

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



Modelování a simulace 2019/2020

Simulačné štúdium Varianta číslo 2 Uhlíková stopa v energetice a teplárenství

9. decembra 2019

Igor Mjasojedov (xmjaso00)
Alex Sporni (xsporn01)

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Autori a zdroje informácií	1
1.2	Overenie validity	1
2	Rozbor témy a použitých metód/technológií	1
2.1	Technológia CCS	2
2.1.1	Post-Combustion	2
2.1.2	Chemická absorbcia	2
2.2	Popis použitých postupov	3
2.3	Popis použitých technológií	3
3	Koncepcia modelu	3
4	Architektúra simulačného modelu	5
5	Podstata simulačných experimentov a ich použitie	6
5.1	Postup experimentov	6
5.2	Dokumentácia jednotlivých experimentov	6
5.2.1	Experiment číslo 1	7
5.2.2	Experiment číslo 2	8
5.2.3	Experiment číslo 3	8
5.2.4	Experiment číslo 4	10
5.2.5	Experiment číslo 5	11
5.3	Závery experimentov	13
6	Zhrnutie simulačných experimentov a záver	13

1 Úvod

Táto práca vznikla ako projekt do predmetu Modelování a simulace. Témou našej práce je uhlíková stopa v energetike a v teplárenstve. V tejto práci je riešený proces zostavenia modelu [9, strana 7] pre implementáciu technológie *carbon capture and storage* (CCS) v elektrárni Prunéřov a jeho následná simulácia [9, strana 33]. Na základe tohto modelu a série simulačných experimentov [9, strana 9] bude znázornené chovanie systému za rôznych podmienok. Zmyslom projektu bude demonštrovať v akom rozsahu bude technológia CCS pre náš systém prínosná, či už z pohľadu životného prostredia, alebo z ekonomickej stránky a prípadne aké výhody/nevýhody so sebou prináša.

1.1 Autori a zdroje informácií

Autormi tejto simulačnej štúdie sú:

- Igor Mjasojedov, xmajso00@stud.fit.vutbr.cz
- Alex Sporni, xsporn01@stud.fit.vutbr.cz

Zdroje informácií, ktoré sme potrebovali k vypracovaniu projektu sme čerpali z odbornej literatúry, ktorá bude riadne ozdrojovaná na konci dokumentu. Naša vďaka patrí aj Ing. Martinovi Hrubému za jeho čas, ktorý nám venoval na odbornej konzultácii.

1.2 Overenie validity

Náš model pozostáva zo základných údajov, ktoré ho definujú a následne sa od nich odvíjajú všetky ďalšie dopočítané hodnoty. Z tohto dôvodu pokladáme za validitu modelu [9, strana 37] uvedenie oficiálneho zdroju ku každej základnej informácii 6. Uvedenie týchto zdrojov k jednotlivým informáciám je možné nájsť v sekcii 2, ako aj v sekcii 5.

2 Rozbor témy a použitých metód/technológií

Pre modelovanie a simuláciu implementácie CCS technológie do systému je nutné poznať základné fakty ohľadom bloku vybranej elektrárne a vlastnosti dodávaného uhlia, ktoré slúži ako palivo v danom bloku. V našom prípade sme sa rozhodli technológiu CCS implementovať v elektrárni Prunéřov. Elektráreň sa delí na dva celky Prunéřov I a Prunéřov II, ďalej ich budeme uvádzať len ako EPRU I a EPRU II. Elektráreň leží na západnom okraji severočeskej panvy medzi Chomutovom a Kláštorom nad Ohří. EPRU II je najmladšia uholná elektráreň ČEZ, a.s. Patrí medzi najväčších dodávateľov elektriny [15]. Elektráreň spaľuje hnedé uhlie, ktoré je dodávané do elektrárne z lomu Nástup-Tušimice. Uhlie je dopravované do elektrárne pomocou železnice. Uhlie spalované v elektrárni spadá do kategórie PS2 čo označuje priemyselnú zmes. Hodnota výhrevnosti paliva sa pohybuje v rôznom rozsahu, kde dolná hranica v niektorých prípadoch predstavuje 9,75 MJ/kg [14] a horná 15,6 MJ/kg [16]. V našich výpočtoch budeme počítať s hodnotou výhrevnosti 10,1 MJ/kg, ktorá sa vyskytuje v katalógu ČEZ [2].

Druh uhlia	Zrnitost [mm]	A^d - obsah popola [%]	W^r - obsah vody [%]	Q_i - Výhrevnost [MJ/kg]	S^r - obsah síry [%]
PS2	0 - 40	40,8	34,0	10,1	2,2

Tabuľka 1: Parametre uhlia z lomu Nástup – Tušimice

Pre náš model sme si vybrali blok elektrárne EPRU II, ktorý využíva modernizovaný trojblok (kotel) 3x250 MWe. Kotel PG 660 od firmy Vítkovice Power Engineering bol riešený ako prietlakový, dvojťahový, s granulárnym ohniskom a priamym fúkaním uhoľného prášku [1]. Ďalej uvediem jednotlivé výkonnostné parametra

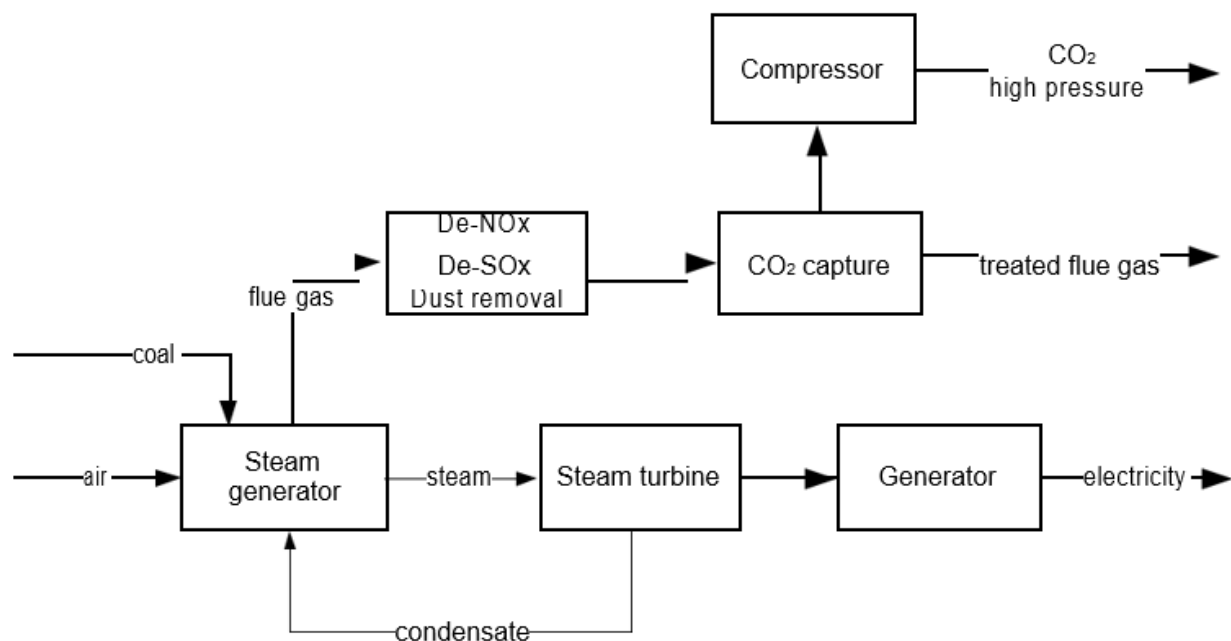
kotla. Výkon 660t/h s parametrami pary 18,2 MPa/575/580°C. Strojovňa bola vybavená turbínami spoločnosti Škoda KT – 250 o výkone 250 MW. Turbíny sú rovnotlakové, kondenzačné s prihrievaním pary a každá z nich je vybavená 8 neregulovanými odbermi a jedným regulovaným odberom pary [15]. Ročná výroba elektrickej energie v EPRU I činí 2 877 GWh elektrickej energie a v EPRU II 6 363 GWh elektrickej energie [13]. Najdôležitejším parametrom pre nás predstavuje čistá tepelná účinnosť kotla označovaná η , v prípade zastaraného EPRU I 4×110 MW činí len 33% [7] a v prípade zmodernizovaného bloku EPRU II 3×250 MW predstavuje 39% [14].

2.1 Technológia CCS

Carbon Capture and Storage, CCS je súhrnný názov pre technológiu, ktorá slúži na znižovanie produkcie CO_2 vo všetkých procesoch, kde CO_2 vzniká ako vedľajší nežiadaný produkt, môžu to byť oceliarne, cementárne, rôzne chemické podniky, ale predovšetkým uhľové elektrárne. CCS sa zaoberá separáciou CO_2 , dopravou a následným uskladnením. V našej práci sa budeme zaoberať výlučne len separáciou. Separáciu budeme prevádzať pomocou Post-Combustion metódou, ktorá využíva chemickú absorpciu [8, strana 3], [12].

2.1.1 Post-Combustion

Post-combustion technológia sa zaoberá separáciou CO_2 z už vzniknutých spalín na konci procesu vzniku energie. Hlavnou výhodou post-combustion metódy je možná implementácia už do postavených, plne zabehnutých uhľolných elektrární, ako je naznačené na referenčnom obrázku č. 1. Medzi najznámejšie post-combustion technológie patrí chemická absorpcia, fyzická absorpcia a membránová separácia. V našej práci sa budeme zaoberať výlučne chemickou absorpciou, pretože dokáže zachytiť až 80-95% CO_2 [8, strana 113], [12].



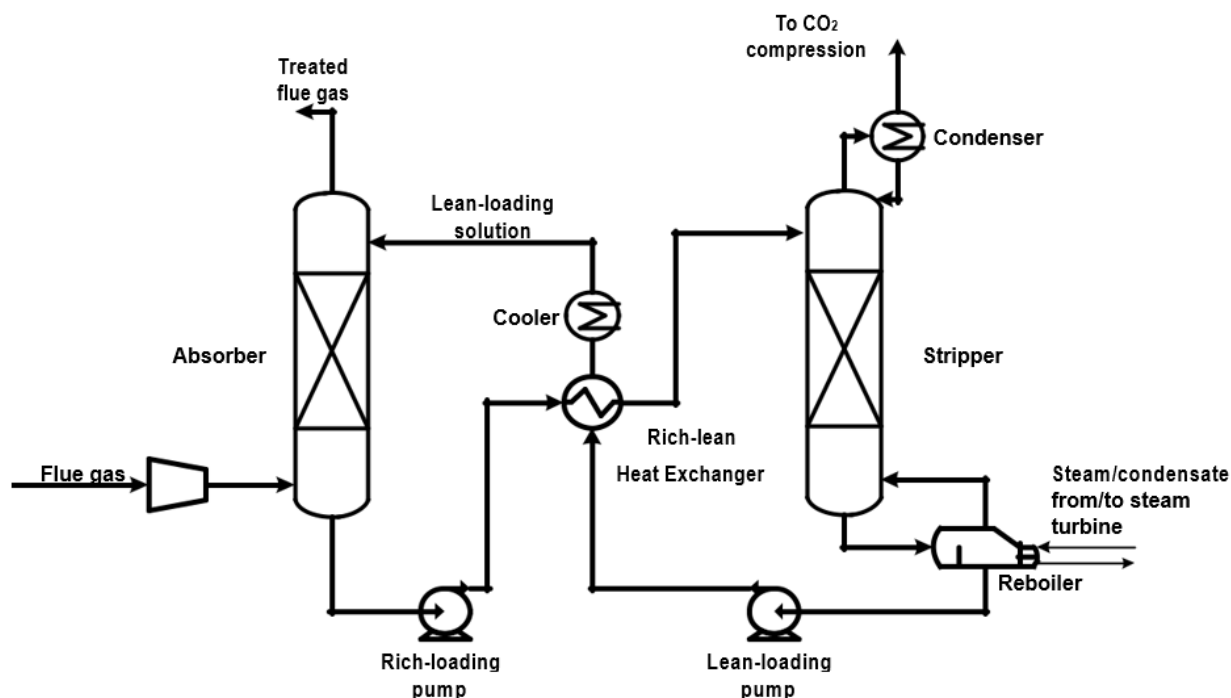
Obr. 1: Schéma uhoľnej elektrárne s post-combustion technológiou pre zachytávanie CO_2

2.1.2 Chemická absorpcia

Chemická absorpcia pracuje s reverzibilnou chemickou reakciou rôznych rozpúšťadiel založených na bázi aminov s kyslími plynmi. Najviac rozšíreným roztokom je monoethanolamin (MEA)¹. Referenčnú separačnú jed-

¹ vid'. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ethanolamin>

notku môžeme vidieť na obrázku 2. Separačná jednotka je tvorená dvoma hlavnými kolónami: absorbér



Obr. 2: Schéma základnej chemickej absorpcie pre zachytenie CO₂ pri implementácii CCS technológie

(Absorber) a oddelovačom (Stripper). Jednotka ďalej obsahuje kompresory, výmenníky tepla, kondenzačnú jednotku, chladiče, atď... Kompletný popis funkcionality modulu je popísaný v zdrojoch [8, strana 115], [12, strana 652-654].

Aj napriek všetkým výhodám ktoré so sebou technológia prináša má aj svoje nevýhody v podobe režijných (energetických) nákladov, ktoré linárne stúpajú s percentuálnym množstvom zachytávania CO₂. Touto nevýhodou sa budeme priamo zaoberať pri simulácii, kde budeme zisťovať či sa implementovanie tejto technológie vyplatí aj z ekonomického faktoru.

2.2 Popis použitých postupov

Hlavným nástrojom pri skúmaní technológie CCS sme využili prostredie Excel, v ktorom sme si vytvorili jednotlivé tabuľky, ktoré pracovali s dátami získanými spracovaním overených vstupných hodnôt.

2.3 Popis použitých technológií

Avšak na rozsiahlejšie experimenty sme mali za potrebu vytvoriť simulačný model, ktorý sme vyvíjali v jazyku C/C++ a keďže náš model pozostáva len zo sady matematických vzorcov, nebolo nutné použiť žiadnu knižnicu určenú na simulovanie.

3 Konceptia modelu

V tejto sekcii sa budeme zaoberať návrhom konceptuálneho [9, strana 48] modelu. Náš model sa odvíja od niekoľkých kľúčových parametrov, ktorými sú:

- ročná produkcia energie
- čistá tepelná účinnosť bloku

- výhrevnosť uhlia, ktoré je využívané ako palivo v bloku
- emisný faktor hnedého uhlia

A keďže sa budeme zaoberať aj ekonomickým dopadom na elektrárňu po implementácii technológie CCS, náš model budú tvoriť aj dodatočné informácie:

- cena 1t uhlia
- cena 1ks emisnej povolenky na 1t CO₂

Pre potreby simulácie modelu je nutné aby sme si dopočítali niekoľko dodatočných informácií. Jednou z hlavných je koeficient hmotnosti spáleného uhlia na produkciu 1 kWh energie.

$$Q = m * H * \eta \quad (1)$$

Q [J].....energia

m [kg].....hmotnosť hnedého uhlia

H [MJ/kg].....výhrevnosť hnedého uhlia

ηčistá tepelná účinnosť

z rovnice 1 nám vyplíva:

$$m = \frac{Q}{\eta * H}$$

$$m = \frac{Q}{\eta_{\text{bez CCS}} * H} = \frac{3600000}{\eta_{0,39} * 10,1 * 10^6} = 0,9139 \text{ kg}$$

Pri použití CCS technológie nám klesla účinnosť o 33% podľa zdroja [8, strana 343]. Tým sa nám zvyšuje potrebný objem spáleného uhlia na vyprodukovaní rovnakého množstva energie, keďže potrebujeme odvádzať určité množstvo vyprodukovanej energie aj na režiu technológie CCS.

$$m = \frac{Q}{\eta_{\text{CCS}} * H} = \frac{3600000}{\eta_{0,2613} * 10,1 * 10^6} = 1,3640 \text{ kg}$$

Výsledné hodnoty nám reprezentujú množstvo spáleného hnedého uhlia s danou výhrevnosťou, ktoré potrebujeme na produkciu 1 kWh energie. Ďalšie dodatočné informácie, ktoré sme potrebovali vypočítať boli:

- celkový objem CO₂ (rok bez CCS) [t]
- celková spotreba uhlia (rok bez CCS) [t]
- výdavky na emisné povolenky (rok bez CCS) [Kč]

Celková spotreba uhlia (rok bez CCS) sme vypočítali ako Ročná produkcia energie * 1000000 * Množstvo uhlia na 1 kWh (bez CCS) / 1000 \Rightarrow Celková spotreba uhlia (rok bez CCS) = 6363 * 1000000 * $\frac{0,9139}{1000}$ = 5815145,7[t]

Celkový objem CO₂ (rok bez CCS) sme vypočítali ako Celková spotreba uhlia (rok bez CCS) * Výhrevnosť uhlia * Emisie CO₂ (uhlie) / 1000 \Rightarrow Celkový objem CO₂ (rok bez CCS) = 5815384,615 * 10,1 * $\frac{99,1}{1000}$ = 5820676,615[t]

Výdavky na emisné povolenky (rok bez CCS) sme vypočítali ako Celkový objem CO₂ (rok bez CCS) * Cena emisnej povolenky na 1t CO₂ \Rightarrow Výdavky na emisné povolenky (rok bez CCS) = 5820676,615 * 601,6046 = 3501745827[Kč]

4 Architektúra simulačného modelu

Tvorba simulačného modelu sa odvíjala už od vytvoreného abstraktného modelu, a teda od výpočtov a tabuliek vytvorených v programe Excel. Simulačný model je implementovaný jazykom C/C++ bez využitia špeciálnych knižníc, keďže sa pri simulácii jedná len o iteráciu výpočtov s úpravou niekoľkých premenných hodnôt. Vstupom do programu sú základné informácie ktoré nám definujú model. Tieto informácie sú:

- -p: množstvo vyprodukovanej elektrickej energie v bloku elektrárne v GWh
- -u: čistá tepelná účinnosť bloku v %
- -v: výhrevnosť uhlia, ktoré je využívané ako palivo v bloku v GJ/t
- -c: cena množstva 1 tony hnedého uhlia v Kč
- -e: množstvo emisií vyprodukovaných z 1kg hnedého uhlia v kg/GJ
- -r: vyžiadané množstvo zredukovania emisií
- -k: cena jednej emisnej povolenky v Kč

Možný príklad spustenia programu:

```
./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1218 -e 99,1 -r 30 -k 650
```

Po spracovaní vstupných parametrov simulačného programu si simulátor vypočíta dodatočné informácie a to:

- koeficienty s a bez CCS
- množstvo spáleného uhlia na produkciu argumentom zadaného objemu energie produkovanej blokom elektrárne
- množstvo vyprodukovaného CO₂ pri spálení vypočítaného objemu uhlia
- nevyhnutné náklady spojené s emisnými poplatkami na objem vyprodukovaných emisií

Tieto informácie sa následne vypíšu na štandardný výstup. V ďalšom kroku sa vypočíta maximálny objem emisií, ktoré sa môžu blokom elektrárne vypustiť do ovzdušia na základe argumentom [-r] špecifikovanej požiadavky na redukcii objemu vypúšťaných emisií o určité percento.

Prvým hlavným cyklom v simulátore je cyklus, ktorým získame informáciu o potrebnej konfigurácii CCS technológie, aby sme dosiahli požadovanej redukcii vypúšťaných emisií do ovzdušia. Konfiguráciou CCS budeme mať na mysli percento zachytu CO₂. V spomínanom cykle si vypočítame množstvo spáleného uhlia s a bez technológie CCS. Množstvo spaľovaného uhlia cez CCS sa nám odvíja od konfigurácie CCS.

Následne si pri oboch množstvách uhlia vypočítame objem emisií, ktoré ich spaľovanie vyprodukuje. Zo súčtu objemov emisií následne získame po vynásobení percentom zachytu, množstvo zachyteného a vypusteného CO₂ do ovzdušia. Podmienka cyklu pozostáva z porovnania vypusteného množstva CO₂ po filtrácii s požadovaným maximálnym množstvom. Cyklus iteruje ďalej v prípade, že množstvo vypusteného CO₂ prekročilo maximálnu hranicu. Avšak v ďalšej iterácii sa jednotlivé výpočty vykonávajú nad zvýšeným percentom zachytu o 1%.

Po úspešnom skončení cyklu sa na štandardný výstup vypíšu získané informácie pre konečné percento zachytu, ktorým splňujeme podmienku maximálneho množstva vypúšťaného CO₂ do ovzdušia.

Druhá časť programu sa zaoberá ekonomickým dopadom na elektrárňu po zavedení technológie CCS. Čím je vyššie percento zachytu, tým sa viac uhlia je nutné spáliť na produkciu rovnakého množstva energie ako pred zavedením technológie CCS. Tým sa nám zvyšujú náklady na celkovo zakúpené uhlie. Počiatočné výpočty sú rovnaké ako aj v prvom cykle, avšak dodatočne sa dopočítajú aj nasledujúce informácie:

- Cena dodatočne spáleného uhlia
- Suma ušetrená na emisných poplatkoch

V prípade, že cena dodatočne spáleného uhlia prevyšuje náklady spojené s kúpou dodatočne spáleného uhlia, sme v strate a iterácia sa opakuje v vyššom percentom záchytu. Cyklus končí, až kým sa tento pomer nezmení, teda budeme v zisku, alebo kým už percento záchytu nebudeme môcť navyšovať.

Následne na štandardný výstup deklarujeme, či je možné aby táto technológia bola zisková za určitej konfigurácie v prípade špecifikovaných cien uhlia a emisných poplatkov v argumentoch. Ak áno, vypíše sa informácia minimálneho percenta záchytu od ktorého je filtrácia zisková, ušetrená cena a celkovo zachytené, či vypustené množstvo emisií.

5 Podstata simulačných experimentov a ich použitie

Cieľom experimentovania je zistiť, či sa technológia CCS oplatí nasadiť do elektrárne Prunéřov, konkrétne do bloku... a aká konfigurácia technológie je nutná pre rôzne znižovanie vypúšťaného CO₂ z aktuálnych hodnôt. Keďže experimenty zameriavame nad konkrétnym jedným blokom jednej elektrárne, parametre programu -p -u -v -e budú nemenné. Tieto parametre budú nadobúdať hodnoty z overených zdrojov.

- -p 6363 GWh [13]
- -u 39% [14]
- - 10,1 GJ/t [2]
- -e 99,1 kg/GJ [6], [4]

Premennými experimentov budú:

- cena uhlia, ktorá má tendenciu rásť každoročne o 1,28% (parameter -c) [3, strana 54]
- cena emisnej povolenky, ktorá má tiež tendenciu rapídne vzrásť už od budúceho roku (parameter -k) [10], [5], [11]
- percento želaného zníženia vypúšťaného CO₂ do ovzdušia (parameter -r)

5.1 Postup experimentov

Experimentovanie bude prebiehať skúmaním, ako sa systém správa pri rôznych vstupoch. Tieto vstupy budeme upravovať tak, aby sme predstierali reálne hodnoty ktoré s pravdepodobnosťou nastanú v budúcnosti. Prvotne budeme predpokladať stabilnú cenu uhlia a uvažovať budeme o zmenách cien emisných povoleniek. Experimentami nadobudneme hodnotu ceny povolenky, od ktorej bude zavedený CCS systém ziskový. Následne začneme upravovať aj cenu uhlia a budeme pozorovať, aké zmeny musia nastať taktiež v cenách povoleniek, aby bol systém stále ziskový.

5.2 Dokumentácia jednotlivých experimentov

V nasledujúcej časti bude rozpísaná časť experimentov, ktoré sme previedli nad našim modelom.

5.2.1 Experiment číslo 1

```
./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1218 -e 99,1 -r 20 -k 384.557
```

```
===== Computed coefficients =====
```

```
Amount of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
```

```
Amount of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)
```

```
===== Original values =====
```

```
Coal consumption per year: 5.81538e+06 [tons]
```

```
Amount of CO2 released per year: 5.8148e+06 [tons]
```

```
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09 [tons]
```

```
Selected amount of CO2 to reduce: 20 [%]
```

```
=> Maximum amount of CO2 to release: 4.65184e+06 [tons]
```

```
===== Results =====
```

```
Coal combusted without CCS: 4.01262e+06 [tons]
```

```
Coal combusted with CCS: 2.6907e+06 [tons]
```

```
=> Total coal combusted: 6.70332e+06 [tons]
```

```
Emissions of coal combusted without CCS: 4.01221e+06 [tons]
```

```
Emissions of coal combusted with CCS: 2.69043e+06 [tons]
```

```
Total CO2 produced: 6.70265e+06 [tons]
```

```
=> Total CO2 captured: 2.07782e+06 [tons]
```

```
=> Total CO2 released: 4.62483e+06 [tons]
```

CCS technology must be set at least to 31 % of filtering to decrease CO2 release by 20% of original values.

```
===== Economic factor =====
```

CCS technology is not lucrative for specified system.

Prvým experimentom je overenie, či sa systém opäť nasadí pri hodnotách cien uhlia a emisných poplatkov ku dnešnému dňu. Výsledkom je, že nie je, a teda je nutné navýšiť cenu emisných poplatkov aby náš systém bol ziskový.

5.2.2 Experiment číslo 2

```
./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1218 -e 99,1 -r 20 -k 606
```

```
===== Computed coefficients =====
Amount of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
Amount of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)

===== Original values =====
Coal consumption per year: 5.81538e+06 [tons]
Amount of CO2 released per year: 5.8148e+06 [tons]
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09 [tons]
=====
```

```
Selected amount of CO2 to reduce: 20 [%]
=> Maximum amount of CO2 to release: 4.65184e+06 [tons]
```

```
===== Results =====
Coal combusted without CCS: 4.01262e+06 [tons]
Coal combusted with CCS: 2.6907e+06 [tons]
=> Total coal combusted: 6.70332e+06 [tons]
Emissions of coal combusted without CCS: 4.01221e+06 [tons]
Emissions of coal combusted with CCS: 2.69043e+06 [tons]
Total CO2 produced: 6.70265e+06 [tons]
=> Total CO2 captured: 2.07782e+06 [tons]
=> Total CO2 released: 4.62483e+06 [tons]
```

CCS technology must be set at least to 31 % of filtering to decrease CO2 release by 20% of original values.

```
===== Economic factor =====
CCS technology is lucrative when it is configured to filter 99% of
CO2 produced and more.
Saved costs: 0.341927 [million Kč]
Total CO2 produced: 8.62153e+06 [tons]
=> Total CO2 captured: 8.4491e+06 [tons]
=> Total CO2 released: 172431 [tons]
```

Po niekoľkých neúspešných navyšovaní ceny emisného poplatku sme sa dopracovali k hodnote 606Kč. Od tejto ceny, je systém ziskový pre hocikáký percentuálny záchyt vypúšťaného CO₂ do ovzdušia. Taktiež je možné vidieť z výpisu, že ak by nás zaujímal len záchyt 20% pôvodných emisií bez ohľadu na ekonomický faktor, museli by sme CCS technológiu nakonfigurovať na 31% záchyt.

5.2.3 Experiment číslo 3

```
./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1218 -e 99,1 -r 20 -k 638.375
```

```
===== Computed coefficients =====
Amount of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
Amount of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)
```

```

===== Original values =====
Coal consumption per year:          5.81538e+06      [tons]
Amout of CO2 released per year:     5.8148e+06      [tons]
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09    [tons]
=====

```

```

Selected amout of CO2 to reduce: 20 [%]
=> Maximum amout of CO2 to release: 4.65184e+06 [tons]

```

```

===== Results =====
Coal combusted without CCS:         4.01262e+06      [tons]
Coal combusted with CCS:            2.6907e+06       [tons]
=> Total coal combusted:             6.70332e+06      [tons]
Emissions of coal combusted without CCS: 4.01221e+06 [tons]
Emissions of coal combusted with CCS:  2.69043e+06 [tons]
Total CO2 produced:                 6.70265e+06      [tons]
=> Total CO2 captured:                2.07782e+06      [tons]
=> Total CO2 released:                4.62483e+06      [tons]

```

CCS technology must be set at least to 31 % of filtering to decrease CO2 release by 20% of original values.

```

===== Economic factor =====
CCS technology is lucrative when it is configured to filter 89% of
CO2 produced and more.
Saved costs: 3.44752 [million Kč]
Total CO2 produced:                 8.33513e+06      [tons]
=> Total CO2 captured:                7.33491e+06      [tons]
=> Total CO2 released:                1.00022e+06      [tons]

```

./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1218 -e 99,1 -r 95 -k 638.375

```

===== Computed coefficients =====
Amout of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
Amout of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)

```

```

===== Original values =====
Coal consumption per year:          5.81538e+06      [tons]
Amout of CO2 released per year:     5.8148e+06      [tons]
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09    [tons]
=====

```

```

Selected amout of CO2 to reduce: 95 [%]
=> Maximum amout of CO2 to release: 290740 [tons]

```

```

===== Results =====
Coal combusted without CCS:         174462 [tons]
Coal combusted with CCS:            8.41929e+06 [tons]
=> Total coal combusted:             8.59375e+06 [tons]

```

```

Emissions of coal combusted without CCS:      174444      [tons]
Emissions of coal combusted with CCS:         8.41845e+06 [tons]
Total CO2 produced:                          8.59289e+06      [tons]
=> Total CO2 captured:                        8.3351e+06      [tons]
=> Total CO2 released:                        257787      [tons]

```

CCS technology must be set at least to 97 % of filtering to decrease CO2 release by 95% of original values.

```

===== Economic factor =====
CCS technology is lucrative when it is configured to filter 98% of
CO2 produced and more.
Saved costs: 163.412 [million Kč]
Total CO2 produced:      8.59289e+06      [tons]
=> Total CO2 captured:    8.3351e+06      [tons]
=> Total CO2 released:    257787      [tons]

```

Ďalším experimentom sme skúmali, ak by bol dopad v prípade ak by sa cena emisného poplatku vyšplhala na 25€ [5], [11] resp. 638,375 Kč. Systém by bol ziskový a to od 3,44 miliona Kč pri 20% záchyte až po 163,4 milióna Kč pri 95% záchyte.

5.2.4 Experiment číslo 4

```
./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1278.9 -e 99,1 -r 95 -k 635.375
```

```

===== Computed coefficients =====
Amount of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
Amount of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)

```

```

===== Original values =====
Coal consumption per year:      5.81538e+06      [tons]
Amount of CO2 released per year: 5.8148e+06      [tons]
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09 [tons]
=====

```

```

Selected amount of CO2 to reduce: 95 [%]
=> Maximum amount of CO2 to release: 290740 [tons]

```

```

===== Results =====
Coal combusted without CCS:      174462      [tons]
Coal combusted with CCS:         8.41929e+06      [tons]
=> Total coal combusted:         8.59375e+06      [tons]
Emissions of coal combusted without CCS:      174444      [tons]
Emissions of coal combusted with CCS:         8.41845e+06 [tons]
Total CO2 produced:              8.59289e+06      [tons]
=> Total CO2 captured:           8.3351e+06      [tons]
=> Total CO2 released:           257787      [tons]

```

CCS technology must be set at least to 97 % of filtering to decrease CO2 release by 95% of original values.

===== Economic factor =====
CCS techonology is not lucrative for specified system.

./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1278.9 -e 99,1 -r 95 -k 670

===== Computed coefficients =====
Amout of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
Amout of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)

===== Original values =====
Coal consumption per year: 5.81538e+06 [tons]
Amout of CO2 released per year: 5.8148e+06 [tons]
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09 [tons]
=====

Selected amout of CO2 to reduce: 95 [%]
=> Maximum amout of CO2 to release: 290740 [tons]

===== Results =====
Coal combusted without CCS: 174462 [tons]
Coal combusted with CCS: 8.41929e+06 [tons]
=> Total coal combusted: 8.59375e+06 [tons]
Emissions of coal combusted without CCS: 174444 [tons]
Emissions of coal combusted with CCS: 8.41845e+06 [tons]
Total CO2 produced: 8.59289e+06 [tons]
=> Total CO2 captured: 8.3351e+06 [tons]
=> Total CO2 released: 257787 [tons]

CCS technology must be set at least to 97 % of filtering to decrease CO2 release by 95% of original values.

===== Economic factor =====
CCS technology is lucrative when it is configured to filter 98% of CO2 produced and more.
Saved costs: 169.95 [million Kč]
Total CO2 produced: 8.59289e+06 [tons]
=> Total CO2 captured: 8.3351e+06 [tons]
=> Total CO2 released: 257787 [tons]

Pri tomto experimente sme sa zamerali na zmeny a vývoj ceny uhlia. Z výsledkov si môžeme všimnúť že čo i len pri jej 5% navýšení, čo môže nastať do 5 rokov, sa zisk stratil a to aj pri cene emisného poplatku v hodnote 25€. Avšak straty neboli príliš vysoké a po jemnom navýšení emisného poplatku na 637Kč sme boli opať v plusových číslach. Pre docielenie podobného intervalu ziskov ako pri experimente č.3 by sme v tomto prípade potrebovali, aby emisné poplatky boli v hodnote aspoň 670 Kč.

5.2.5 Experiment číslo 5

./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1383.1976 -e 99,1 -r 20 -k 766.05

```
===== Computed coefficients =====
Amount of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
Amount of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)
```

```
===== Original values =====
Coal consumption per year: 5.81538e+06 [tons]
Amount of CO2 released per year: 5.8148e+06 [tons]
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09 [tons]
=====
```

```
Selected amount of CO2 to reduce: 20 [%]
=> Maximum amount of CO2 to release: 4.65184e+06 [tons]
```

```
===== Results =====
Coal combusted without CCS: 4.01262e+06 [tons]
Coal combusted with CCS: 2.6907e+06 [tons]
=> Total coal combusted: 6.70332e+06 [tons]
Emissions of coal combusted without CCS: 4.01221e+06 [tons]
Emissions of coal combusted with CCS: 2.69043e+06 [tons]
Total CO2 produced: 6.70265e+06 [tons]
=> Total CO2 captured: 2.07782e+06 [tons]
=> Total CO2 released: 4.62483e+06 [tons]
```

CCS technology must be set at least to 31 % of filtering to decrease CO2 release by 20% of original values.

```
===== Economic factor =====
CCS technology is lucrative when it is configured to filter 79% of
CO2 produced and more.
Saved costs: 7.69968 [million Kč]
Total CO2 produced: 8.04873e+06 [tons]
=> Total CO2 captured: 6.27801e+06 [tons]
=> Total CO2 released: 1.77072e+06 [tons]
```

./ims -p 6363 -u 39 -v 10.1 -c 1383.1976 -e 99,1 -r 95 -k 766.05

```
===== Computed coefficients =====
Amount of coal for 1MWh energy: 0.913938 [tons] (No CCS capture)
Amount of coal for 1MWh energy: 1.36409 [tons] (CCS capture)
```

```
===== Original values =====
Coal consumption per year: 5.81538e+06 [tons]
Amount of CO2 released per year: 5.8148e+06 [tons]
Cost of emission permit bills per year: 2.23635e+09 [tons]
=====
```

```
Selected amount of CO2 to reduce: 95 [%]
=> Maximum amount of CO2 to release: 290740 [tons]
```

```
===== Results =====
```

Coal combusted without CCS:	174462	[tons]
Coal combusted with CCS:	8.41929e+06	[tons]
=> Total coal combusted:	8.59375e+06	[tons]
Emissions of coal combusted without CCS:	174444	[tons]
Emissions of coal combusted with CCS:	8.41845e+06	[tons]
Total CO2 produced:	8.59289e+06	[tons]
=> Total CO2 captured:	8.3351e+06	[tons]
=> Total CO2 released:	257787	[tons]

CCS technology must be set at least to 97 % of filtering to decrease CO2 release by 95% of original values.

===== Economic factor =====

CCS technology is lucrative when it is configured to filter 98% of CO2 produced and more.

Saved costs: 413.924 [million Kč]

Total CO2 produced:	8.59289e+06	[tons]
=> Total CO2 captured:	8.3351e+06	[tons]
=> Total CO2 released:	257787	[tons]

Posledný experiment predpokladá nárast emisnej povolenky na 30€ k roku 2030 a cenu uhlia s medziročným nárastom o 1,28% [3] k roku 2030 na 1383,1976 Kč. Výsledky boli kladné. Systém by mal byť ziskový a to od 7,7 miliona Kč pri 20% filtrácii až do 413,924 miliónov pri 95% filtrácii.

5.3 Závery experimentov

Všetky experimenty boli vykonávané na dátach k 1 roku prevádzky elektrárne a taktiež, ako aj ich výsledky. Prvotné experimenty sa zmarievali len na validáciu simulátoru a to porovnávaním nadobudnutých hodnôt s hodnotami nadobudnutými manuálne v programe Excel. Na základe experimentov môžeme pozorovať a do budúcnosti predpokladať správanie systému za rôznych situácií.

6 Zhrnutie simulačných experimentov a záver

Experimentami sme dokázali, že implementácia technológie CCS sa oplatí tým viac, čím je vyššia cena emisných povoleniek. Keďže sa predpokladá nárast týchto poplatkov, je na mieste uvažovať nad jej implementáciou. Avšak je nutné brať do úvahy aj cenu uhlia, ktorá sa môže taktiež navyšovať v priebehu rokov, ale pri experimentovaní sme brali v úvahu aj tento faktor. Ako možné vidieť v experimente č. 5, náklady spojené s nárastom ceny uhlia o 1,28% [3, strana 54] každým rokom, neprevýšili ušetrené financie pri emisiách v prípade, že sme predpokladali k roku 2030 ich nárast na 30€ [11]. Taktiež, môžeme predpokladať, že nárast emisných povoleniek bude do budúcnosti rapídnejší než, nárast cien uhlia a tým pádom by mal byť systém ziskový naprieč celej svojej dobe životnosti. Všetky experimenty boli vykonávané na dátach k 1 roku prevádzky elektrárne a taktiež ich výsledky sa vzťahujú k jednému roku prevádzky bloku.

Použitá literatura

- [1] allforpower.cz: Nové kotle pro méně kvalitní uhlí. [online], 2009, [vid. 2019-12-05]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/ivitas_409.pdf
- [2] severočeské doly a.s.; ČEZ, S.: Katalog hnědého uhlí. [online], 2014, [vid. 2019-12-05]. Dostupné z: http://www.sdas.cz/dokumenty/Katalog_2014.pdf
- [3] Bagin, V.: *Analýza ekonomických dopadů předpokládaného vývoje v oblasti teplárenství*. Diplomová práce, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta elektrotechnická Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2019, [vid. 2019-12-09].
- [4] BRADA, I. V.: Internetová poradna i-EKI. [online], 2017, [vid. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/cz/programy-podpory/efekt/i-ekis/80358>
- [5] european Commission: Revision for phase 4 (2021-2030). [online], 2019, [vid. 2019-12-09]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/revision_en
- [6] Ing. MLÁDEK, C.: Vyhláška č. 309/2016 Sb. [online], 2016, [vid. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-309>
- [7] elektrotechnika on line, E.: Elektrárna Pruněřov – nejlepší dostupná technologie nebo šrot? [online], 2010, [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://www.etm.cz/index.php/component/content/article/38-energetika/553-elektrarna-prunerov-nejlepsi-dostupna-technologie-nebo-srot>
- [8] Organization, W. M.; Programme, U. E.: Carbon dioxide capture and storage. [online], 2018, [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- [9] PERINGER, P.; HRUBÝ, M.: Modelování a simulace, Text k přednáškám kursu Modelování a simulace na FIT VUT v Brně. [online], 24. október 2019, [vid. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>
- [10] ministerstvo životního prostředí: Cena emisní povolenky pro účely určení alokace na výrobu elektřiny na rok 2019. [online], 2019, [vid. 2019-12-09]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/cena-emisni-povolenky_2019
- [11] VOŘÍŠEK, M.: Šéf E.ONu požaduje cenu emisí CO₂ ve výši 25-30 EUR/t, pouze pro začátek. [online], 2017, [vid. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nemecko/sef-e-onu-pozaduje-cenu-emisi-co2-ve-vysi-25-30-eurt-zacatek/>
- [12] WANG, Y.; ZHAO, L.; OTTO, A.; aj.: A Review of Post-combustion CO₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. [online], 2017, [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217313851>
- [13] Wikipedie: Elektrárny Pruněřov. [online], 2019, [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektr%C3%A1rny_Prun%C3%A9řov
- [14] ÚJV Řež, a. s.: Komplexní modernizace elektrárny PRUNĚŘOV II, Česká republika. [online], 2019, [vid. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/reference/komplexni-modernizace-elektrarny-prunerov-ii-ceska-republika-10179>
- [15] ČEZ, S.: ELEKTRÁRNY PRUNĚŘOV. [online], 2019, [vid. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-prunerov-58176>

- [16] ministerstvo životního prostředí ČR; Česká geologická služba: Surovinové zdroje České republiky. [online], 2016, [vid. 2019-12-05]. Dostupné z: http://www.geology.cz/extranet/publikace/online/surovinove-zdroje/surovinove-zdroje-ceske-republiky-2016_m.pdf