

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**HODNOCENÍ PROVOZU MALÝCH  
FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN  
S PŘIPOJENÍM DO SÍTĚ NN**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JAROSLAV ČERNÝ**

**BRNO 2010**

>>Vložit zadání práce<<

>>Vložit licenční smlouvu<<

Bibliografická citace práce:

ČERNÝ, J. Hodnocení provozu malých fotovoltaických elektráren s připojením do sítě nn. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2010, 58 stran.

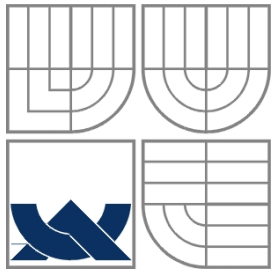
## Poděkování

Rád bych poděkoval své vedoucí Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval svým spolupracovníkům za mnoho konstruktivních komentářů k mojí práci.

Nakonec bych chtěl poděkovat své ženě Zdeňce za její trpělivost, podporu a lásku.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Diplomová práce**

# **Hodnocení provozu malých fotovoltaických elektráren s připojením do sítě nn**

**Jaroslav Černý**

**vedoucí: Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Master's Thesis**

# **Operational Evaluation of the Small Photovoltaic Power Plants Connected to the LV network**

by

**Jaroslav Černý**

**Supervisor: Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2010**

**Brno**

**ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je provést praktické měření dvou malých fotovoltaických elektráren a naměřené výsledky porovnat s teoretickým výpočtem a zhodnotit, jak se od sebe liší. Naměřená data jsou rozčleněna do tří skupin. První skupina hodnotí celkovou výrobu elektrické energie v jednotlivých měsících a porovnává je s teoretickým předpokladem, který slouží k výpočtu finanční návratnosti.

Druhá skupina dat nám ukazuje průběh výroby elektrické energie během charakteristických dnů. Můžeme porovnat, jak vypadá ideální den z hlediska výroby FVE, tedy slunečný a bezoblačný den, s opakem, kdy je po celý den zataženo a prší. Dalším extrémem je prudký nárůst nebo pokles výkonu, který může nastat u fotovoltaické elektrárny, a doba kdy k němu může dojít.

Ve třetí skupině jsou obsaženy statistická data z výroby elektrické energie. Jsou zpracovány jako histogramy a polygony výroby, které názorně ukazují rozložení výroby v jednotlivých měsících. Tyto údaje nám mohou sloužit při rozhodování o formě výkupu, tedy jestli je pro nás ekonomické využití tzv. zeleného bonusu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Fotovoltaická elektrárna; fotovoltaický článek; četnost; MDS 10; statistické měření; relativní četnost; histogram výroby.



## **ABSTRACT**

The objective of this thesis is to perform practical measurements of two small photovoltaic power plants, compare the received results with a theoretical calculation, and evaluate how the two differ from each other. Measured data are divided into three groups. The first group evaluates an overall electric power production in the individual months and compares it with the theoretical presumption that is instrumental to a return of investment calculation.

The second group shows us a development of electric power production during characteristic days. We can compare how an ideal day from the FVE production point of view looks like, in other words a sunny and clear-sky day, with the opposite case when it is cloudy and raining all day long. Another extreme is a rapid growth or a performance drop, which can happen in a photovoltaic power plant and a time period when this situation can arise.

The third group contains statistic data from the electric power production. They are processed in the form of histograms and polygons of production that graphically illustrate production decomposition into the individual months. These data can be instrumental to a decision making about the form of purchase, whether it is economical for us to use the so called green bonus or not.

**KEY WORDS:** Photovoltaic power station; photovoltaic cell; frequency; MDS 10; statistically measurement of relative frequency, histogram production.

**OBSAH**

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	12
SEZNAM TABULEK .....	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD .....	15
2 CÍLE PRÁCE .....	16
3 HISTORIE A SOUČASNOST FOTOVOLTAIKY.....	17
3.1 HISTORIE .....	17
3.2 FOTOVOLTAIKA V ČR .....	19
4 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK.....	21
4.1 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU.....	21
4.2 KONSTRUKCE FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	22
4.3 MATERIÁL PRO FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY.....	23
4.4 PŘÍRODNÍ PODMÍNKY V ČR.....	25
4.5 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ .....	27
5 LEGISLATIVA .....	30
5.1 VÝVOJ LEGISLATIVNÍCH PODMÍNEK V ČR.....	30
5.2 VÝKUPNÍ CENA A ZELENÝ BONUS.....	31
6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ .....	33
6.1 TECHNICKÉ ÚDAJE FVE.....	33
6.2 ODHAD VÝROBY .....	36
6.3 SKUTEČNÁ VÝROBA .....	38
6.4 PRŮBĚHY VÝKONŮ BĚHEM DNE.....	42
6.5 STATISTICKÉ ROZLOŽENÍ VÝROBY Z FVE.....	45
6.6 ZHODNOCENÍ PROVOZU FVE.....	53
7 ZÁVĚR.....	55
8 POUŽITÁ LITERATURA .....	56
PŘÍLOHA A MĚŘENÍ - MĚŘÍCÍ A TESTOVACÍ SYSTÉMY.....	58

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3.1 Jeden z prvních fotovoltaických panelů .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4.1 Princip fotovoltaického článku .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4.2 Schéma standardního solárního článku na bázi monokrystalického křemíku .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.3 Vliv ztrát na celkovou účinnost solárního fotovoltaického článku .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.4 Schéma texturovaného solárního Si článku .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.5 Mapa slunečního záření ČR.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.6 Ukázka voltampérové charakteristiky (V-A) pro různé teploty článku při 1000 W/m<sup>2</sup>....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.7 Ukázka voltampérové charakteristiky (V-A) a Pmax-V pro různé hodnoty ozáření při..</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 6.1 Rozmístění fotovoltaických panelů na střeše RD .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 6.2 Umístění fotovoltaické elektrárny na střeše rodinného domu .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 6.2 Graf odhadnuté výroby z fotovoltaické elektrárny.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6.3 Graf skutečné výroby fotovoltaické elektrárny z období I. - X. 2009 .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6.4 Porovnání odhadnuté a skutečné výroby FVE 1 za období I. - X. 2009.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6.5 Porovnání odhadnuté a skutečné výroby FVE 2 za období I. - X. 2009.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.6 Graf skutečné energie přepočtené na 1 kWp .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.7 Průběh výkonů dodávaných do sítě z FVE 1 a FVE 2 za slunečného dne.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6.8 Průběh výkonů dodávaných do sítě z FVE 1 a FVE 2 za oblačného dne .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6.9 Průběh výkonů dodávaných do sítě při vyjasnění slunce.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6.11 Histogram výroby z FVE 1 (za 24 hod) .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 6.12 Histogram výroby z FVE 2 (za 24 hod) .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 6.13 Polygon výroby z FVE 1 (za 24 hod) .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6.14 Polygon výroby z FVE 2 (za 24 hod) .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6.15 Histogram výroby z FVE 1 (za délku slunečného dne).....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 6.16 Histogram výroby z FVE 2 (za délku slunečného dne).....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6.17 Polygon výroby z FVE 1 (za délku slunečného dne).....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6.18 Polygon výroby z FVE 2 (za délku slunečného dne).....</i>	<i>53</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 3.1 Fotovoltaické elektrárny v ČR, stav k 1. 4. 2010 (zdroj ERÚ).....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 5.1 Výkupní ceny a zelené bonusy pro výrobu elektřiny využitím slunečního záření podle...</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 6.1 Fotovoltaický panel SPV-180 – SME - 1(Schüco) .....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 6.2 Fotovoltaický střídač Fronius IG 15.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6.3 Fotovoltaický panel Vitovolt 200 SC2.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6.4 Fotovoltaický střídač Fronius IG 40.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6.5 Odhad vyrobené energie fotovoltaické elektrárny .....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 6.6 Skutečná výroba z fotovoltaické elektrárny v období I. - X. 2009.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6.7 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 1 (za 24 hod).....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6.8 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 2 (za 24 hod).....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6.9 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 1 (za délku slunečního dne) .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6.10 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 2 (za délku slunečního dne) .....</i>	<i>51</i>

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ERÚ	Energetický regulační úřad
FVE	fotovoltaická elektrárna
HDO	hromadné dálkové ovládání
OZE	obnovitelné zdroje energie
PVGIS	fotovoltaický geografický informační systém – Photovoltaic Geographical Information System

# 1 ÚVOD

Spotřeba elektrické energie u nás i ve světě neustále roste i přesto, že se zavádějí nové energeticky úspornější technologie a účinnější spotřebiče. V současné době je většina elektrické energie vyráběna v tepelných a jaderných elektrárnách. Palivem je zde především černé a hnědé uhlí, zemní plyn a uran. Zásoby těchto energetických surovin však nejsou nevyčerpatelné.

Evropská unie začala ve velké míře podporovat obnovitelné zdroje energie. Naše republika při vstupu do EU musela zavázat, že zvýší podíl výroby z těchto zdrojů. Indikativním cílem bylo dosažení 8 % hrubé výroby elektrické energie z OZE do roku 2010. V roce 2005 začal u nás platit zákon č. 180/2005 Sb. o podpoře obnovitelných zdrojů energie a vyhláška ERÚ č. 475/2005. Jejich záměrem byla podpora a stabilizace podnikatelského prostředí v OZE, atraktivnost pro investory a vytvoření podmínek pro vyvážený rozvoj obnovitelných zdrojů. K podporovaným zdrojům patří energie vody a větru (vodní a větrné elektrárny), biomasa, bioplyn, skládkový plyn, kalový a důlní plyn z uzavřených dolů, geotermální energie (využití nízkopotencionálního tepla a fotovoltaika).

Výroba elektrické energie z fotovoltaických článků nebyla ze začátku hlavním zájmem investorů. Hlavním jejím nedostatkem byly počáteční velké investice. Doba návratnosti byla asi 15 let. To se během posledních dvou let změnilo. Ceny fotovoltaických panelů klesly více než státní podpora a doba návratnosti investice je v současnosti je 8 – 10 let (některé prameny uvádějí i nižší čísla).

Sluneční energie byla lidstvem využívána odedávna a je jisté, že tuto energii, i když v pozmeněné formě bude využívat i nadále. K jejím výhodám patří hlavně čistota provozu. Veřejnost ve svém okolí raději snese plochu osázenou fotovoltaickými panely než větrnou elektrárnu. Další výhodou jsou nízké náklady na provoz a údržbu zařízení, které spočívají hlavně v ostraze objektu. Protože elektrárna nepotřebuje žádné „palivo“ a nemá žádné mechanické části, neznečišťuje okolí emisemi a hlukem. Posledním bodem je pak rychlost a jednoduchost výstavby solárních elektráren, která se dá počítat v řádech měsíců.

S rychlým nárůstem výstavby těchto elektráren se však začínají projevovat i jejich nedostatky. A to hlavně závislost výkonu na denní době a aktuálních klimatických podmínkách. Dalšími problémy pak jsou nedostatek točivé energie, regulace napětí v sítích nn, vliv na úroveň HDO, potřeba udržovat záložní zdroje atd. Tyto a další otázky, které s využitím energie slunce nastanou, bude nutné v budoucnu řešit.

## 2 CÍLE PRÁCE

Podle teoretických předpokladů jsme schopni velice jednoduše vypočítat nejen ekonomickou návratnost fotovoltaických elektráren, ale také například výrobu v jednotlivých měsících. Praktickým měřením však můžeme zjistit, jak se teorie liší od reality. Cílem této práce je porovnat teoretický výpočet výroby elektrické energie, který lze získat na internetu a je založen na statistických podkladech se skutečnou výrobou. Pro porovnání jsem zvolil dvě malé fotovoltaické elektrárny, které jsou umístěny na jednom místě a za stejných podmínek. Liší se od sebe jen instalovaným výkonem a výrobcem fotovoltaických panelů.

Typickým projevem výroby elektrické energie je její závislost na intenzitě osvětlení. Tato se během dne mění nejenom s polohou slunce, ale také v důsledku zastínění mraky. Další vlivy jako je teplota fotovoltaických článků a znečištění ovzduší již nemají na výrobu tak velký vliv. Měření nám může ukázat, jaký průběh výkonů dosahují obě elektrárny za slunečného dne, kdy nebyla zatažena obloha a výroba dosáhla svého denního maxima. Tedy ideálního dne pro FVE. Opakem je pak den, kdy je po celý den zataženo, prší a elektrárna prakticky nevyrábí. Jiným zajímavým průběhem je den, kdy je dopoledne zataženo a okolo poledne vysvitne slunce. Zde se projeví rychlý nárůst výkonů z FVE.

Posledním bodem této práce je statistické zpracování naměřených dat do histogramu výroby, které nám ukáže rozdělení výroby v jednotlivých měsících. Můžeme tím zjistit, kolik elektrické energie může fotovoltaická elektrárna vyrábět v různých obdobích. Tyto informace nám mohou být užitečné, například pokud chceme námi vyrobenou energii sami spotřebovat a uplatnit při výkupu elektřiny zelený bonus.

## 3 HISTORIE A SOUČASNOST FOTOVOLTAIKY

### 3.1 Historie

Název fotovoltaika se skládá ze dvou slov, řeckého (phos) – světlo a ze jména italského fyzika Alessandra Volty (\*1745, †1827). Objev fotovoltaického jevu se připisuje francouzskému fyzikovi Alexandru Edmondu Becquerelovi (\*1820, †1891), který jej odhalil při svých experimentech v roce 1839. Jako devatenáctiletý mladík učinil objev, který našel praktické využití až po 120 letech. Do nádoby rozdělené průlinčitou stěnou vložil dvě platinové elektrody a obě části nádoby naplnil elektrolytem. Elektrody připojil k citlivému galvanoměru a nádoby světlotěsně zakryl. Ručička galvanoměru nevykazovala žádnou výchylku. Když však sejmul z nádoby víko a osvětlil elektrody, objevilo se mezi elektrodami napětí, kterou změřil galvanoměrem. Sestava elektrod a elektrolytu se při osvětlení stala zdrojem napětí. Poprvé tak byla pozorována přímá přeměna světelné energie na elektřinu.

První pokusy s fotočlánky začaly v sedmdesátých letech 19. století, kdy byly poprvé zjištěny změny vodivosti selenu při jeho osvětlení. Kolem r. 1883 byl sestaven první selenový fotočlánek s tenkou vrstvou zlata (Charles Fritts, účinnost pod 1 %).

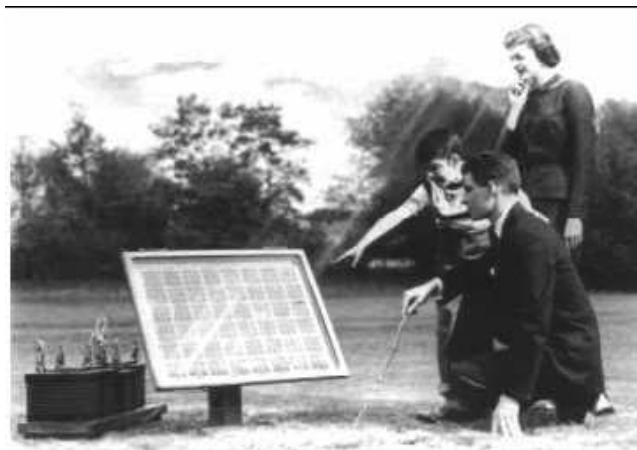
V roce 1905 vysvětlil fotoelektrický jev Albert Einstein (v roce 1921 byl oceněn Nobelovou cenou za fyziku za „vysvětlení fotoefektu a zásluhy o teoretickou fyziku“). Ve článku „O heuristickém hledisku dotýkajícím se vznikem a přeměnou světla“, navrhl myšlenku světelných kvant (nyní nazývanou fotony) a ukázal, jak mohou být použity k vysvětlení takových jevů jako fotoelektrický efekt. Myšlenka světelného kvanta přišla z předchozího odvození záření absolutně černého tělesa Maxem Planckem, který předpokládal, že energie záření může být pohlcena nebo vyzařena jen po celých částech nazývaných kvanta. Einstein ukázal, že pokud se předpokládá, že světlo se vlastně sestává z jednotlivých balíčků, jinak záhadný fotoelektrický jev může být vysvětlen.

První patent na solární článek podal Russell Ohl v roce 1946. První skutečný fotovoltaický článek s 6% účinností byl vyroben z krystalického křemíku v roce 1954 v Bellových laboratořích (G. L. Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller). Chapin dostal za úkol vyřešit problém s bateriemi, které v telefonních systémech v tropech nebyly příliš spolehlivé. Mimo jiné zkoušel i tehdy dostupné selenové sluneční články. Ty však měly špatnou účinnost (0,5 %). Jeho kolegové Fuller a Pearson experimentovali s křemíkovými diodami. V arzenu dopované destičce křemíku vytvořili pomocí bóru PN přechod. Tak vytvořili první křemíkový sluneční článek, který použili pro napájení radiopřijímače.

Zajímavostí je i to, že tento článek se zachoval, a přestože nemá žádné ochranné pouzdro, funguje i po padesáti letech s účinností okolo 1,5 %. Jeho o rok mladší kolega z roku 1955, který byl již zapouzdřen, měl po 49 letech účinnost 5,1 %.

Od svého objevu v roce 1839 do roku 1940 byl fotovoltaický jev zajímavým objektem pro fyzikální bádání. Až s rozvojem polovodičové technologie (zejména po zvládnutí přípravy monokrystalického Si), se začíná uvažovat o možném využití jako zdroj energie pro kosmický výzkum.





Obr. 3.1 Jeden z prvních fotovoltaických panelů

Rychlý růst účinnosti článků na počátku padesátých let je spojen s nalezením základních principů konstrukce a technologie článků (optimalizace polohy přechodu PN a zvýšení generace nosičů v objemu FV článku pomocí antireflexní vrstvy). Tato konstrukce byla užívána až do poloviny osmdesátých let.

Větší rozvoj fotovoltaiky nastává s nástupem kosmického výzkumu v šedesátých letech. Sluneční články slouží jako zdroj energie pro družice. První družicí, která využívala FV panely byl ruský Sputnik 3 a americký Vanguard I. Dalším důležitým mezníkem pro rozvoj fotovoltaiky byla celosvětová ropná krize v roce 1973.

Ve druhé polovině osmdesátých let se rozvíjí technologie zdokonalením funkce antireflexní vrstvy pomocí texturace povrchu. V roce 1994 byla realizována dokonalá struktura s minimální odrazivostí u struktury PEARL pomocí anisotropního leptání přes oxidovou masku na výchozím monokrystalickém Si. U této struktury byla dosažena účinnost 24 % [1][2].

- **1839** A. E. Besquerel poprvé pozoroval přímou přeměnu záření na elektřinu, objevil fotovoltaický jev.
- **1873** W. Smith objevil závislost odporu selenu na osvětlení.
- **1876** W. G. Adams a R. A. Day pozorovali fotovoltaický jev na krystalu selenu a vytvořili první fotovoltaický článek bez použití elektrolytu.
- **1918** J. Czochralski vynalezl metodu získávání velkých monokrystalů, která se stala základem výroby křemíkových ingotů.
- **1950** Průmyslové zavedení výroby křemíkových monokrystalů Czochralského metodou.
- **1954** D. M. Chapin , C. S. Fullera G. L. Pearson ve firmě Bell Telephone vyrobili první křemíkový fotovoltaický článek s účinností okolo 6 %.
- **1958** Byly vypuštěny první umělé družice s přístroji napájenými z fotovoltaických článků (Vanguard I a Sputnik 3).
- **1960** Účinnost nejlepších fotovoltaických článků dosáhla 14 %.

- **1963** Japonský maják byl vybaven fotovoltaickým zdrojem o výkonu 242 W, v té době šlo o rekordní výkon.
- **1982** Ve světě pracovaly fotovoltaické systémy o celkovém výkonu 9,3 MW.
- **2002** Ve světě pracovaly fotovoltaické systémy o celkovém výkonu 562,5 MW. Téměř polovina těchto systémů je v provozu v Japonsku.

## 3.2 Fotovoltaika v ČR

V roce 1998 byla uvedena do provozu první fotovoltaická elektrárna v ČR, ta byla do roku 2002 součástí komplexu větrných elektráren v lokalitě Mravenečník v Jeseníkách. Odlehlost místa ale způsobovala problémy s údržbou panelů a ostrahou. Proto byla elektrárna v roce 2003 přestěhována do areálu jaderné elektrárny Dukovany, kde slouží v informačním středisku k demonstračním účelům.

200 fotovoltaických modulů z monokrystalického křemíku o ploše asi 75 m<sup>2</sup> dává špičkový výkon 10 kW. Uspořádání modulů je ve dvou sekcích po pěti větvích, orientace směrem k jihu se sklonem 45°. Ročně elektrárna vyrobí téměř 8000 kWh. Elektrárna využívá svůj instalovaný výkon na 10 %. Roční časové využití je asi 40 %. Systém je možné připojit k rozvodné síti. Dalším prvkem je zařízení pro snímání, zpracování a vyhodnocování naměřených dat ke studijním účelům. Jedno ze dvou vizualizačních zařízení je umístěno přímo v Informačním centru jaderné elektrárny a slouží pro informaci jeho návštěvníkům.

V roce 1999 česká pobočka Greenpeace navrhla realizaci projektu Slunce do škol. V rámci tohoto projektu byly instalovány fotovoltaické systémy o výkonu 0,1 a 0,2 kWp, později 1,2 kWp. Od roku 2002 pokračoval tento program na vysokých školách instalacemi 20 kWp systémů.

Koncem roku 2006 byl nominální výkon největší instalace 60 kWp. Od 1. února roku 2007 byla zprovozněna FVE Bušanovice o velikosti 693 kWp. V dubnu roku 2008 byla uvedena na ploše 4,2 ha do provozu FVE Hrádek o výkonu 1,1 MWp. V září téhož roku měla největší elektrárna u nás již výkon téměř 2 MWp a o dva měsíce později skoro 3 MWp. K datu 1. 8. 2009 byl instalovaný výkon největší fotovoltaické elektrárny Vimperk 3,368 MWp. Prudký nárůst výstavby FVE v současnosti je všeobecně známý a nepotřebuje komentáře (viz. **tabulka 3.1**). [2][3][4][5].

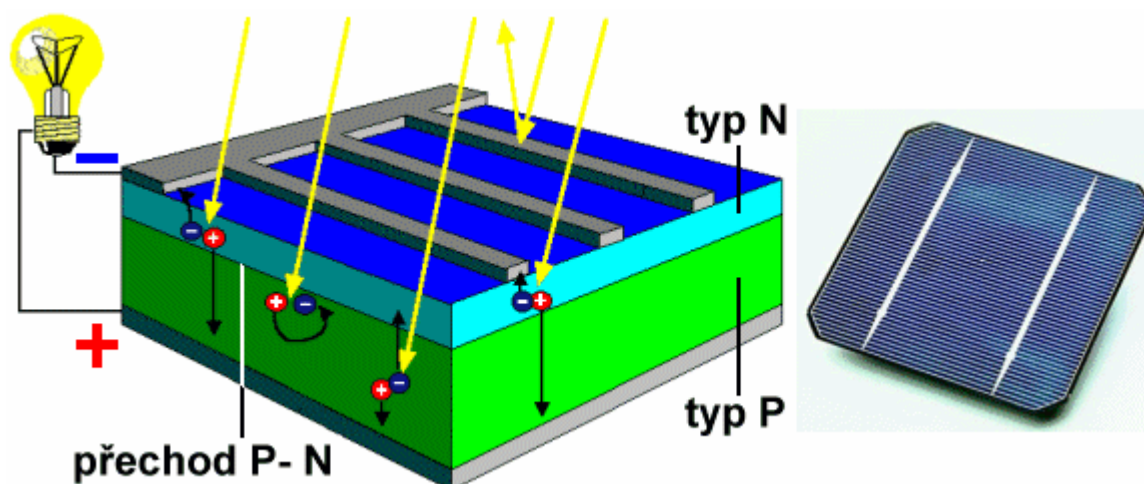
Tab. 3.1 Fotovoltaické elektrárny v ČR, stav k 1. 4. 2010 (zdroj ERÚ)

Rok	FVE	
	Počet provozoven	Instalovaný výkon
	(ks)	( MWp )
1. 1. 2002	1	0,01
1. 1. 2003	1	0,01
1. 1. 2004	2	0,02
1. 1. 2005	9	0,12
1. 1. 2006	12	0,15
1. 1. 2007	28	0,35
1. 1. 2008	249	3,40
1. 1. 2009	1475	65,74
1. 1. 2010	6032	462,92
1. 4. 2010	7014	491,02

## 4 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK

### 4.1 Princip fotovoltaického článku

Fotovoltaický (solární) článek využívá přímé přeměny světelné energie na energii elektrickou. Jeho základem je polovodičová dioda. Princip vidíme na **obrázku 4.1**. Základem je tenká křemíková destička s vodivostí typu P. Na ní se při výrobě vytvoří tenká vrstva polovodiče typu N. Mezi oběma vrstvami je tzv. přechod P-N. Dopadem slunečního záření vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev. Z krystalové mřížky se začnou uvolňovat záporné elektrony a na přechodu P-N se vytvoří elektrické napětí, které dosahuje 0,5–0,6V. Připojením zátěže se začnou kladné a záporné náboje vyrovnávat a obvodem začne protékat elektrický proud. Jednotlivé články se potom zapojují sériově, aby dosáhly požadovaného standartizovaného napětí.

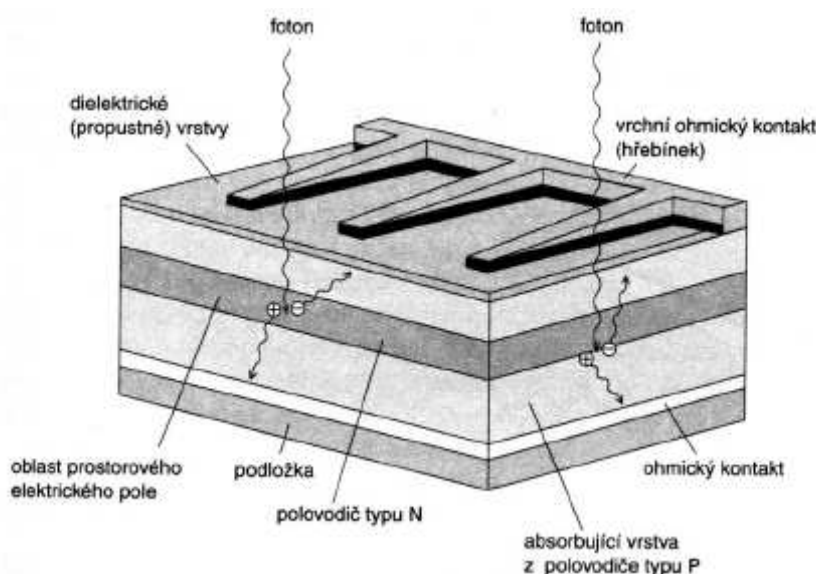


Obr. 4.1 Princip fotovoltaického článku

K tomu aby docházelo ke generování páru elektron – díra, musí mít dopadající záření patřičnou energii. Tuto potřebuje elektron daného polovodiče na překonání zakázaného pásu. Například křemík potřebuje pro překonání zakázaného pásu energii minimálně 1,12 eV (odpovídá záření o vlnové délce 1105 nm). Sluneční záření procházející atmosférou obsahuje fotony s energiemi od 0,5 eV (infračervené záření) po přibližně 2,9 eV (ultrafialové záření). Z toho vyplývá, že křemík dokáže využít jen určitou část tohoto záření. Záření s větší vlnovou délkou, které mají energii menší, než 1,12 eV fotovoltaický jev nevyvolají. Fotony záření s kratší vlnovou délkou, které mají energii větší, jak 1,12 eV mají dostatek energie na uvolnění elektronů z mřížky. Zbylá energie se nevyužita přemění v teplo. Udává se, že se takto dokáže využít maximálně 50 % energie [2][6].

## 4.2 Konstrukce fotovoltaických článků

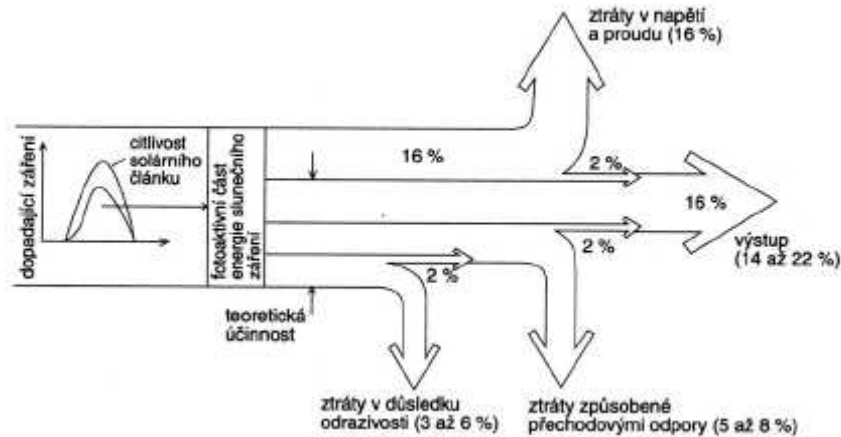
Při konstrukci solárních článků se snažíme nejen o úsporu materiálu, ale i o omezení optických a elektrických ztrát. Optické ztráty vznikají následkem odrazu (reflexe) a neúplné absorpce záření (šířce zakázaného pásu). Průměrný činitel odrazu polovodičů je pro záření ve viditelné oblasti spektra dosti velký (pro křemík přesahuje 30 %). V praxi se proto používají různé antireflexní vrstvy, které je mohou snížit pod 10 %. **Obrázek 4.2** nám ukazuje řez standardní strukturou solárního článku na bázi monokrystalického křemíku. Na **obrázku 4.3** vidíme podíl jednotlivých jevů na ztrátách účinnosti solárního článku.



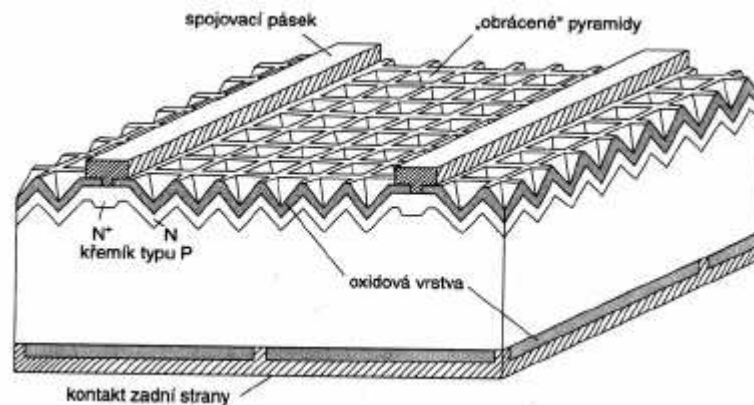
Obr. 4.2 Schéma standardního solárního článku na bázi monokrystalického křemíku

Jinou možností ke zlepšení účinnosti je vytvoření tzv. texturovaného povrchu. Schématický náčrt texturovaného křemíkového solárního článku je na **obrázku 4.4**. Světlo po dopadu na takto upravený povrch je z části odraženo směrem dolů, a kde může dále proniknout do článku. Vrchní osvětlovaná část článku plní současně funkci kontaktu a odvádí elektrický proud. Texturovaný povrch lze vytvořit pomocí selektivního leptadla. Mřížková elektroda, která odvádí el. proud, je navržena tak, aby ztráty způsobené stíněním mřížky a elektrický odpor byly co nejmenší.

Další možností je umístit aktivní přechod na spodní neosvětlené straně článku. Výhodou je, že nám mřížka nestíní článek. Článek musí být ale velice tenký. Generované nosiče se totiž musí dostat až k přechodu. Jako průhledná a elektricky dobře vodivá elektroda se někdy využívá sklo pokryté vrstvičkou oxidu cínu ( $\text{SnO}_3$ ) nebo směsí oxidu cínu a india. Pokud jsou plochy větší pak se ovšem i přes tyto vrstvy napařuje kovová mřížka. Zde se vyžadují velmi čisté technologické procesy a unikátní mikroelektronická technika [6].



Obr. 4.3 Vliv ztrát na celkovou účinnost solárního fotovoltaického článku



Obr. 4.4 Schéma texturovaného solárního Si článku

### 4.3 Materiál pro fotovoltaické články

#### Křemík (Si)

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických panelů je v současné době křemík. Je druhým nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře, a protože se využívá prakticky od počátku, má nejrozsáhlejší technologickou základnu.

Křemík se v přírodě nachází pouze ve sloučeninách, například jako oxid křemičitý je součástí křemene, který tvoří písky moří řek a pouští. Ten chemickou reakcí s uhlíkem vytvoří takzvaný

hutní křemík o čistotě 97 – 99 %, který ještě není dostatečně čistý pro využití v elektrotechnice. Pro výrobu polykrystalického křemíku se používají chemické metody. V tzv. Siemensově postupu je z křemíku nejprve vyrobena nějaká těkavá sloučenina. Tato je pak vedena přes vrstvu vysoce čistého křemíku o teplotě přes 1 100 °C. Přitom dochází k jejich rozkladu a vzniklý vysoce čistý křemík se ukládá v krystalické podobě na původní křemíkovou podložku.

Obvyklou metodou pro výrobu monokrystalického křemíku je řízená krystalizace z taveniny tzv. Czochralského proces. Polykrystalický křemík je vložen do tavné pece spolu s dopujícím prvkem, např. s fosforem. Křemík s fosforem je v tavné peci roztaven a celá pícka je roztočena. Následně je do pícky ponořen tzv. zárodek, na který se začne roztavený křemík zachytávat. Zárodek je uchycen na lanku, které se otáčí a je pomalu vytahováno z roztavené pece, kde vytváří válcový ingot o průměru až 200 mm. Tento ingot se po vychladnutí rozřeže na destičky o tloušťce 0,1 – 0,3 mm. Zbytky válce (asi 50 – 60 %) se vracejí k roztavení a opětovnému zpracování.

V prvním kroku se surové plátky mokrou chemickou cestou o několik milimetrů odleptají. Přitom se odstraní vrstva krystalu zničená řezáním a zároveň se plátky čistí. Potom následuje difúze, kdy v elektricky vyhřívané křemenné trubce při teplotě +800 °C difunduje fosfor z nosného plynu do povrchové vrstvy plátek. Tak vzniká vrstva s dotací typu N a fosforem silně obohacená oxidová vrstva. Plátky se poskládají na sebe a stlačí do kompaktní kostky, která se v kyslíkové plazmě vyrobené působením vysokého kmitočtu odleptá. Z hran jednotlivých destiček se tak odstraní vrstva polovodiče typu N. Z přední a zadní strany se mokřím chemickým leptáním odstraní nežádoucí oxidová vrstva.

Metodou sítotisku se zhotovují vodivé kontakty. Na spodní neosvětlené ploše je vytvořena hustá mřížka, sběrnice (kontakty) na osvětlené části povrchu má podobu „vodivých prstů“. Kontakty se při vysoké teplotě zataví přes antireflexní vrstvu až do křemíkového materiálu.

Polykrystalický křemík, jehož výroba je ekonomicky méně nákladná, má lepší účinnost při nižší intenzitě osvětlení. Cenově dražší monokrystalický křemík, má při dostatečné intenzitě osvětlení vyšší účinnost.

### **Arsenid galia (GaAs)**

Druhým nejčastěji používaným materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je arsenid galia. Jeho vývoj a použití probíhá již mnoho let, ale jeho použití zatím nedosáhlo takové úrovně jako u křemíku. Jeho předností je vyšší účinnost oproti křemíkovým článkům. V laboratorních podmínkách byly vyvinuty články s účinností větší než 20 % a v praxi je účinnost článků v průměru 17,5 %. Nevýhodou GaAs článků je jejich cena a větší hustota (5 200 kg/m<sup>3</sup>). Jsou také podstatně křehčí.

Pro svoji lepší účinnost a odolnost proti kosmickému záření nacházejí uplatnění při letech do vesmíru. Články jsou rovněž vhodnější pro práci za zvýšených teplot, kde mají jen nepatrně sníženou účinnost. Nevýhodu větší hustoty lze odstranit výrobou velmi tenkých solárních článků, protože aktivní tloušťka GaAs čipu je podstatně menší než aktivní tloušťka čipu křemíkového.

### Materiály měď – indium – diselen a podobné

Měď – indium – diselen ( $\text{CuInSe}_2$ ) a měď – indium – galium – selen ( $\text{CuInGaSe}$ ) jsou polykryalický polovodičové materiály s přímým přechodem a s velmi vysokou hodnotou optického absorpčního koeficientu. Jsou to polovodiče p-typu a jsou vždy využívány ve heteropřechodové konstrukci. Často se jako n-typ využívá tenká vrstva kadmia síry ( $\text{CdS}$ ). Ve fotovoltaickém výzkumu se mu v současné době věnuje hlavní pozornost. Začínají se také objevovat první pilotní výzkumné články z těchto materiálů.

### Telurid kademnatý ( $\text{CdTe}$ )

Telurid kademnatý je považován za velmi nadějný materiál pro výrobu fotovoltaických článků. Při velikosti šířky zakázaného pásma 1,5 eV (při pokojové teplotě) má velký činitel absorpce. Současně dosahuje jak vysoké proudové hustoty  $J_{sc}$  (až 26 A/cm), tak vysokého napětí  $U_{oc}$  (až 850 mV). Protože se jedná o binární slitinu je výroba článků mnohem jednodušší než výroba  $\text{CuInSe}_2/\text{CuInGaSe}$  článků. V USA dosáhly články vyrobené elektrochemickou metodou účinnosti okolo 10 %. Kvůli jeho nedostatečnému množství v zemské kůře však zřejmě nenajde uplatnění pro velké fotovoltaické elektrárny. Může se však uplatnit ve spotřební elektrotechnice.

### Sulfid kademnatý ( $\text{CdS}$ )

Historicky nejstarší materiál pro výrobu solárních článků. Vytváří přechod PN se dvěma dalšími materiály (sulfid měďnatý a telurium kadmia). Články  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdS}$  mají výhodu v nižší hmotnosti. Poměrně jednoduchou technologií se dosahovalo účinnosti přes 10 %. Našli využití zejména v kosmické technologii. Nevýhodou byla jejich nízká stabilita. Dnes se již nepoužívají.

Články s přechodem  $\text{CdS} - \text{CdTe}$  jsou pokročilejší variantou. Tyto články vyhovují jen zařízením s nízkým příkonem. V energetice se příliš nepoužívají [2][6][7].

## 4.4 Přírodní podmínky v ČR

Česká republika leží v mírných zeměpisných šířkách severní polokoule. Podnebí můžeme označit jako mírné, ale zároveň velmi rozmanité i v průběhu roku. V různých oblastech ČR se však výrazně liší. Hlavním zdrojem těchto rozdílů je nadmořská výška. S vyšší nadmořskou výškou teploty klesají a přibývají srážky, ale svoji roli zde hrají i další faktory – hraniční hory například výrazně ovlivňují přízemní proudění vzduchu a rozložení srážek.

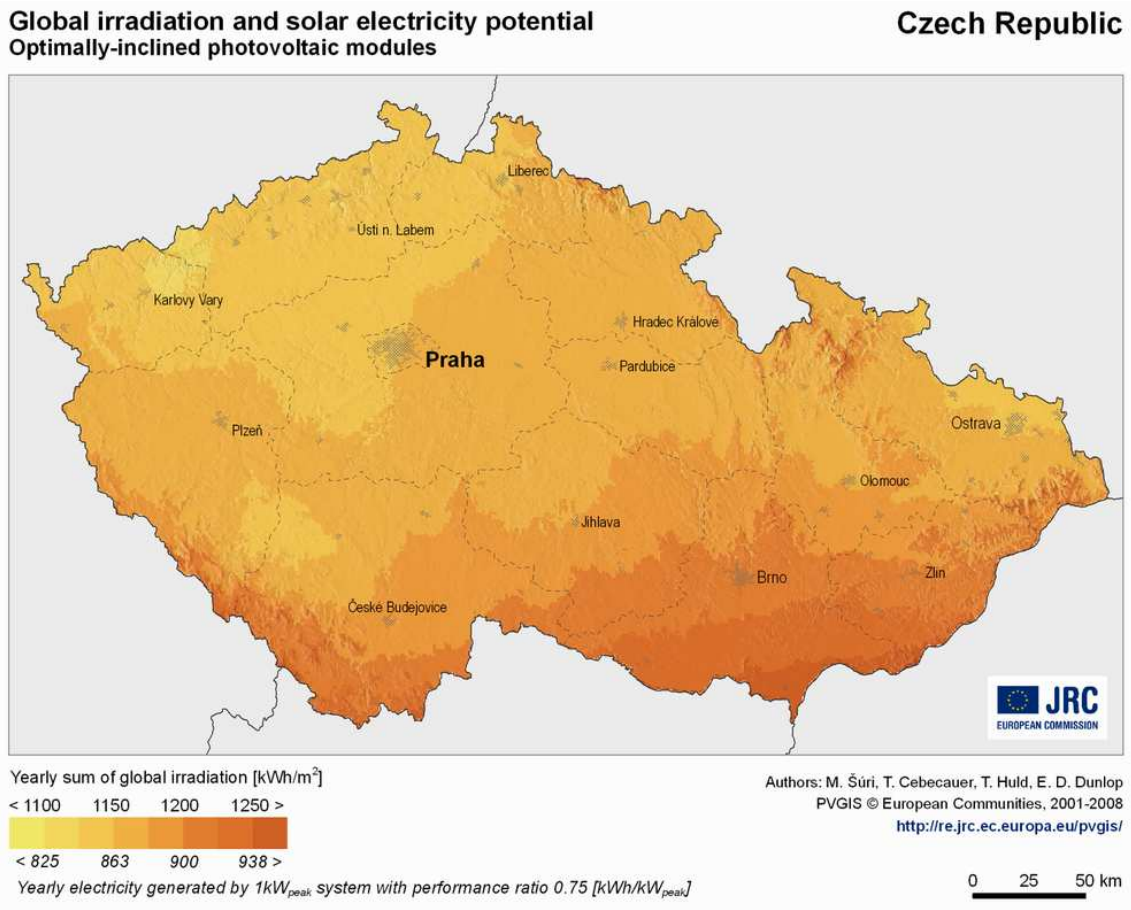
Dalším faktorem, který ovlivňuje sluneční záření je znečištění atmosféry. Podle oblasti znečištění může dosahovat 5 – 10 %, v krajním případě ale i 20 %. Naopak v oblastech s nadmořskou výškou od 700 m. nad mořem lze počítat s 5 % nárůstem globálního záření. Také skladba světelného záření ovlivňuje účinnost fotovoltaických článků. V ČR je spektrum sluneč-



ního záření tvořeno zhruba ze 40 % difúzním světlem. Zbytek tvoří světlo přímé. Difúzní záření vzniká rozptylem přímých slunečních paprsků na molekulách vzduchu, vodních kapkách ledových krystalcích a na různých aerosolových částicích. Energetický potenciál difúzního záření je nižší než u přímého světla.

Podle dostupných údajů dopadne v ČR na 1 m<sup>2</sup> vodorovné plochy asi 950 – 1340 kWh energie. Roční množství slunečních hodin se pohybuje v rozmezí 1331 – 1844 hod (ČHMÚ). Pro praktické využití fotovoltaických článků lze říci, že z 1 kW běžného systému lze za rok získat 800 – 1100 kWh elektrické energie.

Podle Ministerstva pro místní rozvoj byl stanoven teoretický potenciál výroby elektrické energie slunečního záření na cca 80 000 TWh. Toto je největší možný potenciál, který předpokládá využitelnou plochu pro fotovoltaické systémy na 50 200 km<sup>2</sup>. Jen pro úplnost: Česká republika má rozlohu 78 864 km<sup>2</sup> [1][8][9].



Obr. 4.5 Mapa slunečního záření ČR

## 4.5 Parametry fotovoltaických článků

Elektrické vlastnosti fotovoltaických panelů se popisují voltampérovou charakteristikou, která udává závislost proudu na napětí při daném osvětlení. Tyto parametry by měl uvádět výrobce v katalogových listech.

*Proud nakrátko –  $I_{SC}$  ( A )*

Proud nakrátko (Short Circuit) je nejvyšší hodnota proudu, který může panel dát. Někdy se také označuje jako fotoelektrický proud. Jeho velikost je závislá na intenzitě osvětlení, teplotě, spektrální citlivosti a ploše fotovoltaického panelu. Měří se speciálním přístrojem s velice malým vnitřním odporem. Velikost proudu fotovoltaického článku se pohybuje od desítek *mA* do jednotek *A*. Hodnota proudu panelu je pak dána jeho velikostí a zapojením.

*Napětí naprázdno –  $U_{OC}$  ( V )*

Napětí naprázdno (Open Circuit) je maximální napětí panelu bez připojené zátěže, který můžeme naměřit při dané teplotě a intenzitě osvětlení. Velikost napětí u monokrystalických článků se pohybuje okolo 0,6 V.

*Proud maximálního výkonu –  $I_{mpp}$  ( A )*

Proud maximálního výkonu (Maximum Power Point) je hodnota proudu při maximálním výkonu. Bod MPP se udává prostřednictvím napěťové a proudové souřadnice voltampérové charakteristiky.

*Napětí maximálního výkonu –  $U_{mp}$  ( V )*

Napětí maximálního výkonu (Maximum Power Point) je hodnota napětí při maximálním výkonu.

*Maximální výkon –  $P_{max}$  ( Wp )*

Maximální výkon s jednotkou  $W_p$  (Watt-peak) nám udává součin napětí a proudu maximálního výkonu. Je to typická hodnota fotovoltaického panelu. Měření výkonů se provádí při standardních zkušebních podmínkách STC (Standart Test Conditions), tj. při ozáření  $1000 \text{ W/m}^2$  (přibližně plné sluneční ozáření) při teplotě článku  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a hodnotě  $AM = 1,5$  (Air Mass) tzn., že složení světla odpovídá slunečnímu světlu po průchodu 1,5 násobnou tloušťkou zemské atmosféry filtrující světlo.

*Tolerance výkonu –  $\Delta P_{mp}$  ( % )*

Tolerance výkonu nám udává, o kolik procent se může lišit výkon. Některé panely mají toleranci kladnou i zápornou. U kvalitních výrobků je tolerance kladná. Obvykle bývá 5 %.

*Faktor plnění – FF*

Faktor plnění je poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Podle velikosti FF můžeme posoudit kvalitu fotovoltaického článku. Čím je hodnota vyšší, tím větší výkon je schopen do zátěže dodat. V ideálním případě dosahuje hodnotu 1. Obvykle však 0,7 – 0,9.

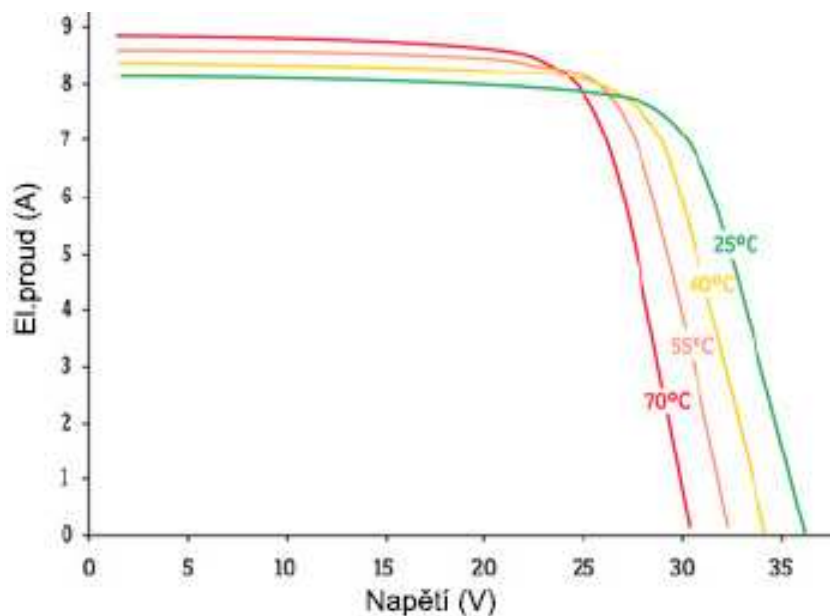
$$FF = \frac{U_{mpp} I_{mpp}}{U_{oc} I_{sc}}$$

#### Účinnost článku – $\eta$

Účinnost fotovoltaického článku je dána podílem maximálního výkonu článku a celkovou energií dopadajícího světla  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{U_{mpp} I_{mpp}}{P_{in}}$$

Je dána vlastnostmi materiálu, který je ovlivněn spektrální citlivostí článku na dopadající záření. Fotovoltaický článek tedy využívá energii různých vlnových délek s různou účinností. Polykrytalické články mají účinnost 13–16 %, monokrytalické 15–18 %.



Obr. 4.6 Ukázka voltampérové charakteristiky (V-A) pro různé teploty článku při  $1000 \text{ W/m}^2$

Dalšími hodnotami, které se udávají v technických parametrech fotovoltaických článků, jsou teplotní koeficienty. Udávají se zejména proto, že mají vliv na celkový výkon článku hlavně v teplých letních měsících. Při změně teploty o  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  dojde ke změně výkonu až o 10 %.

#### Teplotní koeficient $P_{max}$ – $\alpha$

Teplotní koeficient maximálního výkonu klesá s rostoucí teplotou. Jeho hodnota je přibližně  $-0,47 \text{ \% / }^\circ\text{C}$ .

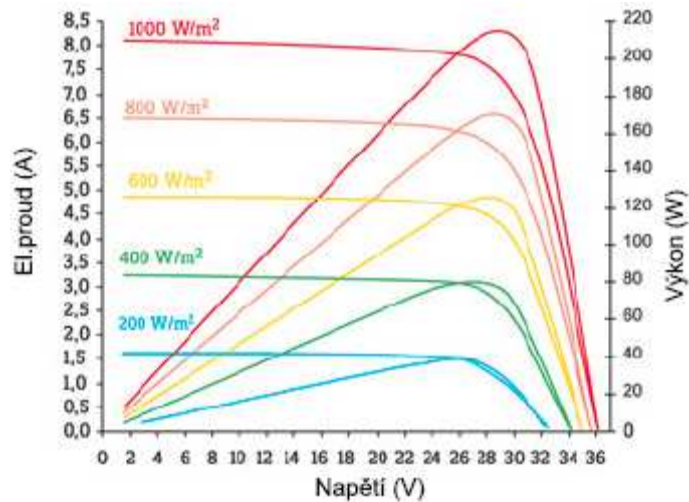
#### Teplotní koeficient $I_{sc}$ – $\beta$

Proud nakrátko není příliš závislý na teplotě a se zvyšující se teplotou slabě narůstá. To může být způsobeno zvýšenou světelnou absorpcí, protože se šíře zakázaného pásu u polovodičů obecně zmenšuje s teplotou. Jeho velikost je přibližně  $+0,1 \text{ \% / }^\circ\text{C}$ .

*Teplotní koeficient  $U_{OC} - \gamma$* 

Napětí naprázdno je více závislé na teplotě a ovlivňuje i výkon článku. Klesá s rostoucí teplotou. Teplotní koeficient dosahuje hodnoty přibližně  $-0,38\% / ^\circ\text{C}$ .

Dalšími parametry, které udává výrobce, jsou mechanické vlastnosti. Zde se uvádějí rozměry panelu, jeho hmotnost, materiál solárních článků, materiál rámu, čelního skla, zadní strany apod. [10][11][22].



Obr. 4.7 Ukázka voltampérové charakteristiky (V-A) a  $P_{\max}$ -V pro různé hodnoty ozáření při  $25^\circ\text{C}$

## 5 LEGISLATIVA

### 5.1 Vývoj legislativních podmínek v ČR

Ještě před 10 lety se výstavbou a provozem fotovoltaických elektráren u nás zabývala jen hrstka nadšenců. Výroba z těchto zdrojů byla ekonomicky nerentabilní. Důvodem byla zejména vysoká cena článků a také nízká výkupní cena elektřiny. Od roku 2002 byla elektřina vykupována za cenu 6,00 Kč/kWh.

V Evropě se mezitím začala rozvíjet podpora obnovitelných zdrojů energie. Mezi významné právní normy můžeme zařadit Bílou knihu ISES: Přejít k obnovitelným zdrojům energie, která uvádí důvody pro zavedení účinných vládních politik celosvětového využívání obnovitelných zdrojů energie a směrnici Evropského parlamentu a Rady č. 2001/77/ES ze dne 27. září 2001 o podpoře elektrické energie z obnovitelných zdrojů na vnitřním trhu s elektrickou energií. Tato směrnice byla do české legislativy aplikována v roce 2005 zákonem č. 180/2005 Sb. O podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů).

Přijetím tohoto zákona se Česká republika zavázala, že do roku 2010 bude 8 % z hrubé výroby elektrické energie tvořit obnovitelné zdroje. Aby bylo tohoto cíle dosaženo, byly zvýšeny ceny výkupu elektrické energie zejména u fotovoltaických elektráren. Pro rok 2006 byla stanovena výkupní cena 13,20 Kč/kWh. Cena byla nastavena tak, aby bylo dosaženo návratnosti do 15 let a přiměřeného zisku.

Začátkem roku 2008 vstoupila v platnost vyhláška ERÚ č. 364/2007 Sb. (novela vyhlášky ERÚ č.475/2005 Sb.), která zajistila větší ekonomickou návratnost investic. Prodloužila dobu výkupu elektřiny na celou dobu projektované životnosti elektrárny z původních 15 na 20 let, podobně jako ve většině ostatních států EU.

Podmínky státního výkupu se mění každý rok a podle zákona může cena klesnout maximálně o 5 % ročně. Podle uvedení do provozu se nastaví výkupní cena (podle platného cenového rozhodnutí ERÚ) pro dané zařízení. Tato se potom po dobu životnosti výroby elektřiny zvyšuje s ohledem na index cen průmyslových výrobců minimálně o 2 % a maximálně o 4 % (podle vyhl. 150/2007 §2 odst. 11). Vstupní výkupní cena, která bude platná pro vždy následující období uvedení do provozu, nesmí být nižší než 95 % (podle zákona 180/2007 §6 odst. 4) ceny předchozího roku. Tímto stát zaručuje investorům určitou jistotu. V rámci jedné výroby elektřiny nelze kombinovat režim výkupních cen a zelených bonusů. Mezi zelenými bonusy a výkupními cenami můžeme 1 krát ročně přecházet (podle zákona 180/2005 §4 odst. 3). Distributor je povinen od výrobců odebrat všechnu vyrobenou elektrickou energii [12][13][17].

Tab. 5.1 Výkupní ceny a zelené bonusy pro výrobu elektřiny využitím slunečního záření podle Cenového rozhodnutí ERÚ č.5/2009

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny el. dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. 1. 2010 do 31. 1. 2010	12250	11280
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. 1. 2010 do 31. 1. 2010	12150	11180
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. 1. 2009 do 31. 1. 2009	13150	12180
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. 1. 2009 do 31. 1. 2009	13050	12080
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu od 1. 1. 2008 do 31. 12. 2008	14010	13040
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu od 1. 1. 2006 do 31. 12. 2007	14370	13400
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu před 1. 1. 2006	6850	5880

## 5.2 Výkupní cena a zelený bonus

Pro elektřinu vyrobenou z obnovitelných zdrojů energie platí výkupní ceny a zelené bonusy a také určité podmínky.

Výkupní ceny jsou stanoveny jako minimální ceny podle zvláštního právního předpisu (zákon č. 526/1990 Sb., o cenách, ve znění pozdějších předpisů). Uplatňují se za elektřinu dodanou a naměřenou v předávacím místě výroby elektřiny a sítě provozovatele přenosové soustavy, které vstupuje do zúčtování odchylek subjektu zúčtování odpovědného za ztráty v přenosové soustavě.

Zelené bonusy jsou stanoveny jako pevné ceny podle zvláštního předpisu (zákon č. 526/1990 Sb., o cenách, ve znění pozdějších předpisů). Uplatňují se za elektřinu dodanou a naměřenou v předávacím místě výroby elektřiny a sítě provozovatele regionální distribuční soustavy nebo přenosové soustavy a dodanou výrobcem obchodníkovy s elektřinou nebo oprávněnému zákazníkovi a dále za ostatní vlastní spotřebu elektřiny podle vyhlášky č.475/2005 Sb. (kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů, ve znění pozdějších předpisů). Podle stejné vyhlášky se zelené bonusy neuplatňují za technologickou vlastní spotřebu.

V rámci jedné výroby elektřiny nelze kombinovat režim výkupních cen a režim zelených bonusů. Je-li v rámci výroby elektřiny uveden do provozu další zdroj nebo více dalších zdrojů, nebo splňuje-li jeden či více zdrojů v rámci jedné výroby elektřiny podmínky pro uplatnění od-

lišných výkupních cen, může výrobce uplatňovat odlišné výkupní ceny pro takové jednotlivé zdroje za předpokladu, že zajistí samostatné měření výroby elektřiny v souladu s vyhláškou č. 218/2001 Sb. (která stanoví podrobnosti měření elektřiny a předávání technických údajů) na jednotlivých vývodech ze zdrojů. V případě uplatnění podpory formou povinného výkupu se elektřina měřená fakturačním měřením rozdělí při fakturaci v poměru samostatně naměřených hodnot výroby elektřiny na jednotlivých zdrojích. V případě uplatnění podpory formou zelených bonusů se zelené bonusy uplatňují samostatně na každý zdroj podle naměřených hodnot.

Pokud se tedy výrobce rozhodne pro výkupní ceny, tak veškerou vyrobenou elektřinu prodá distributorovi. Ten je povinen ji odebrat. Výkupní cena je zafixovaná na 20 let, podle výkupní ceny z roku instalace elektrárny.

V případě, že se výrobce zelené elektřiny rozhodne pro zelené bonusy, je výkupní cena o něco nižší. Pokud ji ale dokáže sám spotřebovat, tak ji má vlastně zadarmo. To znamená, neplatí tuto energii distribuční společnosti. Energií, kterou nespotřebuje je vykupována distributorem v sazbě zelených bonusů.

Měření probíhá na dvou elektroměrech. První je zapojen u zdroje a měří celkovou vyrobenou elektřinu. Druhý je na přípojce a jedná se o čtyřkvadrantový elektroměr, který dovede počítat jak energii dodanou, tak energii spotřebovanou [18][19].

## 6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

### 6.1 Technické údaje FVE

Fotovoltaická elektrárna se nachází jižně od Brna v obci Střelice. Na střeše objektu je instalován systém pro výrobu elektrické energie ze slunce. Systém je tvořen 39 fotovoltaickými panely umístěnými na hliníkových profilech. Sklon střechy je  $40^\circ$  a je orientována na jih s azimutem  $182^\circ$ . Celkem je instalováno 30 monokrystalických fotovoltaických panelů Vitovolt 200 SC2 (Viessman) o výkonu 5,1 kWp (FVE 2) a 9 monokrystalických panelů SPV-180 W<sub>p</sub> (Schüco) o výkonu 1,6 kWp (FVE 1). Součástí systému jsou i dva fotovoltaické střídače Fronius IG 15 (FVE 1) a Fronius IG 40 (FVE 2), které přeměňují stejnosměrné napětí z fotovoltaických článků na střídavé napětí 230 V, 50 Hz. Měníče jsou vybaveny bezpečnostní ochranou zajišťující automatické odpojení od sítě v případě ztráty napětí a každý jen zapojen do jiné fáze. [20][21][23]

#### FVE 1 – 1,6 kWp

9 monokrystalických fotovoltaických panelů SPV-180 – SME – 1 (Schüco)

1 měnič Fronius IG 15

Tab. 6.1 Fotovoltaický panel SPV-180 – SME - 1(Schüco)

<b>Mechanické vlastnosti</b>			
Rozměry	( mm )	1580 x 808 x 40	
Hmotnost	( kg )	15,5	
Materiál	Eloxovaný stříbrný hliník, jednovrstvé bezpečnostní sklo		
<b>Elektrické parametry</b>			
Maximální výkon	$P_{\max}$	( W <sub>p</sub> )	180
Napětí max. výkonu	$U_{\text{mp}}$	( V )	35,4
Proud max. výkonu	$I_{\text{mp}}$	( A )	5,08
Napětí naprázdno	$U_{\text{OC}}$	( V )	44,4
Proud nakrátko	$I_{\text{SC}}$	( A )	5,35
Tolerance výkonu	$\Delta P_{\text{mp}}$	( % )	+5 %/-0 %
Účinnost článku		( % )	16,8
Účinnost modulu		( % )	14,7
Max.ss.napětí syst.	$U_{\max}$	( V )	1 000
Garance	12 roků 90 %    25 roků 80 %		



Tab. 6.2 Fotovoltaický střídač Fronius IG 15

<b>Mechanické vlastnosti</b>		
Rozměry	( mm )	366 x 344 x 220
Hmotnost	( kg )	9
<b>Elektrické parametry</b>		
Napěťový rozsah MPP	( V )	150 - 400
Maximální vstupní napětí	( V )	500
Výkon FV zařízení	( W <sub>p</sub> )	1300 - 2000
Jmenovitý výkon	( W )	1300
Maximální vstupní výkon	( W )	1500
Maximální účinnost	( % )	94,2
Euro účinnost	( % )	91,4
Síťové napětí/frekvence	( V/Hz )	220/50

**FVE 2 – 5,1 kW<sub>p</sub>**

30 monokrystalických fotovoltaických panelů Vitovolt 200 SC2 (Viessman)

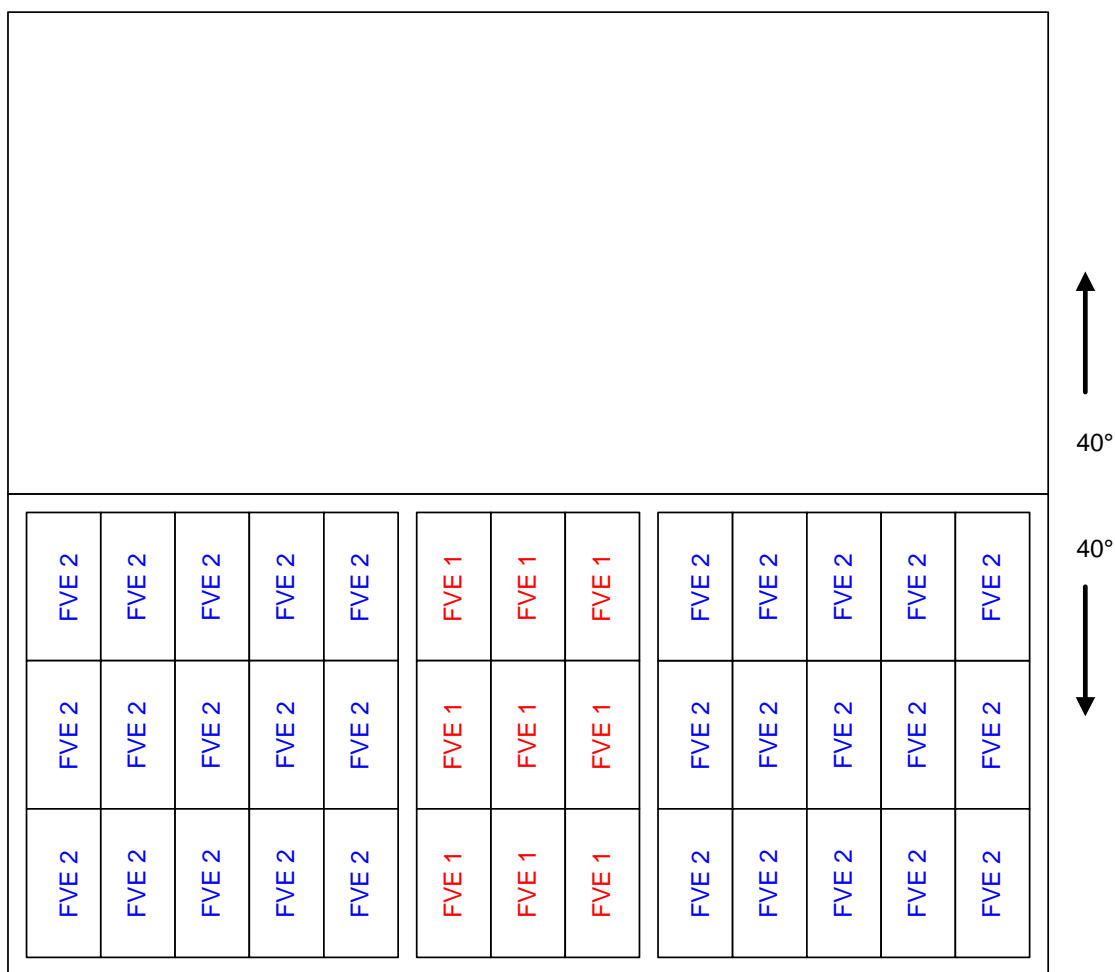
1 měnič Fronius IG 40

Tab. 6.3 Fotovoltaický panel Vitovolt 200 SC2

Materiál	Hliníkový rám, sklolaminát, borosilikátové sklo		
<b>Elektrické parametry</b>			
Maximální výkon	$P_{max}$	( W <sub>p</sub> )	170
Napětí max. výkonu	$U_{mp}$	( V )	35,2
Proud max. výkonu	$I_{mp}$	( A )	4,83
Napětí naprázdno	$U_{OC}$	( V )	43,8
Proud nakrátko	$I_{SC}$	( A )	5,14
Tolerance výkonu	$\Delta P_{mp}$	( % )	± 5 %
Účinnost modulu		( % )	13,31
Max.ss.napětí syst.	$U_{max}$	( V )	1 000
Garance	12 roků 90 %    25 roků 80 %		

Tab. 6.4 Fotovoltaický střídač Fronius IG 40

<b>Mechanické vlastnosti</b>		
Rozměry	( mm )	610 x 344 x 220
Hmotnost	( kg )	16
<b>Elektrické parametry</b>		
Napěťový rozsah MPP	( V )	150 - 400
Maximální vstupní napětí	( V )	500
Výkon FV zařízení	( Wp )	3500 -5500
Jmenovitý výkon	( W )	3500
Maximální vstupní výkon	( W )	4100
Maximální účinnost	( % )	94,3
Euro účinnost	( % )	93,5
Síťové napětí/frekvence	( V/Hz )	220/50



Obr. 6.1 Rozmístění fotovoltaických panelů na střeše RD

V **tabulkách 6.1 až 6.4** jsou vypsány mechanické a elektrické parametry fotovoltaických panelů a střídačů napětí použitých v měřené fotovoltaické elektrárně. Na **obrázku 6.1** vidíme rozmístění fotovoltaických panelů na střeše rodinného domku. Na **obrázku 6.2** je zachycen pohled na celou fotovoltaickou elektrárnu.



*Obr. 6.2 Umístění fotovoltaické elektrárny na střeše rodinného domu*

## 6.2 Odhad výroby

Pro odhad výroby z fotovoltaické elektrárny byl použit systém PVGIS (Fotovoltaický geografický informační systém – Photovoltaic Geographical Information System), vyvinutý vědeckou službou Evropské komise – Společným centrem pro výzkum. Tento systém umožňuje uživatelům odhadnout intenzitu slunečního záření na jakémkoliv místě v Evropě. Přesnost systému je dána statistickým sběrem dat, který probíhal v letech 1985-1995 v celé Evropě, která byla rozdělena na plochy o velikosti 1 x 1 km. Zde byly pravidelně odečítány hodnoty intenzity slunečního záření, teploty, apod.

Pomocí interaktivních map a počítačových simulací můžeme mimo jiné odhadnout potenciální výrobu z fotovoltaického systému v jednotlivých měsících. Výpočet se provádí podle vzorce:

$$E = 365 \cdot P_k \cdot r_p \cdot H_{h,i}$$

$P_k$  (kWp) - špičkový instalovaný výkon systému

$r_p$  - odhadovaný výkonnostní poměr systému, obvyklá hodnota pro střešní systémy z mono- nebo polykrystalických křemíkových modulů je 0,75

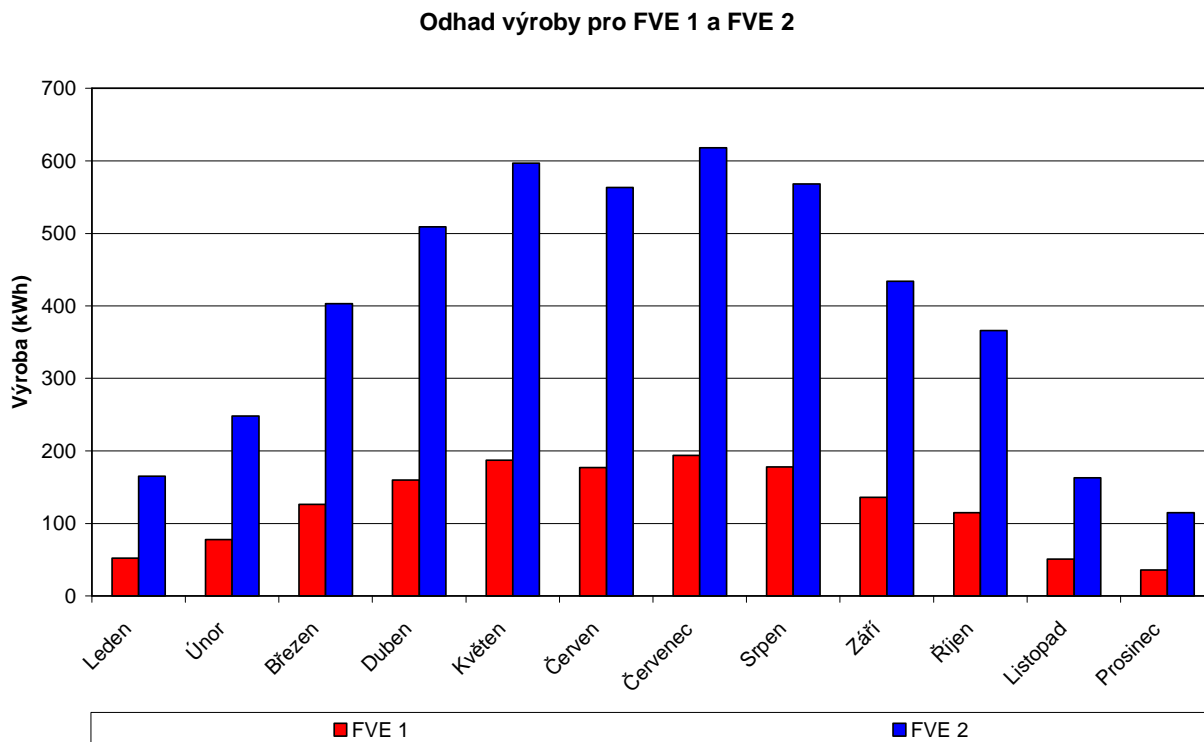
$H_{h,i}$  - měsíční nebo roční průměr intenzity globálního záření na vodorovný a nakloněný povrch

Při výpočtu se uvažovalo lokalitou Brno (49°11'49" sever, 16°36'37" východ, nadmořská výška: 222 m. n. m., sklonu modulů 40°, orientaci modulů (azimut) 182°, odhadované ztráty vlivem teploty 6,9 % (použita databáze teplot), odhadované ztráty vlivem úhlové odrazivosti 2,9 %, ostatní ztráty (kabely, měniče, atd.) 14 %. Celkové ztráty systému pak 23,8 % [9].

Výsledek výpočtu pro obě fotovoltaické elektrárny nám ukazuje **tabulka 6.5**. Pro lepší přehlednost jsou údaje převedeny do grafické podoby **obrázek 6.2**.

Tab. 6.5 Odhad vyrobené energie fotovoltaické elektrárny

Měsíc	Odhad výroby (kWh)	
	FVE 1	FVE 2
Leden	52	165
Únor	78	248
Březen	126	403
Duben	160	509
Květen	187	597
Červen	177	563
Červenec	194	618
Srpen	178	568
Září	136	434
Říjen	115	366
Listopad	51	163
Prosinec	36	115
Celková roční výroba (kWh/rok)	1490	4749



Obr. 6.2 Graf odhadnuté výroby z fotovoltaické elektrárny

### 6.3 Skutečná výroba

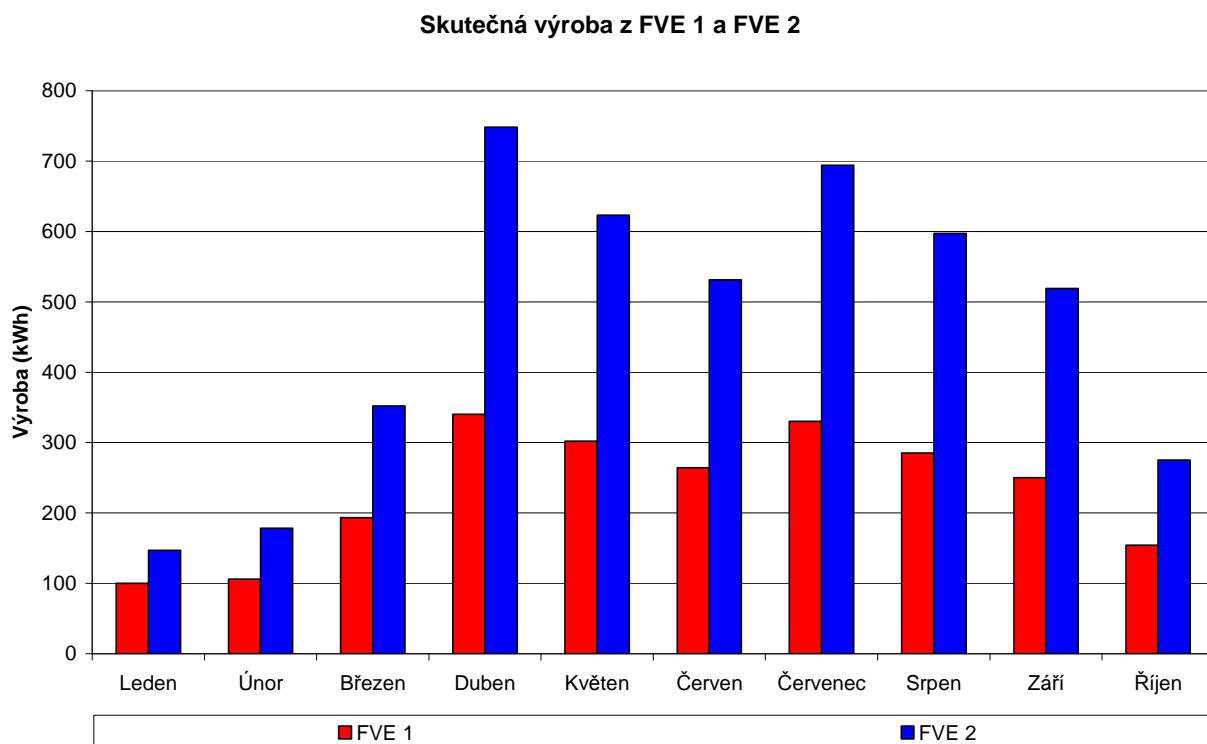
Pro měření skutečné výroby energie z fotovoltaické elektrárny byl použit měřicí přístroj firmy EGÚ Brno, a. s. MDS 10. Tento přístroj umožňuje dlouhodobý monitoring v elektrických sítích. Měří efektivní hodnotu napětí, proudů a účinnky v sítích nn, vn a vvn. Provádí minutový záznam maxim, minim a průměrných hodnot zadaných veličin. Tyto naměřené údaje pak můžeme zpracovat. Pomocí softwaru vypočteme skutečnou výrobu z jednotlivých FVE pro každý měsíc. Měření se uskutečnilo v období od 1. 1. 2009 do 31. 10. 2009. Z tohoto důvodu nejsou předloženy výsledky za listopad a prosinec. Také celková výroba je jen za 10 měsíců. Naměřené hodnoty byly průběžně kontrolovány s elektroměrem. Naměřené hodnoty se lišily  $\pm 1\%$ . [24]

V **tabulce 6.6** a na **obrázku 6.3** můžeme vidět skutečnou výrobu z obou elektráren v jednotlivých měsících. Zatímco odhadnutá výroba energie je přímo úměrná instalovanému výkonu fotovoltaické elektrárny, její skutečná výroba tomuto neodpovídá. Tento rozdíl je patrný nejen v zimních měsících, ale i v letních měsících, kdy předpokládáme pěkné počasí s přímým slunečním zářením.

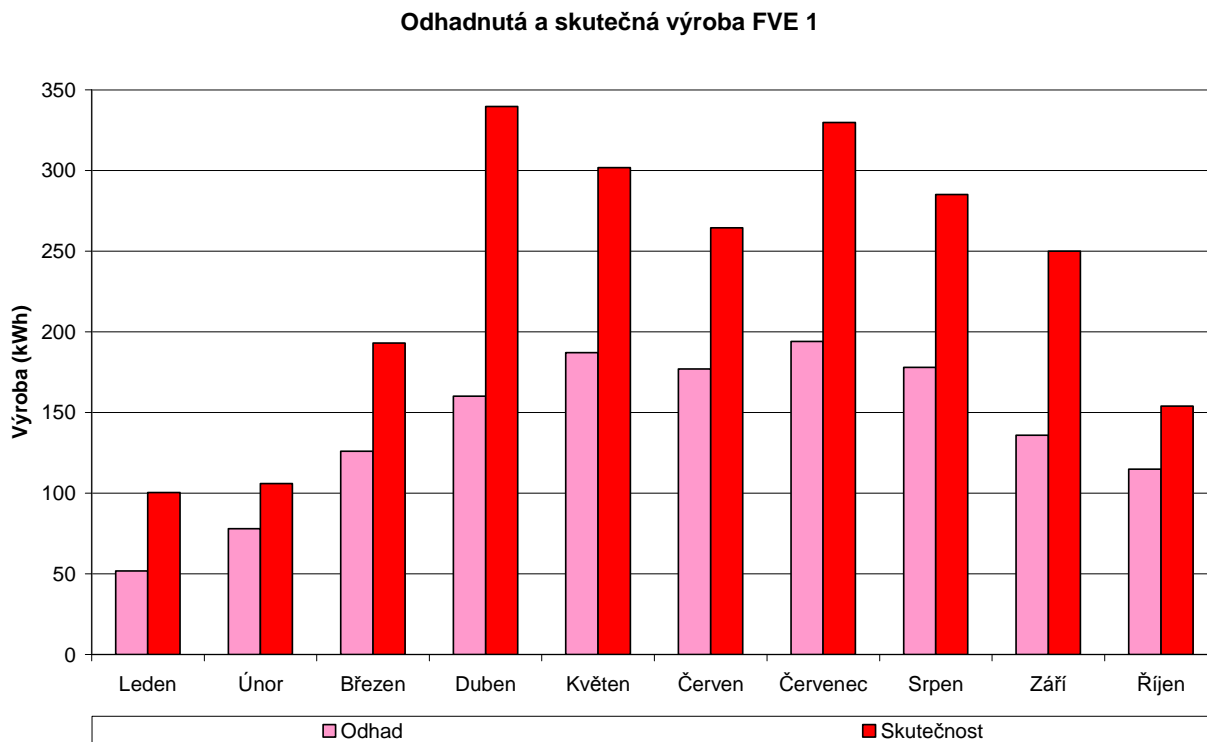
Menší fotovoltaická elektrárna nám vyprodukovala oproti odhadu daleko více energie. Nejvíce je to vidět v měsíci dubnu, kdy činila výroba více jak dvojnásobek oproti předpokladu. Velký procentní rozdíl je také za měsíc leden. V tomto období bylo vyrobeno téměř dvojnásobné množství energie, než bylo vypočteno. Dalším měsícem s velkým rozdílem je září. Nejmenší rozdíl je v měsíci únoru, kdy odhad byl asi 80 % ze skutečnosti. Porovnání odhadnuté a skutečně vyrobené energie vyrobené FVE 1 je vidět z grafu na **obrázku 6.4**.

Tab. 6.6 Skutečná výroba z fotovoltaické elektrárny v období I. - X. 2009

Měsíc	Skutečná výroba (kWh)	
	FVE 1	FVE 2
Leden	100	147
Únor	106	178
Březen	193	352
Duben	340	748
Květen	302	623
Červen	264	531
Červenec	330	694
Srpen	285	597
Září	250	519
Říjen	154	275
Celková výroba (kWh/)	2324	4664



Obr. 6.3 Graf skutečné výroby fotovoltaické elektrárny z období I. - X. 2009



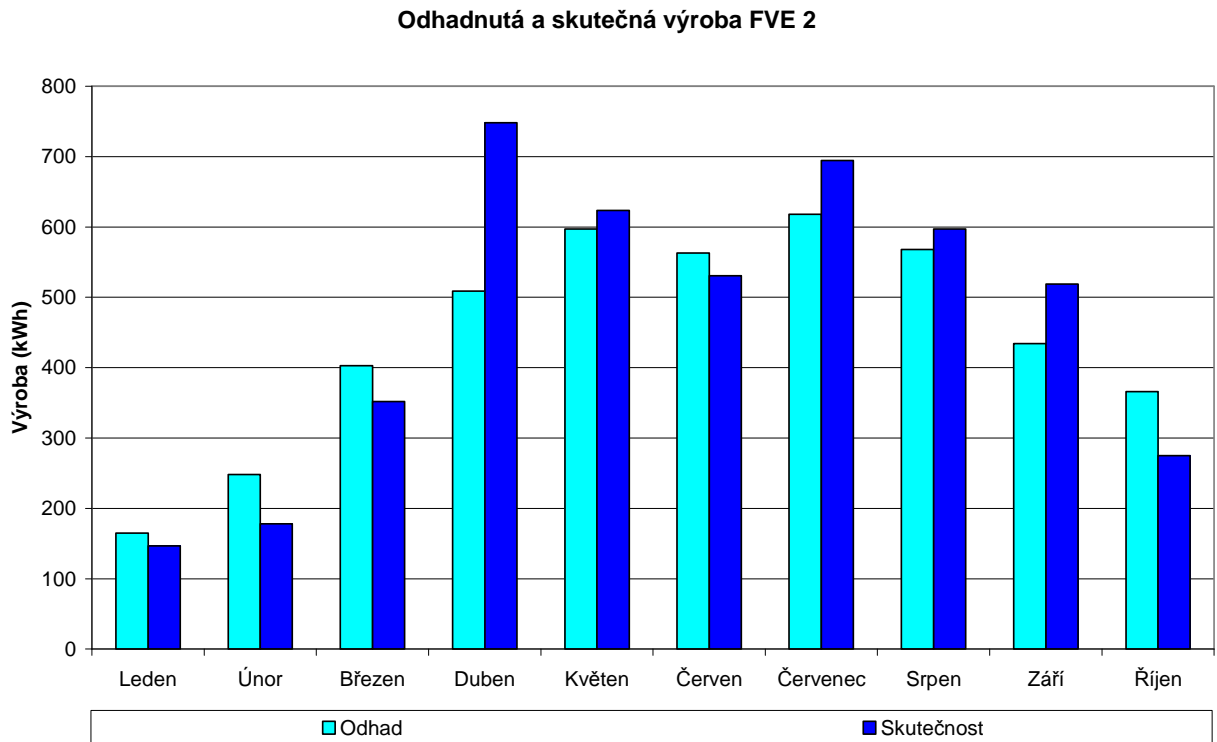
Obr. 6.4 Porovnání odhadnuté a skutečné výroby FVE 1 za období I. - X. 2009

U větší fotovoltaické elektrárny takové velké rozdíly nejsou. V některých měsících je odhad výroby o něco větší než skutečná výroba a v některých je tomu naopak. Opět se nám zde projevil měsíc duben, kdy bylo extrémně pěkné počasí, které výrazně vylepšilo výrobu. Na **obrázku 6.5** vidíme grafické porovnání odhadnuté a skutečně vyrobené energie z FVE 2.

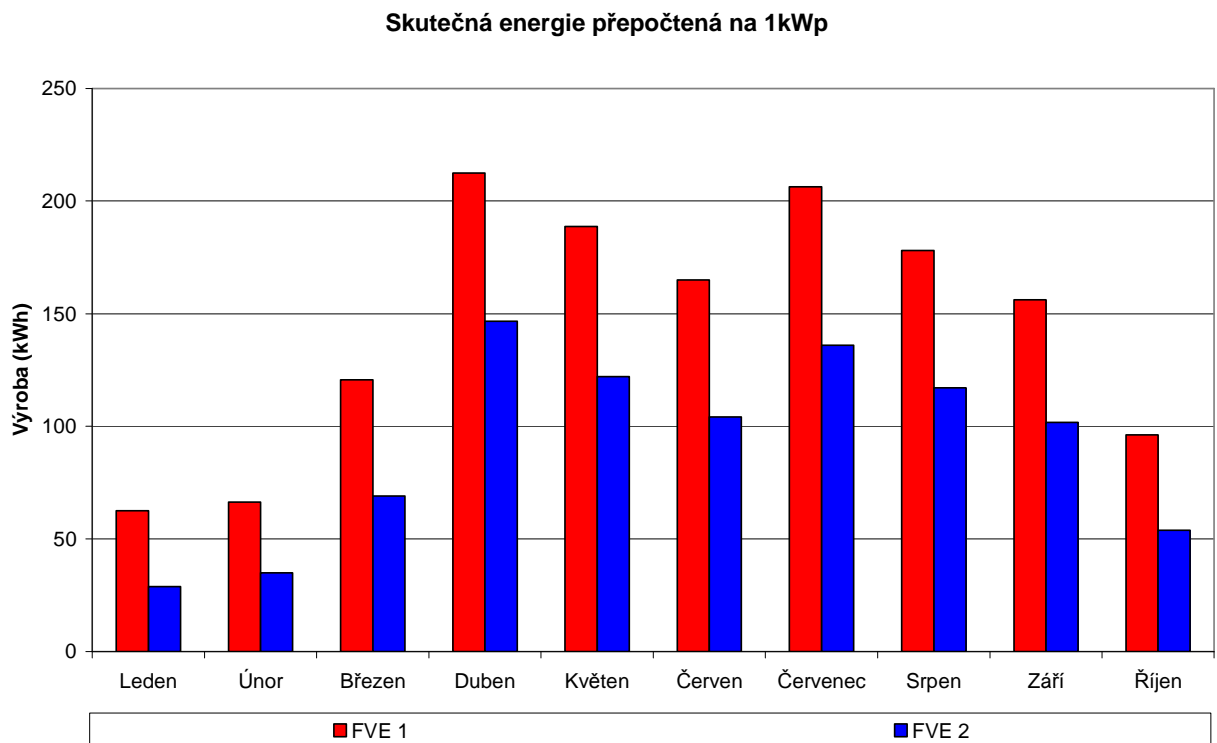
Pokud porovnáme výsledky z obou elektráren, tak menší elektrárna nám vyrobila oproti předpokladu o 60 % více elektrické energie. U větší fotovoltaiky byl odhad výroby jen nepatrně větší vzhledem ke skutečnosti.

Pro lepší srovnání byl proveden přepočítaný výkon vyrobené energie na instalovaný výkon. Vyrobená energie v jednotlivých měsících byla podělena instalovaným výkonem fotovoltaické elektrárny. Na **obrázku 6.6** pak vidíme graf skutečně vyrobené energie přepočtené na 1 kWp. Je zde opět vidět lepší využití menší elektrárny, která v zimních měsících dosahuje 2krát lepšího výkonu.

Rozdíl výroby mezi oběma elektrárnami by mohl být v zimních měsících způsoben zasněžením určité části panelů. Tato skutečnost nejde již nyní objektivně prokázat. Pravděpodobnější však je, jak vyplývá z dalších výsledků měření, že tomu tak není. Panely jsou umístěny vedle sebe na jedné střeše, takže je předpoklad, že případné množství sněhu bude stejné na všech panelech obou elektráren.



Obr. 6.5 Porovnání odhadnuté a skutečné výroby FVE 2 za období I. - X. 2009



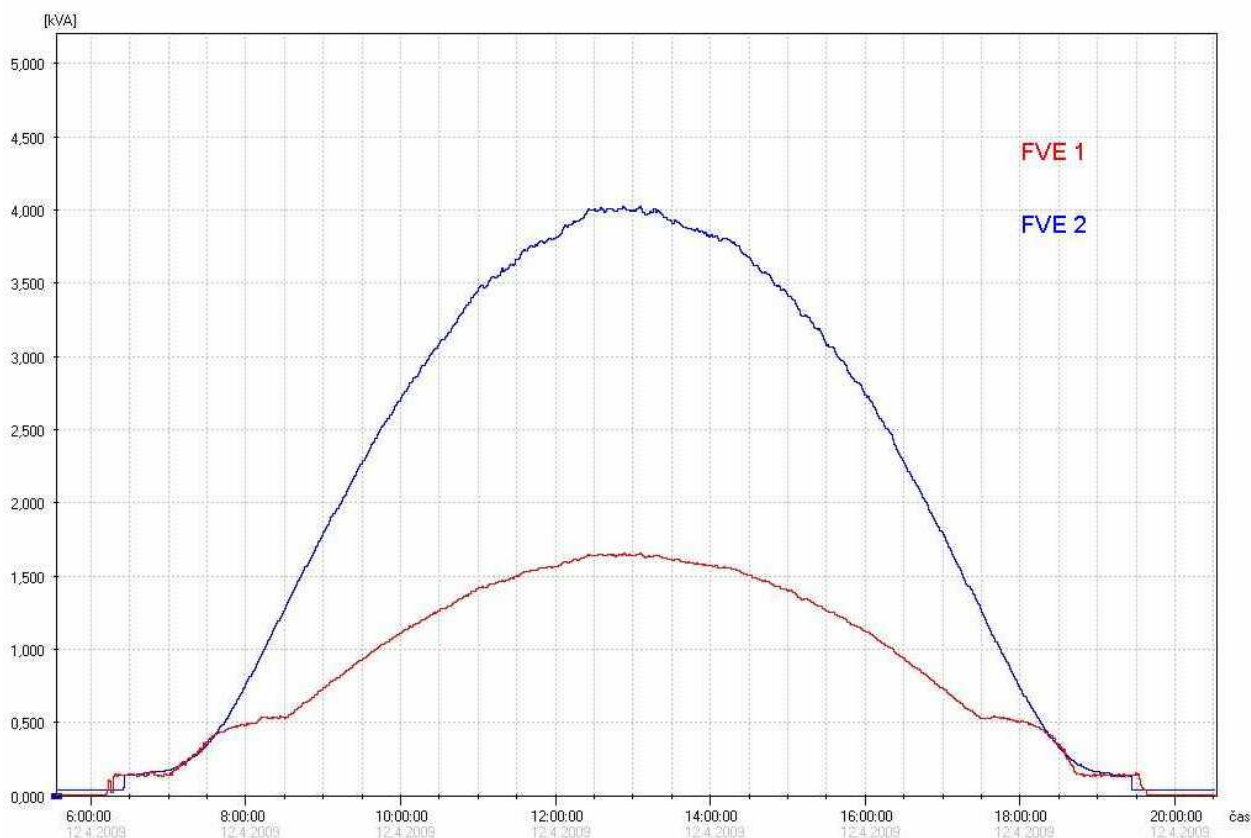
Obr. 6.6 Graf skutečné energie přepočtené na 1 kWp



## 6.4 Průběhy výkonů během dne

Na **obrázku 6.7** vidíme průběh výkonů dodávaných do sítě z FVE 1 a FVE 2 za bezoblačného slunečného dne. V ranních a večerních hodinách, kdy převládá difúzní záření, dodávají obě elektrárny do sítě stejný výkon. Během dne, kdy začne přibývat přímého slunečního záření, se začne zvedat výkon obou elektráren. Svého maxima dosáhne okolo 13 hod. (letního času). U menší elektrárny byla naměřena hodnota 7,1 A, která odpovídá instalovanému výkonu (1,6 kWp). Větší elektrárna (5,1 kWp) by měla dávat proud okolo 22 A. Ve skutečnosti jsme však naměřili přibližně 17,5 A, což jsou asi 4 kW.

Měřením tedy bylo zjištěno, že zatímco FVE 1 dosáhne během slunečného dne 100 % svého instalovaného výkonu, tak druhá elektrárna pracuje na hranici 80 % ze svého maxima. Toto může být způsobeno vadou fotovoltaického panelu. Bohužel přístup na střechnu neumožňuje měření jednotlivých panelů a tím přesné zjištění závady. Druhým vysvětlením je horší účinnost solárních panelů, které byly levnější. Elektrické parametry (viz. **tabulka 6.1** a **tabulka 6.3**) nám ukazují, že panely firmy Schüco mají toleranci výkonu + 5 % / - 0 %. Naproti tomu panely firmy Viessman mají toleranci výkonu  $\pm 5\%$ .



Obr. 6.7 Průběh výkonů dodávaných do sítě z FVE 1 a FVE 2 za slunečného dne

Průběh výkonů za oblačného dne, kdy je záření prakticky jen difúzní, nám ukazuje **obrázek 6.8**. FVE 1 dodávala do sítě prakticky stejný výkon po celý den, a to 130 VA. FVE 2 začala pracovat o půl hodiny později s výkonem 60 VA, který v dopoledních hodinách postupně narůstal na 140 VA. V 14.30 hod. nastal opět pokles výkon až do 16.10 hod., kdy elektrárna přestala vyrábět. Druhá elektrárna pracovala s menšími výpadky až do 17.25 hod. Paradoxně tedy tento den, kdy

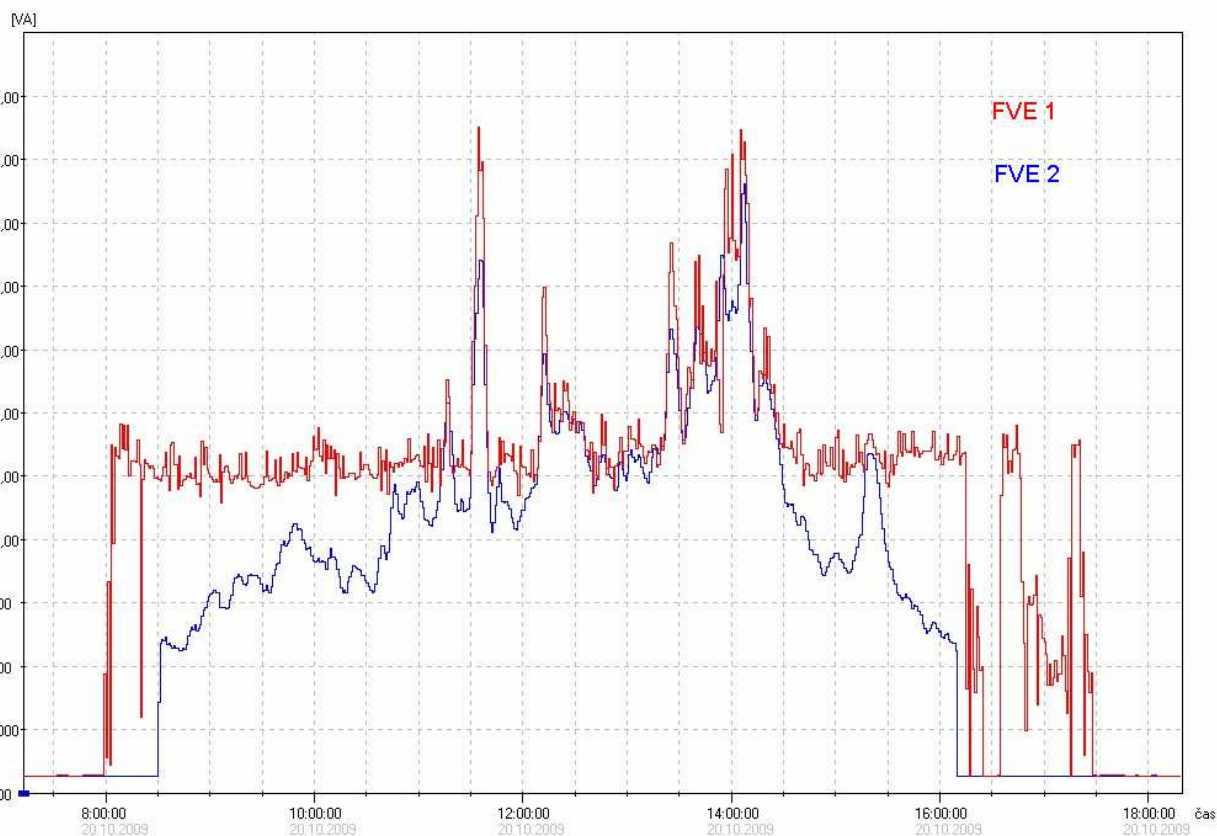
bylo zataženo a tedy převládalo difúzní záření, vyrobila více energie elektrárna s menším instalovaným výkonem. Takovýchto dnů ale bylo během měření jen několik.

V průběhu roku bývá nejvíce dnů s malou nebo velkou oblačností. Mračna nám zastíní fotovoltaický panel a dojde k poklesu výkonu. O tom jak rychle se mění výkon fotovoltaické elektrárny, se můžeme přesvědčit na **obrázku 6.9**, kdy skoro po celý den bylo zataženo. Okolo 13 hodiny, tedy v době kdy FVE může vyrábět nejvíce energie, se vyjasnilo. Fotovoltaické panely, které nebyly během dne rozehráté (teplota snižuje výkon článků) začaly během 3 minut vyrábět plný výkon. Detail nám ukazuje **obrázek 6.10**. Výkon na FVE 1 se vyšplhal z 0,5 kVA na 1,8 kVA. To představuje nárůst více jak 300 % během 3 minut.

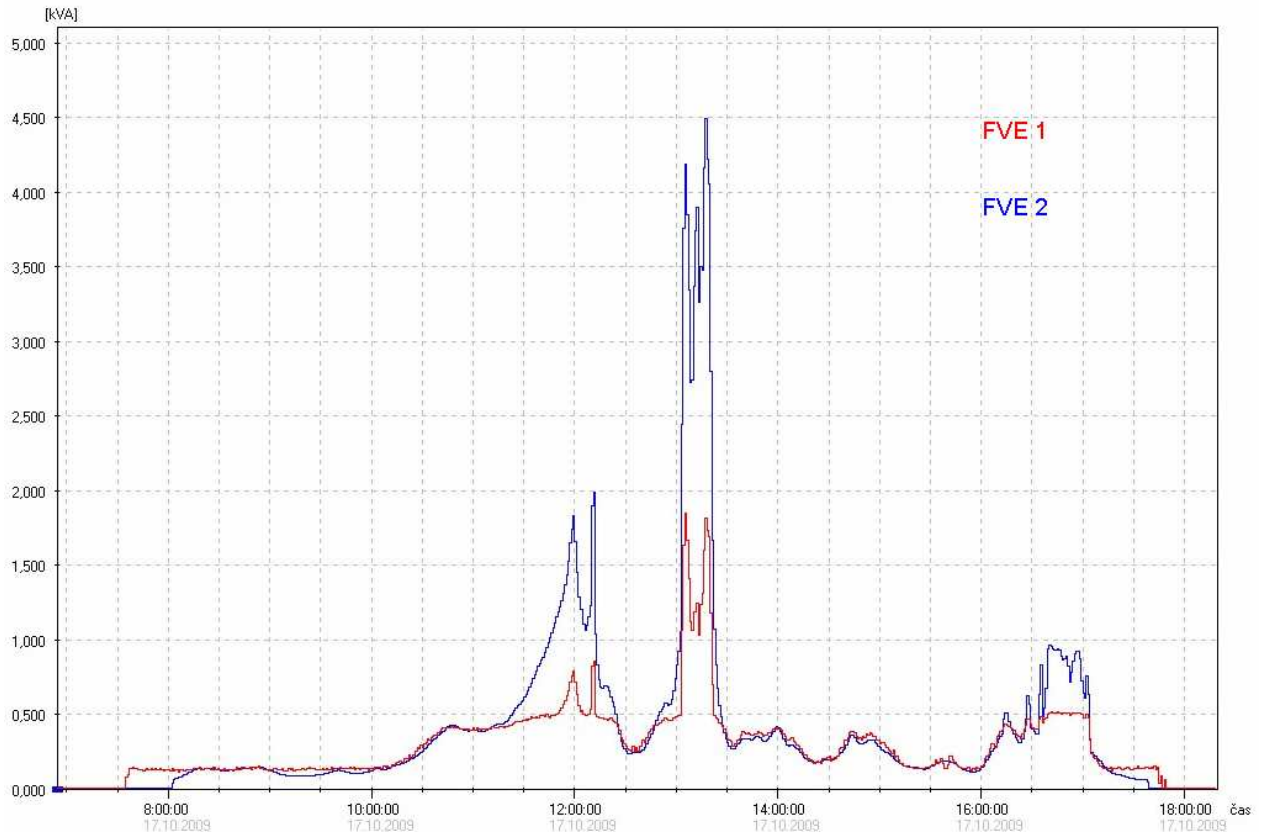
FVE 2 v této době dosáhla 4,5 kVA, z původních 0,6 - 1 kVA. Výkon elektrárny tak během 3 minut stoupl více jak o 400 %. Tento stav trval přibližně 15 minut. Potom došlo opět k velkému poklesu výkonu. V průběhu asi 5 minut klesl výkon obou elektráren na původní hodnotu, tj. 0,5 kVA respektive 1 kVA.

Výkon fotovoltaické elektrárny může mít během krátké doby strmý nárůst, který nelze předvídat. Stejně tak může dojít prudkému poklesu výroby. Je zřejmé, že k největšímu nárůstu nebo poklesu výroby může dojít v poledních hodinách, tedy v době, kdy fotovoltaická elektrárna dosahuje svého maxima výroby.

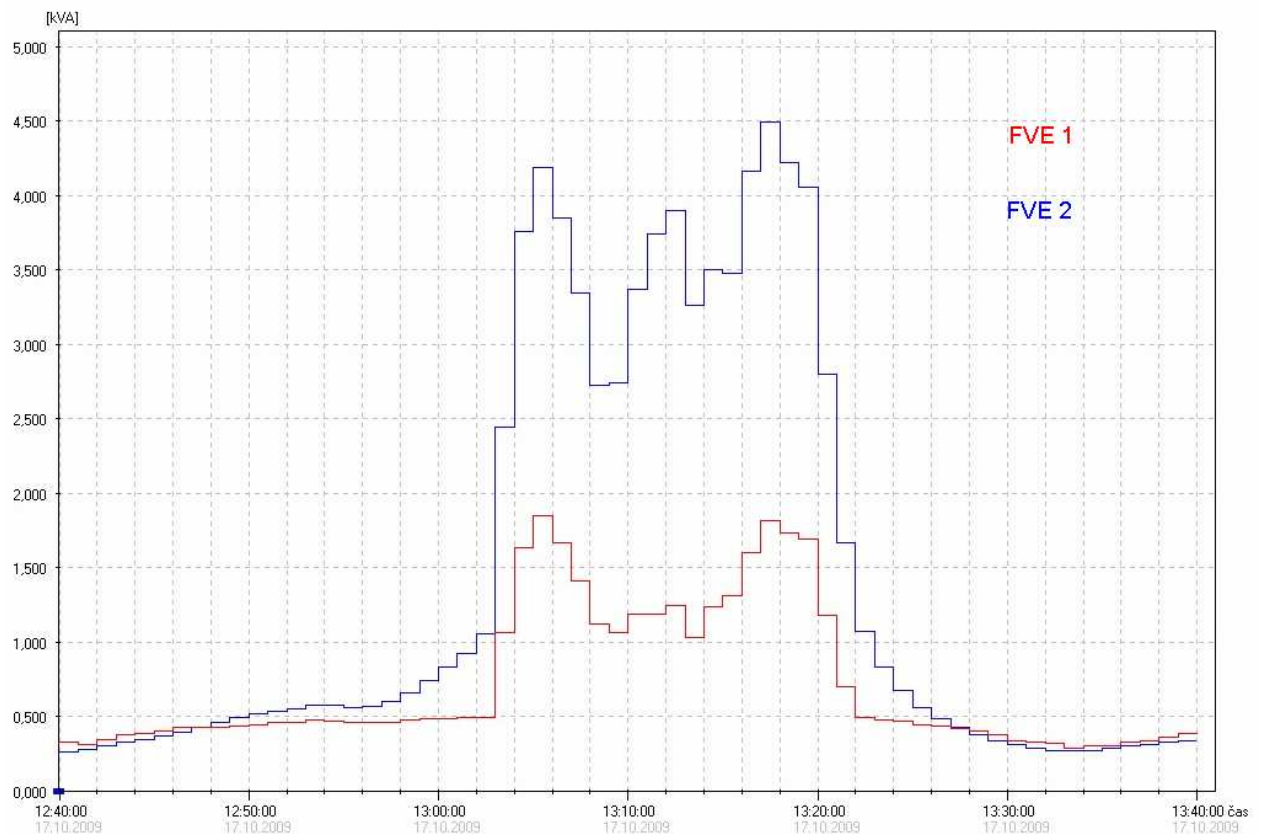
Pro doplnění je potřeba uvést, že jmenovitý výkon fotovoltaického panelu se počítá při standardních podmínkách STC (Standart Test Conditions). Intenzita ozáření je  $1000 \text{ W/m}^2$ , teplota článku je  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a hodnota AM (Air Mass) je 1,5. Nižší teplota článku a větší intenzita ozáření může tedy způsobit, že panely FVE 1 budou dodávat větší jak maximální výkon.



Obr. 6.8 Průběh výkonů dodávaných do sítě z FVE 1 a FVE 2 za oblačného dne



Obr. 6.9 Průběh výkonů dodávaných do sítě při vyjasnění slunce



Obr. 6.10 Detail z extrémního nárůstu výkonu při vyjasnění slunce

## 6.5 Statistické rozložení výroby z FVE

Jak je zřejmé nejen z výsledků měření, ale také z fyzikálního principu výroby z fotovoltaických článků, je průběh výkonů během dne nestejný. Je závislý zejména na intenzitě slunečního záření, úhlu dopadu slunečních paprsků, ale také teplotě panelů a znečištění ovzduší. Z praxe je patrné, že nejvíce energie se bude vyrábět v době, kdy je nejdelší slunečný den, a naopak nejméně energie se vyrobí v zimě, kdy nejenom, že jsou dny kratší, ale sníh může zakrýt fotovoltaické panely.

Pokud chceme zjistit rozložení výroby během dne, můžeme využít matematickou statistiku, která vychází ze shromážděných naměřených dat. Pomocí ní můžeme usuzovat na charakter procesu, tedy například jak často pracuje FVE na jmenovitý výkon, na kolik procent z maximálního výkonu vyrábí nejčastěji v jednotlivých obdobích, atd. Tyto údaje nám mohou být užitečné, pokud chceme znát kdy a kolik energie můžeme využít.

### Matematická statistika - četnost

Statistickým zkoumáním určitého statistického souboru dostáváme většinou velký počet údajů o jeho statistických znacích. Aby byl tento materiál přehledný a my jej mohli dál zpracovávat, je potřeba ho nejdříve utřídit. Statistické třídění spočívá v rozčlenění statistického souboru do menších stejnorodějších částí, které nazýváme třídami. Za kritérium třídění je možno vzít jeden nebo více znaků.

Počet prvků statistického souboru, které patří do  $k$ -té třídy, se nazývá četnost (absolutní četnost) prvků v  $k$ -té třídě; budeme ji značit  $N_k$ . Podíl  $v_k = \frac{N_k}{N}$ , kde  $N$  je rozsah uvažovaného statistického souboru, se nazývá relativní (poměrná) četnost prvků v  $k$ -té třídě. Vyjadřuje se jako desetinné číslo nebo v procentech.

Součet všech četností prvků v první až  $k$ -té třídě  $N'_k = \sum_{i=1}^k N_i$  se nazývá kumulativní četnost prvků v  $k$ -té třídě. Součet všech relativních četností prvků v první až  $k$ -té třídě  $v'_k = \sum_{i=1}^k v_i$  se nazývá kumulativní relativní četnost prvků v  $k$ -té třídě.

Histogram četnosti je horní obrys množiny obdélníků, jejichž základny jsou na ose  $x$ , mají délky rovné délce třídních intervalů a jejich výšky jsou rovny absolutním nebo relativním četnostem.

Polygon četnosti je lomená čára, která se skládá z úseček spojujících postupně středy horních stran histogramu četnosti. Je-li délka všech tříd stejná, připojujeme na obou koncích histogramu na ose  $x$  intervaly dané délky a v jejich středu volíme počáteční a koncový polygon.

### Histogram výroby

Měřicí přístroj MDS 10 nám umožňuje zobrazit statistická data ve zvoleném datovém souboru. V praxi to znamená, že pokud chci měřit statistické údaje, musím přesně zvolit start

a konec měření. Vyhodnocení výsledků potom vidíme ve třídách, které jsou po 10% měřicího rozsahu. V každé třídě je počet minut, ve kterých se minutový průměr dané veličiny pohyboval.

Pro naše měření není tato funkce vhodná. Můžeme však využít další možnost, kterou nám tento přístroj poskytuje, tj. export textových dat. Tato volba umožňuje exportovat data do textového souboru csv, který je čitelný například programem Microsoft Excel. Data uložená v nativním formátu MDS 10 (\*.mds) jsou binární a bez znalosti vnitřní struktury naprosto nečitelná. Dají se ale snadno a rychle strojově číst a nezabírají na disku zbytečné místo.

Pro další zpracování dat jsem volil funkci Četnost (Microsoft Excel) a rozdělil je po jednotlivých měsících do 6 – ti tříd.

- 0 % .....nulový výkon, elektrárna nevyrábí
- 0 – 20 % .....nula až dvacet procent výkonu elektrárny
- 20 – 40 % .....dvacet až čtyřicet procent výkonu elektrárny
- 40 – 60 % .....čtyřicet až šedesát procent výkonu elektrárny
- 60 – 80 % .....šedesát až osmdesát procent výkonu elektrárny
- nad 80 % .....osmdesát a více procent výkonu elektrárny

Výkonem elektrárny se rozumí maximální výkon (Wp).

Výsledné zpracování v **tabulkách 6.7 a 6.8** a **grafech 6.11 a 6.12** nám ukazuje relativní četnost výroby v jednotlivých měsících u obou FVE za celý den. Na obou grafech je dobře vidět zejména doba kdy elektrárny nepracují, tzn., kdy nesvítí slunce. To je pochopitelně dáno délkou slunečného dne. V zimních měsících dosahuje přes 60 %, v letních měsících něco přes 35 %. Elektrárny tedy i v době, kdy je slunečný den nejdelší vyrábí jen necelou 1/3 z celkového denního času. V zimních měsících jsou dokonce 2/3 času mimo provoz.

Zatímco menší FVE vyrábí v rozsahu 0 – 20 % mezi 11 až 22 % z celkového času, tak u druhé elektrárny je to mezi 20 až 36 %. V další třídě (20 – 40 %) činí výroba u FVE 1 mezi 10 až 26-ti % a u FVE 2 mezi 2 až 12-ti %. Ve třídách 40 – 60 % a 60 – 80 % je doba výroby u FVE 1 maximálně 7 % a u FVE 2 maximálně necelých 14 %. Ve většině případů se ale pohybuje okolo 6 – 7 % respektive 8 – 9 %.

Za povšimnutí také stojí, že výroba u FVE 1 v rozsahu nad 80 % dosahuje např. v měsíci dubnu 16 % a v dalších i 10 – 12 %, tak u FVE 2 nepřesahuje nikdy hranici 1 %.

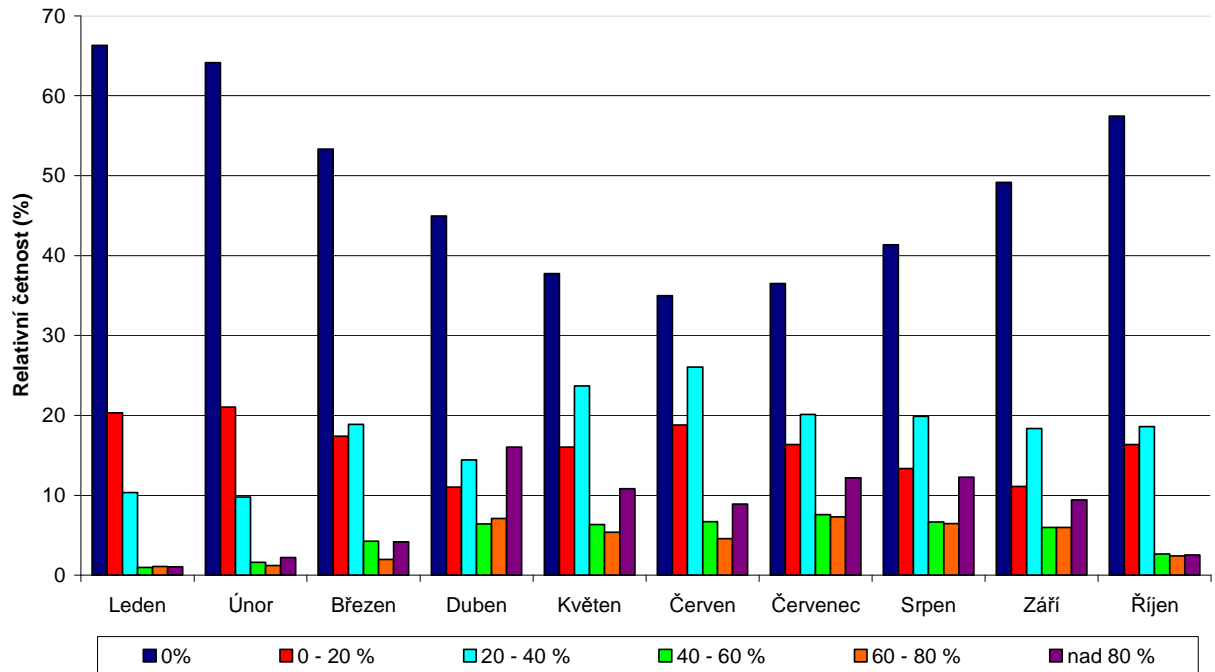
Tab. 6.7 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 1 (za 24 hod)

	0 %	0 – 20 %	20 – 40 %	40 – 60 %	60 – 80 %	Nad 80 %
Leden	66,3	20,3	10,4	1,0	1,1	1,0
Únor	64,1	21,0	9,8	1,6	1,2	2,2
Březen	53,3	17,4	18,9	4,2	2,0	4,2
Duben	45,0	11,0	14,4	6,4	7,1	16,0
Květen	37,8	16,0	23,7	6,4	5,4	10,8
Červen	35,0	18,8	26,1	6,7	4,6	8,9
Červenec	36,5	16,4	20,1	7,6	7,3	12,2
Srpen	41,4	13,3	19,9	6,7	6,5	12,3
Září	49,2	11,1	18,4	6,1	6,0	9,4
Říjen	57,5	16,4	18,6	2,7	2,4	2,5

Tab. 6.8 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 2 (za 24 hod)

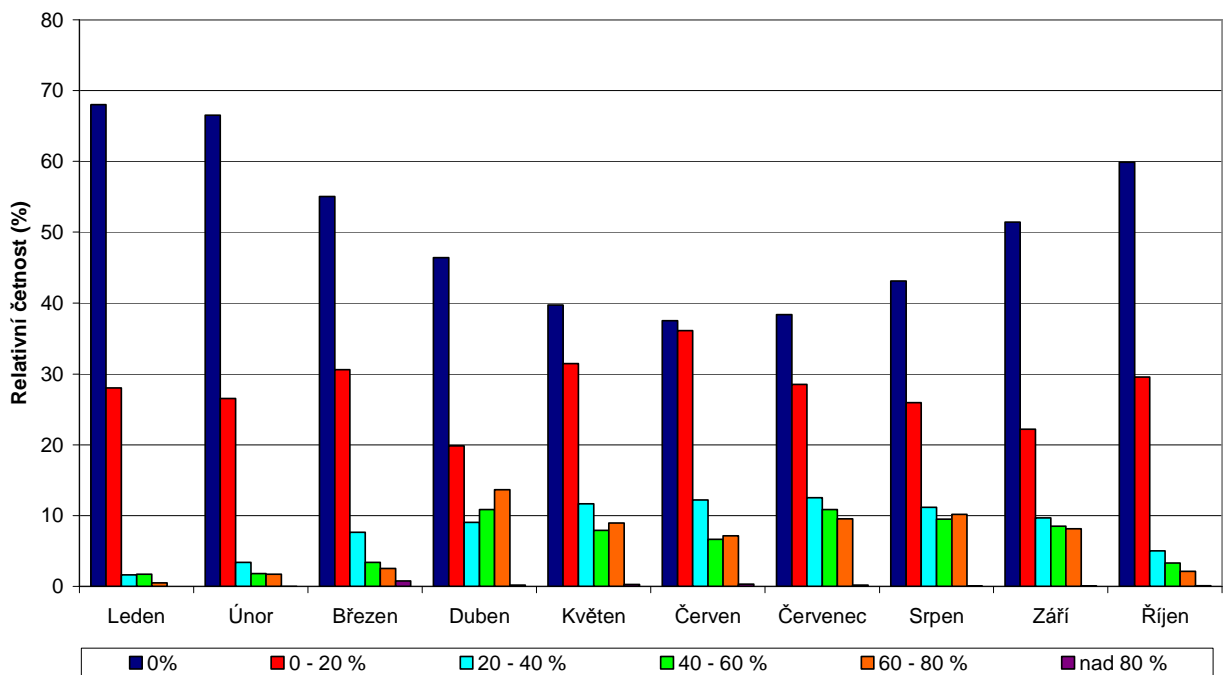
	0 %	0 – 20 %	20 – 40 %	40 – 60 %	60 – 80 %	Nad 80 %
Leden	68,0	28,0	1,7	1,7	0,5	0,0
Únor	66,5	26,5	3,4	1,8	1,7	0,0
Březen	55,0	30,6	7,6	3,4	2,6	0,8
Duben	46,4	19,9	9,1	10,9	13,7	0,2
Květen	39,7	31,5	11,6	7,9	9,0	0,3
Červen	37,5	36,1	12,2	6,6	7,2	0,3
Červenec	38,4	28,5	12,5	10,8	9,5	0,2
Srpen	43,1	26,0	11,2	9,5	10,2	0,1
Září	51,4	22,2	9,7	8,5	8,2	0,1
Říjen	59,9	29,6	5,0	3,3	2,1	0,1

Histogram FVE 1



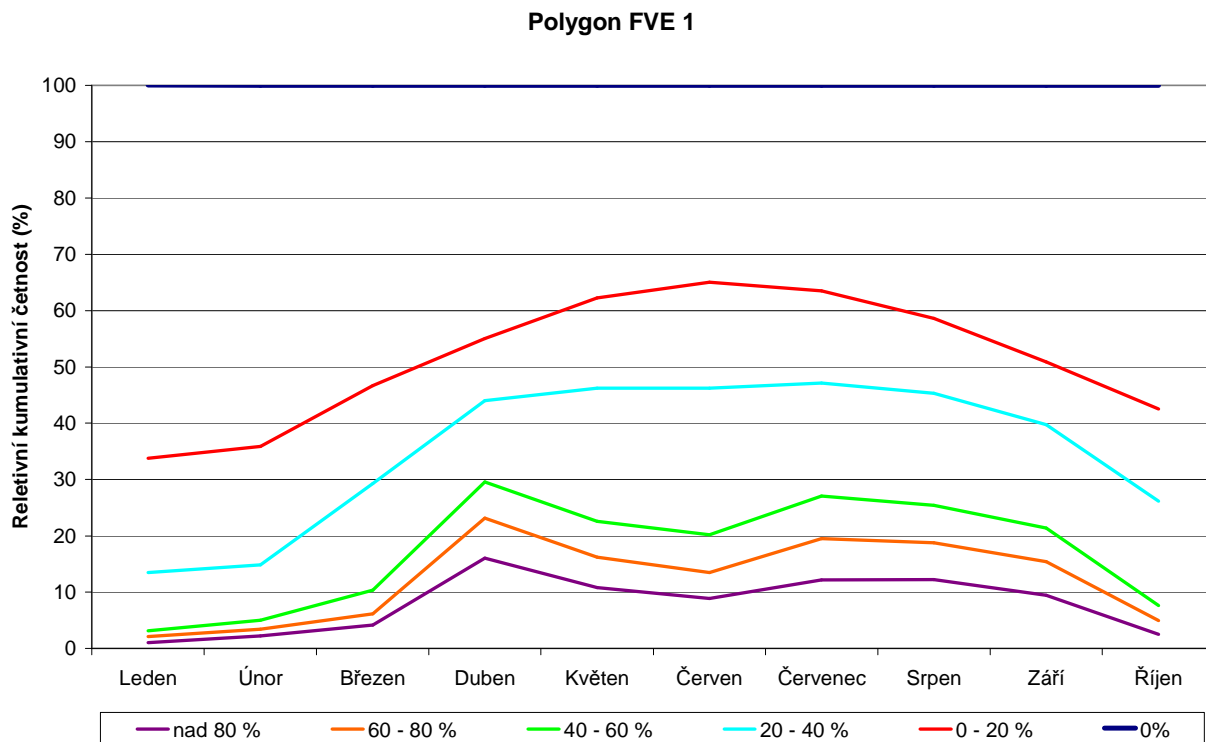
Obr. 6.11 Histogram výroby z FVE 1 (za 24 hod)

Histogram FVE 2

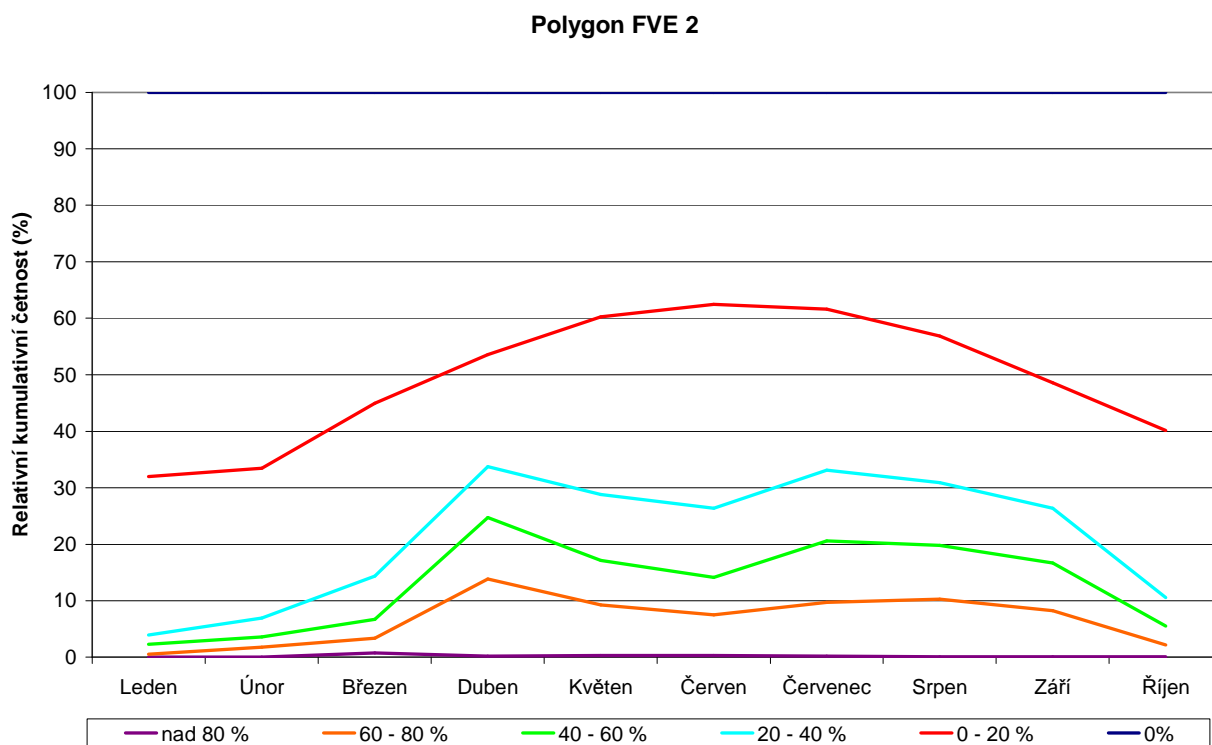


Obr. 6.12 Histogram výroby z FVE 2 (za 24 hod)





Obr. 6.13 Polygon výroby z FVE 1 (za 24 hod)



Obr. 6.14 Polygon výroby z FVE 2 (za 24 hod)



Na **obrázku 6.13** vidíme relativní kumulativní četnost výroby z FVE 1. V zimních měsících (leden a únor) vyrábí elektrárna prakticky jen v rozsahu 0 – 20 % z instalovaného výkonu nebo vůbec. V měsících, které jsou příznivé pro FVE (duben až září) pracuje v rozsahu 0 – 40 % pouze necelých 50 % z celkového času (za 24 hod). FVE 2 pracuje ve stejném rozsahu (0 – 40 %) jen okolo 30 % z celkového času (**obrázek 6.14**). Z obou obrázků je opět vidět, že FVE 2 vyrábí v rozsahu nad 80 % jmenovitého výkonu v zanedbatelném čase. Menší elektrárna pracuje ve stejném rozsahu okolo 10 % z celkového času.

Jak je vidět, tak fotovoltaická elektrárna produkuje elektřinu od 1/3 do 2/3 z celkového denního času. Pokud chceme vědět rozložení výroby jen za aktivní dobu elektrárny, musíme odečíst vzorky, kdy elektrárna nepracuje a znovu výsledky přepočítat. Výsledky pak vidíme v **tabulce 6.9 a 6.10 a obrázcích 6.15 až 6.18**.

U menší elektrárny je opět vidět větší využití v letních měsících. Za povšimnutí stojí zejména duben, kdy díky bezoblačnému počasí činila výroba ve třídě nad 80 % téměř 30 % doby aktivní doby FVE. Větší elektrárna ve třídě nad 80 % v tomto měsíci skoro nevyráběla.

Porovnáním relativních četností výroby z obou fotovoltaických elektráren můžeme říci, že menší elektrárna má větší účinnost. Je to dáno zřejmě tím, že byly použity kvalitnější fotovoltaické panely. Měřením bylo zjištěno, že větší elektrárna má instalovaný výkon 5,1 kWp, ale v praxi jej prakticky nedosahuje (maximální hodnota 4,3 kWp) a jen zřídka přesahuje hranici 80 % jmenovité hodnoty. U menší fotovoltaické elektrárny je tomu jinak. Během slunečného dne dosahovala elektrárna maximálního výkonu až 1,7 kWp, tedy více než je instalovaný výkon.

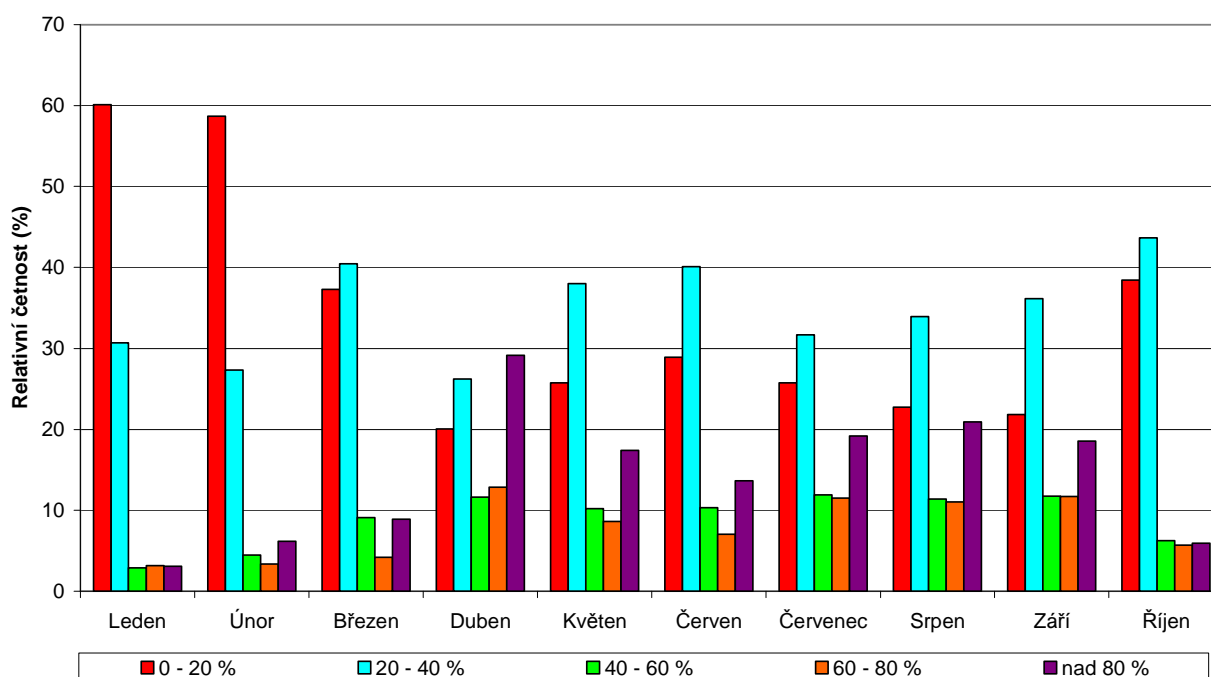
Tab. 6.9 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 1 (za délku slunečného dne)

	0 – 20 %	20 – 40 %	40 – 60 %	60 – 80 %	Nad 80 %
Leden	60,1	30,7	2,9	3,2	3,1
Únor	58,7	27,3	4,5	3,4	6,2
Březen	37,3	40,5	9,1	4,2	8,9
Duben	20,1	26,2	11,7	12,9	29,2
Květen	25,7	38,0	10,2	8,6	17,4
Červen	28,9	40,1	10,3	7,0	13,7
Červenec	25,7	31,7	11,9	11,5	19,2
Srpen	22,7	33,9	11,4	11,0	20,9
Září	21,8	36,1	11,8	11,7	18,5
Říjen	38,5	43,6	6,2	5,7	5,9

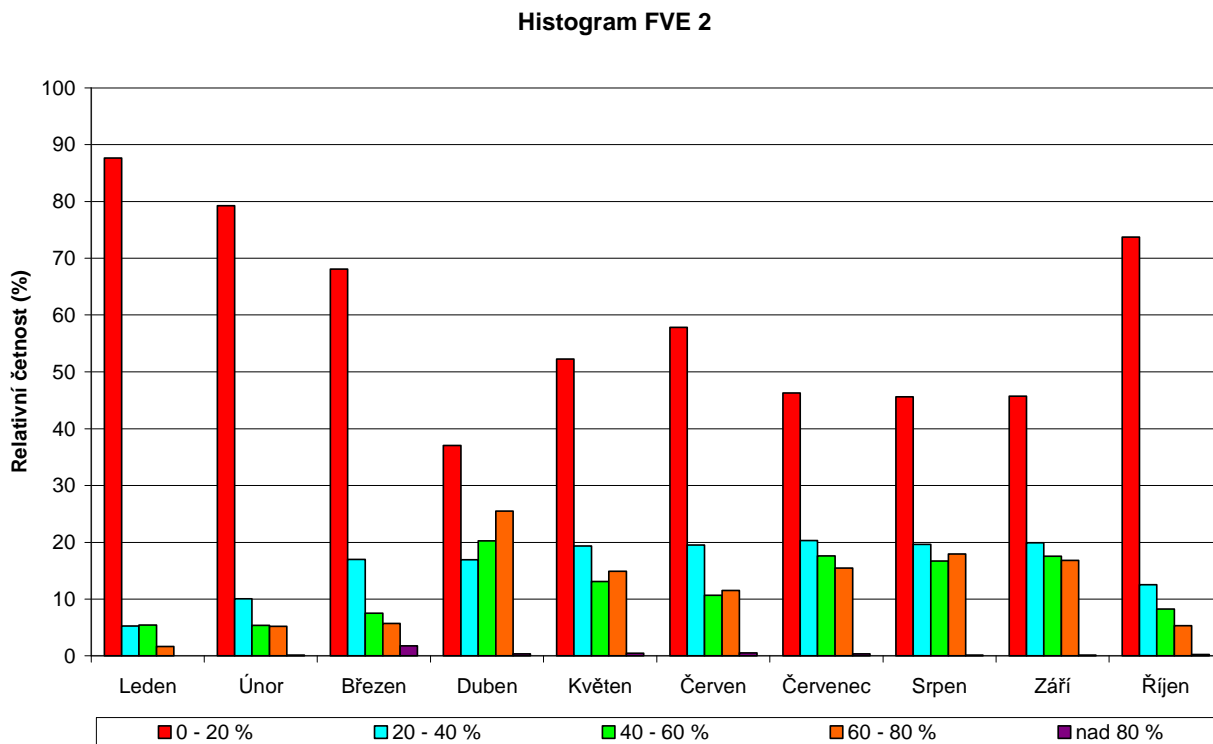
Tab. 6.10 Tabulka relativní četnosti výroby z FVE 2 (za délku slunečního dne)

	0 – 20 %	20 – 40 %	40 – 60 %	60 – 80 %	Nad 80 %
Leden	87,7	5,2	5,4	1,7	0,0
Únor	79,2	10,1	5,4	5,2	0,1
Březen	68,1	17,0	7,5	5,7	1,7
Duben	37,0	16,9	20,2	25,5	0,4
Květen	52,2	19,3	13,1	14,9	0,5
Červen	57,8	19,5	10,6	11,5	0,5
Červenec	46,3	20,3	17,6	15,5	0,3
Srpen	45,6	19,6	16,7	17,9	0,1
Září	45,7	19,9	17,5	16,8	0,1
Říjen	73,7	12,6	8,2	5,3	0,2

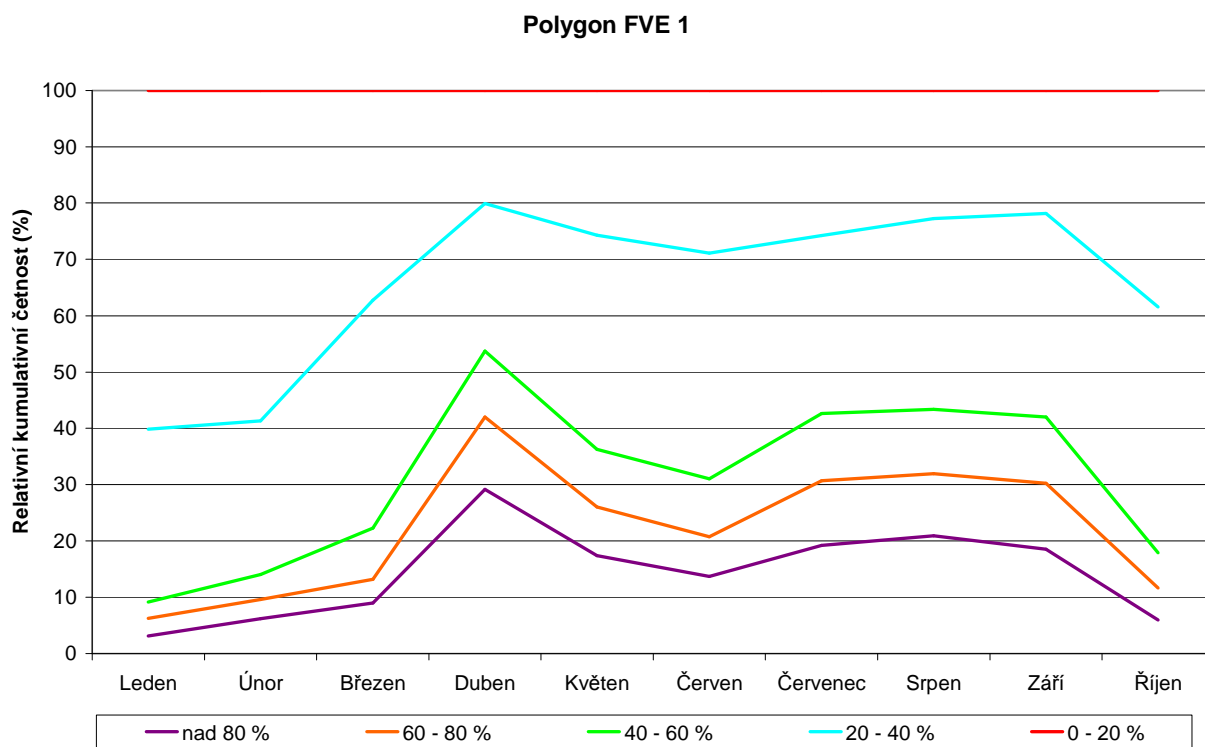
Histogram FVE 1



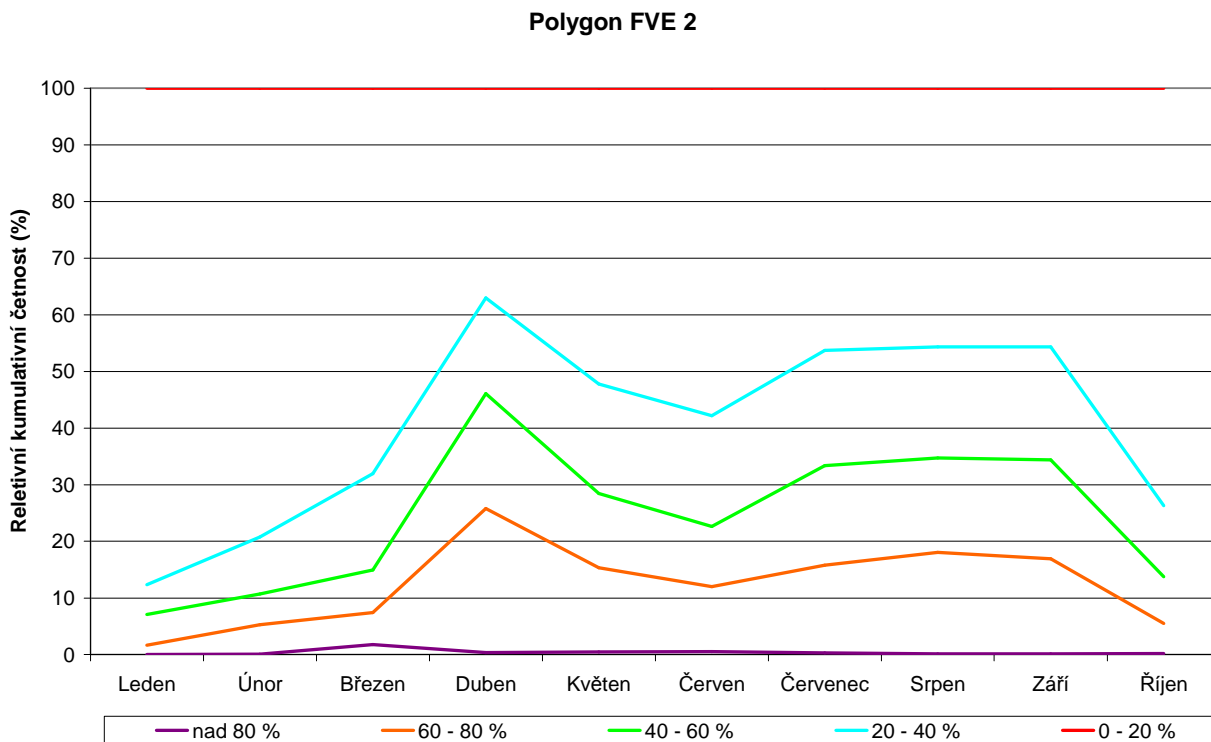
Obr. 6.15 Histogram výroby z FVE 1 (za délku slunečního dne)



Obr. 6.16 Histogram výroby z FVE 2 (za délku slunečního dne)



Obr. 6.17 Polygon výroby z FVE 1 (za délku slunečního dne)



Obr. 6.18 Polygon výroby z FVE 2 (za délku slunečného dne)

## 6.6 Zhodnocení provozu FVE

Nejméně elektrické energie vyrobí fotovoltaická elektrárna v lednu. Ve sledovaném období činila výroba z menší elektrárny 100 kWh. Z toho 60,1 % z aktivní doby byla výroba ve třídě od 0-20 %. Přepočteme-li to na výkon, tak z velké části vyráběla do 320 W. Dalších asi 30 % vyráběla do 640 W. Zbýlých necelých 10 % byl výkon nad 640 W.

Podobně FVE 2 vyrobila v lednu 147 kWh elektrické energie. Z toho 87,7 % připadlo na třídu 0-20 %, tedy do 1,02 kW. Dalších 5,2 % vyrobila elektrárna ve třídě od 20-40 % (1,02 – 2,04 kW). Zbýlých asi 7 % pak v rozsahu 40-80 % (2,04 – 4,08 kW).

Nejvíce energie vyrobila menší elektrárna v měsíci dubnu, kdy bylo vyprodukováno 340 kWh elektrické energie. Nejvíce času pracovala v režimu nad 80 % (tj. nad 1,28 kW), a to 29,2 % z celkového času. Dalších asi 13 % času vyráběla v rozsahu 0,96 – 1,28 kW a zhruba 12 % času v rozsahu 0,64 – 0,96 kW atd.

Větší elektrárna vyprodukovala ve stejném období 748 kWh elektrické energie. Pokud tuto výrobu opět rozdělíme do tříd, pak v nejnižším výkonu (0 – 1,02 kW) pracovala 37 % času, od 1,02 – 2,04 kW necelých 17 % času, od 2,04 – 3,06 kW zhruba 20 % času, od 3,06 – 4,08 kW asi 25 % času a nad 4,08 kW necelé 1 % z času.

Pokud chceme využít výkup formou zelených dotací, je nutné spotřebovat co nejvíce námi vyrobené elektrické energie sami. Spotřebiče v domácnosti musí být rozloženy rovnoměrně do tří

fází. Zdroje elektrické energie v uvedeném praktickém případě pracují do dvou fází. Je tedy logické, že při rozhodování jakou formu výkupu zvolit, nemůžeme vycházet z celkové spotřeby domácnosti.

Ze statistického zpracování je zřejmé, že rozložení výkonů výroby z FVE je v průběhu roku různé. Pokud bereme v úvahu běžnou domácnost, kde největšími spotřebiči jsou bojler pro ohřev TUV, myčka nádobí a pračka, tak se zelený bonus nevyplatí. Jak již bylo řečeno, spotřeba elektrické energie musí být rozložena rovnoměrně do tří fází. Malé spotřebiče, které jsou v chodu po celý den jako mraznička a lednička mají příkon 100 - 200 W. Velké spotřebiče zase s výjimkou bojleru nepracují po celý den.

Pokud by byla spotřeba elektrické energie vyšší (instalace klimatizace, tepelné čerpadlo, ohřev vody v bazénu apod.) mohli bychom po důkladnějším měření o využití zeleného bonusu uvažovat.

## 7 ZÁVĚR

Měřením dvou různých fotovoltaických elektráren z jednoho místa byly zjištěny některé rozdíly. Prostým srovnáním předpokládané výroby elektrické energie obou fotovoltaických elektráren s hodnotou naměřenou elektroměrem můžeme dojít k závěru, že elektrárna pracuje bez závad a odhad výroby a tím i finanční návratnost jsou v pořádku. V rámci měření, kde byla měřena každá elektrárna zvlášť, bylo zjištěno, že menší elektrárna vyrobí více elektrické energie, než byl odhadovaný výpočet. V některých měsících bylo vyrobeno i dvakrát více energie oproti předpokladu. Naproti tomu FVE 2 vyrobila přibližně množství energie odpovídající předpokladu.

FVE 2 má zhruba třikrát větší instalovaný výkon než elektrárna FVE 1. Přepočteme-li vyrobenou energii z obou elektráren na 1 kWp, vidíme větší efektivitu u menší fotovoltaické elektrárny.

Jak je patrné z grafu výroby elektrické energie ve slunečný den, menší elektrárna dodává energii odpovídající jmenovité hodnotě svého výkonu. Druhá elektrárna se dostane ve stejné době jen na přibližně 80 % jmenovitého výkonu. To může být způsobeno vadou ve fotovoltaickém panelu, kterou se zatím nepodařilo prokázat. Jinou možností je fakt, že byly použity články s horší kvalitou. Výrobce uvádí toleranci  $\pm 5\%$ .

O tom, že menší fotovoltaická elektrárna využívá kvalitnější články, svědčí i průběh výkonů při nízké intenzitě osvětlení. V tomto případě obě elektrárny dodávají do sítě přibližně stejný výkon. Tento jev je možné vysvětlit tím, že větší elektrárna využívá měnič o větším výkonu. Podle výrobce jsou střídače Fronius spojeny do dvou výkonových dílů a pracují v tzv. optimalizovaném systému Master-Slave. Při částečném vytížení pracuje jen jeden z obou dílů, při plném vytížení pracují oba společně.

Při výrobě elektrické energie z fotovoltaických článků je nutno počítat s možným prudkým nárůstem nebo poklesem výkonu elektrárny. K největším změnám může dojít během poledních hodin, kdy elektrárna dosahuje svého maximálního výkonu. Pokud budou „příznivé“ klimatické podmínky, může dojít k nárůstu výkonu až o 400 % během několika minut. Stejně tak může dojít i ke stejnému poklesu výkonu.

Statistické zpracování výsledků měření ukázalo nevhodnost využití výkupu formou zeleného bonusu pro běžnou spotřebu v rodinném domku. Abychom dokázali efektivně využít energii z fotovoltaických elektráren, bylo by třeba zapínat spotřebiče v domácnosti v závislosti na okamžitým výkonu dodávaném z FVE.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Historie-Fotovoltaika* [online]. 2009 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://fotovoltaika.vialoca.com/historie/historie.html>>.
- [2] KUSALA, Jaroslav. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>>.
- [3] *Solární liga ČR* [online]. 2009 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.solarniliga.cz/busanovice.html>>.
- [4] *Fotovoltaická elektrárna Dukovany* [online]. ČEZ, c2010 [cit. 2010-01-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/slunce/slunecni-elektrarna-dukovany.html>>.
- [5] *ERU* [online]. V Jihlavě : 13.4.2010, 4.5.2010 [cit. 2010-05-04]. Informace o výrobě elektřiny ze solárních zdrojů. Dostupné z WWW: <<http://www.eru.cz/>>.
- [6] VANĚK, Jiří. *Alternativní zdroje energie*. [s. l.], 2006. 158 s. Skripta.
- [7] *Křemík* [online]. c2010 , 5.1.2010 [cit. 2010-01-05]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Křemík>>.
- [8] *Fotovoltaika pro každého* [online]. c2003-2009 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <[http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/#fv\\_cr](http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/#fv_cr)>.
- [9] *Czech Republic* [online]. European Communities, c2001-2008 , 20.11.2008 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmeps/eur.htm>>.
- [10] *Solární panel* [online]. Solartec s.r.o, c1993-2010 [cit. 2010-01-05]. Dostupný z WWW: <<http://eshop.solartec.cz/cs/zbozi/10170/solarni-panel-sg-180-5z.html>>.
- [11] SAJDÁK, Ivo. Parametry fotovoltaických panelů. In *Sborník přednášek ke konferenci Obnovitelné zdroje energie*. Praha : ČENES, 2009. s. 14-15.
- [12] *Cenová rozhodnutí* [online]. IT Systems a.s., c2009 , 4.1.2010 [cit. 2010-01-05]. Dostupný z WWW: <[http://www.eru.cz/dias-browse\\_articles.php?parentId=113](http://www.eru.cz/dias-browse_articles.php?parentId=113)>.
- [13] *PRO-ENERGY*. Stenella s.r.o. roč. 3, č. 3- . Praha, 2009- .
- [14] *Vitovolt 200* [online]. Viessmann, c2009 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <[http://www.viessmann.cz/cs/products/Photovoltaic/vitovolt\\_200.html](http://www.viessmann.cz/cs/products/Photovoltaic/vitovolt_200.html)>.
- [15] *Solární systémy* [online]. 2009 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.schueco.com/web/cz/zakaznici/produkte/solar-systeme>>.
- [16] *Solární energie* [online]. Fronius International GmbH, c2008-2009 [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-7E85269D-E51B1CD1/fronius\\_ceska\\_republika/hs.xsl/30\\_301.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-7E85269D-E51B1CD1/fronius_ceska_republika/hs.xsl/30_301.htm)>.
- [17] BECHNÍK , Bronislav, SROKA, Radim. *Obnovitelné zdroje energie* [online]. Topinfi s.r.o., c2009 [cit. 2009-11-16]. Dostupný z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=6056&h=12&pl=49>>.
- [18] Cenové rozhodnutí ERÚ č. 4/2009 ze dne 3.listopadu 2009. *Cenová rozhodnutí*. 2009, č. 4, s. 9.
- [19] Cenové rozhodnutí ERÚ č. 5/2009 ze dne 23. listopadu 2009. *Cenová rozhodnutí*. 2009, č. 5, s. 1.

- 
- [20] *Datenblatt Vitovolt 200 SC*. [s.l.] : [s.n.], 2008. Dostupný z WWW: <<http://www.viessmann.cz>>. s. 4.
- [21] *Technické informace : SPV 180-SME-1*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 2 s. Dostupný z WWW: <<http://www.schueco.cz>>.
- [22] Technický list. *SILIKEN SLK 60P6L*. [s.l.] : SVP-SOLAR, 17.6.2009. 2 s. Dostupné z WWW: <<http://www.panely-solarni.cz/fotovoltaiicke-moduly.html>>.
- [23] *Fronius IG : Fotovoltaický střídač*. [s.l.] : [s.n.], [2008?]. 16 s. Dostupný z WWW: <<http://www.fronius.cz>>.
- [24] *Egubrno* [online]. 2009 [cit. 2010-05-19]. Měřicí přístroje a měření v elektrizační soustavě. Dostupné z WWW: <<http://www.egubrno.cz/sekce/s005/pristroje/mds/mds10.html>>.



## **Příloha A Měření - měřící a testovací systémy**

MDS 10 – Monitor distribučních sítí; výrobní číslo 14

Sada proudových kleští MT-UNI; výrobní číslo 056