

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická



Diplomová práce
**Modelování a hodnocení investic do
tepelných elektráren**
Pavel Vodička

Vedoucí práce: Prof. Ing. Oldřich Starý, CSc.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Ekonomika a řízení energetiky

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Vodička Pavel

Studijní program: elektrotechnika, energetika a management
Obor: ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Modelování a hodnocení investic do tepelných elektráren

Pokyny pro vypracování:

- druhy tepelných elektráren
- technické a ekonomické vstupy pro hodnocení ekonomické efektivity
- nástroje pro modelování vstupů
- aplikace pro zvolený druh elektrárny

Seznam odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího DP.

Vedoucí diplomové práce: Prof.Ing. Oldřich Starý, CSc. - ČVUT FEL, K 13116

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2014/2015



Doc.Ing. Jaroslav Krápek, CSc.
vedoucí katedry

V2 Ripka
Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 8.11.2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací *Modelování a hodnocení investic do tepelných elektráren* vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

Podpis autora _____

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem lidem, kteří mě podporovali v tvorbě této diplomové práce.

Jmenovitě:

- *Prof. Ing. Oldřichu Starému, CSc.* za vedení práce a podnětné připomínky ke směřování práce.
- *Ing. Martinu Benešovi Ph.D.* za konzultaci k problematice výpočtu entalpie ze zadané teploty a tlaku.
- *Ing. Janu Vybulkovi* za poskytnutí informací k projektu paroplynové elektrárny Podčerady a dokumentu s jeho popisem (zdroj [6]).

Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Obsah.....	5
Abstrakt.....	7
Abstract.....	7
Klíčová slova.....	7
Keywords.....	7
Úvod.....	8
1 Druhy tepelných elektráren.....	9
1.1 Elektrárny spalující plynná paliva.....	9
1.2 Elektrárny spalující tuhá paliva.....	12
1.3 Paroplynové elektrárny.....	15
2 Technické a ekonomické vstupy pro hodnocení ekonomické efektivity.....	18
2.1 Technické vstupy.....	18
2.1.1 Parametry plynové části cyklu.....	18
2.1.2 Parametry parní části cyklu.....	18
2.1.3 Ostatní technické parametry.....	19
2.1.4 Výpočty z technických parametrů.....	20
2.2 Ekonomické vstupy.....	24
3 Nástroje pro modelování vstupů.....	26
3.1 Program Mathematica.....	26
3.1.1 Základní struktury příkazů.....	26
3.1.2 Zdroje dat.....	27
3.1.3 Možnosti vizualizace dat.....	28
3.1.4 Dynamické zobrazení dat.....	29
3.1.5 Interaktivní vstupy dat.....	30
3.1.6 Funkce pro finanční analýzu.....	31
3.1.7 Free-Form Linguistic Input.....	31

3.1.8 Computable Document Format.....	31
3.1.9 Výpočet čisté současné hodnoty v programu Mathematica.....	32
3.1.10 Novinky současné verze (Mathematica 9).....	32
3.2 Program MATLAB.....	32
3.3 Program Maple.....	33
3.4 Srovnání dostupných variant.....	33
4 Aplikace pro zvolený typ elektrárny.....	34
4.1 Struktura kódu.....	34
4.2 Uživatelské rozhraní.....	34
4.3 Výpočetní část.....	39
4.4 Iniciační část programu.....	39
4.5 Možná rozšíření aplikace.....	41
Závěr.....	43
Zdroje a citace:.....	44
Použité zkratky, výrazy a symboly.....	45
Tabulky a obrázky:.....	46
Přílohy:.....	46
Příloha A: Tabulky parametrů výpočtu entalpie.....	47
Příloha B:	48

Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na vytvoření zjednodušeného technicko-ekonomického modelu, který by byl využitelný jako první stupeň hodnocení záměru na vybudování tepelné elektrárny. Výsledná aplikace umožňuje vyhodnocení ekonomické efektivity investice do paroplynové elektrárny s jednoduchým plynovým a parním cyklem.

Abstract

In this work, I dealt with creating simplified techno-economic model, usable as first stage of heat power-plant project evaluation. Finished application can be used to evaluate economical effectiveness of investment into combined cycle power-plant with simple gas and steam cycle.

Klíčová slova

Investice, hodnocení investic, energetika, výpočet entalpie, technicko-ekonomický model

Keywords

Investment, evaluation of investment, energetics, enthalpy calculation, techno-economic model

Úvod

Tepelné elektrárny jsou energetická zařízení s vysokými investičními náklady a samotné vyhodnocení jejich ekonomických důsledků je bez vytvoření konkrétního projektu s ekonomickou analýzou velmi náročné; rozhodovatel musí mít zkušenosti a znalosti. Náklady na vypracování samotného projektu se mohou pohybovat až v řádu několika procent z investice a pokud by se ukázal projekt nerentabilní, tak by tyto náklady byly utopené.

Cílem tohoto projektu je vytvořen zjednodušený model, který by mohl předejít nerentabilním investicím a který by mohl být využíván jako předběžná studie proveditelnosti. Umožnil by tak člověku, který má jen základní přehled o oboru, přibližné zhodnocení projektu.

Práce předpokládá elementární znalosti ekonomických a energetických pojmů na straně čtenáře.

1 Druhy tepelných elektráren

Pro účely této práce jsou tepelnými elektrárnami myšleny takové elektrárny, které využívají tepelnou energii jako mezistupeň transformace chemické energie paliva na energii elektrickou za pomoci točivého magnetického pole. Tato konkrétní definice byla zvolena, protože je práce cílena především na hodnocení investic do spalovacích elektráren.

Již z definice vyplývá, že se jedná pouze o spalovací elektrárny, neboť jaderné, vodní, větrné a sluneční elektrárny nesplňují požadavek na chemickou energii a zdroje založené na termoelektrickém jevu nesplňují požadavek na točivé magnetické pole. Spalovací elektrárny dělíme na elektrárny spalující plyná paliva, elektrárny spalující tuhá paliva a paroplynové elektrárny, které mohou v závislosti na návrhu kombinovat spalování tuhých i plyných paliv.

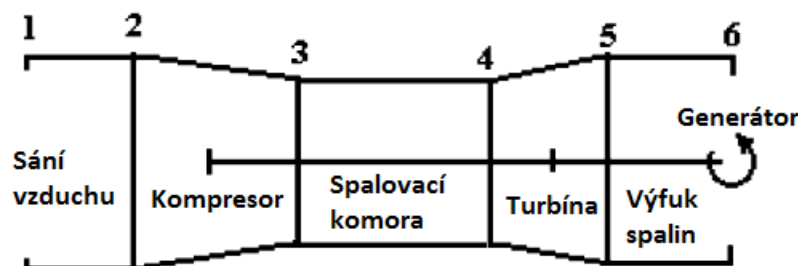
1.1 Elektrárny spalující plyná paliva

Jednoduchý cyklus

Elektrárna spalující plyná paliva zpravidla využívá Braytonova cyklu s otevřeným oběhem. Toto je možné, neboť se hlavní složky většiny paliv hořením rozkládají pouze na plyné složky (převážně H_2O a CO_2) a tudíž mohou přímo vstupovat do plynové turbíny.

Při nejjednodušším provedení elektrárny je vzduch nasáván do stroje a v kompresoru adiabaticky stlačen. Poté vstupuje do spalovací komory, kde probíhá spalování s palivem za izobarické expanze. Výsledná horká směs pohání turbínu a následně je vypuštěna do atmosféry. Kompresor a turbína bývají zpravidla umístěny na stejné hřídeli, která je v jednodušších variantách napojena i na generátor.

Obr. 1.1 (2.2): Jednoduchá plyn el. (převzato ze zdroje [1] a upraveno)

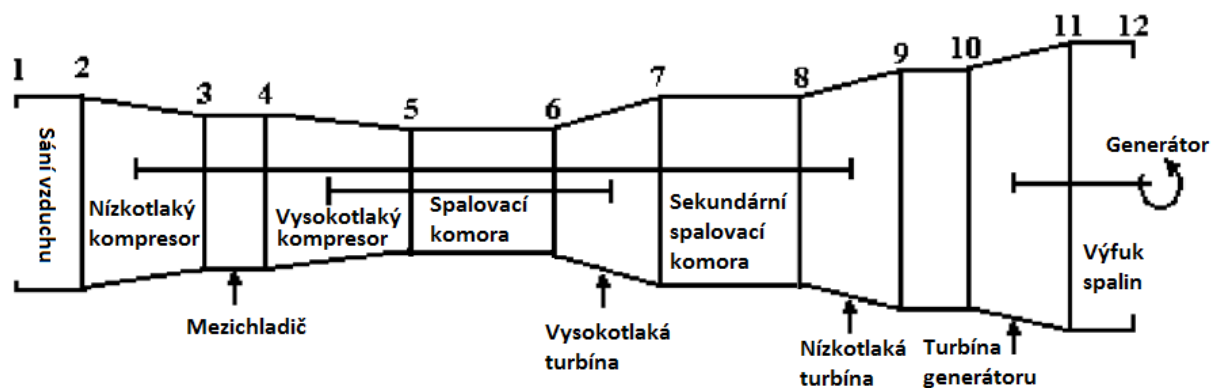


Vícetupňová plynová elektrárna

Účinnost přeměny energie plynové elektrárny s jednoduchým cyklem se běžně pohybuje kolem 30 %. To ovšem není vždy dostačující a proto se zavádějí dodatečné úpravy, kterými se zabývá níže.

Rozdělení komprese a expanze na více částí umožňuje vložení mezichladiče nebo přídavného spalování mezi cykly. Taktéž více tlakových stupňů umožňuje mechanické oddělení hřídelí, které pak nejsou omezeny frekvencí 50Hz a mohou tak pracovat za optimálních otáček. Naopak výhodou jedné hřídele je snazší regulace výkonu, neboť není třeba překonávat setrvačnost samostatných částí a energie z navíc přidaného paliva je tak přímo přenesena do generátoru.

Obr. 1.2: Dvoustupňová plynová el. (převzato ze zdroje [1] a upraveno)



Na obr. 1.2 je zobrazeno schéma plynové elektrárny s dvěma tlakovými stupni, třemi samostatnými hřídelemi, mezichlazením a přídavným spalováním.

Mezichlazení

Pokud má elektrárna alespoň 2 tlakové stupně, lze mezi kompresory vložit chladič. Zchlazení částečně stlačených plynů zmenšuje energetickou náročnost následujících kompresí. Na druhou stranu mají stlačené plyny nižší teplotu, která se musí nahradit energií z paliva nebo regeneračního ohřevu.

Regenerační ohřev

Výstupní teplota plynů z turbíny jednoduchého cyklu dosahuje řádově 600°C. K využití této energie slouží regenerační ohřev, kdy je tepelná energie expandovaných spalin předávána stlačenému vzduchu před vstupem do spalovací komory. Takto předaná energie přímo snižuje potřebné množství paliva na konkrétní výkon zařízení.

Další způsob využití této energie je předání tepla parnímu cyklu, kterým se zabývá níže (kapitola 1.1.3). Rozdíl v efektivitě využití tepla mezi regeneračním oběhem a parním cyklem paroplynové elektrárny spočívá v množství předaného tepla, neboť stlačený vzduch je již vlivem komprese částečně zahřátý a tudíž je rozdíl teplot menší, než u parního cyklu.

Regenerační ohřev ve značné míře mitiguje nevýhodu nižší teploty po expanzi u mezichlazení. Za přítomnosti jak mezichlazení, tak regeneračního ohřevu dochází navíc ke předání až celého rozdílu teplot způsobeného mezichlazením (v závislosti na účinnosti výměníku tepla).

Při využití této úpravy cyklu je nižší kompresní poměr, než je u plynových elektráren obvyklé. To je způsobeno zvýšením teploty vzduchu během komprese. Tímto jevem a určením optimálního kompresního poměru se zabývali malajští vědci, jenž určili poměr 1:5 jako optimální.^[2]

Přídavné spalování

Přídavné spalování je úprava cyklu požadující více tlakových úrovní, kdy je mezi turbínami směs přivedena do sekundární spalovací komory. Tato úprava zvyšuje teplotu plynů vystupujících z nízkotlaké turbíny a není-li tato energie dále využita (např. regenerační ohřev nebo výroba páry), pak je snížena celková účinnost zařízení.

Výhody elektrárny

- relativně nízké investiční náklady
- rychlá regulace výkonu
- vhodná jako špičkový zdroj
- možné úpravy cyklu pro zvýšení účinnosti
- nízké poplatky za emise

Nevýhody elektrárny

- vysoké variabilní náklady
- nízká účinnost jednoduchého cyklu
- závislost na volatilním trhu s plynem

1.2 Elektrárny spalující tuhá paliva

Základní topologie elektrárny

Spalovací elektrárny využívají Clausius-Rankinova cyklu páry. Cyklus začíná přečerpáním vody z nízkého tlaku kondenzátoru na tlak požadované admisní páry. Poté je voda v kotli přeměněna na páru, která následně v parní turbíně expanduje. Expanze páry je ukončena před dosažením 10% vlhkosti páry, jinak by kondenzované kapky vody působily abrazivně na poslední stupně turbíny. Zbytek tepelné energie je v kondenzátoru z expandované páry přesunut do chladicí vody.

Množství vody potřebné pro zachycení kondenzačního tepla je značné, což vychází z měrného tepla vody ($4,184 \text{ KJ/Kg}\cdot\text{K}$) a z měrného výparného tepla (2500 KJ/Kg). Tento rozdíl v energiích znamená, že pokud by jsme měli například parní cyklus s množstvím páry 50 Kg/s , která by měla při vstupu do kondenzátoru vlhkost 10 %, tak by bylo potřeba ohřát o 5°C $5\,377 \text{ Kg}$ chladicí vody za sekundu.

Samotná chladicí voda ve většině elektráren předává teplo do atmosféry v chladících věžích, ale je také možné přebytečné teplo odvést do vhodného zdroje vody. Možný je i otevřený oběh chladicí vody, ale ten je málokdy realizován vzhledem k náročnosti filtrace potřebného objemu.

Druhy kotlů

První možnost při volbě kotle je kotel bubnový. V tomto provedení kotle je voda přiváděna do bubnu (vyrovnávací nádržka uvnitř kotle), odkud vede potrubí chladnější vodu ke spodní části kotle a skrz kotel zpět do bubnu, přičemž je tento krátký oběh většinou poháněn jen zahřátím vody v kotli (takzvaný přirozený oběh). Z bubnu dále vede parní vývod k přehřívání.

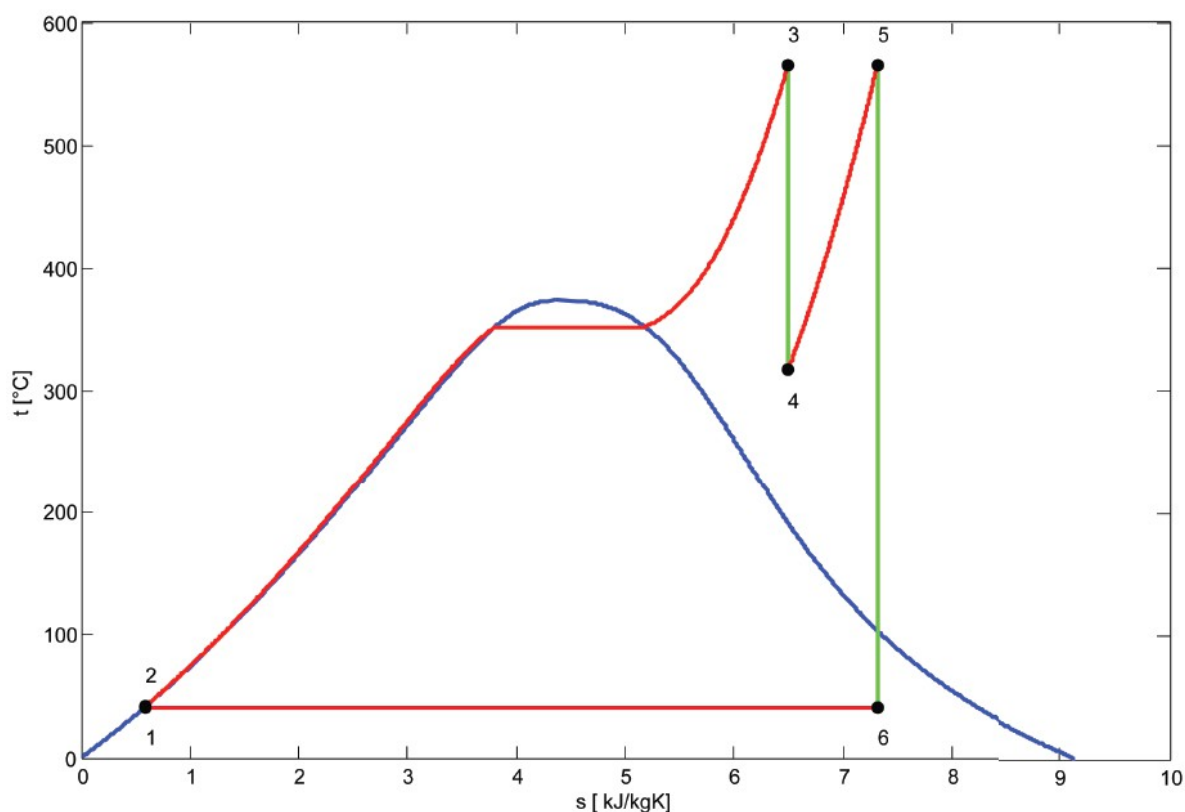
Tento typ je velmi odolný, v žádném místě nedochází k hromadění solí a při prudkém zvýšení odběru páry (snížení tlaku) se z bubnu vypaří pára navíc.

Druhá možnost je kotel průtočný. V tomto provedení voda necirkuluje, nýbrž pouze projde jednou kotlem, kde se rovnou přehřeje a vypaří. Konstrukce tohoto typu je jednodušší, ale dochází zde k vypaření značného množství vody v jednom místě, čímž se zvyšují nároky na čistotu vody. Tento druh je vhodný pro nadkritická zařízení, kde není jasná hranice mezi vodou a párou.

Přihřívání páry

Pokud je žádoucí cyklus s vysokým tlakem, ale jsme omezeni maximální dosažitelnou teplotou (omezený zdroj tepla, nebo omezení materiálů), pak je potřeba zajistit, aby při expanzi nedošlo k překročení bezpečné vlhkosti páry. Tento problém je možné vyřešit rozdělením expanze na více částí a opětovným ohřátím páry mezi jednotlivými stupni. V takovémto případě jsou turbíny běžně označovány jako vysokotlaká a nízkotlaká.

Obr. 1.3: Parní cyklus s jedním přehřevem (zdroj [3])



Nadkritický oběh

Kritický bod vody je $22,064\text{MPa}$ a $647,096\text{K}$ (373.85°C). Pokud vytvoříme parní oběh s tlakem vyšším, než je tlak kritický, pak se při ohřívání pracovní látky vyhneme přechodu mezi vodou a párou a přejdeme do nadkritické fáze. Oběh využívající těchto parametrů se nazývá nadkritický a vyznačuje se vyšší termodynamickou účinností.

Nevýhodou tohoto cyklu je technologická náročnost na zajištění cyklu s takto vysokým tlakem za značných teplot. Vysoké teploty jsou pro optimální využití

nadkritického oběhu nezbytné, neboť takovýto oběh bez přehřívání páry, jehož expanze by končila za vlhkosti páry maximálně 10%, musí mít teplotu admisní páry přibližně 700°C.

Regenerační výměníky tepla

Zvýšení energetické efektivity může být provedeno přidáním regeneračních výměníků tepla, do kterých je přivedena částečně expandovaná pára z odběrové turbíny. Tato pára následně ve výměníku zkondenzuje, a předá tak své kondenzační teplo. Pokud nebudeme uvažovat nedokonalosti technického provedení, tak se dá konstatovat, že rozdíl energie mezi takto odebranou párou a párou admisní je přímo převeden na turbínu, čímž má tato část výkonu hypoteticky účinnost 100 %. Bohužel je množství takto využitelné páry značně omezené poměrem měrné tepelné kapacity a výparného tepla (viz začátek podkapitoly).

Shrneme-li obsah předchozího odstavce do jedné věty, tak je žádoucí maximalizovat množství energie předané turbíně regenerační parou. Největší množství páry je využité při odběru páry na začátku, na druhou stranu Kg páry odebrané na konci turbíny předal nejvíce energie, proto se optimální bod jednoho výměníku nachází přibližně v polovině intervalu.

Jeden výměník nestačí k absolutnímu využití potenciálu. Na jedné straně by voda mohla být zahřívána na částečnou teplotu více expandovanou parou, na druhé by trocha méně expandované páry mohla předat energii částečně ohřáté vodě vystupující z výměníku. Jak jistě čtenář již pochopil, tak je k celkovému využití potenciálu regenerace potřeba nekonečného množství výměníků.

Spojíme-li tyto znalosti s poznatkem, že účinnost těchto zařízení klesá s jejich počtem, tak zjistíme, že určení ekonomicky efektivního množství výměníků není triviální.

Popis problému byl úmyslně zjednodušen zanedbáním tepelné energie páry nad měrným výparným teplem a zanedbáním účinnosti jednotlivých zařízení.

Výhody elektrárny

- elektrárna může spalovat libovolná paliva (záleží na parametrech kotle)
- nízké náklady na palivo
- vhodné jako základní zdroj

Nevýhody elektrárny

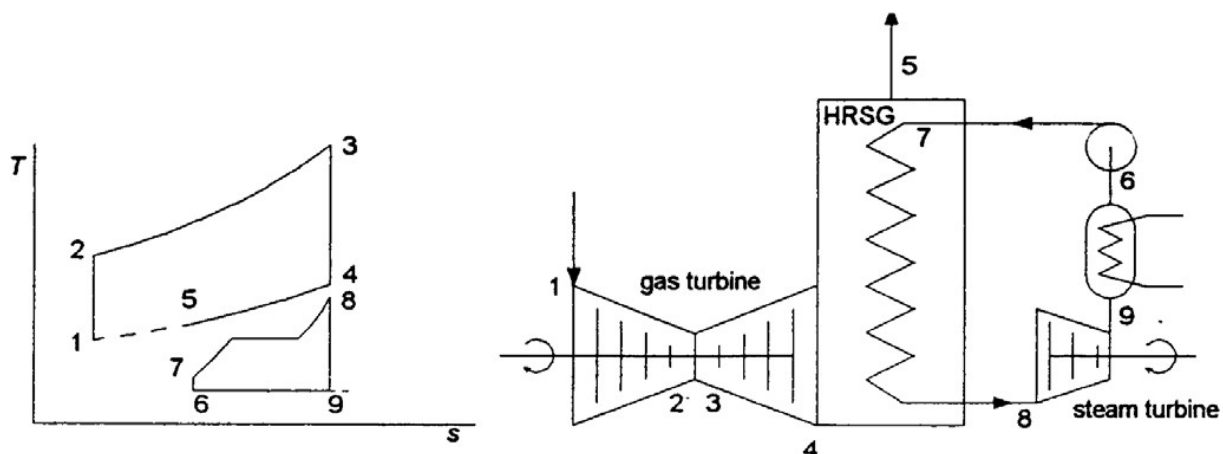
- vyšší investiční náklady
- pomalá regulace výkonu
- vyšší poplatky za emise
- větší spotřeba paliva na spuštění elektrárny

1.3 Paroplynové elektrárny

Základní topologie elektrárny

Paroplynové elektrárny jsou elektrárny, které mají plynovou turbínu a které využívají teplo směsi po expanzi k výrobě páry pro parní cyklus. Tato elektrárna může v závislosti na návrhu obsahovat kotel na tuhá paliva, který pracuje paralelně s generátorem páry a dodává páru do společné parní sběrnice, nebo funguje při sériovém zapojení ke generaci páry z ohřáté vody.

Obr. 1.4: T-s diagram a schéma základní varianty paroplynového cyklu (zdroj [1])

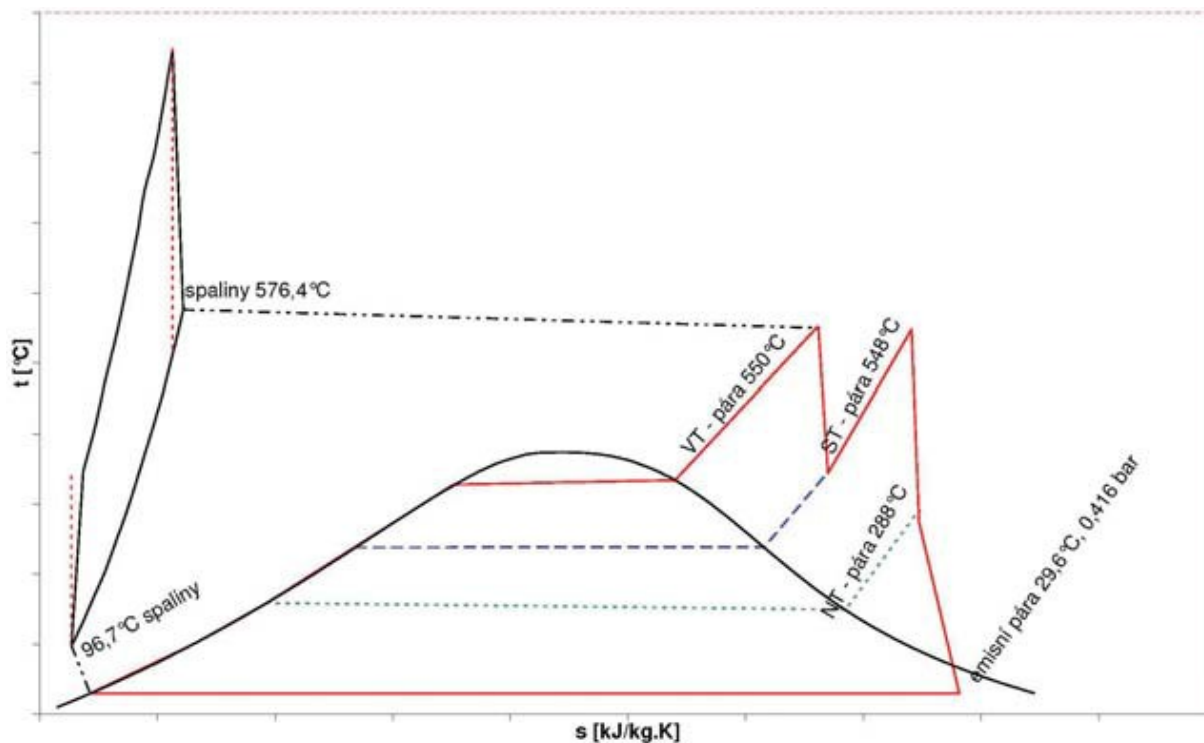


Zkratka HRSG (Heat Recovery Steam Generator) z Obr. 1.4 vyjadřuje generátor páry z tepla spalin. Taktéž je teplota admisní páry limitována teplotou spalin po expanzi, tudíž je za vysokého tlaku páry nutné znovuohřívání páry.

V České republice je v současné době postaven jediný paroplynový zdroj (elektrárna Podčerady). Jedná se o zdroj o jmenovitém výkonu 840MWe s termodynamickou účinností 58,4%, jehož investiční náklady byly 16 000 mil. Kč.^[7] Bohužel se situace na trhu s energiemi změnila tak výrazně, že se elektrárnu nevyplatí provozovat ani pokud považujeme její výstavbu za utopené náklady. Níže

příložený obr. 1.5 je zde umístěn, jakožto reprezentant T-s diagramu zprovozněného paroplynového zdroje.

Obr. 1.5: T-s diagram pracovních látek paroplynové elektrárny (zdroj[6])



Optimální paroplynový cyklus

Pokud chceme maximalizovat součet výstupních energií z generátorů parní turbíny a generátoru plynové turbíny, pak snadno dojdeme k závěru, že optimální provoz celého paroplynového cyklu znamená neoptimální nastavení samostatné plynové části. Při takovémto nastavení je lehce snížena termodynamická účinnost plynové části, čímž dochází ke zvýšení teploty spalin vstupujících do generátoru páry. Za správného nastavení dochází ke většímu zvýšení výkonu parní části, než je snížení výkonu v části plynové.

Určení takového nastavení cyklu je velmi náročné a je prakticky nutné využít speciálního softwaru, který běžně potřebuje k výpočtu řadu iterací. Například pro analýzu jediné české paroplynové elektrárny umístěné v komplexu Podčerady byl využit program *GT Pro* společnosti *Thermoflow*^{[4][7]}.

Úpravy paroplynového cyklu

Do paroplynového cyklu mohou být zahrnuty téměř veškeré úpravy, jak Braytonova, tak Rankinova cyklu. Výjimkou je regenerační ohřev u plynového cyklu, jelikož je teplo plynu po expazi již využito k tvorbě páry.

Pokud bychom hledali způsob, jakým upravit plynový cyklus, pak je dobré zahrnout ve svých úvahách práci *Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant^[1]*. V této práci je provedena vícekritériální analýza, porovnávající jednoduchý cyklus, cyklus s mezichladičem, cyklus s přídavným spalováním a cyklus s mezichladičem a přídavným spalováním. Tato analýza určila jako nejvhodnější cyklus s přídavným spalováním. Na druhou stranu sami autoři přiznávají, že metoda je velmi citlivá na expertní určení vah jednotlivých kritérií.

Výhody paroplynového cyklu

- vysoká účinnost
- nízké emise

Nevýhody paroplynového cyklu

- vyšší investiční náklady
- pomalá regulace výkonu parní části
- neefektivní samostatný provoz plynové části

2 Technické a ekonomické vstupy pro hodnocení ekonomické efektivity

Pokud bychom chtěli přesně určit veškeré vlastnosti elektrárny, tak bychom byli nuceni využít specializovaný software. Tato skutečnost je dána především množstvím jednotlivých vstupních parametrů, což je vidět na software *GT Pro* společnosti *thermofow*, kde je paroplynová elektrárna popsána 3 000 parametry.

Zajímá-li nás pouze přibližné zhodnocení návrhu, pak je nutné vymezit několik nejdůležitějších parametrů a založit na nich hrubý odhad vlastností. Tímto vymezením se zabývám v této kapitole.

2.1 Technické vstupy

2.1.1 Parametry plynové části cyklu

Mechanická účinnost rotoru zahrnuje efektivitu mechanického přenosu energie včetně ztrát třením v soustrojí. Parametr je bezrozměrný a může nabývat hodnot od nuly do jedné.

Účinnost alternátoru vyjadřuje efektivitu převodu kinetické energie na energii elektrickou. Parametr může nabývat hodnot od nuly do jedné.

Vnitřní termodynamická účinnost kompresoru určuje, jak moc se vzduch stlačením zahřeje nad úroveň zahřátí během ideální adiabatické komprese. Energie nutná pro toto zahřátí je dodána z kinetické energie rotoru.

Vnitřní termodynamická účinnost turbíny určuje efektivitu převodu energie z horkých spalin na mechanickou energii rotoru.

Maximální teplota a tlak ve spalovací komoře jsou ve značné míře omezeny technickou úrovní provedení elektrárny. Za využití jednoduchého cyklu platí, že s větší teplotou a tlakem ve spalovací komoře roste celková termodynamická účinnost.

2.1.2 Parametry parní části cyklu

Teplota a tlak páry jsou hlavní parametry parního cyklu. Určují entalpii admisní páry a vyšší teplota s tlakem obecně znamená vyšší celkovou účinnost parního cyklu. Zvýšení tlaku je důležité především z důvodu snížení entropie, čehož můžeme využít k znovuořevu páry po částečné expanzi. Na druhou stranu je také zmenšena entalpie páry. Z toho plyne, že vyšší tlak páry nezvyšuje účinnost, nýbrž pouze umožňuje zvýšení účinnosti jinými úpravami.

Efektivita generátoru páry ze spalin vyjadřuje část tepelné energie přesunutě z expandovaných spalin do tvorby páry o zadané teplotě a tlaku. Parametr je bezrozměrný a nabývá hodnot menších než jedna.

Účinnost kotle značí, kolik tepelné energie z tuhého paliva je využito k výrobě páry v kotli.

Mechanická účinnost rotoru zahrnuje efektivitu mechanického přenosu energie včetně ztrát třením v soustrojí. Parametr může nabývat hodnot od nuly do jedné.

Účinnost alternátoru vyjadřuje efektivitu převodu kinetické energie na energii elektrickou. Parametr může nabývat hodnot od nuly do jedné.

Tlak v kondenzátoru určuje teplotu kondenzace, tudíž i velikost energie odvedené chladicí vodou ze zařízení.

Vlhkost páry po expanzi značí při vyšších hodnotách větší využití energie páry na turbíně. Na druhou stranu kondenzované kapičky vody působí abrazivně na poslední stupně turbíny. V praxi se setkáme s vlhkostí po expanzi maximálně 10 %.

2.1.3 **Ostatní technické parametry**

Výhřevnost paliva vyjadřuje množství energie uvolněné z jednotky paliva. V rámci této práce je výhřevnost obou typů paliv vztažena na 1 kg daného paliva.

Jmenovitý výkon elektrárny značí, na jaký výkon elektrárny je budoucí projekt cílen.

Množství výkonu způsobené paroplynovým oběhem je parametr potřebný k oddělení vyrobené energie podle zdroje chemické energie. Parametr může nabývat veškerých hodnot od nuly do jedné.

Venkovní teplota je převážně využívána při výpočtu vlastností plynové části, ale slouží také k určení minimální teploty a tlaku v parní části.

Venkovní tlak slouží ve zjednodušeném modelu výhradně k výpočtům vlastností plynové části, ale nejedná se o parametr vázaný na její konstrukci, proto je umístěn mezi ostatní technické parametry.

2.1.4 Výpočty z technických parametrů

Výpočet bodu varu – výchozí vzorec

Tyto podkapitoly se zabývají určením teploty varu za daného tlaku a určením tlaku varu za dané teploty. Vztah těchto dvou veličin je popsán v dokumentu *Mezinárodní asociace pro vlastnosti vody a páry* (zdroj [5]).

Základní vztah teploty a tlaku na skupenském přechodu vody a páry:

$$\beta \vartheta + n_1 \beta \vartheta + n_2 \beta \vartheta + n_3 \beta \vartheta + n_4 \beta \vartheta + n_5 \beta \vartheta + n_6 \vartheta + n_7 \vartheta + n_8 = 0$$

$$\vartheta = \frac{T_s}{T'} + \frac{n_9}{(T_s/T' - n_{10})} \quad \beta = \left(\frac{p_s}{p'} \right)^{0,25}$$

$$T' = 1K \quad p' = 1MPa$$

Tabulka 2.1: Konstanty výpočtu bodu varu:

n_1	$0.116\ 705\ 214\ 527\ 67 \times 10^4$	n_6	$0.149\ 151\ 086\ 135\ 30 \times 10^2$
n_2	$-0.724\ 213\ 167\ 032\ 06 \times 10^6$	n_7	$-0.482\ 326\ 573\ 615\ 91 \times 10^4$
n_3	$-0.170\ 738\ 469\ 400\ 92 \times 10^2$	n_8	$0.405\ 113\ 405\ 420\ 57 \times 10^6$
n_4	$0.120\ 208\ 247\ 024\ 70 \times 10^5$	n_9	$-0.238\ 555\ 575\ 678\ 49 \times 10^0$
n_5	$-0.323\ 255\ 503\ 223\ 33 \times 10^7$	n_{10}	$0.650\ 175\ 348\ 447\ 98 \times 10^3$

Výpočet bodu varu – vzorec výpočtu teploty a tlaku varu

Úpravou výchozího vzorce dostaneme vztah pro výpočet tlaku varu:

$$\frac{p_s}{p'} = \left[\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{0,5}} \right]^4$$

$$A = \vartheta^2 + n_1 \vartheta + n_2 \quad B = n_3 \vartheta^2 + n_4 \vartheta + n_5 \quad C = n_6 \vartheta^2 + n_7 \vartheta + n_8$$

Úpravou výchozího vzorce dostaneme vztah pro výpočet teploty varu:

$$\frac{T_s}{T'} = \frac{n_{10} + D - [(n_{10} + D)^2 - 4(n_9 + n_{10})]^{0,5}}{2}$$

$$D = \frac{2G}{-F - (F^2 - 4EG)^{0,5}}$$

$$E = \vartheta^2 + n_3 \vartheta + n_6 \quad F = n_1 \vartheta^2 + n_4 \vartheta + n_7 \quad G = n_2 \vartheta^2 + n_5 \vartheta + n_8$$

Výpočet entalpie páry za dané teploty a tlaku

I přes to, že je entalpie za dané teploty a tlaku jednoznačně určena, neexistuje exaktní vzorec, který by tuto závislost popisoval. Pokud chceme entalpii určit, musíme buď využít tabulek, nebo přibližného výpočtu, jako je například výpočet popsáný *Mezinárodní asociací pro vlastnosti vody a páry* (zdroj [5]).

Tento výpočet entalpie je založen na výpočtu specifické volné Gibbsovy energie, jejíž výpočet je rozdělen na část energie ideálního plynu a reziduální část energie. Pro účely této práce se zabývám pouze výpočtem entalpie páry mimo oblast kritického bodu vody.

Základní vztah specifické a bezrozměrné Gibbsovy energie:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau)$$

g – specifická Gibbsova energie

γ – bezrozměrná Gibbsova energie

γ^o – bezrozměrná Gibbsova energie ideálního plynu

γ^r – zbytková část bezrozměrné Gibbsovy energie

π – redukovaný tlak

τ – inverzní redukovaná teplota

$$\pi = p/p' \quad p' = 1 \text{ MPa}$$

$$\tau = T'/T \quad T' = 540 \text{ K}$$

$$R = 0.461526 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Odvozený vztah pro entalpii:

$$\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r)$$

γ_τ^o – derivace funkce bezrozměrné Gibbsovy energie ideálního plynu podle τ

γ_τ^r – derivace funkce zbytkové části bezrozměrné Gibbsovy energie podle τ

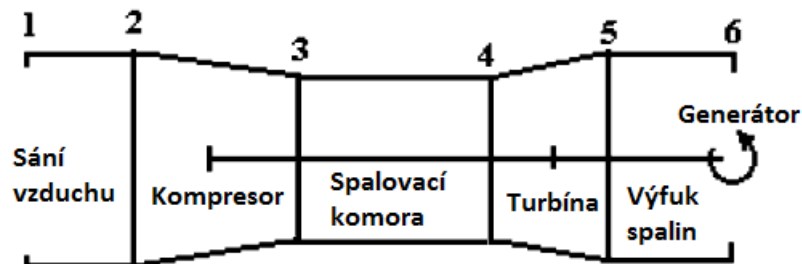
$$\gamma_\tau^o = \sum_{i=1}^9 n_i^o J_i^o \tau^{J_i^o}$$

$$\gamma_\tau^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} J_i(\tau - 0,5)^{J_i - 1}$$

Tabulky potřebných hodnot pro tyto funkce jsou obsaženy v příloze A na konci práce.

Výpočty související s plynovou částí

Obr. 2.2 (1.1): Jednoduchá plyn el. (Převzato ze zdroje [1] a upraveno)



Obrázek 2.2, již zobrazený v kapitole 1.1.1, je zde umístěn za účelem přehlednosti podkapitoly, neboť jsou podle něj popsány parametry cyklu (spodní index odpovídá obrázku).

Ideální izoentropická komprese a expanze jsou popsány vzorcem pro adiabatickou expanzi:

$$\frac{T_{3a}}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_4}{T_{5a}} \quad \text{kde } \kappa = 1,4 \text{ pro dvouatomové plyny, které tvoří většinu vzduchu.}$$

Pro platnost tohoto vztahu je nutno uvažovat $p_3 = p_4$ a $p_2 = p_5$, jinak řečeno zanedbáváme tlakový spád v rámci zařízení.

Kompresi a expanzi však nejsou ideální, proto musíme vypočítat skutečné teploty T_3 a T_5 , k čemuž potřebujeme vnitřní termodynamickou účinnost kompresoru η_{tdk} a vnitřní termodynamickou účinnost turbíny η_{tdt} .

$$\eta_{tdk} = \frac{T_{3a} - T_2}{T_3 - T_2} \quad \eta_{tdt} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_{5a}}$$

V upravené formě:

$$T_3 = \frac{T_{3a} - T_2}{\eta_{tdk}} + T_2 \quad T_5 = T_4 - \eta_{tdt}(T_4 - T_{5a})$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že teplota se při kompresi zvýší více (větší množství odebrané mechanické energie), zatímco teplota při expanzi bude snížena méně (menší část energie převedena na mechanickou).

Jako další krok je třeba určit množství paliva potřebného k zahřátí směsi. Poměr nutného paliva k ohřátí vzduchu na požadovanou teplotu vyjádříme z rovnosti energie před a po spálení paliva:

$$M_{pal} c_{pal} T_{pal} + M_{vzd} c_v T_3 + M_{pal} Q_{pal} = (M_{vzd} + M_{pal}) c_v T_4$$

Aproximujeme-li předchozí vzorec jako $c_{pal} = c_v$ a $T_{pal} = T_2$, pak získáme poměr:

$$\frac{M_{pal}}{M_{vzd}} = \frac{c_v T_4 - c_v T_3}{Q_{pal} + c_v T_2 - c_v T_4} = X$$

$c_v = 1 \text{ kJ/Kg K}$ – měrná tepelná kapacita vzduchu.

Q_{pal} – výhřevnost plynu

X – podíl paliva a vzduchu (využito v následujících výpočtech)

Nyní můžeme přistoupit k poslednímu výpočtu plynové části. Tento výpočet vychází ze vzorce pro svorkový výkon P_{sv} :

$$P_{sv} = [(M_{vzd} + M_{pal})c_v(T_4 - T_5) - M_{vzd}c_v(T_3 - T_2)]\eta_g\eta_a$$

Po úpravě:

$$\frac{P_{sv}}{M_{pal}} = \eta_g\eta_m c_v \left[\frac{X+1}{X}(T_4 - T_5) - \frac{(T_3 - T_2)}{X} \right]$$

η_g – účinnost alternátoru

η_m – mechanická účinnost rotoru

Nyní máme vyjádřen výkon na svorkách generátoru plynové turbíny způsobený jedním kilogramem plynu za sekundu, z něhož je odvození závislostí pro termodynamickou účinnost a potřebného množství paliva na daný výkon triviální.

Výpočty související s parní částí

Výpočet regenerované páry na jeden kilogram plynu:

$$M_{par} = \frac{(M_{pal} + M_{vzd})(T_5 - T_k)c_v\eta_{hrsg}}{h_a - h_0} \quad \frac{M_{par}}{M_{pal}} = \frac{\frac{X+1}{X}(T_5 - T_k)c_v\eta_{hrsg}}{h_a - h_0}$$

pro M_{pal} , M_{vzd} , X , T_5 a c_v viz předchozí podkapitola

M_{par} – hmotnost páry vyrobené za sekundu

T_k – teplota kondenzátu

η_{hrsg} – účinnost převodu tepelné energie z plynu

h_a – entalpie admisní páry (výpočet je na začátku kapitoly 2.1.4)

h_0 – entalpie vody po kondenzaci

Dále určíme výkon na svorkách alternátoru parní turbíny na jeden kilogram plynu:

$$\frac{P_{svpp}}{M_{pal}} = \frac{M_{par}}{M_{pal}}(h_a - h_k)\eta_{gs}\eta_{ms}$$

P_{svpp} – svorkový výkon parní části způsobený regenerovanou parou

h_k – entalpie páry po expanzi (před kondenzátorem)

η_{gs} – účinnost alternátoru

η_{ms} – mechanická účinnost rotoru

Posledním krokem je samotné potřebné množství paliva na dosažení požadovaného výkonu paroplynového cyklu:

$$M_{pal} = P_{pjm} \div \left(\frac{P_{sv}}{M_{pal}} + \frac{P_{svpp}}{M_{pal}} \right)$$

P_{pjm} – jmenovitý výkon paroplynového cyklu

Výpočet energie vyrobené z tuhého paliva

Nyní vypočítáme množství páry vyrobené v parním kotli:

$$M_{pk} = \frac{P_{tjm}}{(h_a - h_k) \eta_{gs} \eta_{ms}}$$

výrazy h_a a h_k jsou popsány v předchozí podkapitole.

M_{pk} – množství páry vyrobené v kotli za sekundu

P_{tjm} – jmenovitý výkon způsobený tuhým palivem

Vypočítáme potřebné množství tuhého paliva:

$$M_{tpal} = \frac{M_{pk}(h_a - h_0)}{Q_{tpal} \eta_k}$$

M_{tpal} – množství tuhého paliva za sekundu

Q_{tpal} – výhřevnost tuhého paliva

Nyní máme veškeré technické podklady k ekonomickému zhodnocení připraveny. Výpočet termodynamické účinnosti a dalších sekundárních parametrů je nyní triviální a proto se jím v této kapitole nezabývám.

2.2 Ekonomické vstupy

Cena paliva je vyjádřena v peněžních jednotkách na tunu u tuhého paliva a na GJ výhřevnosti u plynného paliva.

Hodnota vyrobené energie může být zadána v peněžních jednotkách na jednu MWh nebo na jeden GJ vyrobené energie.

Životnost investice slouží k výpočtu poměrné anuity a čisté současné hodnoty.

Investiční náklady jsou hlavní položkou definující převážnou část průměrných fixních ročních nákladů.

Roční náklady na údržbu vyjadřují velikost každoročních fixních nákladů vzhledem k investičním nákladům.

Diskont znamená očekávaný přírůstek k jednotkové investici a vyjadřuje tak cenu ušlé příležitosti investora.

Poměrná doba využití maxima je bezrozměrná jednotka vyjadřující poměr doby, za kterou by zařízení za jmenovitého výkonu vyrobilo celkový objem produkce období, a daného období.

Ekvivalentní roční fixní náklady

Ekvivalentní roční fixní náklady N_{rf} odpovídají částce, která má při každoročním opakování čistou současnou hodnotu rovnu čisté současné hodnotě všech fixních nákladů za dobu životnosti.

$$N_{rf} = a_{Tz} N_i + N_p \quad a_{Tz} = \frac{r(1+r)^{Tz}}{(1+r)^{Tz} - 1}$$

a_{Tz} – poměrná annuita

N_i – investiční náklady

N_p – provozní náklady

r – diskontní míra

Čistá současná hodnota

Čistá současná hodnota je součet všech peněžních toků za doby životnosti převedených na jejich současnou hodnotu. Běžně jsou investiční náklady obsaženy v roce 0, zatímco spuštění provozu bývá v roce 1.

$$NPV = \sum_{i=0}^{Tz} \frac{CF_i}{(1+r)^i} \quad NPV = \frac{CF((1+r)^{Tz} - 1)}{(1+r)^{Tz} r} - N_i$$

NPV – čistá současná hodnota

Tz – doba životnosti

CF_i – peněžní tok i -tého roku

r – diskontní míra

CF – peněžní tok identický pro roky 1 - Tz

N_i – investiční náklady

3 Nástroje pro modelování vstupů

Jelikož jsem se problematikou výběru výpočetního software zabýval již v bakalářské práci *Využití programu Mathematica pro hodnocení investic v energetice*, tak jsou vybrané pasáže z této práce částečně přejaty. Jedná se především o části textu popisující možnosti programu Mathematica a strukturu jeho příkazů.

3.1 Program Mathematica

Počátek vývoje programu Mathematica se datuje k roku 1988^[9], kdy Stephen Wolfram dokončil verzi *Mathematica 1.0*. Po dokončení této prvotní verze byl program, původně určený jen pro výpočet matematických operací, rozvinut do rozsáhlého programu podporujícího výpočty a množství aplikací.

3.1.1 Základní struktury příkazů

Příkazem se myslí libovolná posloupnost znaků, kterou dokáže program Mathematica přeložit. Příkaz lze spustit samostatně, nebo sekvenčně v kombinaci s jinými příkazy. Pro spuštění více příkazů sekvenčně je nutné, aby se nacházely ve stejném výpočetním bloku, ale aby zároveň byly odděleny buď středníkem, nebo čárkou.

Funkce

Zpracování dat v programu Mathematica většinou značně záleží na využití vestavěných funkcí. Ty mají vždy formát $f[a, b, \dots]$, kde f vyjadřuje název funkce a a, b, \dots vyjadřuje parametry, jejichž množství udává typ funkce. Veškeré funkce zabudované do programu Mathematica začínají velkým písmenem a efekt většiny funkcí může být upraven vybranými modifikátory, které se vkládají dovnitř funkce za parametry.

Také je možné pomocí znaků $:=$ definovat vlastní funkci, ačkoliv takto definované funkce jsou ve skutečnosti jen nevyhodnocené části programu uložené v lokální proměnné (viz níže).

Proměnná

Proměnná je vyjádřena libovolnou kombinací písmen a číslic, která začíná písmenem a neodpovídá žádné z již definovaných systémových funkcí. Typ proměnné není nijak blíže specifikován, tudíž může proměnná obsahovat libovolná data včetně nevyhodnocených příkazů, tabulek, obrázků a videí. Inicializace proměnné probíhá pomocí znaku $=$ a k jejímu odstranění slouží funkce *Clear*.

Pokud je proměnná inicializovaná, může být využita v celém programu. Jediná výjimka nastává, pokud byla proměnná inicializována jako lokální proměnná uvnitř funkce *Block* nebo funkce *Module*, kde je využitelná, jen v rámci příkazu. V této práci také nazývám některé proměnné, které se úzce váží k dané funkci, parametry.

Seznam

Seznamem myslíme základní strukturu dat a zároveň způsob, jak vložit více údajů přímo do kódu. Seznam se vytváří pomocí dvou složených závorek, nebo pomocí funkce *List*. V obou případech jsou prvky odděleny čárkou.

Seznam je struktura často využívaná jako výstup značného množství funkcí, například je-li výstupem funkce matice, pak je tento výstup zapsán jako seznam seznamů. Konkrétně zobrazení matice je možné vynutit příkazem *TableForm*.

Příklad dvourozměrné matice 2x2: `{{ a1, a2 }, { b1, b2 }}`

Řetězec

Některé funkce vyžadují textový vstup. Pro takovéto funkce lze text zadat pomocí dvojitých angloamerických uvozovek na každé straně daného textu. Řetězec lze také využít k zpřehlednění manipulačních prvků, nebo výstupu některých příkazů.

Příklad: `Speak["This is some text"]`

3.1.2 Zdroje dat

Přímé zadání dat

Jako každý výpočetní program umožňuje i program *Mathematica* zadávání dat přímo do kódu. Tato možnost se nejvíce používá ve spojení s ostatními způsoby získávání dat. Takto lze vložit do kódu čísla, řetězce, obrázky i surová data ke zpracování.

Import dat ze souboru

Mathematica 9 podporuje 158 vstupních datových formátů, pomocí kterých lze importovat široké spektrum dat (text, matematický text, obrázky, video, zvuk, 3D modely, ...). Data z těchto formátů jsou automaticky zpracovávána bez nutnosti následného upravování a ihned připravena k použití. Výsledná data mohou být uložena do 134 formátů.

Databáze

Mathematica podporuje jak komunikaci s databázemi pomocí vlastního kódu, univerzálního pro všechny standardní databáze, tak komunikaci pomocí uživatelem zadaných SQL dotazů.

Import dat ze serverů Wolfram|Alpha

Úspěch programu Mathematica stojí na jednom z hlavních pilíř - importu dat ze serverů Wolfram|Alpha. Tyto servery obsahují přes 10 trilionů dat^[12] z oblastí jako jsou například ekonomie, chemie, fyzika, sociální vědy a z mnoho dalších. Z-těchto serverů si funkce programu Mathematica automaticky stahují veškerá potřebná data pro vykonání konkrétního příkazu.

Tímto kanálem lze taktéž získávat informace o aktuálním stavu světa, jako jsou radarová data, předpovědi počasí, nebo ceny obchodovaných materiálů.

3.1.3 Možnosti vizualizace dat

Mathematica umožňuje široké spektrum vizualizací dat. Kromě klasických grafů nabízí také zobrazení stromového typu a trojrozměrné zobrazení grafů i objektů.

Dvourozměrné grafy bodů a funkcí

Dvourozměrný graf údajů se zobrazí pomocí příkazu `ListPlot[{{x1,y1},{x2,y2},...}]` a slouží ke znázornění množství bodů v grafu. Tento typ grafu nabízí širokou škálu možností úpravy, jako jsou spojení bodů podle různých stupňů interpolace, obarvení bodů i propojujících částí na základě souřadnic x nebo y a mnoho dalších úprav. Některé možnosti vyžadují, aby byly alespoň některé body propojeny.

Dvourozměrný graf funkcí se zobrazí pomocí příkazu `Plot[{f1,f2,...},{x,xmin,xmax}]` a je upravitelný stejným způsobem jako graf údajů po spojení jednotlivých bodů.

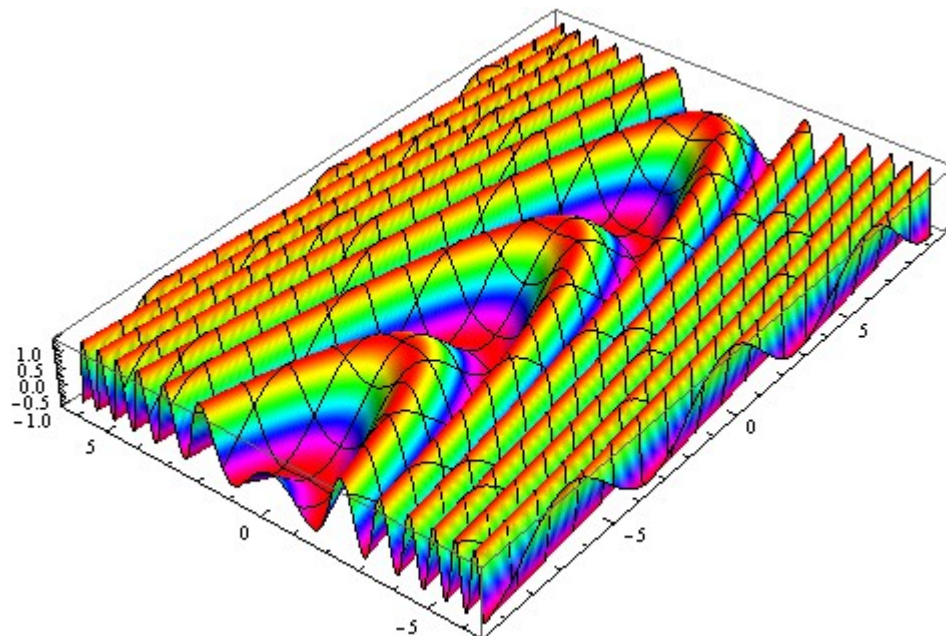
Graf závislostí

Tento typ grafu se velmi liší od výše uvedených grafů, protože jeho podstatou není zobrazování bodů s danými souřadnicemi. Proto také tento typ grafu umožňuje jen základní modifikaci vzhledu. Výhoda tohoto zobrazení spočívá v automatickém rozložení bodů podle jejich závislostí.

Trojrozměrná zobrazení

Jednotící prvek u všech trojrozměrných zobrazení programu Mathematica je možnost rotace výsledného zobrazení pomocí počítačové myši. Mathematica umožňuje trojrozměrně zobrazit body, vztahy, vektory, funkce i obecná zobrazení.

Obr. 3.1: Příklad 3D grafu funkce $\sin(x+y^2)$.



3.1.4 Dynamické zobrazení dat

Funkce Dynamic

Obsah této funkce je aktualizován vždy, když je změněn obsah libovolné využití proměnné. Funkce *Dynamic* nereaguje na změnu hodnot ve funkcích, které svá data získávají vně programu Mathematica, jako například funkce *DateString*, *FinancialData*, nebo *RandomInteger*. Aktualizaci obsahu funkce *Dynamic* lze specifikovat vnořením funkce *Refresh*, která umožňuje aktualizaci vyvolanou po určitém čase, nebo při změně konkrétních proměnných.

Funkce Manipulate

Tato funkce umožňuje jednoduchou implementaci interaktivního rozhraní pro zadávání dat. Její první parametr definuje výstup, který bývá závislý na lokálních proměnných definovaných v druhé části. Funkce *Manipulate* přiřazuje každému parametru objekt pro jeho manipulaci, pokud již není přiřazen, nebo zakázán. Na konci se můžou nacházet přídatné parametry, jako například *Initialization*, sloužící k nastavení funkcí využívaných pro výpočty v rámci funkce *Manipulate*.

Funkce Animate

Tato funkce je velmi podobná funkci *Manipulate*, ale je přizpůsobena zvláště pro potřeby animace funkcí. Pro výpočetně náročné funkce lze využít funkci *ListAnimate*, která vyhodnotí všechna výsledná zobrazení již při spuštění.

3.1.5 Interaktivní vstupy dat

Předchozí kapitola se zabývala funkcemi dynamicky reagujícími na změnu využitých parametrů. Většina aplikací těchto funkcí se neobejde bez způsobu, jak tyto parametry účinně měnit. Právě k tomuto účelu lze využít některé z širokého výběru ovládacích prvků.

InputField

Tímto způsobem lze vložit do příslušné proměnné téměř libovolná data. *InputField* je možno nastavit tak, aby vložené znaky považoval za příkaz, nebo naopak za obyčejný řetězec. Existuje i omezení na pouhé zadávání čísel.

Checkbox

Checkbox musí mít nastaveny možné stavy, ve kterých se může nacházet a při stisknutí vytvořeného tlačítka se přepne do dalšího stavu. Jelikož jsou k rozlišení stavů k dispozici pouze tři různá zobrazení ovládacího tlačítka, je vhodné pro vyšší počet stavů využít jiný způsob.

PopupMenu a SetterBar

Tyto ovládací prvky se svojí funkčností podobají, neboť oba slouží k výběru některého stavu z dané nabídky. Jediný rozdíl tkví ve stylu zobrazení nabídky. Zatímco *SetterBar* zobrazuje veškeré varianty najednou, *PopupMenu* stále zobrazuje jen aktivní variantu a zbylé pouze při stisknutí.

Slider

Slider umožňuje plynule měnit parametr, který má danou minimální a maximální hodnotu. Protože *Slider* při svém pohybu stále obměňuje hodnotu, jsou veškeré výpočty dynamicky vázané s takto řízenou proměnnou neustále přepočítávány (nežádoucí u složitých výpočtů). Tento problém se dá vyřešit snížením kvality výpočtů, nebo jejich zastavení během nastavování proměnné. Existuje také dvourozměrná varianta *2DSlider*.

3.1.6 Funkce pro finanční analýzu

Funkce Cashflow

Tato funkce reprezentuje sérii peněžních toků v příslušných obdobích. Pokud je tato funkce zavolána jen se seznamem, jako vstup jsou přiřazeny peněžním tokům ze seznamu indexy období počítané od nuly. Taktéž je možné přiřadit jednotlivým hodnotám konkrétní období, nebo změnit interval mezi hodnotami.

Funkce TimeValue

Funkce *TimeValue* umožňuje jednoduchý přepočítání hodnot na hodnoty budoucí i minulé. První parametr může být jedna hodnota, nebo seznam hodnot ve formátu výstupu funkce *Cashflow*. Druhým parametrem je diskont a třetím je období, ke kterému se mají hodnoty přepočítat.

Funkce EffectiveInterest

Tato funkce, mající jako první parametr úrokovou míru a jako druhý část úroku, kterým se úročí, slouží k převodu úroku na efektivní úrokovou míru.

3.1.7 Free-Form Linguistic Input

Free-Form Linguistic Input znamená způsob zadávání příkazu, který umožňuje zadat příkaz v anglickém jazyce, k čemuž není zapotřebí žádná znalost formátu příkazů. Překlad z anglického jazyka do příkazů, které Mathematica přeloží, probíhá na serveru Wolfram|Alpha. Služba je tudíž dostupná pouze, pokud má počítač přístup k internetu. Samotný server Wolfram|Alpha byl vytvořen pomocí 15 milionu řádků kódu programu Mathematica a využívá k výpočtům 10 000 procesních jednotek^[12].

3.1.8 Computable Document Format

Tento interaktivní formát dokumentu byl vytvořen za účelem sdílení výsledků tvorby uživatelů programu Mathematica s lidmi, kteří nemají přístup k samotnému programu. Hlavní výhodou dokumentu spočívá v možnosti výpočtu dat na straně příjemce, tudíž není potřeba do dokumentu ukládat velké množství dat a je také možné nechat příjemce měnit vstupní parametry dokumentu. Dokumenty tohoto formátu lze spustit pomocí zdarma dostupného programu *CDF Player*.

Základní licence (FreeCDF) zakazuje libovolnou komerční manipulaci se soubory tohoto formátu, včetně ochrany díla pomocí DRM (digital rights management).

3.1.9 Výpočet čisté současné hodnoty v programu Mathematica

Využití funkce *NestList*

Pokud potřebujeme vypočítat čistou současnou hodnotu ze série stejných peněžních toků, pak se nejvýhodněji jeví použití funkce *NestList*. Ta spustí *nkrát* (*n* zastupuje parametr funkce *Nest*) rekurzivně zadanou funkci. Funkce *NestList* je funkčně velmi podobná, jen vrací místo výsledného produktu seznam všech meziproductů (v tomto případě diskontovaných peněžních toků). Čistá současná hodnota se skládá ze součtů výsledného seznamu.

Využití funkcí *TimeValue* a *Cashflow*

Jak je výše uvedeno (podkapitola 3.1.6), funkce *TimeValue* usnadňuje výpočet převodu hodnot mezi jednotlivými obdobími. Čistá současná hodnota se získá pomocí příkazu `TimeValue[Cashflow[seznam_peněžních_toků], diskont, 0]`.

3.1.10 Novinky současné verze (Mathematica 9)

S každou další verzí jsou do programu Mathematica přidány další možnosti a vylepšeno uživatelské rozhraní. V této verzi jsou nejvýraznější novinky v oblasti uživatelského rozhraní.

Lišta zpracování výstupu

Lišta zpracování výstupu je nová součást uživatelského rozhraní, která se zobrazí, jakmile je dokončeno vyhodnocení příkazu. Tato lišta navrhuje způsoby následující úpravy výstupu předchozí funkce na základě standardního využití konkrétního typu výstupu.

Management zadávání funkcí a proměnných

Tento přídavek k programu nabízí převážně zvýraznění umístění souvisejících závorek a automatické návrhy k dokončení rozepsané funkce, nebo proměnné. Tyto změny značně zpřehledňují samotný text a výrazně usnadnili tvorbu netriviálních aplikací.

3.2 Program MATLAB

První verze programu MATLAB sloužila k zjednodušení výpočetních úkonů, které byly do té doby řešeny pomocí složitého programovacího jazyka Fortran. Jak již název MATLAB (Matrix Laboratory) napovídá, výpočetní jádro programu se zakládá na maticových výpočtech. Výhoda programu MATLAB spočívá v tom, že jádro systému je dostupné ke stažení zdarma, ale placená rozšíření jsou nezbytná pro

většinu aplikací. Dnes pro MATLAB již existuje 86 různých rozšíření. Nevýhoda této fragmentace spočívá v tom, že se některé tyto rozšíření těžko synchronizují.

3.3 Program Maple

Vývoj programu Maple začal již v roce 1980 jakožto školního projektu cíleného na vývin výpočetního systému, který by nebyl nepřiměřeně náročný na hardware. Systém se rychle šířil mezi univerzitami a roku 1988 byla založena firma *Waterloo Maple* spravující komerční vývoj a distribuci produktu. Maple vyniká ve vyhodnocování algebraických výpočtů, ale na druhou stranu postrádá zdroj strukturovaných dat, jako má k dispozici Mathematica.

3.4 Srovnání dostupných variant

Určit nejlepší z programů Maple, MATLAB a Mathematica prakticky není možné, neboť každý z těchto programů vyniká v jiné oblasti. Pokud jde o problémy, které jsou snadno převoditelné na maticové výpočty, nejlepší volbou se stává program MATLAB, neboť jeho výpočetní jádro se zakládá na maticových operacích. Další specifickou oblastí jsou symbolické výpočty, jejichž efektivním zpracováním dominuje program Maple. Hlavní výhodou programu Mathematica spočívá v možnosti automatického přístupu k online datům a také v možnosti dotazování serveru *Wolfram|Alpha*. Toto dotazování v přirozené formě anglického jazyka velmi usnadňuje práci začátečníkům.

Pro účely této diplomové práce jsem pro vytvoření technicko ekonomického modelu zvolil program Mathematica. K tomuto rozhodnutí mě především vedly dobré zkušenosti se snadno modifikovatelným příkazem *Manipulate*, jež jsem získal během tvorby bakalářské práce.

4 Aplikace pro zvolený typ elektrárny

Tato kapitola se zaměřuje na propojení teoretických znalostí s potenciálem programu Mathematica. Konkrétně se zde popisuje struktura a tvorba aplikace hodnotící ekonomickou efektivitu investice do paroplynové elektrárny s přídatným kotlem na tuhá paliva pro paralelní tvorbu páry.

4.1 Struktura kódu

Celý program je ve skutečnosti pouze jeden příkaz *Manipulate*, který je však značně modifikován. První část tohoto příkazu vždy specifikuje výstup, v tomto případě je výstupem proměnná *output*. Druhá část je tvořena deklarací veškerých použitých proměnných, u kterých je potlačeno zobrazení automatického ovládaní (s výjimkou proměnné *section*), a panelem obsahujícím dynamicky aktualizovanou proměnnou *inputs* (viz kap. 4.2). Další část je tvořena seznamem bloků kódu, které řídí veškeré změny parametrů. Poslední část je modifikátor *Initialization*, který slouží k nastavení konstant, vložení tabulek a deklarování složitých funkcí.

4.2 Uživatelské rozhraní

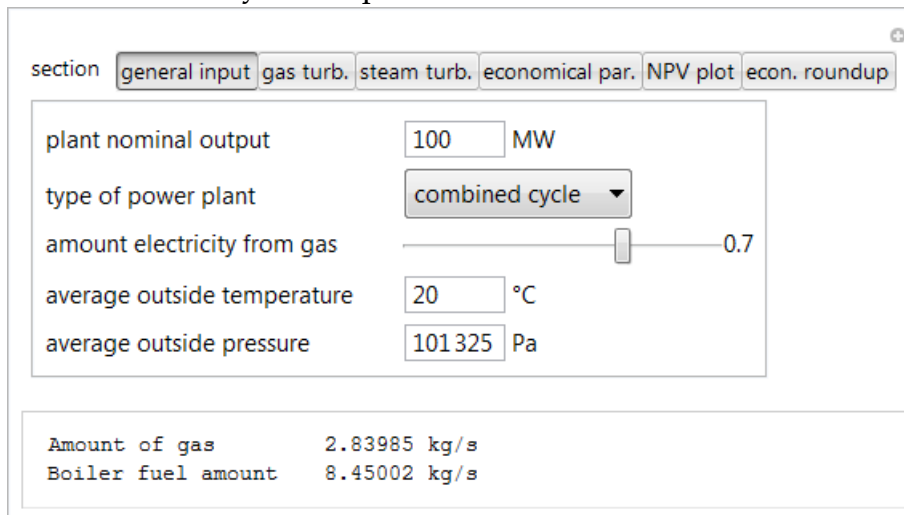
Z důvodu velkého množství parametrů bylo nutné navrhnout způsob jejich zobrazování s důrazem na přehlednost a efektivitu. Na horním okraji uživatelského rozhraní se vždy nachází přepínač sekcí programu. Pod ním je zobrazen obsah proměnné *inputs* uvnitř panelu a u spodního okraje je zobrazen obsah proměnné *output*. Samotné obsahy těchto dvou proměnných odpovídají konkrétní vybrané sekci.

Obecné vstupy

V této sekci může uživatel nastavit obecné parametry elektrárny a okolních podmínek. Převážně se tato část zabývá určením velikosti výkonu a jeho dělením podle zdroje primární energie.

Proměnná *output* v rámci této sekce zobrazuje množství plynu a tuhého paliva za sekundu, jako demonstraci spotřeby paliva konkrétního rozdělení.

Obr. 4.1: Sekce obecných vstupů.



section **general input** gas turb. steam turb. economical par. NPV plot econ. roundup

plant nominal output MW

type of power plant

amount electricity from gas

average outside temperature °C

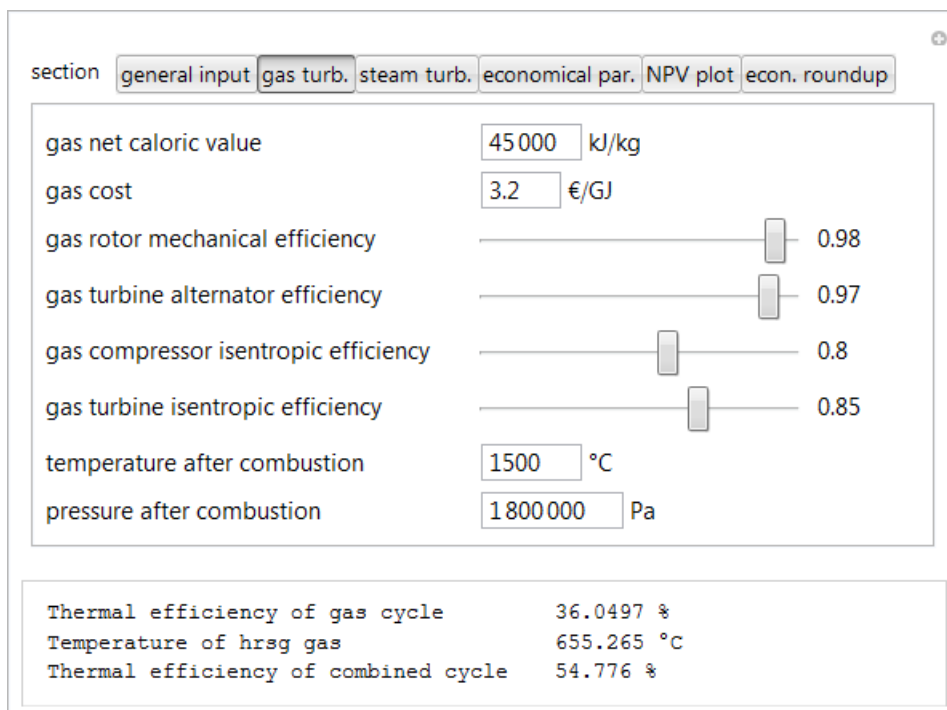
average outside pressure Pa

Amount of gas 2.83985 kg/s
Boiler fuel amount 8.45002 kg/s

Parametry plynového cyklu

Zde může uživatel nastavit parametry popsané v kapitole 2.1.1 a také výhřevnost a cenu plynu. Jako částečný výstup má uživatel zobrazenou termodynamickou účinnost plynového cyklu, teplotu spalin pokračujících do generátoru páry a termodynamickou účinnost celého paroplynového cyklu.

Obr. 4.2: Sekce parametrů plynového cyklu.



section **general input** **gas turb.** steam turb. economical par. NPV plot econ. roundup

gas net calorific value kJ/kg

gas cost €/GJ

gas rotor mechanical efficiency

gas turbine alternator efficiency

gas compressor isentropic efficiency

gas turbine isentropic efficiency

temperature after combustion °C

pressure after combustion Pa

Thermal efficiency of gas cycle 36.0497 %
Temperature of hrsg gas 655.265 °C
Thermal efficiency of combined cycle 54.776 %

Parametry parního cyklu

Podobně jako parametrů plynového cyklu tato sekce obsahuje parametry z kapitoly 2.1.2 a navíc cenu a výhřevnost tuhého paliva. Jako částečný výstup je ve spodní části zobrazena termodynamická účinnost parního a paroplynového cyklu spolu s teplotou spalin vstupujících do generátoru páry. Teplota spalin zároveň určuje maximální povolenou teplotu páry.

Výjimkou je parametr tlaku páry, který je vynechán, neboť model nezahrnuje žádnou úpravu cyklu, která by využila potenciál vyššího tlaku. Kdyby byl parametr tlaku modifikovatelný, pak by uživatel mohl dojít k chybnému závěru, že snížením tlaku páry zvýší účinnost. V rámci výpočtů je počítáno s tlakem páry 3MPa.

Částečný výstup zobrazuje účinnost výroby elektřiny z tuhého paliva, teplotu spalin vstupujících do generátoru páry a účinnost paroplynového cyklu.

Obr. 4.3: Sekce parametrů parního cyklu.

The screenshot shows a software interface with a 'section' menu at the top containing: 'general input', 'gas turb.', 'steam turb.', 'economical par.', 'NPV plot', and 'econ. roundup'. The 'steam turb.' section is active. It contains the following parameters:

net caloric value of boiler fuel	11000	kJ/kg
cost of boiler fuel	40	€/Kg
steam temperature	550	°C
steam generator efficiency	<input type="range"/>	0.9
steam boiler efficiency	<input type="range"/>	0.95
steam rotor mechanical efficiency	<input type="range"/>	0.98
steam turbine alternator efficiency	<input type="range"/>	0.97

Below these are calculated results:

Thermal efficiency of steam cycle	32.2753 %
Temperature of incoming gas	655.265 °C
Thermal efficiency of combined cycle	54.776 %

Parametry investice

Tato sekce umožňuje nastavení doby životnosti, investičních nákladů, nákladů na údržbu, diskontu, zatížení elektrárny, hodnoty vyrobené energie a měny, ve které jsou uvedeny vstupy a výstupy.

Proměnná output v této sekci zobrazuje hodnotu paliva spotřebovaného na výrobu 1 MWh elektřiny a minimální hodnotu energie pro kladnou čistou současnou hodnotu.

Obr. 4.4: Sekce parametrů investice.

The screenshot shows a software interface for investment parameters. At the top, there are tabs: 'general input', 'gas turb.', 'steam turb.', 'economical par.', 'NPV plot', and 'econ. roundup'. The 'economical par.' tab is selected. Below the tabs, there are several input fields and a slider:

- investment livetime: 50 years
- investment: 60000000 €
- yearly maintenance cost: 2 % of investment
- diskont: 0.08
- load factor: a slider set to 0.6
- value of 1 MWh: 40 €
- currency: €

At the bottom, there is a summary table:

Value of used fuel	26.8898 €/MWh el.
	7.46939 €/GJ el.
Minimal value for positive NPV	38.5043 €/MWh

Graf minimální ceny energie

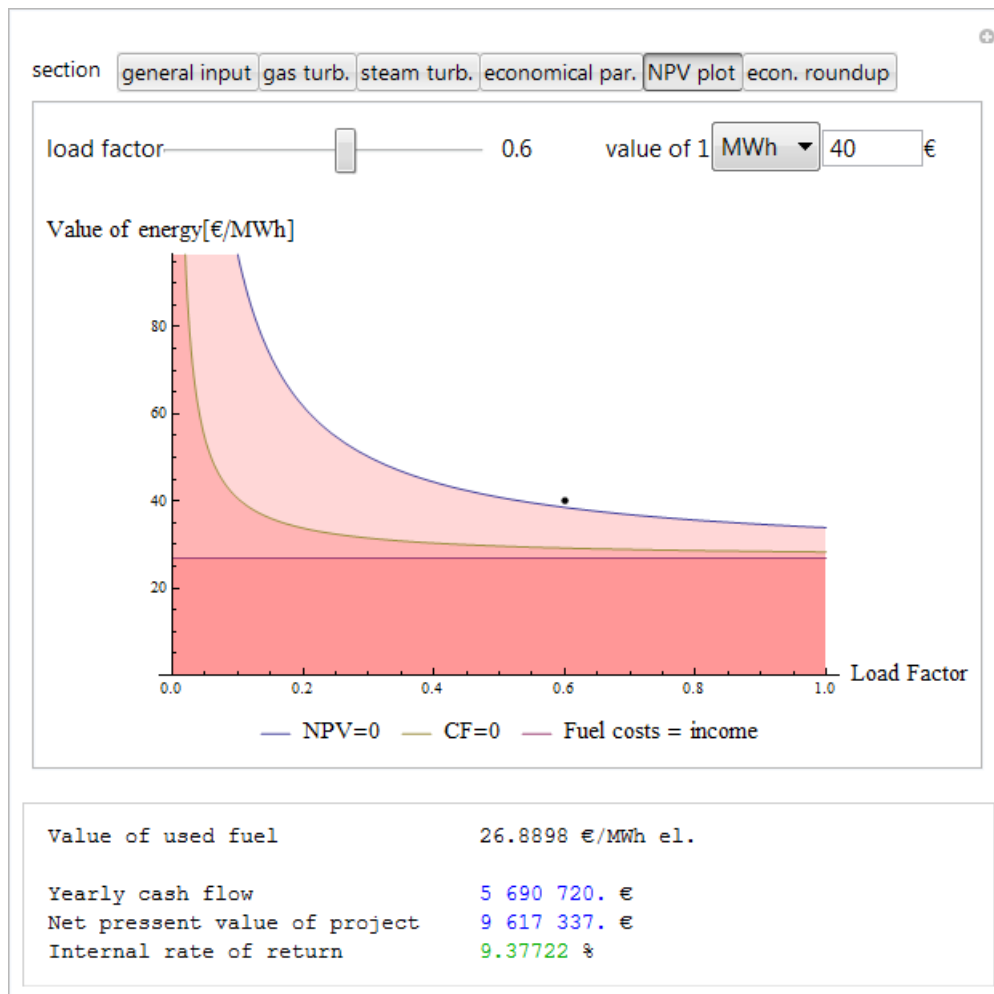
Tato sekce je první, která je primárně zaměřená na prezentování vlastností zadané investice. Z převážné části je tvořena grafem nutné hodnoty elektrické energie pro splnění konkrétních požadavků v závislosti na zatížení zařízení.

Graf je dělen třemi křivkami na čtyři části. V nejspodnější vrstvě (nejvíce červeně zbarvená) jsou náklady na palivo větší, než je příjem z vyrobené energie. Druhá vrstva od spodního okraje vyjadřuje situaci, kdy příjem nepokrývá palivové náklady spolu s náklady na údržbu. Třetí vrstva znamená kladný cash flow běžného roku, ale záporné NPV projektu. Poslední vrstva (bez zbarvení) znamená kladné NPV projektu.

Nad grafem jsou umístěny ovládací prvky hodnoty elektřiny a zatížení zařízení. Bod udaný nastavením těchto parametrů se zobrazuje uvnitř grafu, včetně automatické aktualizace pozice.

V části standardního výstupu je uvedena hodnota paliva spotřebovaného na výrobu 1 MWh elektřiny, cashflow běžného roku, čistá současná hodnota a vnitřní výnosové procento projektu.

Obr. 4.5: Sekce grafu minimální ceny energie.



Ekonomické shrnutí projektu

Poslední sekce je jediná, která nemá žádné kontrolní prvky a jedná se tudíž o statické zhodnocení celkového důsledku nastavení jednotlivých sekcí. První tři údaje se zabývají variabilní částí provozních, konkrétně se jedná o náklady na spotřebovaný plyn, náklady na spotřebované tuhé palivo a celková hodnota vyrobené elektřiny.

Po grafickém oddělení hodnot následují dva uvedené údaje zobrazují součet předchozích hodnot (celkový variabilní výsledek) a ekvivalentní roční fixní náklady. Součet těchto hodnot tvoří ekvivalentní roční finanční výsledek projektu, který je uveden hned po druhém grafickém oddělení hodnot.

Poslední trojice hodnot zobrazuje peněžní tok běžného roku, čistou současnou hodnotu projektu a vnitřní výnosové procento projektu.

Obr. 4.6: Sekce ekonomického shrnutí projektu.

section	
general input	gas turb.
steam turb.	economical par.
NPV plot	econ. roundup

Yearly costs of gas fuel	7 737 763. €
Yearly costs of coal fuel	6 395 517. €
Yearly income	21 024 000. €

Total yearly variable output	6 890 720. €
Ekvivalent yearly fixed costs	6 104 571. €

Ekvivalent yearly result	786 149. €
Yearly cash flow	5 690 720. €
Net present value of project	9 617 337. €
Internal rate of return	9.37722 %

4.3 Výpočetní část

Vytvořený program je velmi rozsáhlý a některé výpočty jsou značně komplikované. Pokud by program nebyl nijak rozdělen a veškeré výpočty by se provedly znovu při změně libovolného parametru, pak by zřejmě došlo k pomalým reakcím na konkrétní změny.

Aby se předešlo tomuto nepříznivému jevu, je výpočetní část programu tvořena bloky kódu, které jsou aktivované pouze při změně specifikované proměnné.

Ukázka bloku kódu:

```
Dynamic @ Refresh [ x = y + z; "" , TrackedSymbols :-> { y } ]
```

Takovýto blok automaticky při změně hodnoty proměnné y změní hodnotu proměnné x na součet z a y , zatímco nijak nebude reagovat na případné změny z .

4.4 Iniciační část programu

Tato část programu je vyhodnocena právě jednou a to v momentě spuštění programu. Jsou zde deklarované nejen rozličné konstanty, ale i funkce zajišťující výpočet bodu varu a entalpie z teploty a tlaku.

Celá tato část je obsažena v modifikátoru *Initialization* funkce *Manipulate*.

4.4.1 Výpočet entalpie

Zkrátíme-li samotný výpočet na nejnütnější komponenty, tak nám zůstane pouze nutnost zadání celé tabulky parametrů a specifikace konkrétní funkce. Tabulka parametrů Gibbsovy energie ideálního plynu je vyjádřena jako seznam $\{\{J_1, n_1\}, \{J_2, n_2\} \dots \{J_9, n_9\}\}$. Tabulka parametrů Gibbsovy energie zbytkové části je vyjádřena jako seznam $\{\{I_1, J_1, n_1\}, \{I_2, J_2, n_2\} \dots \{I_{43}, J_{43}, n_{43}\}\}$.

Výsledkem je funkce *enthalpy*[tlak_v_Pa , teplota_v_°C]

Ověřování přesnosti funkce

Dokument *Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam* zároveň se vztahy uvádí kontrolní hodnoty za teplot 300K, 700K a tlaků 3500Pa, 30MPa. Správnost výpočtu ověříme pomocí rozdílu vypočítané a kontrolní hodnoty:

$$\text{enthalpy}[3500, 300 - 273.15] - 2549.91145 = 0.00000084002 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{enthalpy}[3500, 700 - 273.15] - 3335.68375 = 0.00000373122 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{enthalpy}[30000000, 700 - 273.15] - 2631.49474 = 0.00000484481 \text{ kJ/kg}$$

Rozdíly mezi hodnotami jsou za hranicí přesnosti výpočtu.

Při srovnání h-s diagramu těmito hodnotami zjišťujeme, že hodnota entalpie 3,5 kPa a 26,85 °C odpovídá diagramu, ale zbylé dva body se v tomto diagramu nenachází.

4.4.2 Výpočet bodu varu

Výpočetní vztah teploty a tlaku je tvořen více stupni výpočtů, proto je uzavřen v příkazu *Block*, který umožňuje deklaraci lokálních proměnných sloužících pro mezivýpočty. Parametry jsou uloženy v jednoduchém seznamu $\{n_1, \dots, n_{10}\}$.

Ověřování přesnosti výpočtu teploty varu

Kontrolní hodnoty teplot varu jsou uvedeny pro tlaky 0,1MPa, 1MPa a 10MPa:

$$\text{SaturTemp}[100000] + 273.15 - 372.755919 = -0.000000388662 \text{ °C}$$

$$\text{SaturTemp}[1000000] + 273.15 - 453.035632 = 0.000000391466 \text{ °C}$$

$$\text{SaturTemp}[10000000] + 273.15 - 584.149488 = -0.0000000147338 \text{ °C}$$

Rozdíly mezi hodnotami jsou za hranicí přesnosti výpočtu.

Ověřování přesnosti výpočtu tlaku varu

Kontrolní hodnoty tlaku varu jsou uvedeny pro teploty 300K, 500K a 600K:

$$\text{SaturPres}[300 - 273.15] - 3536.58941 = -0.283227 \text{ Pa}$$

$$\text{SaturPres}[500 - 273.15] - 2638897.76 = -155.701 \text{ Pa}$$

$$\text{SaturPres}[600 - 273.15] - 12\,344\,314.6 = -1\,524.22 \text{ Pa}$$

U této funkce jsou rozdíly řádově větší a závislost mezi velikostí teploty a rozdílu naznačuje systematickou chybu. Při opakovaných kontrolách kódu se problém nepodařilo odhalit, ale vzhledem k poměru velikosti chyby k velikosti výsledné hodnoty (maximálně 0,012%) se také může jednat o zaokrouhlovací chybu.

V obou případech je daná nepřesnost zanedbatelná.

4.5 Možná rozšíření aplikace

Výsledná aplikace je sice funkčním celkem hodnotícím investici do nejjednoduššího typu paroplynové elektrárny, ale stále zde existuje potenciál rozšíření o další funkce. V této podkapitole se zabývám těmito rozšířeními, včetně jejich dopady a komplikacemi.

Zahrnutí účinnosti parní turbíny do výpočtu

Abychom mohli zahrnout účinnost parní turbíny, musíme nejdříve přesně určit pozici admisní páry na h-s diagramu. Výpočet entalpie je již v aplikaci zahrnut a výpočet entropie je tudíž pouze otázkou zadání vzorce (výpočty entalpie a entropie sdílejí konstanty).

Poté musíme navrhnout způsob, jak určit parametry vlastnosti emisní páry, neboť se ve značném množství případů pouhou jednoduchou expanzí dostaneme do oblasti páry s nepříjemně vysokou vlhkostí. Taktéž by bylo vhodné navrhnout optimální variantu cyklu, včetně optimálního počtu tlakových stupňů s přehříváním páry.

Možnost prodeje tepelné energie

Možnost teplotního prodeje tepla byla jednou z původně uvažovaných komponent aplikace. Ze záměru se ustoupilo, neboť ke správnému vyhodnocení ekonomických důsledků by bylo nutné zahrnout kompletní výpočty Rankinova cyklu, včetně výpočtu entropie a výpočtů teploty ze zadaného tlaku a entropie.

Taktéž přidání všech souvisejících parametrů do uživatelského rozhraní by mohlo aplikaci učinit nepřehlednou.

Panel odhadu velikosti investičních nákladů

Toto rozšíření vyžaduje získání značného množství údajů o předchozích vybudovaných zařízeních a pořizovacích cenách jednotlivých součástí. S těmito údaji lze vytvořit orientační závislosti pořizovacích nákladů na velikosti vyrobeného (přeneseného) výkonu konkrétní části zařízení. Například jedna z jednodušejší

zjistitelných závislostí je závislost pořizovacích nákladů na čerpadla v závislosti na potřebném výkonu.

Zahrnutí úprav paroplynového cyklu

Úpravami je myšleno mezichlazení částečně stlačeného plynu, přídavné spalování po částečné expanzi spalin, přehřívání páry po částečné expanzi a regenerační ohřev parního cyklu.

Pokud by se tato rozšíření do aplikace zahrnula, pak by bylo vzhledem ke složitosti uživatelského rozhraní vhodné implementovat taktéž automatické nastavování řady sekundárních parametrů, jako například velikost tlaku v mezistupních u parní části, nebo kompresní poměry nízkotlaké a vysokotlaké části plynové turbíny.

Závěr

V této práci jsem nejprve definoval pojem tepelná elektrárna a poté popsal plynovou elektrárnu, elektrárnu na tuhá paliva a paroplynovou elektrárnu. Každý typ elektrárny jsem popsal z hlediska způsobu funkce nejen za nejjednoduššího provedení, ale i při zahrnutí různých úprav cyklu.

V druhé kapitole jsem se zabýval technickými a ekonomickými výpočty nutnými pro vytvoření modelu. Konkrétně jsem odvodil řadu vztahů určujících vlastnosti plynového i parního cyklu. Taktéž jsem přiblížil způsoby určení teploty varu vody za zadaného tlaku, tlaku varu vody za zadané teploty a entalpie páry ze zadané teploty a tlaku.

Ve třetí kapitole jsem se zabýval převážně programem Mathematica a částečně ostatními výpočetními programy. Rozebral jsem základní datové formáty i funkce programu. Analyzoval jsem způsoby získávání dat. Zaměřil jsem se na různé způsoby prezentace dat. Objasnil jsem vlastnosti dynamických zobrazení dat. Zjistil jsem, jaké nové možnosti nabízí Mathematica 9 a porovnal jsem jej s ostatními výpočetními programy.

Ve čtvrté kapitole jsem nejprve popisoval strukturu zdrojového kódu vytvořené aplikace. Poté jsem rozebral uživatelské rozhraní a jeho jednotlivé sekce a rozebral jsem inicializační část aplikace, která obsahuje veškeré potřebné statické údaje k výpočtům. Na závěr této kapitoly jsem uvedl přehled možných budoucích rozšíření této aplikace.

Cíl této práce jsem splnil – vytvořil jsem aplikaci, která může vzhledem k omezenému množství parametrů poměrně přesně zhodnotit investici do paroplynové elektrárny.

Vytvořená aplikace bude po splnění specifických požadavků nahrána na *Wolfram Demonstrations Project*.

Zdroje a citace:

- [1] A.L. Polyzakis a spol.: *Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant* [online]:
<http://80.www.sciencedirect.com/dialog.cvut.cz/science/article/pii/S0196890407002828>
- [2] M. M. RAHMAN a SPOL. *Thermal Analysis of Open-Cycle Regenerator Gas-Turbine Power-Plant*. [online]:
http://www.academia.edu/2822547/Thermal_Analysis_of_Open-Cycle_Regenerator_Gas-Turbine_Power-Plant
- [3] ČEPL, Ondřej. *Optimalizace Rankineůva-Clausiiůva parního cyklu*. Brno, 2013. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64389. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [4] Internetová stránka společnosti ThermoFlow. [online]. 6.3.2014. Dostupné z: <http://www.thermoflow.com/>
- [5] THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE PROPERTIES OF WATER AND STEAM. *Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*. Lucerne, Switzerland, 2007. [online]: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>
- [6] ŠIMŮNEK, Jan. ŠKODA PRAHA INVEST S.R.O. *Nový paroplynový zdroj 840 MWe v Elektrárně Počerady* pozn.: nepublikovaný dokument. Podobný dokument se stejným názvem lze nalézt online: <http://www.spininvest.cz/files/Pocerady.pdf>
- [7] VYBULKA, Jan. Osobní rozhovor. Praha, 12.2.2014. pozn.: Využití programu *GT Pro* bylo odvozeno až z nabídky firmy *ThermoFlow*. (zdroj [4])
- [8] Dokumentace programu Mathematica. dostupná v prostředí programu Mathematica [online]:
<http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>
- [9] Internetová stránka projektu *Wolfram Demonstrations Project* [online]:
<http://demonstrations.wolfram.com>
- [10] Internetová stránka společnosti *Waterloo Maple* [online]:
<http://www.maplesoft.com/index.aspx>
- [11] Internetová stránka společnosti *MathWorks* [online]:
http://www.mathworks.com/products/matlab/?s_cid=global_nav
- [12] Stephen Wolfram: *The Background and Vision of Mathematica* (video) [online]: <http://www.youtube.com/watch?v=56lSaies6Ws#t=924s>.

Použité zkratky, výrazy a symboly

- *CF (Cashflow)* je zkratka pro peněžní tok, vyjadřuje peněžní přírůstek pro kladné hodnoty a peněžní úbytek pro hodnoty záporné.
- *NPV (Net Present Value)* je zkratka pro čistou současnou hodnotu
- *IRR (Internal Rate of Return)* je zkratka pro vnitřní výnosové procento
- *Diskont* vyjadřuje přírůstek hodnoty investice o jednotkové velikosti při přechodu do následujícího období

- p tlak běžně uváděný v Pa
- p' referenční tlak výpočtu (definován vždy u výpočtu)
- T teplota běžně uváděná v °C (výpočty v K)
- T' referenční teplota výpočtu (definována vždy u výpočtu)
- M hmotnostní tok běžně uváděna v Kg/s

Tabulky a obrázky:

<i>Obr. 1.1 (2.2):</i> Jednoduchá plyn el. (převzato ze zdroje [1] a upraveno).....	9
<i>Obr. 1.2:</i> Dvoustupňová plynová el. (převzato ze zdroje [1] a upraveno).....	10
<i>Obr. 1.3:</i> Parní cyklus s jedním přihřevem (zdroj [3]).....	13
<i>Obr. 1.4:</i> T-s diagram a schéma základní varianty paroplynového cyklu (zdroj [1])...	15
<i>Obr. 1.5:</i> T-s diagram pracovních látek paroplynové elektrárny (zdroj[6]).....	16
<i>Tabulka 2.1:</i> Konstanty výpočtu bodu varu:.....	20
<i>Obr. 2.2 (1.1):</i> Jednoduchá plyn el. (Převzato ze zdroje [1] a upraveno).....	22
<i>Obr. 3.1:</i> Příklad 3D grafu funkce $\sin(x+y^2)$	29
<i>Obr. 4.1:</i> Sekce obecných vstupů.....	35
<i>Obr. 4.2:</i> Sekce parametrů plynového cyklu.....	35
<i>Obr. 4.3:</i> Sekce parametrů parního cyklu.....	36
<i>Obr. 4.4:</i> Sekce parametrů investice.....	37
<i>Obr. 4.5:</i> Sekce grafu minimální ceny energie.....	38
<i>Obr. 4.6:</i> Sekce ekonomického shrnutí projektu.....	39

Přílohy:

- A. Tabulky parametrů výpočtu entalpie.
- B. Zdrojový kód s komentářem v českém jazyce.
- C. CD obsahující – Tuto práci ve formátu .pdf
 - Zdrojový kód programu ve formátu .nb
 - Samostatný program ve formátu .cdf

Příloha A: Tabulky parametrů výpočtu entalpie

Tabulka A.1: Konstanty výpočtu bezrozměrné gibsovy energie ideálního plynu.

i	J_i^o	n_i^o	i	J_i^o	n_i^o
1	0	$-0.969\ 276\ 865\ 002\ 17 \times 10^1$	6	-2	$0.142\ 408\ 191\ 714\ 44 \times 10^1$
2	1	$0.100\ 866\ 559\ 680\ 18 \times 10^2$	7	-1	$-0.438\ 395\ 113\ 194\ 50 \times 10^1$
3	-5	$-0.560\ 879\ 112\ 830\ 20 \times 10^{-2}$	8	2	$-0.284\ 086\ 324\ 607\ 72 \times 10^0$
4	-4	$0.714\ 527\ 380\ 814\ 55 \times 10^{-1}$	9	3	$0.212\ 684\ 637\ 533\ 07 \times 10^{-1}$
5	-3	$-0.407\ 104\ 982\ 239\ 28 \times 10^0$			

Tabulka A.2: Konstanty výpočtu zbytkové části bezrozměrné gibsovy energie.

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	1	0	$-0.177\ 317\ 424\ 732\ 13 \times 10^{-2}$	23	7	0	$-0.590\ 595\ 643\ 242\ 70 \times 10^{-17}$
2	1	1	$-0.178\ 348\ 622\ 923\ 58 \times 10^{-1}$	24	7	11	$-0.126\ 218\ 088\ 991\ 01 \times 10^{-5}$
3	1	2	$-0.459\ 960\ 136\ 963\ 65 \times 10^{-1}$	25	7	25	$-0.389\ 468\ 424\ 357\ 39 \times 10^{-1}$
4	1	3	$-0.575\ 812\ 590\ 834\ 32 \times 10^{-1}$	26	8	8	$0.112\ 562\ 113\ 604\ 59 \times 10^{-10}$
5	1	6	$-0.503\ 252\ 787\ 279\ 30 \times 10^{-1}$	27	8	36	$-0.823\ 113\ 408\ 979\ 98 \times 10^1$
6	2	1	$-0.330\ 326\ 416\ 702\ 03 \times 10^{-4}$	28	9	13	$0.198\ 097\ 128\ 020\ 88 \times 10^{-7}$
7	2	2	$-0.189\ 489\ 875\ 163\ 15 \times 10^{-3}$	29	10	4	$0.104\ 069\ 652\ 101\ 74 \times 10^{-18}$
8	2	4	$-0.393\ 927\ 772\ 433\ 55 \times 10^{-2}$	30	10	10	$-0.102\ 347\ 470\ 959\ 29 \times 10^{-12}$
9	2	7	$-0.437\ 972\ 956\ 505\ 73 \times 10^{-1}$	31	10	14	$-0.100\ 181\ 793\ 795\ 11 \times 10^{-8}$
10	2	36	$-0.266\ 745\ 479\ 140\ 87 \times 10^{-4}$	32	16	29	$-0.808\ 829\ 086\ 469\ 85 \times 10^{-10}$
11	3	0	$0.204\ 817\ 376\ 923\ 09 \times 10^{-7}$	33	16	50	0.106 930 318 794 09
12	3	1	$0.438\ 706\ 672\ 844\ 35 \times 10^{-6}$	34	18	57	-0.336 622 505 741 71
13	3	3	$-0.322\ 776\ 772\ 385\ 70 \times 10^{-4}$	35	20	20	$0.891\ 858\ 453\ 554\ 21 \times 10^{-24}$
14	3	6	$-0.150\ 339\ 245\ 421\ 48 \times 10^{-2}$	36	20	35	$0.306\ 293\ 168\ 762\ 32 \times 10^{-12}$
15	3	35	$-0.406\ 682\ 535\ 626\ 49 \times 10^{-1}$	37	20	48	$-0.420\ 024\ 676\ 982\ 08 \times 10^{-5}$
16	4	1	$-0.788\ 473\ 095\ 593\ 67 \times 10^{-9}$	38	21	21	$-0.590\ 560\ 296\ 856\ 39 \times 10^{-25}$
17	4	2	$0.127\ 907\ 178\ 522\ 85 \times 10^{-7}$	39	22	53	$0.378\ 269\ 476\ 134\ 57 \times 10^{-5}$
18	4	3	$0.482\ 253\ 727\ 185\ 07 \times 10^{-6}$	40	23	39	$-0.127\ 686\ 089\ 346\ 81 \times 10^{-14}$
19	5	7	$0.229\ 220\ 763\ 376\ 61 \times 10^{-5}$	41	24	26	$0.730\ 876\ 105\ 950\ 61 \times 10^{-28}$
20	6	3	$-0.167\ 147\ 664\ 510\ 61 \times 10^{-10}$	42	24	40	$0.554\ 147\ 153\ 507\ 78 \times 10^{-16}$
21	6	16	$-0.211\ 714\ 723\ 213\ 55 \times 10^{-2}$	43	24	58	$-0.943\ 697\ 072\ 412\ 10 \times 10^{-6}$
22	6	35	$-0.238\ 957\ 419\ 341\ 04 \times 10^2$				

Příloha B:

Tato příloha obsahuje zdrojový kód aplikace spolu s českým komentářem. Komentáře v programu Mathematica začínají znaky (* a končí znaky *). Komentáře přidané v českém jazyce jsou obarvené červeně, proměnné v kódu jsou obarveny modře a vybrané celky kódu jsou zvýrazněny žlutě.

Přidání komentářů nemění funkčnost aplikace.

Zdrojový kód aplikace:

```
Manipulate[(*tento příkaz tvoří celou aplikaci*)

(*display*)
output, (*proměnná output je vždy zobrazena ve spodní výstupní části
uživatelského rozhraní*)

(*control*)
{{section,"general input"}, {"general input", "gas turb.", "steam
turb.", "economical par.", "NPV plot", "econ. roundup"}, ControlType-> SetterBar},
(*proměnná section je jedinou stále zobrazovanou proměnnou*)

Dynamic@Panel [inputs, Alignment->Center],
(*panel zobrazující menící se kontrolní prvky*)

(*deklarace ostatních využitých proměnných*)
{{output, "default output"}, ControlType-> None},
{{inputs, "default input"}, ControlType-> None},

{{outerTemp, 20}, ControlType->None}, (* °C *)
{{outerPres, 101325}, ControlType->None}, (* Pa *)
{{plantType, "combined cycle"}, ControlType->None},

{{gasCompEff, 0.8}, ControlType->None},
{{gasTurbineEff, 0.85}, ControlType->None},
{{gasAlternatorEff, 0.97}, ControlType->None},
{{gasMechanicalEff, 0.98}, ControlType->None},
{{gasFuelAmount, 1}, ControlType->None}, (* kg/s *)
{{gasFuelHeat, 45000}, ControlType->None}, (* kJ/kg *)
{{gasFuelCost, 3.2}, ControlType->None}, (* currency/GJ *)
{{gasChamberTemp, 1500}, ControlType->None}, (* °C *)
{{gasChamberPress, 1800000}, ControlType->None}, (* Pa *)
{{gasHrsgTemp, 1}, ControlType->None},
{{gasTempBeforeComb, 1}, ControlType->None},
{{gasFuelAirRatio, 1}, ControlType->None},
{{gasPowerPerFKg, 1}, ControlType->None},
{{gasCCPowerPerFKg, 1}, ControlType->None},
{{gasOutputPower, 1}, ControlType->None},
{{gasCCOutputPower, 1}, ControlType->None},

{{hrsgEff, 0.9}, ControlType->None},
{{hrsgSteamPerKg, 1}, ControlType->None},

{{steamPress, 3000000}, ControlType->None}, (* Pa *)
{{steamTemp, 550}, ControlType->None},
```



```

{{steamEnthalpy, 3255},ControlType->None},(* kJ/kg *)
{{condensatorEnthalpy,2350},ControlType->None},(* kJ/kg *)
{{steamFinalDryness,0.9},ControlType->None},
{{steamMechanicalEff,0.98},ControlType->None},
{{steamAlternatorEff,0.97},ControlType->None},

{{boilerFuelAmount,1},ControlType->None},
{{boilerFuelHeat,11000},ControlType->None},(* kJ/kg *)
{{boilerFuelCost,40},ControlType->None},(* EUR/t *)
{{boilerEff,0.95},ControlType->None},
{{boilerSteam,1},ControlType->None},
{{minCondensatorPress,1000},ControlType->None},(* Pa *)
{{condensatorPress,3900},ControlType->None},(* Pa *)
{{condensatorTemp,30},ControlType->None},(* °C *)
{{steamOutputPower, 1},ControlType->None},

{{invLifetime,50},ControlType->None},
{{diskont,0.08},ControlType->None},
{{anuity,1},ControlType->None},
{{investment,60000000},ControlType->None},
{{elUnit,1},ControlType->None},(*{1-> "kWh",3.6->"GJ"}*)
{{valueOfenergy,40},ControlType->None},
{{loadFactor,0.6},ControlType->None},
{{currency,"€"},ControlType->None},
{{targetEnergy,100},ControlType->None},(*MW el*)
{{publicElDistrib,0.7},ControlType->None},
{{elDistrib,0.7},ControlType->None},
{{maintenance,2},ControlType->None},
{{averageCosts,1},ControlType->None},
(*Konec deklarační části a začátek výpočetní části*)
(*compute*)
Row@{ (*příkaz Row obsahuje celou výpočetní část a zajišťuje, aby veškeré
prázdné výstupy výpočetních celků nezabírali více než jeden prázdný řádek v
uživatelském rozhraní*)

Dynamic@Refresh[If[section=="general input",{
inputs=TableForm@{ (*určení obecných vstupů*)
{"plant nominal output",
Row@{InputField[Dynamic@targetEnergy,Number,FieldSize->4]," MW"}},

{"type of power plant",PopupMenu[Dynamic@plantType,{"only gas fuel", "only
boiler fuel", "combined cycle"}]}},

{"amount electricity from gas",Row@{Slider[Dynamic@publicElDistrib,
{0,1,0.01},Enabled->Dynamic@If[plantType=="combined
cycle",True,False],Appearance->Small], Dynamic@elDistrib}},

{"average outside temperature",
Row@{InputField[Dynamic@outerTemp,Number,FieldSize->4]," °C"}},

{"average outside pressure",
Row@{InputField[Dynamic@outerPres,Number,FieldSize->4]," Pa"}}
}],
output=TableForm@{ (*určení částečného výstupu*)
{"Amount of gas", Row@{Dynamic@gasFuelAmount," kg/s"}},
{"Boiler fuel amount", Row@{Dynamic@boilerFuelAmount," kg/s"}}
}];"",TrackedSymbols:>{section}}, (*vyhodnocení jen při přepnutí sekce*)

```

```

(*určení rozdělení vyrobené energie podle typu elektrárny*)
Dynamic@Refresh[Which[
plantType=="combined cycle",elDistrib=publicElDistrib,
plantType=="only gas cycle",elDistrib=1,
plantType=="only steam cycle",elDistrib=0]
;","",TrackedSymbols:>{plantType,publicElDistrib}],

Dynamic@Refresh[If[section=="gas turb.",{
inputs=TableForm@{ (*určení vstupů plynové turbíny*)
{"gas net caloric value",
Row@{InputField[Dynamic@gasFuelHeat,Number,FieldSize->4]," kJ/kg"}},
{"gas cost",Row@{InputField[Dynamic@gasFuelCost,Number,FieldSize->3],"
",currency,"/GJ"}},
{"gas rotor mechanical efficiency",Slider[Dynamic@gasMechanicalEff,
{0.5,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},
{"gas turbine alternator efficiency",Slider[Dynamic@gasAlternatorEff,
{0.5,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},
{"gas compressor isentropic efficiency",Slider[Dynamic@gasCompEff,
{0.5,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},
{"gas turbine isentropic efficiency",Slider[Dynamic@gasTurbineEff,
{0.5,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},
{"temperature after combustion",
Row@{InputField[Dynamic@gasChamberTemp,Number,FieldSize->4]," °C"}},
{"pressure after combustion",
Row@{InputField[Dynamic@gasChamberPress,Number,FieldSize->6]," Pa"}}
},
output=TableForm@{ (*určení částečného výstupu*)
{"Thermal efficiency of gas cycle",
Row@{Dynamic[100*gasPowerPerFKg/gasFuelHeat], "%"}},
(*účinnost plynové části*)
{"Temperature of hrsg gas ", Row@{Dynamic@gasHrsgTemp," °C"}},
(*teplota spalín po expanzi*)
{"Thermal efficiency of combined cycle",
Row@{Dynamic[100*(gasCCPowerPerFKg+gasPowerPerFKg)/gasFuelHeat]," %"}}
(*účinnost paroplynového cyklu*)
}];","",TrackedSymbols:>{section}],

Dynamic@Refresh[If[section=="steam turb.",{
inputs=TableForm@{ (*určení vstupů parní části*)
{"net caloric value of boiler fuel",
Row@{InputField[Dynamic@boilerFuelHeat,Number,FieldSize->4]," kJ/kg"}},
{"cost of boiler fuel",
Row@{InputField[Dynamic@boilerFuelCost,Number,FieldSize->3]," ",
currency,"/Kg"}},

```

```

{"steam temperature",
Row@{InputField[Dynamic@steamTemp,Number, FieldSize->4]," °C"}},

{"steam generator efficiency",
Slider[Dynamic@hrsgEff,{0,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},

{"steam boiler efficiency",
Slider[Dynamic@boilerEff,{0.5,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},
{"steam rotor mechanical efficiency",
Slider[Dynamic@steamMechanicalEff,{0.5,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},

{"steam turbine alternator efficiency",
Slider[Dynamic@steamAlternatorEff,{0.5,1,0.01},Appearance->"Labeled"]}
},
output=TableForm@{ (*částečný výstup sekce vstupů parní části*)
{"Thermal efficiency of steam cycle",Row@{Dynamic[
100*1000*targetEnergy*(1-elDistrib)/(boilerFuelAmount*boilerFuelHeat)
]," %"}}, (*účinnost výroby el. z tuhého paliva*)

{"Temperature of incoming gas ", Row@{Dynamic@gasHrsgTemp," °C"}},
(*teplota spalin po expanzi*)
{"Thermal efficiency of combined cycle",
Row@{Dynamic[100*(gasCCPowerPerFKg+gasPowerPerFKg)/gasFuelHeat]," %"}},
(*účinnost paroplynového cyklu*)
}];"",TrackedSymbols:>{section}},

Dynamic@Refresh[If[section=="economical par.",{
inputs=TableForm@{ (*určení ekonomických parametrů investice*)
{"investment livetime",
Row@{InputField[Dynamic@invLivetime,Number,FieldSize->4]," years"}},

{"investment",Row@{InputField[Dynamic@investment,Number,FieldSize->8]
," ",Dynamic@currency}},

{"yearly maintenance cost",
Row@{InputField[Dynamic@maintenance,FieldSize->2]," % of investment"}},

{"diskont",InputField[Dynamic@diskont,FieldSize->4]},

{"load factor",
Slider[Dynamic@loadFactor,{0.05,1,0.01},Appearance->"Labeled"]},

{Row@{"value of 1",PopupMenu[Dynamic@elUnit,
{1-> "MWh",3.6->"GJ"}]},Row@{InputField[Dynamic@valueOfenergy,FieldSize->4]
," ",Dynamic@currency}},

{"currency",PopupMenu[Dynamic@currency,{"Kč","€","$","£","₹","¥","α"}]}
},
output=TableForm@{ (*určení částečného výstupu*)
{"Value of used fuel", (*cena spotřebovaného paliva*)
Row@{Dynamic[3.6*(boilerFuelAmount*boilerFuelCost+gasFuelAmount*gasFuelHeat
* gasFuelCost/1000)/(targetEnergy)]," ",Dynamic@currency,"/MWh el."}},
{"",Row@{Dynamic[(boilerFuelAmount*boilerFuelCost+gasFuelAmount*gasFuelHeat
* gasFuelCost/1000)/(targetEnergy)]," ",Dynamic@currency,"/GJ el."}},

{"Minimal value for positive NPV", (*min. hodnota el. pro kladné NPV*)
Row@{Dynamic[(averageCosts+8760*loadFactor*3.6*boilerFuelAmount*

```

```

boilerFuelCost+8760*loadFactor*3.6*gasFuelAmount*gasFuelHeat*gasFuelCost/10
00)/(8760*loadFactor*targetEnergy)], " ",Dynamic@currency, "/MWh" }}
}
}]; " ", TrackedSymbols->{section}],

Dynamic@Refresh[If[section=="NPV plot",{
inputs=TableForm@{ (*deklarace grafu a ovládací prvky 2 proměnných*)
Row@{"load factor",
Slider[Dynamic@loadFactor,{0.05,1,0.01},Appearance->"Labeled"],

Row@{"value of 1",PopupMenu[Dynamic@elUnit,{1->"MWh",3.6->"GJ"}]},
Row@{InputField[Dynamic@valueOfenergy,FieldSize->4],currency}},
{}},
Plot[{ (*začátek deklarace grafu*)
(averageCosts+8760*load*3.6*boilerFuelAmount*boilerFuelCost+8760*load*3.6*
gasFuelAmount*gasFuelHeat*gasFuelCost/1000)/(8760*load*targetEnergy),
(*křivka nulové čisté současné hodnoty*)
3.6*(boilerFuelAmount*boilerFuelCost+gasFuelAmount*gasFuelHeat*gasFuelCost/
1000)/(targetEnergy), (*hodnota využitého paliva*)

(investment*maintenance*0.01+8760*load*3.6*boilerFuelAmount*boilerFuelCost+
8760*load*3.6*gasFuelAmount*gasFuelHeat*gasFuelCost/1000)/
(8760*load*targetEnergy)}, (*křivka nulového peněžního toku*)

{load,0,1}, (*deklarace osy load*)
PlotRange->{0, (*rozsah od nuly do ceny v bodě load = 0,1 a NPV = 0 *)
(averageCosts+8760*0.1*3.6*boilerFuelAmount*boilerFuelCost+8760*0.1*3.6*
gasFuelAmount*gasFuelHeat*gasFuelCost/1000)/(8760*0.1*targetEnergy)},

ImageSize->Large,
Filling->Axis,
FillingStyle->Directive[Opacity[0.17],Red],
AxesLabel->{Style["Load Factor",FontSize->15],
Style[StringJoin["Value of energy[" ,currency, "/MWh"]",FontSize->15]}},
PlotLegends->
Placed[LineLegend[{ColorData[1,1],ColorData[1,3],ColorData[1,2]},
{"NPV=0","CF=0","Fuel costs = income"}],Below],

Epilog->
{PointSize[Medium],Point[{Dynamic@loadFactor,Dynamic[valueOfenergy*elUnit]}
]}] (*konec deklarace grafu*)
},
output=TableForm@{ (*určení výstupu pod grafem*)
{"Value of used fuel",
Row@{Dynamic[3.6*(boilerFuelAmount*boilerFuelCost+gasFuelAmount*gasFuelHeat
*gasFuelCost/1000)/(targetEnergy)], " ",currency, "/MWh el."}},
{}},
{"Yearly cash flow ",
Row@{Dynamic@Block[{x=targetEnergy*loadFactor*8760*valueOfenergy*elUnit-
loadFactor*8760*3.6*gasFuelCost*gasFuelHeat*gasFuelAmount/1000-
loadFactor*8760*3.6*boilerFuelCost*boilerFuelAmount-
0.01*maintenance*investment}],
Style[NumberForm[x,ExponentFunction->(Null &),DigitBlock->3,
NumberSeparator->" "],If[x<0,Red,Blue]]}, " ",currency}},

{"Net present value of project ",
Row@{Dynamic@Block[{x=(targetEnergy*loadFactor*8760*valueOfenergy*elUnit-

```

```

loadFactor*8760*3.6*gasFuelCost*gasFuelHeat*gasFuelAmount/1000-
loadFactor*8760*3.6*boilerFuelCost*boilerFuelAmount-averageCosts)/anuity}},
Style[NumberForm[x,ExponentFunction ->(Null &),DigitBlock->3,
NumberSeparator->" "],If[x<0,Red,Blue]]}, " ",currency}}},

{"Internal rate of return ",
Dynamic@Block[{cf=targetEnergy*loadFactor*8760*valueOfenergy*elUnit-
loadFactor*8760*3.6*gasFuelCost*gasFuelHeat*gasFuelAmount/1000-
loadFactor*8760*3.6*boilerFuelCost*boilerFuelAmount-
0.01*maintenance*investment,d,d2},
If[invLivetime*cf>investment,Row@{Style[d2=100*d/.FindRoot[cf==
investment*d*(1+d)^invLivetime/(-1+(1+d)^invLivetime),{d,0.08}],
If[d2<diskont*100,Black,Darker@Green]], "%"}
,Style["None(\[Sum]CF<0)",Red]] ]}}];"",TrackedSymbols:>{section}},

Dynamic@Refresh[If[section== "econ. Roundup",{
inputs=Block[{ (*výstup sekce ekonomického shrnutí*)
gas=loadFactor*8760*3.6*gasFuelCost*gasFuelHeat*gasFuelAmount/1000,
coal=loadFactor*8760*3.6*boilerFuelCost*boilerFuelAmount,
in=targetEnergy*loadFactor*8760*valueOfenergy*elUnit},
Style[TableForm@{
{"Yearly costs of gas fuel ",Row@{Style[NumberForm[gas,ExponentFunction
->(Null &),DigitBlock->3,NumberSeparator->" "],Red]," ",currency}}},

{"Yearly costs of coal fuel ", Row@{Style[NumberForm[coal,ExponentFunction
->(Null &),DigitBlock->3,NumberSeparator->" "],Red]," ",currency}}},

{"Yearly income ",Row@{Style[NumberForm[in,ExponentFunction ->(Null
&),DigitBlock->3,NumberSeparator->" "], Blue]," ",currency}}},

{"-----", "-----"},

{"Total yearly variable output ",Row@{Style[NumberForm[in-gas-
coal,ExponentFunction ->(Null &),DigitBlock->3,NumberSeparator->" "],If[in-
gas-coal<0,Red,Blue]], " ",currency}}},

{"Ekvivalent yearly fixed costs ",
Row@{Style[NumberForm[averageCosts,ExponentFunction ->(Null &),
DigitBlock->3,NumberSeparator->" "],Red]," ",currency}}},

{"-----", "-----"},

{"Ekvivalent yearly result ",Row@{Style[ NumberForm[in-gas-coal-
averageCosts,ExponentFunction ->(Null &),DigitBlock->3,NumberSeparator->
" "],If[in-gas-coal-averageCosts<0,Red,Blue]], " ",currency}}},
{}},
{"Yearly cash flow ", Row@{Block[{x=in-gas-coal-
0.01*maintenance*investment},Style[NumberForm[x,ExponentFunction ->(Null
&),DigitBlock->3,NumberSeparator->" "],If[x<0,Red,Blue]]}, " ",currency}}},

{"Net present value of project ",Row@{Style[NumberForm[(in-gas-coal-
averageCosts)/anuity,ExponentFunction ->(Null &),DigitBlock-
>3,NumberSeparator->" "],If[in-gas-coal-averageCosts<0,Red,Blue]], "
",currency}}},

{"Internal rate of return ",If[invLivetime*(in-gas-coal-
0.01*maintenance*investment)>investment,Row@{Block[{d,d2},Style[d2=100*d/.

```

```

FindRoot[(in-gas-coal-investment*maintenance*0.01)==
investment*d*(1+d)^invLivetime/(-1+(1+d)^invLivetime),
{d,0.08}],If[d2<diskont*100,Black,Darker@Green]], " %" }
,Style["None\[Sum]CF<0)",Red]]}
},17]
],
output="" (*standartní výstup*)
];"",TrackedSymbols :> {section}],

Dynamic@Refresh[ (*teploty po kompresi a expanzi*)
Block[{adiabaticRatio=(gasChamberPress/outerPres)^adiabaticExp},
gasTempBeforeComb= outerTemp+(adiabaticRatio*(outerTemp+273.15)-
273.15-outerTemp)/gasCompEff;
gasHrsgTemp=gasChamberTemp-gasTurbineEff*(gasChamberTemp+273.15-
(gasChamberTemp+273.15)/adiabaticRatio);
If[steamTemp>gasHrsgTemp,steamTemp=IntegerPart@gasHrsgTemp]
];"",TrackedSymbols:>{outerPres,outerTemp,gasChamberPress,
gasChamberTemp,gasTurbineEff,gasCompEff}],

Dynamic@Refresh[ (*poměr vzduchu a plynu*)
gasFuelAirRatio=airHeatCapacity*(gasChamberTemp-gasTempBeforeComb)/
(gasFuelHeat-airHeatCapacity*gasChamberTemp+airHeatCapacity*outerTemp)
;"",TrackedSymbols:> {gasFuelHeat,gasTempBeforeComb}],

Dynamic@Refresh[ (*svorkový výkon plynového gen. na jeden kg plynu*)
gasPowerPerFKg=gasAlternatorEff*gasMechanicalEff*airHeatCapacity*((1+1/
gasFuelAirRatio)*(gasChamberTemp-gasHrsgTemp)-(gasTempBeforeComb-
outerTemp)/gasFuelAirRatio)
;"",TrackedSymbols:>
{gasAlternatorEff,gasMechanicalEff,gasFuelAirRatio,gasHrsgTemp}],

Dynamic@Refresh[ (*množství páry vyrobené na kg plynu*)
hrsgSteamPerKg=airHeatCapacity*(1+1/gasFuelAirRatio)*(gasHrsgTemp-
condensatorTemp)*hrsgEff/(steamEnthalpy-waterHeatCapacity*(condensatorTemp-
25))
;"",TrackedSymbols:>
{gasFuelAirRatio,gasHrsgTemp,condensatorPress,hrsgEff,steamEnthalpy}],

Dynamic@Refresh[ (*svorkový výkon parní turbíny vytvořený kg plynu*)
gasCCPowerPerFKg=hrsgSteamPerKg*(steamEnthalpy-
condensatorEnthalpy)*steamMechanicalEff*steamAlternatorEff
;"",TrackedSymbols:>
{hrsgSteamPerKg,steamEnthalpy,condensatorEnthalpy,steamMechanicalEff,
steamAlternatorEff}],

Dynamic@Refresh[ (*množství plynu potřebné pro požadovaný výkon*)
gasFuelAmount=1000*targetEnergy*elDistrib/
(gasPowerPerFKg+gasCCPowerPerFKg);
gasOutputPower=gasFuelAmount*gasPowerPerFKg;
gasCCOutputPower=gasFuelAmount*gasCCPowerPerFKg
;"",TrackedSymbols:>
{targetEnergy,elDistrib,gasCCPowerPerFKg,gasPowerPerFKg}],

Dynamic@Refresh[ (*min tlak kondenzátoru v závislosti na venk. teplotě*)
minCondensatorPress=SaturPres[outerTemp];
If[condensatorPress<minCondensatorPress,
condensatorPress=minCondensatorPress]
;"",TrackedSymbols:> {outerTemp,condensatorPress}],

```

```

Dynamic@Refresh[ (*entalpie emisní páry*)
  condensatorTemp=SaturTemp[condensatorPress];
  condensatorEnthalpy =
steamFinalDryness*enthalpy[condensatorPress,condensatorTemp]+(1-
steamFinalDryness)*waterHeatCapacity*(condensatorTemp-25)
;"" ,TrackedSymbols:> {condensatorPress,steamFinalDryness}},

Dynamic@Refresh[ (*entalpie admisní páry*)
Which[steamTemp>gasHrsgTemp,steamTemp=IntegerPart@gasHrsgTemp,steamTemp<200
,steamTemp=200];
  steamEnthalpy=enthalpy[steamPress,steamTemp]
;"" ,TrackedSymbols:> {steamPress,steamTemp}},

Dynamic@Refresh[ (*potřebné množství tuhého paliva*)
  boilerSteam=1000*targetEnergy*(1-elDistrib)/((steamEnthalpy-
condensatorEnthalpy)*steamMechanicalEff*steamAlternatorEff);
  boilerFuelAmount=boilerSteam*(steamEnthalpy-waterHeatCapacity*
(condensatorTemp-25))/(boilerEff*boilerFuelHeat)
;"" ,TrackedSymbols:> {targetEnergy,elDistrib,steamEnthalpy,
condensatorEnthalpy,steamMechanicalEff,steamAlternatorEff,condensatorTemp,
boilerEff,boilerFuelHeat}},

Dynamic@Refresh[ (*poměrná anuita*)
  anuity=diskont*(1+diskont)^invLivetime/(-1+(1+diskont)^invLivetime)
;"" ,TrackedSymbols:> {diskont}},

Dynamic@Refresh[ (*ekvivalentní roční fixní náklady*)
  averageCosts=investment*anuity+investment*maintenance/100
;"" ,TrackedSymbols:> {investment,anuity,invLivetime,maintenance}}

}

,Initialization:> ( (*inicializační část*)
  adiabaticExp=0.4/1.4; (*adiabatický exponent pro dvouatomové plyny*)
  airHeatCapacity:=1 (* kJ/Kg*K *); (*tepelná kapacita vzduchu*)
  waterHeatCapacity:=4.1813(* kJ/Kg*K *); (*tepelná kapacita vody*)
  saturTable= (*koeficienty výpočtu bodu varu*)
{1167.0521452767,-724213.16703206,-17.073846940092,12020.82470247,-
3232555.0322333,14.91510861353,-4823.2657361591,405113.40542057,-
0.23855557567849,650.17534844798};
  SaturTemp[pressure_]:= (*deklarace funkce teploty varu*)
Block[{beta=(pressure/1000000(*1MPa*))^0.25,E,F,G,D},
  E=beta^2+saturTable[[3]](*n3*)*beta+saturTable[[6]](*n6*);
  F=saturTable[[1]](*n1*)*beta^2+saturTable[[4]]
(*n4*)*beta+saturTable[[7]](*n7*);
  G=saturTable[[2]](*n2*)*beta^2+saturTable[[5]]
(*n5*)*beta+saturTable[[8]](*n8*);
  D=2*G/(-F-(F^2-4*E*G)^0.5);
  -273.15+(saturTable[[10]](*n10*))+D -((saturTable[[10]](*n10*))+D)^2-
4*(saturTable[[9]](*n9*))+saturTable[[10]](*n10*))*D)^0.5)/2
];
  SaturPres[temp_]:= (*deklarace funkce tlaku varu*)
Block[{theta:=temp+273.15-saturTable[[9]](*n9*) /(temp+273.15-
saturTable[[10]](*n10*)),A,B,C},
  A:=theta^2+saturTable[[1]](*n1*)*theta+saturTable[[2]](*n2*);
  B:=saturTable[[3]](*n3*)*theta^2+saturTable[[4]]
(*n4*)*theta+saturTable[[5]](*n5*);

```

```

C:=saturTable[[6]](*n6*)*theta^2+saturTable[[7]]
(*n7*)*theta+saturTable[[8]](*n8*);
1000000*(2*C/(-B+Sqrt[B^2-4*A*C]))^4
];

enthalpyTableIdeal={(*Ji ni*) (*koeficienty výpočtu entalpie*)
{0,-9.6927686500217} ,{1,10.086655968018} ,{-5,-0.0056087911283020} ,
{-4,0.071452738081455} ,{-3,-0.40710498223928} ,{-2,1.4240819171444} ,
{-1,-4.3839511319450} ,{2,-0.28408632460772} ,{3,0.021268463753307} };
enthalpyTableResid={(*Ii Ji ni*) (*koeficienty výpočtu entalpie*)
{1,0,-0.0017731742473213} ,{1,1,-0.017834862292358} ,
{1,2,-0.045996013696365} ,{1,3,-0.057581259083432} ,
{1,6,-0.050325278727930} ,{2,1,-0.000033032641670203} ,
{2,2,-0.00018948987516315} ,{2,4,-0.0039392777243355} ,
{2,7,-0.043797295650573} ,{2,36,-0.000026674547914087} ,
{3,0,0.000000020481737692309} ,{3,1,0.00000043870667284435} ,
{3,3,-0.000032277677238570} ,{3,6,-0.0015033924542148} ,
{3,35,-0.040668253562649} ,{4,1,-0.78847309559367*10^-9} ,
{4,2,0.12790717852285*10^-7} ,{4,3,0.00000048225372718507} ,
{5,7,0.0000022922076337661} ,{6,3,-0.16714766451061*10^-10} ,
{6,16,-0.0021171472321355} ,{6,35,-23.895741934104} ,
{7,0,-0.59059564324270*10^-17} ,{7,11,-0.0000012621808899101} ,
{7,25,-0.038946842435739} ,{8,8,0.11256211360459*10^-10} ,
{8,36,-8.2311340897998} ,{9,13,0.19809712802088*10^-7} ,
{10,4,0.10406965210174*10^-18} ,{10,10,-0.10234747095929*10^-12} ,
{10,14,-0.10018179379511*10^-8} ,{16,29,-0.80882908646985*10^-10} ,
{16,50,0.10693031879409} ,{18,57,-0.33662250574171} ,
{20,20,0.89185845355421*10^-24} ,{20,35,0.30629316876232*10^-12} ,
{20,48,-0.0000042002467698208} ,{21,21,-0.59056029685639*10^-25} ,
{22,53,0.0000037826947613457} ,{23,39,-0.12768608934681*10^-14} ,
{24,26,0.73087610595061*10^-28} ,{24,40,0.55414715350778*10^-16} ,
{24,58,-0.00000094369707241210} };
enthalpy[press_,temp_]:= (*funkce výpočtu entalpie*)
Block[{pi=press/1000000(*MPa*),tau=540/(temp+273.15)},
0.461526(*R*)(temp+273.15)*tau*
(
Sum[enthalpyTableIdeal[[i,1]]*enthalpyTableIdeal[[i,2]]*tau^(enthalpyTableI
deal[[i,1]]-1),{i,9}]
+Sum[enthalpyTableResid[[i,3]]*enthalpyTableResid[[i,2]]*pi^enthalpyTableRe
sid[[i,1]]*(tau-0.5)^(enthalpyTableResid[[i,2]]-1),{i,43}]
)]
)
]

```