



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## MOBILNÍ OSTROVNÍ FOTOVOLTAICKÝ SYSTÉM

MOBILE ISLAND PHOTOVOLTAIC SYSTEM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Zelenka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Petr Zelenka**  
Studijní program: Energetika  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Mobilní ostrovní fotovoltaický systém

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci práce bude pozornost věnována problematice malých ostrovních systémů s fotovoltaickými panely pro zásobování sezóních spotřebičů. Rešeršním způsobem bude představena problematika výroby elektrické energie s využitím fotovoltaické přeměny. Popsány budou všechny komponenty vybraného ostrovního systému. Konkrétní ostrovní systém bude proměřen v širokém rozmezí provozních parametrů. Experimentální práce budou dále zahrnovat proměření alternativních komponent pro ostrovní fotovoltaické systémy dostupné v laboratořích Energetického ústavu. Experimentálně zjištěné hodnoty budou užity pro sestavení charakteristik a porovnání komponent ostrovního systému. Následně budou formulovány závěry a doporučení pro provoz ostrovního systému.

### Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršním způsobem představte problematiku generování elektrické energie s využitím fotovoltaické přeměny a elektrochemické akumulace, včetně popisu souvisejících komponent.
2. Popište konkrétní hodnocený mobilní fotovoltaický systém a realizujte měření hlavních charakteristik v širokém rozsahu provozních parametrů.
3. Realizujte měření parametrů dalších dostupných komponent pro malé fotovoltaické systémy.
4. Na základě naměřených dat vytvořte provozní charakteristiky a zhodnocení malého ostrovního systému.

### Seznam doporučené literatury:

CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-86534-03-0.

CIHELKA, Jaromír. Solární tepelná technika. Praha: T. Malina, 1994, 203 s. : il. ISBN 80-900759-5-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Mobilní ostrovní fotovoltaický systém je technologie určená k produkci elektrické energie v místech bez tradiční elektrické rozvodné sítě. Kompaktní přenosné zařízení spojuje solární panely s bateriemi a dalšími komponentami, např. regulátory nabíjení a střídači. Jeho mobilní povaha umožňuje nasazení v odlehlých lokalitách (samoty, vojenské základny, horské chaty, tábořiště) a v nouzových situacích. První část bakalářské práce je věnována problematice generování elektrické energie fotovoltaickou přeměnou a jejím uchováváním v akumulátorech, experimentální část se zabývá měřením charakteristik fotovoltaických panelů s různým sklonem a zastíněním. Je také modelováno využití solární energie při různém slunečním záření. Práce poskytuje celkový pohled na význam mobilních ostrovních fotovoltaických systémů a jejich potenciál v oblasti obnovitelné energie a udržitelného rozvoje.

## **Klíčová slova**

Mobilní ostrovní fotovoltaický systém, fotovoltaika, charakteristika fotovoltaických panelů, energetická nezávislost, optimalizace výkonu

## **Abstract**

The mobile island photovoltaic system is a technology designed for electricity generation in locations without traditional electrical grid infrastructure. This compact portable device combines solar panels with batteries and other components, such as charge controllers and inverters. Its mobile nature allows deployment in remote locations (isolated houses, military bases, mountain cottages, campsites) and in emergency situations. The first part of the bachelor's thesis focuses on the issue of generating electrical energy through photovoltaic conversion and its storage in batteries, while the experimental part focuses on measuring the characteristics of photovoltaic panels with different inclinations and shading. It also models the utilization of solar energy under various sunlight conditions. The thesis provides an overall perspective on the importance of mobile island photovoltaic systems and their potential in the field of renewable energy and sustainable development.

## **Key words**

Mobile island photovoltaic system, photovoltaics, characteristics of PV panels, energy independence, power optimization

## **Bibliografická citace**

ZELENKA, Petr. *Mobilní ostrovní fotovoltaický systém*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157862>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Mobilní ostrovní fotovoltaický systém** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
*Jméno a příjmení*

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za poskytnuté rady a čas, který mi věnoval. Energetickému ústavu FSI VUT v Brně děkuji za propůjčení měřicí techniky a solárních panelů, obci Podolí za možnost experimentovat na jejím území a skautům ze střediska Žabovřesky Brno, z.s. za jejich pomoc a zájem o problematiku. V neposlední řadě patří díky naší rodině a Lucii Dvořákové, která mi asistovala v průběhu experimentu.

## **Obsah**

<b>1</b>	<b><i>Historie fotovoltaiky</i></b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b><i>Fotovoltaický článek</i></b> .....	<b>5</b>
2.1	<b>Monokrystalické křemíkové články</b> .....	<b>6</b>
2.2	<b>Polykrystalické křemíkové články</b> .....	<b>7</b>
2.3	<b>Amorfní křemíkové články</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b><i>Energie ze Slunce</i></b> .....	<b>8</b>
3.1	<b>Měření dopadajícího slunečního záření</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b><i>Solární fotovoltaické panely</i></b> .....	<b>9</b>
<b>5</b>	<b><i>Zvyšování účinnosti fotovoltaických panelů</i></b> .....	<b>10</b>
5.1	<b>Oboustranné moduly</b> .....	<b>10</b>
5.2	<b>Průhledné kontakty</b> .....	<b>10</b>
5.3	<b>Antireflexní vrstva a textura povrchu</b> .....	<b>10</b>
5.4	<b>Natáčení modulů za sluncem</b> .....	<b>11</b>
5.5	<b>Koncentrátory</b> .....	<b>11</b>
<b>6</b>	<b><i>Systémy připojené na rozvodnou síť</i></b> .....	<b>12</b>
<b>7</b>	<b><i>Ostrovní fotovoltaické systémy</i></b> .....	<b>14</b>
<b>8</b>	<b><i>Historie elektrochemické akumulace</i></b> .....	<b>14</b>
<b>9</b>	<b><i>Akumulátory</i></b> .....	<b>16</b>
9.1	<b>Olověné akumulátory</b> .....	<b>16</b>
9.2	<b>Alkalické akumulátory</b> .....	<b>17</b>
9.3	<b>Lithium-iontové baterie</b> .....	<b>17</b>
<b>10</b>	<b><i>Praktické měření</i></b> .....	<b>18</b>
10.1	<b>Testovaný ostrovní fotovoltaický systém</b> .....	<b>18</b>
10.2	<b>Parametry jednotlivých testovaných komponent</b> .....	<b>19</b>
10.2.1	<b>Solární panel Canadian Solar CS3L-380MS</b> .....	<b>19</b>



---

10.2.2	Solární regulátor MPPT EPsolar serie XTRA – 3210N.....	20
10.2.3	Solární baterie Banner 180Ah Solar.....	21
10.2.4	Měníč napětí SINUS Victron Energy Phoenix VE.Direct 800VA 12 V .....	21
10.2.5	Solární panel Victron Energy SPP040601200 .....	22
10.2.6	Solární panel Renogy RNG-100DB-H.....	23
<b>10.3</b>	<b>Měřicí technika .....</b>	<b>24</b>
10.3.1	Sonel PVM-1020.....	24
10.3.2	Sonel IRM-1 .....	25
<b>10.4</b>	<b>Měřicí naklápací rám .....</b>	<b>26</b>
<b>10.5</b>	<b>Měření parametrů FV panelů v závislosti na sklonu .....</b>	<b>27</b>
10.5.1	Popis experimentu .....	27
10.5.2	Sledované veličiny .....	28
10.5.3	Naměřené hodnoty .....	31
<b>10.6</b>	<b>Měření parametrů FV panelů v závislosti na částečném zakrytí.....</b>	<b>40</b>
10.6.1	Popis experimentu .....	40
10.6.2	Sledované veličiny .....	40
10.6.3	Naměřené hodnoty .....	41
<b>11</b>	<b>Modelová situace.....</b>	<b>46</b>
<b>12</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>59</b>
<b>13</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>61</b>

## **Úvod**

Vzhledem k rostoucím regulacím energetického sektoru a posunu ke stále čistším zdrojům energie roste význam obnovitelných zdrojů. Nemalá pozornost je přikládána fotovoltaice, která přeměňuje sluneční záření v elektrickou energii. Zatímco společnost debatuje o tom, jak by se fotovoltaika měla podílet na energetické infrastruktuře, v místech bez elektrické přípojky se velmi dynamicky rozvíjejí ostrovní fotovoltaické (FV) systémy, které postupně vytlačují zdroje spalující fosilní paliva. Vítězí nad nimi bezemisní a nehluknou činností a podstatně nižšími nároky na provoz a údržbu. Představují flexibilní udržitelné řešení pro produkci elektrické energie v odlehlých oblastech.

Ve skautském středisku jsme se v dubnu 2023 rozhodli pro pořízení mobilního ostrovního fotovoltaického systému pro letní stanový tábor, kde byla v minulosti jediným zdrojem elektřiny hlučná elektrocentrála. Motivací bakalářské práce bylo hledání různých způsobů zefektivnění systému a předání získaných poznatků dalším uživatelům.

První část práce se rešeršním způsobem věnuje obecné problematice generování elektrické energie fotovoltaickými články. Kromě stručné historie fotovoltaiky jsou zde rozebrány různé typy a odlišnosti mezi dnes používanými křemíkovými články. Tato část se také věnuje sluneční energii a jejímu měření. Dále je představen koncept fotovoltaických panelů a možnosti zvyšování jejich účinnosti. Pozornost je věnována rozdílům mezi standardní fotovoltaickou elektrárnou připojenou na rozvodnou síť a ostrovními provozy. V neposlední řadě je zpracován stručný přehled historie elektrochemické akumulace a typů dnes používaných akumulátorů.

Druhá část se věnuje praktickému měření základních charakteristik tří vybraných solárních panelů. Cílem experimentu bylo analyzovat vliv jejich sklonu a částečného zastínění na výkon a účinnost a navrhnout optimální podmínky využití ostrovního systému.

Třetí část je věnována celkovému provozu systému, kdy do hry vstupuje modelová situace dvou letních dnů s velmi odlišnými slunečními podmínkami. Kromě stanovení výkonu panelů během dne je navržen scénář používání elektrických spotřebičů i sledování stavu nabití baterie. Nakonec je systém vyhodnocen a jsou navržena opatření pro maximální využití jeho potenciálu.

## 1 Historie fotovoltaiky

Historie fotovoltaiky se začala psát v roce 1839, když francouzský akademik Alexandre Edmond Becquerel zjistil, že proud mezi kovovými elektrodami ponořenými v roztoku se mění v závislosti na intenzitě osvětlení. Dlouhá desetiletí však tento jev nenašel praktické využití [1].

V roce 1876 londýnský profesor William Grylls Adams a jeho student Richard Evans Day zpozorovali něco, čemu se začalo říkat fotovoltaický jev. Tito dva akademici vystavili selen světlu a generovali z něj elektrický proud. Proud byl velmi slabý, nemohl pohánět jakékoliv zařízení, byl však měřitelný.

V roce 1888 pozorovali Heinrich Hertz a Wilhelm Hallwachs nezávisle na sobě, že povrch záporně nabitého kovu ztrácí po osvětlení záporný náboj a povrch nenabitého kovu se nabíjí kladně. Aleksandr Stoletov pak detekoval tzv. fotoproud mezi katodou a anodou.

V roce 1897 objevil Joseph John Thompson elektron a v roce 1899 vysvětlil podstatu fotoelektrického jevu jako uvolňování elektronů z povrchu kovu po dopadu světelného záření (tzv. vnější fotoelektrický jev). Popisem vlastností tohoto jevu se zabýval také Philip Lenard.

Fotoelektrický jev měl řadu vlastností, které nebylo možné vysvětlit pomocí zákonů klasické fyziky.

V roce 1900 Max Planck použil při vysvětlování zákonů pro záření „Černého tělesa“ představu, že elektromagnetické záření se vyzařuje, šíří a je pohlcováno nespojitě po tzv. kvantech. Energie kvanta závisí na frekvenci záření.

Fyzikální princip fotoelektrického jevu popsal v roce 1905 Albert Einstein v práci „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“, za což získal v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku. Vysvětlil tento jev jako interakci světelných kvant (fotonů) s elektrony v kovu. Einsteinovu hypotézu potvrdil v roce 1916 Robert Andrews Millikan, který ji svými experimenty chtěl původně vyvrátit.

První fotovoltaický článek použitelný pro výrobu elektřiny byl vyroben v Bellových laboratořích v roce 1954. Články z monokrystalického křemíku měly účinnost okolo 6 %. Jejich výrobní cena značně přesahovala cenu elektrické energie, kterou byly za dobu své životnosti schopny vyrobit. Již v roce 1958 se začaly články používat v kosmických družicích, a používají se tam dodnes [3].

V pozemských podmínkách se fotovoltaické panely začaly využívat od 70. let minulého století, a to nejčastěji v odlehlých lokalitách, kde nebyla k dispozici elektrizační soustava. Jejich výhodou byl fakt, že nepotřebovaly palivo ani obsluhu. Šlo obvykle o ostrovní systémy s akumulátory [4].

Ropná krize vedla společnost k investicím do solárního výzkumu. V roce 1973 přišel na svět první polykrystalický panel vyvinutý Elliotem Bermanem. Měl sice nižší účinnost, ale také nižší výrobní náklady. V roce 1977 v USA vznikl Výzkumný ústav solární energie, který se později stal známým jako Národní laboratoř pro obnovitelnou energii (*NREL – National Renewable Energy Laboratory*) [2].

Od 80. let dochází k větším pozemním instalacím. ARCO Solar se stal prvním výrobcem systémů, které dosahovaly produkce 1 MWp. O dva roky později solární společnost vybudovala v Kalifornii první elektrárnu v megawattovém měřítku. V roce 1998 byla instalována první „velká“ sluneční elektrárna v České republice v Dukovanech [2].

Skutečného rozšíření se fotovoltaika dočkala až díky různým dotačním podporám. Výrobní náklady a ceny panelů s časem klesají, a fotovoltaika se tak stává ekonomicky stále výhodnější. Dnes patří k hlavním zdrojům obnovitelné energie.



*Obr. 1 První fotovoltaický panel [5]*

## **2 Fotovoltaický článek**

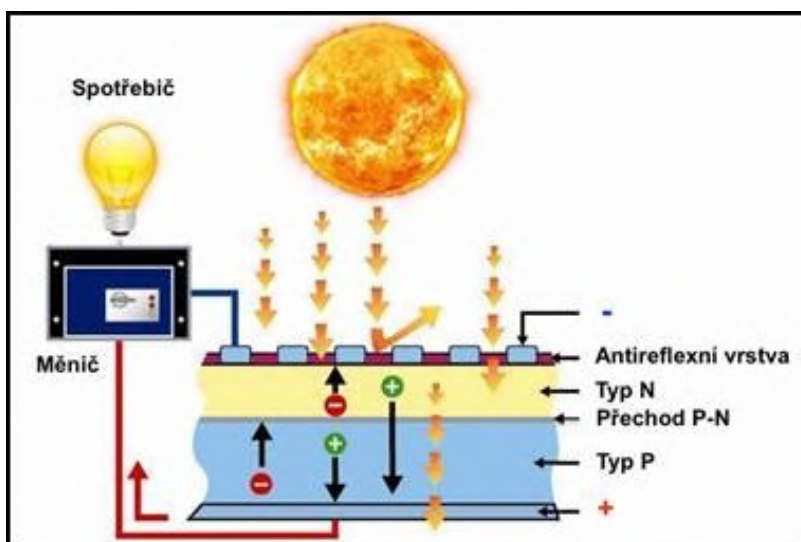
Fotovoltaický článek je základní komponentou solárních panelů. Skládá se ze dvou rozdílně dotovaných křemíkových vrstev. Strana obrácena směrem ke Slunci je záporně dotována fosforem, spodní vrstva je dotována zpravidla bórem. Na obou stranách jsou kovové elektrody jako kontakty, aby bylo možné odebírat proud. Na zadní straně bývá většinou pomocí hliníkové nebo stříbrné pasty umístěna celoplošná elektroda. Přední strana naproti tomu musí co nejlépe propouštět světlo. Kontakty se zde skládají z tenké mřížky. Na povrchu bývá antireflexní vrstva, která dává článkům typickou černou barvu u monokrystalických panelů, či modrou barvu u panelů polykrystalických. Tím docílíme, že je nejvíce fotonů absorbováno a neopustí článek [6].

Samotný princip funguje tak, že dopováním křemíku fosforem vznikne polovodič typu n, který má nadbytečné elektrony a je podstatně vodivější než čistý křemík. Analogicky přidavkem boru

vzniká polovodič typu p s nadbytečnými dírami v krystalické mřížce. Jakmile se oba polovodiče spojí, vzniká tenká vrstva, která se nazývá p-n přechod. Když na článek dopadá sluneční záření, generují se volné elektrony a díry. Elektrické pole p-n přechodu je oddělí a pošle na opačné strany, elektrony do vrstvy typu n, která se tak stává záporným pólem fotovoltaického článku, a díry do vrstvy typu p, která tvoří kladný pól. Tím vzniká napětí, které je v případě křemíku 0,6 V, a které při zatížení ještě trochu klesá. Požadovaného napětí se dosáhne spojováním článků do série [7].

Při ozáření článku dochází ke ztrátám rekombinací a odrazem, a také zastíněním předními kontakty. Největší podíl energie se však ztratí ve formě dlouhovlnného nebo krátkovlnného záření, které nemůže být využito. Fotovoltaický článek tak může využívat jen část elektromagnetického spektra [6].

Článek z křemíku dokáže využít elektrony s energií větší než 1,1 eV ( $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Sluneční záření obsahuje fotony s energií od 0,5 eV (infračervené záření) do přibližně 2,9 eV (ultrafialové záření). Energie fotonů s větší energií však není využita beze zbytku, část jejich energie se přemění v teplo. Každý foton může uvolnit jeden elektron. Nelze tak z principu využít více než 55 % dopadajícího záření. V důsledku dalších ztrát bývá celková účinnost článku nejčastěji „pouze“ 10 až 20 % [7].



Obr. 2 Schéma fotovoltaického článku [9]

## 2.1 Monokrystalické křemíkové články

Jde o základní a nejstarší typ fotovoltaických článků. Jsou čtvercové nebo se zaoblenými rohy. Novější články mívají délku hrany 15,2 cm, a mohou být vybaveny třemi vodivými pásky. Spotřeba materiálu u těch se zaoblenými rohy je menší, jelikož se články řežou z kulatých tyčí. Tyče se vyrábějí tzv. Czochralského metodou, tj. pomalým tažením zárodka krystalu z taveniny

ultra čistého křemíku o teplotě 1420 °C. Ingoty se řezou speciální drátovou pilou na plátky o tloušťce 0,25–0,35 mm, lze je však vyrábět i o tloušťce 0,1 mm. Plátky se zarovnávají na homogenní tloušťku, vyleští se a na povrchu odleptají, aby se odstranily nepravidelnosti a nečistoty. Díky tomu, že jsou z jediného krystalu, je povrch článků tmavomodrý až černý. Elektrická kvalita monokrystalických článků je vysoká, dosahují průměrné účinnosti 15–17 %, není však výjimečná ani účinnost přesahující 21 % [6].

## 2.2 Polykrystalické křemíkové články

Jde o velmi rozšířený typ článků. Lze je snadno rozpoznat díky jejich modře se třpytící krystalické struktuře. Bývají čtvercové s délkou hrany 4, 5, 6 nebo 8 palců. Jejich účinnost je nižší než u monokrystalických článků, pohybuje se mezi 13 a 16 %. Výroba je levnější, většinou se používá metoda blokového lití. Křemík se ve vakuu zahřeje na 1500 °C a v grafitovém kelímku se postupně ochlazuje až do blízkosti bodu tání. Vzniknou polykrystalické křemíkové bloky o rozměrech 40 × 40 × 30 cm, které se rozřežou na tyče, a ty se dále řezou na destičky. Pozitivním faktorem je, že odpad je u tvorby polykrystalických článků menší než u článků monokrystalických. Jejich typický vzhled je důsledkem třpytu krystalů s rozdílnou orientací, takže můžeme jednotlivé krystaly dobře rozpoznat [7].

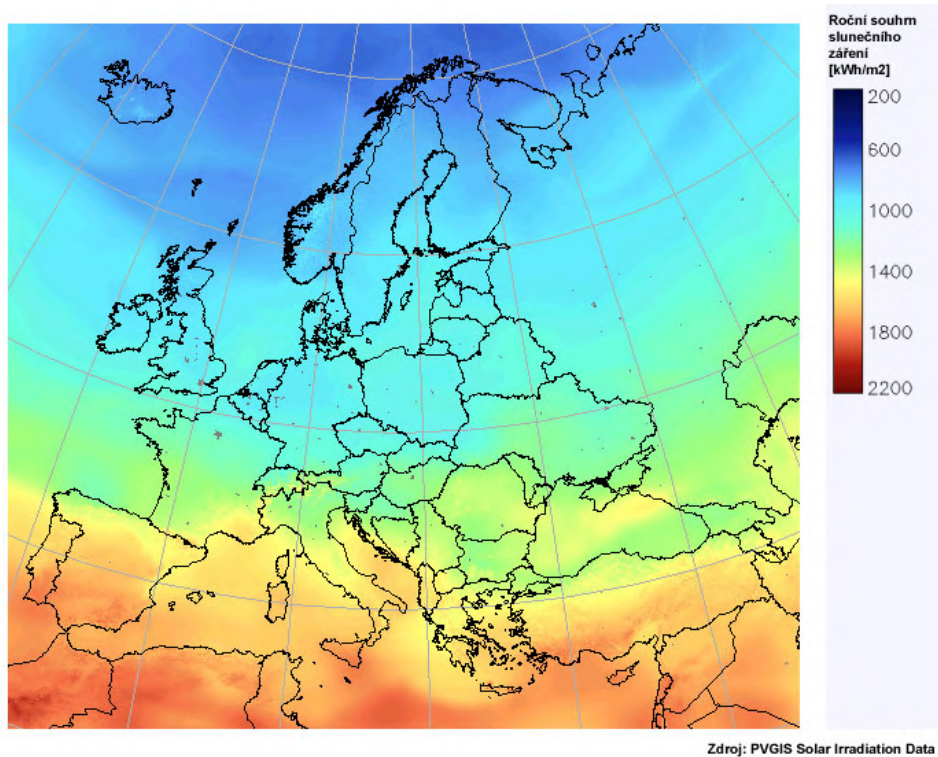
## 2.3 Amorfni křemíkové články

Články z amorfniho křemíku spotřebují na výrobu podstatně méně materiálu než články krystalické, což se podepisuje na jejich ceně. První takové články byly vyvinuty v roce 1974. Výroba spočívá v rozkladu vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Nejčastěji se používá silan nebo dichlorsilan. Proces probíhá při teplotě pouhých 200 °C. Takto lze připravit velmi tenké vrstvy křemíku. Jako podložka se užívá nejčastěji sklo, nerez či v dnešní době hojně i plast. Nanesená vrstva je amorfni, což znamená, že nemá pravidelnou krystalickou strukturu a zároveň obsahuje určité množství vodíku. Vrstvy mohou být díky větší absorpci slunečního záření tenčí a jsou proto ohebné. Lze je použít jako krycí fólie na střechy či dokonce našít na oblečení.

Nevýhodou článků z amorfniho křemíku je nízká účinnost, která často nepřesáhne 7 %. Příčinou je skutečnost, že některé atomy křemíku nemají kolem sebe sousedy, se kterými by se mohly vázat. Na těch místech dochází k tzv. rekombinaci nábojů. Problém částečně řeší navázání vodíků na volná místa, čemuž se říká vodíková pasivace či hydrogenace. Přítomností vodíku ale články částečně ztrácejí stabilitu. Struktura je zpočátku narušována oxidací vzdušným kyslíkem. Výkon článků proto nejprve klesá, a teprve později se ustálí na zhruba 80 % původního výkonu [7].

### 3 Energie ze Slunce

Ve Slunci vzniká elektromagnetické záření prostřednictvím jaderných reakcí, tzv. termonukleární fúzí. Za vysokých teplot a tlaků se ve středu slunečního jádra slučují atomová jádra vodíku. Přitom se uvolňuje obrovské množství energie ve formě fotonů. Fotony procházejí slunečním plazmatem, cestují ke slunečnímu povrchu, vyzařují do okolního prostoru a po zhruba osmi minutách dopadají i na zemský povrch. Bez sluneční energie by nebyl možný zdejší život. Výkon ozáření Sluncem a roční energie ozáření se vztahují na čtvereční metr osluněné plochy. Záření dopadající svísele na atmosférický obal Země činí průměrně  $1367 \text{ W/m}^2$ . Tato hodnota se nazývá solární konstantou. Molekuly zemské atmosféry část záření odrazí, rozptýlí či pohltní, takže na zemský povrch dopadá při pěkném počasí jen asi  $1000 \text{ W/m}^2$ , a to relativně nezávisle na místě. Tato hodnota se používá jako referenční hodnota při určování jmenovitého výkonu fotovoltaických panelů. Existuje nepsané pravidlo, že z  $1 \text{ kW}$  instalovaného výkonu můžeme ročně získat v našich zeměpisných šířkách  $800$  až  $1200 \text{ kWh}$  elektrické energie. Sluneční záření na Zemi se skládá z difúzního a přímého záření. Při jasných dnech převažuje přímé záření, zatímco při zatažené obloze převažuje záření difúzní [7].



Obr. 3 Roční souhrn slunečního záření v  $\text{kWh/m}^2$  [10]

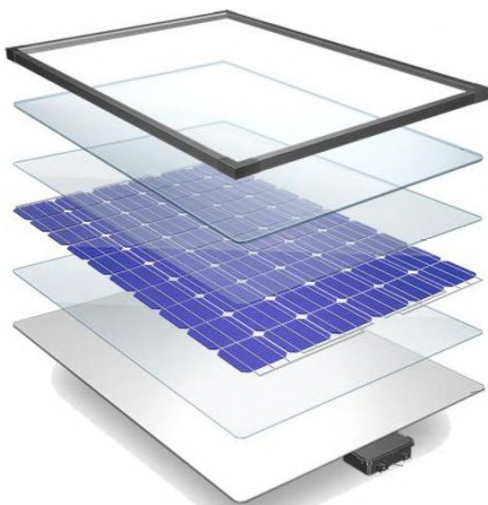
### 3.1 Měření dopadajícího slunečního záření

Údaje o intenzitě přímé i difúzní složky slunečního záření a o celkovém množství energie, která dopadla na plochu, lze získat měřením. Meteorologické stanice většinou měří pouze celkové záření (tj. součet přímého a difúzního záření). K měření se zpravidla používá pyranometr. Pomocí termočlánků se zjišťuje teplota černého a bílého povrchu pod skleněným krytem. Rozdíl teplot je úměrný intenzitě dopadajícího záření. To, že je sluneční záření přeměněno na teplo zaručuje, že odezva nezávisí na vlnové délce záření. Intenzita slunečního záření se může snímat také pomocí speciálních kalibrovaných čidel, tzv. referenčních článků. Zatímco pyranometr reaguje na širší spektrum záření, referenční články de facto kopírují charakteristiku fotovoltaických panelů [7].

## 4 Solární fotovoltaické panely

Fotovoltaické články mají v současné době výkon okolo 4 W s napětím typicky 0,5 V. Aby byly k dispozici větší hodnoty napětí a výkonu, sestavují se články do tzv. fotovoltaických modulů či panelů. Panely obvykle sestávají z 36, 48, 54, 60 nebo 72 článků zapojených do jedné či dvou větví nazývaných stringy (z angl. strings). Přední kontakty článků se připájejí k zadním kontaktům článků předcházejících. Při výrobě tenkovrstvých článků odpadá jejich pájení, během napařování a nanášení na skleněnou destičku se zapojují do série. Při výrobě panelu se obvykle položí 4 nebo 8 řad článků vedle sebe a zapouzdří se. Tak vznikne obdélníkový tvar panelu. Nové větve se zapouzdří mezi skleněnou destičku na přední straně a umělohmotnou fólii na zadní straně. Nejčastěji se používá fólie tedlaru, fluoropolymeru nepropustného pro vodní páru a odolného proti UV záření. Obvykle se užívá speciální tvrzené solární sklo, které obsahuje jen malé množství oxidu železa, takže je zvláště dobře propustné pro světlo. Sklo má články chránit před povětrnostními vlivy, např. krupobitím. Během výrobního procesu se články oboustranně zapustí do etylen-vinyl-acetátu (EVA). Tento průhledný substrát články elektricky izoluje. Pak se články působením tepla a tlaku spečou se sklem a fólií. Panel je opatřen duralovým rámem s dostatečnou pevností a mechanickou odolností. Pokud je i zadní strana ze skla, jde o dvojitý skleněný modul, nazývaný také bifaciální. V dnešní době články disponují také antireflexní vrstvou, snižující ztrátu světla odrazem, čímž se zvedá účinnost panelu o několik procent. U monokrystalických panelů se jako antireflexní vrstva často používá vakuovým napařováním nanášený nitrid křemíku. Otvorem v zadní straně panelu procházejí vývody větví článků ven. Sem se umísťuje přípojovací krabice modulu z tepelně stabilní umělé hmoty odolné proti UV záření. V krabicích jsou obtokové diody a přípojovací svorky, jimiž lze panely propojovat [6].





Obr. 4 Model fotovoltaického panelu [11]

## 5 Zvyšování účinnosti fotovoltaických panelů

Tato kapitola se zabývá problematikou a základními způsoby zvyšování účinnosti fotovoltaických panelů.

### 5.1 Oboustranné moduly

Jednou z možností zvýšení účinnosti fotovoltaiky je použití bifaciálních panelů, využívajících světlo dopadající na obě jejich strany. Budou-li namontovány na bílé nebo stříbrné střeše (např. plechové), bude množství světla využitého na zadní straně významné. Někdy se uvádí zvýšení produkce elektřiny až o 30 %. Panely najdou uplatnění také ve spojení se zrcadlovým koncentrátorem a stojanem umožňujícím natáčení za sluncem [7].

### 5.2 Průhledné kontakty

Elektrické kontakty na horní vrstvě zastíní část panelu a sníží tak jeho účinnost. Alternativou je použití průhledné elektricky vodivé vrstvy. Jako materiál se zpravidla volí oxid cínu [7].

### 5.3 Antireflexní vrstva a textura povrchu

Materiál fotovoltaických článků má poměrně velký index lomu, což znamená, že se část dopadajícího světla odráží. Fenomén je nejintenzivnější při dopadu světla pod malým úhlem. Můžeme přidat antireflexní vrstvu nebo vytvořit jehlanovitou strukturu přední strany panelu. Tím

usnadníme vstup fotonů do struktury článku a díky totální reflexi znesnadníme výstup nezachycených fotonů odražených od zadní vrstvy [7].

## **5.4 Natáčení modulů za sluncem**

Denní produkci elektřiny lze významně navýšit montáží fotovoltaických panelů na stojan, který zajistí během dne jejich natáčení proti slunečním paprskům. U malých systémů se nejčastěji setkáme s natáčením kolem jedné osy. Slunce sleduje dvojice čidel, jejichž signál je v rovnováze za předpokladu, že na obě dopadá stejně intenzivní záření. Stejnoseměrný motor přes šroubovou převodovku otáčí podle polaroty proudu osu s fotovoltaickými panely na jednu nebo druhou stranu. Proud k pohonu motoru je získáván z přídatného bifaciálního panelu namontovaného kolmo ke slunci na spodní části osy. Sluneční sledovač se otáčí tam, kde slunce svítí víc, a zastaví se, když jsou hlavní panely natočeny kolmo ke slunečním paprskům. U velkých fotovoltaických instalací se můžeme setkat s natáčením kolem dvou os. Jejich natáčení je řízeno počítačem, který zná polohu slunce v jednotlivých okamžicích [7].

## **5.5 Koncentrátory**

Koncentrátor záření je optické zařízení, které umí „sebrat“ sluneční záření z relativně velké plochy a soustředit je na plochu fotovoltaického panelu, čímž výrazně zvýší jeho produkci. Fotovoltaické články navíc disponují při větším ozáření vyšší účinností. Je však třeba pamatovat, že články se mohou zahřívat, což vedle snížení účinnosti může vést i k jejich zničení. Koncentrátory používané pro solární moduly nejčastěji rozdělujeme podle typu optických prvků. Zrcadlový koncentrátor s rovinným zrcadlem se snadno vyrábí, ale disponuje jen malou koncentrací záření. Častěji se používají parabolická zrcadla, disponující vysokým stupněm koncentrace. Je však nutné jejich natáčení za sluncem a zajištění chlazení článků. Výhodné je chlazení vodou, zvláště pokud ohřátou vodu nadále využijeme. Jako alternativu k zrcadlům můžeme uvést Fresnelovy čočky, které lze použít jako mikro koncentrátory. Např. plocha jednotlivých článků v koncentrátorech FLATCON činí pouhé 3 mm<sup>2</sup> a koncentrují světlo 300–500x. Zde je ale opět nutné intenzivní chlazení článků [7].



Obr. 5 Zrcadlové koncentrátoři [12]

## 5.6 Half-cut technologie

Half-cut technologie spočívá v rozdělení fotovoltaických článků na poloviny a následné propojení těchto polovin do paralelních obvodů. Tato technologie snižuje tepelné ztráty a zvyšuje odolnost panelů vůči stínění a mikrotrhlinám, což v konečném důsledku zvyšuje celkovou účinnost a spolehlivost fotovoltaického systému.

## 6 Systémy připojené na rozvodnou síť

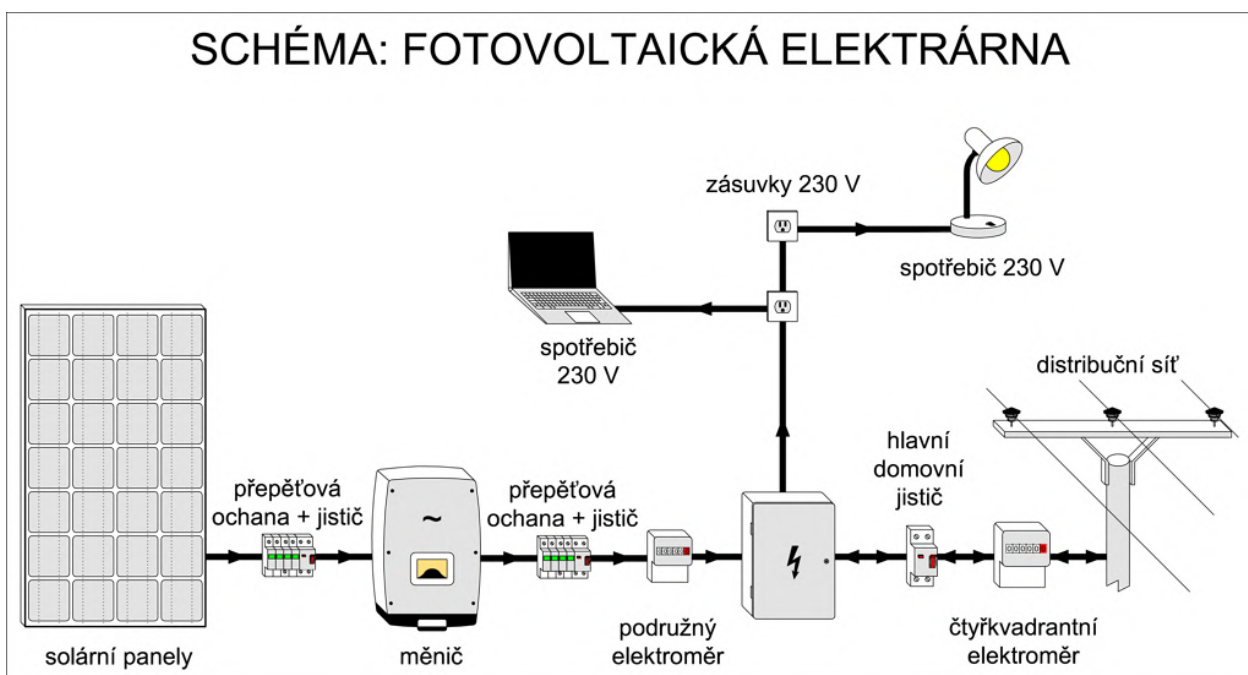
Elektřinu vyrobenou fotovoltaickými panely je možné dodávat do rozvodné sítě. Odpadá tak potřeba akumulace, čímž se systém zjednodušuje. Výhodou je vedle možnosti odprodávat elektřinu distributorovi, což může být z dlouhodobého horizontu ekonomicky výhodné, rovněž možnost odebírat elektřinu ze sítě. V systému je potřebný měnič, který zajišťuje konverzi stejnosměrného proudu z panelů na proud střídavý. Síťové měniče mohou být jednofázové nebo třífázové. Musí splňovat bezpečnostní opatření, sledovat napětí, frekvenci a impedanci sítě, zajišťovat plnění normy kvality dodávané energie či vypnou dodávku elektřiny při poruše. Nejčastěji se používají střídače pracující v režimu pulzně šířkové modulace (PWM) synchronizované rozvodnou sítí.

Některé měniče rovněž umožňují připojení datové komunikační linky pro monitorování provozu systému. Činnost měničů je obvykle zajištěna digitálním řídicím systémem. S ohledem na velikost systému je možné měnič volit z několika variant.

Modulový střídač je střídač malého výkonu (do 500 W), který bývá nainstalován přímo na fotovoltaický modul. Panely mají vlastní střídače paralelně připojené k síti. Výhodou je menší potřeba vodičů o velkých průměrech, protože odpadá přenos stejnosměrného proudu na větší vzdálenosti. Výhodou systému je také jeho modularita, tedy možnost odebírání nebo přidávání jednotlivých panelů ke střídači. Hlavní nevýhodou je vysoká cena.

Centrální střídač převádí výkon všech panelů. Systém zvládá i větší instalace, a to i ve stovkách kilowatt. Panely se zde propojí sériově a paralelně. Výhodou systému je vyšší pracovní napětí, které je příznivé pro zmenšení ztrát ve vedení a obecně zlepšuje parametry střídače. Nevýhoda spočívá v lokalizaci poruch.

Řetězový střídač je kombinací předchozích dvou variant. Několik panelů je zapojeno sériově a výkon jejich řetězce zpracovává jeden měnič. Jeho výkon se pohybuje do 15 kW a v systému jich může být několik. Systém lze snadno rozšiřovat, a dojde-li k poruše, je její lokalizace mnohem jednodušší než u centrálního střídače. Řetězové střídače se často používají v zapojení, kde tři různé řetězce dodávají výkon do tří fází síťového rozvodu [8].



Obr. 6 Schéma fotovoltaické elektrárny [13]

## 7 Ostrovní fotovoltaické systémy

Fotovoltaické systémy připojené k rozvodné síti patří k poměrně drahým zdrojům energie. Jejich stavba se často vyplácí jen díky vysokým výkupním cenám elektřiny. Pro ostrovní (tj. autonomní) systémy v místech bez elektrické infrastruktury platí tvrzení přesně opačné. Zpravidla jde o nejlevnější způsob, jak zajistit alespoň základní energetické služby tam, kde není možné připojení k rozvodné síti. Jde o horské chaty, letní tábory, ale mohou to být i klasické rodinné domy [7]. Můžeme se s nimi setkat i při řízení provozu světelnou signalizací při opravách silniční sítě v odlehlých oblastech.

Ostrovní fotovoltaické systémy sestávají z jednoho či několika fotovoltaických panelů a akumulátoru elektrické energie. Nejčastěji jsou používány akumulátory elektrochemické, z nichž nejrozšířenější jsou baterie olověné. Pro speciální aplikace slouží baterie nikl-kadmiové či nikl-železné a využívají se i lithiové články. Další komponentou ostrovních systémů je regulátor napětí, který má zabránit přebíjení baterie či jejímu hlubokému vybití a optimalizuje celý nabíjecí proces. Standardně je pracovní bod fotovoltaického pole dán napětím akumulátoru, což nemusí být z hlediska účinnosti systému optimální. Zlepšené účinnosti lze dosáhnout přidáním DC-DC měniče, který umožňuje regulovat výstupní napětí fotovoltaického pole tak, aby odpovídalo bodu maximálního výkonu.

Výhodou ostrovních systémů je jejich relativně jednoduchá instalace, jednodušší než u tzv. on-grid aplikací, kde je nutné nainstalovat např. pro trojfázový odběr tři střídače. Mezi další výhody patří nízké provozní náklady, slunce svítí zadarmo. Odpadají náklady na palivo potřebné pro elektrocentrály nebo kogenerační jednotky. Nesmíme opomenout ekologickou šetrnost a bezhlučný provoz systémů.

Nevýhodou ostrovních systémů je nižší napětí (nejčastěji 12 nebo 24 V). Z této skutečnosti vychází potřeba vodičů o velkém průřezu, aby nedocházelo k velkým ztrátám kvůli vysokým proudům. Jednou z možností je doplnění systému střídačem, díky němuž lze kromě tenčích vodičů používat i běžné síťové spotřebiče.

Výkon ostrovních systémů je limitován počtem panelů a intenzitou slunečního záření. Před zapojením spotřebiče je třeba zvážit, zda je výkon systému pro spotřebič dostačující. Nejvíce elektrické energie se spotřebuje při vytápění nebo ohřevu užitkové vody. S nároky na elektrickou energii souvisí i výběr vhodného akumulátoru. Jeho velikost je spojena s předpokládaným počtem dnů bez slunečního svitu. Pokud chce mít spotřebitel jistotu, že nezůstane bez proudu ani během zimních měsíců, je vhodné ostrovní fotovoltaický systém doplnit dalším zdrojem, např. větrnou turbínou, malou vodní elektrárnou nebo, asi nejčastěji, elektrocentrálou se zásobou paliva [8].

## 8 Historie elektrochemické akumulace

Lidé od nepaměti hledali způsob, jak energii efektivně ukládat. Za zmínku stojí tzv. „bagdáská baterie“, objevená archeology v minulém století. Její koncept je starší než dva tisíce let. V nádobě byly listy mědi navinuté na železnou tyč. Wilhelm König, jeden z německých archeologů,

spekuloval o možnosti kombinace mědi a železa jako formy galvanických článků použitých jako baterie. Když je přidána kyselina, měď a železo mohou vyvolat chemickou reakci vedoucí ke generaci elektrického proudu. Předpokládá se, že taková forma baterie mohla být použita k elektrolytickému pokovování artefaktů Parthské civilizace zlatem.

Italský fyzik Luigi Galvani pitval v roce 1780 žábu připojenou k mosaznému háku železným skalpelem. Když se dotkl její nohy, noha se pohnula. Galvani věřil, že to způsobila "živočišná elektřina" pocházející z nohy samotné. To odmítal Alessandr Volta, který zastával názor, že jev způsobily dva kovy a vlhký vodič. Volta svou koncepci ověřil experimentem, který zveřejnil v roce 1791.

Na počátku 19. století Volta na základě Galvaniho „žabích“ pokusů sestavil proslulý Voltův elektrochemický článek (tzv. Voltův sloup), který je dnes vnímán jako první baterie schopná produkovat elektrický proud. Článek je tvořen zinkovou a měděnou elektrodou v elektrolytu ze zředěné kyseliny sírové. Navzdory schopnosti dodávat stálé proudy, Voltův článek nemohl produkovat elektřinu dlouho, jeho životnost nepřekročila hodinu. Dalšími nedostatky byly úniky elektrolytu, které způsobovaly zkraty, a tvorba vodíkových bublin na mědi, což zvyšovalo vnitřní odpor baterie.

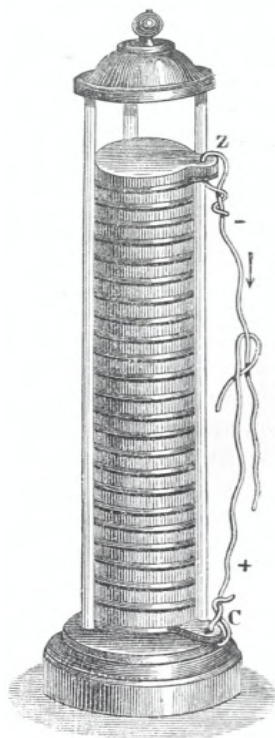
Po Galvanim a Voltovi následovali další badatelé, kteří se snažili elektrochemický postup zdokonalovat. Jedním z nich byl britský chemik John Frederic Daniell, který překonal omezení Voltova sloupu, když vynalezl článkové baterie. Daniellova baterie využívala síran měďnatý ponořený v keramické nádobě naplněné zinkovou elektrodou a kyselinou sírovou. Nádoba z porézního materiálu umožňovala iontům procházet, ale zabraňovala smíchání roztoků. Daniellova článková baterie byla také první baterií, která využívala rtuť k redukci koroze. Tento typ baterie produkoval napětí 1,1 V a byl hojně používán k napájení komunikačních zařízení.

V roce 1859 Gaston Planté přišel s první dobíjecí baterií, která mohla být po vybití opět nabita. Šlo o dnes známý olověný akumulátor.

V roce 1899 vynalezl švédský vědec Waldemar Junger první nikl-kadmiovou baterií (Ni-Cd). Šlo o prototyp využívající alkalický elektrolyt, díky němuž článek disponoval lepší energetickou hustotou než olověné baterie.

Po sérii experimentů přišel badatel Gilbert Newton Lewis v roce 1912 s lithium-iontovou baterií. Komerčně dostupnými se tyto baterie staly až koncem století. Firma SONY uvedla baterii na trh v roce 1991 [14].

Intenzivní hledání způsobů efektivního skladování elektrické energie pokračuje i v dnešní době.



Obr. 7 Voltův sloup [15].

## 9 Akumulátory

Autonomní fotovoltaické systémy (též off-grid) jsou zdatelně dražší než ty, které pouze dodávají energii do sítě. Hlavním důvodem je cena akumulátorů, která často tvoří víc než polovinu ceny celého zařízení. Jejich životnost je přitom nižší než životnost fotovoltaických panelů. Bude je nutné po čase vyměnit, což dále zvýší náklady [7].

### 9.1 Olověné akumulátory

Jde o nejčastější typ akumulátorů pro fotovoltaické systémy. Od startovacích akumulátorů se liší tím, že jsou optimalizovány na hluboké vybíjení (tzv. deep cycle) a mají nízké samovybíjení. Tento typ akumulátorů se používá velmi dlouho a jejich technologie je dobře zvládnuta. Olověné akumulátorové baterie existují v několika provedeních:

- Klasické staniční baterie složené z 2 V článků v průhledných nádobách s volně nalitým elektrolytem. Umožňují snadnou údržbu a výměnu článků. V porovnání s jinými provedeními jsou levné. Měřením hustoty kyseliny lze snadno zjistit stupeň nabití. Baterie

jsou vhodné pro cyklický provoz, a protože mají tlusté desky, snášejí i hluboké vybíjení. Jejich nevýhodou je větší cena a vyšší hmotnost. Pro ochranu před nebezpečím výbuchu je nutné zajistit odvětrávání kyslíku a vodíku, plynů vznikajících při nabíjení, Údržba je nutná, byť relativně jednoduchá. Je třeba dolévat do elektrolytu destilovanou vodu a kontrolovat stav článků. Kladné desky trubkového typu jsou ze slitiny olova s malým množstvím antimonu, záporné desky jsou pastového typu s mřížkou.

- Šesti článkové 12V baterie se používají zpravidla pro menší systémy. Jejich výhodou je nízká cena a kompatibilita. Nevýhodou je, že při poruše jednoho článku je oprava relativně složitá.
- Uzavřené baterie s elektrolytem nasáklým v porézní hmotě nebo elektrolytem ve formě tixotropního gelu. U těchto baterií dochází na povrchu čerstvě vyloučeného olova na záporné desce k reakci kyslíku a vodíku za vzniku vody. Díky tomu není třeba vodu doplňovat, a proto se akumulátory nazývají bezúdržbové. Jejich výhodou je také menší sklon k sulfataci při delším setrvání ve vybitém stavu a menší samovybíjení. Nevýhodou je vyšší cena a nemožnost opravy vadných článků [7].

## 9.2 Alkalické akumulátory

Do této skupiny patří nikl-kadmiové (Ni-Cd), nikl-metalhydridové (Ni-MH) a nikl-ocelové (Ni-Fe) akumulátory. Mají nižší energetickou účinnost než akumulátory olovené. Ve fotovoltaických systémech se setkáme zejména s Ni-Cd akumulátory s kapsovými elektrodami. Jejich výhodou je dlouhá životnost, uvádí se, že při optimálních nabíjecích cyklech 10–20 let. Dobře snášejí dlouhodobé vybití. Nevýhodou je tzv. paměťový efekt, což je pokles kapacity, když se baterie občas zcela nevybíje. Trpí také samovybíjením, v prvních dvaceti dnech je denní ztráta náboje 1–2 %. Díky nižšímu napětí článku (1,2 V) je pro dosažení potřebného napětí nutný jejich větší počet (10 článků ve 12V Ni-Cd baterii, 6 článků v oloveném akumulátoru). Kadmium z vyřazené baterie patří mezi nebezpečné odpady [7].

## 9.3 Lithium-iontové baterie

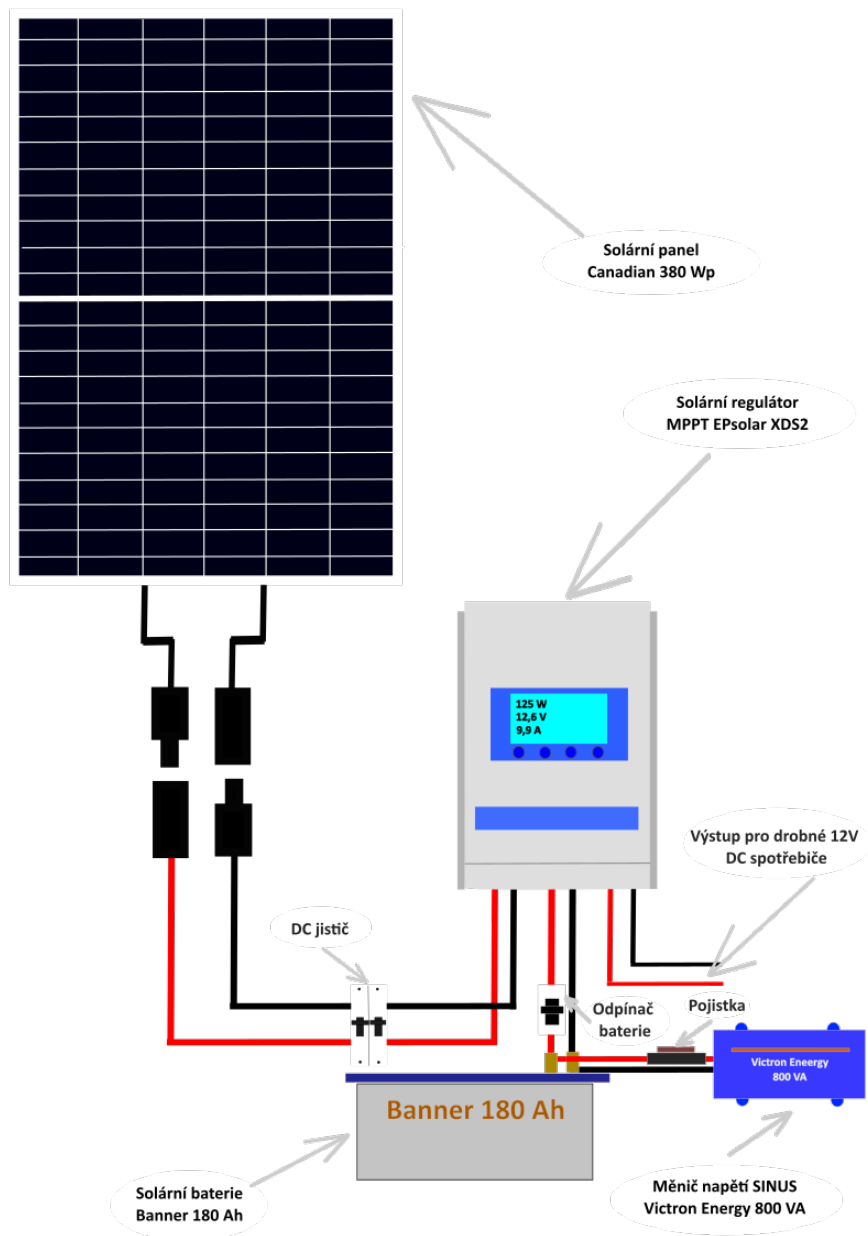
Tyto baterie zažívají v poslední době rozmach. Výhodou je jejich malá hmotnost daná hmotností lithia, které patří mezi nejlehčí kovy. Hmotnost při stejné kapacitě dosahuje pouze 20 % hmotnosti běžných bezúdržbových olovených baterií. Díky své vysoké reaktivitě poskytuje lithium relativně vysoké napětí připadající na jeden článek (přibližně 3 V). Mají zanedbatelné samovybíjení a netrpí výše zmíněným paměťovým efektem. Významnou nevýhodou je postupná ztráta kapacity s časem, bez ohledu na to, zda je baterie používána nebo nikoliv. Tento fenomén je způsoben vysokou reaktivitou lithia. Baterie musí mít jištění proti přílišnému vybití, které by ji dokázalo spolehlivě zničit. Baterie jsou rovněž citlivé na přebíjení. Proto se do nich montuje speciální obvod, který dokáže odpojit či omezit proud, když je plně nabitá, nebo když se naopak vybíje pod určité napětí [7].



## 10 Praktické měření

Tato kapitola se věnuje praktickému měření základních charakteristik vybraných fotovoltaických panelů v různých podmínkách.

### 10.1 Testovaný ostrovní fotovoltaický systém



Obr. 8 Schéma zapojení ostrovního fotovoltaického systému.

Jde o celek sestávající z několika komponent, které nám byly v červnu roku 2023 dodány společností SOLARSUN. Jsou to následující komponenty:

- FV panel Canadian CS3L-380MS,
- FV regulátor MPPT EPsolar serie XTRA – 30 A,
- solární baterie Banner 180Ah Solar,
- měnič napětí SINUS Victron Energy Phoenix VE.Direct 800 VA 12 V,
- pojistný odpínač k baterii 50 A + 2x pojistka,
- pár svorek pro připojení kabelů k baterii a příslušná kabeláž,
- DC jistič 20 A k panelu.

Další testované fotovoltaické panely, zapůjčené z EÚ FSI VUT v Brně:

- FV panel Victron Energy SPP040601200,
- FV panel Renogy RNG-100DB-H.

## 10.2 Parametry jednotlivých testovaných komponent

V této podkapitole jsou uvedeny základní parametry komponent ostrovního systému, které byly shledány relevantními v rámci měření.

### 10.2.1 Fotovoltaický panel Canadian Solar CS3L-380MS

Tab. 1 Parametry panelu Canadian Solar CS3L-380MS\*

Nominální výkon panelu [Wp]:	380
Rozměry [mm]:	1048x1765x35
Typ panelu:	monokrystalický
Jmenovité napětí [V]:	34,5
Hmotnost [kg]:	20,5
Maximální účinnost [%]:	20,5
Teplotní koeficient při Pm [% / °C]:	-0,35

\* Při standardních testovacích podmínkách (STC) ozáření 1000 W/m<sup>2</sup>, spektru AM 1,5 a teplotě článku 25 °C



Obr. 9 Canadian Solar CS3L-380MS [16]

### 10.2.2 Solární regulátor MPPT EPsolar serie XTRA – 3210N

Solární regulátor v ostrovním fotovoltaickém systému slouží k řízení a optimalizaci nabíjení a vybíjení akumulátorů. Jeho hlavní funkcí je chránit akumulátory před přebíjením, které by mohlo způsobit jejich poškození nebo zkrácení životnosti. Dále regulátor monitoruje napětí a proud dodávaný ze solárních panelů, aby udržel optimální nabíjecí podmínky. Solární regulátor také chrání fotovoltaický systém před zpětným vybíjením v noci a poskytuje informace o stavu nabíjení a výkonu celého systému. Celkově zajišťuje efektivní a bezpečné fungování solárního systému s akumulátory.



Obr. 10 solární regulátor MPPT EPsolar serie XTRA – 3210N [17]

### 10.2.3 Solární baterie Banner 180Ah Solar

Jde o baterii s tekutým elektrolytem pro provoz v solárních systémech. Od autobaterií se liší nejen cenou, ale hlavně konstrukcí, která oproti běžné autobaterii přináší mnohonásobně delší životnost v cyklickém provozu fotovoltaických systémů.

Baterie je olověná stejně jako baterie gelová, pouze elektrolyt je kapalný. Jako elektrolyt je použita zředěná kyselina sírová. Je proto vyžadována údržba v podobě kontroly hladiny elektrolytu přibližně jednou za měsíc a případné dolití destilovanou vodou [16].

Tab. 2 Vybrané parametry solární baterie Banner 180 Ah

Hmotnost [kg]:	47
Kapacita [Ah]:	180
Napětí [V]:	12
Kapacita [kWh]:	2,16
Rozměry [mm]:	514 x 223 x 220
Typ:	Údržbový



Obr. 11 Solární baterie Banner 180 Ah [18].

### 10.2.4 Měníč napětí SINUS Victron Energy Phoenix VE.Direct 800VA 12 V

Jde o měnič, který obsahuje robustní toroidní transformátor. Měníč generuje tzv. čistou sinusovou vlnu, což znamená, že proud i napětí mají reálný sinusový charakter, tak jak je tomu v reálné rozvodné síti (některé levnější měniče totiž generují tzv. modifikovanou sinusoidu). Měníč je odolný proti zkratu a chráněný proti přehřátí, ať už v důsledku přetížení nebo vysoké teploty okolí [17].

Tab. 3 Vybrané parametry měniče napětí SINUS Victron Energy Phoenix VE.Direct 800 VA 12 V

Trvalý výstupní výkon [VA]:	800
Trvalý činný výkon [W]:	650
Špičkový činný výkon [W]:	1500
Hmotnost [kg]:	5,5
Rozměry [mm]:	105 x 216 x 305

\*Parametry jsou pro teplotu 25 °C



Obr. 12 Měnič napětí SINUS Victron Energy Phoenix VE.Direct 800VA 12 V [19]

### 10.2.5 Fotovoltaický panel Victron Energy SPP040601200

Tab. 4 Základní parametry fotovoltaického panelu Victron Energy SPP040601200\*

Nominální výkon panelu [Wp]:	60
Rozměry [mm]:	545 x 668 x 25
Typ panelu:	polykrystalický
Jmenovité napětí [V]:	12
Hmotnost [kg]:	4
Maximální účinnost [%]:	16,5
Teplotní koeficient při Pm [% / °C]:	-0,45

\* Při standardních testovacích podmínkách (STC) ozáření 1000 W/m<sup>2</sup>, spektru AM 1,5 a teplotě článku 25 °C



Obr. 13 Fotovoltaický panel Victron Energy SPP040601200 [20]

#### 10.2.6 Fotovoltaický panel Renogy RNG-100DB-H

Tab. 5 Základní parametry fotovoltaického panelu Renogy RNG-100DB-H\*

Nominální výkon panelu [Wp]:	100
Rozměry [mm]:	1216 x 533 x 2
Typ panelu:	monokrystalický
Jmenovité napětí [V]:	18,9
Hmotnost [kg]:	1,8
Maximální účinnost [%]:	15,43
Teplotní koeficient při Pm [% / °C]:	-0,42

\* Při standardních testovacích podmínkách (STC) ozáření 1000 W/m<sup>2</sup>, spektru AM 1,5 a teplotě článku 25 °C



Obr. 14 Fotovoltaický panel Renogy RNG-100DB-H [21]

## 10.3 Měřicí technika

K praktickému měření fotovoltaických panelů byla použita měřicí zařízení od polského výrobce Sonel, určená k měření fotovoltaických instalací.

### 10.3.1 Sonel PVM-1020

Měřicí přístroj Sonel PVM-1020 slouží ke komplexnímu měření provozních charakteristik fotovoltaických panelů. Testovaný panel se do něj zapojí pomocí dvou vodičů. Jedná se o vhodný nástroj při měření kategorie 1 dle normy ČSN EN 62446-1. Spolupracuje s měřičem slunečního záření a teploty Sonel IRM-1 prostřednictvím rádiové komunikace LoRa, a je tak schopný převádět naměřené parametry na podmínky STC dle normy ČSN EN IEC 60891. Zařízení rovněž disponuje Bluetooth modulem pro komunikaci s počítačem. Přístroj je schopen měřit následující parametry:

- napětí naprázdno FV panelu nebo řetězu panelů až do 1000 V DC,
- RMS napětí AC sítě do 600 V s měřením frekvence,
- zkratový proud FV panelu nebo řetězu panelů do 20 A DC,
- izolační odpor FV panelů – měření napětí 250, 500 nebo 1000 V, současné měření dvou hodnot  $R_{ISO+}$  a  $R_{ISO-}$ . Izolační odpor AC obvodů – měřicí napětí 250, 500 nebo 1000 V,

- odolnost ochranných vodičů a vyrovnaní potenciálů s proudem  $\pm 200$  mA,
- měření slaboproudého odporu, zvuková a vizuální signalizace,
- měření provozního proudu a střídavého proudu FV panelů – vše pomocí externí svorky,
- měření výkonu AC/DC,
- test diod s proudem 200 mA, automatická detekce polarity,
- test blokovacích diod napětím 1000 V DC.



Obr. 15 Sonel PVM-1020

### 10.3.2 Sonel IRM-1

Přístroj Sonel IRM-1 slouží primárně jako měřič teploty a slunečního svitu pomocí kalibrovaného čidla. Prostřednictvím komunikace LoRa spolupracuje s měřičem Sonel PVM-1020. Přístroj také disponuje zabudovaným kompasem a měřičem sklonu. Měřič spadá do vysoké třídy přesnosti IP65. Přístroj měří následující parametry:

- intenzita slunečního záření ve  $W/m^2$  nebo BTU/ft<sup>2</sup>h,
- teplota FV panelu ve  $^{\circ}C$  nebo  $^{\circ}F$ ,
- okolní teplota ve  $^{\circ}C$  nebo  $^{\circ}F$ ,



- úhel sklonu FV panelů,
- orientace panelů pomocí vestavěného kompasu.



Obr. 16 Sonel IRM-1

## 10.4 Měřicí naklápěcí rám

Jelikož se první část praktického měření zabývá závislostmi parametrů fotovoltaických panelů na úhlu sklonu, bylo nutné zhotovit zařízení sloužící k nastavení úhlu, který bude fotovoltaický panel svírat s horizontální rovinou.

Z dřevěných latí jsme zhotovili naklápěcí rám, na který byly umístěny testované panely (obr. 17). Rám sestává ze dvou obdélníkových bloků diagonálně vyztužených příčkou a spojených dvěma nerezovými panty. Blok sloužící jako základna má uprostřed lat s děrami, do kterých se zapichuje hrot polohovacího zařízení. Druhý blok slouží jako nosič panelu, pro jehož upevnění je na spodní části zhotoven žlábek, do kterého se panel zasune. V polovině delších stran má vloženu příčku, na kterou je pomocí nerezového pantu připevněna polohovací lat s výše zmíněným hrotem na konci. Bloky jsou pro lepší mechanické vlastnosti opatřeny rohovými nerezovými výztuhami.

Zařízení lze polohovat od  $0^\circ$ , kdy oba bloky leží na sobě a panel tak svírá nulový úhel s horizontální rovinou, do  $90^\circ$ , kdy panel svírá s horizontální rovinou pravý úhel.



Obr. 17 Měřicí naklápěcí rám

## 10.5 Měření parametrů FV panelů v závislosti na sklonu

Následující experiment se zabývá měřením hlavních charakteristik fotovoltaických panelů v závislosti na sklonu panelů, a tedy i na úhlu, který panel svírá se slunečními paprsky.

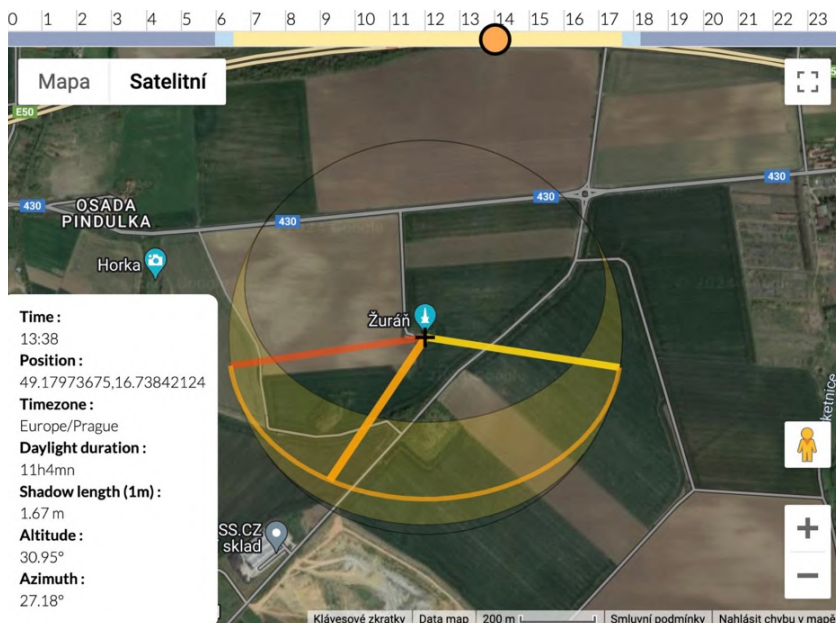
### 10.5.1 Popis experimentu

Měření bylo provedeno 4. března 2024 v lokalitě Žuráň (místo odkud řídil Napoleon bitvu u Slavkova), spadající do katastrálního území obce Podolí v Jihomoravském kraji. Byl slunečný den s prakticky nulovou oblačností. Měření bylo zrealizováno v časovém rozmezí 13.38–14.02, kdy Slunce svítilo pod úhlem  $\theta \in (30,95^\circ - 29,16^\circ)$ . Pro účely měření byl z důvodu nevýznamné odchylky úhel  $\theta$  zaokrouhlen na  $30^\circ$ . Údaje o pozici slunce vychází z webové stránky Sun Direction dostupné z [22].

Panely byly postupně naklápěny z polohy  $0^\circ$  do polohy  $90^\circ$ , a to v intervalech po  $10^\circ$ . Na panely byl připevněn měřicí přístroj Sonel IRM-1, který snímal intenzitu dopadajícího slunečního záření, teplotu panelu, teplotu ovzduší, sklon panelu a orientaci panelu pomocí zabudovaného kompasu. Zatímco sklon panelů vstupuje do experimentu jako nezávislá proměnná, orientace je volena podle polohy slunce. Naklápěcí rám s testovanými panely byl v průběhu celého měření natáčen za

sluncem tak, aby normála plochy panelu ležela se slunečními paprsky v jedné rovině. V průběhu následujícího měření se azimut pohyboval v rozmezí od  $27,18^\circ$  do  $29,00^\circ$ , a bylo tedy nutné celý stojan ke kolmému nasměrování na slunce mírně pootáčet.

V každé poloze bylo změřeno napětí na prázdno  $U_{oc}$  a zkratový proud  $I_{sc}$ , a to pomocí přístroje Sonel PVM-1020. Dále byl v každé poloze změřen maximální výkon  $P_{mpp}$  pomocí solárního regulátoru MPPT EPsolar serie XTRA – 3210N.



Obr. 18 Informace o pozici slunce. Převzato z [22] a upraveno

## 10.5.2 Sledované veličiny

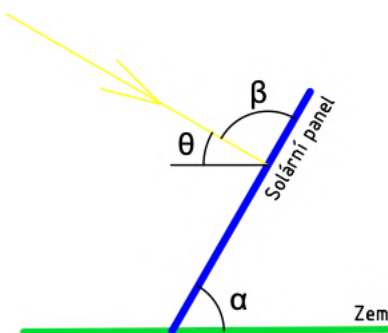
V průběhu experimentu byly sledovány následující veličiny:

Úhel slunce nad obzorem  $\theta$  [ $^\circ$ ] – úhel, pod kterým dopadá sluneční záření na zemský povrch.

Sklon panelu  $\alpha$  [ $^\circ$ ] – úhel, který svírá testovaný panel s horizontální rovinou. Tento úhel byl měřen pomocí přístroje Sonel IRM-1.

Úhel dopadajícího záření na panel  $\beta$  [ $^\circ$ ] – úhel, který svírá testovaný panel s dopadajícími slunečními paprsky. Tento úhel je pro následující experiment nejvíce vypovídající, jelikož přímo ovlivňuje naměřené veličiny. Je vypočten pomocí triviální rovnice:

$$\beta = 180^\circ - \alpha - \theta. \quad (1)$$



Obr. 19 Popis úhlů

Plocha FV panelu  $A_c$  [m<sup>2</sup>] – celková plocha fotovoltaického modulu, součin jeho šířky a délky.

Provozní teplota FV panelu  $T_c$  [°C] – teplota fotovoltaického modulu naměřená během experimentu pomocí čidla přístroje Sonel IRM-1 přiloženého k zadní straně modulu.

Provozní teplota vzduchu  $T$  [°C] – teplota okolního ovzduší naměřená přístrojem Sonel IRM-1.

Intenzita záření  $E$  [W/m<sup>2</sup>] – intenzita dopadajícího slunečního záření naměřená referenčním článkem přístroje Sonel IRM-1 v jednotlivých polohách panelů.

Maximální výkon  $P_{mpp}$  [W] – maximální výkon článku naměřený pomocí MPPT regulátoru při sledování maximálního pracovního bodu.

Napětí na prázdko  $U_{oc}$  [V] – maximální napětí na výstupních svorkách FV panelu při nulovém proudu a bez připojené zátěže naměřené pomocí přístroje Sonel PVM-1020.

Zkratový proud  $I_{sc}$  [A] – maximální proud při nulovém napětí a za předpokladu, že odpor  $R_{so}$  je nulový, naměřený pomocí přístroje Sonel PVM-1020.

Účinnost FV panelu  $\eta$  [-] – účinnost fotovoltaického panelu při daných podmínkách vyjádřena ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{rad}} = \frac{P_{mpp}}{E \cdot A_c} \quad (2)$$

Přepočtená účinnost FV panelu  $\eta_{STC}$  [-] – účinnost fotovoltaického panelu přepočtená na standardní testovací podmínky (Standard Test Conditions, tj. intenzita 1000 W/m<sup>2</sup>, teplota modulu 25 °C, AM 1,5) dle vztahu:

$$\eta_{STC} = \eta - \beta_P \cdot (T_C - T) , \quad (3)$$

kde  $\beta_P$  je teplotní koeficient vyjádřen v [%/ °C].

Fill factor FF – udává poměr mezi maximálním výkonem  $P_{mmp}$  a výkonem daným zkratovým proudem  $I_{sc}$  a napětím na prázdko  $U_{oc}$ . Závisí na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a také odporu aktivní polovodiivé vrstvy. V češtině je nazýván také činitelem plnění. Fill Factor se dá vyjádřit vztahem:

$$FF = \frac{P_{mmp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} . \quad (4)$$

Vztažená účinnost  $\eta_{VZ}$  [-] – poměr výkonu FV panelu  $P_{mmp}$  v daných podmínkách k výkonu FV panelu  $P_{mmp(90^\circ)}$  při  $\beta = 90^\circ$  (tj. k maximálnímu dosaženému výkonu) dle vztahu:

$$\eta_{VZ} = \frac{P_{mmp}}{P_{mmp(90^\circ)}} . \quad (5)$$

### 10.5.3 Naměřené hodnoty

#### Canadian Solar CS3L-380MS

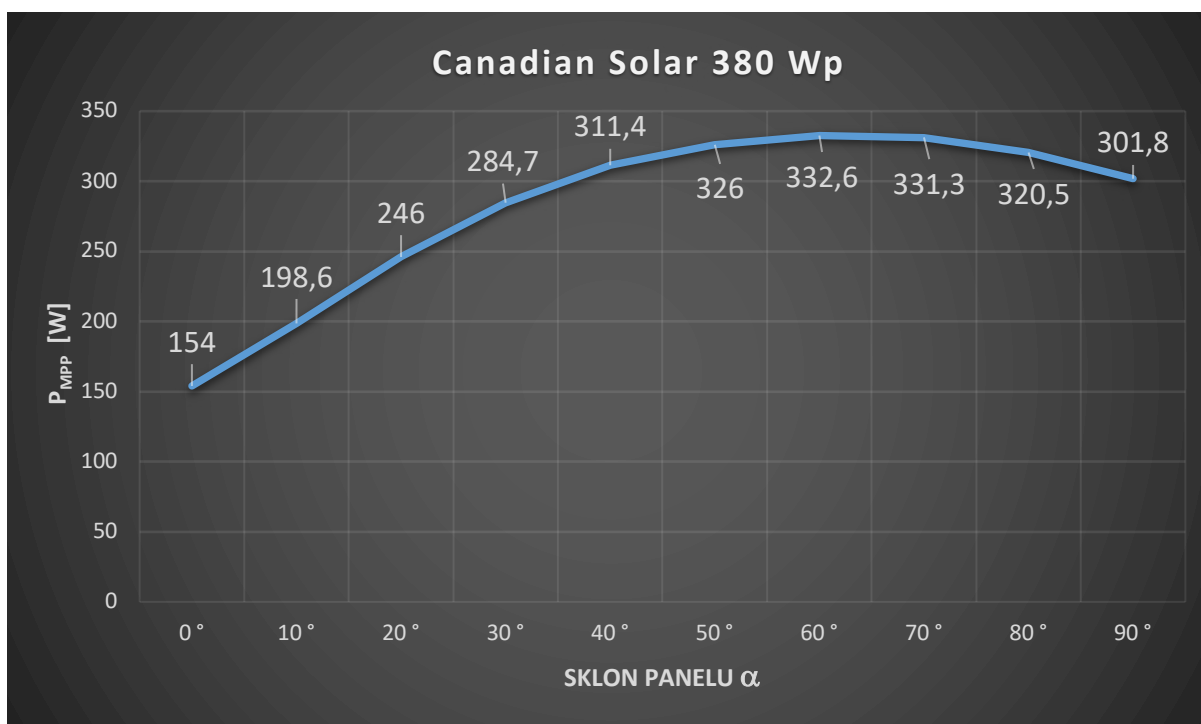


Obr. 20 Fotovoltaický panel Canadian Solar CS3L-380MS během měření

Tab. 6 Naměřené hodnoty fotovoltaického panelu Canadian Solar CS3L-380MS

$\theta$ [°]	30	$T_c$ [°C]	33,4						
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	1,85	$T$ [°C]	17,6						
$\beta_p$ [%/°C]	-0,35								
$\alpha$	$\beta$	$E$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P_{mpp}$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$\eta$ [%]	$\eta_{STC}$ [%]	FF	$\eta_{vz}$ [%]
0 °	150 °	483	154	39,2	5,07	17,23	20,17	0,77	46,30
10 °	140 °	601	198,6	39,6	6,51	17,86	20,80	0,77	59,71
20 °	130 °	735	246	39,9	8,09	18,09	21,03	0,76	73,96
30 °	120 °	845	284,7	40,1	9,28	18,21	21,15	0,77	85,60
40 °	110 °	923	311,4	40,2	10,21	18,24	21,18	0,76	93,63
50 °	100 °	973	326	40,2	10,83	18,11	21,05	0,75	98,02
<b>60 °</b>	<b>90 °</b>	<b>975</b>	<b>332,6</b>	<b>40,2</b>	<b>11,11</b>	<b>18,44</b>	<b>21,38</b>	<b>0,74</b>	<b>100,00</b>
70 °	80 °	973	331,3	40,1	11,11	18,41	21,35	0,74	99,61
80 °	70 °	944	320,5	40	10,73	18,35	21,29	0,75	96,36
90 °	60 °	884	301,8	39,9	10,18	18,45	21,39	0,74	90,74

Tabulka 6 zaznamenává naměřená data panelu Canadian Solar CS3L-380MS o nominálním výkonu 380 Wp. Sedmý řádek je zvýrazněn tučně, jelikož udává data z měření, kdy byl úhel  $\beta$  roven  $90^\circ$ , a tedy dopadající sluneční paprsky svíraly s panelem pravý úhel. Panel tak generoval maximální možný výkon  $P_{mmp}$ , který činil 332,6 W. Po přepočtu na STC by šlo o výkon 385,6 W, což by asi o 1 % překonalo nominální výkon deklarovaný výrobcem. Výkon s měnícím se sklonem panelu klesal, jak je patrné z grafu (obr. 21). Pozoruhodné je, že například při úhlu  $\alpha = 30^\circ$  a  $\alpha = 90^\circ$ , kdy je deviace od úhlu  $\beta = 90^\circ$  stejná, se výkony lišily, a to 284,7 W respektive 301,8 W. Rozdíl může být dán faktem, že při  $\alpha = 90^\circ$ , kdy byl panel umístěn svisle, se kromě dopadajícího slunečního záření část světla odrážela od zemského povrchu a zvýšila tak přibližně o 8 % výkon panelu. Nejnižšího výkonu panel dosahoval při  $\alpha = 0^\circ$ , kdy ležel na zemi. Přesto však generoval 154 W, což je přibližně 46 % maximálního dosaženého výkonu.



Obr. 21 Závislost maximálního výkonu  $P_{mmp}$  na sklonu  $\alpha$  pro panel Canadian Solar CS3L-380MS

**Victron Energy SPP040601200**



Obr. 22 Fotovoltaický panel Victron Energy SPP040601200 během měření

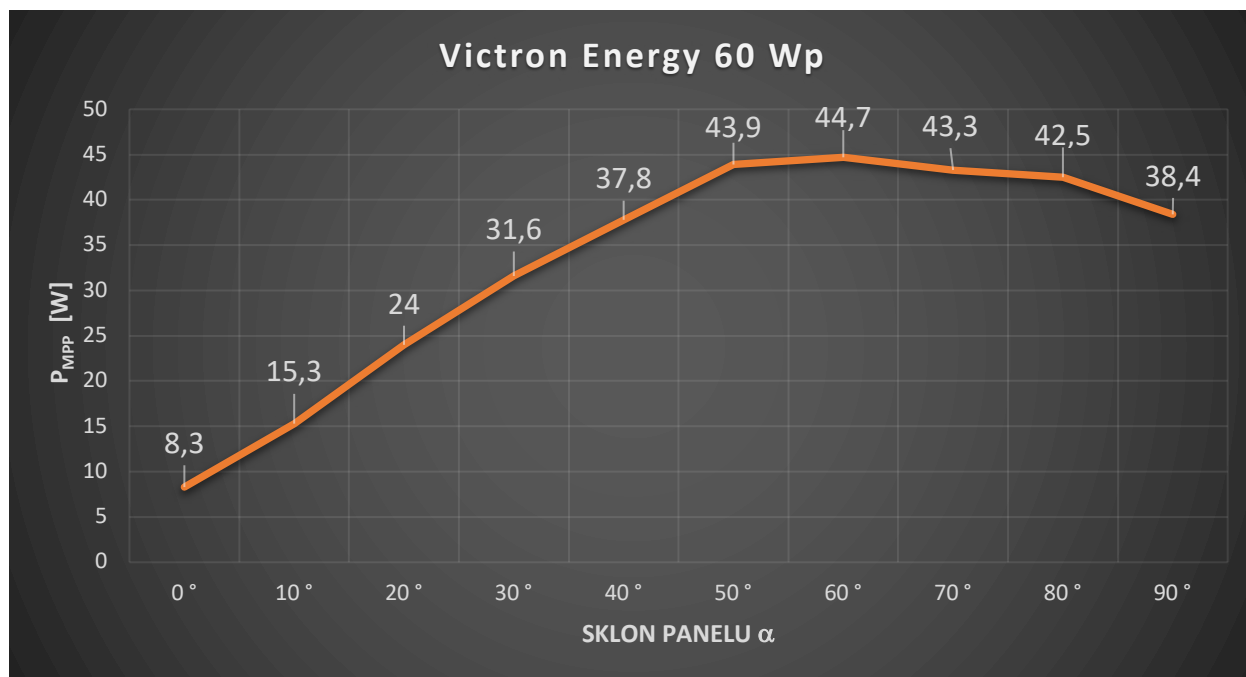
Tab. 7 Naměřené hodnoty fotovoltaického panelu Victron Energy SPP040601200

$\theta$ [°]	30	$T_c$ [°C]	30,9
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,364	$T$ [°C]	17,6
$\beta_p$ [%/°C]	-0,45		

$\alpha$	$\beta$	$E$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P_{mpp}$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$\eta$ [%]	$\eta_{STC}$ [%]	FF	$\eta_{vz}$ [%]
0 °	150 °	465	8,3	20,5	0,79	4,90	7,56	0,51	18,57
10 °	140 °	635	15,3	21	1,37	6,62	9,27	0,53	34,23
20 °	130 °	768	24	21,2	1,92	8,59	11,24	0,59	53,69
30 °	120 °	877	31,6	21,4	2,39	9,90	12,55	0,62	70,69
40 °	110 °	952	37,8	21,4	2,61	10,91	13,56	0,68	84,56
50 °	100 °	988	43,9	21,5	2,75	12,21	14,86	0,74	98,21
<b>60 °</b>	<b>90 °</b>	<b>1015</b>	<b>44,7</b>	<b>21,5</b>	<b>2,81</b>	<b>12,10</b>	<b>14,75</b>	<b>0,74</b>	<b>100,00</b>
70 °	80 °	1005	43,3	21,4	2,79	11,84	14,49	0,73	96,87
80 °	70 °	968	42,5	21,4	2,66	12,06	14,72	0,75	95,08
90 °	60 °	910	38,4	21,3	2,56	11,59	14,25	0,70	85,91



Tabulka číslo 7 zaznamenává naměřená data panelu Victron Energy SPP040601200 o nominálním výkonu 60 Wp. Sedmý řádek je opět zvýrazněn tučně, jelikož udává data z měření, kdy byl úhel  $\beta$  roven  $90^\circ$ , a tedy dopadající sluneční paprsky svíraly s panelem pravý úhel, a panel tak generoval maximální možný výkon  $P_{mmp}$ , který činil 44,7 W. Po přepočtu na STC by šlo o výkon 54,5 W, tedy o výkon téměř o 10 % nižší než nominální výkon deklarovaný výrobcem. Výkon s měnícím se sklonem panelu klesal, jak je patrné z grafu (obr. 23). I zde se při úhlu  $\alpha = 30^\circ$  a  $\alpha = 90^\circ$ , kdy je deviace od úhlu  $\beta = 90^\circ$  stejná, výkony lišily, a to 31,6 W respektive 38,4 W. Tento fakt je opět nejspíše důsledkem částečného odrazu od země při svislém umístění panelu. Rozdíl je přibližně 18 %, což je podstatně více než u předchozího panelu (8 %). Nejnižšího výkonu panel dosahoval při  $\alpha = 0^\circ$ , kdy ležel na zemi, a to 8,3 W, což je ani ne 19 % maximálního dosaženého výkonu. Dá se tedy říct, že v tomto případě je polykrystalický panel náchylnější k měnícímu se úhlu svitu než panel monokrystalický, což je poměrně atypické. Účinnostmi se zabývá samostatná kapitola.



Obr. 23 Závislost maximálního výkonu  $P_{mmp}$  na sklonu  $\alpha$  pro panel Victron Energy SPP040601200

### Renogy RNG-100DB-H



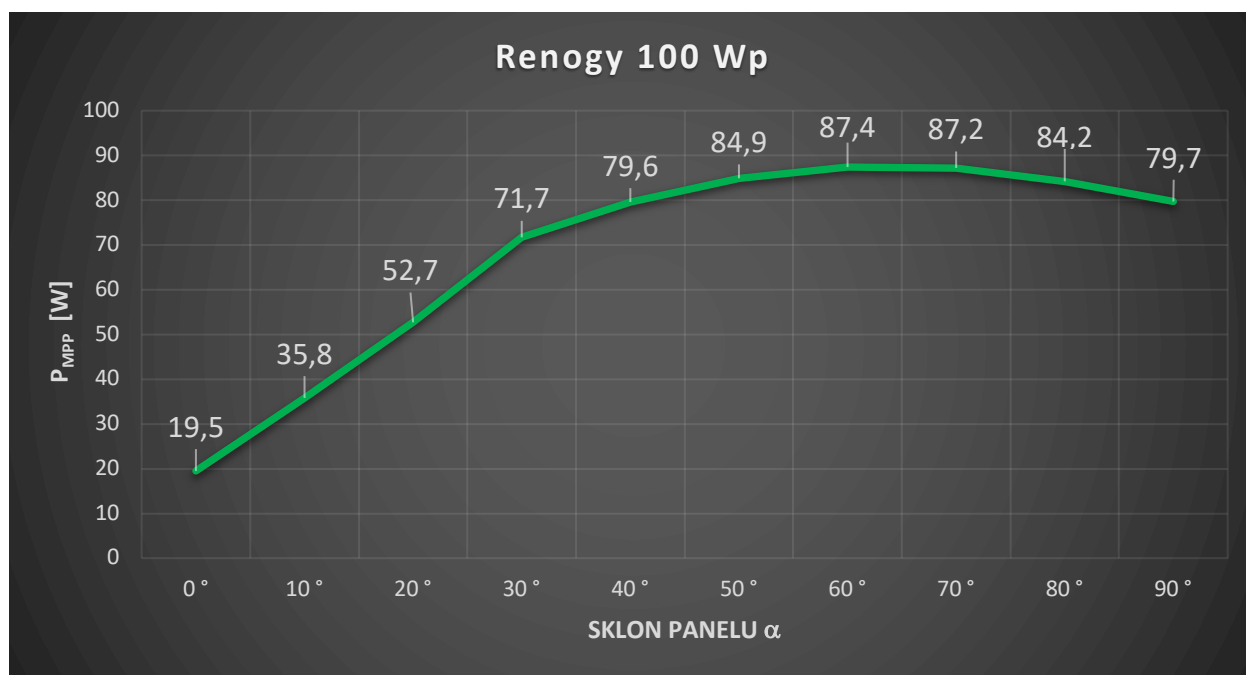
Obr. 24 Fotovoltaický panel Renogy RNG-100DB-H během měření

Tab. 8 Naměřené hodnoty fotovoltaického panelu Renogy RNG-100DB-H

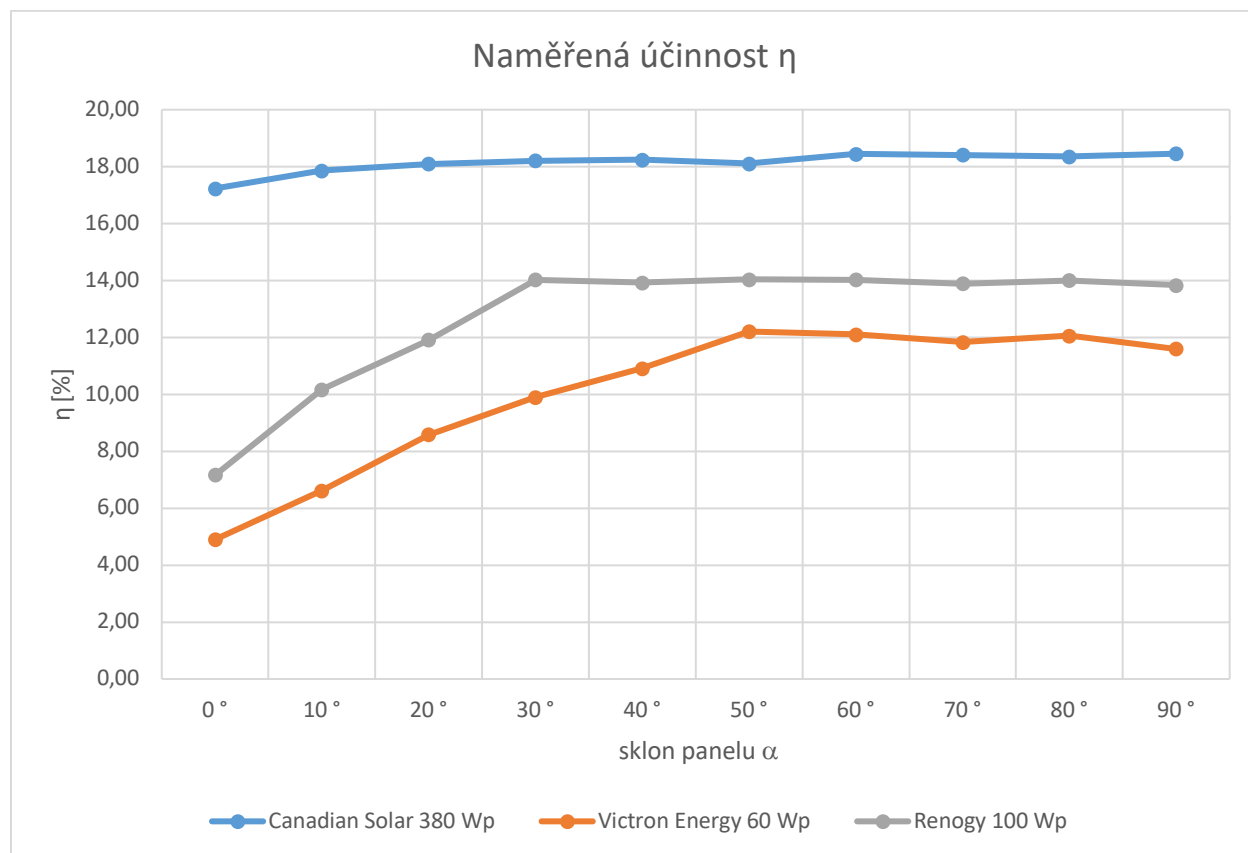
$\theta$ [°]	30	$T_c$ [°C]	29,5
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,648	$T$ [°C]	17,6
$\beta_p$ [%/°C]	-0,42		

$\alpha$	$\beta$	$E$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P_{mpp}$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$\eta$ [%]	$\eta_{STC}$ [%]	FF	$\eta_{vz}$ [%]
0 °	150 °	420	19,5	21,9	1,68	7,16	9,05	0,53	22,31
10 °	140 °	543	35,8	22,2	2,64	10,17	12,06	0,61	40,96
20 °	130 °	683	52,7	22,4	3,64	11,91	13,80	0,65	60,30
30 °	120 °	789	71,7	22,4	4,24	14,02	15,91	0,75	82,04
40 °	110 °	882	79,6	22,4	4,76	13,93	15,82	0,75	91,08
50 °	100 °	933	84,8	22,4	5,05	14,02	15,91	0,75	97,14
<b>60 °</b>	<b>90 °</b>	<b>962</b>	<b>87,4</b>	<b>22,3</b>	<b>5,23</b>	<b>14,02</b>	<b>15,91</b>	<b>0,75</b>	<b>100,00</b>
70 °	80 °	969	87,2	22,2	5,25	13,89	15,78	0,75	99,77
80 °	70 °	928	84,2	22,1	5,1	14,00	15,89	0,75	96,34
90 °	60 °	889	79,7	22	4,8	13,84	15,73	0,75	91,19

Tabulka 8 zaznamenává naměřená data panelu Renogy RNG-100DB-H o nominálním výkonu 100 Wp. Sedmý řádek je opět zvýrazněn tučně, jelikož udává data z měření, kdy úhel  $\beta$  byl roven  $90^\circ$ , sluneční paprsky svíraly s panelem pravý úhel a panel generoval maximální možný výkon  $P_{mmp}$ , který činil 87,4 W. Po přepočtu na STC šlo o výkon 99,2 W. Dosažený nominální výkon byl tedy jen o necelé 1 % nižší než 100 W, deklarovaných výrobcem. To je ve srovnání s předchozím panelem podstatně lepší výsledek. Výkon s měnícím se sklonem panelu klesal, jak je patrné z grafu (obr. 25). I zde se při úhlu  $\alpha = 30^\circ$  a  $\alpha = 90^\circ$ , kdy je deviace od úhlu  $\beta = 90^\circ$  stejná, výkony lišily, a to 71,7 W respektive 79,7 W. Tento fakt je opět nejpravděpodobněji důsledkem částečného odrazu světla od země při svislém umístění panelu. Rozdíl je přibližně 10 %, což je více než u panelu Canadian Solar (8 %), ale méně než u panelu Victron Energy (18 %). Nejnižšího výkonu panel dosahoval při  $\alpha = 0^\circ$ , kdy ležel na zemi, a to 19,5 W, což je přibližně 22 % maximálního dosaženého výkonu. Jedná se tedy o lepší výsledek než u panelu Victron Energy, ale o podstatně horší výsledek než u panelu Canadian Solar.

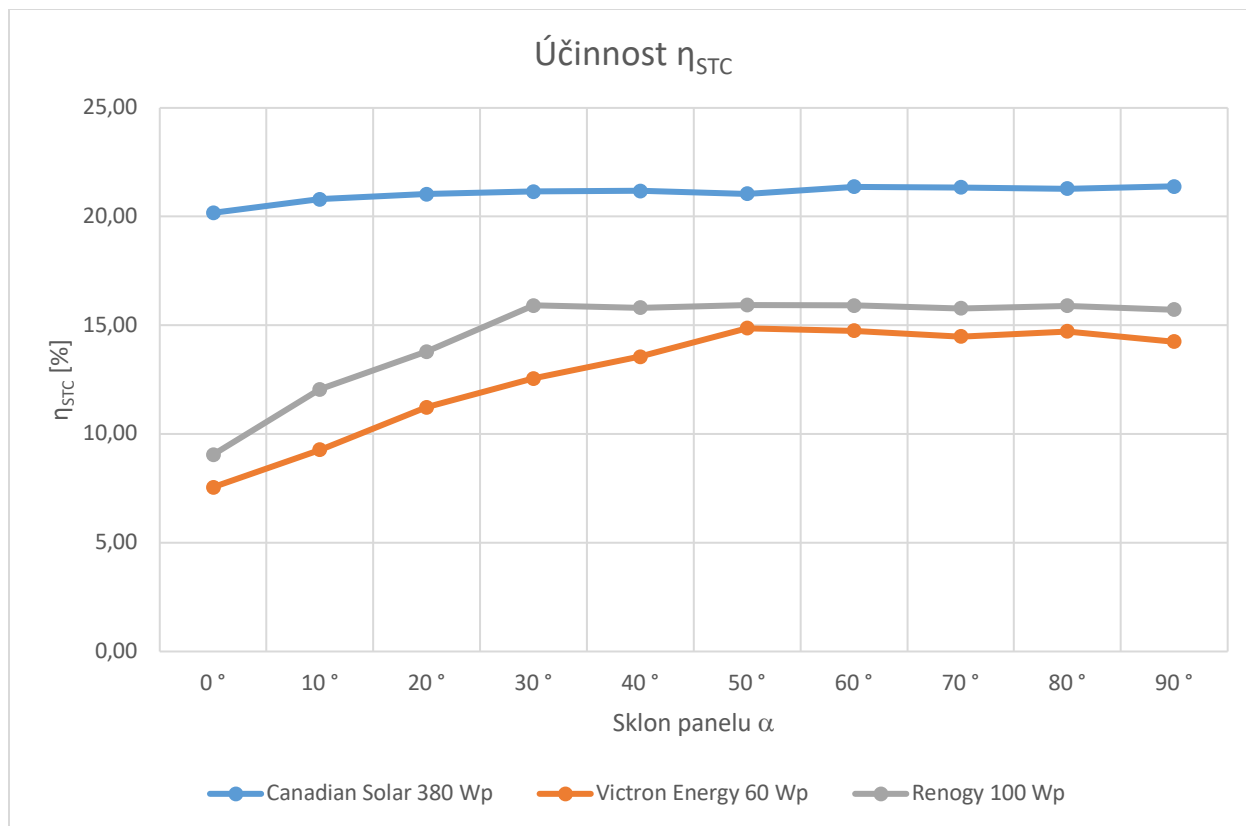


Obr. 25 Závislost maximálního výkonu  $P_{mmp}$  na sklonu  $\alpha$  pro panel Renogy RNG-100DB-H

**Porovnání účinností**

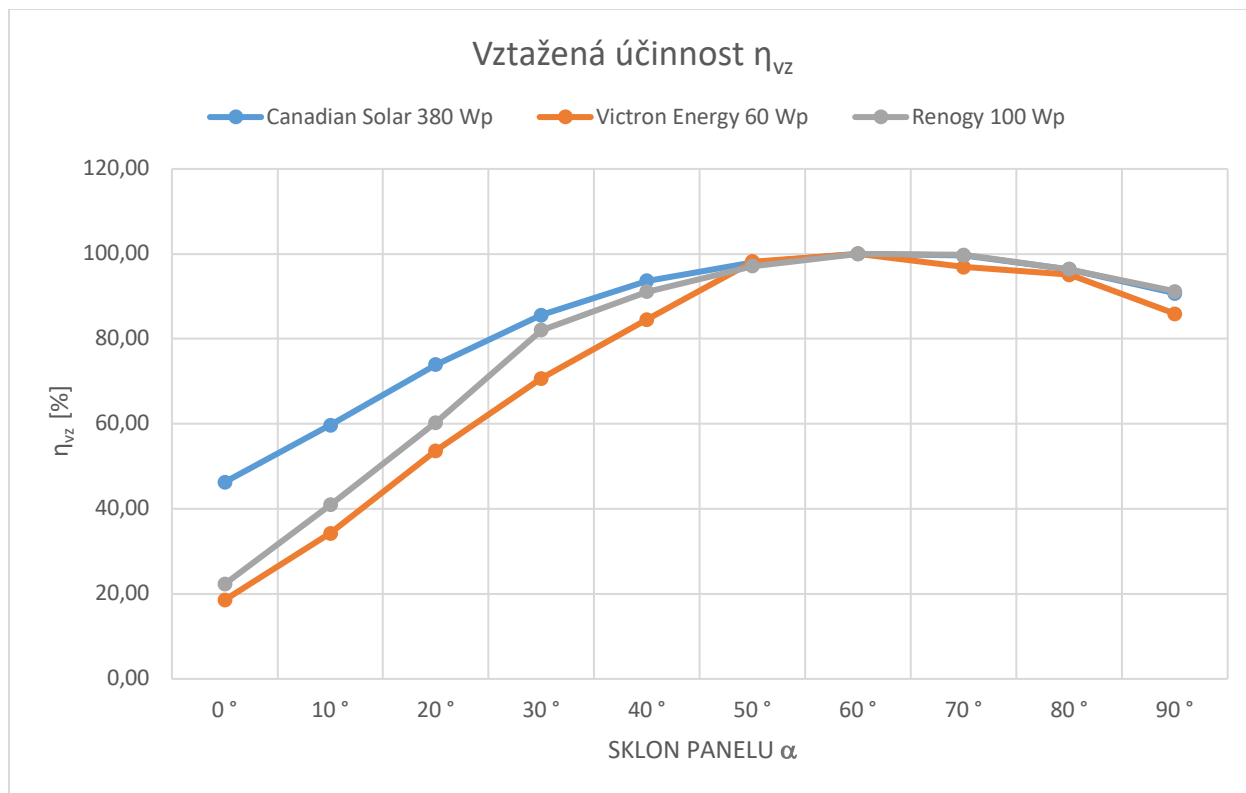
Obr. 26 Závislost účinností jednotlivých panelů na sklonu  $\alpha$

Graf na obr. 26 poskytuje srovnání účinností jednotlivých panelů za daných teplotních a světelných podmínek. Účinnost je vyjádřena jako výkon panelu dělený intenzitou dopadajícího záření (vztah je popsán v kapitole 10.5.2 Sledované veličiny). Z grafu je patrné, že nejlepší účinností fotovoltaické přeměny disponuje panel Canadian Solar; pohybuje se nad 18 % až na dvě výjimky, kdy klesne mírně pod tuto hranici. Účinnostmi přepočtenými na STC se zabývá graf následující (obr. 27). Účinnost fotovoltaického panelu Renogy se držela v intervalu úhlu  $\alpha \in (30^\circ-90^\circ)$  kolem hranice 14 %. Pro nižší hodnoty úhlu  $\alpha$  začala účinnost poměrně strmě klesat. Nejhorší účinnosti dosahoval panel Victron Energy, který jen mírně překročil hranici 12 %. Průběh účinnosti je podobný jako u panelu Renogy s tím rozdílem, že účinnost začíná zřetelně klesat již při  $\alpha = 40^\circ$ .



Obr. 27 Závislost účinností jednotlivých panelů přepočítaných na STC na sklonu  $\alpha$

Graf na obr. 27 je, co se týče účinnosti, nejvíce vypovídající. Poskytuje reálné srovnání s účinnostmi deklarovanými výrobci. Znárodnuje účinnosti přepočtené na STC dle vztahu vyjádřeného v kapitole 10.5.2 Sledované veličiny. Protože teplota všech článků v průběhu měření byla vyšší, než je referenční teplota (25 °C), přepočítaná účinnost tak z podstaty věci musí být vyšší. Pro panel Canadian Solar se STC účinnost pohybovala nad hranicí 20 % po celou dobu měření. Pro  $\alpha = 60^\circ$  nabyla hodnoty 21,38 %, což je dokonce víc než výrobcem deklarovaná účinnost (20,5 %). Pro panel Renogy STC účinnost dosáhla maxima při  $\alpha = 60^\circ$ , a to 15,91 %, což je přibližně o 0,5 % více, než deklaruje výrobce (15,43 %). STC účinnost panelu Victron Energy dosáhla svého maxima při  $\alpha = 50^\circ$ , a to 14,86 %, což je přibližně o 10 % méně, než deklaruje výrobce (16,5 %). Tento fotovoltaický panel vychází, co se týče provozních charakteristik, nejhůře. Charakteristika chování průběhů STC účinností je stejná jako účinností v předchozím grafu (obr. 26).



Obr. 28 Závislost vztažených účinností jednotlivých panelů na sklonu  $\alpha$

Graf na obr. 28 znázorňuje průběhy tzv. vztažených účinností jednotlivých panelů. Ukazuje, jak byly jednotlivé panely náchylné na změnu úhlu  $\alpha$ , a tedy i na změnu dopadajícího slunečního záření (úhel  $\beta$ ). Jedná se o poměr výkonu při daném úhlu  $\alpha$  k maximálnímu výkonu panelu při  $\beta = 90^\circ$  (viz vztah v kapitole 10.5.2 Sledované veličiny. Nejméně náchylný na změnu úhlu dopadajícího slunečního záření byl panel Canadian Solar. I při  $\alpha = 0^\circ$ , tedy když leží vodorovně na zemi, je stále schopen dodávat 46,30 % z maximálního naměřeného výkonu při  $\alpha = 60^\circ$  ( $\beta = 90^\circ$ ). Panel Renogy byl za těchto podmínek schopen dodávat 22,31 % a panel Victron Energy pouze 18,57 %. Pro malé deviace od  $\alpha = 60^\circ$  byl pokles vztažené účinnosti relativně malý. Významněji začala vztažená účinnost u všech tří panelů klesat až když  $\alpha < 40^\circ$  a odchylka od úhlu  $\beta = 90^\circ$  byla tedy větší než  $20^\circ$ .

## 10.6 Měření parametrů FV panelů v závislosti na částečném zakrytí

Následující experiment se zabývá měřením hlavních charakteristik fotovoltaických panelů při jejich postupném zakrývání.

### 10.6.1 Popis experimentu

Měření bylo provedeno ve stejný den a na stejném místě jako měření předchozí. Měření bylo zrealizováno v časovém rozmezí 14.30–15.15. V tomto případě byl rám s panely vždy nasměrován přímo na slunce, aby se tak úhel  $\beta$  rovnal vždy  $90^\circ$ , proto bylo v průběhu měření nutno přizpůsobovat polohu rámu požadovaným podmínkám. Pro zakrývání byla zvolena karimatka zhotovená ze speciálního černého molitanu, který je pro světlo nepropustný. Je nutno zmínit, že by se panely chovaly jinak, kdyby byly zastíněny například stromem, kdy stále na panel dopadá značná část světla z okolí. Tato simulace může částečně přiblížit chování panelů, když je nějaký předmět umístěn přímo na jejich povrchu (například listí, sněhová pokrývka a podobně).

Každý panel byl vertikálně rozdělen na čtyři shodné obdélníky, které byly postupně zakrývány. Nejprve byl celý panel nezakrytý, dále byl zakryt z 25 %, z 50 %, ze 75 % a nakonec byl zakryt celý.

Při každém zakrytí bylo měřeno napětí na prázdno  $U_{oc}$  a zkratový proud  $I_{sc}$ , a to pomocí přístroje Sonel PVM-1020. Dále byl v každé pozici změřen maximální výkon  $P_{mpp}$  pomocí solárního regulátoru MPPT EPsolar serie XTRA – 3210N.

### 10.6.2 Sledované veličiny

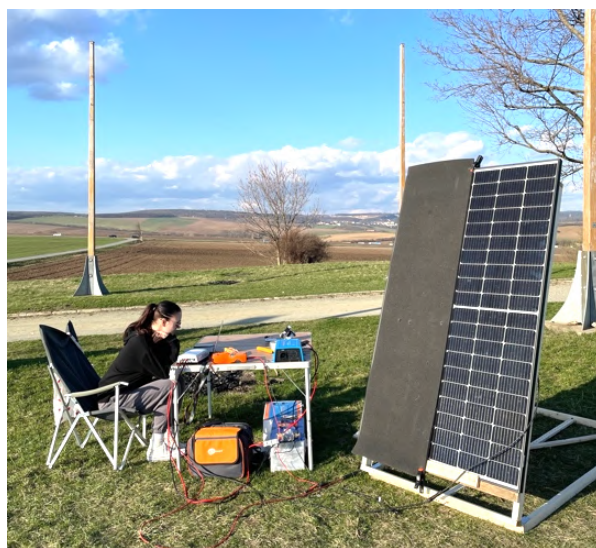
Kromě veličin, které jsou popsány v předchozím experimentu, zde zavádíme doplňující veličinu:

Zakrytí panelu [%] – plocha panelu, která je vertikálně zakryta světelně nepropustnou karimatkou.

### 10.6.3 Naměřené hodnoty

Následující část obsahuje tabulky naměřených hodnot jednotlivých panelů při postupném zakrývání. Jsou také vytvořeny grafy porovnávající výsledky měření jednotlivých panelů.

#### Canadian Solar CS3L-380MS



Obr. 29 Fotovoltaický panel Canadian Solar CS3L-380MS při 50 % zakrytí

Tab. 9 Naměřené hodnoty fotovoltaického panelu Canadian Solar CS3L-380MS

$E$ [W/m <sup>2</sup> ]	835	$T_c$ [°C]	33,4
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	1,85	$T$ [°C]	17,6
$\beta_p$ [%/°C]	-0,35		

Zakrytí panelu [%]	$P_{mpp}$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$\eta$ [%]	$\eta_{STC}$ [%]
0	285,1	39,7	9,41	18,46	21,40
25	176	37,7	9,83	11,39	14,33
50	0	35,9	9,07	0,00	0,00
75	0	35,4	5,07	0,00	0,00
100	0	33,1	0,00	0,00	0,00



**Victron Energy SPP040601200**



Obr. 30 Fotovoltaický panel Victron Energy SPP040601200 při 50 % zakrytí

Tab. 10 Naměřené hodnoty fotovoltaického panelu Victron Energy SPP040601200

$E$ [W/m <sup>2</sup> ]	835	$T_c$ [°C]	30,9
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,364	$T$ [°C]	17,6
$\beta_p$ [%/°C]	-0,45		

Zakrytí panelu [%]	$P_{mpp}$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$\eta$ [%]	$\eta_{STC}$ [%]
0	38,4	21,2	2,48	12,63	15,29
25	0	19,4	0,01	0,00	0,00
50	0	16,9	0,01	0,00	0,00
75	0	15,1	0,00	0,00	0,00
100	0	11,1	0,00	0,00	0,00

**Renogy RNG-100DB-H**



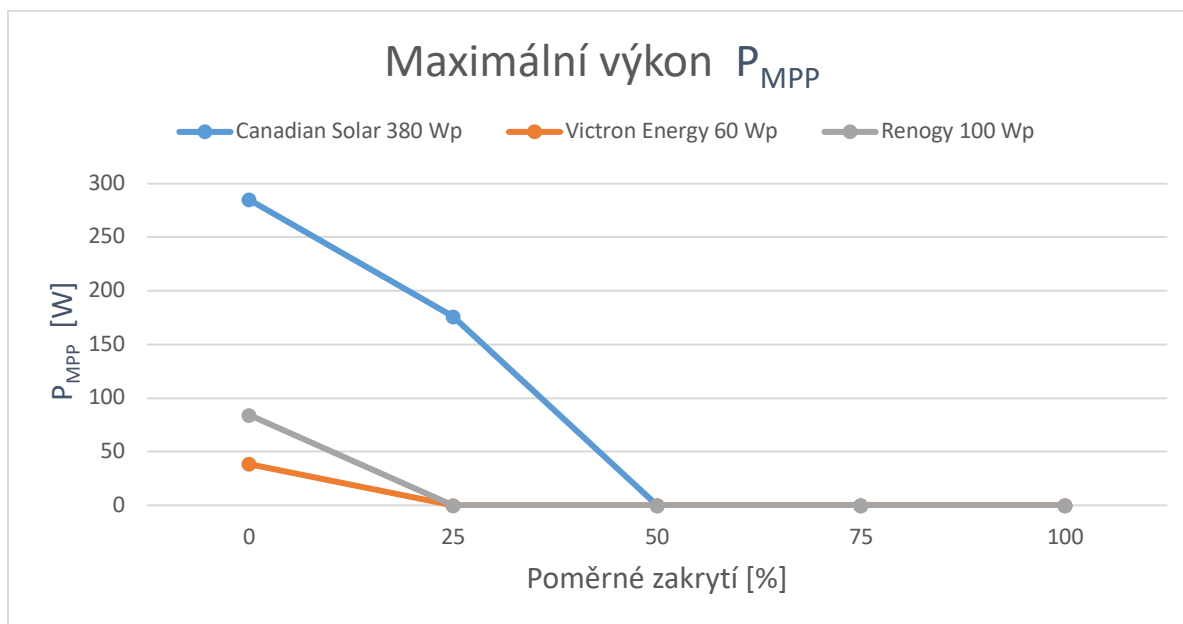
Obr. 31 Fotovoltaický panel Renogy RNG-100DB-H při 75 % zakrytí

Tab. 11 Naměřené hodnoty fotovoltaického panelu Renogy RNG-100DB-H

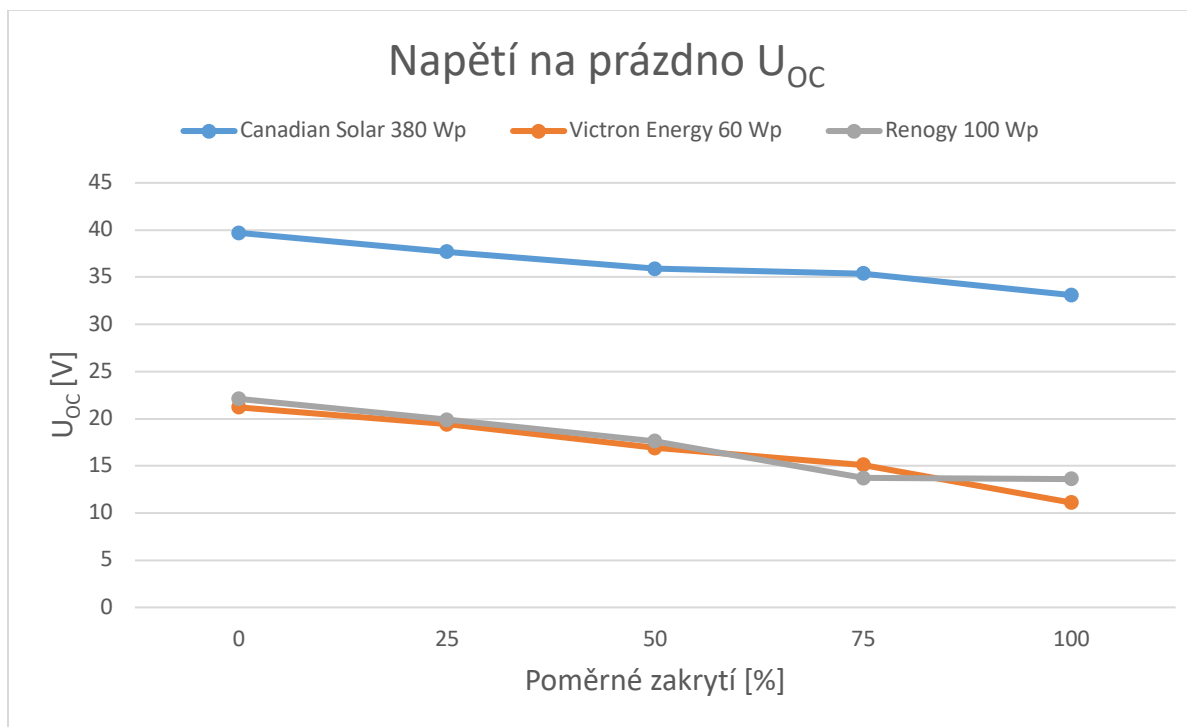
$E$ [W/m <sup>2</sup> ]	835	$T_c$ [°C]	29,5
$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	0,648	$T$ [°C]	17,6
$\beta_P$ [%/°C]	-0,42		

Zakrytí panelu [%]	$P_{mpp}$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$\eta$ [%]	$\eta_{STC}$ [%]
0	84,3	22,1	5,16	15,58	17,47
25	0	19,9	4,92	0,00	0,00
50	0	17,6	4,48	0,00	0,00
75	0	13,7	0,01	0,00	0,00
100	0	13,6	0,00	0,00	0,00

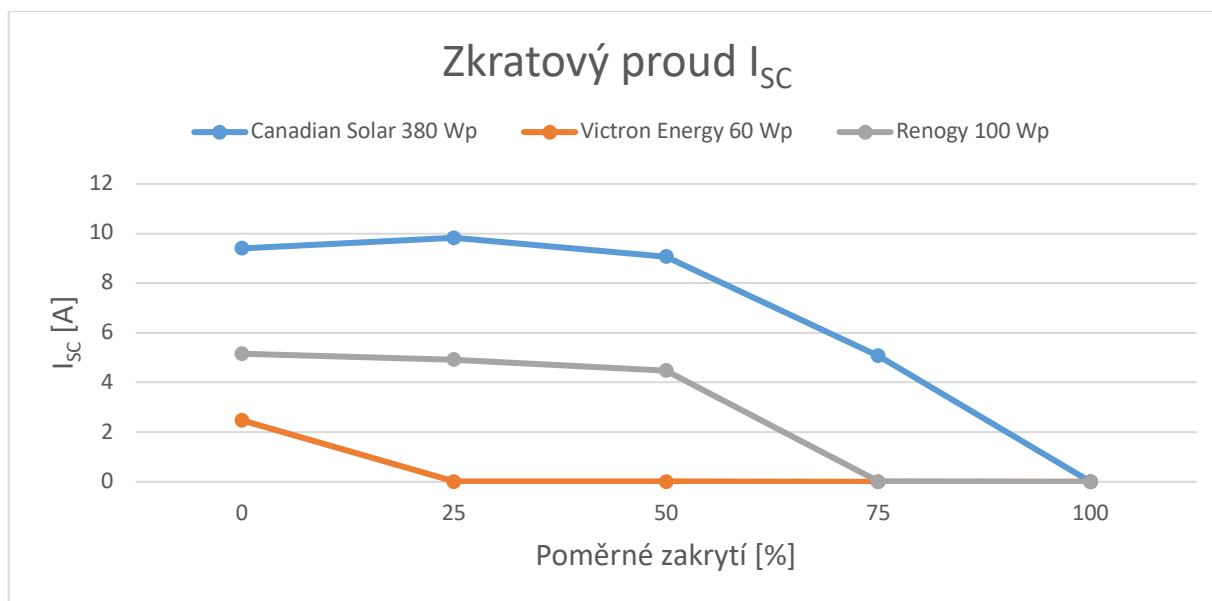
### Porovnání výsledků



Obr. 32 Závislost maximálního výkonu  $P_{mpp}$  na poměrném zakrytí



Obr. 33 Závislost napětí na prázdko  $U_{OC}$  na poměrném zakrytí



Obr. 34 Závislost zkratového proudu  $I_{sc}$  na poměrném zakrytí

Graf na obr. 32 znázorňuje výkon jednotlivých panelů v závislosti na poměrném zakrytí. Je pozoruhodné, že jak panel Renogy, tak panel Victron Energy vykazovaly nulový výkon již při zakrytí z 25 %. Pro jejich provoz je tedy nezbytné, aby se na jejich ploše nevyskytovaly žádné nežádoucí prvky, které by způsobovaly jejich částečné zastínění. Naproti tomu panel Canadian Solar, který disponuje tzv. half-cut technologií, vykazoval při zakrytí z jedné čtvrtiny stále ještě přibližně 62% výkon vůči výkonu při nulovém zakrytí. Nicméně při zakrytí z jedné poloviny již ani tento panel negeneroval žádný výkon. Jinak by se panel pravděpodobně choval, kdyby nebyl zakrýván vertikálně, ale horizontálně, jelikož právě half-cut technologie rozděluje panel horizontálně.

Graf na obr. 33 znázorňuje napětí na prázdko při různém rozsahu zakrytí panelů. Že i při 100% zakrytí není napětí nulové je pravděpodobně dáno tím, že část světla přichází na fotovoltaické články zadní stranou panelů, která není zcela neprůsvitná. Napětí se stoupajícím zakrytím klesalo téměř lineárně. U panelů Victron Energy a Renogy byl pokles nepatrně strmější než u panelu Canadian Solar. Panel Renogy vykazoval téměř stejné napětí na prázdko při zakrytí ze 75 % jako při zakrytí ze 100 %.

Graf na obr. 34 vykresluje zkratové proudy  $I_{sc}$  při různém zakrytí. Jejich změny byly u jednotlivých panelů podstatně odlišné. Pozoruhodné je, že panel Canadian Solar nabyl nejvyšší hodnoty zkratového proudu při zakrytí z 25 % a výsledek tak byl nepatrně vyšší než při nulovém zakrytí. Poté již hodnota zkratového proudu s narůstajícím zakrytím klesala. Průběh zkratového proudu u fotovoltaického panelu Renogy měl z počátku relativně pomalý pokles, nicméně pokles mezi 50% a 75% zakrytím byl dramaticky skokový. Zkratový proud u panelu Victron Energy klesl téměř na nulu již při 25% zakrytí. Z výsledků vyplývá, že pokud se výkon  $P_{mpp}$  rovná při daném poměrném zakrytí nule, přestože zkratový proud  $I_{sc}$  i napětí na prázdko  $U_{oc}$  jsou nenulové, fill factor se v takovém případě musí rovnat nule.

## 11 Modelová situace

Na základě naměřených dat byl jako nejvhodnější fotovoltaický panel pro zapojení do výše popsaného ostrovního systému shledán panel Canadian Solar CS3L-380MS. V následující části je na základě naměřených hodnot tohoto panelu vytvořena modelová situace pro praktické použití ostrovního systému na letním skautském stanovém táboře, a to pro dva letní dny. Šlo o 31. červenec 2023, kdy celý den svítilo slunce, a 1. srpen 2023, kdy naopak byla celý den hustá oblačnost a déšť. Jednotlivé komponenty systému jsou popsány v kapitole 10.2 Parametry jednotlivých testovaných komponent.

### 11.1 Umístění panelu

Fotovoltaický panel byl umístěn na střechu polní kuchyně skautského stanového tábora mezi obcemi Lučice a Skuhrov v okrese Havlíčkův Brod. Panel byl připevněn na plochou část střechy v horizontální rovině (tedy  $\alpha = 0^\circ$ ). Důvodem k takovému umístění je charakteristika objektu a také fakt, že je panel ze země pro běžného pozorovatele de facto neviditelný a nestane se tak snadným lupem při případném přepadu tábora.

### 11.2 Jednotlivé elektrické spotřebiče

V této podkapitole jsou popsány elektrické spotřebiče, které mohou být napájeny z výše popsaného systému.

#### Měnič napětí SINUS Victron Energy Phoenix VE.Direct 800VA 12 V

Jde o měnič sloužící k přeměně stejnosměrného proudu o napětí 12 V do proudu střídavého o výstupním napětí 210–245 V, který slouží v našem případě k napájení běžných elektrických spotřebičů. Měnič je detailněji popsán v podkapitole 10.2 Parametry jednotlivých testovaných komponent. Samotný měnič odebírá permanentně 6,5 W, pokud je v zapnutém režimu. Účinnost měniče je 0,9, a proto je celkový příkon elektrických spotřebičů nutné ještě vydělit touto účinností pro získání vypovídající hodnoty odběru elektrické energie ze systému.

#### LED osvětlení

V kuchyni a přilehlé jídelně je realizováno osvětlení pomocí soustavy čtyř shodných LED pásek, každé o příkonu 4,1 W. Soustava je napájena 12 V přímo z regulátoru napětí. Pásky lze zapínat a vypínat jednotlivě.

### Lednice Philco PTB 911 W

Jde o malou lednici určenou pro uchovávání potravin podléhajících rychlé zkáze. Průměrný příkon lednice byl vypočítán jako roční spotřeba elektrické energie dělená 365 dny a dále 24 hodinami. Je jisté, že kompresor o příkonu 85 W není v provozu po celou dobu, ale s průměrným hodinovým odběrem 12,9 W se lze v rámci našeho modelování spokojit.

### Mobilní telefony

Předpokládejme, že se v táboře nachází devět vedoucích, kteří používají různé typy mobilních zařízení o průměrné kapacitě baterie 14,1 Wh. V našem případě každý z nich denně využije 80 % kapacity baterie, a je ji tedy nutné během dne dobít. K tomu slouží tři nabíječky o celkovém příkonu 22,7 W pracující s účinností 75 %, které jsou schopny tři zařízení dobít o oněch 80 % za 2 hodiny. Pro nabití všech devíti zařízení je nutné nabíjecí cyklus v průběhu dne třikrát opakovat.

### Notebook HP 210 G50

V táboře je jeden společný notebook pro víceúčelové využití. Kapacita jeho baterie je 42 Wh. Předpokládejme, že ji celou za jeden den vybijeme, a je tedy nutné ji plně nabít. Nabíječka o příkonu 60,3 W pracující s účinností 70 % nabije zařízení za jednu hodinu.

### Dataprojektor Epson EB-FH06

Skauti disponují vlastním dataprojektorem, určeným k příležitostnému promítání. Zařízení pracuje s příkonem 290 W.

### Nabíječka Husqvarna QC 330

Jde o nabíječku o příkonu 336 W, určenou pro dobíjení dvou akumulátorů do sekačky Husqvarna LC 141i, která slouží k příležitostnému sekání trávníku v areálu tábořiště. Každý akumulátor má kapacitu 187,2 Wh. Plné nabití obou akumulátorů trvá něco málo přes hodinu. Zatímco sekačka seká s prvním akumulátorem, druhý je možné ve stejnou dobu nabíjet.

### Nabíječka Stihl AL 101:

Jde o nabíječku o příkonu 80 W, určenou pro dobíjení akumulátorů kompatibilních s akumulátorovou motorovou pilou Stihl AP 300 S o kapacitě 281 Wh. Nabíječka pracuje s účinností 80 % a je schopna akumulátor plně nabít za přibližně 4,4 hodiny.

### 11.3 Slunečný den 31. 7. 2023

Toto datum bylo společně s datem 1. srpna vybráno, jelikož se obě nacházejí v polovině letních prázdnin, a je tak možné hovořit o jakýchsi průměrných letních podmínkách.

Celý den je v následující tabulce rovnoměrně rozdělen po hodinových blocích. Údaje o pozici slunce, a tedy znalosti úhlu  $\theta$  vycházejí opět z webové stránky Sun Direction, dostupné z <https://sun-direction.com/>. Jde vždy o průměrný údaj vztažený k dělicí půlhodině (např. pro interval 9-10 se jedná o pozici slunce v 9:30). Úhel  $\beta$  je pak vypočten dle vztahu uvedeného v podkapitole 10.5.2 Sledované veličiny.

Hodnoty teploty ovzduší  $T$  v jednotlivých hodinách vycházejí z historického měření ČHMÚ pro danou lokalitu ze dne 31. 7. 2023, kdy bylo skoro jasno. Teplota FV panelu  $T_c$  je pak vypočtena jako hodnota  $T$  navýšená o 13,2 °C, což byl rozdíl těchto teplot při praktickém měření.

Solární výkon  $P_1$  je pak vypočten z empirického vztahu:

$$P_1 = -0,0457 \cdot \beta^2 + 7,9138 \cdot \beta - 9,0227, \quad (6)$$

kde  $\beta$  je úhel dopadajícího slunečního záření. Závislost byla softwarově odvozena z naměřené závislosti maximálního výkonu  $P_{MPP}$  na úhlu  $\beta$ . Jelikož měření závislosti proběhlo za teploty článku  $T_c = 33,4$  °C, bylo nutné přepočítat Solární výkon  $P_1$  na Solární výkon  $P_{MPP}$ , který bere v potaz změnu účinnosti modulu vlivem změny teploty, přestože se hodnoty těchto dvou solárních výkonů liší jen nepatrně.

Předpokládejme, že v modelovém případě zůstala baterie z předchozího dne nabita na 50 % své kapacity (tj. 1080 Wh). V průběhu celého dne odebíral stálý proud měnič a lednice. V prvních dvou hodinách probíhalo nabíjení tří mobilních telefonů. V 7 hodin ráno vstal první vedoucí a zapnul jistič fotovoltaického panelu, jelikož výrobce doporučuje panel na noc odpojit kvůli vzniku ztrátových proudů. Panel začal produkovat elektrickou energii. Zároveň začalo dvouhodinové nabíjení dalších tří mobilních telefonů. Od 9 do 12 hodin byl rozsvícen jeden LED pásek v zásobárně potravin. Jelikož byl slunný den, bylo rozhodnuto o dobíjení akumulátorů k sekačce na trávu a motorové pile, které proběhlo po poledni. Od 17 do 19 hodin následoval další cyklus dobíjení tří mobilních telefonů, který následovalo hodinové dobíjení notebooku. Panel byl vedoucím odpojen ve 20 hodin. Mezi 21. a 23. hodinou proběhlo promítání dvouhodinového filmu. Ve večerních hodinách byly postupně rozsvíceny všechny LED pásy. V závěru dne byla baterie nabita na 60 % kapacity, o 10 % více než byla nabita předchozí den, a to i přes značnou energetickou zátěž nabíječkami a projektorem. Celková denní spotřeba elektrické energie činila 2,17 kWh. Pokud by bylo upuštěno od večerního promítání filmu, zůstala by baterie nabita na 90 % své kapacity. Upuštění od nabíjení akumulátorů do sekačky a pily by nebylo příliš efektivní úsporou vzhledem k vysokým solárním ziskům v danou dobu, což by způsobilo úplné nabití akumulátoru a následné automatické odpojení panelu od systému, a tedy nevyužití solárního potenciálu. Údaje v následující tabulce jsou ve W, není-li uvedeno jinak.

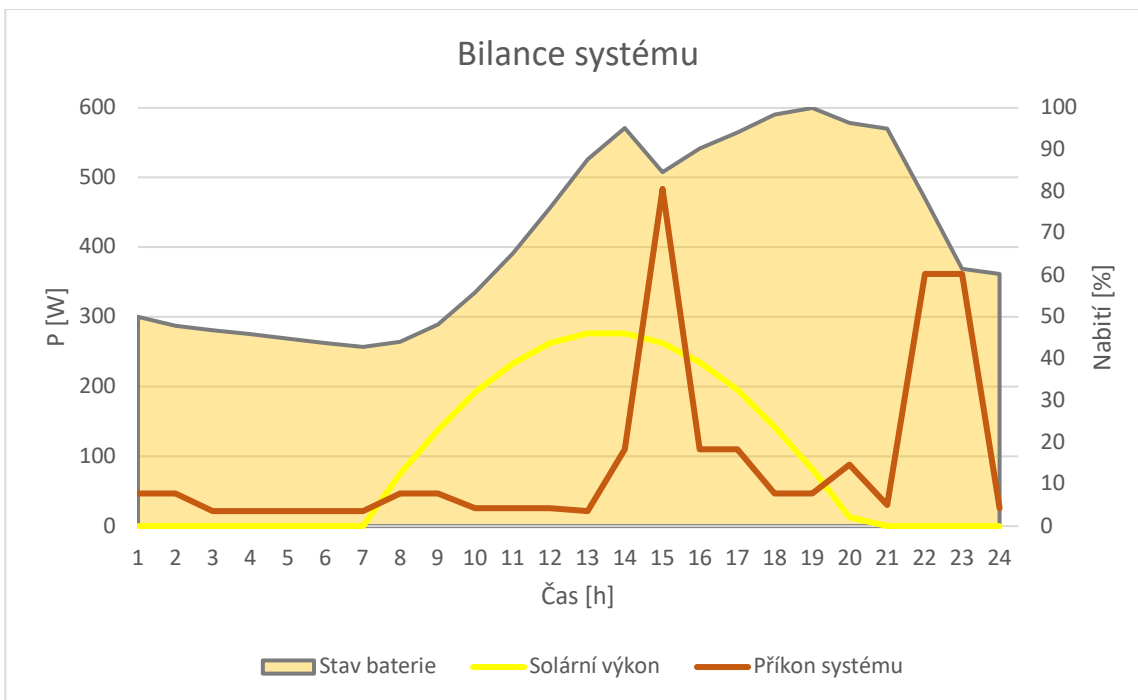
Tab. 12 Energetická bilance ostrovního fotovoltaického systému pro modelový den 31.7.

Čas:	0--1	1--2	2--3	3--4	4--5	5--6	6--7	7--8	8--9	9--10	10--11	11--12
θ [°]:							8,4	18,0	27,5	37,1	45,9	53,3
β [°]:							171,6	162,0	152,5	142,9	134,1	126,7
T [°C]	13,2	12,7	12,2	11,7	11,1	10,6	11,2	12,8	13,4	15,8	17,1	17,4
T <sub>c</sub> [°C]								26	27	29	30	31
Solární výkon <sub>1</sub>								74	135	189	230	260
Solární výkon								75,5	138,2	191,5	232,8	262,5
Stav baterie [Wh]	1080	1033	1012	990	969	947	925	953	1043	1205	1409	1641
Stav baterie [%]	50	48	47	46	45	44	43	44	48	56	65	76
Měnič Victron	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
LED osvětlení										4,1	4,1	4,1
Lednice Philco	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
Mob. telefony	22,7	22,7						22,7	22,7			
HP 210 G50												
Epson EB-FH06:												
Husqvarna QC 330												
Stihl AL 101												
Výkon systému	42,1	42,1	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	42,1	42,1	23,5	23,5	23,5
Příkon systému	46,8	46,8	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	46,8	46,8	26,1	26,1	26,1

Čas:	12--13	13--14	14--15	15--16	16--17	17--18	18--19	19--20	20--21	21--22	22--23	23--00
θ [°]:	57,8	58,1	54,2	47,0	38,5	28,8	19,3	9,6	0,8			
β [°]:	122,2	121,9	125,8	133,0	141,5	151,2	160,7	170,4	179,2			
T [°C]	19,1	20,6	21,2	20,7	20,8	21,5	21,9	21,2	18,7	18,1	16,4	15,1
T <sub>c</sub> [°C]	32	34	35	34	34	35	35	35				
Solární výkon <sub>1</sub>	276	277	263	235	196	143	83	13				
Solární výkon	276,6	276,1	262,3	234,6	195,3	142,1	82,0	12,5				
Stav baterie [Wh]	1893	2054	1829	1950	2032	2126	2160	2083	2053	1691	1329	1303
Stav baterie [%]	88	95	85	90	94	98	100	96	95	78	62	60
Měnič Victron	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
LED osvětlení									8,2	16,4	16,4	4,1
Lednice Philco	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
Mob. telefony						22,7	22,7					
HP 210 G50								60,3				
Epson EB-FH06:										290,0	290,0	
Husqvarna QC 330			336,0									
Stihl AL 101		80,0	80,0	80,0	80,0							
Výkon systému	19,4	99,4	435,4	99,4	99,4	42,1	42,1	79,7	27,6	325,8	325,8	23,5
Příkon systému	21,6	110,4	483,8	110,4	110,4	46,8	46,8	88,6	30,7	362,0	362,0	26,1





Obr. 35 Energetická bilance systému v závislosti na čase



Obr. 36 Proporční spotřeba jednotlivých spotřebičů 31. 7. 2023

## 11.4 Deštivý den 1. 8. 2023

Celý postup výpočtu jednotlivých veličin je shodný s postupem popsáním v předchozí podkapitole (tj. Slunečný den 31. 7. 2023) s tím rozdílem, že byla celý den hustá oblačnost s deštěm.

Platí obecné pravidlo, že při zvýšené oblačnosti se denní solární zisk pohybuje od 10 % do 25 % nominálního zisku za jasného dne. V našem případě byl tedy zvolen pesimistický scénář, kdy se solární zisk rovná 10 %. Postup výpočtu solárního výkonu je shodný s předchozím případem s tím rozdílem, že je solární výkon  $P_{MPP}$  vynásoben jednou desetinou. Vzhledem k dešti, který v našem případě po celý den omýval, a tedy i chladil povrch panelu, je v tomto případě teplota panelu  $T_C$  shodná s teplotou vzduchu  $T$ .

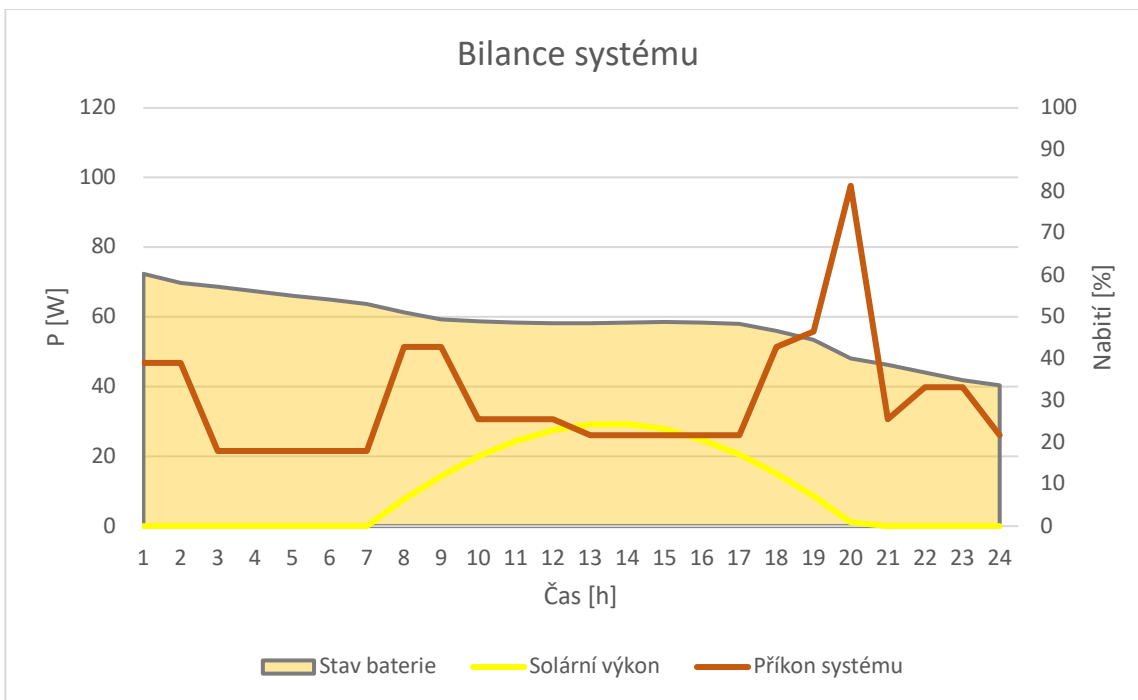
V tomto modelovém případě zůstala baterie z předchozího dne nabita na 60 % své kapacity (tj. 1303 Wh). V průběhu celého dne odebíral stejně jako v den předchozí stálý proud měnič a lednice. V prvních dvou hodinách probíhalo nabíjení tří mobilních telefonů. Panel generoval výkon od 7 do 20 hodin, stejně jako v den předchozí. V 7 hodin rovněž začalo dvouhodinové nabíjení dalších tří mobilních zařízení. V 7 hodin byl rozsvícen jeden LED pásek v kuchyni a vzhledem k velké oblačnosti svítil celý den. Od 9 do 12 hodin byl ještě k tomu rozsvícen další LED pásek v zásobárně potravin. Na rozdíl od předchozího dne neproběhlo nabíjení akumulátorů pro pilu a sekačku. Od 17 do 19 hodin následoval další cyklus dobíjení tří mobilních telefonů a po něm následovalo hodinové dobíjení notebooku. V tento den se nepromítalo. Ve večerních hodinách byly rozsvíceny všechny LED pásy. Na závěr dne byla baterie nabita na 34 % své kapacity, tedy o 26 % méně, než byla nabita z předchozího dne. Celková denní spotřeba elektrické energie byla 0,87 kWh, což je přibližně 60% úspora oproti dni předchozímu. Stejný scénář by se mohl opakovat ještě celý další den, na jehož konci by zůstala baterie nabita z 8 %. Pokud by bylo 31. 7. upuštěno od promítání filmu a dobíjení zahradní techniky, systém by byl schopen dodávat dané množství energie tři celé dny namísto dvou. Údaje v tabulce 13 jsou ve W, není-li uvedeno jinak.

Tab. 13 Energetická bilance ostrovního fotovoltaického systému pro modelový den 1.8.

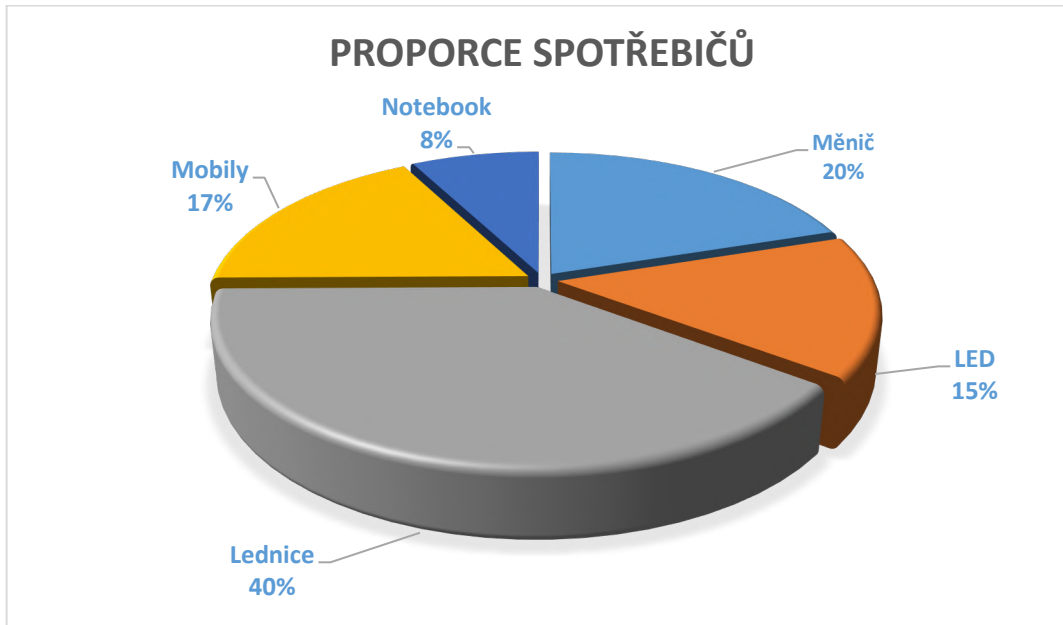
Čas:	0--1	1--2	2--3	3--4	4--5	5--6	6--7	7--8	8--9	9--10	10--11	11--12
$\theta$ [°]:							8,2	17,8	27,4	36,9	45,7	53,0
$\beta$ [°]:							171,8	162,2	152,7	143,1	134,3	127,0
T [°C]	15,4	15,2	14,9	15,2	14,5	14,1	14,8	14,9	14,9	15,2	15,3	15,6
T <sub>c</sub> [°C]								15	15	15	15	16
Solární výkon <sub>1</sub>								72	134	188	230	259
Solární výkon	0	0	0	0	0	0	0	7,7	14,3	19,9	24,4	27,5
Stav baterie [Wh]	1303	1256	1235	1213	1192	1170	1148	1105	1067	1056	1050	1046
Stav baterie [%]	60	58	57	56	55	54	53	51	49	49	49	48
Měnič Victron	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
LED osvětlení								4,1	4,1	8,2	8,2	8,2
Lednice Philco	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
Mob. telefony	22,7	22,7						22,7	22,7			
HP 210 G50												
Epson EB-FH06:												
Husqvarna QC 330												
Stihl AL 101												
Výkon systému	42,1	42,1	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	46,2	46,2	27,6	27,6	27,6
Příkon systému	46,8	46,8	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	51,3	51,3	30,7	30,7	30,7

Čas:	12--13	13--14	14--15	15--16	16--17	17--18	18--19	19--20	20--21	21--22	22--23	23--00
$\theta$ [°]:	57,5	57,9	53,9	46,8	38,3	28,6	19,1	9,4	0,6			
$\beta$ [°]:	122,5	122,1	126,1	133,2	141,8	151,4	160,9	170,6	179,5			
T [°C]	16,1	16,2	15,9	16,3	16,1	15,8	15,4	14,9	14,3	13,9	13,3	12,5
T <sub>c</sub> [°C]	16	16	16	16	16	16	15	15				
Solární výkon <sub>1</sub>	275	276	262	234	195	142	81	11				
Solární výkon	29,1	29,2	27,8	24,8	20,6	15,0	8,6	1,2	0	0	0	0
Stav baterie [Wh]	1049	1052	1053	1051	1046	1009	962	865	835	795	755	729
Stav baterie [%]	49	49	49	49	48	47	45	40	39	37	35	34
Měnič Victron	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
LED osvětlení	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	8,2	8,2	8,2	16,4	16,4	4,1
Lednice Philco	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
Mob. telefony						22,7	22,7					
HP 210 G50								60,3				
Epson EB-FH06:												
Husqvarna QC 330												
Stihl AL 101												
Výkon systému	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	46,2	50,3	87,9	27,6	35,8	35,8	23,5
Příkon systému	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	51,3	55,9	97,7	30,7	39,8	39,8	26,1



Obr. 37 Energetická bilance systému v závislosti na čase



Obr. 38 Proporční spotřeba jednotlivých spotřebičů 1. 8. 2023

## 12 Závěr

Práce se zabývá problematikou mobilních ostrovních fotovoltaických systémů, které se v posledních letech těší značné popularitě díky mnohým benefitům, které jejich provoz přináší.

První část práce se rešeršním způsobem zaměřuje na problematiku fotovoltaických systémů. Je zde obsažena stručná historie fotovoltaiky a elektrochemické akumulace. Dále je popsán fotovoltaický článek a jeho role ve fotovoltaických systémech. Jsou zde také popsány monokrystalické, polykrystalické a amorfní křemíkové články, včetně jejich základních výhod a nevýhod. Práce dále pojednává o sluneční energii, jejím měření a významu na poli fotovoltaiky. Následující kapitola se věnuje šesti způsobům zvyšování účinnosti fotovoltaických panelů. Přestože se již v praxi od většiny z nich z ekonomických důvodů upouští, u ostrovních aplikací stále mohou účinně navyšovat sezónní zisky. Kapitola poskytuje komplexnější pohled na rozdíly mezi systémy připojenými na rozvodnou síť a ostrovními aplikacemi. V kapitole 9 Akumulátory jsou pak představeny tři základní typy elektrochemické akumulace, a to prostřednictvím olověných, alkalických a lithium-iontových akumulátorů.

Další kapitola se zabývá praktickým měřením vybraných charakteristik tří různých fotovoltaických panelů v závislosti na jejich sklonu a postupném zakrývání. Při kolmo dopadajícím slunečním záření vyšel z měření nejlépe panel Canadian Solar s účinností 21,38 % (vztaženo na STC), což je dokonce více než výrobce deklaruje. Nejhůře se umístil panel Victron Energy, který dosáhl účinnosti 14,75 %. Panel Renogy pak vykazoval účinnost 15,91 %. Grafy ukazují změny účinnosti a výkonu při měnícím se sklonu panelu. Panely Renogy a Victron Energy negativně reagují na změny podstatně více než panel Canadian Solar. Byly sledovány také změny hlavních charakteristik při postupném zakrývání panelů. Jak panel Renogy, tak panel Victron Energy vykazovaly nulový výkon již při zakrytí z 25 %. Naproti tomu panel Canadian Solar disponující tzv. half-cut technologií byl při tomto zakrytí schopen poskytovat přibližně 62 % svého nominálního výkonu. Nicméně při zakrytí z 50 % ani tento panel negeneroval žádný výkon.

Závěrečná část práce nabízí konkrétní scénář aplikace výše popsaného ostrovního systému. Jsou zde scénáře pro dva letní dny, přičemž první je slunečný a ve druhém je hustá oblačnost. Během slunného dne byl systém schopen poskytnout 2,17 kWh elektrické energie, což kromě napájení základních spotřebičů jako je lednice či dobíjení elektroniky, umožnilo dobít baterie pro hobby nářadí a promítnout celovečerní film. Druhý den vzhledem k husté oblačnosti a deštivému počasí bylo nutné energii šetřit. Přestože fotovoltaický panel dodal pouhých 250 Wh, díky nabití baterie z předchozího dne byl i v tomto dni systém schopen dodávat dostatek energie pro klíčové spotřebiče.

V rámci provozu ostrovního systému je nutné rozumně hospodařit s energií v závislosti na slunečních podmínkách. Pro praktický provoz na letních táborech či chatách byl systém pro svou relativně nízkou pořizovací cenu 25 075 Kč shledán příznivým.

## 13 Seznam použitých zdrojů

- [1] Becquerel E. (1839): Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. Comptes Rendus 9: 561–567.  
Dostupné z: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2968p/f561.image> [cit 20140712]
- [2] Pajurek R. (2021): Stručná historie fotovoltaiky. Volty.cz. [online]. Dostupné z: <https://www.volty.cz/2021/08/04/strucna-historie-fotovoltaiky/>
- [3] This Month in Physics History. (1954): Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell.  
Dostupné z: <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- [4] Bechník B. (2014): Stručná historie fotovoltaiky. Tzbinfo [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [5] Solar Choice (2022): Who invented solar panels? The history of solar energy.  
Dostupné z: <https://www.solarchoice.net.au/invention-and-history-of-solar-panels/>. [cit. 2023-11-19].
- [6] Haselhuhn R., Losík V. (2011): Fotovoltaika – budovy jako zdroj proudu. Ostrava, HEL, ISBN 978-3-410-86167-33-6.
- [7] Murtinger K., Beranovský J., Tomeš M. (2008): Fotovoltaika, elektřina ze slunce. 2. vyd. Brno: ERA. ISBN 978-80-7366-133-5.
- [8] Benda V. a kol. (2012): Obnovitelné zdroje energie. Praha: Profi Press. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [9] Nos F. (2023): Solární energie pro rodinný dům: Princip funkce fotovoltaických elektráren. [online]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/6444.solarni-energie-pro-rodinny-dum-princip-funkce-fotovoltaickych-elentraren>. [cit. 2023-11-19].
- [10] Na Zeleno (2008): Solární energie – kolik kWh lze získat? [online]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/solarni-energie/solarni-energie-kolik-kwh-lze-ziskat-vyhody-a-nevyhody.aspx>].
- [11] Svarc J. (2023): Solar Panel Construction. [online]. Clean Energy Reviews. Dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>.
- [12] Traxle (2022) *Inova Solar*. [online] Dostupné z: <https://www.solar-trackers.com/solar-trackers/trackers-gallery>. [cit. 2024-02-01].
- [13] Matajs V. (2018): Jak funguje střešní fotovoltaická elektrárna? [online] Solární experti, Clean Energy Reviews. Dostupné z: <https://www.solarniexpert.cz/jak-funguje-stresni-fotovoltaicka-elektrarna/>

- [14] UPS battery center (2014) *History Of Batteries: A Timeline*. Online. UPS BATTERY CENTER. UPS Battery Center. Dostupné z: <https://blog.upsbatterycenter.com/history-batteries-timeline/>. [cit. 2023-11-19].
- [15] ETHW (2023) *Alessandro Volta*. [online]. Dostupné z: [https://ethw.org/Alessandro\\_Volta](https://ethw.org/Alessandro_Volta). [cit. 2023-11-19].
- [16] SOLARSUN (2023): Canadian Solar 380Wp. [online] Dostupné z: <https://www.solarsun.cz/canadian-380wp-monokrystalicky-solarni-panel-akce/>
- [17] SOLARSUN (2023): MPPT EPsolar serie XTRA – 30 A [online]. Dostupné z: <https://www.solarsun.cz/mppt-solarni-regulator-epsolar-xds2-100vdc--30a-serie-xtra-12-24v/>
- [18] SOLARSUN (2023): Solární baterie Banner 180Ah Solar Online. Dostupné z: <https://www.solarsun.cz/solarni-baterie-banner-180ah-solar/>.
- [19] SOLARSUN (2023): Měníč napětí SINUS Victron Energy Phoenix VE.Direct 800VA 12 V. Dostupné z: <https://www.solarsun.cz/menic-napeti-sinus-victron-energy-phoenix-ve-direct-800va-12v/>
- [20] SOLARSUN (2023): Solární panel Victron Energy 60Wp/12 V. [online]. Dostupné z: <https://www.solarsun.cz/solarni-panel-victron-energy-60wp-12v/>
- [21] SOLARSUN (2023): Flexibilní solární panel Renogy 100Wp/12 V. [online]. Dostupné z: <https://www.solarsun.cz/flexibilni-solarni-panel-renogy-100wp-12v/>
- [22] TECHY SARL. *Sun Direction* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://sun-direction.com/>

## 12 Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Veličina
$\alpha$	[°]	Sklon panelu
$A_c$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha panelu
$\beta$	[°]	Úhel dopadajícího záření na panel
$E$	[W/m <sup>2</sup> ]	Intenzita záření
FF	[-]	Fill factor
$\eta$	[-]	Účinnost FV panelu
$\eta_{\Sigma TX}$	[-]	Přepočtená účinnost na STC
$\eta_{\zeta Z}$	[-]	Vztažená účinnost
$I_{SC}$	[A]	Zkratový proud
$P_1$	[W]	Solární výkon
$P_{MPP}$	[W]	Maximální výkon
$R_{ISO}$	[Ω]	Izolační odpor
$T$	[°C]	Provozní teplota vzduchu
$T_c$	[°C]	Provozní teplota FV panelu
$U_{OC}$	[V]	Napětí na prázdko
$\theta$	[°]	Úhel slunce nad obzorem



<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
AC	Střídavý proud
AM	Průzračnost atmosféry
BTU	Britská tepelná jednotka
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSN	Česká technická norma
DC	Stejnoseměrný proud
EÚ	Energetický ústav
eV	Elektronvolt
FSI	Fakulta strojního inženýrství
FV	Fotovoltaický
Ni-Cd	Nikl-kadmiový
Ni-Fe	Nikl-železný
Ni-MH	Nikl-metal hydridový
PWM	Pulzně šířková modulace
STC	Standardní testovací podmínky
UV	Ultrafialové záření
VUT	Vysoké učení technické v Brně