

1. Úvod

Tato práce se zabývá možností využití menších fotovoltaických elektráren v České republice a jejich podílu na výrobě elektrické energie v průběhu roku. Na základě modelu[1, snímek 7] a simulačních experimentů bude ukázáno, jakou částí se fotovoltaické elektrárny podílejí na výrobě elektrické energie v různých měsících kalendářního roku, kdy se mění jak světelné podmínky, tak nároky na množství elektrické energie. Smyslem experimentů je ukázat, jakou část spotřeby domácností je možné pokrýt instalací fotovoltaických elektráren na střechy rodinných domů. Jelikož je model schopný pracovat s různě velkým množstvím vstupních dat, jeho výsledky mohou být užitečné při rozhodování, zda investovat do fotovoltaické elektrárny či nikoliv.

1.1. Kontext problému

V současné chvíli jsou největším zdrojem elektrické energie v České republice tzv. spalovací parní elektrárny, které jsou zodpovědné zhruba za 50 % z celkového množství roční výroby elektrické energie¹. Jak již název napovídá, tyto elektrárny využívají výhřevné palivo pro tvorbu tepla. Vzniklým teplem je ohřívána voda, která se mění na páru, a poté roztáčí turbínu připojenou ke generátoru elektrické energie. Jelikož ale drtivou většinu paliva v těchto elektrárnách tvoří uhlí, vzniká kromě elektrické energie a zbytkového tepla také spousta nežádoucích látek – a to především velké množství oxidu uhličitého. Oxid uhličitý neboli také CO₂ je v posledních letech velmi žhavé téma napříč celým světem. Jeho zvyšující se koncentrace v atmosféře totiž způsobuje tzv. globální oteplování, což je označení pro dlouhodobý nárůst průměrné teploty klimatického systému Země. Pokud nedojde k omezení produkce CO₂ a kácení lesů, bude mít podle prognóz globální oteplování katastrofální dopad na život na Zemi, a to již v časovém horizontu několika desítek let.

Například uhelná elektrárna Počerady, má přibližně stejnou roční produkci CO₂ jako všechny nákladní automobily v České republice². Podobně velkých uhelných elektráren najdeme na území České republiky hned několik. Odstrašující je rovněž fakt, že přibližně stejné množství energie, jako vyrobí dvě největší uhelné elektrárny v ČR, je vyváženo do zahraničí (ČR vyrábí více el. energie, než spotřebovává)¹.

Pokud chceme zabránit nebo alespoň zpomalit globální oteplování, je potřeba energii vyrábět způsoby, které mají menší nebo ideálně nulovou uhlíkovou stopu. Jedním z takových způsobů je její získávání z největšího zdroje energie ve sluneční soustavě – ze Slunce. Toho se dá dosáhnout pomocí fotovoltaických panelů a z nich složených fotovoltaických elektráren (FVE).

Vzhledem k probíhajícímu programu Nová zelená úsporám, který finančně podporuje mimo jiných i realizaci menších fotovoltaických systémů (do 10 kWp³), se nabízí otázka, jakým

¹ http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf

² <https://www.greenpeace.org/czech/tiskova-zprava/3047/elektrarna-pocerady-je-nejvetsi-znecistovatel-co2-v-cr-chvaletice-zvysily-znecistení-o-43-procent/>, <http://www.hnutiduha.cz/aktualne/elektrarna-pocerady-spali-10-tun-uhli-za-minutu-65-proleti-kominem-zbytek-jde-na-vyvoz>

³ kilowatt-peak je míra nominálního výkonu solárního panelu/solární elektrárny

způsobem by výstavba těchto elektráren ovlivnila energetický mix České republiky a tím pádem i produkci CO₂.

1.2. Autoři a zdroje

Autory této práce a modelu jsou Adam Linka a Dominik Juriga z 3. ročníku bakalářského studijního programu na Fakultě informačních technologií VUT v Brně.

Jako zdroj informací a vstupních dat pro simulační model[1, snímek 44] posloužily záznamy o množství vyrobené energie různými fotovoltaickými elektrárnami na webovém portálu firmy Solar Monitor a roční zprávy o provozu elektrizační soustavy České republiky z webu energetického regulačního úřadu. Také byla využita některá data z výsledků sčítání lidu, domů a bytů z roku 2011.

1.3. Validita

Vzhledem k povaze práce a časové náročnosti nedošlo k experimentální validaci[1, snímek 37] modelu. Jelikož jsou ale v modelu používána reálná data o výrobě el. energie přímo z fotovoltaických elektráren a data přímo z oficiálních zpráv energetického regulačního úřadu, dá se vytvořený model považovat za validní.

2. Rozbor tématu a použitých metod/technologií

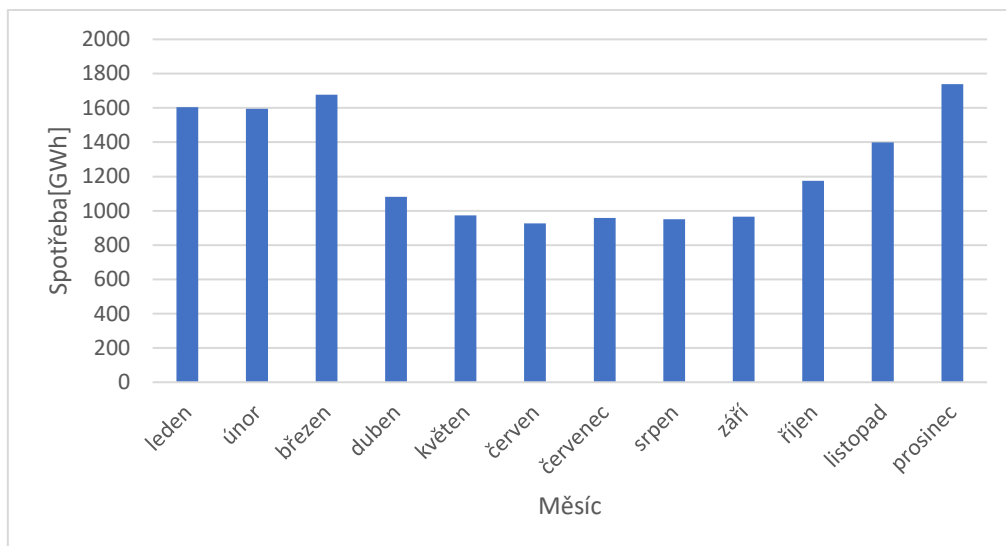
Dle výsledků sčítání lidu, domů a bytů v roce 2011 se na území České republiky nachází 1 554 794 obydlených rodinných domů⁴. V těchto domech bydlí celkově 5 043 384 osob⁴, což je 49 % z celkového počtu obyvatel České republiky. V rámci této studie jsou střechy rodinných domů uvažovány jako vhodné místo pro instalaci menších fotovoltaických elektráren.

Celková spotřeba energie v České republice za rok 2018 dosáhla hodnoty 59 511,7 GWh⁵. Domácnosti z tohoto množství spotřebovaly 15 050,3 GWh⁵, což tvoří přibližně 25 % celkové spotřeby. Podíl domácností na celkové spotřebě el. energie je za posledních 10 let téměř konstantní, pohybuje se mezi 25-26 %.

Spotřeba domácností v jednotlivých měsících kalendářního roku se drží určitého trendu, kdy nejnížší spotřebu je možné pozorovat v letních měsících, zatímco nejvyšší spotřebu v měsících zimních. Například v roce 2018 byla spotřeba v „nejhorším“ měsíci, prosinci, o 84 % vyšší než v „nejlepším měsíci“, srpnu⁵. Tento trend pravděpodobně úzce souvisí s rozdílnými nároky na vytápění a svícení v průběhu roku.

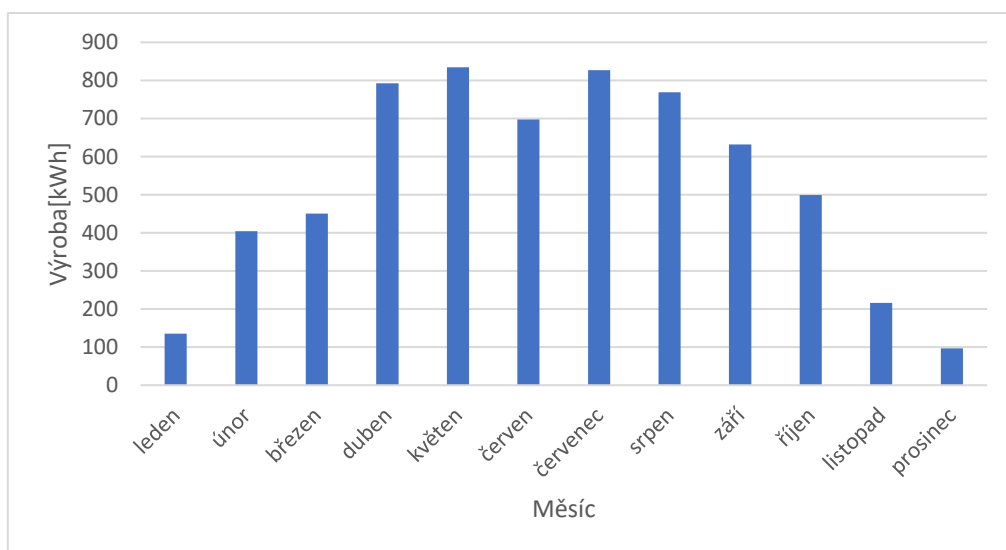
⁴ <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=ZVCR015&pvokc=&katalog=30630&z=T>

⁵ http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf



Graf 1: Spotřeba domácností v jednotlivých měsících roku 2018

Trend ve výkonu fotovoltaické elektrárny je opačný. Výkon se odvíjí od intenzity a délky osvětlení, a od úhlu dopadu světla na fotovoltaické panely. Nejlepší podmínky u nás tedy panují v letních měsících, kdy jsou světlé dny nejdelší. Nejhorší měsíce pro získávání energie ze slunce jsou pak logicky ty zimní, kdy je většinu dne tma nebo vysoká oblačnost, která rapidně snižuje množství dopadajícího světla na panely.



Graf 2: Výroba fotovoltaické elektrárny o výkonu 5.7 kWp v jednotlivých měsících

2.1. Použité postupy

Pro tvorbu modelu byly využity standardní postupy programování v jazyce C++, přičemž byl použit imperativní přístup k programování. Model je implementován na základě matematických vzorců.

2.2. Popis původu použitých metod/technologií

Byly použity standartní funkce jazyka C++⁶ a jeho knihoven. Pro překlad zdrojových souborů sloužil nástroj GNU Make⁷.

3. Koncepce

Jelikož model simuluje pokrytí spotřeby domácností fotovoltaickými elektrárnami v jednotlivých měsících kalendářního roku, musí počítat jak s trendem spotřeby, tak s trendem výroby el. energie v průběhu roku. Mimo jiných parametrů je k simulaci tedy nutné dodat dva soubory dat. Jeden obsahuje výkon fotovoltaických elektráren v jednotlivých měsících a jejich maximální výkon, druhý soubor obsahuje spotřebu domácností v jednotlivých měsících. Jelikož se trendy počítají průměrováním dat, platí, že čím více dat je poskytnuto, tím přesnější je simulace[1, snímek 8].

Pro každý záznam (rok) v souboru dat platí následující:

1. Sečtou se hodnoty v každém měsíci jednoho roku.
2. Každý měsíc toho roku se podělí výsledkem z přechozího kroku. Tím je získáno 12 hodnot, které reprezentují podíl každého měsíce na celkově roční výrobě/spotřebě.
3. U souboru dat z fotovoltaických elektráren je navíc vypočítán tzv. roční koeficient výroby, což představuje číslo, kterým když vynásobíme špičkový výkon elektrárny, dostaneme roční výrobu energie.

Poté se všechny podíly ve stejných měsících sečtou a podělí počtem záznamů (roků). Tím je získána průměrná výroba/spotřeba v každém měsíci kalendářního roku.

Jakmile je vypočítaný průměrný trend spotřeby a průměrný trend výroby, je po doplnění údajů o celkové spotřebě, velikosti a počtu FVE možné podle následujícího vzorce vypočítat, jakým způsobem dokážou fotovoltaické elektrárny přibližně pokrýt zadanou spotřebu v jednotlivých měsících kalendářního roku.

$$\text{Pokrytí v měsíci } m = \frac{\text{výkonFVE}[kWp] \times \text{početFVE} \times \text{koeficient} \times \text{podílNaVýrobě}(m)}{\text{spotřeba}[kWh] \times \text{podílNaSpotřebě}(m)}$$

Na základě zadání informací o minimálním přípustném pokrytí a výkonu FVE je možné zjistit, jaký počet instalací by bylo nutné realizovat, a to pomocí následujícího vzorce.

$$\text{Počet FVE} = \frac{\text{spotřeba}[kWh] \times \text{podílNaSpotřebě}(\text{nejhoršíMěsíc}) \times \text{minimální pokrytí}}{\text{výkonFVE}[kWp] \times \text{koeficient} \times \text{podílNaVýrobě}(\text{nejhoršíMěsíc})}$$

Obdobně je možné po zadání minimálního přípustného pokrytí a počtu FVE zjistit, jak výkonné by instalované elektrárny musely být, a to podle následujícího vzorce.

⁶ <https://en.cppreference.com/w/cpp>

⁷ <https://www.gnu.org/software/make/>

$$\text{Výkon FVE} = \frac{\text{spotřeba}[kWh] \times \text{podílNaSpotřebě}(\text{nejhoršíMěsíc}) \times \text{minimální pokrytí}}{\text{početFVE} \times \text{koeficient} \times \text{podílNaVýrobě}(\text{nejhoršíMěsíc})}$$

Výsledky z předchozích dvou vzorců jsou poté dosazeny do vzorce pro výpočet pokrytí spotřeby v jednotlivých měsících.

4. Architektura simulačního modelu/simulátoru

Po spuštění program nejprve zpracuje soubory dat s údaji o výrobě FVE v jednotlivých měsících a s údaji o spotřebě domácností v jednotlivých měsících. Zpracování probíhá ve funkci `parseData`. Ta nejprve vypočítá celkovou výrobu/spotřebu tak, že sečte hodnoty všech měsíců jednoho roku. Tímto výsledkem následně dělí hodnotu každého měsíce, čímž je získáno 12 hodnot, které reprezentují podíl každého měsíce na roční výrobě/spotřebě. U souboru dat z fotovoltaických elektráren je navíc vypočítán tzv. roční koeficient výroby, a to podělením celkové roční výroby špičkovým výkonem. Podíly stejných měsíců jsou poté sečteny a poděleny počtem záznamů (roků). Tímto způsobem jsou získány dva vektory desetinných čísel. Jeden obsahuje průměrné podíly jednotlivých měsíců na roční výrobě fotovoltaické elektrárny a průměrný koeficient roční výroby. Druhý vektor potom obsahuje průměrné podíly jednotlivých měsíců na roční spotřebě.

Na základě kombinace vstupních argumentů jsou volány funkce, které implementují matematické vzorce uvedené ve [3. kapitole](#).

Pro úspěšné spuštění modelu musí být vždy zadán údaj o spotřebě, cesta k souboru s daty o výrobě FVE a cesta k souboru s daty o spotřebě.

Následně uživatel zadává argumenty s údaji o počtu instalací, výkonu FVE nebo minimální pokrytí, jakého chce dosáhnout. Vždy je nutné zadat dva z těchto argumentů. Na základě jejich kombinace je určen další postup, a to následovně:

- počet instalací, výkon FVE:
Pro získání výsledků je použita funkce `calculatePercentage`, která implementuje vzorec pro pokrytí v jednom měsíci. Pomocí `for` cyklu tedy projde všechny měsíce a na základě vstupních dat vypočítá procentuální pokrytí dané spotřeby fotovoltaickou elektrárnou. Výsledky vypíše na standardní výstup.
- počet instalací, minimální pokrytí:
V tomto případě model počítá výkon FVE, aby při daném počtu instalací byly schopny pokrýt minimálně danou hodnotou v procentech. K tomu je využita funkce `calculateOutput`, která implementuje vzorec pro výpočet výkonu FVE. Funkce nejprve volá funkci `getWorstMonth`, která najde nejneprůzračnější měsíc na základě součinu podílu výroby a podílu spotřeby. Pro nalezený měsíc je potom počítán výkon FVE. Funkce vypíše výsledek a zavolá funkci `calculatePercentage`, která výsledek vsadí do kontextu pokrytí spotřeby v celém roce.

- výkon FVE, minimální pokrytí:
Tentokrát model počítá počet instalací FVE, aby při daném výkonu byly schopny pokrýt minimálně danou hodnotu v procentech. K tomuto účelu je využívána funkce `calculateCount`, která implementuje vzorec pro výpočet počtu instalací FVE. Princip je stejný jako u funkce `calculateOutput`.

4.1. Spuštění simulačního modelu

Před prvním spuštěním je projekt nutné nejdříve přeložit. To je možné udělat příkazem `make` nebo `make ims`.

Spuštění simulačního modelu je možné pomocí příkazu `make run`. V tomto případě je model spuštěn s předem danými vstupními parametry, které odpovídají vstupním datům použitým v [Experimentu 1](#).

Model se dá spustit i s vlastními vstupními daty, a to následovně:

```
make run-custom args='-solardata <dataVýroba> - condata  
<dataSpotřeba> -count <početFVE> -size <výkonFVE> -percentage  
<minimálníPokrytí> -consumption <spotřeba>'
```

<dataVýroba> = cesta k souboru s daty o výrobě FVE

<dataSpotřeba> = cesta k souboru s daty o spotřebě

<početFVE> = počet instalovaných FVE

<výkonFVE> = výkon instalovaných FVE v kWp

<minimálníPokrytí> = minimální pokrytí v procentech (pouze číslo)

<spotřeba> = roční spotřeba v kWh

Vždy je třeba zadat právě dva argumenty z: `-count`, `-size` a `-percentage`.

5. Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Simulace má za úkol zjistit, jak se mohou menší fotovoltaické elektrárny umístěné na rodinných domech podílet na pokrytí celkové spotřeby el. energie domácností v průběhu roku. Tato zjištění pomůžou odhalit silné a slabé stránky tohoto řešení a umožní nám zamyslet se nad jeho smyslem.

5.1. Postup experimentování

Pro experimentování budou využita data z roční výroby (po měsících) různých FVE umístěných po České republice⁸. Zároveň budou využita data roční spotřeby (po měsících) domácností ze statistik energetického regulačního úřadu za posledních 5 let⁹. Budeme sledovat, jak se se zadaným množstvím a výkonem FVE mění schopnost pokrýt spotřebu domácností. Různé výkony FVE jsou odvozeny od nabídky české firmy S-Power¹⁰, jimiž nabízené varianty podléhají

⁸ <https://www.solarmonitor.cz/cz/reseni/monitoring-fve> (soubor `solarData.txt`)

⁹ http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf (soubor `consumptionData.txt`)

¹⁰ <https://www.s-power.cz/fotovoltaicke-elektrarny/>

dotačnímu programu Nová zelená úsporám¹¹ a zároveň pro akumulaci nadbytečné energie využívají baterie, díky čemuž bude využití získané energie efektivnější.

5.2. Experimenty

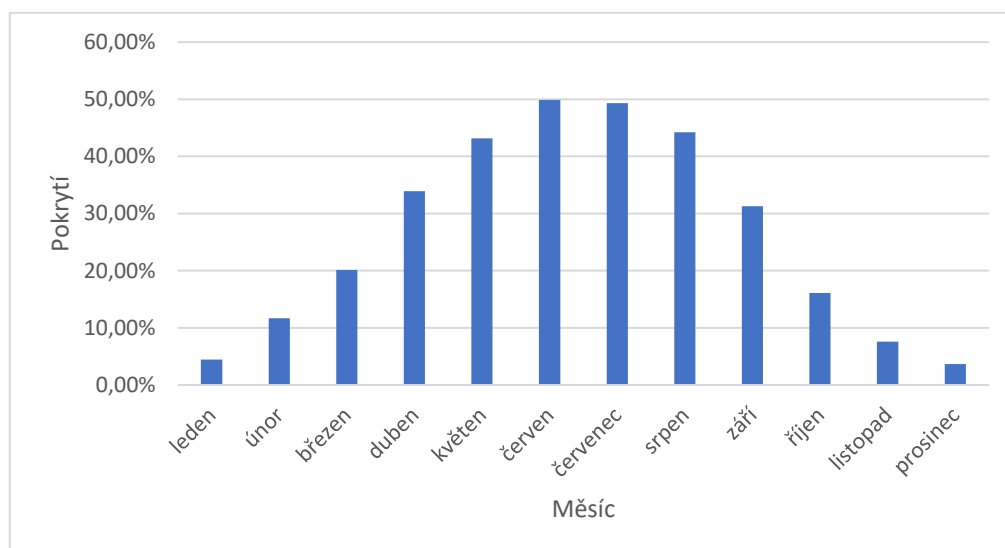
U každého experimentu je popsán jeho smysl, vstupní hodnoty a výsledky. Zároveň jsou výsledky slovně zhodnoceny.

5.2.1. Experiment 1

V prvním experimentu uvažujeme instalaci malé FVE o výkonu 2.28 kWp a ukládáním přebytků do baterií na všechny rodinné domy v České republice. Smyslem experimentu je zjistit, jak se instalace nejmenší možné dotované elektrárny podepíše na pokrytí celkové spotřeby domácností.

Počet FVE	Výkon FVE	Spotřeba
1 554 794	2.28 kWp	15 050.3 GWh

Tabulka 1: Vstupní data



Graf 3: Výsledky

Z výsledků je patrné, že pokud bychom na každý obydlený rodinný dům nainstalovali relativně malou FVE o výkonu 2.28 kWp, byli bychom schopni v jedné třetině roku pokrýt 40-50 % spotřeby všech domácností. Jelikož v rodinných domech bydlí cca 49 % obyvatelstva, byly by schopny tyto domy v jedné třetině roku pokrýt celou nebo alespoň většinovou část své vlastní spotřeby. V zimních měsících pokrytí klesá i pod 4 %, a to z důvodu horších světelných podmínek a vyšších nároku na množství el. energie v domácnostech.

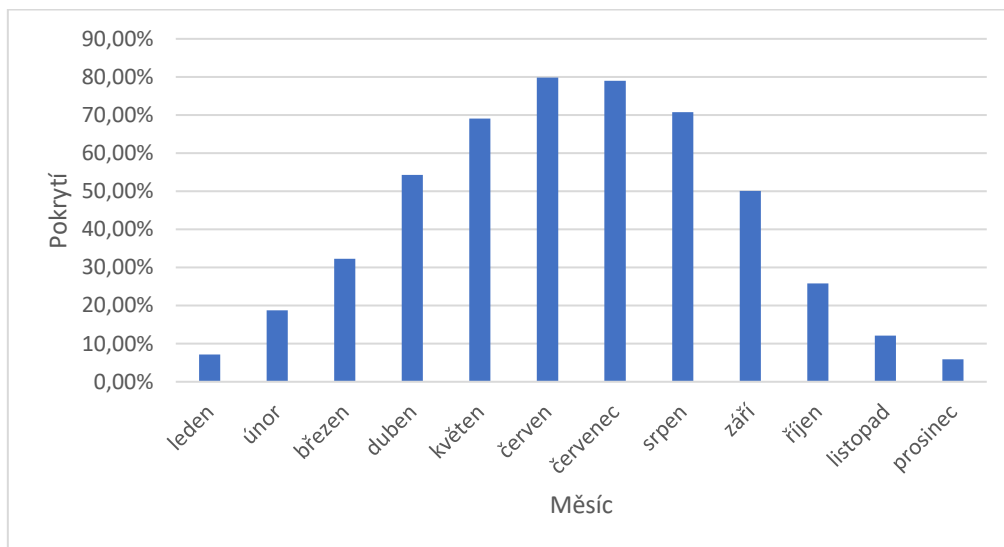
5.2.2. Experiment 2

V druhém experimentu přejdeme na další stupeň z nabídky firmy S-Power, na FVE o výkonu 3.65 kWp. Co se týče poměru cena/špičkový výkon, jedná se o nejvýhodnější nabídku této firmy.

¹¹ <https://www.novazelenausporam.cz/nabidka-dotaci/rodinne-domy-zdroje-energie/>

Počet FVE	Výkon FVE	Spotřeba
1 554 794	3.65 kWp	15 050.3 GWh

Tabulka 2: Vstupní data



Graf 4: Výsledky

Navýšení výkonu FVE o 60 % se přímou úměrou promítlo do pokrytí spotřeby. Rodinné domy by byly v polovině roku schopny pokrýt celou svou spotřebu. Ve čtyřech z těchto šesti měsíců by navíc přebytky dosahovaly 20-30 %. To v kontextu spotřeby všech domácností znamená pokrytí 70-80 % v jedné třetině roku. Ve dvou nejslabších měsících se pokrytí pohybuje kolem 6-7 %.

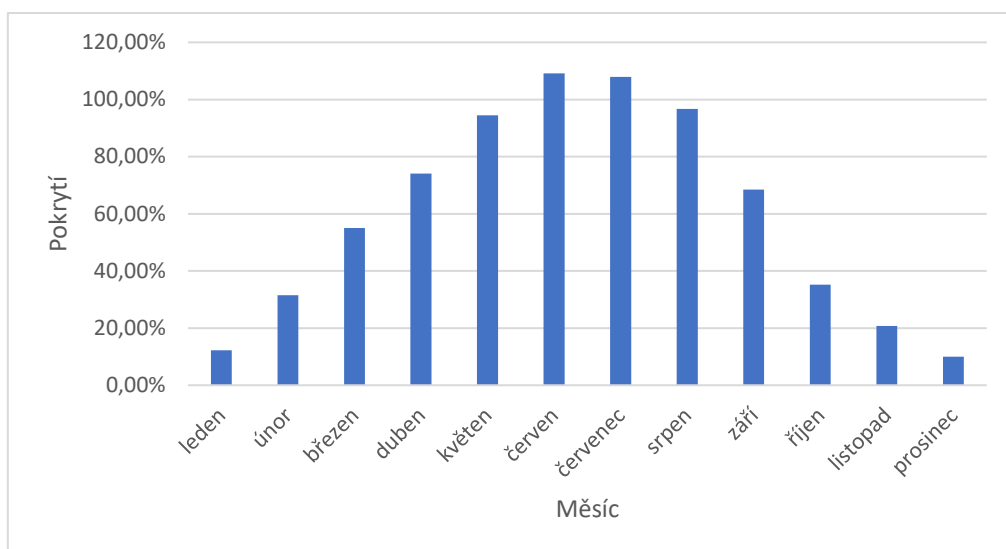
5.2.3. Experiment 3

Ve třetím experimentu se zaměříme na pokrytí spotřeby v zimních měsících. Bude nás zajímat, jak výkonné FVE by bylo třeba umístit na střechy rodinných domů, aby pokrytí spotřeby v průběhu roku nekleslo pod 10 %.

Počet FVE	Minimální pokrytí	Spotřeba
1 554 794	10 %	15 050.3 GWh

Tabulka 3: Vstupní data

Výkon FVE potřebný k dosažení minimálního pokrytí 10 % vychází 5.55 kWp. Pokrytí v jednotlivých měsících s takto výkonnými FVE vychází následovně:



Graf 5: Výsledky

Situace v zimních měsících vypadá příznivěji, kdy je nejmenší pokrytí v měsíci prosinec, a to stanovených 10 %. Na druhou stranu v letních měsících červen a červenec přesahuje výroba FVE spotřebu domácností až o 10 %.

5.2.4. Experiment 4

Předchozí experimenty ukázaly, že FVE rozmístěné na rodinných domech dokážou v příznivější polovině roku pokrýt významnou část spotřeby domácností. V zimních měsících je ovšem pokrytí relativně malé a padá k jednotkám procent. Pro dosažení vyššího pokrytí v těchto měsících je potřeba výrazně navýšit výkon elektrárny, což se v letních měsících projeví výrobou přesahující spotřebu domácností, viz. [Experiment 3](#). Jedním z faktorů, který malé pokrytí způsobuje, jsou špatné světelné podmínky. Tento faktor ovlivnit nedokážeme. Druhým faktorem je zvýšená spotřeba el. energie v zimních měsících. Tu přisuzujeme především vyšším nárokům na vytápění budov.

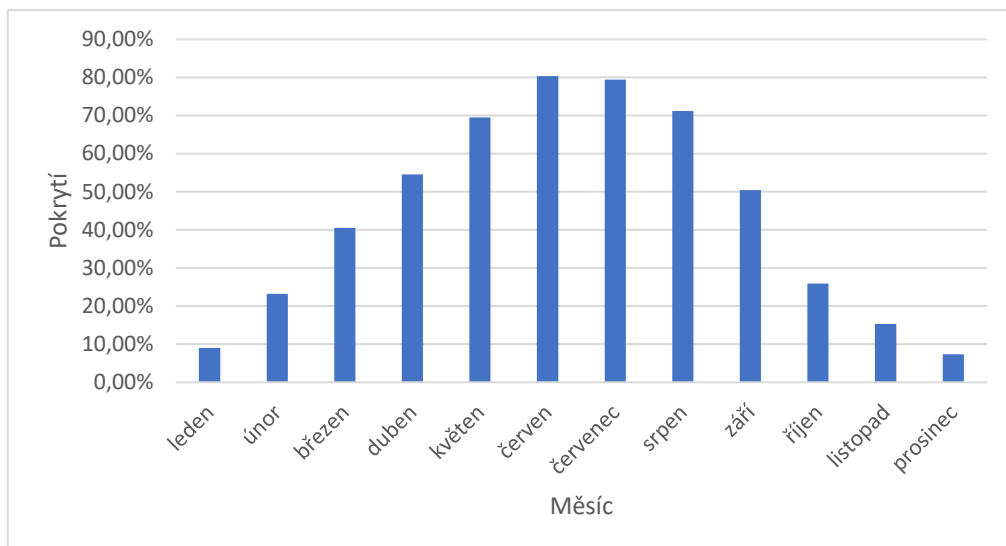
Vhodné zateplení budov dokáže snížit jejich tepelné ztráty až na jednu třetinu oproti původnímu stavu, a tím pádem i snížit nároky na vytápění¹². V tomto experimentu budeme uvažovat, že domácnosti udělaly patřičná opatření a snížily tak tepelné ztráty svých budov. Trend spotřeby domácností upravíme¹³ tak, že v chladnějších měsících (leden, únor, březen, listopad a prosinec) snížíme spotřebu o 20 %. Zároveň o takto ušetřenou energii snížíme spotřebu v roce 2018.

Počet FVE	Výkon FVE	Spotřeba
1 554 794	3.65 kWp	13 445.7 GWh

Tabulka 4: Vstupní data

¹² <https://www.nazeleno.cz/stavba/izolace-2/zatepleni-rodinneho-domu-kdy-se-vyplati.aspx>,
<https://www.isover.cz/aktuality/uspورا-za-vytapeni-v-cislech>

¹³ Soubor consumptionData_20.txt



Graf 6: Výsledky

Vyrovnanější trend spotřeby v průběhu roku se dle očekávání projevila pouze v zimních měsících, kde vidíme oproti Experimentu 2 nárůst pokrytí 1,5-8 %.

5.3. Závěry experimentů

Celkem byly provedeny 4 experimenty, ve kterých se postupně měnil výkon instalované fotovoltaické elektrárny. Ve všech experimentech je vidět velký kontrast v pokrytí spotřeby mezi zimním a letním ročním obdobím. Tento kontrast je možné ovlivnit pouze snížením spotřeby el. energie v zimním období, počet instalací ani výkon instalovaných FVE na něj nemá vliv. Z experimentů plyne, že pokrytí spotřeby roste úměrně s výkonem FVE a počtem jejich instalací.

6. Shrnutí simulačních experimentů a závěr

V rámci experimentů bylo zjištěno, že instalace fotovoltaických elektráren na střechy rodinných domů dává smysl i v měřítku pokrytí spotřeby všech domácností. I menší FVE o výkonu 2,28 kWp dokáže průměrně v jedné třetině roku pokrýt většinovou část spotřeby rodinného domu. V případě instalace větší FVE o výkonu 3.65 kWp na střechu každého rodinného domu v ČR se toto pokrytí zvýší na polovinu roku. V jedné třetině roku by pak takovýto počet instalovaných FVE měl přebytky ve výši 20-30 %, kterými by bylo možné pokrýt spotřebu odpovídajícího množství dalších domácností.

Instalace takového množství FVE by se neobešla bez nutnosti úpravy elektrizační soustavy. V letních měsících by FVE z našeho experimentu pokrývaly až 80 % spotřeby domácností, což by znamenalo až 20 % celkové spotřeby ČR. V elektrizační soustavě by proto musela existovat zařízení, která by dokázala kompenzovat výkyvy ve výrobě el. energie. Takovými zařízeními jsou například přečerpávací elektrárny, paroplynové elektrárny s rychlým náběhem nebo také strategicky rozmístěné bateriové akumulátory a další zařízení, která dokážou akumulovat a následně rychle uvolnit energii. Pokud by byla elektrizační soustava na velký objem energie vyrobené pomocí FVE dobře připravena, mohla by energie ze Slunce především v teplejší polovině roku odlehčit uhelným elektrárnám a některé dokonce na tuto část roku vyřadit z provozu. Tím by také došlo ke snížení emisí produkovaných těmito elektrárnami.

V zimním období jsou FVE limitovány krátkými světlými dny a vysokou oblačností. Pokrytí spotřeby v tomto období klesá až k jednotkám procent. Pokud tedy chceme co nejlépe zužít množství el. energie, která je v tomto období pomocí FVE vyrobena, a obecně lépe hospodařit s energií jako takovou, je dobré učinit opatření, která sníží tepelné ztráty domu/bytu. Toho je možné dosáhnout zateplením pomocí izolace, výměnou oken nebo například optimalizováním vytápění objektu.

7. Literatura

- [1] PERINGER, Petr a Martin HRUBÝ. Modelování a simulace [online]. 24. října 2019 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z:
<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>