiny (součet z obou stupňů turbíny) [MWh]

$$E_{SV} = 0,358 MW + 0,056 MW = 0,32 MWh \quad (P1.1)$$

$Q_{UŽ}$ - množství užitečného tepla (teplo získané ve výměníku- Obr.9) [MWh]

$$Q_{UŽ} = 1,36 MWh \quad (P1.2)$$

Q_{PAL_KJ} - celkové množství energie spotřebované na výrobu elektřiny
mechanické energie a užitečného tepla [MWh]

$$průtok = 1000 \frac{kg}{h} \quad (P1.3)$$

$$LHV = 10 \frac{MJ}{kg} \quad (P1.4)$$

$$Q_{PAL_KJ} = průtok \cdot LHV \cdot 0,95 = 2,64 MWh \quad (P1.5)$$

M_{P1} - množství páry, které prošlo prvním stupněm turbíny [t]

M_{P2} - množství páry, které prošlo druhým stupněm turbíny [t]

i_{VST} - entalpie páry na vstupu [MJ/kg]

i_{VYST1} - entalpie páry na výstupu z prvního stupně turbíny [MJ/kg]

i_{VYST2} - entalpie páry na výstupu z druhého stupně turbíny [MJ/kg]

η_{celk} - celková účinnost kogenerační jednotky [-]

E_M - množství mechanické energie [MWh]

$$M_{P1} = 2,63 t \quad (P1.6)$$

$$M_{P2} = 0,479 t \quad (P1.7)$$

$$i_{VST} = 3214,4 \frac{KJ}{kg} \quad (P1.8)$$

$$i_{VYST1} = 2848,9 \frac{KJ}{kg} \quad (P1.9)$$

$$i_{VYST2} = 167,5 \frac{KJ}{kg} \quad (P1.10)$$

$$E_M = M_{P1} \cdot \frac{i_{VST} - i_{VYST1}}{3,6} + M_{P2} \cdot \frac{i_{VST} - i_{VYST2}}{3,6} = 0,649 MWh \quad (P1.11)$$

$$\eta_{celk} = \frac{(E_{SV} + Q_{UŽ})}{Q_{PAL_KJ}} = 0,64 \quad (P1.12)$$

Množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla [MWh]

E_{SV1} - množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu s nejvyšší v běžném provozu dosažitelnou výrobou užitečného tepla $Q_{U\check{Z}}$ a současně při nejvyšší v běžném provozu dosažitelné spotřebě paliva [MWh]

E_{SV2} - množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce měřené na svorkách generátorů při provozním stavu vycházejícím z provozního stavu měření E_{SV1} , kdy je zastavena dodávka užitečného tepla a dodávka paliva je snížena takovým způsobem, aby produkce jiného než užitečného tepla byla totožná s provozním stavem při stanovení E_{SV1} [MWh]

C_{SKUT} - skutečný poměr elektřiny a tepla vyjadřující poměr mezi množstvím elektřiny z kombinované výroby a množstvím užitečného tepla při jeho nejvyšší výrobě v běžném provozu [-]

E_{KVET} - množství elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla [MWh]

$$E_{SV1} = 0,291 \text{ MWh} \quad (P2.1)$$

$$E_{SV2} = 10,87 \text{ kW} + 47,3 \text{ kW} = 0,058 \text{ MWh} \quad (P2.2)$$

$$C_{SKUT} = \frac{(E_{SV1} - E_{SV2})}{Q_{U\check{Z}}} = 0,15 \quad (P2.3)$$

$$E_{KVET} = Q_{U\check{Z}} \cdot C_{SKUT} = 0,205 \text{ MWh} \quad (P2.4)$$

Výše úspory primární energie UPE při kombinované výrobě

η_{E_NEKVET} - specifická účinnost výroby elektřiny nepocházející z kombinované výroby [-]

$E_{SV\eta_{E_NEKVET}}$ - množství elektřiny vyrobené v kogenerační jednotce pracující při nejvýše dosažitelném elektrickém výkonu v obvyklém provozu a současně provozované bez dodávky užitečného tepla [MWh]

$$E_{SV\eta_{E_NEKVET}} = 0,569 \text{ MWh} \quad (P3.1)$$

$$\eta_{E_NEKVET} = \frac{E_{SV\eta_{E_NEKVET}}}{Q_{PAL_KJ}} = 0,22 \quad (P3.2)$$

E_{NEKVET} - elektřina nepocházející z kombinované výroby [MWh]

$$E_{NEKVET} = E_{SV} - E_{KVET} = 0,118 \text{ MWh} \quad (P3.3)$$

Q_{PAL_NEKVET} - spotřeba energie v palivu na výrobu elektřiny nepocházející z kombinované výroby [MWh]

$$Q_{PAL_NEKVET} = \frac{E_{NEKVET}}{\eta_{E_NEKVET}} = 0,546 \text{ MWh} \quad (P3.4)$$

Q_{PAL_KVET} - spotřeba energie v palivu použitém v procesu kombinované výroby [MWh]

$$Q_{PAL_KVET} = Q_{PAL_KJ} - Q_{PAL_NEKVET} = 2,09 \text{ MWh} \quad (\text{P3.5})$$

η_q^T - účinnost dodávky tepla z kombinované výroby [-]

$$\eta_q^T = \frac{Q_{U\check{Z}}}{Q_{PAL_KVET}} = 0,65 \quad (\text{P3.6})$$

η_e^T - elektrická účinnost dodávky tepla z kombinované výroby [-]

$$\eta_e^T = \frac{E_{KVET}}{Q_{PAL_KVET}} = 0,098 \quad (\text{P3.7})$$

η_r^V - výsledná harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu tepla [-]

$$\eta_r^V = 0,8 \quad (\text{P3.8})$$

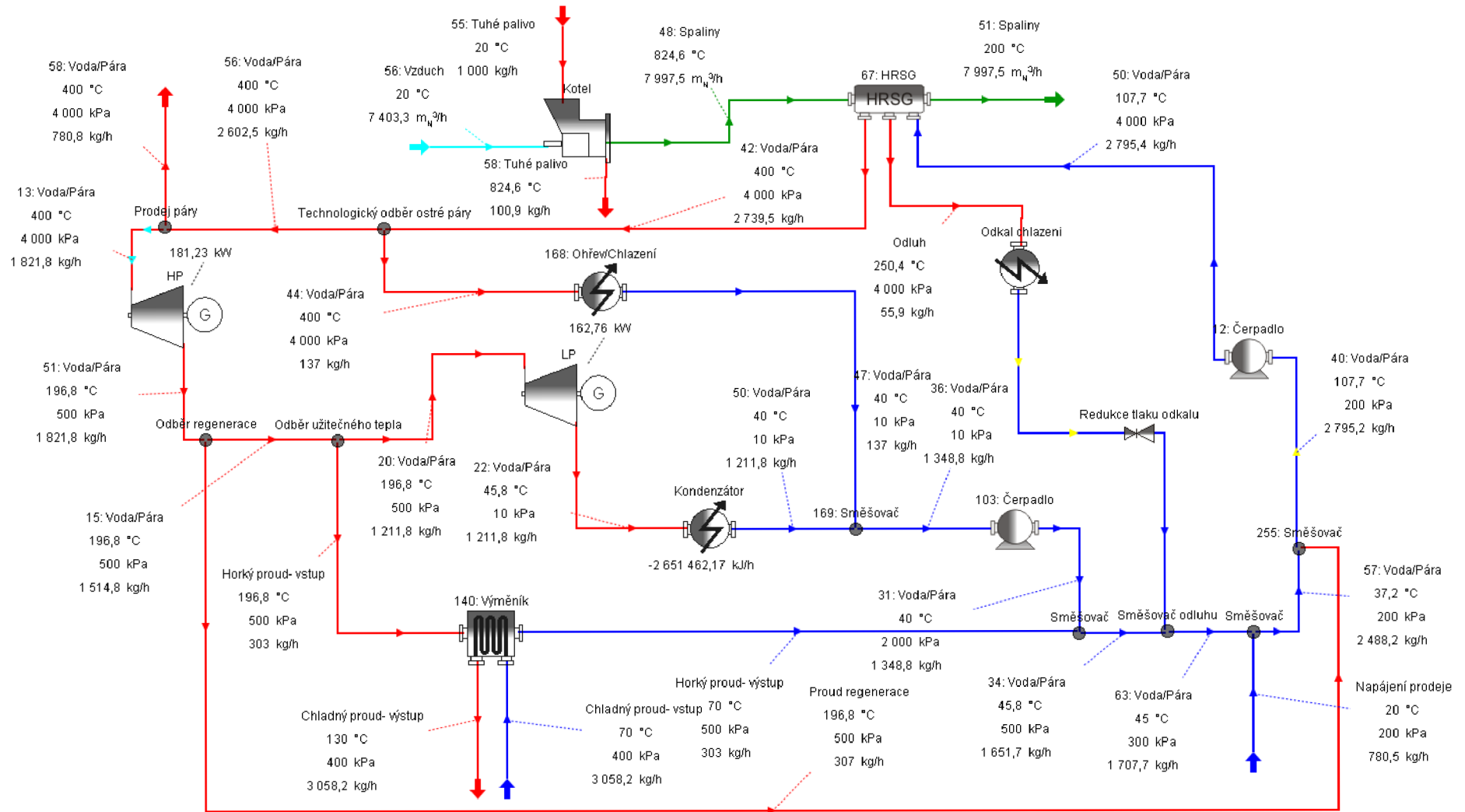
η_r^E - výsledná harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny[-]

$$\eta_r^E = 0,25 \quad (\text{P3.9})$$

UPE - výše úspory primární energie při kombinované výrobě elektřiny a tepla [%]

$$UPE = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{\eta_q^T}{\eta_r^V} + \frac{\eta_e^T}{\eta_r^E} \right)} \right] \cdot 100 = 17\% \quad (\text{P3.10})$$

Příloha 2 - Celkové schéma v softwaru W2E



Příloha 3 - 5 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny Esv_{1,2}

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
Esv [MW]	0,29	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54
QUŽ [MW]	1,54	1,36	1,18	1,01	0,84	0,67	0,50	0,33	0,16
QPAL_KJ [MW]	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
Mp1 [t]	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60
Mp2 [t]	0,24	0,48	0,72	0,95	1,18	1,41	1,64	1,86	2,09
ivST [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
ivYST1 [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
ivYST2 [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η _{celk}	0,69	0,64	0,58	0,53	0,48	0,42	0,37	0,32	0,27
Esv1 [MW]	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Esv2 [MW]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
CSKUT	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
EKVET [MW]	0,23	0,21	0,18	0,15	0,13	0,10	0,08	0,05	0,02
Esvη _E _NEKVET[MW]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
η _E _NEKVET	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
E _{NEKVET} [MW]	0,06	0,12	0,18	0,23	0,29	0,35	0,40	0,46	0,51
QPAL_NEKVET[MW]	0,27	0,55	0,82	1,08	1,35	1,61	1,87	2,13	2,39
QPALKVET [MW]	2,37	2,09	1,82	1,56	1,29	1,03	0,76	0,51	0,25
η _{qT}	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
η _{eT}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
η _{rV}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η _{rE}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	17,00	17,00	17,06	16,97	16,93	16,99	17,22	17,15	17,36

Příloha 4 - 10 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny E_{sv1,2}

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
E _{sv} [MW]	0,28	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51
Q _{už} [MW]	1,45	1,28	1,11	0,95	0,79	0,63	0,47	0,31	0,15
Q _{pal_KJ} [MW]	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
M _{p1} [t]	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46
M _{p2} [t]	0,23	0,45	0,67	0,89	1,11	1,33	1,54	1,75	1,96
i _{vst} [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
i _{vst1} [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
i _{vst2} [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η _{celk}	0,69	0,63	0,58	0,53	0,47	0,42	0,37	0,32	0,27
E _{sv1} [MW]	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
E _{sv2} [MW]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
C _{skut}	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
E _{kv} [MW]	0,22	0,19	0,17	0,14	0,12	0,09	0,07	0,05	0,02
E _{svηE_NEKVET} [MW]	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
η _{E_NEKVET}	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
E _{NEKVET} [MW]	0,06	0,11	0,17	0,22	0,27	0,33	0,38	0,43	0,49
Q _{pal_NEKVET} [MW]	0,27	0,53	0,78	1,03	1,28	1,53	1,78	2,02	2,26
Q _{palKVET} [MW]	2,23	1,97	1,72	1,47	1,22	0,97	0,72	0,48	0,24
η _{qT}	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
η _{eT}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
η _{rV}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η _{rE}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	16,77	16,77	16,60	16,70	16,62	16,61	16,73	16,40	17,45

Příloha 5 - 10 % technologický odběr, 0 % prodej, se změnou Esv_{1,2}

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
Esv [MW]	0,28	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51
QUŽ [MW]	1,45	1,28	1,11	0,95	0,79	0,63	0,47	0,31	0,15
QPAL_KJ [MW]	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Mp1 [t]	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46
Mp2 [t]	0,23	0,45	0,67	0,89	1,11	1,33	1,54	1,75	1,96
ivST [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
ivYST1 [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
ivYST2 [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η _{celk}	0,69	0,63	0,58	0,53	0,47	0,42	0,37	0,32	0,27
Esv1 [MW]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Esv2 [MW]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
CSKUT	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
EKVET [MW]	0,22	0,19	0,17	0,14	0,12	0,10	0,07	0,05	0,02
Esvη _E _NEKVET[MW]	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
η _E _NEKVET	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
E _{NEKVET} [MW]	0,06	0,11	0,17	0,22	0,27	0,33	0,38	0,43	0,49
QPAL_NEKVET[MW]	0,26	0,52	0,77	1,03	1,28	1,53	1,77	2,02	2,26
QPALKVET [MW]	2,24	1,98	1,73	1,47	1,22	0,97	0,73	0,48	0,24
η _{qT}	0,65	0,65	0,64	0,65	0,64	0,64	0,65	0,64	0,65
η _{eT}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
η _{rV}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η _{rE}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	16,70	16,69	16,52	16,63	16,55	16,53	16,66	16,33	17,38

Příloha 6 - 15 % technologický odběr, 0 % prodej, bez změny E_{sv1,2}

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
E _{sv} [MW]	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,43	0,45	0,48
Q _{už} [MW]	1,35	1,20	1,04	0,89	0,74	0,59	0,44	0,29	0,14
Q _{pal_KJ} [MW]	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36
M _{p1} [t]	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33
M _{p2} [t]	0,21	0,42	0,63	0,84	1,04	1,24	1,44	1,64	1,84
i _{vst} [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
i _{vst1} [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
i _{vst2} [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η _{celk}	0,68	0,63	0,58	0,52	0,47	0,42	0,37	0,31	0,26
E _{sv1} [MW]	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,28
E _{sv2} [MW]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
C _{skut}	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
E _{kv} [MW]	0,20	0,18	0,16	0,13	0,11	0,09	0,07	0,04	0,02
E _{svηE_NEKVET} [MW]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
η _{E_NEKVET}	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
E _{NEKVET} [MW]	0,06	0,11	0,16	0,21	0,26	0,31	0,36	0,41	0,46
Q _{pal_NEKVET} [MW]	0,26	0,50	0,74	0,98	1,21	1,45	1,68	1,91	2,13
Q _{palKVET} [MW]	2,10	1,86	1,62	1,38	1,15	0,91	0,68	0,45	0,23
η _{qT}	0,64	0,64	0,64	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
η _{eT}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
η _{rV}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η _{rE}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	16,33	16,29	16,29	16,38	16,25	16,16	16,16	16,37	15,72

Příloha 7 - 15 % technologický odběr, 0 % prodej, se změnou Esv_{1,2}

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
Esv [MW]	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,43	0,45	0,48
QUŽ [MW]	1,35	1,20	1,04	0,89	0,74	0,59	0,44	0,29	0,14
QPAL_KJ [MW]	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36
Mp1 [t]	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33
Mp2 [t]	0,21	0,42	0,63	0,84	1,04	1,24	1,44	1,64	1,84
ivST [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
ivYST1 [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
ivYST2 [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η _{celk}	0,68	0,63	0,58	0,52	0,47	0,42	0,37	0,31	0,26
Esv1 [MW]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Esv2 [MW]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
CSKUT	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
EKVET [MW]	0,21	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,07	0,04	0,02
Esvη _E _NEKVET[MW]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
η _E _NEKVET	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
E _{NEKVET} [MW]	0,05	0,10	0,16	0,21	0,26	0,31	0,36	0,41	0,46
QPAL_NEKVET[MW]	0,25	0,49	0,73	0,97	1,21	1,44	1,67	1,91	2,13
QPALKVET [MW]	2,11	1,87	1,63	1,39	1,15	0,92	0,69	0,45	0,23
η _{qT}	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
η _{eT}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
η _{rV}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η _{rE}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	16,19	16,15	16,15	16,24	16,11	16,02	16,02	16,23	15,58

Příloha 8 - 5 % technologický odběr, 20 % prodej, bez změny E_{SV1,2}

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
E _{SV} [MW]	0,23	0,26	0,28	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42
QUŽ [MW]	1,18	1,04	0,91	0,78	0,64	0,51	0,38	0,25	0,13
QPAL_KJ [MW]	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
Mp1 [t]	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
Mp2 [t]	0,18	0,37	0,55	0,73	0,91	1,08	1,26	1,43	1,60
iv _{ST} [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
iv _{ST1} [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
iv _{ST2} [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η _{celk}	0,68	0,62	0,57	0,52	0,47	0,41	0,36	0,31	0,26
E _{SV1} [MW]	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
E _{SV2} [MW]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
C _{SKUT}	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
E _{KVET} [MW]	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02
E _{SVηE_NEKVET} [MW]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
η _{E_NEKVET}	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
E _{NEKVET} [MW]	0,05	0,10	0,14	0,19	0,23	0,28	0,32	0,36	0,40
QPAL_NEKVET[MW]	0,20	0,36	0,53	0,69	0,85	1,01	1,17	1,32	1,48
QPALKVET [MW]	1,89	1,72	1,56	1,39	1,23	1,08	0,92	0,76	0,61
η _{qT}	0,63	0,61	0,58	0,56	0,52	0,48	0,42	0,33	0,21
η _{eT}	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03
η _{rV}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η _{rE}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	13,76	11,06	7,58	2,95	-3,54	-13,25	-29,49	-61,92	-159,24

Příloha 9 - 5 % technologický odběr, 20 % prodej, se změnou E_{sv1,2}

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
E _{sv} [MW]	0,23	0,26	0,28	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42
QUŽ [MW]	1,18	1,04	0,91	0,78	0,64	0,51	0,38	0,25	0,13
Q _{PAL_KJ} [MW]	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
M _{p1} [t]	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
M _{p2} [t]	0,18	0,37	0,55	0,73	0,91	1,08	1,26	1,43	1,60
i _{vst} [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
i _{vst1} [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
i _{vst2} [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η _{celk}	0,68	0,62	0,57	0,52	0,47	0,41	0,36	0,31	0,26
E _{sv1} [MW]	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
E _{sv2} [MW]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
C _{SKUT}	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
E _{KVET} [MW]	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02
E _{svηE_NEKVET} [MW]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
η _{E_NEKVET}	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
E _{NEKVET} [MW]	0,05	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,32	0,36	0,40
Q _{PAL_NEKVET} [MW]	0,18	0,34	0,51	0,67	0,84	1,00	1,16	1,32	1,47
Q _{PALKVET} [MW]	1,91	1,74	1,57	1,41	1,25	1,08	0,92	0,77	0,61
η _{qT}	0,62	0,60	0,58	0,55	0,52	0,47	0,41	0,33	0,21
η _{eT}	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03
η _{rV}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η _{rE}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	13,71	11,03	7,59	3,01	-3,41	-13,02	-29,09	-61,17	-157,45

Příloha 10 - 5 % technologický odběr, 30 % prodej, bez změny Esv1,2

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
Esv [MW]	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
QUŽ [MW]	1,00	0,89	0,77	0,66	0,55	0,43	0,32	0,22	0,11
QPAL_KJ [MW]	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81
Mp1 [t]	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82
Mp2 [t]	0,16	0,31	0,47	0,62	0,77	0,92	1,07	1,21	1,36
ivST [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
ivYST1 [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
ivYST2 [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η_{celk}	0,67	0,61	0,56	0,51	0,46	0,41	0,36	0,31	0,26
Esv1 [MW]	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Esv2 [MW]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
CSKUT	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
EKVET [MW]	0,15	0,13	0,12	0,10	0,08	0,07	0,05	0,03	0,02
Esv η_E _NEKVET[MW]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
η_E _NEKVET	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
ENEKVET [MW]	0,05	0,09	0,13	0,16	0,20	0,24	0,28	0,31	0,35
QPAL_NEKVET[MW]	0,16	0,28	0,40	0,52	0,64	0,76	0,87	0,99	1,10
QPALKVET [MW]	1,64	1,52	1,40	1,28	1,16	1,05	0,93	0,82	0,70
η_qT	0,61	0,58	0,55	0,51	0,47	0,41	0,35	0,26	0,15
η_eT	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02
η_rV	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η_rE	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	11,41	7,25	1,94	-5,19	-15,14	-30,06	-54,94	-104,73	-254,05

Příloha 11 - 5 % technologický odběr, 30 % prodej, se změnou Esv1,2

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
Esv [MW]	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
QUŽ [MW]	1,00	0,89	0,77	0,66	0,55	0,43	0,32	0,22	0,11
QPAL_KJ [MW]	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81
Mp1 [t]	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82
Mp2 [t]	0,16	0,31	0,47	0,62	0,77	0,92	1,07	1,21	1,36
ivST [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
ivYST1 [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
ivYST2 [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η_{celk}	0,67	0,61	0,56	0,51	0,46	0,41	0,36	0,31	0,26
Esv1 [MW]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Esv2 [MW]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
CSKUT	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
EKVET [MW]	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03	0,02
Esv η_E _NEKVET[MW]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
η_E _NEKVET	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
ENEKVET [MW]	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,23	0,27	0,31	0,35
QPAL_NEKVET[MW]	0,13	0,26	0,38	0,51	0,63	0,75	0,87	0,98	1,10
QPALKVET [MW]	1,67	1,55	1,42	1,30	1,18	1,06	0,94	0,82	0,71
η_qT	0,60	0,57	0,54	0,51	0,46	0,41	0,34	0,26	0,15
η_eT	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,04	0,02
η_rV	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η_rE	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	11,58	7,51	2,29	-4,70	-14,46	-29,10	-53,50	-102,34	-248,82

Příloha 12 - 5 % technologický odběr, 40 % prodej, bez změny Esv1,2

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
Esv [MW]	0,17	0,19	0,21	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30
QUŽ [MW]	0,82	0,73	0,63	0,54	0,45	0,36	0,27	0,18	0,09
QPAL_KJ [MW]	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Mp1 [t]	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
Mp2 [t]	0,13	0,26	0,38	0,51	0,63	0,75	0,88	1,00	1,11
ivST [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
ivYST1 [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
ivYST2 [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η_{celk}	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,26
Esv1 [MW]	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Esv2 [MW]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
CSKUT	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
EKVET [MW]	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,05	0,04	0,03	0,01
Esv η_E _NEKVET[MW]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
η_E _NEKVET	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
E _{NEKVET} [MW]	0,05	0,08	0,11	0,14	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29
QPAL_NEKVET[MW]	0,13	0,22	0,30	0,38	0,46	0,54	0,63	0,71	0,78
QPALKVET [MW]	1,40	1,31	1,23	1,15	1,06	0,98	0,90	0,82	0,74
η_qT	0,59	0,55	0,51	0,47	0,42	0,36	0,29	0,21	0,12
η_eT	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02
η_rV	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η_rE	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	8,25	2,54	-4,79	-14,56	-28,20	-48,71	-82,91	-151,29	-356,47

Příloha 13 - 5 % technologický odběr, 40 % prodej, se změnou Esv1,2

	10% na turbínu	20% na turbínu	30% na turbínu	40% na turbínu	50% na turbínu	60% na turbínu	70% na turbínu	80% na turbínu	90% na turbínu
Esv [MW]	0,17	0,19	0,21	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30
QUŽ [MW]	0,82	0,73	0,63	0,54	0,45	0,36	0,27	0,18	0,09
QPAL_KJ [MW]	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Mp1 [t]	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
Mp2 [t]	0,13	0,26	0,38	0,51	0,63	0,75	0,88	1,00	1,11
ivST [MJ/kg]	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
ivYST1 [MJ/kg]	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
ivYST2 [MJ/kg]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
η_{celk}	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,26
Esv1 [MW]	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Esv2 [MW]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
CSKUT	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
EKVET [MW]	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,04	0,03	0,01
Esv η_E _NEKVET[MW]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
η_E _NEKVET	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
ENEKVET [MW]	0,04	0,07	0,10	0,13	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29
QPAL_NEKVET[MW]	0,10	0,19	0,27	0,36	0,45	0,53	0,62	0,70	0,78
QPALKVET [MW]	1,43	1,34	1,25	1,17	1,08	1,00	0,91	0,83	0,75
η_qT	0,58	0,54	0,50	0,46	0,41	0,36	0,29	0,21	0,12
η_eT	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02
η_rV	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
η_rE	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
UPE [%]	8,97	3,43	-3,69	-13,17	-26,42	-46,32	-79,51	-145,89	-345,05