## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

# Simulační studie Uhlíková stopa v energetice a teplárenství

1.	ÚVOD	2
1.1 1.2	,	
2.	ROZBOR TÉMATU A POUŽITÝCH METOD/TECHNOLOGIÍ	
2.1 2.2		
3.	KONCEPCE	5
3.1	1. POPIS KONCEPTUÁLNÍHO MODELU	5
4.	ARCHITEKTURA SIMULAČNÍHO MODELU/SIMULÁTORU	6
4.1	1. Mapování abstraktního modelu do simulačního	6
5.	PODSTATA SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ A JEJICH PRŮBĚH	7
5.1	1. POSTUP EXPERIMENTOVÁNÍ	7
5.2	2. DOKUMENTACE EXPERIMENTŮ	7
	5.2.1. Experiment 1	7
	5.2.2. Experiment 2	
	5.2.3. Experiment 3	8
	5.2.4. Experiment 4	8
	5.2.5. Experiment 5	8
	5.2.6. Experiment 6	8
5.3	3. ZÁVĚRY EXPERIMENTŮ	8
6.	SHRNUTÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ A ZÁVĚR	9
7. REF	FERENCE	10

## 1. Úvod

Tato práce se zabývá problémem solárních panelů a využitím baterií k efektivnímu využívání získané energie tehdy, kdy je to vhodné a zjištění celkového dopadu na uhlíkovou stopu. Důvodem k tomu je, že jeden z největších problémů fotovoltaických elektráren je právě nespolehlivost v otázce: "kdy bude vyrábět kolik energie?" a z toho plyne například možnost přetěžování sítě, nebo i naopak nedostatku energie. Využití baterií k řešení tohoto problému je jedno z nejaktuálnějších řešení.

## 1.1. Autoři, zdroje

Řešení vypracovali studenti Radek Duchoň (xducho07) a Josef Oškera (xosker03) z FIT VUT.

Jedním z nejdůležitějších zdrojů faktů byla šestiletá statistika tvorby energie ze solárních panelů ve vlastní domácnosti. Dále pak konverzace se zaměstnancem společnosti EON, panem Liborem Bráblíkem (od kterého jsme se dověděli například o trendu solárních baterií) a další různé veřejně dostupné informace, hlavně pak výroční zpráva od národního energetického úřadu.

## 1.2. Ověření validity

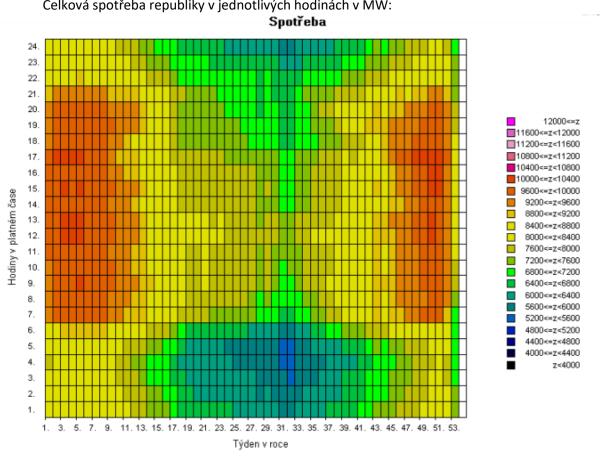
Abychom zaručili validitu [IMS, 37] modelu [IMS, 7], získané údaje z veřejně dostupných zdrojů jsme křížově porovnávali ve více zdrojích a pokud to šlo, tak jsme je také porovnávali se skutečně dosaženými údaji v již zmíněné šestileté statistice, se kterou jsme rovněž porovnávali námi navržené vzorce pro model.

## 2. Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Fotovoltaická elektrárna produkuje nezanedbatelné množství energie naší republiky, konkrétně tvoří přes 10 % instalovaného výkonu [1] z celkem 21 989 MW [1]. Pokud se má tento "ekologický" druh energie nadále rozšiřovat, je nutné vyřešit problémy plynoucí z masového rozšíření panelů, kde nejzásadnějším problémem je nejistá tvorba energie a celkově odlišné množství produkované energie napříč rokem. (viz přiložený dokument statistika.xlsx)

Pro simulaci využíváme baterie Tesla Powerwall 2 [2], které mají kapacitu 13,5kWh. Z této kapacity se bude efektivně využívat pouze 60 % v měsících s vyšší produkcí energie a 40 % v měsících s nižší produkcí energie, a to pro zachování co nejdelší životnosti. (I tak ovšem počítáme jen s deklarovanou životností 10 let.) Zároveň počítáme s deklarovanou efektivitou 90 %, kdy 10 % energie se ztratí.

Celková spotřeba energie v simulaci se řídí tímto grafem spotřeby energie v republice, který jsme manuálně přepsali do dvourozměrné matice o celkem 1272 polích v programu.



Celková spotřeba republiky v jednotlivých hodinách v MW:

(Obrázek [3])

Emise na kWh energie ze solárního panelu jsou až 24 g CO₂e [4], na výrobu referenčního panelu (164 × 99,4 cm) je spotřebováno 978kWh [5], na recyklaci lze použít většinu materiálů – ideálně dokonce přes 95 % [6] a snížit tak nároky na energii až o 70 % [6].

U baterií vzniká 75 kg CO₂e na kWh při výrobě [7], to lze ovšem zredukovat recyklací. Lze efektivně recyklovat až 80 % materiálů a snížit tak emise na 27 kg CO₂e. [8]

## 2.1. Použité postupy

Model je reprezentován řadou vzorců, které jsou dány již výše zmíněnými údaji (a dalšími z již zmíněných odkazů), aproximací naší statistiky pomocí kvadratické funkce, kterou jsme chtěli jednodušeji simulovat Gaussovu křivku a taktéž zmíněnými údaji. Pomocí zmíněné až primitivní aproximace se nám podařilo překvapivě dobře a jednoduše kopírovat data z naší statistiky, což dokazuje, že někdy jednoduché řešení může být v dané situaci velmi elegantní.

## 2.2. Popis původu použitých metod/technologií

Model je implementován v jazyce C++ za využití standardních knihoven s dodrženým standardem C++11. Rovnice pro celkovou funkčnost simulace jsme sestavovali sami na základě získaných dat z dostupných zdrojů.

## 3. Koncepce

Reálný instalovaný výkon je násobně větší, než kolik energie se využívá. To je dáno tím, že v různou dobu se využívá různé množství energie, zjistit jakým mechanismem se přesně využívají kdy které zdroje však není technicky možné. (Závisí to např. i na plánovaných údržbových odstávkách jaderných elektráren apod.) Proto v našem modelu počítáme pro zjednodušení, že jaderné a vodní elektrárny jedou neustále na maximální výkon. Naším cílem je co nejvíce omezit tepelné elektrárny ve chvíli kdy jsme v tomto ideálním stavu. (Samozřejmě pokud bude naplánovaná odstávka Temelínu, musí se dočasně nahradit jiným zdrojem – zde dává smysl využívat uhelné elektrárny. Tato fakta však zanedbáváme, protože by výsledný model byl příliš složitý, to by však nemělo mít vliv na náš průzkum.) Dále pak zanedbáváme postupně se zvyšující spotřebu republiky, jelikož jde o poměrně pomalý postup.

Tepelné elektrárny (s výjimkou jaderných) jsme spojili všechny do jedné kategorie, přičemž emise na kWh jsme přepočítali dle aktuálního podílu instalovaného výkonu. (49 % pro uhelné elektrárny, celkem 10 % pro paroplynové a plynové, které užitkují zemní plyn.) [9] Celkově se tak dostáváme k váženému průměru 1,06 kg CO<sub>2</sub>e/kWh energie.

S Větrnými a přečerpávacími elektrárnami zde nepočítáme, jelikož větrné elektrárny mají zanedbatelný vliv (pouze 1 % instalovaného výkonu v ČR) a přečerpávací jsou 5 %, ale zato jsou spíše velkými bateriemi než reálnými zdroji. Mezi ostatní elektrárny jsme proto těchto 6 % podílu na tvorbě energie rovnoměrně rozdělili.

Kapacitu baterií jsme určili na 5,4 kWh pro období říjen–únor, tedy 40 % z maxima. To protože solární panely (jak vyplývá ze statistik) vyrábí v těchto měsících jen zlomek toho, co v ostatních měsících a tak pro úsporu životnosti baterií není vhodné baterie dlouhodobě mít pod kapacitou 40 %, zároveň však není vhodné nabíjet baterie nad 80 % (celkově). Mimo tyto měsíce povolujeme (krátkodobé) vybití až do hladiny 20 %, tedy počítáme s kapacitou 8,1 kWh. Díky tomuto si můžeme dovolit ignorovat postupné snižování kapacity. (O teoretických až 20 % za dobu deseti let, po kterých je vyřazujeme k recyklaci. Toto je však nejhorší případ daný zárukou. V praxi by měly být výsledky mnohem lepší, jelikož v simulaci počítáme s efektivním šetřením baterií a životnost tak mnohem delší.)

### 3.1. Popis konceptuálního modelu

Model funguje v diskrétním čase, kdy se stav simulace [IMS, 8] aktualizuje po jedné hodině. Simulace probíhá následovně:

- 1. Inicializuje se systém vytvořením určitého množství panelů a baterií.
- 2. Zjistí se, kolik energie bude potřeba pro danou hodinu generovat.
- 3. Vyrobí se co nejvíce energie z vodních a jaderných elektráren.
- 4. Vyrobí se energie z fotovoltaických elektráren.
- 5. Pokud je energie dostatek, pokusí se dobít baterie (pouze z přebytků solárních panelů).
- 6. Pokud je energie nedostatek, pokusí se dodat energii z baterií.
- 7. Pokud energie stále nedostačuje, započítá se, kolik by muselo vzniknout energie v tepelných elektrárnách.
- 8. Během zmíněných kroků se započítají emise z tepelných a fotovoltaických elektráren.
- 9. Pokud ještě nebyla odsimulována zadaná doba (v letech), vrací se na krok 2.
- 10. Spočítají se emise na tvorbu vygenerovaných panelů a baterií, které se sečtou s průběžně napočítanými emisemi.

## 4. Architektura simulačního modelu/simulátoru

Spuštěním simulačního modelu [IMS, 10] se spustí simulační experiment pro každou kombinaci ze zadaného maxima násobku aktuálního instalovaného výkonu solárních panelů a maximální celkové kapacity baterií jako násobek instalovaného výkonu solárních panelů v aktuální simulaci. Pro každou tuto kombinaci se vypíšou výsledky.

Výsledky obsahují údaje o využití množství energie z různých zdrojů, tedy i kolik energie musely dovygenerovat tepelné elektrárny. Následně jsou ve výpisu roční údaje o celkové spotřebě (jeden z údajů, pomocí kterého jsme mohli validovat, zda model odpovídá realitě), kolik energie prošlo bateriemi. Dále pak výpis říká, jaký je podíl instalovaného výkonu a absolutní instalovaný výkon v GW pro jednotlivé zdroje, jaká je celková kapacita baterií (neredukovaná), kolik na to připadá baterií, panelů a kolik je panelů na baterii. Posledními a pro nás nejdůležitějšími údaji jsou výsledky ročních emisí. Nakonec po výpisu všech těchto variant se vypíše "nejlepší" varianta při které vzniklo nejmenší množství emisí.

## 4.1. Mapování abstraktního modelu do simulačního

Části modelu jsou reprezentovány pomocí "pseudo objektů", kdy jsme vytvořili struktury pro baterii, zdroj, spotřebu Čr, čas a funkce pro práci s nimi.

- Baterie obsahuje údaje o maximální kapacitě a požadované úrovni nabití.
- Zdroj je určen typem, výkonem a má počítadlo vyrobené energie.
- Spotřeba Čr je dvourozměrné pole naplněné daty pro každý týden a hodinu.
- Čas je reprezentován pomocí čtyř hodnot hodina, den, týden a rok.

Produkce fotovoltaických panelů v průběhu dne je dána funkcí:  $f(x) = -1.5625 x^2 + 4.0625 x - 1.640425$ , Kde "x" je hodina. Produkce napříč rokem je pak celkově dána výše zmíněnou funkcí upravenou o modifikaci danou týdnem: ret =  $f(x) - 0.75 \times (26 - \text{tyden}_{gauss}()) / 27$ ;

Kde funkce tyden\_gauss() vrací hodnotu 0-26, abychom věrohodně simulovali 27 různě efektivních týdnů pro fotovoltaické elektrárny s jedním maximem a minimem na dvou koncích. Pro hodnoty menší než 0 se hodnota vynuluje. (Solární panely nemohou pouze spotřebovávat energii.)

Program se překládá pomocí příkazu "make". Následně se může spouštět buď bez parametrů, kdy se využijí výchozí hodnoty pomocí prostého "make run". (Počet let v simulaci 10 let, baterie s kapacitou až třicetinásobnou oproti instalovanému výkonu fotovoltaických elektráren, fotovoltaické elektrárny s až třicetinásobným výkonem aktuálního výkonu v Čr a s počítáním s recyklací.) Pro zadání argumentů se program spouští jako:

make run ARGS="POČET LET PANELY BATERIE RECYKLACE"

#### kde:

- POČET\_LET je celé číslo říkající kolik let se má odsimulovat.
- PANELY je celé číslo udávající maximální násobek současného instalovaného výkonu solárních panelů v Čr.
- BATERIE je celé číslo určující maximální kapacitu baterií jako násobek instalovaného výkonu solárních panelů v ČR.
- RECYKLACE je bool zadaný jako hodnota "1" pro recyklování panelů a baterií nebo "0" pro nerecyklování

## 5. Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Prvním cílem bylo alespoň částečné ověření validity modelu, to se nám po řadě omylů podařilo porovnáváním výstupních údajů se známými fakty. Dalším cílem bylo zjistit, jestli a za jakých okolností bude vhodné využívat baterie pro stabilnější využití solárních panelů.

## 5.1. Postup experimentování

Po prvních experimentech nebyl náš model validní, jelikož jsme opomněli například fakt, že instalovaný výkon v republice je násobně větší oproti spotřebě republiky (a to i se započítaným exportem energie), podařilo se nám však získané údaje využít k úpravě modelu a dojít k validnímu modelu.

Po vytvoření konečně validního modelu jsme pro začátek spustili simulaci tak, aby údaje odpovídaly aktuálnímu výkonu fotovoltaických elektráren v republice. Po zjištění dat z aktuálního stavu jsme začali experimentovat spouštěním po dobu jednoho roku a zkoumat, jak se budou měnit emise podle toho, jestli se počítá s recyklací, bateriemi nebo případně s vyšším podílem instalovaného výkonu pro solární panely. Následně jsme se přesunuli k dlouhodobějším statistikám, kdy jsme nechali program simulovat deset let (kdy máme garantovanou správnou funkčnost baterií) a 30 let bez užívání baterií. (Jelikož fotovoltaické elektrárny mají sice garantovanou životnost jen 20 let, po kterých by měla klesnout produkce na pouhých 80 %, ale dle většiny expertů bude životnost minimálně 30 let, čemuž i odpovídá námi dodaná statistika, kdy za 6 let nelze pozorovat nějaké celkové snížení účinnosti.) Z mnoha simulací jsme pak vyfiltrovaly ty nejlepší výsledky pro právě zadané parametry, které jsme následně mohli porovnávat a něco z nich vyvozovat.

#### 5.2. Dokumentace experimentů

Uvádíme zde nejdůležitější experimenty, u kterých se snažíme uvést důvody pro ně, jejich závěrečné výsledky a případně nějaké shrnutí.

### 5.2.1. Experiment 1

První experiment má za úkol zjistit emise z fotovoltaických a tepelných elektráren na 1 rok "přinejlepším" při aktuálním rozvrstvení instalovaného výkonu, kdy se budou tepelné elektrárny využívat minimálně, při zanedbání aktuálně minimální množství instalovaných baterií.

Tepelné elektrárny [E]	Tepelné elek. CO₂e	Solární Panely [E]	Solární panely CO₂e	
16 929 GWh	17 944 601 run	5 547 GWh	315 606 tun	

Už z toho experimentu nám vychází, že solární panely jsou násobně čistější než tepelné elektrárny.

#### 5.2.2. Experiment 2

V dalším experimentu jsme se pokusili zjistit vliv na celkové roční emise, pokud budeme počítat s životností panelu 30 let a emise spojené s výrobou panelu tak budou rozpočítané mezi tyto roky. (Stále nebudeme využívat baterie.)

Tepelné el. [E]		Tepelné el. CO₂e	Panely [E]	Panely CO₂e
	16 929 GWh	17 944 601 run	5 547 GWh	139 226 tun

#### 5.2.3. Experiment 3

Ve třetím experimentu jsme zkoušeli, jak se změní emise, pokud budou všechny panely co nejvíce ekologicky recyklované a opět udržované po dobu třiceti let. Jedná se tedy o hypoteticky "druhou generaci fotovoltaických elektráren". (Zde stále bez baterií.)

Tepelné el. [E]		Tepelné el. CO₂e	Panely [E]	Panely CO₂e
	16 929 GWh 17 944 601 tun		5 547 GWh	134 963 tun

Zde již můžeme vidět, že recyklace neměla příliš viditelný vliv na čistotu energie z panelů, pouze o nějakých 5 000 tun na rok, ačkoliv to by se u experimentu jedna projevilo jako 150 000 tun.

## 5.2.4. Experiment 4

Tentokrát jsme konečně zapojili baterie a zkusili zjistit kolik by jich muselo být pro co nejlepší optimalizaci emisí za aktuálního stavu. (Nepočítá se s recyklací, simulovalo se 10 let, což je naše teoretická životnost baterií, abychom je nemuseli obměňovat.)

Tepelné el. [E]	Tep. El. CO₂e	Panely [E]	Panely CO₂e	Baterie	Baterie CO₂e
16 781 GWh	17 787 804 tun	5 547 GWh	134 963 tun	346 556 ks	35 088 tun

Můžeme vidět, že celková optimalizace emisí je dost nízká, naproti tomu baterií by se takto muselo Vytvořit ohromné množství

#### 5.2.5. Experiment 5

V pátém experimentu jsme nechali odsimulovat 10 let, ovšem povolili jsme již i násobení instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren.

Tepelné el. [E]	Tep. El. CO₂e	Panely [E]	Panely CO₂e	Baterie	Baterie CO₂e
394 GWh	417 777 tun	94 310 GWh	2 573 638 tun	8 837 186 ks	894 765 tun

Zde je vidět velký skok ve snížení emisí, kdy se z řádu desítek milionů tun CO₂e snížili do "pouhých" jednotek milionů tun. Naproti tomu enormně vzrostl počet instalovaných panelů (dle generované energie) a taktéž počet baterií se musel řádově více než dvacetkrát navýšit.

#### 5.2.6. Experiment 6

V posledním experimentu, kterým bychom se chtěli pochlubit jsme vyzkoušeli "zopakovat" minulý experiment, ale s tím rozdílem, že počítáme s dokonalou recyklací, jedná se tak o "druhou generaci" po první desítce let, kdy by fungovalo české energetictví ve stavu z minulého experimentu.

Tepelné el. [E]	Tep. El. CO₂e	Panely [E]	Panely CO₂e	Baterie	Baterie CO₂e
234 GWh	248 411 tun	99 858 GWh	2 494 846 tun	9 357 021 ks	341 063 tun

Zde je vidět, že s recyklací může být vhodné ještě o trochu navýšit podíl fotovoltaických elektráren, nicméně celkový vliv na emise již není až tak ohromný.

#### 5.3. Závěry experimentů

Pomocí prvních experimentů se nám podařilo přiblížit se realitě v našem modelu, následně bylo provedeno více než tucet experimentů v různých podmínkách, pomocí kterých jsme byli schopni dojít k nejefektivnějším řešením z pohledu emisí v energetickém průmyslu.

## 6. Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Simulačními experimenty se nám podařilo prokázat hned několik vlivů:

pozitivní vliv solárních panelů v aktuálním měřítku na celkové emise. Z námi zjištěných údajů vychází energie ze solárních panelů jako vysoce čistá. Důvodem, proč je naopak často považována za extrémně špatnou, je primárně ten, že se velmi často přičítají do uhlíkové stopy fotovoltaických elektráren i emise z uhelných elektráren – to se klasicky zdůvodňuje tím, že v Číně, kde se produkuje vysoké množství panelů, je 80 % produkované energie právě z uhelných elektráren. [10] Tento postup nám však nepřijde korektní, jelikož to není tak, že poté co se tato energie vrátí, že by se vytvořily znovu emise z uhelných elektráren...

Recyklace solárních panelů nemá až tak vysoký vliv na čistotu energie i přes fakt, že lze absolutní majoritu materiálů znovupoužít. Při recyklaci by tak mělo v tomto případě jít primárně o zmírnění ekonomických nákladů, namísto snahy zužitkovat co nejlépe již použitý materiál. Oproti tomu recyklace baterií už měla razantně větší vliv.

V aktuálním rozložení, kdy solární elektrárny nejsou majoritou se příliš nevyplatí hromadné globální užitkování baterií, jelikož ani dle našich simulací by emise téměř neklesly (v takto malém poklesu to dokonce ani nemusí znamenat, že jsou údaje dostatečně přesné, aby byl pokles skutečně pravdivý, i když to může být naopak i o něco lepší), zato náklady na baterie by byly až v řádu desítek miliard. Baterie jsou tak v aktuální době vhodné pouze pro jednotlivce, kterým se proplatí, když budou využívat při drahém proudu baterie a při levném normální síť, potažmo ještě pokud jsou v některých oblastech častější výpadky proudu, aby mohli používat baterii jako záložní zdroj.

Rozšíření fotovoltaických elektráren by v kombinaci s užitkováním baterií mělo mít vysoce pozitivní vliv na emise a uhelné elektrárny by se v takovém stavu nemusely (mimo případů, kdy bude například dočasně odstavená jaderná elektrárna, bude dlouhodobě v létě špatné počasí pro solární panely apod.) využívat takřka vůbec (v porovnání s nynější situací), a emise za rok by tak mohly poklesnout dokonce několikanásobně. Nicméně i v tomto případě by bylo zapotřebí enormní množství baterií. Kdyby se využívaly námi používané baterie v simulacích, mohlo by se jednat až o astronomickou částku 1,4 bilionu korun vloženou čistě do baterií a samotných elektráren by muselo taky násobně přibýt. (Dle našich simulací vyšel nejlépe 17tinásobný instalovaný výkon oproti aktuálnímu, což vede ještě na problém se sháněním dostatku prostoru pro relativně velké solární panely, umíme si ovšem představit, že jednou vzniknou například nějaké firmy, které si budou od lidí pronajímat střechy pro možnost nainstalovat na ně solární panely, ze kterých by následně profitovaly právě dané společnosti.) Nicméně věříme, že pokud by se takto transformovalo české energetictví, byly by vynaloženy i adekvátní výdaje na ekonomičtější produkci výkonnějších baterií, které budou uzpůsobeny právě pro tyto účely.

Ve výsledku tak věříme, že má smysl se zabývat touto cestou na globální úrovni a solární panely spolu s bateriemi tak rozšiřovat se snahou upozadit význam tepelných elektráren.

## 7. Reference

- [1] Roční zpráva o provozu ES ČR [online], 2019, [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: https://www.eru.cz/
- [2] Everything You Need To Know About The Tesla Powerwall 2 [online], 2019, [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <a href="https://cleantechnica.com/">https://cleantechnica.com/</a>
- [3] Elektrizační soustava [online], 2019, [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/
- [4] Carbon footprint of solar panels under microscope [online], 2019, [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <a href="https://www.euractiv.com/">https://www.euractiv.com/</a>
- [5] Energy Payback: Clean Energy from PV [online], 2019, [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <a href="https://www.nrel.gov/">https://www.nrel.gov/</a>
- [6] Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti [online], 2019, [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <a href="https://oze.tzb-info.cz/">https://oze.tzb-info.cz/</a>
- [7] Environmental Burdens of Large Lithium-Ion Batteries [online], 2019, [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: https://www.electrochem.org/
- [8] Lithium-ion Battery Recycling Solution [online], 2019, [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <a href="https://www.fortum.com/">https://www.fortum.com/</a>
- [9] Emisní hodnoty skleníkových plynů u fosilních zdrojů energie [online], 2019, [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://www.wingas.cz/
- [10] Tepelné elektrárny [online], 2019, [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: https://wiki.cinstina.upol.cz/