

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav energetiky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

NÁVRH A PROVOZNÍ BILANCE

**FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY UMÍSTĚNÉ NA
STŘECHU RODINNÉHO DOMU**

**DESIGN AND OPERATION BALANCES OF
PHOTOVOLTAIC POWER PLANT SITUATED ON
THE ROOF OF A HOUSE**

Autor: Ondřej Červený

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

2017

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Broumově, dne 30. 5. 2017

.....
Ondřej Červený

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu docentu Ing. Tomáši Dlouhému, CSc., za odborné vedení a rady. A také rodině za psychickou a materiální podporu během studia.

Anotační list

Jméno autora:	Ondřej Červený
Název BP:	Návrh a provozní bilance fotovoltaické elektrárny umístěné na střechu rodinného domu
Anglický název:	Design and operation balances of photovoltaic power plant situated on the roof of a house
Akademický rok:	2016/2017
Ústav/obor:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 31 Počet obrázků: 6 Počet grafů: 4 Počet tabulek: 14
Klíčová slova:	Fotovoltaická elektrárna, globální záření, návratnost
Keywords:	Photovoltaic power plant, global radiation, recoverability
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá malými fotovoltaickými elektrárnami. V úvodu je zpracována rešerše na toto téma, kde najdeme informace o fotovoltaických panelech, systémech a možnostech finanční podpory na zřízení a provoz těchto elektráren. Ve druhé části je zpracovaný návrh takové elektrárny na střechu zvoleného objektu, včetně jeho ekonomické bilance.
Abstract:	This Bachelor's thesis focuses on small photovoltaic power plants. The thesis first offers a theoretical overview of the topic including details about solar panels and systems. It also explores the different types of provided financial support for construction and operation of the power plants. The second part presents a project of a solar power plant designated for rooftops and provides a basic financial analysis of the proposal.

Obsah

Seznam použitých symbolů	6
1. Úvod.....	7
2. Rešeršní část	8
2.1 Princip a původ fotovoltaiky.....	8
2.2 Typy FV článků	8
2.2.1 První generace.....	8
2.2.2 Druhá generace	9
2.2.3 Třetí generace	9
2.3 Přírodní podmínky	10
2.4 Fotovoltaické systémy	11
2.4.1 Systém připojený do sítě.....	11
2.4.2 Ostrovní systém	12
2.5 Podpora FV elektráren	13
2.5.1 Přímý výkup a zelený bonus.....	13
2.5.2 Nová zelená úsporám.....	14
3. Návrh FV elektrárny pro rodinný dům	16
3.1 Specifikace domu a domácnosti	16
3.2 Volba prvků FV elektrárny	17
3.3 Výpočet energetického potenciálu střechy	18
3.4 Zisk navržené elektrárny.....	25
3.4.1 Zisk pro vypočtený úhrn záření	25
3.4.2 Zisk pro alternativní úhrn záření.....	26
3.5 Porovnání výsledků.....	27
4. Závěr	29
Citovaná literatura.....	30

Seznam použitých symbolů

f	[Hz]	Frekvence
U	[V]	Napětí
E	[Wh]	Energie
S	[m ²]	Plocha
P _n	[Wp]	Nominální výkon fotovoltaického panelu
I	[W/m ²]	Intenzita slunečního záření
R	[km]	Vzdálenost Země od slunce
Z	[-]	Koeficient znečištění ovzduší
ξ	[-]	Součinitel závislý na výšce Slunce a nadmořské výšce
z	[m]	Nadmořská výška
δ	[°]	Deklinace slunce
ω	[°]	Hodinový úhel slunce
φ	[°]	Zeměpisná šířka
J	[W/m ²]	Insolace
J ₀	[W/m ²]	Insolace v solárním klimatu
t	[hod]	Čas
β	[°]	Úhel sklonu obecně položené plochy od vodorovné roviny
α	[°]	Azimutový úhel
J _p	[W/m ²]	Intenzita záření na obecně položenou plochu
A	[-]	Albedo
Q	[J/m ²]	Denní úhrn záření na obecně položenou plochu
v _r	[hod]	Využití instalovaného výkonu
W _r	[kWh]	Roční množství vyrobené energie
P _i	[kW]	Instalovaný výkon

1. Úvod

V minulých letech zažila fotovoltaika v České republice velký boom díky štědré státní podpoře v podobě přímého výkupu nebo zeleného bonusu. Tato podpora však v roce 2014 skončila a nově postavené elektrárny tedy tuto možnost podpory nemají. O rok později začal fungovat nový dotační program Nová zelená úsporám. Ten nabízí jednorázové dotace na podporu elektráren na obnovitelné zdroje.

Cílem této práce je navržení fotovoltaické elektrárny na reálný objekt – rodinný dům, při splnění podmínek pro udělení dotace. To zahrnuje vyhodnocení energetického potenciálu záření v dané lokalitě a následnou kalkulaci zisku a návratnosti celého projektu.

2. Rešeršní část

2.1 Princip a původ fotovoltaiky

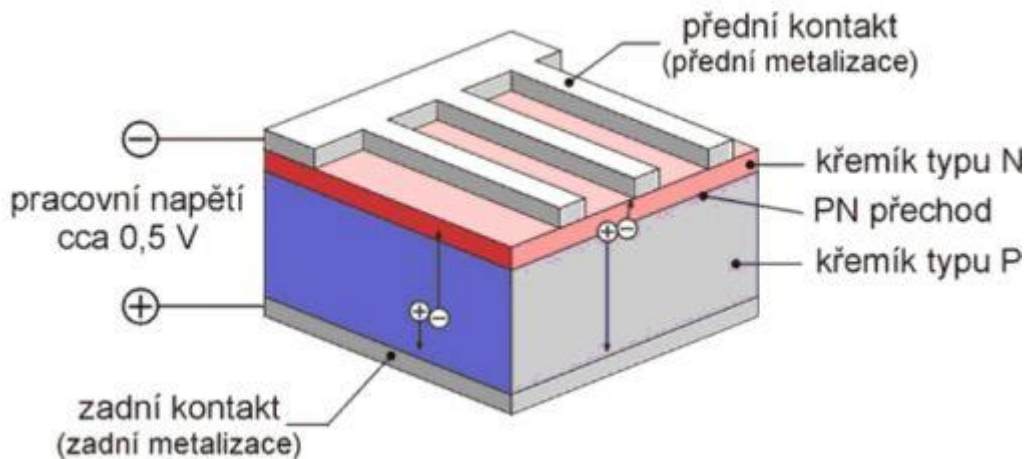
Fotovoltaika nám dovoluje měnit energii proudu fotonů (světla) přímo na elektrický proud. Děje se tak vzájemným působením dopadajícího slunečního záření a polovodiče solárního článku, přičemž dochází k uvolňování nosičů elektrických nábojů, které jsou pomocí kovových kontaktů odváděny. Vzniká tak stejnosměrná energie, kterou je možné přímo využít, ale častěji se pomocí invertoru transformuje na střídavou s frekvencí 50 Hz, která se používá ve standardní rozvodné síti.

Proces uvolňování nosičů náboje se nazývá fotoelektrický jev. Za jeho objevitele je považován francouzský fyzik Antoine César Becquerel. Fyzikálně byl popsán Albertem Einsteinem v roce 1905, za což mu později byla udělena Nobelova cena. Po druhé světové válce byla velkým impulsem pro rozvoj fotovoltaiky kosmonautika, kde se solární články začaly využívat jako zdroj energie pro družice. [1]

2.2 Typy FV článků

2.2.1 První generace

Dnes rozeznáváme tři generace solárních článků. Nejčastěji se setkáváme s první generací, což jsou monokrystalické a polykrystalické křemíkové články. Jejich nevýhodou je relativně malá účinnost 13 - 16 % pro polykrystalické a až 21 % pro monokrystalické a vysoká výrobní cena. Tyto články se skládají ze dvou rozdílně dotovaných křemíkových vrstev, kde horní, osvětlená vrstva je záporně dotovaná fosforem a spodní vrstva je kladně dotovaná bórem. Na každé straně článku jsou umístěny kovové elektrody, aby se mohl odebírat proud. [1] [2] Schéma článku znázorňuje obr. 1.



Obr. 1: Řez polovodičem fotovoltaického článku [1]

2.2.2 Druhá generace

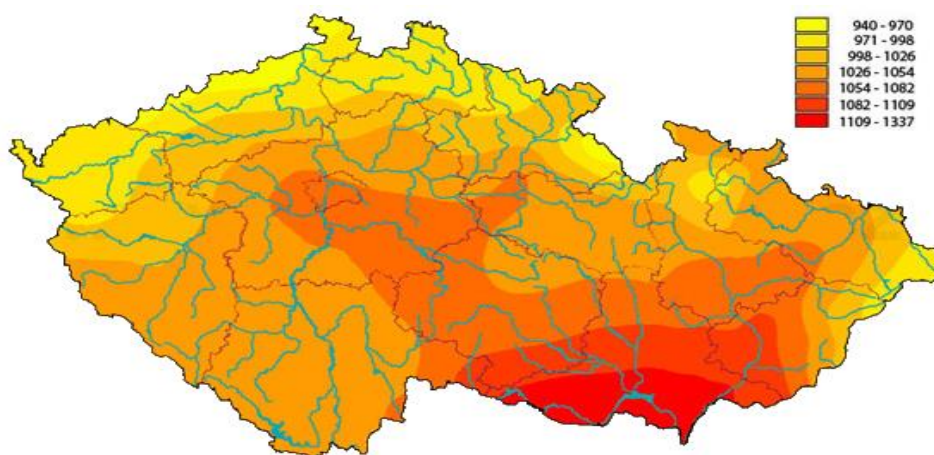
Články druhé generace, dostupné v komerční sféře, mají zatím nižší účinnost než články generace první, ale jejich pořizovací cena je zato nižší. Vyznačují se 100-1000 krát tenčí polovodičovou vrstvou, což má právě za příčinu menší spotřebu materiálu a tedy nižší cenu. Dalšími výhodami oproti první generaci je menší citlivost na teplotu a zastínění a také lepší využití difuzní složky záření. Také možnost průhlednosti materiálu, čehož se dá využít pro instalaci na okna budov. Užívají se především články z mikrokrytalického nebo amorfního křemíku. Tenké vrstvy nejsou samonosné, a proto je třeba je nanášet na vhodný podkladový materiál. Tím může být sklo, plast, kovová folie. Vrchní stranu článku tvoří transparentní vodivý oxid, který slouží pro odvádění proudu a také jako antireflexní vrstva. Jejich účinnost je 6-10 %. [3]

2.2.3 Třetí generace

Mezi třetí generaci se řadí články vícevrstvé a koncentrátorové. Vícevrstvé maximalizují energetickou využitelnost pomocí substruktur (vrstev), kdy každá zachycuje určitou část spektra záření a zbytek propouští do vrstev nižších. Koncentrátorové články zvyšují produktivitu klasických drahých článků tak, že zvyšují intenzitu dopadajícího světla pomocí zrcadel a čoček. [4]

2.3 Přírodní podmínky

Na celkové množství dopadající energie má vliv zejména zeměpisná poloha, nadmořská výška, doba slunečního svitu a čistota ovzduší v dané lokalitě. V české republice se celková doba slunečního svitu pohybuje mezi 1400 a 1700 hodin za rok. Pro výpočet energetické bilance FVE je velmi důležitý údaj o sumě globálního slunečního záření, což je energie, která dopadne na metr čtverečný vodorovné plochy za danou dobu. Při konkrétním výpočtu je třeba ještě počítat s nastaveným sklonem panelů. Pro Českou republiku je ideální sklon přibližně 35° a orientace na jih. [5] [6] Úhrn záření v ČR a vliv orientace plochy zobrazuje obr. 2 a graf 1.

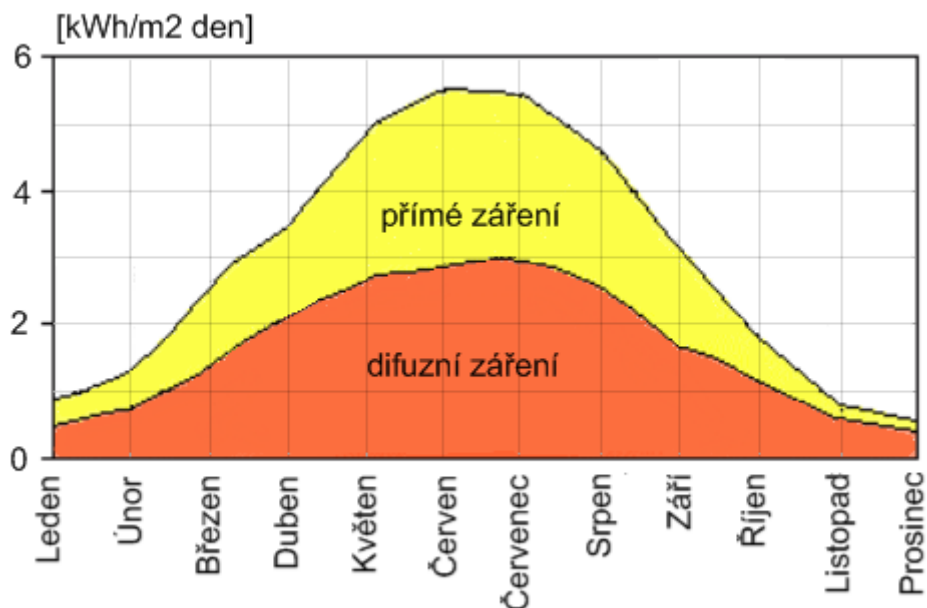


Obr. 2: Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR [kWh/m²] [5]



Graf 1: Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci FV panelu [6]

Část záření dopadající ze směru od slunce a vytvářející stíny se nazývá přímé záření. Průchodem atmosférou se však část záření rozptyluje a odráží od prachových částic. Takové záření pak nazýváme difuzní. Jejich poměr je závislý na klimatických a geografických podmínkách. V létě je tento poměr cca 1:1. V zimě pak podstatně narůstá podíl difuzního záření. Z hlediska výtěžnosti platí, že první generace fotovoltaických panelů potřebuje přímé záření pro maximální výtěžnost. Vícevrstvé články dokáží dobře zužitkovat i difuzní záření a dokáží tak lépe zásobovat energií i v zimním období. [8]



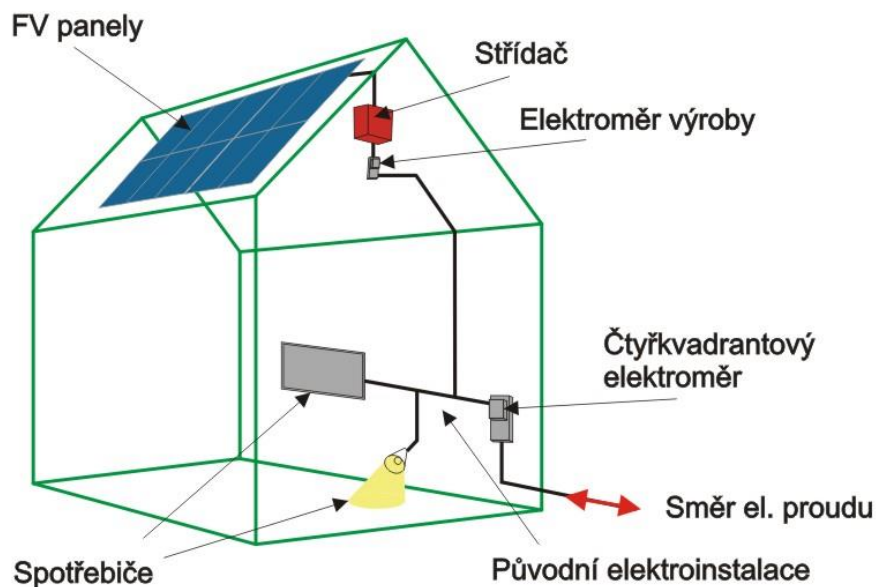
Graf 2: Přímé vs. difuzní záření v podmínkách ČR [8]

2.4 Fotovoltaické systémy

2.4.1 Systém připojený do sítě

Tento systém, nazývaný též on-grid může pracovat ve dvou režimech. Buď odvádí veškerou vyrobenou energii do rozvodné sítě, nebo ji sám spotřebovává a prodávají se pouze přebytky. Nevýhodou tohoto systému je potřeba měniče napětí, protože fotovoltaické panely dodávají stejnosměrný proud. Ten je třeba pro distribuci do sítě převést na normalizované střídavé napětí 230 V/50 Hz a při této transformaci dochází k nežádoucím ztrátám. [7] Základními prvky tohoto systému jsou:

- FV panely
- měnič napětí
- elektroměr vyrobené energie
- kabeláž

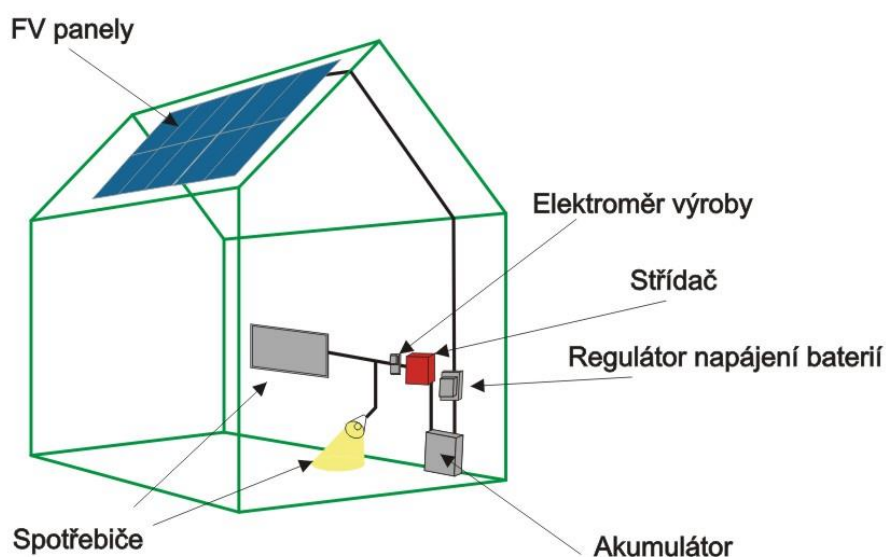


Obr.3: Systém připojený k síti [7]

2.4.2 Ostrovní systém

Tento systém, nazývaný též off-grid, se využívá tam, kde není k dispozici připojení k distribuční síti nebo tam, kde by finanční náklady na zřízení elektrické přípojky byly příliš vysoké. Veškerá vyrobená energie se tedy spotřebuje přímo v objektu. Energie se ukládá do akumulátorů, kdy jejich stav kontroluje regulátor, který v případě rizika přebití odpojí akumulátor od solárních panelů, a naopak v případě přílišného vybití odpojí spotřebiče. Tento systém se dá doplnit plynovým či benzinovým agregátem nebo dalším obnovitelným zdrojem energie, tedy vodní či větrnou elektrárnou. Takto doplněný systém se pak nazývá hybridní. [7] Základními prvky tohoto systému jsou:

- FV panely
- regulátor nabíjení
- akumulátory
- měnič pro připojení spotřebičů požadujících 230 V



Obr. 4: Ostrovní systém [7]

2.5 Podpora FV elektráren

2.5.1 Přímý výkup a zelený bonus

Zelený bonus je jednou z forem podpory obnovitelných zdrojů energie. Další je výkup vyrobené elektřiny za garantované výkupní ceny. Zelený bonus je částka vyplácená za vyrobenou kWh energie, přičemž vyrobenou energii si majitel elektrárny může sám spotřebovat. Nespotřebovanou energii lze volně prodat a tato částka se přičte k zelenému bonusu. Nevýhodou zde je nejistota prodeje této přebytečné energie, neboť na rozdíl od přímého výkupu, zde nemá žádný distributor povinnost od nás energii koupit a může se tedy stát, že ne vždy se nám podaří veškerou přebytečnou energii na trhu prodat. V případě přímého výkupu prodáváme veškerou vyrobenou elektřinu dodavateli. Mezi oběma způsoby podpory lze jednou do roka přecházet.

Tyto dotace se řídí zákonem č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie. Výši zeleného bonusu a garantované výkupní ceny v Kč/MWh každý rok upravuje a zveřejňuje Energetický regulační úřad, a to pro jednotlivé druhy obnovitelných zdrojů, kterými kromě solární energie může být například energie větrná, vodní, geotermální či energie získaná z biomasy nebo bioplynu. [9] [10]

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výroby [kW]		Jednotarifní pásmo provozování	
		od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
		a	b	c	d		
501	Výroba elektřiny využitím slunečního záření	1.1.2006	31.12.2007	-	-	16 518	15 918
502		1.1.2008	31.12.2008	-	-	16 110	15 510
503		1.1.2009	31.12.2009	0	30	15 115	14 415
504		1.1.2009	31.12.2009	30	-	15 004	14 404
505		1.1.2010	31.12.2010	0	30	14 077	13 377
506		1.1.2010	31.12.2010	30	-	13 966	13 366
507		1.1.2011	31.12.2011	0	30	8 446	7 746
508		1.1.2011	31.12.2011	30	100	6 647	6 047
509		1.1.2011	31.12.2011	100	-	6 194	5 594
510		1.1.2012	31.12.2012	0	30	6 802	6 102
511		1.1.2013	30.6.2013	0	5	3 691	2 991
512		1.1.2013	30.6.2013	5	30	3 064	2 364
513		1.7.2013	31.12.2013	0	5	3 236	2 536
514		1.7.2013	31.12.2013	5	30	2 632	1 932

Obr. 5: Výše výkupních cen a zelených bonusů pro rok 2017 [11]

2.5.2 Nová zelená úsporám

Od 22. října 2015 lze podávat žádosti o dotace v dotačním programu Nová zelená úsporám. Ten podporuje mimo jiné instalace fotovoltaických systémů do rodinných domů. To jak do již dokončených budov, tak do novostaveb. V následující tabulce jsou uvedeny výše podpory dle druhu systému využití vyrobené energie.

Tab. 1: Podporované typy systémů

Podoblast podpory	Typ systému	Výše podpory [Kč]
C.3.3	Solární FV systém pro přípravu teplé vody s přímým ohřevem	35 000
C.3.4	Solární FV systém bez akumulace elektrické energie s tepelným využitím přebytků a celkovým využitelným ziskem ≥ 1700 kWh/rok	55 000
C.3.5	Solární FV systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem ≥ 1700 kWh/rok	70 000
C.3.6	Solární FV systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem ≥ 3000 kWh/rok	100 000

Všechny vyčtené FV systémy, které mohou získat podporu, musí splňovat následující:

- Instalovaný výkon FVE nepřesáhne 10 kWp
- Minimální účinnost panelů je 10 % pro tenkovrstvé a 15 % pro mono a polykrystalické
- FVE bude umístěna na domě, nikoli například na zahradě

Dále pro podoblast C.3.3 platí:

- FVE musí být optimalizována v závislosti na zátěži (MPP trackerem například)
- Systém nesmí být propojen s distribuční sítí
- Fotovoltaika musí pokrývat alespoň 50 % celkového potřebného tepla k ohřevu vody
- Na každý instalovaný kWp musí být zásobník o objemu alespoň 80 litrů

Pro zbylé tři podoblasti platí:

- 70 % vyrobené energie se musí využít k pokrytí spotřeby přímo v domě, na který je podpora vypsána, takže maximálně 30 % může přetéct do sítě
- FVE je připojena do distribuční sítě, a to až po 1.1.2016
- Měnič napětí musí mít účinnost alespoň 94 % a MPP tracker alespoň 98 %
- Na každý instalovaný kWp musí být zásobník o objemu alespoň 80 litrů (C.3.4) nebo baterie o kapacitě 1,75 kWh (C.3.5; C.3.6)

Fotovoltaické elektrárny s výkonem do 10 kWp jsou navíc zvýhodněné tím, že k jejich provozu není potřeba licence ani živnostenský list, což má samovýrobcům zjednodušit prodej přetoků. [12] [13]

3. Návrh FV elektrárny pro rodinný dům

3.1 Specifikace domu a domácnosti

Dům, pro který budu navrhovat fotovoltaickou elektrárnu, se nachází ve východních Čechách ve městě Broumov. Dům má tři podlaží a v každém z nich funguje jedna domácnost. Já pro své výpočty budu uvažovat, že vyrobenou elektřinu bude využívat pouze jedna z těchto domácností. Spotřeba elektrické energie této domácnosti je shrnuta v tabulce 2.

Tab. 2: Spotřeba el. energie modelové domácnosti v jednotlivých měsících v roce 2016

	Energie [kWh]	Cena [Kč]
Leden	360	1 140
Únor	435	1 275
Březen	408	1 183
Duben	366	1 072
Květen	383	1 090
Červen	441	1 295
Červenec	447	1 332
Srpen	461	1 339
Září	361	1 052
Říjen	325	963
Listopad	381	1 155
Prosinec	463	1 234
Σ	4 831	14 130

Pro výpočet jsem pomocí kompasu změřil azimutový úhel α_N plochy střechy (neboli odklon čela domu od jižního směru) a stanovil ho na -35° . Dále jsem z výkresové dokumentace střechy zjistil úhel β sklonu od vodorovné plochy a ten je roven $11,25^\circ$. Z dokumentace jsem také určil plochu, která by se dala využít pro umístění fotovoltaických panelů na přibližně 33 m^2 .



Obr. 6: Dům pro navrhovanou elektrárnu

3.2 Volba prvků FV elektrárny

Z důvodu nutnosti baterií k získání dotace a jejich vysokým pořizovacím cenám jsem výpočet provedl pro dvě různé varianty, dle kapacit dvou zvolených baterií. Jedna varianta bude v dotační podoblasti C.3.5 a druhá v podoblasti C.3.6 (viz. tab. 1).

První uvažovaná varianta má baterii o kapacitě 6,7 kWh. Jedná se o baterii BMZ ESS 3.0, která se nabíjí napětím 48 voltů. Z kapacity jsem určil maximální instalovaný výkon, tak aby odpovídal požadavku pro udělení dotace, na 3,8 kWp. Dále jsem podle nabíjecího napětí a maximálního instalovaného výkonu vybral měnič Infisolar 3K Plus.

Druhá varianta má baterii o kapacitě 2,6 kWh. Jedná se o baterii BMZ ESS 1.0 s nabíjecím napětím 24 voltů. Obdobně jako u první varianty jsem určil maximální instalovaný výkon elektrárny na 1,5 kWp a vybral adekvátní měnič. V tomto případě Victron MultiPlus 24.

Pro obě varianty jsem zvolil stejný panel BENQ AUO POLY s 260 Wp. Z maximálního instalovaného výkonu a maximálního výkonu jednoho panelu lze snadno spočítat potřebný počet panelů. Pro první variantu je to 14 a pro druhou 5.

3.3 Výpočet energetického potenciálu střechy

Následuje výpočet sumy globálního záření na plochu (střechu) definovaných parametrů. K výpočtu jsem použil vzorce z [14].

Vztah pro intenzitu slunečního záření na horní hranici atmosféry:

$$I_0 = I_* \frac{R_0^2}{R^2} \quad (1)$$

Kde:

I_* je solární konstanta; $I_* = 1367 \frac{W}{m^2}$

R_0 je střední vzdálenost Země od Slunce; $R_0 = 149,6 \cdot 10^6 km$

R je okamžitá vzdálenost Země od Slunce [km]

Tab. 3: Vzdálenosti země od slunce v 15. den jednotlivých měsíců

	R [km]
Leden	147 600 000
Únor	147 800 000
Březen	148 900 000
Duben	150 200 000
Květen	151 300 000
Červen	152 000 000
Červenec	152 100 000
Srpen	151 500 000
Září	150 400 000
Říjen	149 100 000
Listopad	147 900 000
Prosinec	147 200 000

Vztah pro intenzitu přímého slunečního záření na zemském povrchu na jednotkovou plochu kolmou ke slunečním paprskům:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-Z}{\xi}\right) \quad (2)$$

Kde:

Z je koeficient znečištění ovzduší

ξ je součinitel závisující na výšce Slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa

Tab. 4: Hodnoty koeficientu znečištění ovzduší pro jednotlivé měsíce [14]

	Koeficient Z
Leden	2,3
Únor	2,4
Březen	2,6
Duben	3
Květen	3,3
Červen	3,5
Červenec	3,6
Srpen	3,4
Září	3
Říjen	2,7
Listopad	2,4
Prosinec	2,3

Vztah pro součinitel ξ podle Heidla a Kocha:

$$\xi = \frac{9,38076 \cdot (\sin \alpha_s + \sqrt{0,003 + \sin^2 \alpha_s})}{2,0015 \cdot (1 - z \cdot 10^{-4})} + 0,91018 \quad (3)$$

Kde:

α_s je úhlová výška slunce nad ideálním geometrickým obzorem [°]

z je nadmořská výška daného místa zadaná v metrech; $z = 370m$

Vztah pro výšku slunce nad obzorem:

$$\sin \alpha_s = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (4)$$

Kde:

δ je deklinace slunce [°]

φ je zeměpisná šířka [°]

ω je hodinový úhel slunce [°]

Vztah pro insolaci:

$$J = I \cdot \sin \alpha_s \quad (5)$$

Vztah pro insolaci v solárním klimatu (bez vlivu zemské atmosféry):

$$J_0 = I_* \frac{R_0^2}{R^2} (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \sigma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega) \quad (6)$$

Vztah pro hodinový úhel v závislosti na čase:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} t \quad (7)$$

Kde:

t je čas, který je v okamžiku kulminace roven nule, před kulminací záporný a po kulminaci kladný

τ je doba 24 hodin vyjádřená ve stejných jednotkách jako t

Sluneční deklinace pro libovolný den v roce:

$$\delta = 23,45^\circ \sin(\varepsilon - 109^\circ) \quad (8)$$

Úhel určující pořadí daného dne v roce:

$$\varepsilon = 0,98^\circ D + 29,7^\circ M \quad (9)$$

Kde:

D je den v měsíci

M je měsíc v roce (leden=1)

Úhel dopadu slunečních paprsků:

$$\cos \vartheta = \sin \alpha_s \cdot \cos \beta + \cos \alpha_s \cdot \sin \beta \cdot \cos(\alpha - \alpha_N) \quad (10)$$

Kde:

β je úhel sklonu obecně položené osluněné plochy od vodorovné roviny [°]

α je azimutový úhel Slunce měřený stejně jako hodinový úhel Slunce [°]

α_N je azimutový úhel normály obecně položené osluněné plochy měřený stejně jako hodinový úhel Slunce [°]

Vztah pro azimutový úhel slunce:

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta}{\cos \alpha_s} \sin \omega \quad (11)$$

Intenzita přímého slunečního záření na obecně položenou plochu:

$$J_p = I \cdot \cos \vartheta \quad (12)$$

Přibližný vztah pro intenzitu difuzního záření na obecně položenou plochu na zemském povrchu:

$$J_{pdif} = \frac{1}{2} [(1 + \cos \beta) \cdot J_{dif} + A(1 - \cos \beta) \cdot (J + J_{dif})] \quad (13)$$

Kde:

J_{dif} je intenzita rozptýleného slunečního záření na horizontálním zemském povrchu [W/m²]

A je albedo, reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky, většinou A = 0,2

Vztah pro intenzitu rozptýleného slunečního záření na horizontálním zemském povrchu:

$$J_{dif} = 0,33 \cdot (I_0 - I) \cdot \sin \alpha_s \quad (14)$$

Denní úhrn přímého záření na obecně položenou plochu na zemském povrchu:

$$Q_{PO} = \int_{t_1}^{t_2} J_P dt \quad (15)$$

Kde:

t_1 je doba východu slunce

t_2 je doba západu slunce

Denní úhrn difuzního slunečního záření na obecně položenou plochu na zemském povrchu:

$$Q_{Pdif} = \int_{t_1}^{t_2} J_{Pdif} dt \quad (16)$$

Tab. 5: Časy východů a západů slunce v Broumově pro 15. den daného měsíce v roce 2017 [15]

	Východ slunce	Západ slunce
Leden	8:00	16:30
Únor	7:00	17:15
Březen	6:00	18:00
Duben	6:00	20:00
Květen	5:00	20:30
Červen	4:30	21:00
Červenec	5:00	21:00
Srpen	5:45	20:15
Září	6:30	19:00
Říjen	7:15	18:00
Listopad	7:00	16:00
Prosinec	8:00	16:00

Celkový denní úhrn globálního slunečního záření na obecně položenou plochu na zemském povrchu:

$$Q_{GP} = \bar{\tau} \cdot Q_{PO} + (1 - \bar{\tau}) \cdot Q_{Pdif} \quad (17)$$

Kde:

$\bar{\tau}$ je relativní doba trvání slunečního svitu během uvažovaného dne

Relativní doba trvání slunečního svitu během uvažovaného dne:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} \quad (18)$$

Kde:

τ_{skut} skutečná doba slunečního svitu během uvažovaného dne

τ_{teor} teoretická doba slunečního svitu během uvažovaného dne

Tab. 6: Průměrné měsíční sumy slunečního svitu v Hradci Králové v letech 1971-80 [hod] [14]

	Suma slunečního svitu [hod]
Leden	31
Únor	61
Březen	120
Duben	149
Květen	217
Červen	206
Červenec	192
Srpen	211
Září	153
Říjen	107
Listopad	45
Prosinec	29

Dosažením do rovnic 15 a 16 a jejich integrací, kterou jsem provedl v programu Matlab, získáme následující hodnoty:

Tab. 7: Denní úhrny záření na definovanou plochu pro 15. den daného měsíce [kWh/m²]

	Přímé záření	Difuzní záření
Leden	1,94	0,40
Únor	3,10	0,57
Březen	4,62	0,80
Duben	6,00	1,04
Květen	7,04	1,31
Červen	7,47	1,46
Červenec	7,00	1,41
Srpen	6,14	1,20
Září	4,95	0,94
Říjen	3,41	0,67
Listopad	2,30	0,46
Prosinec	1,63	0,36

Dále z rovnice 17 vypočteme denní úhrny globálního záření a jejich vynásobením počtem dnů v příslušném měsíci pak získáme měsíční úhrny, které jsou shrnuty v tabulce 8.

Tab. 8: Měsíční sumy globálního záření na definovanou plochu [kWh/m²]

	Globální záření
Leden	18,35
Únor	31,01
Březen	63,00
Duben	83,99
Květen	120,83
Červen	117,96
Červenec	110,79
Srpen	109,09
Září	77,28
Říjen	48,04
Listopad	23,00
Prosinec	15,76
Σ	819,10

3.4 Zisk navržené elektrárny

Nyní již lze z vypočtených hodnot a parametrů FV systému snadno vypočítat energii, kterou elektrárna ročně dodá domácnosti a následně ze známé spotřeby elektřiny domácnosti (tab. 2) zjistit, kolik korun nám FV elektrárna ušetřila.

Pro určení návratnosti projektu je ještě třeba určit pořizovací cenu celé elektrárny. Tu jsem určil jako součet cen panelů, baterie a měniče. Dále jsem z cen vzorových projektů [16] odhadnul cenu za instalaci, dopravu, administrativu a kabeláž. Viz. následující tabulka:

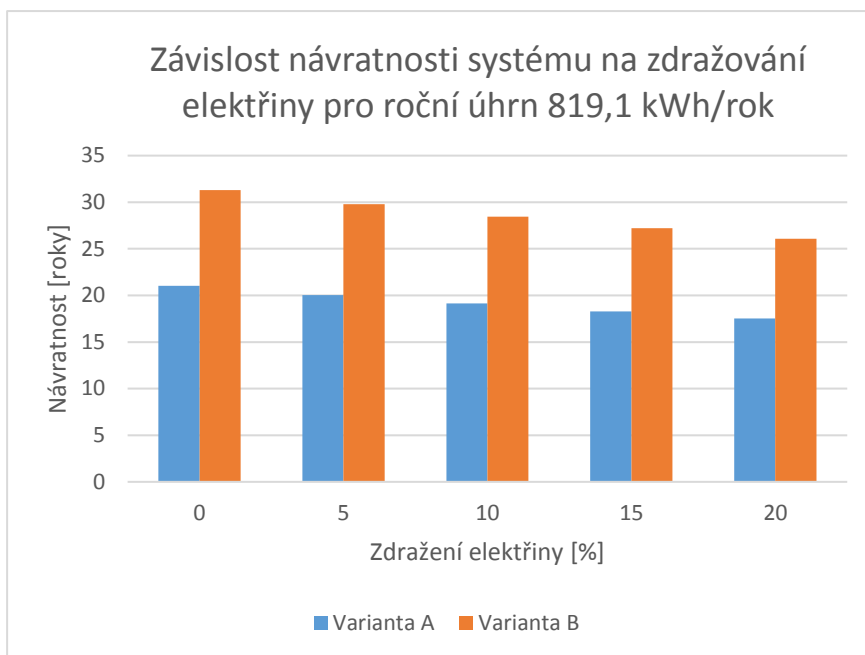
Tab. 9: Kalkulace pořizovacích nákladů [Kč]

	Varianta A	Varianta B
Panely	69 860	24 950
Měnič a řízení	39 900	43 590
Baterie	113 290	48 850
Kabeláž	5 000	4 000
Práce a doprava	24 000	19 000
Projekt, administrativa	20 000	20 000
Dotace	100 000	70 000
Náklady na pořízení	172 050	91 390

3.4.1 Zisk pro vypočtený úhrn záření

Tab. 10: Roční zisk navržené FV elektrárny pro roční úhrn záření 819,1 kWh/m²

	Varianta A	Varianta B
Instalovaná plocha [m ²]	22,56	8,06
Účinnost panelů [%]	16,10	16,10
Vyrobená energie [kWh/rok]	2 974,56	1 062,34
Účinnost měniče [%]	94	94
Výsledná využitelná energie [kWh/rok]	2 796,09	998,60
Ušetřené výdaje za elektřinu [kč/rok]	8 178	2 921



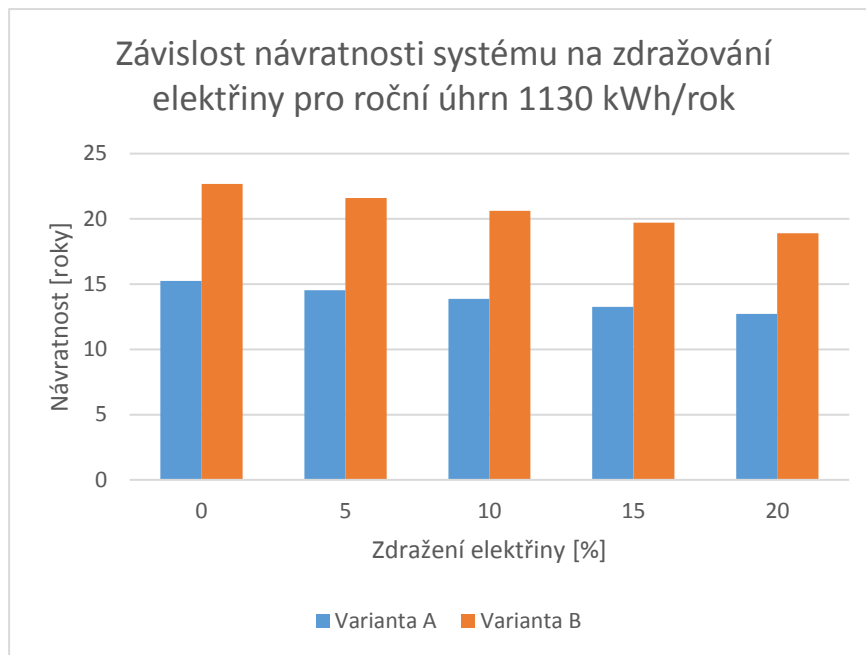
Graf 3: Návratnost v závislosti na zdražování elektřiny pro roční úhrn záření 819,1 kWh/rok

3.4.2 Zisk pro alternativní úhrn záření

Kdybych pro výpočet použil data získaná ze systému PVGIS, což je výpočetní model, který vytvořilo výzkumné centrum Evropské komise, výsledek by se poměrně výrazně lišil. PVGIS je určený právě pro fotovoltaické účely a lze podle něj kalkulovat výrobu elektřiny kdekoliv v Evropě a Africe. Využívá data z pozemních meteostanic a satelitních měření. Podle PVGIS je roční suma záření na stejnou plochu rovna 1 130 kWh/m², což je o 27,5 % vyšší hodnota než hodnota vypočtená. Výsledky pro tuto hodnotu shrnuje následující tabulka:

Tab. 11: Roční zisk navržené FV elektrárny pro roční úhrn záření 1 130 kWh/m²

	Varianta A	Varianta B
Instalovaná plocha [m ²]	22,56	8,06
Účinnost panelů [%]	16,10	16,10
Vyrobená energie [kWh/rok]	4 104,34	1 466,36
Účinnost měniče [%]	94	94
Výsledná využitelná energie [kWh/rok]	3 858,08	1 378,37
Ušetřené výdaje za elektřinu [kč/rok]	11 830	4 030



Graf 4: Návratnost v závislosti na zdražování elektřiny pro roční úhrn záření 1130 kWh/rok

3.5 Porovnání výsledků

Vydělením pořizovacích nákladů ušetřenými výdaji určíme návratnost pro jednotlivé varianty.

Tab. 12: Návratnost a porovnání výsledků

	Varianta A		Varianta B	
	Suma záření [kWh/rok]	819,1	1 130	819,1
Pořizovací náklady [Kč]	172 050		91 390	
Ušetřené výdaje za elektřinu [kč/rok]	8 178	11 830	2 921	4 030
Návratnost [roky]	21	15	31	23

Pro výpočet sumy záření bylo použito několika koeficientů (např. koeficient čistoty ovzduší) a doba slunečního svitu, která nebyla přesně daná pro uvažovanou lokalitu, což mohlo způsobit nepřesnost výsledku. Spočítal jsem tedy roční využití instalovaného výkonu a porovnal ho s celorepublikovými daty pro fotovoltaické elektrárny do 10 kWh z Ročních zpráv o provozu ES od Energetického regulačního úřadu, která jsou shrnuta v tabulce 13.

Tab. 13: Celorepubliková data pro FVE do 10 kWh instalovaného výkonu [17]

	Instalovaný výkon [MW]	Výroba elektřiny [MWh]	Využití instalovaného výkonu [hod]
2014	94,00	91 105,70	969,21
2015	94,70	96 328,60	1017,20
2016	94,20	91 097,10	967,06
Průměr	94,30	92 843,80	984,56

Vztah pro využití instalovaného výkonu:

$$v_r = \frac{W_r}{P_i} \quad (19)$$

Kde:

W_r je roční množství vyrobené energie [kWh]

P_i je instalovaný výkon [kW]

Získané hodnoty pro jednotlivé zdroje dat jsou v následující tabulce:

Tab. 14: Využití instalovaného výkonu

Zdroj dat	ERÚ	PVGIS	Výpočet
v_r [hod]	984,56	1128,39	817,17

Je vidět, že se výsledky z výpočtu a PVGIS liší od celorepublikového průměru. Hodnoty z výpočtu o 17 % a hodnoty z PVGIS o 15 %. Označil bych tedy výsledky z výpočtu za poměrně pesimistické a výsledky z PVGIS za mírně optimistické. To odpovídá i mapě ročních úhrnů na obr. 2, jestliže bych zanedbal sklon střechy. Vzhledem k tomu, že tento sklon je poměrně malý, pouze 11°, tak bych se jeho zanedbáním nemusel dopustit nějak velké chyby.

4. Závěr

Úkolem této práce bylo navrhnout a bilancovat fotovoltaickou elektrárnu na střechu rodinného domu. V prvním kroku jsem zvolil jednotlivé prvky systému a určil investiční náklady na zřízení elektrárny. Zde jsem se z důvodu vysokých cen baterií rozhodl rozdělit úlohy na dvě různé varianty, podle kapacit dvou různých baterií.

Dále bylo třeba určit energetický potenciál střechy domu. To jsem provedl nejdříve výpočtem a poté také pomocí k tomu určeného softwaru. Oba výsledky se poměrně liší a jak jsem posléze zjistil pomocí výpočtu využití instalovaného výkonu, republikový průměr je přibližně na průměru těchto dvou hodnot.

V dalším kroku jsem již se znalostí spotřeby elektrické energie domácnosti určil návratnost celého projektu. Ukázalo se, že kratší dobu návratnosti má dražší a větší varianta. Její návratnost jsem určil na 15 až 21 let, dle získaných sum záření. Pro druhou, menší variantu se návratnost pohybuje mezi 21 a 31 lety. Doba návratnosti by se dále zkracovala při budoucím zdražování elektřiny a v neoptimističtějším případě bych se tedy mohl dostat i pod 15 let.

S životností panelů alespoň 20 let by se tedy investice měla vrátit a začít generovat zisk. Je pak už na uvážení investora, jak dlouho je ochotný na návrat investice čekat. Rodinný dům a domácnost, pro které jsem fotovoltaickou elektrárnu v této práci navrhoval, je dům a domácnost, kde žiji a o zřízení takové elektrárny bych skutečně do budoucna uvažoval. Očekával jsem ovšem, že návratnost celého projektu se bude pohybovat okolo deseti let, což je doba, které jsem se ve výpočtech pouze přiblížil, a to jen v krajně optimistickém případě. Já bych tedy na základě této práce od zřízení takové elektrárny spíše upustil.

Citovaná literatura

- [1] *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [2] *NÁVRH SYSTÉMU FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ PRO RODINNÝ DŮM*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ PĚCHA.
- [3] *Fotovoltaické systémy* [online]. 2011 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf
- [4] *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [5] *České republiky* [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.elektrozestřechy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [6] *Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů* [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [7] *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [8] *Teorie fotovoltaiky* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.elektrozestřechy.cz/fotovoltaika.aspx>
- [9] *Zelený bonus* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/zeleny-bonus.dic>
- [10] *Zelený bonus* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/zeleny-bonus>
- [11] *Výše výkupních cen a zelených bonusů* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.joyce-energie.cz/aktuality/eru-vydal-cenove-rozhodnuti-pro-rok-2017.html>
- [12] *Nová Zelená Úsporám 2016* [online]. 2016 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.sunwave.cz/legislativa00>
- [13] *Příspěvek na fotovoltaiku pro rodinné domy v Nové zelené úsporám* [online]. 2015 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/zelena-usporam-na-tzb-info/13476-prispevek-na-fotovoltaiku-pro-rodinne-domy-v-nove-zelene-usporam>
- [14] *METODY HODNOCENÍ VHODNOSTI A VÝTĚŽNOSTI OZE*. In: *Ekowatt* [online]. 2000 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://ekowatt.cz/upload/185e8ebf18feb4362c73f87f56e58606/97Metodika_oze_doplнена.pdf

- [15] *Meteogram* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/>
- [16] *Ceny vzorových projektů* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.solarnivyroba.cz/ceny-vzorovych-projektu>
- [17] *Roční zprávy o provozu* [online]. 2015 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/elektrina/statistika-a-sledovani-kvality/rocni-zpravy-o-provozu>