

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Studie autonomního napájení rodinného domu elektřinou ze střešních
fotovoltaických panelů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KOTĚŠOVEC**
Osobní číslo: **E10N0090P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Studie autonomního napájení rodinného domu elektrinou ze střešních fotovoltaických panelů**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Odhadněte a optimalizujte spotřebu rodinného domu (zima vs. léto, pracovní den vs. víkend, výkony spotřebičů vč. soudobosti, apod.). Podmínkou je, aby student bydlel ve vlastním rodinném domě se střechou na jih.
2. Posuďte kapacitu instalace střešních FV panelů (plocha střechy, lokalita) a proveďte orientační propočty s odhadem typových diagramů výroby elektřiny (zima vs. léto, jasno vs. oblačno vs. zataženo).
3. Vyberte vhodný produkt FV panelů (kompromis mezi cenou a technologií) a proveďte vlastní teoretickou realizaci projektu (ukládání do baterií, tj. bez připojení k DS, ss napájení).
4. V závěru proveďte ekonomickou analýzu celého projektu s kalkulací pořizovacích nákladů a výpočtu návratnosti investice při různých scénářích (horší klimatické podmínky, porucha střídače, degradace baterie, apod.).

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Henze, A., Hillebrand, W. : Elektrický proud ze slunce, Fotovoltaika v praxi, technika, přehled trhu, návody ke stavbě, 1. vyd., Ostrava HEL, 2000, ISBN 80-86167-12-7
2. Krieg, B. : Elektřina ze Slunce, Fotovoltaika v teorii a praxi, 1. čes. vyd., Ostrava, HEL, 1993
3. www.solartec.cz
4. www.czrea.cz
5. www.ekowatt.cz


Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Veleba

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

V této práci je proveden návrh autonomního napájecího systému, kde jsou použity jako hlavní zdroj elektrické energie fotovoltaické (FV) panely. Jsou zde rozebrány všechny záležitosti a úvahy potřebné pro návrh a jeho zahájení. Mezi tyto úvahy patří analýza množství dopadajícího slunečního záření, analýza stanoviště, stanovení elektrických spotřebičů v domácnosti, určení jejich příkonů a denní spotřeby, dimenzování výkonu FV panelů a baterií a ekonomická analýza navrženého systému. Návrh byl proveden pro konkrétní rodinný dům, je popsán v druhé části této práce. Pro přesnější analýzu potenciálu energetického výnosu FV elektrárny byl v prostředí MATLAB vytvořen matematický model FV elektrárny.

Klíčová slova

Ostrovní fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický panel, solární regulátor, dimenzování výkonu ostrovní FV elektrárny, matematický model fotovoltaické elektrárny.

Study of autonomous electricity supply to a family house using the roof PV system

Abstract

In this thesis, design of the hybrid stand-alone power system with photovoltaic (PV) panels as the main source of electrical energy is presented. Important data and preliminary considerations needed for the design process are further discussed. These considerations include the solar irradiance and location analysis, determination of electrical appliances in the house along with their inputs and daily power consumptions, sizing of PV arrays and the battery system and the evaluation of the system cost-effectiveness. The design was performed on the particular family house and is described in the second part of the thesis. Mathematical model of the PV power plant was developed in MATLAB environment in order to better analyse and assess the PV power plant for preliminary system design.

Keywords

Stand-alone Photovoltaic System, Photovoltaic Panel, Solar Regulator, Sizing of Photovoltaic Array, Mathematical Model of Photovoltaic Power Plant.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 6.5.2012

Bc. Jan Kotěšovec

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Velebovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

OBSAH

OBSAH	8
Úvod	10
Seznam symbolů a zkratk	11
1. Autonomní systémy	13
1.1 Bez akumulace elektrické energie.....	13
1.2 S akumulací elektrické energie.....	13
1.3 Hybridní systémy.....	14
2. Základní komponenty autonomního systému s akumulací elektrické energie	15
2.1. Fotovoltaický generátor.....	15
2.2. Regulátor nabíjení.....	22
2.3. MPPT regulátor nabíjení.....	23
2.4. Střídač.....	23
2.5. Akumulátory.....	24
2.5.1. Startovací akumulátory.....	24
2.5.2. Solární akumulátory.....	25
2.5.3. Bezúdržbové olověné akumulátory.....	25
2.5.4. Stacionární akumulátory.....	25
2.5.5. Lithium železo fosfátové akumulátory.....	26
3. Posouzení stanoviště	27
3.1. Sklon a orientace.....	27
3.2. Zastínění.....	28
3.3. Plocha.....	29
3.4. Statika.....	30
3.5. Energetický výnos.....	30
4. Odhad spotřeby rodinného domu a její optimalizace	31
4.1. Určení současné spotřeby rodinného domu.....	31
4.2. Optimalizace spotřeby rodinného domu.....	40
4.2.1. Shrnutí provedené optimalizace spotřeby.....	42
5. Posouzení místa instalace	46
5.1. Odhad energetického výnosu.....	47
6. Matematický model FVE	50
6.1. Popis rovnic matematického modelu FVE.....	51
6.2. Newtonova metoda – nalezení hodnoty napětí v MPP.....	53
7. Určení vhodného výkonu ostrovní FVE	55
8. Návrh ostrovního systému	60
8.1. Volba zapojení FV panelů do řetězců a kompatibilita zapojení se sítovým střídačem...62	

9. Ekonomická analýza.....	64
10. Model navrženého ostrovního FV systému.....	66
10.1. Popis struktury a význam jednotlivých částí modelu	67
11. Závěr.....	75
12. Seznam použité literatury a informačních zdrojů.....	77
Přílohy.....	79
Příloha A – technický list FV panelu MY195-M	79
Příloha B – technický list síťového střídače Sunny Boy 4000TL	80
Příloha C – technický list baterie použité v návrhu	81
Příloha D – technický list výrobků Studer série Xtender	82

Úvod

Fotovoltaické autonomní systémy jsou nezávislé na rozvodné síti. Instalují se v místech, kde je ekonomicky nevýhodné budovat elektrickou přípojku nebo tam, kde její vybudování není vůbec možné. Například pokud je vzdálenost k rozvodné síti více než 500 m až 1000 m, jsou náklady na vybudování přípojky srovnatelné nebo vyšší než náklady na FV systém [1]. Proto se s nimi můžeme setkat na horských chatách, samotách, v pouštích. Velký význam mají tyto systémy v rozvojových zemích, kde slouží například k osvětlení škol, napájení nemocničních chladících přístrojů nebo pro čerpání vody.

Dalším častým důvodem pro vybudování autonomního systému je snaha investora o energetickou nezávislost a to i v případě, že má elektrickou přípojku v dosahu. K tomuto rozhodnutí je veden především neustále se zvyšující cenou elektrické energie.

Zkušeností s výstavbou ostrovních elektráren v ČR je zatím velmi málo. Většinou se jedná o elektrárny s menším FV výkonem určené pro napájení chat, zahradních domků, obytných automobilů, apod. Malý počet realizovaných instalací je způsoben také poměrně vysokou pořizovací cenou těchto systémů. Do budoucna však lze očekávat, vzhledem ke stále se zvyšujícím nákladům na elektrickou energii, nárůst zájmu o tyto systémy i mezi majiteli rodinných domů připojených k rozvodné síti.

Při návrhu a dimenzování ostrovních FV systémů se osvědčilo používat určitý postup. Nejdříve je nutné si stanovit denní spotřebu elektrické energie v objektu. Podle denní spotřeby se následně dimenzuje výkon FV panelů. Zvolený výkon FV panelů a denní spotřeba poté určují parametry akumulátorů a ostatních komponent. Na závěr projektování je vhodné provést odhad investičních nákladů a případně naplánovat další možné varianty realizace. [2]

Předkládaná práce je zaměřena na návrh autonomního napájení konkrétního rodinného domu elektřinou ze střešních FV panelů. Návrh byl proveden podle výše popsaného postupu. Odhadnutá denní spotřeba rodinného domu byla příliš velká na to, aby mohla být pokryta ekonomicky efektivně navrženým FV systémem. Proto musela být vhodně optimalizována. Pro přesnější analýzu potenciálu energetického výnosu FV elektrárny a odhad denních výrobních diagramů pro posuzované stanoviště jsem v programu MATLAB vytvořil matematický model fotovoltaické elektrárny.

Seznam symbolů a zkratk

FV	fotovoltaický
FVE	fotovoltaická elektrárna
MPP	Maximal Power Point, bod maximálního výkonu
MPPT	Maximal Power Point Tracking, sledování bodu maximálního výkonu
VRLA	Valve Regulated Lead Acid batteries, ventilem regulované olověné baterie
AGM	Absorbent Glass Material batteries, baterie s tekutým elektrolytem nasáklým do skelné tkaniny
LFP	Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) battery, lithium železo fosfátové baterie
STC	Standard Test Conditions, standardní testovací podmínky
HDO	Hromadné dálkové ovládání
AM	Air Mass, tloušťka atmosféry
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
MATLAB	Matrix laboratory
P_n [W]	jmenovitý výkon
U_{MPP} [V]	napětí v bodě maximálního výkonu
I_{MPP} [A]	proud v bodě maximálního výkonu
U_{OC} [V]	napětí naprázdno
I_{SC} [A]	proud nakrátko
$T_K(P_n)$ [%/°C]	teplotní koeficient jmenovitého výkonu
$T_K(U_{OC})$ [%/°C]	teplotní koeficient napětí naprázdno
$T_K(I_{SC})$ [%/°C]	teplotní koeficient zkratového proudu
P_{DCMAX} [W]	maximální DC výkon připojitelný k síťovému střídači
U_{DCMAX} [V]	maximální vstupní DC napětí síťového střídače
I_{DCMAX} [A]	maximální vstupní DC proud síťového střídače
$U_{MPP\ FV\ DOLE}$ [V]	dolní mez napěťového rozsahu MPPT síťového střídače
$U_{MPP\ FV\ NAHORE}$ [V]	horní mez napěťového rozsahu MPPT síťového střídače
m [-]	idealizující faktor přibližující ohyb V-A křivky co nejvíce realitě
C_1 [Am^2/W]	materiálová konstanta FV článku
C_2 [Km^2/W]	materiálová konstanta FV článku

C_3 [V/K]	materiálová konstanta FV článku
K_1 [A/K]	materiálová konstanta FV článku
K_3 [log (W/m ² V)]	materiálová konstanta FV článku
K_4 [W/m ² V]	materiálová konstanta FV článku
T^C [K]	termodynamická teplota odpovídající aktuální teplotě článku
T^{C0} [K]	referenční termodynamická teplota
t_a [°C]	teplota okolí
k [J/K]	Boltzmannova konstanta ($k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K)
e [C]	konstanta pro elementární elektrický náboj ($e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C)
t^{C0} [°C]	teplota při standardních testovacích podmínkách ($t^{C0} = 25$ °C)
t_a [°C]	teplota okolí
G_a [W/m ²]	intenzita slunečního záření
G_{a0} [W/m ²]	intenzita slunečního záření při STC (1000 W/m ²)
U_t [V]	termální napětí
p [-]	počet FV článků
U [V]	napětí v bodě maximálního výkonu (pouze pro model FVE)
I [V]	proud v bodě maximálního výkonu (pouze pro model FVE)
P [W]	maximální výkon FV článku (pouze pro model FVE)
E_d [kWh]	průměrná denní výroba elektrické energie
E_m [kWh]	průměrná měsíční výroba elektrické energie
H_d [kWh/m ²]	průměrné denní množství dopadnutého globálního záření
H_m [kWh/m ²]	průměrné měsíční množství dopadnutého globálního záření

1. Autonomní systémy

Autonomní systémy můžeme rozdělit na systémy:

- a) bez akumulace elektrické energie
- b) s akumulací elektrické energie
- c) hybridní

1.1 Bez akumulace elektrické energie

Nejvýhodnější z hlediska ztrát je pro autonomní systém vyrobenou energii ihned spotřebovat. V případě přímého napájení bez akumulace elektrické energie je spotřebič funkční pouze při dostatečné intenzitě slunečního záření dopadajícího na FV panely. Příkladem použití přímé spotřeby je zahradní čerpadlo na zavlažování vodou, ventilátory, solární nabíječky.

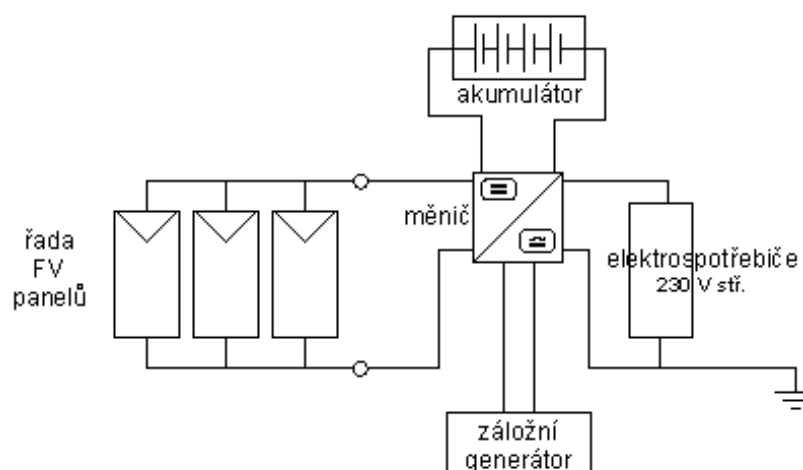
1.2 S akumulací elektrické energie

Výroba elektrické energie se většinou časově nekryje s její spotřebou, proto je třeba jí někde skladovat, aby byla v době potřeby k dispozici. V autonomních systémech se k tomu využívá akumulátorů. Při návrhu autonomního systému s akumulací elektrické energie je třeba počítat s místem pro uložení těchto akumulátorů. Jejich počet je závislý na požadovaném výkonu, spotřebě a počtu autonomních dní. Zejména v zimním období je třeba počítat s tím, že intenzita slunečního záření bude po několik dní velmi malá a veškerá energie pro napájení spotřebičů bude čerpána z akumulátorů. Počet autonomních dní vyjadřuje maximální možnou dobu, po kterou je systém schopen takto fungovat. Při letním provozu systému je obvyklý počet autonomních dnů tři až čtyři. Při celoročním provozování se musí počítat s deseti a více dny pro zabezpečení napájení. Každá kilowatthodina je potřebná, proto se snažíme dosáhnout co nejmenších ztrát energie, např. použitím vysoce účinných střídačů nebo úsporných spotřebičů. [2]

1.3 Hybridní systémy

V našich zeměpisných šířkách není ekonomicky efektivní krýt celoroční spotřebu pouze pomocí FV generátoru. V zimě získáme z FV generátoru méně elektrické energie než v létě, proto by se musela velikost FV generátoru dimenzovat podle podmínek v zimním období. To by vedlo k velkému počtu FV modulů, jejichž výkon by byl v létě nevyužitý. Pro období s malým slunečním svitem je proto zapotřebí mít záložní zdroj energie. Takové systémy se nazývají hybridní. Většinou se jako záložní zdroj používá elektrocentrála na benzín nebo propan-butan, ale autonomní systém může spolupracovat také s malou větrnou elektrárnou nebo malým kogeneračním zdrojem (Stirlingův motor). Energie vyrobená elektrocentrálou je obvykle používána k nabití akumulátorů nebo k pohonu spotřebičů s větším výkonem, než je schopen dodat střídač s akumulátory. Zajímavou možností je použití Stirlingova motoru, který vyrábí teplo a souběžně elektrickou energii. Hlavně v zimě, kdy je spotřeba tepla největší a zároveň intenzita záření nejmenší. To by umožnilo snížení plochy FV generátoru a kapacity akumulátorů. Cena kogeneračních zdrojů je zatím pro běžné použití velmi vysoká. [3]

Schéma hybridního ostrovního systému je znázorněna na Obr. 1. Měnič, zobrazený ve schématu, představuje hybridní měnič napětí, jehož součástí je MPPT regulátor. Funkce těchto komponent bude vysvětlena dále.



Obr. 1 Schéma hybridního systému (převzato z [5])

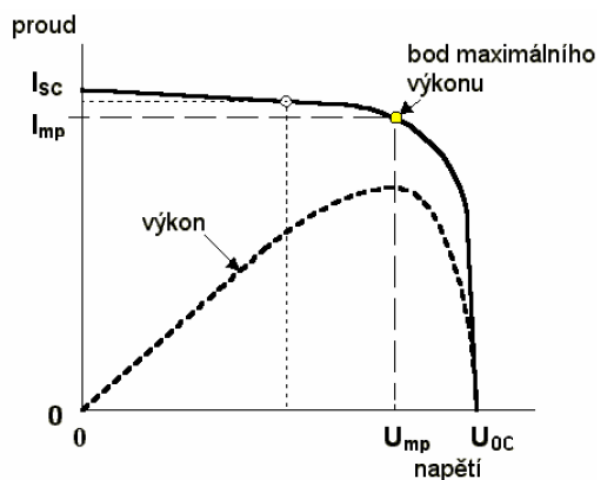
2. Základní komponenty autonomního systému s akumulací elektrické energie

- 1) Fotovoltaický generátor
- 2) Regulátor nabíjení / MPPT regulátor
- 3) Střídač
- 4) Akumulátory

2.1. Fotovoltaický generátor

Fotovoltaické panely, v technické praxi často nazývané jako fotovoltaický generátor, jsou v autonomních systémech hlavním zdrojem elektrické energie. Na trhu je velké množství různých technologií FV panelů (modulů), lišících se svými parametry a vhodností použití. Nejpoužívanější jsou panely polykrystalické, monokrystalické a amorfní. Proto se v dalším teoretickém rozboru budu zabývat pouze těmito třemi technologiemi.

Aby bylo možné nějakým způsobem porovnat různé moduly mezi sebou, byly stanoveny tzv. standardní testovací podmínky – STC (1000 W/m^2 ; $AM = 1,5$; $t = 25^\circ\text{C}$). Při těchto podmínkách se určují štítkové (jmenovité) hodnoty modulu. Typicky se na štítku uvádí maximální výkon P_{MAX} [Wp], kterého je dosaženo v bodě maximálního výkonu (MPP). Tento bod se mění vlivem změny teploty, změny intenzity osvětlení, zastíněním modulu. Dále se uvádí napětí v MPP U_{MPP} [V], proud v MPP I_{MPP} [A], napětí naprázdno U_{OC} [V] a proud nakrátko I_{SC} [A].



Obr. 2 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku (převzato z [8])

Výkon solárního modulu je uváděn s určitou tolerancí, která je dána výrobou. Udávané rozptyly výkonů se pohybují většinou od $\pm 3 \%$ až do $\pm 10 \%$. Zpravidla platí, že čím menší je udávaná tolerance výkonu, tím kvalitnější je FV modul. Výkon jednoho FV panelu se pohybuje v řádech desítek až stovek Wp. Pro dosažení vyššího výkonu se jednotlivé panely spojují sériově, paralelně nebo sérioparalelně do větších celků (FV generátorů). Dalším znakem kvality je doba, po kterou výrobce garantuje určitý minimální výkon. Garance se může vztahovat na spodní mez tolerance výkonu, tedy minimální výkon nebo na jmenovitý výkon modulu. Doba záruky výkonu a hodnota minimálního výkonu, která je garantována, se liší podle výrobce. Obvyklé doby záruky výkonu jsou 10 až 30 let. Dále se poskytuje záruka na samotný modul. Opět se liší podle výrobce, od zákonem předepsaných 2 let až do 30 let.[1]

Účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii je u každé technologie solárních panelů různá. Její velikost určuje maximální výkon na jednotku plochy panelu. Čím vyšší je účinnost, tím menší je potřebná plocha pro dosažení určitého výkonu. Porovnání účinností a plochy, která je potřebná pro instalaci výkonu 1 kWp, pro nejpoužívanější technologie je v Tab. 1.

Hodnotit kvalitu FV modulu pouze podle účinnosti nebo jmenovitého výkonu udávaného na štítku modulu je nedostačující. Výkon modulu závisí na intenzitě osvětlení, spektru slunečního záření a teplotě. Stejně podmínky jako při STC se ve skutečnosti vyskytují málokdy, proto jsou hodnoty výkonu v reálném provozu dosti odlišné. To dokazují i dále uvedené výsledky testu [4].

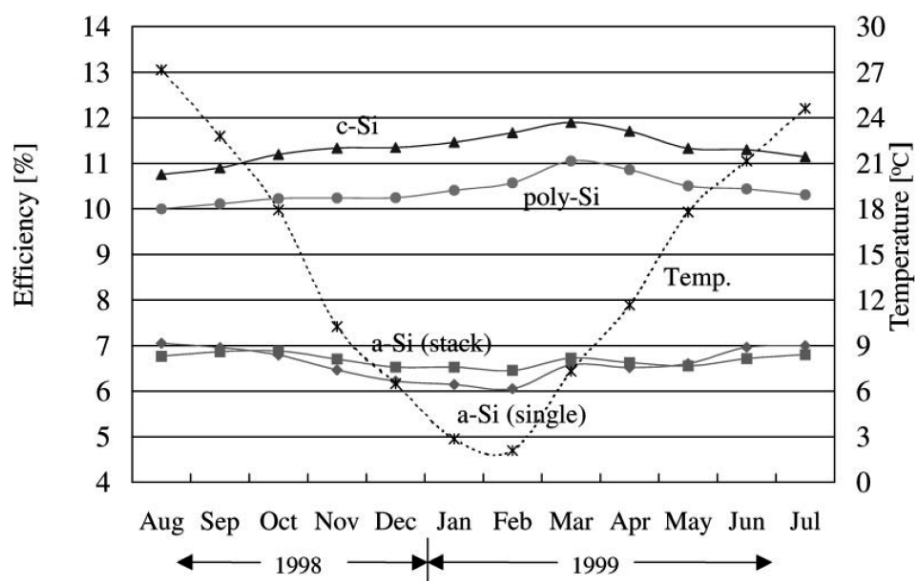
Tab. 1 Účinnost a potřeba plochy pro různé technologie podle údajů výrobců (2009) [1]

Materiál solárních článků	Účinnost modulu	Potřebná plocha pro 1 kWp výkonu
Vysokovýkonové křemíkové solární články	16 – 18 %	5 – 6 m ²
Monokrystalický křemík	11 – 16 %	6 – 9 m ²
Polykrystalický křemík	10 – 15 %	7 – 10 m ²
Amorfní křemík	4 -7 %	15 – 26 m ²

V testu byly porovnávány čtyři různé typy modulů: monokrystalické (c-Si), polykrystalické (poly-Si), tenkovrstvé amorfní křemíkové s jedním přechodem (a-Si single) a tenkovrstvé amorfní křemíkové s třívrstvou strukturou (a-Si stack). Tenkovrstvý modul z amorfního křemíku s jedním přechodem měl skleněný substrát, zatímco třívrstvý modul měl

substrát z nerezové oceli, na kterém byla nanášena třívrstvá struktura Si//a-SiGe//a-SiGe. Z každého typu modulu bylo sestaveno jedno FV pole o různém výkonu. Celkový instalovaný výkon byl 15 kWp. Orientace všech FV polí byla na jih se sklonem 15,3°. Místo instalace: 34°58'N 135°57'E, Japonsko, Ritsumeikan University. V testu byla pro každé FV pole zvlášť měřena vyrobená energie a průměrná účinnost. Také byla měřena teplota okolí. Výsledky z měření jsou zobrazeny v následujících grafech.

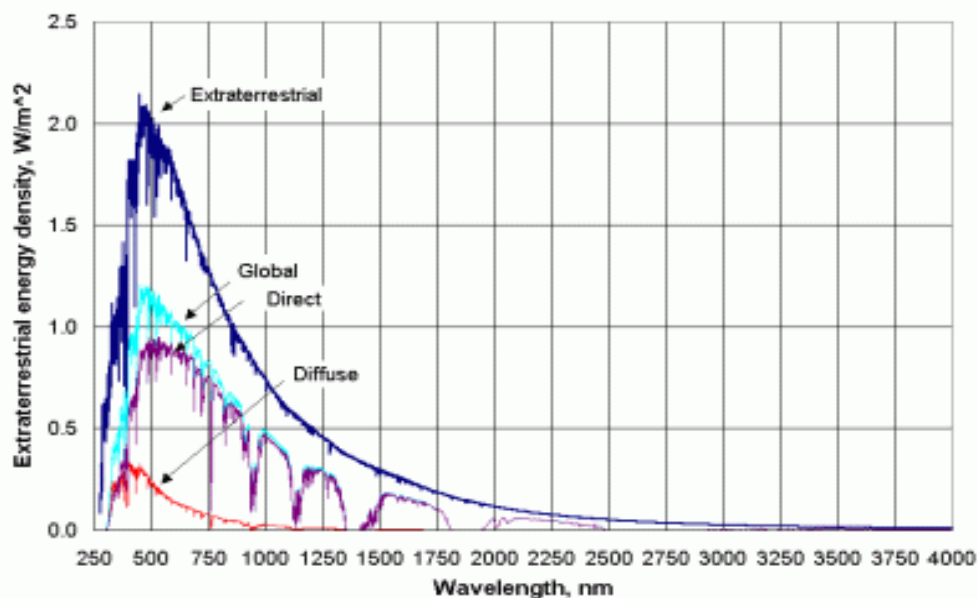
Obr. 3 ukazuje změnu průměrné měsíční účinnosti jednotlivých FV polí v průběhu celého roku. Změna účinnosti a také změna výkonu závisí na teplotě. S rostoucí teplotou klesá napětí článku, a tím i elektrický výkon. Teplotní koeficient maximálního výkonu je u amorfních křemíkových modulů asi o polovinu menší než u krystalických křemíkových modulů (cca $-0,2 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$). Z toho důvodu má vyšší teplota mnohem menší vliv na snížení výkonu. To je patrné i z průběhu grafu, kdy v letních měsících účinnost krystalických modulů oproti tenkovrstvým výrazně poklesla. Další zvláštností tenkovrstvých modulů je, že jejich teplotní koeficient roste s klesajícím ozářením, proto mohou při nižším ozářením a vyšších teplotách dosahovat vyšší účinnosti než při STC [1]. Tato vlastnost předurčuje tenkovrstvé křemíkové moduly pro použití na střeších a integraci do budov, kde je teplota obecně vysoká. Naopak monokrystalické a polykrystalické moduly jsou spíše vhodné pro klasické instalace na střeších nebo na volném prostranství, kde je zajištěno jejich dostatečné chlazení.



Obr. 3 Měsíční průměrná účinnost jednotlivých FV polí a průměrná měsíční teplota (převzato z [4])

Velikost teplotního koeficientu je dána materiálně technologickými vlastnostmi. Dalším parametrem, který je určen druhem materiálu je rozložení spektrální citlivosti. Každý typ solárního článku má určité rozložení spektrální citlivosti na dopadající sluneční záření. Tento parametr vyjadřuje s jakou účinností dokáže solární článek využít energii záření různých vlnových délek – má tedy vliv na účinnost (a tím také výkon) při různých podmínkách ozáření.

Na Obr. 4 je znázorněno spektrální rozložení slunečního záření pro $AM=1,5$ (Air Mass = tloušťka atmosféry) ve srovnání se zářením, před vstupem do atmosféry (extraterrestrial). Sluneční záření (global), dopadající na zemský povrch, se skládá z přímého (direct) a difúzního (diffuse) záření. Podíl mezi přímým a difúzním zářením závisí na poloze Slunce na obloze, oblačnosti a znečištění atmosféry. Čím menší je úhel dopadu slunečního záření, tím větší tloušťkou atmosféry musí záření proniknout, snižuje se intenzita záření (energetický obsah) a mění se spektrum dopadajícího záření. Největší energetický obsah má viditelné sluneční záření s rozsahem vlnových délek 400 nm až 800 nm. Porovnání spektrální citlivosti různých solárních článků je na Obr. 5.

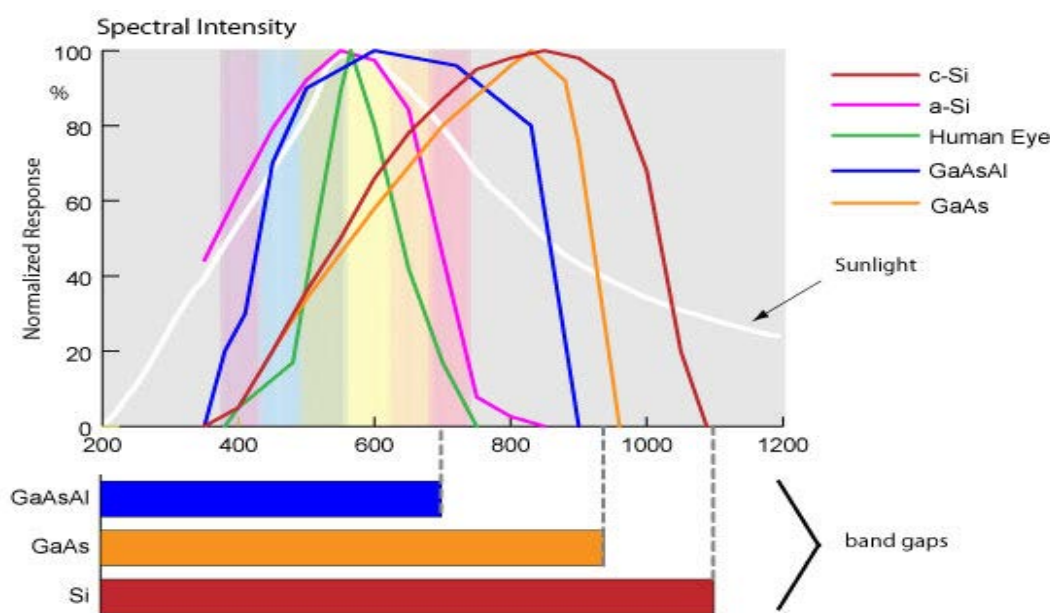


Obr. 4 Přímé, difúzní a globální záření pro $AM=1,5$ (převzato z [6])

Spektrální citlivost krystalického křemíku je vysoká zejména pro oblast dlouhovlnného slunečního záření [1]. Křemíkové FV články jsou schopné využívat spektrum slunečního záření jen do vlnové délky 1100 nm. To znamená, že energie dopadajících fotonů

musí být větší než 1,12 eV, tedy větší než je šířka zakázaného pásu křemíku. Ve skutečnosti fotoefekt není závislý pouze na energii dopadajícího fotonu. Atom může přijmout část energie ve formě tepla z okolí a díky tomu i fotony s větší vlnovou délkou (menší energií než 1,12 eV) mohou vyvolat fotoefekt. Na druhou stranu fotony s malou vlnovou délkou nemusí být absorbovány, protože mají příliš mnoho energie. [7]

Monokrystalické články jsou poměrně citlivé na směr dopadajícího záření, nejlépe využívají přímého slunečního záření. Proto jsou vhodné pro instalace s ideální orientací a sklonem. Často se také používají s polohovacím zařízením, které zajišťuje jejich optimální natočení. Polykrystalické články nejsou tak citlivé na směr slunečního záření jako monokrystalické, dokážou o něco lépe využít difúzní záření, jehož podíl v zimních měsících převažuje nad přímým zářením. Hodí se tak pro instalace na plochy, které nemají úplně optimální orientaci a sklon.

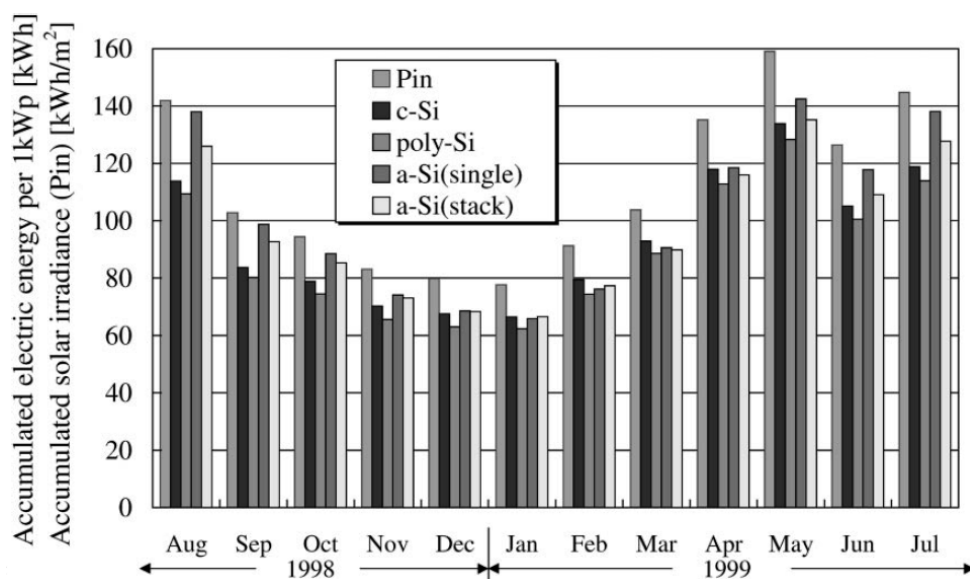


Obr. 5 Porovnání spektrální citlivosti různých solárních článků (převzato z [7])

Amorfni křemíkové články mají nejvyšší spektrální citlivost v oblasti krátkovlnného slunečního záření [1]. Proto mohou tenkovrstvé moduly dosahovat vyšší účinnosti a vyrábět více energie při malém ozáření, například brzo ráno, pozdě večer nebo při zvýšené oblačnosti. Třívrstvé amorfni články mají tři pin vrstvy umístěné nad sebou a každá z nich je optimalizována k absorbování jiné části slunečního spektra. Proto dosahují vyšší účinnosti než jednovrstvé moduly. Výhodou tenkovrstvých modulů je jejich menší citlivost na zastínění.

Vlivem jejich odlišné konstrukce od krystalických modulů se výkon snižuje pouze úměrně zastíněné ploše, proto se hodí pro místa, kde nelze odstranit zastínění.

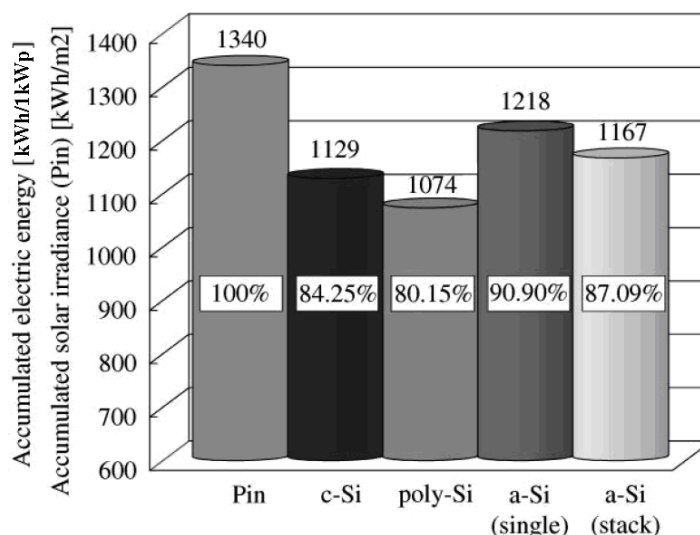
Nejdůležitějším parametrem je množství energie, které panel dokáže vyrobit. Obr. 6 zobrazuje množství vyrobené energie za měsíc v kWh vztažené na 1 kWp instalovaného výkonu. Pin vyjadřuje celkovou energii slunečního záření v kWh, která dopadla za měsíc na plochu jeden m^2 . Je to součet přímého a difuzního slunečního záření dopadnutého na horizontální plochu. V České republice je tato hodnota v ročním součtu 950 až 1340 kWh/ m^2 [1]. Z grafu je vidět, že během letních měsíců vyráběly nejvíce energie tenkovrstvé moduly z amorfního křemíku. Naopak v zimním období největší množství energie vyrobily monokrystalické moduly, bylo to o 5 % [4] více než moduly z amorfního křemíku. Objem vyrobené energie byl ovlivněn malým sklonem FV polí. Malý sklon byl autory zvolen z důvodu porovnání výkonnosti panelů v letních měsících.



Obr. 6 Množství vyrobené energie za měsíc v kWh vztažené na 1 kWp (převzato z [4])

V ročním součtu vyrobily nejvíce energie tenkovrstvé moduly. Rozdíl v produkci mezi monokrystalickými a polykrystalickými moduly byl menší než 5 %. Jedná se o údaje z prvního roku provozu, proto se dá předpokládat, že vlivem počáteční degradace, která je významná především u tenkovrstvých amorfních článků, se výkon v dalších letech produkce o něco sníží. Porovnání vyrobené energie v kWh za rok vztažená na 1 kWp instalovaného výkonu je na Obr. 7.

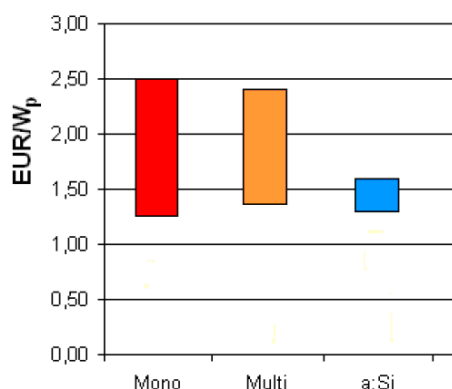
Výběr vhodného typu FV modulu je důležitý, protože jeho cena určuje velikost celkových investičních nákladů. U FV systémů s výkonem pod 30 kWp připojených na síť tvoří náklady na FV generátor 67 % [1] z celkových nákladů. U systémů s větším instalovaným výkonem se tento podíl ještě zvětšuje. V případě autonomních systémů je podíl FV panelů na celkové ceně menší, protože náklady jsou ovlivněny cenou akumulátorů. Cenu FV modulů určuje především cena základní suroviny – křemíku. Z toho důvodu jsou zvýhodněny tenkovrstvé moduly, u nichž je spotřeba křemíku malá. Avšak vzhledem k nižší účinnosti těchto modulů je potřeba větší plocha pro instalaci, a tím i více instalačního materiálu a lidské práce při montáži. Ve výsledku je cena tenkovrstvého FV systému srovnatelná s cenou FV systému z krystalického křemíku.



Obr. 7 Porovnání celkové vyrobené energie za jeden rok (převzato z [4])

Zdokonalování výrobních postupů FV článků i samotné výroby křemíku, snižování energetické náročnosti výroby a rostoucí objem produkce vede k postupnému snižování ceny FV modulů za současného zvyšování jejich účinnosti. Na Obr. 8 je znázorněno porovnání rozpětí cen různých typů modulů na začátku roku 2010.

Přestože náklady na FV generátor tvoří významnou část celkových nákladů, neměla by být cena modulu rozhodujícím kritériem pro jeho výběr. Při uvážení životnosti modulů, která přesahuje 25 let, je hlavní kvalita modulů a zejména pak množství vyrobené energie.



Obr. 8 Rozpětí ceny jednotlivých typů modulů v roce 2010 (převzato z [8])

2.2. Regulátor nabíjení

Je to spojovací prvek mezi solárním generátorem a akumulátorem. Má na starosti optimální nabíjení a vybíjení akumulátoru. Pro zajištění optimálního nabíjení akumulátorů snižuje a stabilizuje vstupní napětí ze solárního generátoru na úroveň, jenž je vhodná pro nabíjení akumulátorů. Akumulátory jsou nabíjeny až do doby, kdy jsou plně nabitě, což je dáno koncovým nabíjecím napětím. Potom je regulátor odpojí od FV generátoru nebo omezí nabíjecí proud, aby nebyly přebíjeny a nesnižovala se tak jejich životnost. Akumulátory jsou odpojeny i v případě poklesu napětí generátoru pod určitou úroveň, která je ještě vhodná pro jejich nabíjení. Za tmy se FV generátor chová jako spotřebič, což je způsobeno jeho vnitřním odporem. Směr proudu by se obrátil, tekla by z akumulátoru do generátoru a akumulátor by se vybil. Tomu zabráňuje vestavěná dioda. Regulátor dále chrání akumulátor před hlubokým vybitím. K hlubokému vybití dochází při poklesu napětí akumulátoru pod hodnotu koncového vybíjecího napětí, přitom může dojít k jeho poškození a snížení životnosti. Pokud hrozí hluboké vybití, odpojí regulátor zátěž od baterie. K odpojení zátěže může také dojít při zkratu na zátěži nebo velkém proudovém přetížení. Některé regulátory provádějí kompenzaci nabíjecí a vybíjecí charakteristiky v závislosti na teplotě akumulátoru, protože koncové nabíjecí a vybíjecí napětí na teplotě závisí. Solární regulátory mají velkou spoustu dalších funkcí, např. rozpoznání připojeného typu akumulátoru, automatické spuštění spotřebiče v době přebytku elektrické energie, zobrazení stavu nabití akumulátorů, atd. Na solárním regulátoru dochází poměrně k velkým ztrátám, protože nedokáže optimálně pracovat s dodaným výkonem z FV generátoru – nabíjecí proud nemůže být nikdy vyšší než proud dodaný FV generátorem; pokud je napětí generátoru nižší než nabíjecí napětí akumulátoru, nabíjení neprobíhá. Průměrná účinnost solárního regulátoru je nízká, asi 80 %. [2][9]

2.3. MPPT regulátor nabíjení

Tento přístroj řeší nedostatek solárního regulátoru. Dokáže optimalizovat nabíjecí napětí a proud tak, aby byl maximálně využit výkon z FV generátoru. Princip je založen na vysokofrekvenčním DC – DC měniči, který vstupní DC napětí z FV generátoru změní na vysokofrekvenční AC napětí, toto napětí transformuje a znovu změní na DC napětí ovšem s jinou velikostí než původní vstupní DC napětí. Tím se změní i proud. Proto může být nabíjecí proud vyšší než dodávaný FV generátorem. Princip je podobný transformátoru, ale pro stejnosměrný proud. Výstupní výkon je potom přibližně roven výkonu dodanému z FV generátoru. Další výhodou oproti obyčejnému regulátoru nabíjení je, že dokáže efektivně využít výkon z FV generátoru o vyšším napětí než je napětí připojených akumulátorů. Každý MPPT regulátor má určitý rozsah vstupního napětí, které dokáže zpracovat. Výstupní napětí můžeme zvolit nebo jej necháme zvolit automaticky podle typu akumulátoru. MPPT regulátor potom bude optimalizovat výkon z FV generátoru pro nastavené napětí. Při výběru jsme omezeni také maximálním vstupním proudem z FV generátoru. Celoroční průměrná účinnost MPPT regulátorů je asi 95 %. Přestože je jeho cena vyšší než cena obyčejného regulátoru nabíjení, v případě větších FV zařízení a autonomních systémů je nezbytný.[9]

2.4. Střídač

Slouží k přeměně stejnosměrného napětí a proudu z FV generátoru nebo akumulátorů na střídavé napětí a proud pro rozvodnou síť. To nám umožní v autonomních systémech používat klasické domácí spotřebiče. Střídač musí být schopen dodávat maximální trvalý výkon všech současně používaných spotřebičů a to po neomezeně dlouhou dobu. Výkon střídače je nutno vhodně dimenzovat, aby jeho jmenovitý výkon byl nejméně takový, jaký je součet příkonů všech současně připojených spotřebičů. Měli bychom také počítat s rezervou pro možné budoucí spotřebiče. Dalším důležitým parametrem střídače je špičkový výkon. Ten je důležitý pro rozběh indukčních spotřebičů (lednička, vysavač, atd.), které při rozběhu odebírají několikanásobek svého jmenovitého příkonu. Špičkový výkon střídače může být několikrát vyšší než jmenovitý, ale je k dispozici pouze několik sekund. Střídače není dobré dlouhodobě přetěžovat. Snižuje se tím jeho životnost, zvyšuje se pravděpodobnost poruchy a také se zvyšují ztráty. Střídač je zpravidla připojován přímo na akumulátor, protože na primární straně odebírá velké špičkové proudy, které není schopen regulátor nabíjení spínat. Aby se zabránilo hlubokému vybití akumulátoru, obsahují některé střídače regulaci nabíjení,

která střídač při hlubokém vybití odpojí. Tím ušetříme i náklady na samostatný nabíjecí regulátor. [2]

2.5. Akumulátory

Vyrobenou energii, která se ihned nespotřebuje, je vhodné ukládat do akumulátorů pro její pozdější použití, například v noci. Přestože akumulátory navyšují cenu celého autonomního systému, je jejich použití v případě celoročního provozu nevyhnutelné. Jejich další nevýhodou je kromě vysoké ceny také malá energetická účinnost, tedy poměr energie, kterou může akumulátor vydat, k energii přivedené do akumulátoru. V závislosti na typu se hodnota energetické účinnosti pohybuje mezi 70 a 85 %. Při návrhu autonomního systému je důležité zvolit dostatečnou kapacitu akumulátorů. Malá kapacita akumulátorů, vzhledem ke spotřebě, znamená více cyklů nabití a vybití, a tím také kratší životnost. Dále je důležité použít v zapojení pouze jeden typ akumulátorů od jednoho výrobce o stejné kapacitě a nejlépe ze stejné výrobní série. Akumulátory o rozdílné kapacitě nebo rozdílně nabitě by se navzájem ovlivňovaly – vzájemné vybíjení a nabíjení, atd. Nejznámějšími typy akumulátorů jsou olověné, nikl–kadmiové, nikl–metalhydridové a lithium–iontové. V autonomních FV systémech se často používají olověné. Mezi olověné akumulátory použitelné ve FV systémech patří startovací akumulátory, solární akumulátory, stacionární akumulátory a bezúdržbové (AGM) akumulátory. [2][10]

2.5.1. Startovací akumulátory

Běžný typ akumulátoru, známý především z automobilů. Při jeho vývoji byl kladen důraz na minimální potřebu místa, malou hmotnost a nízkou cenu. Jedná se o údržbový akumulátor, kde elektrolytem je kyselina sírová zředěná vodou. Není hermeticky uzavřený, uvolňuje se vodík a hrozí únik elektrolytu při naklonění nebo převrácení. Díky velkému počtu tenkých desek, které tvoří velkou plochu, je schopen dodávat velký proud, ale jen po krátkou dobu. To odpovídá jeho využití v automobilech: Potřeba velkého startovacího proudu pro nastartování a následné rychlé dobití. Akumulátor není hluboce vybitý, při startování motoru je odebráno méně než 10 % jmenovité kapacity. Pro použití v autonomních systémech s celoročním provozem jsou však nevhodné. Snesou malý počet pracovních cyklů (nabití a vybití) a nejsou odolné proti hlubokému vybití. Pokud při hlubokém vybití startovacího akumulátoru nedojde co nejdříve k jeho opětovnému nabití, hrozí jeho nenávratné poškození.

Jejich dalšími nevýhodami je malá využitelná kapacita, rychlé samovybíjení (až 20 % za měsíc) a krátká životnost při častějším hlubokém vybíjení. [2][10]

2.5.2. Solární akumulátory

Je to modifikovaná verze startovacího akumulátoru. Má zesílené elektrodové desky, proto snese dvakrát až třikrát větší počet cyklů než startovací akumulátor, a tím má i delší životnost. Další výhodou je menší samovybíjení (2 až 10 % za měsíc). Jejich cena je poměrně příznivá. Používají se především v místech s malou spotřebou (chaty, karavany, atd.). [2]

2.5.3. Bezúdržbové olověné akumulátory

Hermeticky uzavřené, olověné, bezúdržbové akumulátory, označované VRLA (Valve Regulated Lead Acid batteries). Obsahují přetlakový ventil pro regulaci vnitřního tlaku. Nehrozí u nich únik elektrolytu při naklonění nebo převrácení. Oproti startovacím akumulátorům mají mnoho výhod. Mají vyšší využitelnou kapacitu při stejné hmotnosti, nižší rychlost samovybíjení, vydrží delší dobu ve stavu hlubokého vybití bez trvalého poškození a jsou bezúdržbové. Jsou určeny pro dlouhodobý odběr menšího proudu. Kvůli těmto vlastnostem jsou vhodné pro použití v autonomních systémech. Existují dva typy VRLA akumulátorů: gelové akumulátory, jejichž vnitřní konstrukce je téměř shodná s klasickým údržbovým typem, ale elektrolyt je ve formě hustého gelu; a AGM (absorbent glass material) akumulátory, které mají tekutý elektrolyt nasáklý do skelné tkaniny umístěné mezi deskami akumulátoru. Když porovnáme gelové a AMG akumulátory, tak AMG jsou schopné podávat vysoký výkon i při nízkých okolních teplotách, dávají až o 30 % vyšší okamžitý výkon a při stejné kapacitě jsou asi o 10 % lehčí než gelové akumulátory. Naproti tomu gelové akumulátory mají asi o 10 % delší životnost, lépe odolávají hlubokému vybíjení a v případě odstávky pomaleji ztrácejí svoji kapacitu. [2][10]

2.5.4. Stacionární akumulátory

Jejich konstrukce je robustní. Elektrody mají tvořené tlustými pancéřovými deskami, proto dobře snášejí hluboké vybití. Snesou velký počet vybíjecích a nabíjecích cyklů, až pětkrát víc než solární akumulátory. Životnost může být až 20 let. Nevýhodou je jejich vyšší cena, vysoká váha, nutnost větrání místnosti. [2]

2.5.5. Lithium železo fosfátové akumulátory (LFP)

Tento typ akumulátorů využívá pro akumulaci energie lithium. Jejich katoda je tvořena fosforečnanem železnato-litným a anoda je složena z uhlíku. Elektrolyt je absorbován v separátorech a na deskách. Stejně jako bezúdržbové olověné akumulátory mají speciální jednosměrný ventil, který umožňuje unik nahromaděných plynů. Hlavními výhodami oproti olověným bateriím jsou: vyšší hustota energie (Wh/g), vyšší cykličnost, rychlejší nabíjení a vyšší proudová zatížitelnost. Další výhodou je, že můžeme zcela využít jejich kapacitu. Můžeme je úplně vybit ze stavu 100 % na 0 %. Dokonce je můžeme nechat částečně vybité po několik dní, aniž by se to projevilo snížením jejich životnosti. Naproti tomu olověné baterie nesnesou úplné vybíjení, můžeme je vybíjet pouze z menší části. Obvykle je maximální hranice 60 %. Při každodenním provozu by měly být vybíjené pouze asi z jedné třetiny, aby se nesnižovala jejich životnost. Pokud bychom tedy chtěli každý den získat z olověných akumulátorů 1 kWh (83 Ah z 12 V baterie), pak musíte vybrat baterii s nominální hodnotou 250 Ah. [14][15]

Tab. 2 Srovnání vlastností LiFePO₄ a AGM akumulátorů, převzato z [14]

Typ článku	LFP	Olověný AGM
Hustota energie (Wh/kg)	90 – 120	30 – 50
Počet cyklů (při 80 % hloubce vybití)	> 1500	400 – 500
Projektovaná životnost	10 let+	10 let+
Doba nabíjení	0,5 – 4 h	8 – 16 h
Samovybíjení/měsíc (při cca 20 °C)	5 – 10 %	5 %
Nominální napětí článku	3,3 V	2 V
Proudová zatížitelnost: špičková	25 C	5 C
optimální	5 C	0,2 C
Provozní teploty (pro vybíjení)	- 20 až 60 °C	- 20 až 60 °C
Přibližné náklady (EUR/Wh)	0,33	0,11

Akumulátory použité v autonomních FV systémech by měli splňovat tyto požadavky:

- minimální samovybíjení,
- vhodnost pro cyklický provoz,
- odolnost proti hlubokému vybití,

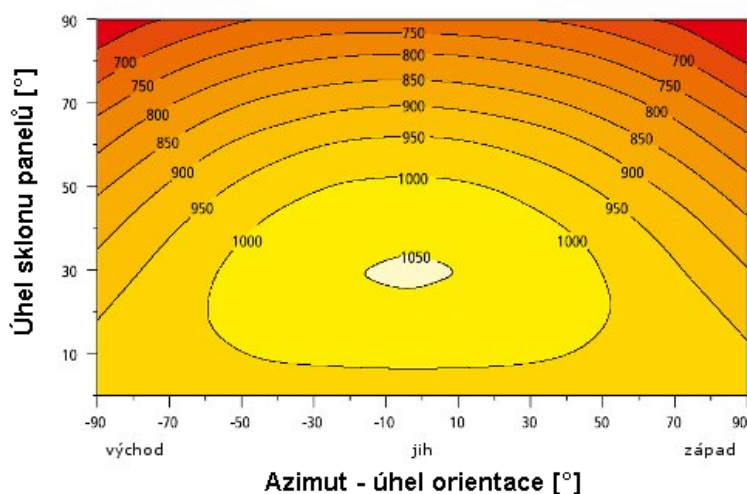
- minimální údržba,
- dlouhá životnost,
- vysoká energetická účinnost.

Těmto požadavkům nejvíce vyhovují bezúdržbové VRLA, stacionární a lithium železo fosfátové akumulátory.

3. Posouzení stanoviště

3.1. Sklon a orientace

Základním předpokladem pro efektivní využití potenciálu výkonnosti FV generátoru je správná volba místa instalace – stanoviště. Nejdůležitějšími parametry stanoviště je jeho orientace ke světovým stranám, sklon, zastínění, plocha. U stávajících staveb je možnost instalace omezena pouze na plochu střechy a fasády s předem danou orientací ke slunci. V případě novostavby lze ve spolupráci s architektem optimalizovat budovu pro instalaci FV generátoru a dosáhnout tak nejlepších možných podmínek. Do jisté míry univerzálním místem instalace je plochá střecha, kde lze zvolit libovolný sklon a orientaci. [1]



Obr. 9 Diagram ozáření s ročním souhrnem celkového ozáření v kWh na různě skloněných a orientovaných plochách pro Berlín (převzato z [11])

K posouzení vhodnosti stanoviště mohou posloužit diagramy ozáření, jenž udávají celkové roční ozáření pro různou orientaci a sklon plochy. Celkové ozáření je součet přímého

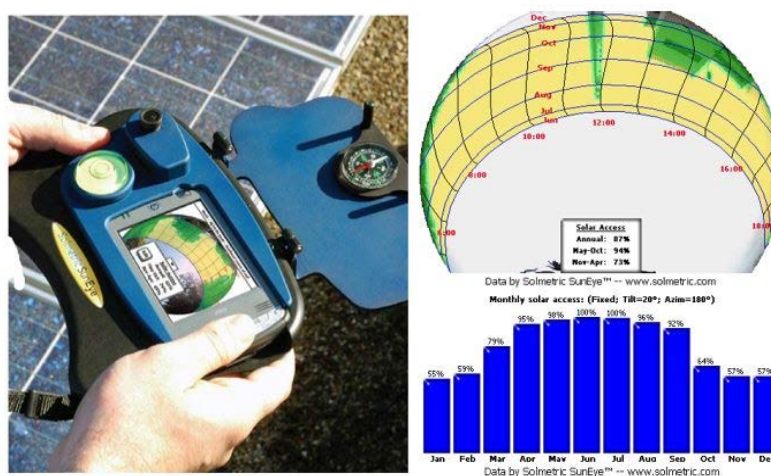
a difuzního slunečního záření. Jeho velikost závisí na zeměpisné poloze, v České republice je tato hodnota v ročním součtu 950 až 1340 kWh/m² na vodorovnou rovinu [1]. Azimut 0° v diagramu ozáření vyjadřuje přímou orientaci na jih, směrem na východ úhel klesá až k -90°, kterému odpovídá přímá orientace na východ. Ve směru na západ úhel stoupá až k +90°. Ideální sklon pro zisk maximálního ozáření za rok je v ČR 35° [12]. Ideální orientace je na jih. Takto ideální stanoviště se vyskytuje zřídka. Panely však není nutné orientovat pouze do oblasti nejvyššího ozáření. Při odchylce ±45° od jihu a sklonu v rozsahu 10 až 50°, činí odchylka od optimálního ozáření maximálně 10 % [1]. Odchylka k západu je výhodnější než k jihovýchodu, protože v dopoledních hodinách je obvykle větší oblačnost a proto je i dopadající energie menší. V celoročním srovnání je produkce u jihozápadně orientovaných panelů o 5 až 7 % vyšší než u jihovýchodně orientovaných [12].

3.2. Zastínění

Při výběru místa instalace je dále potřeba zvážit možné zastínění způsobené objekty v okolí a vzít přitom do úvahy pohyb slunce v průběhu dne i roku, a tím i změnu polohy stínu. Nejčastějšími překážkami jsou stromy, sousední budovy, komíny, televizní antény, satelity, střešní nástavby, vikýře. Částečné zastínění má velký vliv především na klasické krystalické FV moduly, ve kterých je zapojeno více článků do série. Při zastínění jednoho článku v modulu nastane tzv. efekt zahradní hadice. Článek se stane spotřebičem, klesne proud v celém sériovém zapojení článků, klesne výkon modulu. Tento problém je řešen obtokovými diodami, jenž vedou proud mimo zastíněný článek a vzniklé snížení výkonu není tak velké, je úměrné počtu přemostěných diod. Jednou obtokovou diodou je obvykle přemostěno 18 až 20 solárních článků. Kdyby nebyly použity v modulech obtokové diody, poklesl by výkon u všech článků. Mnohem odolnější proti zastínění jsou tenkovrstvé moduly, a to vlivem odlišné konstrukce. Jejich články mají tvar dlouhého poměrně úzkého proužku, tím je ztlíženo jejich úplné zastínění. Výkon těchto modulů klesá pouze úměrně zastíněné ploše. [1]

Odhadnout velikost ztrát způsobených zastíněním můžeme určením horizontu. Linii horizontu určuje úhel azimutu a úhel výšky objektů vrhajících stín na FV generátor. Úhel azimutu objektů lze určit ze situačního plánu FV generátoru a okolí. K určení úhlu výšky γ je potřeba znát vzdálenost a výšku stínících objektů. Získáme je z rozdílu výšky stínícího objektu a FV generátoru Δh a jejich vzdálenosti d : $\gamma = \arctg(\Delta h/d)$. Linie horizontu se vztahuje k určitému bodu, nejčastěji středu FV generátoru, a je zaznamenávána od východu

po západ v úhlu 180° . Když vypočtené úhly výšky objektu vyznačíme k odpovídajícím úhlům azimutu do diagramu dráhy slunce, získáme linii horizontu. Ze vzniklého grafu zjistíme, ve kterých měsících bude docházet k zastínění. V praxi se k posouzení vlivu zastínění používají speciální přístroje, jenž zaznamenávají linii horizontu na digitálních fotografiích, ze kterých je následně pomocí softwaru vytvořena digitální linie horizontu. Zjištěnou linii horizontu lze přenést pro další zpracování do simulačních programů. Tyto programy z linie horizontu vypočtou ztrátu ozáření a přibližnou ztrátu výnosu. Mezi nejpoužívanější programy patří PV-SOL a SolEm. [1]



Obr. 10 Přístroj Solmetric SunEye pro vyhodnocení zastínění blízkými objekty přímo na místě (převzato z [13])

3.3. Plocha

Dalším omezujícím parametrem při návrhu FV systému je velikost použitelné plochy pro instalaci. Nejčastěji se používají nadstřešní instalace na šikmé a ploché střechy a integrované systémy. V případě integrovaných systémů do budovy, solární moduly nahrazují konstrukční díly střechy nebo fasády, stávají se součástí pláště budovy a kromě výroby elektrické energie plní i funkci ochrany před povětrnostními vlivy, tepelné izolace, ochrany před hlukem a sluncem. Tím se ušetří část nákladů. U střešních instalací je třeba si uvědomit, že nelze využít celou plochu střechy, protože je třeba dodržovat určité odstupy od okrajů střechy, střešních oken, vikýřů, hromosvodů. Vzdálenost FV generátoru od okraje střechy by měla být nejméně pětinašobek vzdálenosti modulu od plochy střechy [1]. Vzdálenost modulu od plochy střechy by neměla být příliš velká, aby se zamezilo nadměrnému namáhání

působením větru. Na druhou stranu by měla být dost velká pro zajištění chlazení modulů. Dále je třeba počítat s dodržением určité dilatační mezery mezi moduly k zabránění pnutí vlivem tepelné roztažnosti. Malá velikost vhodné instalační plochy může omezit výběr typu FV modulů. Nejnáročnější na velikost plochy jsou tenkovrstvé moduly. Přehled potřebné plochy k instalaci výkonu 1 kWp pro různé typy FV modulů je uveden v Tab. 1.

3.4. Statika

Často podceňovaná je statika střechy. Zejména u starších staveb je před zamýšlenou instalací vhodné zkontrolovat stav krovu a zvážit, zda-li je schopen unést váhu FV generátoru. Hmotnost generátoru není přenášena na krov rovnoměrně, ale pouze bodově přes střešní háky. Ke zvýšenému zatížení proto dochází hlavně v zimě, kdy se k vlastní hmotnosti generátoru přidá ještě hmotnost sněhu. Velikost zátěže, jenž se může vyskytnout, závisí na místních povětrnostních podmínkách, výšce zimní sněhové pokrývky, ale také na výšce budovy, sklonu střechy, způsobu montáže, vzdálenosti od střešní krytiny a okrajů střech. S ohledem na možné zatížení a také podle typu použité střešní krytiny je třeba zvolit vhodný kotvicí systém s dostatečným počtem spojovacích bodů se střešní krytinou. [1]

3.5. Energetický výnos

Velikost ročního energetického výnosu závisí především na ročním ozáření FV generátoru, který pro různý sklon a orientaci můžeme odečíst z diagramu ozáření na Obr. 9. Teoretický energetický výnos za rok získáme vynásobením odečtené hodnoty ročního ozáření, plochy generátoru a účinnosti FV modulu. Na FV zařízení však dochází k velkému množství ztrát, např. vlivem: reflexe, odchylky od slunečního spektra ($AM = 1,5$), teploty modulu, znečištěním modulu, zastíněním, stejnosměrných ztrát, chybou přizpůsobení MPP, ztrát střídače, střídavých ztrát. Množství skutečně vyrobené energie je vlivem ztrát o 15 až 30 % menší než teoretický předpoklad. [1]

Pro přesnější odhad výnosu a optimalizaci FV zařízení je dobré použít simulační programy, např. PV*SOL nebo PVSYST. Na internetu je zdarma dostupný předpovědní model PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System, vytvořený výzkumným centrem Evropské komise. Poskytuje odhad výroby elektrické energie pro konkrétní místo v Evropě nebo Africe. K výpočtu používá data z pozemních meteorologických stanic a ze satelitního měření. Přesnost tohoto modelu je velmi vysoká. Ze srovnání skutečné produkce

s předpoklady tohoto modelu provedeného v [12] je zřejmé, že odchylka od skutečné produkce je nejvýše -5% , přičemž produkce srovnávaných FV zařízení běžně kolísá v rozsahu -9% až $+8\%$. Z toho je vidět, že přesnost modelu je pro odhad produkce dostatečná.

4. Odhad spotřeby rodinného domu a její optimalizace

4.1. Určení současné spotřeby rodinného domu

Při dimenzování výkonu FV panelů a dalších komponent ostrovního systému je třeba se nejdříve rozhodnout, jaké spotřebiče budeme používat a jak dlouho během dne budou zapnuté. To znamená, že musíme určit celkovou denní spotřebu elektrické energie. Tento údaj je pro návrh zásadní.

Spotřebu elektrického přístroje ve Wh lze určit jednoduše vynásobením příkonu spotřebiče a doby jeho provozu. Jmenovitý příkon je obvykle uváděn na štítku spotřebiče. V případě cyklicky pracujících spotřebičů, jako jsou ledničky a mrazáky, je údaj o příkonu nedostačující. Vyjadřuje pouze, jaký příkon má kompresor v době, kdy běží. Proto je na nich uváděna denní, případně roční spotřeba elektrické energie v kWh.

Určení spotřeby elektrické energie vynásobením jmenovitého příkonu a doby zapnutí elektrického spotřebiče není příliš přesné, protože spotřebiče většinou nepracují s uváděným jmenovitým příkonem. Z toho důvodu jsem pro určení spotřeby rodinného domu použil zásuvkový elektroměr Voltcraft Energy Check 3000.



Obr. 11 Zásuvkový elektroměr Voltcraft Energy Check 3000

Použití zásuvkového elektroměru je velmi jednoduché. Elektroměr zasuneme do zásuvky 230 V, vidlici spotřebiče zasuneme do zásuvky v elektroměru, zapneme připojený spotřebič, měřicí přístroj se automaticky zapne do provozního režimu a na displeji se objeví naměřené hodnoty. Měřicí rozsah přístroje je od 1,5 W až do 3000 W. Takovýto rozsah pokryje všechny běžně používané spotřebiče v domácnostech. Díky tomu, že přístroj měří již od příkonu 1,5 W, je možné přesně změřit spotřebu úsporných žárovek, síťových adaptérů a také často podceňovanou spotřebu přístrojů v režimu Stand-By. Přístroj Voltcraft Energy Check 3000 má mnoho různých funkcí: možnost nastavení dvou různých cenových tarifů, zobrazení činného výkonu, nákladů za hodinu, doby provozu spotřebiče, doby záznamu, nejnižšího a nejvyššího příkonu, který byl během měření zjištěn. Naměřená data jsou ukládána do paměti EEPROM.

Technické údaje zásuvkového elektroměru Voltcraft Energy Check 3000:

Provozní napětí: 230 V AC / 50 Hz

Tolerance: $\pm 1\%$ ± 1 W (max. $\pm 2\%$ a ± 2 W pro měření do 2500 W; max. $\pm 4\%$ pro měření nad 2500 W)

Max. proud: cca 13 A

Max. výkon: 3000 W

Tento přístroj jsem použil pro určení spotřeby všech spotřebičů v naší domácnosti, u kterých toto měření bylo proveditelné. Tedy u těch, které mají vidlici pro připojení do zásuvky 230 V. U necyklicky pracujících spotřebičů (televize nebo mikrovlnná trouba) jsem měřil spotřebu pouze po určitou dobu, například v případě LCD televize jednu hodinu. Změřenou spotřebu jsem vydělil časem provozu spotřebiče a získal tak jakýsi průměrný příkon spotřebiče. Ve všech případech se lišil od štítkové hodnoty měřeného spotřebiče.

U cyklicky pracujících spotřebičů je potřeba změřit celý jejich pracovní cyklus. Spotřebu lednice a mrazáku jsem, pro získání co nejpřesnější hodnoty, monitoroval celý den. Získaný údaj o spotřebě jsem vydělil dobou provozu a získal průměrný příkon. Velikost spotřeby pračky je pochopitelně závislá na typu použitého pracího programu. Já jsem změřil spotřebu pracího programu, který je v naší domácnosti nejpoužívanější (vyvařené/barevné prádlo 40 °C). Udávaná spotřeba podle návodu pro 5 kg prádla je 0,55 kWh, osobně jsem naměřil spotřebu 0,52 kWh. Dá se tedy předpokládat, že v pračce bylo prádla o něco méně než 5 kg. Délka trvání pracího programu byla 1 h a 2 min. Takže průměrný příkon je 520 W.

Pračka je poháněna jednofázovým asynchronní motorem, který pro svůj rozběh potřebuje poměrně velké množství energie. Příkon během rozběhu je proto několikanásobně větší než určený průměrný příkon 520 W. Nejvyšší příkon pračky zaznamenaný během pracovního cyklu byl 2080 W. S takovými špičkovými hodnotami příkonu je potřeba počítat při dimenzování střídače.

Některé domácí spotřebiče, například mikrovlnná trouba, fén, žehlička, vysavač nebo výše zmíněná pračka, umožňují nastavení velikosti výkonu podle potřeby nebo typu zvoleného programu. Tuto skutečnost jsem vzal na vědomí a při měření spotřeby respektoval. Proto byla měřena spotřeba elektrických spotřebičů při jejich obvyklém nastavení výkonu nebo typu programu. Například mikrovlnná trouba je nejčastěji používána na maximální výkon pro ohřev jídla. Fén umožňuje nastavit dva stupně výkonu ventilátoru a dva stupně výkonu tepelné spirály, příkon byl měřen při nastavení výkonu ventilátoru na druhý stupeň a výkonu tepelné spirály na první stupeň. Změřený příkon byl 1090 W. Významný vliv na velikost spotřeby fénu má tepelná spirála. Při jejím vypnutí a stejném nastavení výkonu ventilátoru, byl příkon pouze 450 W. Spotřeba žehličky byla měřena za běžného provozu a s nastaveným typem látky na bavlnu. Vysavač používaný v posuzované domácnosti má nastavitelný výkon, změřený příkon odpovídá nastavení zhruba na 75 % štítkového/jmenovitého výkonu.

Naměřené hodnoty průměrného hodinového příkonu pro uvažované domácí spotřebiče společně s dalšími údaji o spotřebičích jsou uvedené v Tab. 3. Hodnoty HI/LO představují nejnižší a nejvyšší zaznamenaný příkon během měření. U většiny spotřebičů je rozdíl mezi těmito hodnotami malý. Větší rozdíly jsou pouze u spotřebičů poháněných asynchronním motorem. V dalším sloupci najdeme údaje o příkonu v tzv. stand-by nebo-li pohotovostním režimu spotřebiče. U spotřebičů, které jsou připojené do sítě pouze v době jejich používání, jako je vysavač, fén nebo pračka, spotřebu v pohotovostním režimu pochopitelně neuvádím. U lednice a mrazáku je tato hodnota nesmyslná. Jediným spotřebičem, u kterého byla naměřena spotřeba ve stand-by režimu, byla mikrovlnná trouba, ostatní spotřebiče měli spotřebu nulovou nebo menší než je citlivost použitého zásuvkového elektroměru.

Mezi neopomenutelné spotřebiče v domácnosti patří světelné zdroje. V posuzované domácnosti je jich poměrně velké množství. Některé z nich jsou využívány pouze ojediněle a na krátkou dobu. Proto jsem uvažoval pouze ty nejpoužívanější. Jejich seznam, umístění a příkon je uveden v Tab. 4.

Tab. 3 Seznam uvažovaných spotřebičů v rodinném domě

Spotřebič	Typ	Jmenovitý (štítkový) příkon [W]	Změřený průměrný hodinový příkon [W]	HI/LO [W]	Stand-By [W]
bojler	Dražice OKCE125	2000	-	-	-
varná konvice	Tefal Type B1662	2000-2400	1941	1991/1923	0
mrazák	BOSH GSD26410	90	31	103/81	-
lednice	BOSH KSR30410	90	16,75	100/20	-
televize LCD	Panasonic TX-L32 E30E	72	38	43/21	0
mikrovlnná trouba	ETA 1196	1650	1510	1528/2	2,3
fén	Remington D-3156	2000	1090	-	-
notebook	Asus K50IJ	65	25	-	-
žehlička	Philips Azur Cord/Cordless	1550	320	1593/1511	-
vysavač	Zelmer 2000.0.B04E	1200 max. 1500	850	942/677	-
pračka	AEG Electrolux Aqua control 54610	2200	520	2080/0	-
domácí vodárna	Sigma Darling	800	-	-	-
kotel na tuhá paliva	Atmos kombi	50	-	-	-

Tab. 4 Seznam uvažovaných světelných zdrojů

světelný zdroj	umístění	příkon [W]
LED žárovka	obývací pokoj	7
zářivka	pokoj	72
žárovka úsporná	jídelna	18
zářivka	kuchyně	36
žárovka klasická	WC	60
žárovka klasická	koupelna	80
žárovka klasická	ložnice	80

Další věcí, nutnou pro stanovení denní spotřeby elektrické energie rodinného domu, je stanovení doby chodu jednotlivých spotřebičů během dne. Vynásobením doby chodu a příkonu spotřebiče získáme jeho denní spotřebu. Sečtením denních spotřeb jednotlivých spotřebičů potom dostaneme celkovou denní spotřebu elektrické energie.

Při zjišťování doby chodu spotřebičů jsem vycházel ze znalosti návyků posuzované domácnosti. Velká část uvedených dob chodu spotřebičů se také opírá přímo o provedená měření spotřeby zásuvkovým elektroměrem, který umožňuje měřit čas chodu připojeného spotřebiče. Ve své práci jsem kromě doby chodu spotřebiče uvažoval i čas jeho sepnutí. Tento odhad spotřeby jsem provedl pro pracovní a víkendový den v zimním a letním období pro patnáctiminutové intervaly během dne. V létě se vlivem vyšší teploty okolí zvyšuje spotřeba elektrické energie u ledniček, mrazáků, počítačů. Největší význam má toto navýšení u spotřebičů fungujících celý den, tedy ledniček a mrazáků. Spotřeba ledničky a mrazáku byla měřena v zimním období. Z toho důvodu jsem spotřebu těchto dvou spotřebičů navýšil v letním období o 10 %. U ostatních spotřebičů jsem navýšení spotřeby vlivem vyšší teploty zanedbal.

Tab. 5 Odhad denní spotřeby vody pro různá období

	<i>Léto</i>		<i>Zima</i>	
	<i>celková spotřeba vody [l/den]</i>	<i>spotřeba elektrické energie [Wh]</i>	<i>celková spotřeba vody [l/den]</i>	<i>spotřeba elektrické energie [Wh]</i>
<i>pracovní den</i>	280	140	320	160
<i>víkendový den</i>	400	200	480	240

Bojler a domácí vodárna – odhad spotřeby

U bojleru a domácí vodárny bylo nutno dobu chodu odhadnout. Vycházel jsem z odhadnutého množství spotřeby teplé vody a celkové spotřeby vody pro čtyři osoby, pro různá roční období, víkend a pracovní den. Spotřeba vody na jednu osobu za den je v České republice 120 litrů [17]. V odhadu jsem zohlednil fakt, že v běžném pracovním dnu je spotřeba vody v rodinném domě menší než o víkendu, protože obyvatelé domu tráví většinu dne mimo domov. Dále jsem zohlednil pokles spotřeby vody v letních měsících.

Domácí vodárna Sigma Darling má jmenovitý příkon 800 W. Z technické specifikace bylo zjištěno, že při sací výšce 6 metrů je schopna dodat přibližně 1600 litrů za hodinu.

Z tohoto údaje, odhadnutého množství celkové spotřeby vody a příkonu vodárny, dostaneme přibližnou spotřebu elektrické energie. Při odhadu spotřeby vodárny bylo počítáno s tím, že pracuje stále s jmenovitým příkonem 800 W. Odhadnutá denní spotřeba vody a odhad energie, potřebné pro její načerpání, je v Tab. 5.

Určit časy, kdy se spíná domácí vodárna, by bylo dosti obtížné. Proto jsem použil stejný postup jako u výpočtu průměrné spotřeby lednice a mrazáku. Vypočtenou denní spotřebu elektrické energie jsem vydělil počtem 15-min intervalů během dne, tedy 96. Tím jsem získal 15-min spotřebu domácí vodárny. Počítám tedy s tím, že vodárna je v chodu celý den a má konstantní spotřebu.

Tab. 6 Odhad denní spotřeby teplé vody pro různá období

	<i>Léto</i>		<i>Zima</i>	
	<i>spotřeba teplé vody [l/den]</i>	<i>spotřeba elektrické energie [Wh]</i>	<i>spotřeba teplé vody [l/den]</i>	<i>spotřeba elektrické energie [Wh]</i>
<i>pracovní den</i>	80	3800	100	4700
<i>víkendový den</i>	100	4700	130	6100

U bojleru bylo počítáno s ohřevem napájecí vody o teplotě 10 °C na teplotu 50 °C. Příkon topné spirály je 2000 W. Účinnost ohřevu vody elektrickou energií je 98 %. Do spotřeby elektrické energie nejsou započtené tepelné ztráty bojleru. Odhadnutá množství spotřeby teplé vody a vypočtená potřebná množství elektrické energie na ohřev vody jsou uvedena v Tab. 6.

Tab. 7 Časy HDO pro posuzovaný dům

<i>Po – Pá</i>	<i>So – Ne</i>
<i>00:00 – 4:55</i>	<i>1:10 – 7:10</i>
<i>14:35 – 16:35</i>	<i>14:45 – 16:45</i>
<i>22:55 – 24:00</i>	-

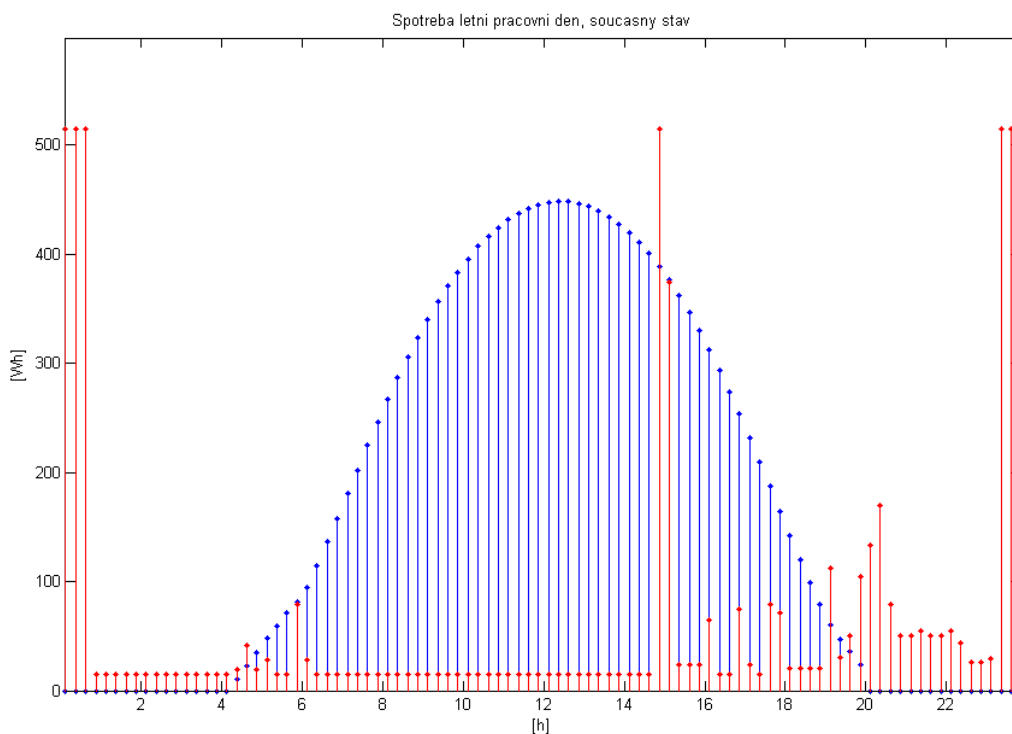
Rodinný dům v současné době využívá dvoutarifní sazbu. Bojler je tedy spouštěn pouze v době nízkého tarifu. Podle čísla povelu na přijímači HDO jsem z [18] zjistil časy spínání. Vypočtenou denní spotřebu elektrické energie na ohřev teplé vody jsem rozdělil mezi jednotlivé úseky během dne.

V Tab. 8 je porovnání celkových denních spotřeb elektrické energie v různých ročních obdobích pro pracovní a víkendový den a letní a zimní průměrné denní spotřeby ve Wh. Největší spotřeba je podle očekávání v zimě a nejmenší v létě. Výraznou měrou se na celkové spotřebě podílí ohřev teplé vody.

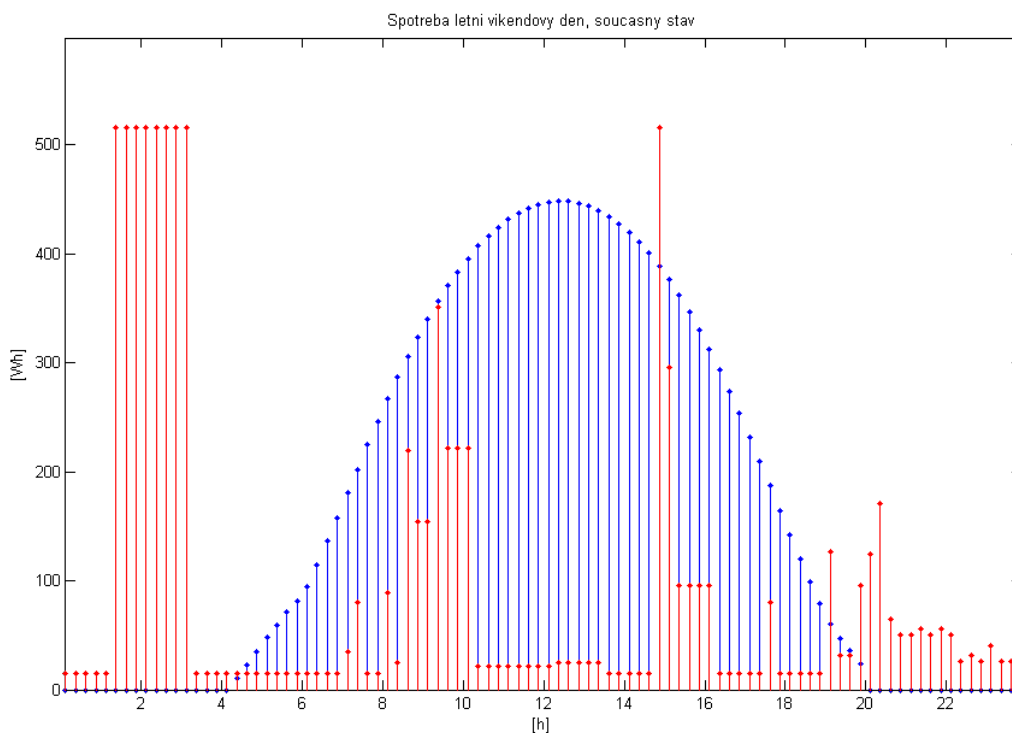
Tab. 8 Porovnání denních spotřeb elektrické energie pro různá období

den	současná denní spotřeba [Wh]	spotřeba el. energie na ohřev vody [Wh]	současná denní spotřeba bez bojleru [Wh]
letní pracovní	6529	3800	2729
letní víkend	9154	4700	4451
zimní pracovní	8004	4700	3304
zimní víkend	11027	6100	4927
letní průměrná	7279	4057	3222
zimní průměrná	8868	5100	3768

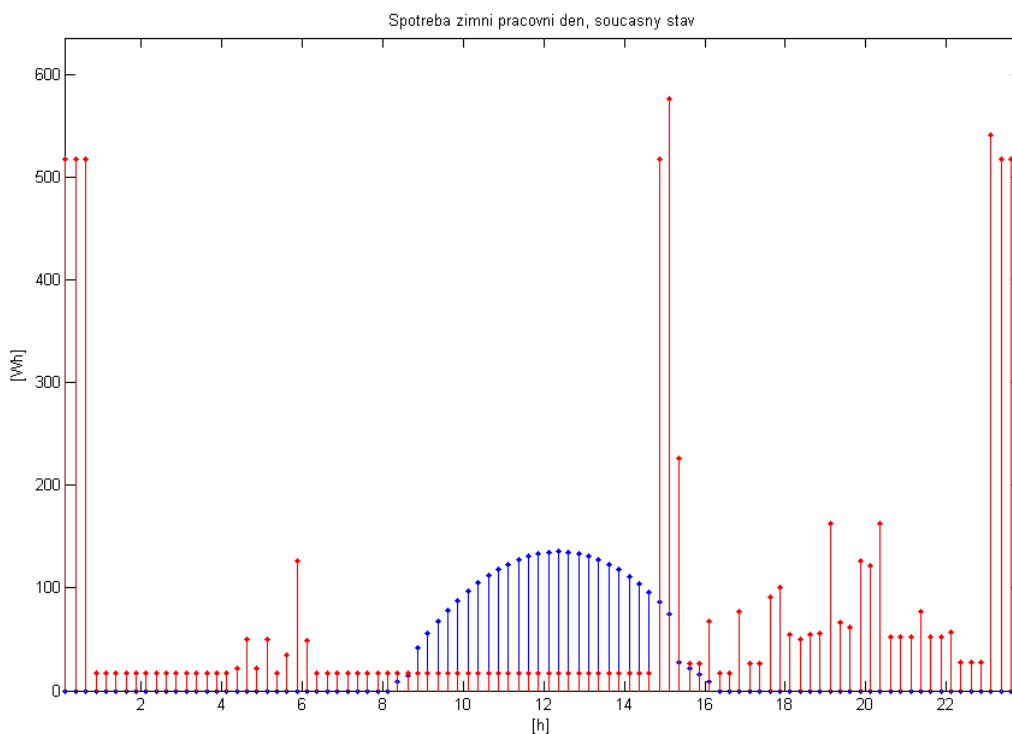
Zjištěné a odhadnuté údaje o spotřebě a jejím časovém průběhu jsem zpracoval v programu Microsoft Excel. Soubor dat je velmi obsáhlý, rozsah této práce neumožňuje jeho prezentaci v tištěné podobě, proto je přiložen v elektronické podobě na CD v příloze. Zobrazeny jsou zde pouze denní diagramy současné spotřeby elektrické energie znázorňující v patnáctiminutových intervalech celkovou spotřebu všech spotřebičů ve Wh, které jsou v daném intervalu v chodu. Průběhy spotřeby jsou na Obr. 12 – 15. Pro porovnání je znázorněn průběh FV výroby ve Wh pro výkon 4 kWp. Průběh FV výroby byl získán z matematického modelu FVE, který je součástí této práce a je popsán v kapitole 6. Na první pohled je jasné, že minimálně v zimním období je množství vyrobené energie menší než množství spotřebované.



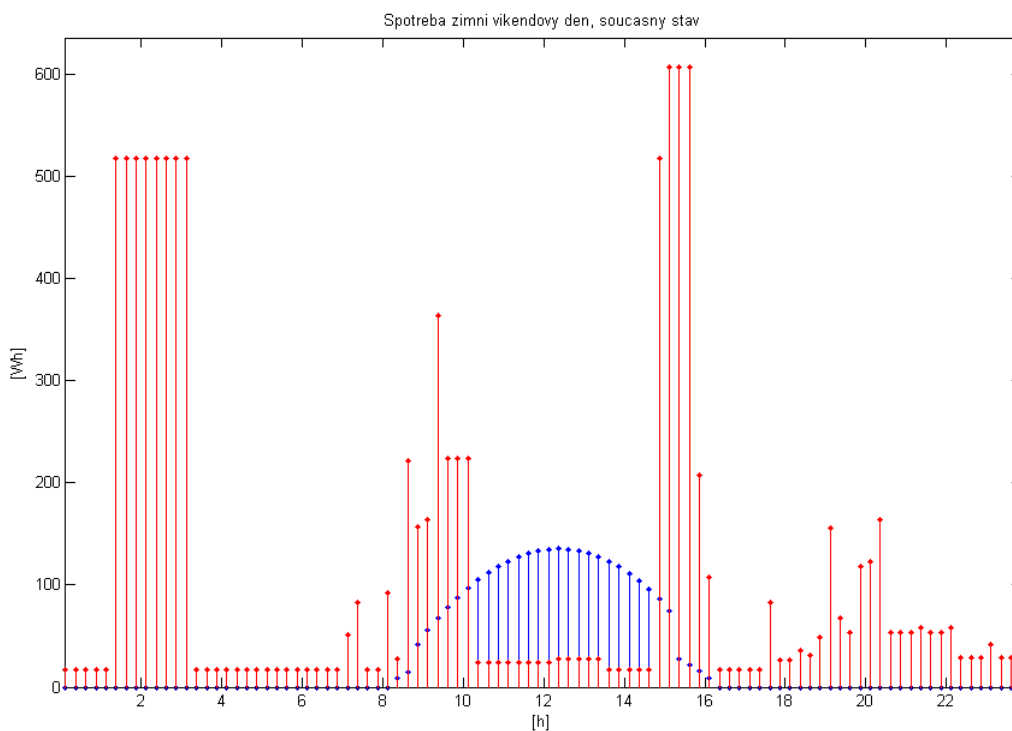
Obr. 12 Porovnání současného průběhu spotřeby elektrické energie v letním pracovním dnu (červená) s denním průběhem FV výroby v červnu pro výkon 4 kWp (modrá)



Obr. 13 Porovnání současného průběhu spotřeby elektrické energie v letním víkendovém dnu (červená) s denním průběhem FV výroby v červnu pro výkon 4 kWp (modrá)



Obr. 14 Porovnání současného průběhu spotřeby elektrické energie v zimním pracovním dnu s denním průběhem FV výroby v prosinci pro výkon 4 kWp (modrá)



Obr. 15 Porovnání současného průběhu spotřeby elektrické energie ve víkendový zimní den (červená) s denním průběhem FV výroby v prosinci pro výkon 4 kWp (modrá)

4.2. Optimalizace spotřeby rodinného domu

Ceny FV technologií, přestože poslední desetiletí klesají, jsou stále poměrně vysoké. FV systém pro pokrytí současné spotřeby rodinného domu by byl velmi drahý. Z tohoto důvodu je třeba spotřebu optimalizovat. Pro dosažení co nejnižší spotřeby elektrické energie je nutné dodržovat několik zásad:

I. Používat spotřebiče s vysokou účinností

Čím vyšší je účinnost elektrického spotřebiče, tím menší jsou ztráty a tím lépe využijeme energii vyrobenou FV panely. Velikost ztrát se projeví především u spotřebičů pracujících denně dlouhou dobu, tedy ledničky a mrazáky. V posuzované domácnosti fungují oba tyto spotřebiče a podílejí se velmi výrazně na celkové spotřebě. Denní spotřeba mrazáku je 744 Wh, lednice 402 Wh. Vhodným krokem k optimalizaci spotřeby je nahrazení těchto dvou samostatných spotřebičů jedním spotřebičem (kombinovanou chladničkou) a to i za cenu nezbytných investičních nákladů. Jako náhradu jsem vybral chladničku BOSCH KGV36VL30 s dostatečným objemem ledničky i mrazáku. Energetická třída této kombinované ledničky je A++. Její denní spotřeba elektrické energie je 620 Wh, což je zhruba polovina součtu spotřeb současně používané ledničky a mrazáku.

Dalším nevhodným spotřebičem je mikrovlnná trouba. Účinnost mikrovlnného ohřevu je menší než 50 %. Navíc použitá mikrovlnná trouba má poměrně vysoký příkon, kterým by zbytečně zatěžovala střídač.

Mezi spotřebiče s malou účinností musíme zařadit také klasické žárovky, ve kterých se většina elektrické energie mění na teplo. Nejvhodnější osvětlení pro autonomní systémy jsou LED svítidla s velmi malou spotřebou. Na seznamu světelných zdrojů jsou tři klasické žárovky, jsou umístěny na poměrně málo frekventovaných místech, jejich spotřeba nehraje velkou roli, a proto jejich výměnu při optimalizaci vynechám.

II. Elektrickou energii nepoužívat k ohřevu vody

Přestože je účinnost elektrického ohřevu vody velmi vysoká, není vhodné elektřinu vyrobenou FV systémem k tomuto účelu primárně používat. Pro ohřátí odhadnutého množství vody na požadovanou teplotu v uvažovaném rodinném domě je potřeba poměrně velké množství energie. Je to více než 50 % z celkové spotřeby. Takto navržený FV systém by

nebyl ekonomický. Proto je vhodné ohřívat vodu jiným zdrojem energie. V současné době se v domě k vaření používá celoplynový sporák. Z tohoto důvodu by se plyn mohl použít i na ohřev vody. Jediné smysluplné využití bojleru v autonomním systému je v letních měsících pro ukládání přebytků FV energie, které se v tomto období dají předpokládat. K tomuto účelu vyrábí firma DZ Dražice fotovoltaický ohřívač vody. Vzhledem k proměnné intenzitě slunečního záření by mohl sloužit spíše jako předehřev studené napájecí vody. Její dohřev na požadovanou teplotu by potom zajišťoval plynový zásobníkový ohřívač. Spojením těchto dvou zdrojů energie by došlo k úspoře nákladů na plyn a využití přebytků FV výroby.

Další spotřebič, sloužící k ohřevu vody, je rychlovarná konvice. Její denní spotřeba sice není nijak závratná, ale vzhledem k nutnosti co největšího snížení spotřeby, je vhodné ji přestat používat. Navíc má, stejně jako mikrovlnná trouba, velký příkon, kterým by zbytečně zatěžovala střídač.

Klasickou pračku je lepší nahradit pračkou s přívody na studenou a teplou vodu, aby voda na praní nemusela být ohřívána elektřinou. Vhodným typem pračky pro tento účel je například CANDY GO 1472 DEHC. Tuto výměnu jsem při optimalizaci nebral v úvahu, použita bude současná pračka.

III. Co největší část spotřeby přesunout do doby, kdy je energie dostatek

Při bydlení v domě s autonomním napájením elektřinou pomocí FV panelů jsme odkázáni pouze na energii, kterou tyto panely dokáží vyrobit, případně na záložní zdroj energie, nejčastěji elektrocentrálu. Levněji však vyrábí elektřinu FV panely. Proto je nutné využívat přednostně tento zdroj. Nejvýhodnější z hlediska ztrát je vyrobenou energii ihned spotřebovat a vyhnout se tím ztrátám vzniklým při akumulaci do baterií. To znamená, co největší část spotřeby přesunout do doby maximální výroby. Největší výroby dosahuje FV systém kolem poledne za jasných a slunečných dnů.

Provést takovouto časovou optimalizaci spotřeby o víkendu, kdy jsme většinu dne doma, není problém. Jednoduše řečeno počkáme, až vysvitne slunce a zapneme požadovaný spotřebič. Pokud bude celý den pod mrakem, můžeme plánovanou činnost spotřebiče odložit a čekat, například do druhého dne, zda-li bude svítit slunce. Nebo činnost provedeme hned a spotřebič budeme napájet z baterií, případně z elektrocentrály. Horší je to v běžném pracovním dni. Většina lidí chodí domů odpoledne nebo pozdě večer. Potom musíme spoléhat na energii, která se naakumulovala během dne do baterií.

Problém časové optimalizace víkendové spotřeby jsem řešil přesunutím nejvíce

energeticky náročných činností (například praní, žehlení, vysávání) do doby maximálního výkonu FV systému, tedy kolem dvanácté hodiny. Spotřebu v pracovním dni jsem z časového hlediska nijak neměnil. Její časový průběh je určen časem příchodu členů domácnosti ze zaměstnání.

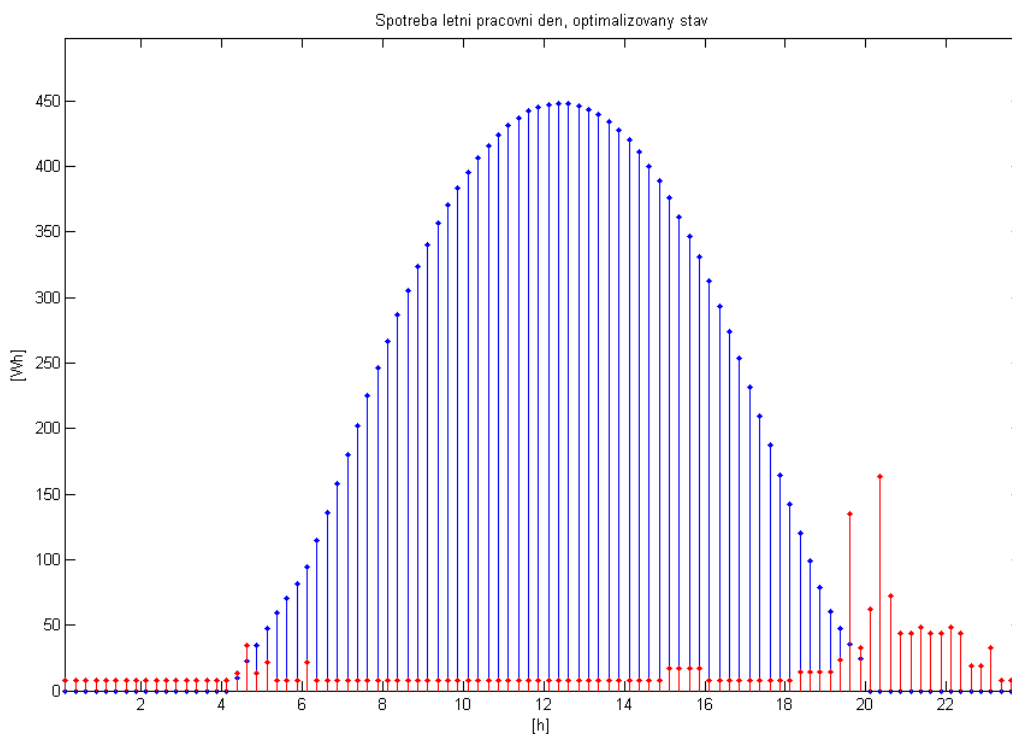
4.2.1. Shrnutí provedené optimalizace spotřeby

vyřazené elektrické spotřebiče: rychlovarná konvice, lednice, mrazák, bojler,
mikrovlnná trouba
nové elektrické spotřebiče: kombinovaná lednice

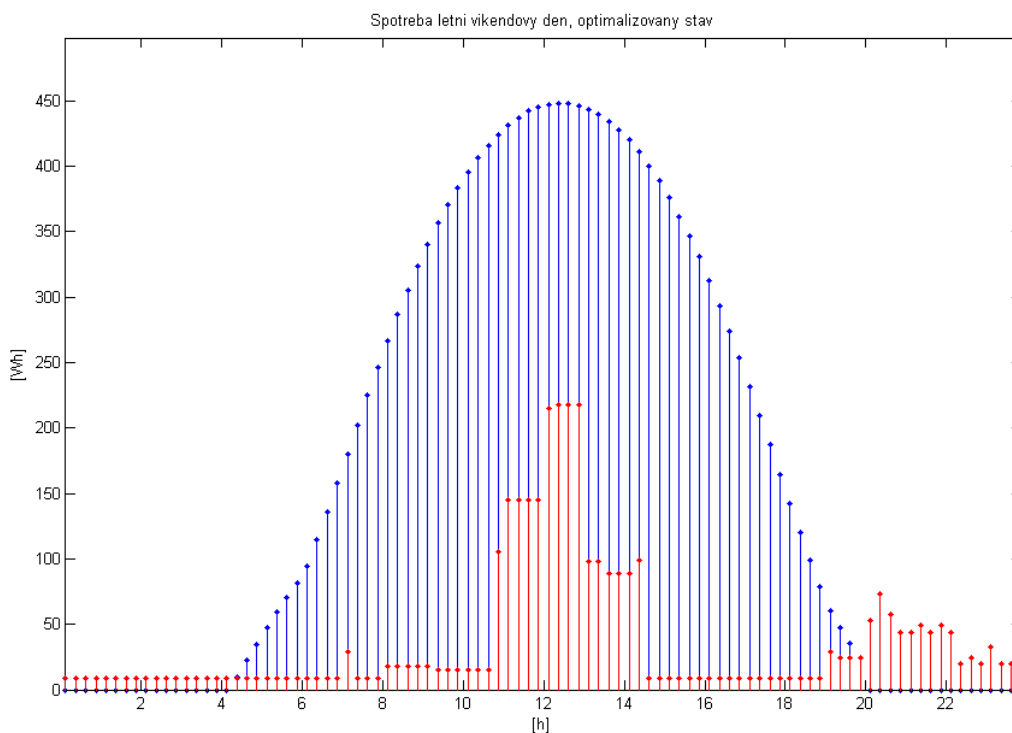
Bojler jsem úplně nevyřadil, ale nebude brán jako spotřebič primárně napájený elektřinou z FV panelů. Bude sloužit pouze pro ukládání přebytků z FV výroby. Do optimalizované spotřeby proto nebude zahrnut.

Vyřazením bojleru, jako hlavního zdroje na ohřev vody, je nutné přidat nový zdroj. Tím by mohl být například plynový ohřev. Protože se tato práce zabývá pouze dodávkou elektrické energie, volbu náhrady za bojler nebudu dále řešit.

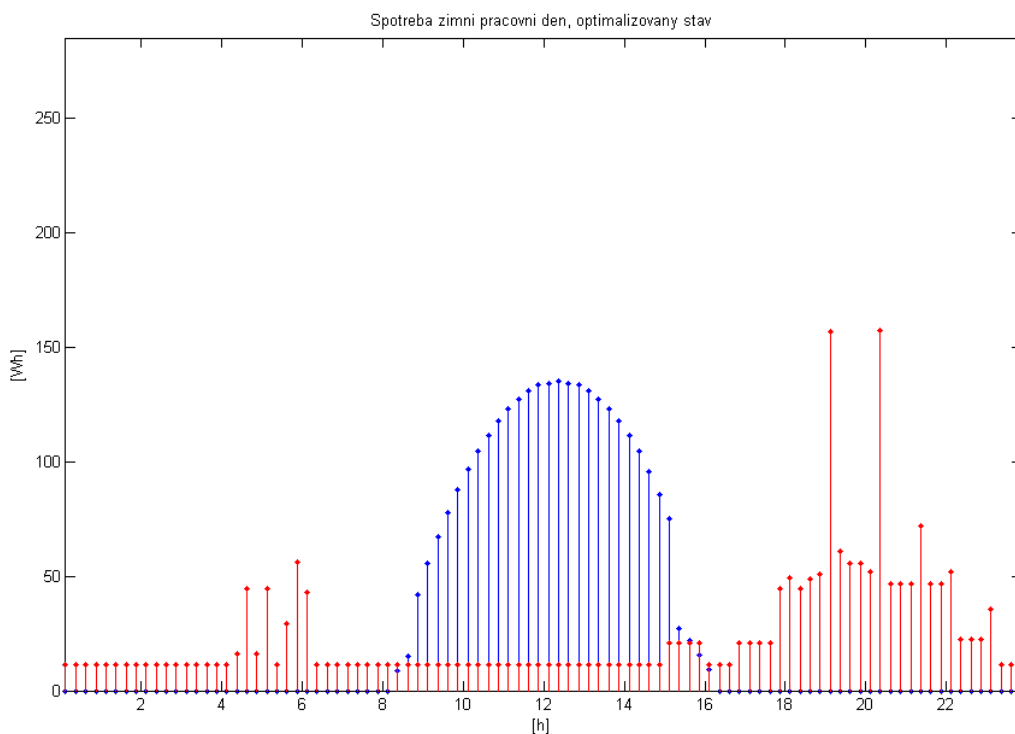
Průběhy optimalizované spotřeby v pracovním a víkendovém dnu v letním a zimním období jsou na Obr. 16 – 19. Opět je zobrazena FV výroba ve Wh pro výkon 4 kWp. Denní průběh FV výroby byl opět získán z matematického modelu FVE popsaného v kapitole 6. Z porovnání průběhů FV výroby a optimalizované spotřeby elektrické energie je dobře vidět význam třetího pravidla optimalizace - co největší část spotřeby přesunout do doby, kdy je energie dostatek.



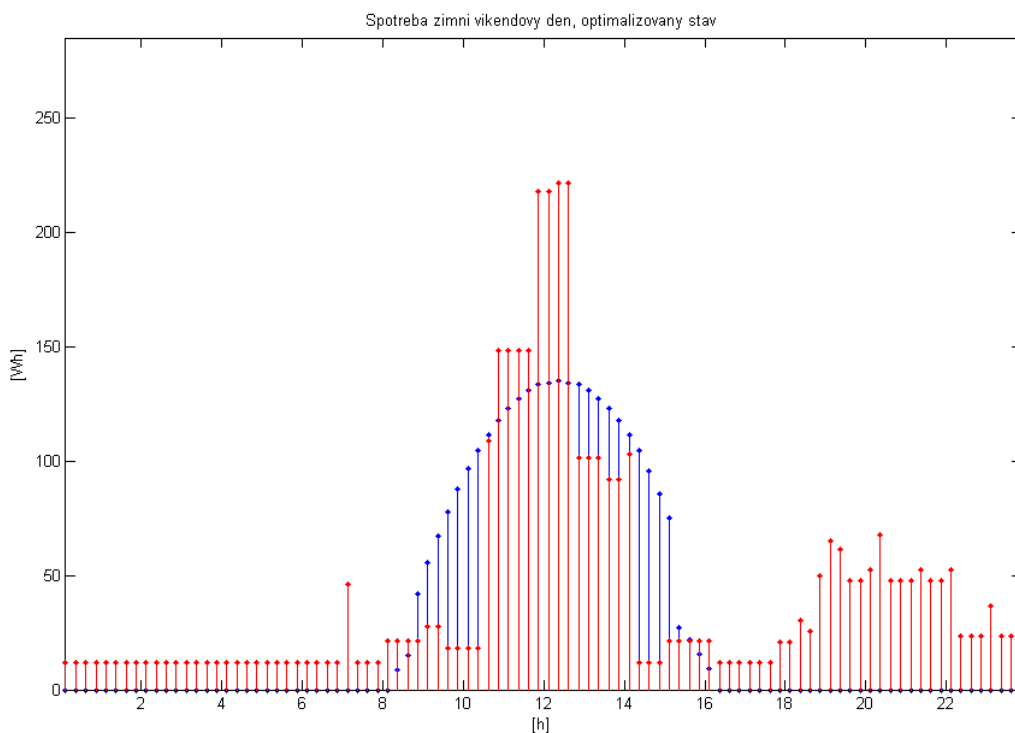
Obr. 16 Porovnání průběhu optimalizované spotřeby elektrické energie v letním pracovním dnu (červená) s denním průběhem FV výroby v červnu pro výkon 4 kWp (modrá)



Obr.17 Porovnání průběhu optimalizované spotřeby elektrické energie o letním víkendovém dnu (červená) s denním průběhem FV výroby v červnu pro 4 kWp (modrá)



Obr. 18 Porovnání průběhu optimalizované spotřeby elektrické energie v zimním pracovním dnu (červená) s denním průběhem FV výroby v prosinci pro výkon 4 kWp (modrá)



Obr. 19 Porovnání průběhu optimalizované spotřeby elektrické energie o víkendovém zimním dnu (červená) s denním průběhem FV výroby v prosinci pro 4 kWp (modrá)

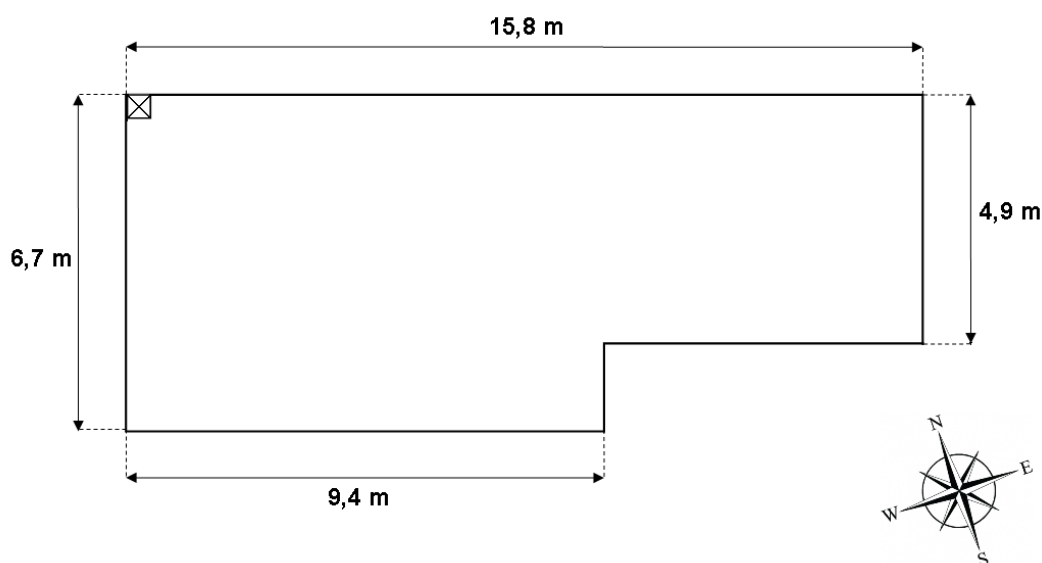
Uvedenými zásahy se podařilo výrazně snížit spotřebu elektřiny. Největší vliv mělo samozřejmě vyřazení bojleru. Ostatní úpravy vedly ke snížení denní spotřeby přibližně o 1 kWh. Porovnání denních spotřeb elektrické energie pro různá období je v Tab. 9.

Provedení optimalizace by mohlo být ještě razantnější. Například LCD televize nebo fén nejsou v domácnosti zcela nezbytné. Ale pro zachování určitého komfortu obyvatel byly spotřebiče zachovány. Dále by se mohlo uvažovat o využití spotřebičů na stejnosměrný proud, tím bychom se vyhnuli ztrátám na střídači a provoz by byl efektivnější. Navíc velká část současně používaných spotřebičů, přestože jsou napájeny střídavým napětím ze sítě, pracuje na stejnosměrný proud. Jsou to například počítače nebo LCD televize. Tyto spotřebiče by stačilo pouze upravit pro přímé napájení stejnosměrným proudem. Nevýhodou stejnosměrného napájení je mimo jiné malý výběr klasických spotřebičů, jako je například pračka. I z tohoto důvodu jsem zvolil napájení všech spotřebičů ze střídače.

Tab. 9 Porovnání denních spotřeb elektrické energie pro různá období

den	současná denní spotřeba [Wh]	spotřeba el. energie na ohřev vody [Wh]	současná denní spotřeba bez bojleru [Wh]	optimalizovaná denní spotřeba [Wh]
letní pracovní	6529	3800	2729	1633
letní víkend	9175	4700	4451	3446
zimní pracovní	8004	4700	3304	2318
zimní víkend	11027	6100	4927	4026
letní průměrná	7279	4057	3222	2151
zimní průměrná	8868	5100	3768	2806

5. Posouzení místa instalace



Obr. 20 Náskres střechy rodinného domu (posuzovaného stanoviště)

Lokalita: Maňovice, část obce Mileč, okres Plzeň-jih

GPS souřadnice: 49°27'12''N, 13°35'50''E

Sklon: 27°

Orientace: +10°

Zastínění: žádné

Plocha střechy: cca 94 m²

Přípojka k elektrické síti: ano

Posuzovaný rodinný dům leží v obci Maňovice v jihozápadních Čechách. Vhodnou plochou pro instalaci FV panelů je zde střecha. Její plocha je přibližně 94 m². Protože je třeba dodržovat určité odstupy od okrajů střechy a komínu, nelze využít celou plochu střechy. Využitelná plocha pro instalaci FV panelů je přibližně 79 m². Na takto velkou plochu bychom mohli podle údajů v Tab. 1 nainstalovat FV monokrystalické panely o celkovém výkonu až 9 kWp. Běžné ostrovní systémy pro napájení rodinných domů mají výkon menší, proto můžeme říci, že při použití monokrystalických panelů, nejme omezeni plochou střechy. Stejně můžeme uvažovat i u polykrystalických panelů. Naopak při použití amorfního křemíku, v závislosti na účinnosti modulu, bychom v krajním případě mohli na střechu nainstalovat pouze 3 kWp. Takový výkon už by nemusel být pro pokrytí spotřeby rodinného domu dostatečný.

Sklon a orientace jsou z hlediska celoročního výnosu téměř optimální. Při odchylce $\pm 45^\circ$ od jihu a sklonu v rozsahu 10° až 50° , činí odchylka od optimálního ozáření maximálně 10 % [1]. Orientace střechy 10° na západ je z hlediska produkce energie výhodnější než na východ, a to z důvodu časté oblačnosti v dopoledních hodinách [12]. Největší spotřeba elektrické energie z celého roku je v zimním období, kdy dopadá na zemský povrch nejméně slunečního záření a výroba elektrické energie je tedy nejmenší. Protože chceme provozovat ostrovní elektrárnu po celý rok, byl by vhodnější větší sklon střechy.

Instalační plocha není zastíněná žádnými stromy nebo domy v okolí. Jediným prvkem, který by mohl způsobit zastínění FV panelů, je televizní anténa umístěná na střeše. V případě rozhodnutí pro realizaci ostrovní elektrárny by nebyl problém přemístit anténu na severní stranu střechy, kde by zastínění nezpůsobovala. Komín umístěný v levém horním rohu střechy (viz. Obr. 20) nevrhá stín na jižní stranu střechy.

5.1. Odhad energetického výnosu

Pro odhad výroby elektrické energie jsem použil předpovědní model PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System [19], který je na internetu zdarma dostupný. Model PVGIS je zdrojem mnoha dat o výrobě elektrické energie a množství dopadnutého slunečního záření. Například pro každý měsíc v roce poskytuje kromě odhadu výroby elektrické energie také data o množství dopadnutého globálního záření za den. Dále pro libovolně zvolený měsíc můžeme získat data o dopadu globálního a difuzního záření a záření při čisté obloze v 15-min intervalech v průběhu dne na plochu o námi zvolené zeměpisné poloze, orientaci a sklonu.

Pro odhad výroby elektrické energie musíme nastavit: sklon, orientaci, typ FV technologie, ztráty, databázi slunečního záření, typ instalace, výkon FV.

V modelu PVGIS je možné nastavit dva typy instalace. První z nich je Free-standing, který odpovídá instalaci FV panelů na stojanu, kdy může vzduch volně proudit okolo modulů a ochlazovat je. Takovým typem instalace je například FVE na budově FEL ZČU v Plzni. Druhým nastavitelným typem instalace je Building integrated. Toto nastavení odpovídá modulům integrovaným do pláště budovy, bez proudění vzduchu za zadní částí. Klasický typ nadstřešní instalace, který já uvažuji, bude někde mezi oběma případy.

Můžeme vybrat mezi třemi FV technologiemi: Crystalline silicon, CIS a CdTe. Vybral jsem Crystalline silicon. Koeficienty použité v modelu PVGIS pro technologii Crystalline silicon byly získány výpočty z dat a měření na různých krystalických modulech. Data

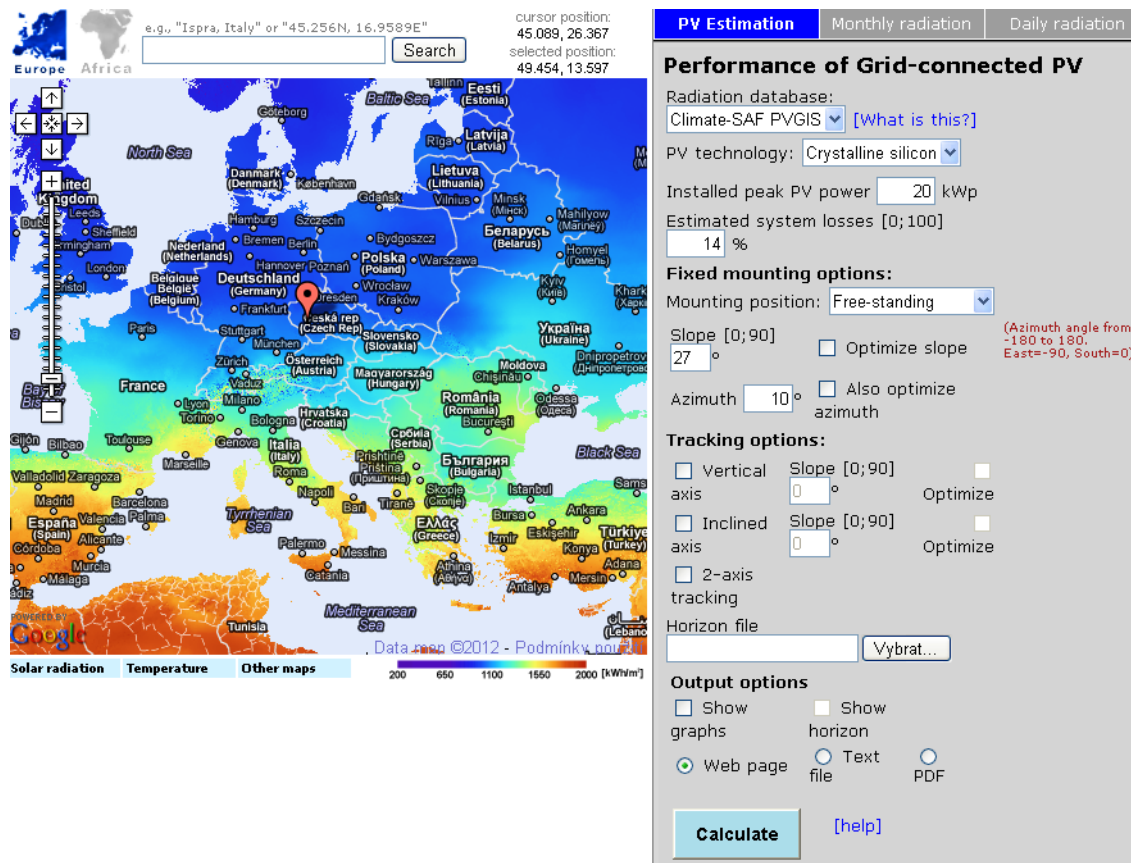
z panelů byla kombinována a vznikl tak průměrný krystalický FV modul. Model PVGIS tedy nedělá rozdíl mezi monokrystalickým a polykrystalickým modulem.

Model PVGIS obsahuje dvě databáze dopadu slunečního záření; Classic PVGIS a novější Climate-SAF PVGIS. Při získávání dat pro svou práci jsem použil databázi Climate-SAF.

Model PVGIS počítá se ztrátami:

- odhadnuté ztráty vlivem teploty s použitím místní teploty okolí: 7,4 %,
- odhadnuté ztráty vlivem odrazu od povrchu FV panelu: 3,1 %,
- další ztráty jsou nastavitelné, volil jsem (vedení 4 %, měnič 10 %): 14,0 %.

V Tab. 10 jsou výstupní data z modelu PVGIS o výrobě elektrické energie pro mnou posuzované stanoviště, tedy sklon 27°, orientace +10°, GPS souřadnice: 49°27'12''N, 13°35'50''E, typ instalace Free-standing, technologie FV Crystalline silicon, odhadnuté systémové ztráty 14 %. Výkon FVE jsem zvolil orientačně 20 kWp.

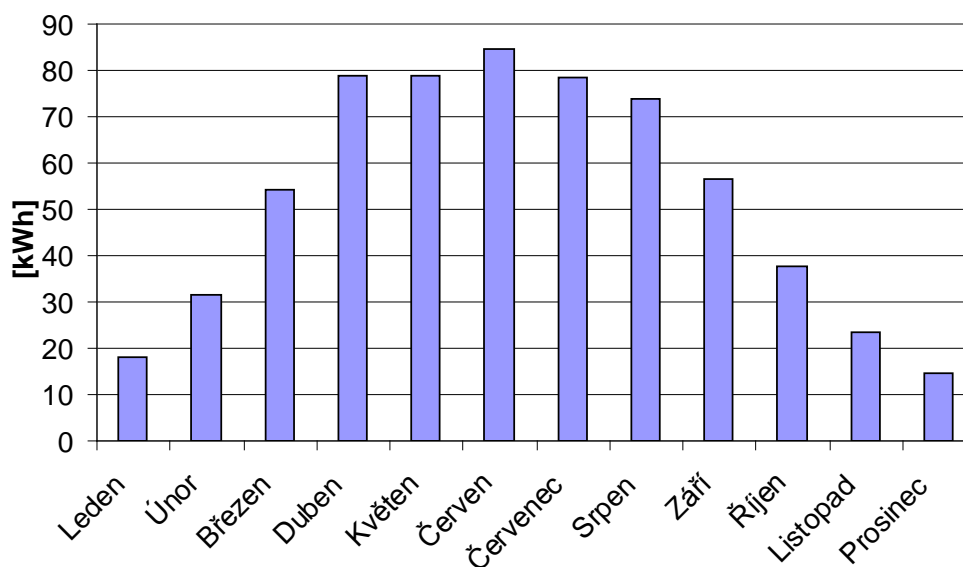


Obr. 21 Model PVGIS

Tab. 10 Data z modelu PVGIS

Měsíc	E_d [kWh]	E_m [kWh]	H_d [kWh/m ²]	H_m [kWh/m ²]
1	18,20	565	1,08	33,60
2	31,50	883	1,90	53,20
3	54,30	1680	3,35	104,00
4	78,70	2360	5,05	151,00
5	78,70	2440	5,21	162,00
6	84,50	2540	5,67	170,00
7	78,60	2440	5,33	165,00
8	73,70	2280	4,95	153,00
9	56,40	1690	3,68	110,00
10	37,70	1170	2,37	73,60
11	23,40	703	1,43	42,80
12	14,50	450	0,87	27,10
Rok	52,60	1600	3,41	104,00

Na Obr. 22 je zobrazena průměrná denní výroba elektrické energie v jednotlivých měsících získaná z modelu PVGIS pro posuzované stanoviště. Z výsledků je vidět, že nejméně elektrické energie bude vyrobeno v prosinci, naopak nejvíce v červnu.



Obr. 22 Denní výroba elektrické energie v jednotlivých měsících

6. Matematický model FVE

Pro získání lepší představy o průběhu výroby elektrické energie během dne, tedy pro odhad denních výrobních diagramů pro posuzované stanoviště, jsem v programu MATLAB vytvořil matematický model fotovoltaické elektrárny.

Jako základ pro svůj model jsem použil model fotovoltaických článků [16]. Vstupní data potřebná pro výpočet výkonu jsem čerpal z modelu PVGIS. Nastavení v modelu PVGIS jsem provedl podle údajů o sklonu, orientaci a umístění posuzovaného stanoviště uvedených v kapitole 5. Použil jsem data o dopadu globálního záření a údaje o teplotě v průběhu dne v patnáctiminutových intervalech pro každý měsíc v roce. Vytvořený model umožňuje získat denní výrobní diagram elektrické energie pro průměrný den ve zvoleném měsíci a pro zvolený výkon.

Aby se z původního modelu fotovoltaických článků stal plnohodnotný model fotovoltaické elektrárny, bylo nutné do modelu přidat funkci sledování bodu maximálního výkonu. Tuto funkci plní u klasických FVE střídač, u autonomních FV systémů nejčastěji regulátor nabíjení s MPPT. Funkci MPPT jsem v modelu vyřešil použitím Newtonovy iterační numerické metody. Pro každou hodnotu intenzity slunečního záření a teploty, tedy pro každých patnáct minut, je počítána nová hodnota napětí pro nový bod maximálního výkonu na V-A charakteristice článku.

V modelu je použito pro výpočet několik materiálových konstant. Jejich hodnoty byly určeny z údajů v technickém listě FV panelu MY195-M, některé hodnoty byly převzaty z původního matematického modelu. Uvedený panel jsem vybral pro vlastní teoretickou realizaci v kapitole 8, z toho důvodu jsou hodnoty materiálových konstant určeny pro tento konkrétní FV panel. Protože se jedná o monokrystalický panel, je idealizující faktor m , přibližující ohyb V-A charakteristiky článku co nejvíce realitě, nastaven na hodnotu 2,5. Technický list FV panelu je v příloze A.

Za tmy se FV generátor chová jako spotřebič, výkon je záporný. Tomuto stavu zabraňuje vestavěná dioda regulátoru nabíjení. Aby nedošlo k ovlivnění výsledku zápornými hodnotami, výkony menší než nula nahrazují nulou.

K určení přesnosti modelu jsem použil data o celkové denní výrobě v jednotlivých měsících z PVGIS. Použitá data jsou uvedena v Tab. 10. Odpovídají FV výkonu 20 kWp, orientaci, sklonu a umístění posuzovaného stanoviště a typu instalace na volném prostranství.

Model PVGIS počítá se ztrátami vlivem teploty, odrazem záření od povrchu FV panelu a dalšími volitelnými ztrátami. Do mého modelu byly započteny ztráty vlivem odrazu záření a volitelné ztráty. Jejich velikost byla zvolena stejná jako u PVGIS. Vliv okolní teploty je zohledněn v samotném matematickém vyjádření vlastností FV článku pomocí rovnic, a proto není nutno ztráty vlivem teploty započítávat zvlášť.

Shoda výstupních hodnot z vytvořeného modelu s hodnotami z PVGIS byla po přímém dosažení materiálových konstant, zjištěných podle údajů z technického listu panelu MY195-M, velmi dobrá. Odchylka byla v řádu jednotek procent, maximálně 3,8 %. Pro dosažení ještě lepší shody s modelem PVGIS, byly koeficienty C_2 a C_3 mírně upraveny. Tím bylo dosaženo odchylky menší než 1 %. Ovšem, jak jsem uvedl výše, data pro srovnání odpovídala instalaci na volném prostranství. Model PVGIS neumožňuje volbu nadstřešního typu instalace, pouze volné prostranství nebo moduly integrované do pláště budovy. Velikost výkonu, respektive vyrobené energie bude vlivem horšího chlazení modulů pro nadstřešní instalaci o něco menší. V následující kapitole 6.1 jsou popsány konkrétní rovnice matematického modelu FVE a v kapitole 6.2 je popsána Newtonova metoda pro výpočet napětí v MPP. Ukázka grafického výstupu z modelu FVE pro výkon 20 kWp je na Obr. 23. Soubor m-file s tímto modelem FVE je přiložen na CD.

6.1. Popis rovnic matematického modelu FVE

Nejdříve je vypočtena referenční termodynamická teplota podle vzorce

$$T^{C0} = 273,15 + t^{C0} \text{ [K]}, \quad (1)$$

kde t^{C0} je teplota při standardních testovacích podmínkách ($t^{C0} = 25 \text{ °C}$). Dále je vypočtena termodynamická teplota T^C , která odpovídá aktuální teplotě FV článku. Teplota FV článku je určena teplotou okolí $t_a \text{ [°C]}$ a oteplením vlivem slunečního záření $G_a \text{ [W/m}^2\text{]}$ podle vztahu

$$T^C = t_a + 273,15 + C_2 \cdot G_a \text{ [K]}, \quad (2)$$

ve kterém velikost konstanty $C_2 \text{ [K}\cdot\text{m}^2\text{/W]}$ vyjadřuje míru chlazení FV článku/panelu. Model PVGIS používá pro panely integrované do budovy koeficient 0,05 $\text{[K}\cdot\text{m}^2\text{/W]}$ a pro panely na volném prostranství 0,035 $\text{[K}\cdot\text{m}^2\text{/W]}$. V modelu FVE na FEL ZČU [16] byla hodnota

0,028 [K·m²/W]. Hodnoty teploty okolí t_a a intenzity slunečního záření G_a jsou v modelu zadány pomocí matic pro všechny měsíce v roce pro posuzované stanoviště. Vlivem zvyšující se teploty FV článku roste i termální napětí U_t [V]. Velikost termálního napětí v závislosti na teplotě FV článku T^C se spočte takto

$$U_t = \frac{k \cdot T^C}{e} \quad [\text{V}], \quad (3)$$

kde k je tzv. Boltzmannova konstanta ($k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K) a e je konstanta pro elementární elektrický náboj ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C). Velikost zkratového proudu I_{SC} a napětí naprázdno U_{OC} je závislá na intenzitě slunečního záření G_a a teplotě článku T^C . Tato závislost je pro zkratový proud vyjádřena rovnicí

$$I_{SC} = C_1 \cdot G_a + K_1 \cdot (T^C - T^{C0}) \quad [\text{A}], \quad (4)$$

kde C_1 [A·m²/W] je materiálová konstanta FV článku. Její velikost byla zjištěna z výkonové charakteristiky v technickém listu FV panelu MY195-M. Vyjadřuje velikost nárůstu zkratového proudu FV panelu vlivem osvitů. Hodnota koeficientu K_1 [A/K] je určena z teplotního koeficientu proudu nakrátko uvedeného v technickém listu FV panelu. Zatímco se zkratový proud vlivem rostoucího záření zvyšuje lineárně, napětí naprázdno U_{OC} roste pouze logaritmicky. S rostoucí teplotou článku napětí naprázdno lineárně klesá. Tato vlastnost FV článku je popsána vztahem

$$U_{OC} = U_{OC0} + C_3 \cdot (T^C - T^{C0}) - \frac{1}{K_4} \cdot e^{\frac{G_a - G_{a0}}{K_3}} \quad [\text{V}], \quad (5)$$

kde koeficient C_3 [V/K] byl stanoven podle teplotního koeficientu napětí naprázdno z technického listu a při závěrečném ladění modelu mírně upraven. Konstanta U_{OC0} [V] je napětí FV článku naprázdno. Hodnota G_{a0} [W/m²] v exponentu rovnice je osvětlenost při standardních testovacích podmínkách (1000 W/m²). Zbývající proměnné K_3 [log (W/m²·V)] a K_4 [W/m²·V] jsou materiálové konstanty. Jejich velikost se mi nepodařilo určit, proto byly tyto hodnoty převzaty z původního modelu [16]. Rozdíl mezi hodnotami pro tento panel a převzatými hodnotami by neměl být příliš velký. V obou případech se jedná o monokrystalický článek/panel.

Proud v MPP FV článku je počítán podle rovnice

$$I = I_{SC} \cdot \left(1 - e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} \right) \quad [A], \quad (6)$$

kde I_{SC} [A] je proud nakrátko, U_{0C} [V] je napětí naprázdno, U_t [V] je termální napětí a U [V] napětí v bodě maximálního výkonu. Dále je zde idealizující faktor m [-], který přibližuje ohyb V-A charakteristiky FV článku co nejvíce realitě. Napětí v bodě maximálního výkonu je vypočteno pomocí Newtonovy metody pro každou teplotu a intenzitu osvětlení zvlášť. Pro maximální výkon FVE platí

$$P = p \cdot U \cdot I \cdot (1 - (10 + 4 + 3,1)/100) \quad [W], \quad (7)$$

kde p [-] je celkový počet článků odpovídající zvolenému výkonu, I [A] je proud vypočtený rovnicí (6) a U [V] je napětí v MPP. Nakonec jsou započteny ztráty na střídači 10 %, na vedení 4 % a odrazem záření od povrchu FV panelu 3,1 %.

Konstanty: $C_1 = 0,00588$ [A·m²/W], $C_2 = 0,0265$ [K·m²/W], $C_3 = -0,0028$ [V/K],
 $K_1 = 0,00218$ [A/K], $K_3 = 300$ [log (W/m²·V)], $K_4 = 140$ [W/m²·V].

6.2. Newtonova metoda – nalezení hodnoty napětí v MPP

Výkonová charakteristika FV článku je dána vztahem

$$P = U \cdot I \quad (8)$$

kde U [V] je okamžité napětí na svorkách FV článku a I [A] je okamžitá hodnota proudu. Dosazením rovnice (6) do rovnice (8) dostáváme rovnici

$$P = U \cdot I_{SC} \cdot \left(1 - e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} \right). \quad (9)$$

Bod maximálního výkonu na výkonové charakteristice FV článku získáme tak, že hledáme řešení rovnice

$$I_{SC} \cdot \left[1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} \right) + U \cdot \left(0 - e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} \cdot \frac{1}{m \cdot U_t} \right) \right] = 0, \quad (10)$$

kteřou získáme derivací výkonové charakteristiky (9) podle napětí na FV článku. Tato derivace je v bodě maximálního výkonu rovna nule. Úpravami rovnice (10) dostaneme vztah

$$m \cdot U_t \cdot e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} + U \cdot e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} - m \cdot U_t = 0. \quad (11)$$

Na první pohled je vidět, že rovnice (11) není lineární. Proto jsem na její řešení použil Newtonovu metodu. Je to iterační numerická metoda, která slouží k nalezení řešení rovnice $f(x)=0$. Předpokladem je, že známe derivaci této funkce $f'(x)$ a počáteční hodnotu x_0 , v jejíž blízkosti hledáme řešení. Iterační rovnice Newtonovy metody je vyjádřena předpisem

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}, \quad (12)$$

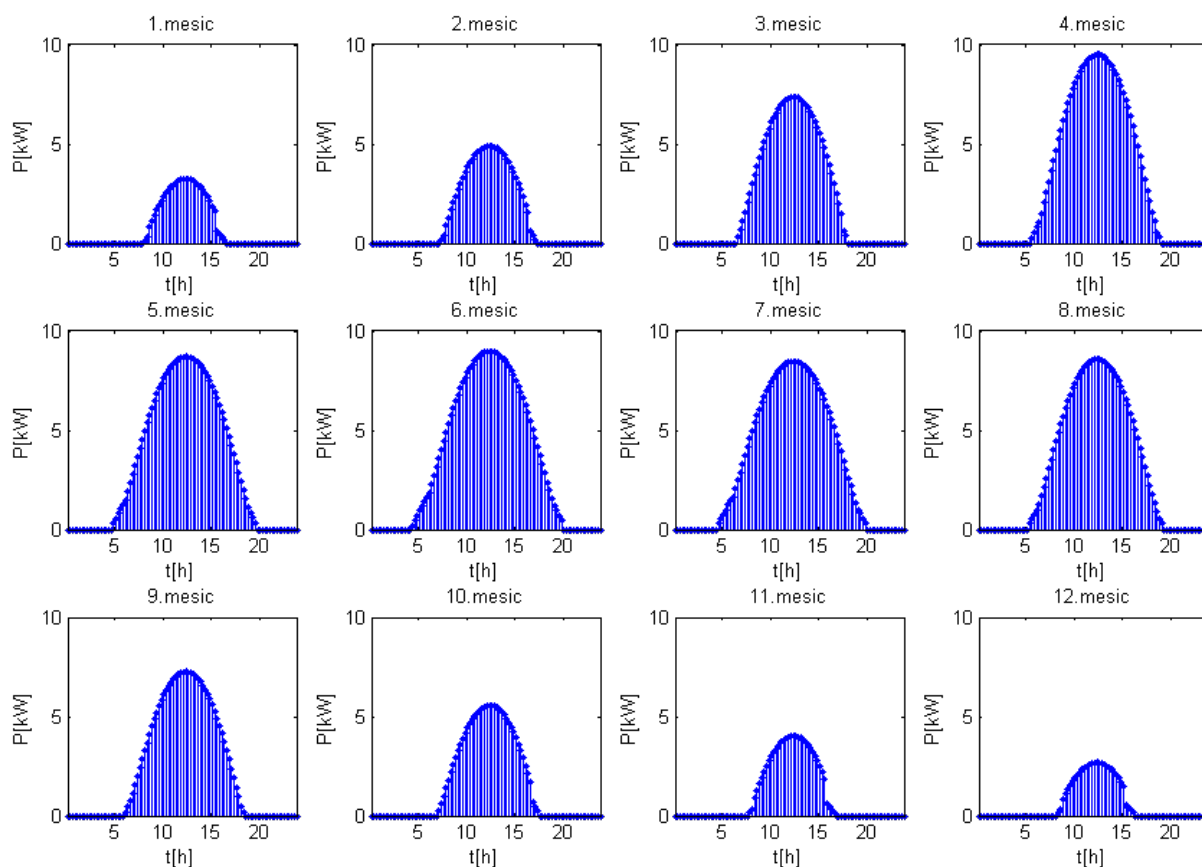
kde $f(x_k)$ je řešená rovnice (11) a $f'(x_k)$ je její derivace podle napětí U (směrnice tečny), která vypadá takto:

$$e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} + e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} + U \cdot e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} \cdot \frac{1}{m \cdot U_t} = 0. \quad (13)$$

Dosazením rovnic (11) a (13) do předpisu (12) získáme iterační předpis pro nalezení napětí v MPP

$$U = U_0 - \left(\frac{(m \cdot U_t + U) \cdot e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}} - m \cdot U_t}{\left(2 + U \cdot \frac{1}{m \cdot U_t} \right) \cdot e^{-\frac{U-U_{0C}}{m \cdot U_t}}} \right), \quad (15)$$

kde U_0 je počáteční hodnota, za kterou bylo zvoleno napětí článku naprázdno U_{0C} .



Obr. 23 Ukázka grafického výstupu z vytvořeného matematického modelu FVE pro výkon 20 kWp

7. Určení vhodného výkonu ostrovní FVE

Výkon FVE se volí podle velikosti denní spotřeby elektrické energie v domácnosti. FVE by měla mít takový výkon, aby byla schopná za den vyrobit dostatek elektrické energie na pokrytí denní spotřeby. Průměrné množství vyrobené energie za den se v průběhu roku mění. Nejvíce energie je v létě, nejméně v zimě. Výkon se dimenzuje obvykle podle nejslabšího zimního měsíce, tím je prosinec. Navrhnout FV systém tak, aby dokázal v prosinci pokrýt denní spotřebu bez dalšího zdroje, je neekonomické. Vedlo by to k velkému počtu panelů, jejichž výkon bychom nedokázali v létě využít. Proto při návrhu uvažují využití elektrocentrály ke krytí části spotřeby v zimním období.

V Tab. 11 je znázorněn postup, jakým byl odhadnut potřebný FV výkon. Vycházel jsem z průměrné optimalizované denní spotřeby v zimním období a z množství energie, které

vyrobí 1 Wp FV panelu za den v prosinci. Údaj o výrobě byl získán z matematického modelu FVE při nastavení volitelných ztrát na nulu. To znamená, že model počítal pouze se ztrátami odrazem od povrchu FV panelu. Další ztráty jsem započítal do těchto výpočtů.

Je zde počítáno s využitím elektrocentrály na pokrytí části spotřeby vyjádřené jako procento z celkové denní spotřeby. Elektrocentrála nabíjí baterie přes nabíječku, z baterií jsou potom přes střídač napájeny spotřebiče. Aby elektrocentrála dodala požadované množství energie, bude muset po započtení všech ztrát vyrobit podstatně větší množství energie. Na úseku od elektrocentrály ke spotřebiči dochází ke ztrátám na střídači, při akumulaci a při nabíjení. Ztráty na vedení zanedbávám. Střídač by měl být kvůli minimalizaci ztrát umístěn co nejbližší bateriím. Stejně tak nabíječka.

Při uvažované spotřebě elektrocentrály na výrobu 1 kWh elektrické energie při jejím zatížení na 75 % maximálního výkonu a ceně jednoho litru pohonných hmot dostaneme náklady za den provozu. Vynásobením počtem dní v prosinci potom měsíční náklady na provoz elektrocentrály.

Zbývající část energie na provoz musí vyrobit FV panely. Díky ztrátám na jednotlivých částech FV systému musí vyrobit o něco více energie. Při výpočtu jsem uvažoval, že 25 % celkové spotřeby bude čerpáno přímo z MPPT regulátoru, nebude tedy ukládáno do baterií. Tím jakoby ztráty na baterii klesly na 15 %. Z energie, kterou musí panely vyrobit po započtení ztrát, a z denní výroby pro 1 Wp dostaneme potřebný výkon FV panelů.

Samozřejmě nás zajímají náklady na provoz elektrocentrály i v dalších měsících, respektive za celý rok. Odhadnutý výkon FV panelů, zejména při větším procentuálním krytí spotřeby, nebude pravděpodobně schopen dodat dostatek energie i v dalších zimních měsících. Pro odhadnuté výkony jsou to měsíce listopad a leden. Měsíční náklady na provoz elektrocentrály v lednu a v listopadu pro jednotlivé odhadnuté výkony jsem vypočetl obráceným postupem než je v Tab. 11. Z odhadnutého FV výkonu, množství vyrobené elektrické energie pro 1 Wp FV panelu za den a se započtením ztrát jsem dostal elektrickou energii, kterou vyrobí FV systém za den. Údaje o denní výrobě pro 1 Wp byly opět získány z matematického modelu FVE při nastavení volitelných ztrát na nulu. Zbytek denní spotřeby bude muset pokrýt elektrocentrála. Z toho dostaneme denní náklady, vynásobením počtem dnů v měsíci získáme měsíční náklady. Sečtením nákladů pro všechny měsíce, ve kterých je elektrocentrála používána pro daný výkon FV panelů, dostaneme roční náklady na pohonné hmoty.

Tab. 11 Postup odhadu potřebného FV výkonu

průměrná denní spotřeba [Wh]	2806	2806	2806	2806	2806	2806	2806	2806
1 Wp vyrobí za den Wh	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
kolik % spotřeby dodá centrála	40	35	30	25	20	15	10	0
kolik Wh dodá centrála za den	1122	982	842	702	561	421	281	0
plus ztráta na střídači 10 %	1247	1091	935	779	624	468	312	0
plus ztráta na baterii 20 %	1559	1364	1169	974	779	585	390	0
plus ztráta nabíječky 5 %	1641	1436	1231	1026	820	615	410	0
centrála musí skutečně vyrobit	1641	1436	1231	1026	820	615	410	0
pohonné hmoty/den (0,45 l / kWh)	0,74	0,65	0,55	0,46	0,37	0,28	0,18	0,00
cena pohonné hmoty [Kč]	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0
Kč / den	27,3	23,9	20,5	17,1	13,7	10,2	6,8	0,0
Kč / měsíc prosinec	847	741	635	529	423	318	212	0
spotřeba co musí pokrýt FV	1684	1824	1964	2105	2245	2385	2525	2806
plus ztráta na střídači 10 %	1871	2027	2182	2338	2494	2650	2806	3118
plus ztráta na baterii 20 % (15 %)	2201	2384	2568	2751	2934	3118	3301	3668
plus ztráta na vedení 4 %	2292	2484	2675	2866	3057	3248	3439	3821
plus ztráta na regulátoru 5 %	2413	2614	2815	3016	3218	3419	3620	4022
co musí vyrobit panely	2413	2614	2815	3016	3218	3419	3620	4022
1 Wp vyrobí za den Wh	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
potřebný výkon FV panelu Wp	2873	3112	3352	3591	3830	4070	4309	4788
Kč/rok pohonné hmoty	1405	1128	889	650	423	318	212	0

Hlavní roli při rozhodování, jaký výkon panelů zvolíme, hraje pořizovací cena. Abych získal přibližnou pořizovací cenu FV systémů s odhadovanými výkony, aproximoval jsem ceny FV ostrovních elektráren v závislosti na jejich výkonu. Informace o cenách ostrovních FV elektráren jsem získal z internetových obchodů [20][21]. Dosazením jednotlivých odhadnutých výkonů do regresní funkce jsem získal přibližnou pořizovací cenu ostrovních FV elektráren s danými výkony.

Tab. 12 Pořizovací ceny FV systémů různých výkonů

kolik % dodá centrála	40	35	30	25	20	15	10	0
výkon FV [Wp]	2873	3112	3352	3591	3830	4070	4309	4788
pořizovací cena [Kč]	293 052	316 509	339 966	363 423	386 880	410 337	433 794	480 708
centrála [Kč]	70 000	70 000	70 000	70 000	70 000	70 000	70 000	0
celková cena	363 052	386 509	409 966	433 423	456 880	480 337	503 794	480 708

Do celkové ceny je nutno připočítat náklady na pořízení elektrocentrály a dalších věcí potřebných pro její provoz. Použití elektrocentrály je ve FV ostrovním provozu nutné v každém případě. Slouží jako záložní zdroj při poruše FV systému. Můžeme jí napájet velké

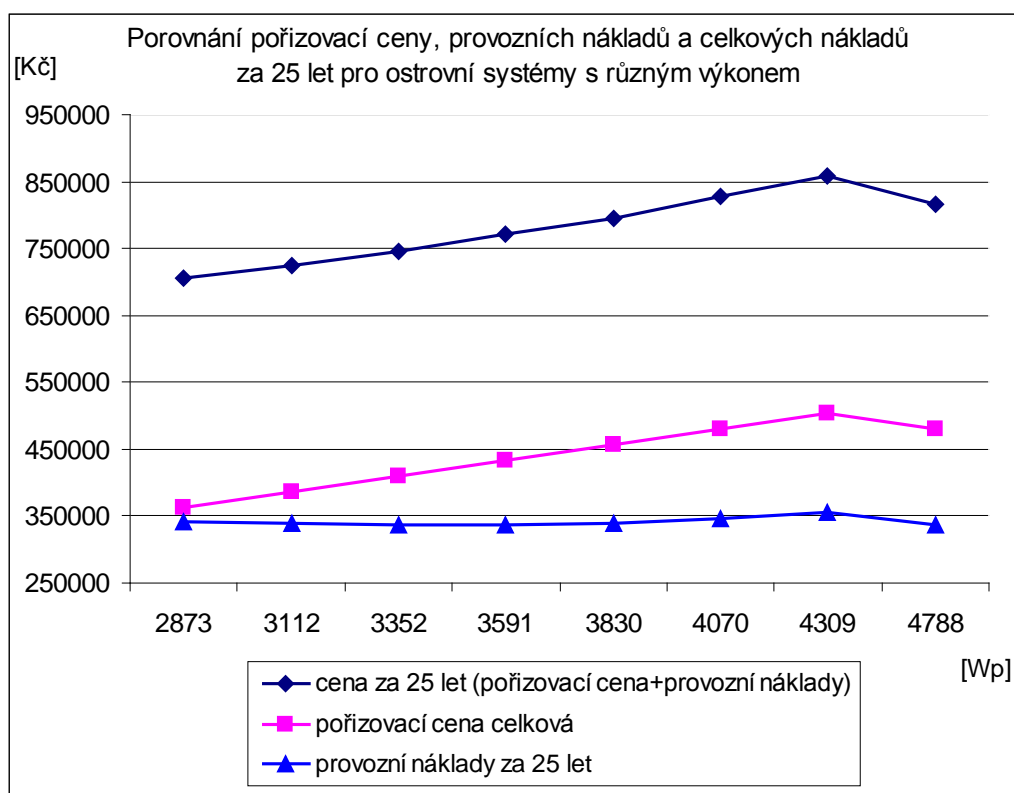
spotřebiče, na které je střídač příliš slabý. Pokud dlouhou dobu nesvítí slunce, dobije baterie, a tím zamezí zkrácení jejich životnosti hlubokým vybitím. Ideální je použití elektrocentrály s automatickým startem, aby mohla být automaticky řízena. Takové elektrocentrály se běžně prodávají. Pokud máme centrálu s elektrickým startem, je možno ji pro tento účel upravit. Centrály se většinou vyrábějí na střídavý proud 230 V, proto je potřeba dokoupit nabíječku baterií. Další náklady jsou spojené s vybudováním odhlučněné místnosti, do které je vhodné elektrocentrálu umístit, aby nerušila okolí svým provozem. Všechny náklady týkající se elektrocentrály jsem odhadnul na 70 000 Kč.

Při volbě výkonu FV ostrovní elektrárny je dobré se zamyslet nad budoucími provozními náklady. Zejména při větším podílu elektrocentrály na výrobě elektřiny jsou náklady na pohonné hmoty významné. Navíc neustálé zdražování fosilních paliv a možnost vyčerpání jejich světových zásob vede k zamyšlení do jaké míry využívat elektrocentrálu. V Tab. 13 je přehled odhadnutých nákladů na provoz za 25 let. Tato doba odpovídá předpokládané minimální životnosti FV panelů, takže ji lze považovat za životnost celé FV elektrárny. Meziroční zdražování pohonných hmot lze těžko předpovědět, počítal jsem se zdražováním o 6 % ročně. Údržba centrály se také projeví ve finanční analýze FV projektu. Čím delší dobu bude centrála v provozu, tím více bude opotřebovávána a bude potřebovat větší údržbu. Předpokládám, že životnost centrály bude delší než 25 let. Proto nebude třeba její výměna. Dále jsem započítal náklady na opravu nebo výměnu střídače, regulátoru nabíjení, výměnu baterií. Tyto náklady jsem odhadl na 70 % z pořizovací ceny. Velikost těchto nákladů se těžko určuje, chybí zkušenosti z provozu FV ostrovních elektráren. V závislosti na výkonu FV panelů zde platí, že pro vyšší výkony je potřeba výkonnější regulátory, větší kapacita baterií, atd. Proto i náklady na jejich výměnu jsou vyšší. Záleží také na kvalitě použitých komponentů, čím vyšší kvalita, tím delší životnost. Vzhledem k životnosti panelů, je lepší volit kvalitnější komponenty. Vyhodnocení provozních nákladů je v Tab. 13.

Tab. 13 Náklady v Kč za 25 let provozu

kolik % dodá centrála	40	35	30	25	20	15	10	0
výkon FV [Wp]	2873	3112	3352	3591	3830	4070	4309	4788
pořizovací cena	363 052	386 509	409 966	433 423	456 880	480 337	503 794	480 708
pohonné hmoty	77 101	61 903	48 792	35 681	23 234	17 426	11 617	0
údržba centrály	60 000	55 000	50 000	47 000	45 000	42 000	40 000	0
výměny komponent	205 137	221 556	237 976	254 396	270 816	287 236	303 656	336 496
celk. provozní náklady	342 238	338 459	336 768	337 078	339 050	346 662	355 273	336 496
celková cena	705 290	724 968	746 735	770 501	795 931	826 999	859 068	817 204

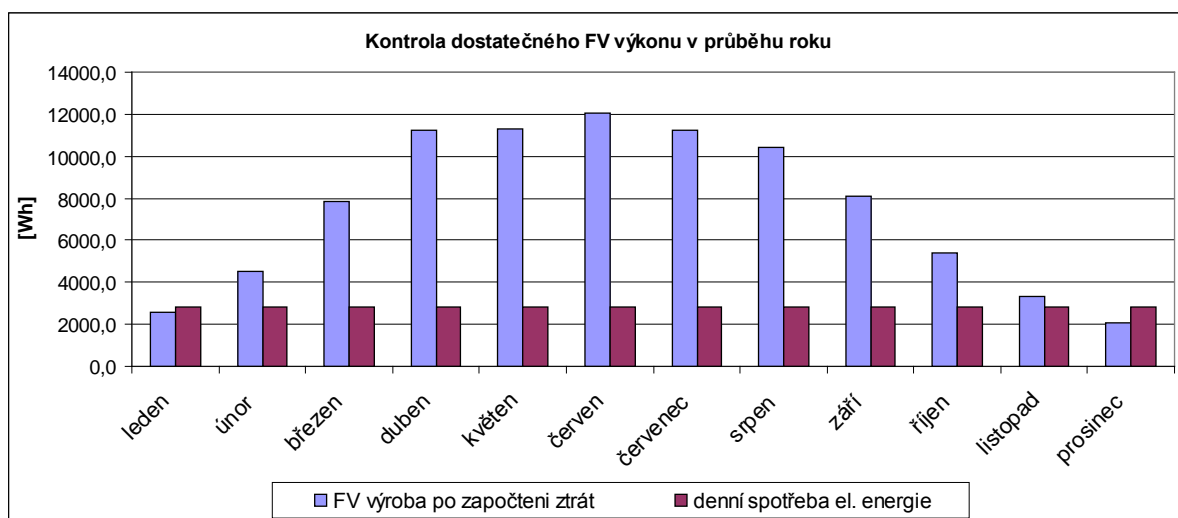
Na Obr. 24 je znázorněno porovnání pořizovací ceny se započtením nákladů na elektrocentrálu a provozních nákladů za 25 let provozu pro ostrovní FV systémy s různým výkonem. Zobrazen je také součet těchto dvou nákladů. Z grafického průběhu provozních nákladů za 25 let provozu je vidět vliv zvýšených nákladů na pohonné hmoty u FV elektráren s malým výkonem. Pro FV systém se čtyřicetiprocentním krytím spotřeby elektrocentrálou se provozní náklady vyšplhaly až na cenu téměř stejnou jako pořizovací cena. Rozdíl mezi elektrárnami s malými a velkými výkony bychom mohli očekávat větší. Avšak z důvodu použití výkonnějších komponent u vyšších výkonů, a tedy větších nákladů na jejich výměnu, je rozdíl mezi provozními náklady minimální. Z toho důvodu vykazuje součtová křivka obou typů nákladů stejnou závislost jako křivka závislosti pořizovacích cen.



Obr. 24 Porovnání nákladů za 25 let provozu

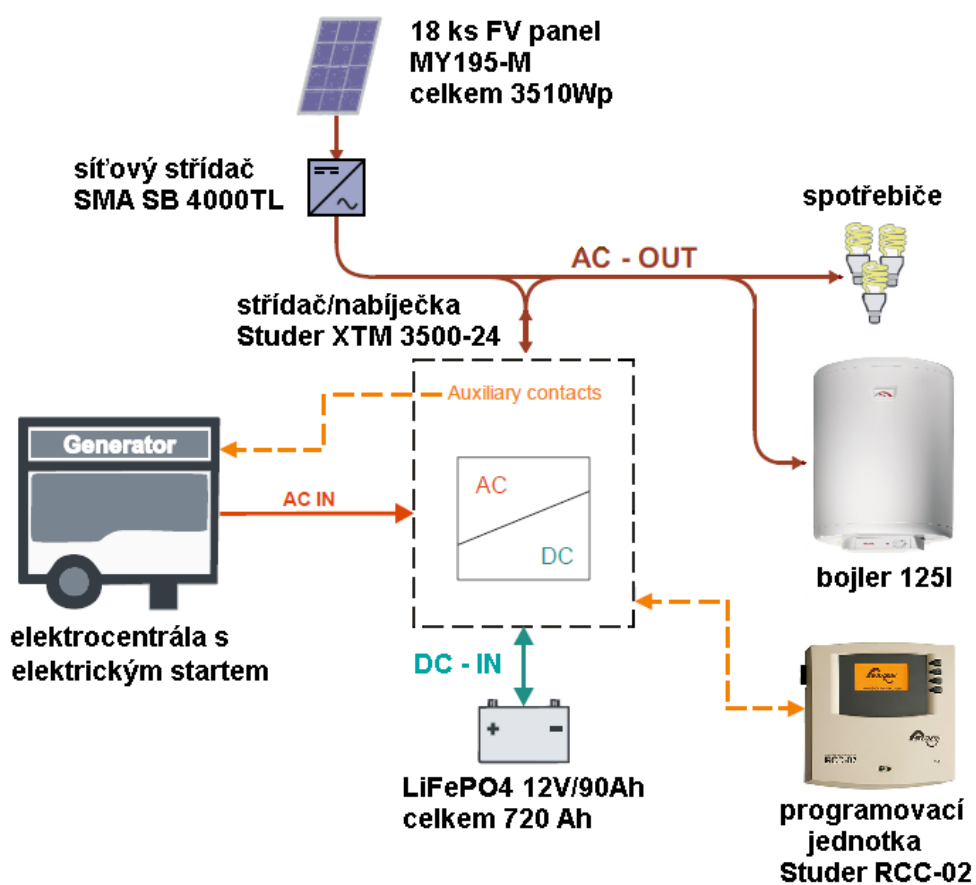
Na základě výše uvedených propočtů jsem zvolil výkon FV panelů 3500 Wp. Tento výkon by měl zaručovat poměrně malou závislost na elektrocentrále, v prosinci 27 % z celkové spotřeby, v lednu potom zhruba 8 %. Jak ukazuje graf na Obr. 25, bude zvolený výkon v ostatních měsících postačovat k výrobě potřebného množství elektrické energie.

Výše uvedené výpočty, včetně grafu na Obr. 25, jsem provedl v programu MS Excel. Datový soubor s těmito tabulkovými výpočty je přiložen v elektronické podobě na CD.



Obr. 25 Kontrola dostatečného výkonu v průběhu roku

8. Návrh ostrovního systému



Obr. 26 Funkční schéma navrženého ostrovního systému

Použité komponenty:

- **FV panely: monokrystalický FV panel MY 195-M, 195 Wp, 1580 mm x 808 mm**

Celkový výkon: $18 \times 195 \text{ Wp} = 3510 \text{ Wp}$.

- **Střídač/nabíječka Studer Innotec pro ostrovní systémy XTM 3500-24**

- **Programovací jednotka Studer Innotec RCC-02**

- **Síťový střídač SMA Sunny Boy 4000 TL-21**

Zvolený síťový střídač je mírně předimenzován, s ohledem na možnost budoucího zvýšení FV výkonu (viz. kapitola 8.1).

- **Baterie: LiFePO₄ / LiFeYPO₄ 12V / 90 Ah**

$8 \times 90 \text{ Ah} = 720 \text{ Ah}$ (17 280 Wh pro 24 V)

Kapacita baterií byla dimenzována podle doporučení manuálu ke Studer XTM 3500-24 jako pětinasobek jeho jmenovitého výkonu dělený napětím baterií. To znamená $5 \times 3500 / 24 = 729 \text{ Ah}$. Navržená kapacita baterií odpovídá přibližně šesti autonomním dnům, při denní spotřebě 2800 Wh (průměrná optimalizovaná zimní spotřeba posuzovaného rodinného domu). Zapojeny by byly ve čtyřech paralelních větvích po dvou bateriích v každé z nich.

- **Elektrocentrála: ITC POWER GG3600SEi**

Jednofázová elektrocentrála s elektrickým startem a možností dálkového startu. Provozní výkon 3,2 kW, maximální výkon 3,4 kW

- **Bojler: Dražice OKCE125**

Zachován z původního vybavení domácnosti.

Centrem navrženého ostrovního systému je střídač/nabíječka Studer Innotec XTM 3500-24, která řídí činnost celého systému. Jeho nastavení se provádí programovací jednotkou Studer Innotec RCC-02. Možnosti nastavení jsou velmi široké. Základní princip fungování navrženého systému (především funkce Studer Innotec XTM) jsem popsal modelem vytvořeným v MATLABU (viz. kapitola 10).

8.1. Volba zapojení FV panelů do řetězců a kompatibilita zapojení se síťovým střídačem SMA SB 4000TL-21

Vlastnosti panelu MY 195-M:

$$P_n = 195 \text{ W}$$

$$U_{MPP} = 36,4 \text{ V}$$

$$I_{MPP} = 5,36 \text{ A}$$

$$U_{OC} = 45,1 \text{ V}$$

$$I_{SC} = 5,88 \text{ A}$$

Teplotní koeficienty:

$$T_K(P_n) = -0,46 \text{ \%}/^\circ\text{C}$$

$$T_K(U_{OC}) = -0,33 \text{ \%}/^\circ\text{C}$$

$$T_K(I_{SC}) = 0,037 \text{ \%}/^\circ\text{C}$$

Výpočet napětí při -15°C (STC -40°C) a 70°C (STC $+45^\circ\text{C}$)

$$U_{OC}(-15^\circ\text{C}) = 45,1 - (-40 \times (45,1 / 100 \times 0,33)) = 51,05 \text{ V}$$

$$U_{MPP}(-15^\circ\text{C}) = 36,4 - (-40 \times (36,4 / 100 \times 0,33)) = 41,2 \text{ V}$$

$$U_{MPP}(70^\circ\text{C}) = 36,4 - (45 \times (36,4 / 100 \times 0,33)) = 30,99 \text{ V}$$

Údaje síťového měniče SMA SB 4000TL-21:

$$P_{DCMAX} = 4200 \text{ W}$$

$$U_{DCMAX} = 550 \text{ V}$$

$$I_{DCMAX} = 2 \times 15 \text{ A}$$

$$U_{MPP \text{ FV DOLE}} = 125 \text{ V}$$

$$U_{MPP \text{ FV NAHORE}} = 440 \text{ V}$$

Doporučený rozsah při jmenovitém výkonu: $175 \text{ V} \div 440 \text{ V}$

Výpočet počtu panelů v jedné řadě:

$$n(\text{moduly}_{MAX}) = U_{MPP \text{ FV NAHORE}} / U_{MPP}(-15^\circ\text{C}) = 440 / 41,2 = 10,68$$

$$n(\text{moduly}_{MIN}) = U_{MPP \text{ FV DOLE}} / U_{MPP}(70^\circ\text{C}) = 125 / 30,99 = 4,03$$

$$n(\text{moduly}_{MAX}) = U_{DCMAX} / U_{OC}(-15^\circ\text{C}) = 550 / 51,05 = 10,77$$

K dodržení napětového okna MPPT měniče musí být za sebou zapojeny nejméně 4 a maximálně 10 panelů. Při použití 11 panelů v řadě by při nízkých teplotách mohlo dojít k překročení napětového okna MPPT měniče. Maximální vstupní napětí měniče rovněž dovoluje zapojit pouze 10 modulů do série. Při 3 panelech v sérii by naopak při vysokých teplotách bylo napětí modulů menší než je napětové okno MPPT měniče.

Kontrola počtu řetězců a panelů, jejich přizpůsobení síťovému měniči:

Počet řetězců = předpokládaný počet panelů / počet modulů v řadě = $18 / 9 = 2$

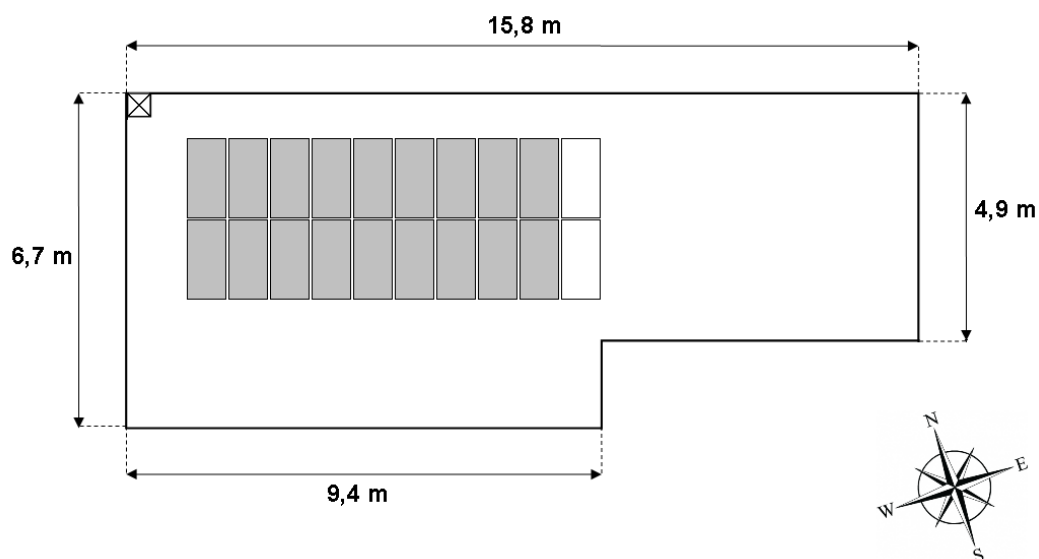
$U_{MPP}(-15\text{ °C}) = 9 \text{ panelů} \times 41,2 \text{ V} = 370,8 \text{ V} < U_{MPP\text{ FV NAHORE}} = 440 \text{ V}$

$U_{MPP}(70\text{ °C}) = 9 \text{ panelů} \times 30,99 \text{ V} = 278,9 \text{ V} > U_{MPP\text{ FV DOLE}} = 125 \text{ V}$

$U_{OC}(-15\text{ °C}) = 9 \text{ panelů} \times 51,05 \text{ V} = 459,5 \text{ V} < U_{DCMAX} = 550 \text{ V}$

$I_{MPP}(25\text{ °C}) = 2 \text{ řetězce} \times 5,36 \text{ A} < I_{DCMAX} = 2 \times 15 \text{ A}$

Navržené zapojení 18 ks FV panelů ve dvou řetězcích (uvedený síťový střídač má dva sledovače MPP) po 9 panelech je se zvoleným měničem realizovatelných. Vyhovuje regulačnímu rozsahu MPPT síťového střídače, maximálnímu vstupnímu stejnosměrnému napětí i maximálnímu vstupnímu proudu. Parametry střídače dovolují navýšení počtu FV panelů minimálně o dva další kusy. Plocha střechy je dostatečná pro umístění 18 i 20 kusů FV panelů.



Obr. 27 Umístění panelů na střeše rodinného domu

9. Ekonomická analýza

Použité komponenty:

FV panely: 18 ks monokrystalický FV panel MY 195-M, 195 Wp

cena: 18 x 10 530 Kč = 189 540 Kč

Střídač/nabíječka Studer Innotec XTM 3500-24

cena: 69 378 Kč

Programovací jednotka Studer Innotec RCC-02

cena: 6 237 Kč

Síťový střídač SMA Sunny Boy 4000 TL-21

cena: 45 600 Kč

Baterie LiFePO₄ / LiFeYPO₄ 12V / 90Ah

cena: 8 x 12 360 Kč = 98 880 Kč

Elektrocentrála ITC POWER GG3600SEi

cena: 35 828 Kč

Kompletní montážní systém pro uchycení 6 ks FV panelů (celkem 3 pro 18 panelů)

cena: 3 × 10 900 Kč = 32 700 Kč

Spojovací elektromateriál, jističe, rozvaděče, kabely, doprava, montáž...

cena: cca 50 000 Kč

celkové pořizovací náklady: 528 163 Kč

V kapitole 7 jsem odhadl cenu FV systému tohoto výkonu na asi 433 000 Kč. Rozdíl v těchto cenách je způsoben především tím, že jsem v návrhu použil pouze kvalitní komponenty. Ostrovní elektrárny, podle kterých jsem odhadoval pořizovací cenu, například používaly většinou olověné baterie s gelovým elektrolytem, jejichž cena je nižší než cena LFP baterií.

Návratnost investice

Při výpočtu návratnosti investice budu vycházet z odhadnuté optimalizované roční spotřeby elektrické energie. Počítám, že půl roku je letní spotřeba a půl roku zimní spotřeba. Celková spotřeba za rok vyšla 904 653 Wh.

průměrná denní spotřeba v létě: 2151 Wh

průměrná denní spotřeba v zimě: 2806 Wh

roční spotřeba: $182,5 \times 2151 + 182,5 \times 2806 = \mathbf{904\ 653\ Wh}$

Při ceně 5 Kč za 1 kWh jsou náklady za první rok 4523 Kč. Přibližné náklady na benzin za rok, získané výpočtem v tabulce 11, jsou 732 Kč. Životnost FV elektrárny uvažuji, stejně jako v kapitole 7, 25 let. Při uvážení meziročního zdražování pohonných hmot o 6 % se náklady na palivo za 25 let provozu vyšplhají na 40 161 Kč. K tomuto výsledku dojdeme sečtením prvních 25 členů geometrické posloupnosti podle vzorce

$$S_n = a_1 \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1}, \quad (16)$$

kam za a_1 dosadíme náklady na pohonné hmoty za první rok (732 Kč), koeficientem q vyjádříme meziroční zdražování o 6 % ($q = 1,06$) a za n dosadíme počet let ($n = 25$).

Za dobu předpokládané životnosti FV elektrárny, která je určená životností panelů, lze očekávat, že minimálně jednou vyměníme všechny ostatní komponenty, ať už z důvodu neopravitelné poruchy nebo technickým zastaráním. Současná pořizovací cena těchto komponent (Střídač/nabíječka Studer Innotec XTM 3500-24, programovací jednotka Studer Innotec RCC-02, síťový střídač SMA Sunny Boy 4000 TL-21, 12 ks baterie LiFePO₄ 12V / 90 Ah) je 220 095 Kč. Při předpokládaném zdražení, v budoucnosti koupených zařízení, o 20 %, budou náklady na jejich výměnu 264 114 Kč. Životnost elektrocentrály předpokládám delší než 25 let, nebude ji proto třeba vyměnit. Ale náklady na její údržbu jsem odhadl na 50 000 Kč. Celkové provozní náklady za 25 let jsou potom 354 275 Kč. Celkové náklady za 25 let, tedy součet pořizovací ceny a provozních nákladů, je 882 438 Kč.

Jak je vidět, celkové náklady jsou velmi vysoké. Při uvážení meziročního zdražování elektrické energie ve stejné míře jako zdražování pohonných hmot (6 %) a stanovené roční spotřebě, bychom za 25 let ušetřili za elektřinu pouze 248 152 Kč. Do úspor nelze připočítat

náklady na vybudování elektrické přípojky – dům je k síti připojen. Životnost FV panelů bude pravděpodobně více než 25 let. Ale ani životnost delší o 5 let nezaručuje za uvedených podmínek návratnost investice. Tu lze předpokládat pouze při velkém zdražování cen elektrické energie. Vývoj cen elektřiny nelze předpovědět. V budoucnu by mohlo dojít k situaci, kdy vlivem velkého zdražení cen elektřiny nebo naopak poklesu cen FV systémů, bude investice do navrženého ostrovního systému rentabilní.

10. Model navrženého ostrovního FV systému

V programu MATLAB jsem vytvořil zjednodušený model, který simuluje denní respektive týdenní průběh ustáleného stavu navrženého ostrovního FV systému. V navrženém FV systému prakticky veškeré řízení zajišťuje střídač/nabíječ Studer Innotec. Tento přístroj má velkou spoustu funkcí a možností nastavení, můžeme jej přímo nazvat manažerem ostrovního systému. Je určen pro spolupráci se záložním zdrojem elektrické energie. V našem případě je to elektrocentrála s elektrickým startem. Manažer ostrovního systému zajišťuje při dosažení určitých podmínek její start. Význam použití elektrocentrály společně se Studer Innotec XTM a možnosti nastavení podmínek jejího startu budou rozebrány dále v popisu modelu.

Model využívá velké množství vstupních dat. Jsou to údaje o spotřebě elektrické energie v letním a zimním období pro pracovní a víkendový den v posuzované domácnosti, kterou jsem již dříve odhadl. Dále je to odhad průběhu spotřeby teplé vody v pracovním a víkendovém dnu. Aby byl denní průběh FV výroby zajímavější a zároveň bližší reálnému průběhu, přidal jsem do modelu týdenní průběhy oblačnosti. Informace o oblačnosti jsem získal z [22]. Vybral jsem jeden týden v prosinci a jeden týden v červnu loňského roku. Zvolené průběhy oblačnosti by měly představovat průměrnou oblačnost v zimě a v létě, tedy v zimě větší oblačnost, v létě menší. Velikost oblačnosti je ve vstupních datech udána procentuálním pokrytím oblohy mraky, od 0 % do 100 %. Podle velikosti oblačnosti jsou v jednotlivých časech během dne určovány velikosti koeficientů, kterými je následně násoben odpovídající FV výkon. Tím je vyjádřen pokles FV výkonu vlivem oblačnosti. Například při 40 až 50 % pokrytí oblohy oblačností je koeficient 0,6. Data o FV výkonu poskytuje dříve

vytvořený matematický model FVE, který jsem do tohoto modelu zakomponoval. Můžeme zvolit libovolný výkon, nejsme omezeni pouze výkonem navržené ostrovní FVE. Matematický model FVE má nastavené volitelné ztráty na 14 % (4 % vodiče, 10 % střídač). Hodnoty z modelu tedy odpovídají energii odebírané ze síťového střídače SMA SunnyBoy 4000TL.

Po zapnutí programu je uživatel vyzván k zadání výkonu FV panelů ve Wp a poté ke zvolení měsíce, pro který se má týdenní průběh vykreslit. V závislosti na zvoleném měsíci bude model počítat s různými vstupními daty o spotřebě a oblačnosti. U průběhu spotřeby teplé vody je rozlišováno pouze mezi pracovním a víkendovým dnem. Pro letní a zimní období je uvažován průběh stejný. Rok jsem rozdělil na letní a zimní období. Pokud je zadán měsíc květen až říjen, budou to letní hodnoty vstupních dat, pro měsíce listopad až březen, zimní hodnoty. Ze zadaného výkonu panelů se spočte počet článků, kterým je vynásoben výkon jednoho článku. Počet článků je odvozen z panelu použitého v návrhu, který má jmenovitý výkon 195 Wp a 72 článků. Výkon bude vypočten matematickým modelem FVE pro každý měsíc a potom násoben koeficienty oblačnosti pro zimní nebo letní období podle zvoleného měsíce. Po úspěšném zadání požadovaného výkonu a měsíce se vykreslí sedm grafických oken. Každé z nich představuje průběh sledovaných hodnot pro jeden den v týdnu, od pondělí do neděle.

10.1. Popis struktury a význam jednotlivých částí modelu

Základem programu jsou dva cykly *for*. Jeden zajišťuje opakování pro sedm dní v týdnu. Druhý, vnořený do prvního cyklu, se opakuje devadesát šestkrát pro každý den. Den je rozdělen do patnáctiminutových intervalů, to je právě devadesát šest intervalů. Toto dělení je odvozeno od matematického modelu FVE. Pro prvních pět dní, tedy pracovních, je použita spotřeba odhadnutá pro pracovní den. Pro šestý a sedmý den, víkendová spotřeba. Stejně tak se mění i průběh spotřeby teplé vody. Poslední denní údaj o stavu baterie a stavu teplé vody je brán jako počáteční hodnota pro následující den. Pro první den je počáteční hodnota stavu baterií a teplé vody pevně nastavena. Tak je zajištěna návaznost sledovaných veličin v celém týdnu.

Dále jsou popsány jednotlivé části zdrojového kódu, které zároveň popisují chování ostrovního systému a zejména pak důležité funkce řídicího centra Studer XTM. Pro snazší orientaci jsou popisované části ve zdrojovém kódu uvozeny stejným nadpisem jako zde. Zdrojový kód modelu je přiložen v elektronické podobě v m-file souboru na CD.

První denní hodnoty

První denní hodnoty stavu baterií a teplé vody se pro každý den počítají zvlášť. Tato úprava byla nutná pro správnou funkci vnořeného cyklu *for*. Pro první denní hodnoty je v prvním kroku uvažována logicky pouze možnost napájení spotřebičů z baterií. Podle hodnoty baterie, která nám v tomto kroku vyjde, může dojít v dalším postupu vnořeným cyklem *for* ke splnění podmínky pro spuštění elektrocentrály z důvodu vybití baterií. Tím dojde ke změně stavu baterie na novou hodnotu. Možnost spuštění z jiného než uvedeného důvodu se pro první denní hodnotu nepředpokládají. Podmínky spuštění elektrocentrály jsou vysvětleny dále.

Vztah výroba – spotřeba, další průběh dne

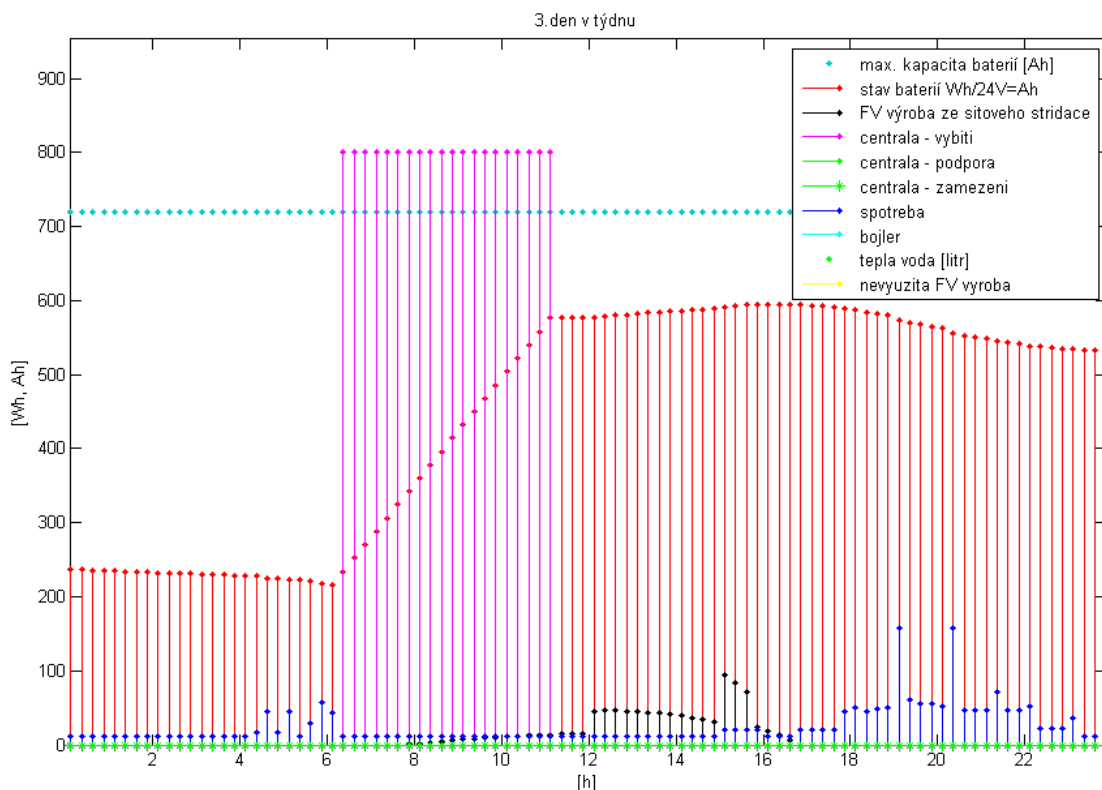
V dalším průběhu dne mohou nastat ve vztahu mezi aktuální velikostí výroby z FV panelů, odebírané ze síťového střídače, a spotřeby elektrické energie tři stavy. Pokud je výroba větší než je spotřeba, je elektrická energie čerpána rovnou ze síťového střídače a přebytek je ukládán do baterií. Jestliže je velikost ukládaného přebytku větší než je volná kapacita v bateriích, je uloženo jenom maximální možné množství. Zbytek je označen jako nevyužitý FV výkon, o který se dále postará bojler. Funkce bojleru je popsána dále. Pokud je FV výroba menší než spotřeba, do baterií nic neuložím, naopak zbývající část výkonu z nich musím čerpat. Poslední možností je, že velikost FV výroby je nula. V takovém případě je celá spotřeba kryta z baterií.

Centrála - nabíječka

Střídač/nabíječ Studer Innotec XTM umožňuje pomocí programovatelného AUX výstupu nastartovat elektrocentrálu. Start je vyvolán po splnění určitých podmínek, které lze různě nastavit. Jednou z nastavitelných podmínek je pokles napětí baterií pod určitou hladinu. Touto hladinou je minimální velikost napětí, při jehož překročení může dojít k poškození akumulátoru vlivem jeho hlubokého vybití. Po nastartování elektrocentrály je sepnuto přenosové relé a ve stejné chvíli se uvede do provozu nabíječka baterií. Elektrocentrála přímo napájí spotřebiče a zbytek výkonu je dodáván do baterií. Sdílení energie mezi spotřebiči a nabíječkou je řízeno automaticky. Po dosažení zvolené úrovně napětí je elektrocentrála vypnuta. V návrhu ostrovní FV elektrárny jsem použil lithium železo fosfátové (LFP) baterie. Nabíjení baterií se skládá ze dvou fází. V první fázi nabíjíme akumulátor určitým (poměrně

velkým) konstantním proudem až do úrovně odpovídající 80 % jeho maximální kapacity. V druhé fázi nabíjíme malým proudem až do maximální kapacity. První fáze při použití velkého proudu trvá krátkou dobu, druhá fáze mnohem déle. Proto je vhodné použít centrálu k nabíjení jen v první fázi. Výhodné je použít nabíječku s co největším nabíjecím proudem, který ovšem nesmí překročit maximální nabíjecí proud baterií, aby baterie byly nabitě co nejrychleji a centrála neběžela příliš dlouho. Minimální úroveň nabití je v modelu nastavena na 30 % maximální kapacity. LFP baterie snesou větší vybití, ale potom se snižuje jejich životnost. V modelu je použita centrála k nabíjení pouze v první fázi (do 80 %), druhou fázi nabíjení zajišťují pouze FV panely. To platí pro všechny případy použití centrály v tomto modelu. V modelu je nastavena celková maximální kapacita baterií a jejich celkové napětí. Pro zjednodušení je počítáno s tím, že baterie mají stále stejné napětí, což v reálu není pravda. Energetická účinnost akumulace je uvažována 80 %.

Dále má Studer Innotec XTM možnost nastavení doby, kdy nebude/bude spuštěna centrála, aby například v noci nerušila svým hlukem. Já předpokládám, že je umístěna v odhlučněné místnosti a proto její provoz nevádí ani v noci.



Obr. 28 Spuštění centrály při poklesu napětí na bateriích

Grafický výstup z modelu na Obr. 28 zobrazuje provoz elektrocentrály a nabíjení baterií z důvodu poklesu napětí na bateriích pod stanovenou mez. Aktuální stav nabití baterií je znázorněn červeným sloupcovým grafem. Růžový sloupcový graf představuje dobu, po kterou je v chodu elektrocentrála. Velikost jednoho sloupce odpovídá energii vyrobené centrálou za 15 min ve Wh. Předpokládám, že vyrábí stále stejné množství energie, bez ohledu na zatížení. Pro použitou centrálu o provozním výkonu 3200 W je to 800 Wh. Vyrobenou energii napájí spotřebiče a zbytkem nabíjí baterie. Celková maximální kapacita baterií je znázorněna světle modrou bodovou přímkou na úrovni 720 Ah. Spotřebě odpovídají modré sloupce, FV výrobě černé. Všechny veličiny mají velikost ve Wh. Výjimkou je stav baterií a jejich maximální kapacita, jejichž velikost je dělena napětím baterií, takže vlastně odpovídá jednotce Ah.

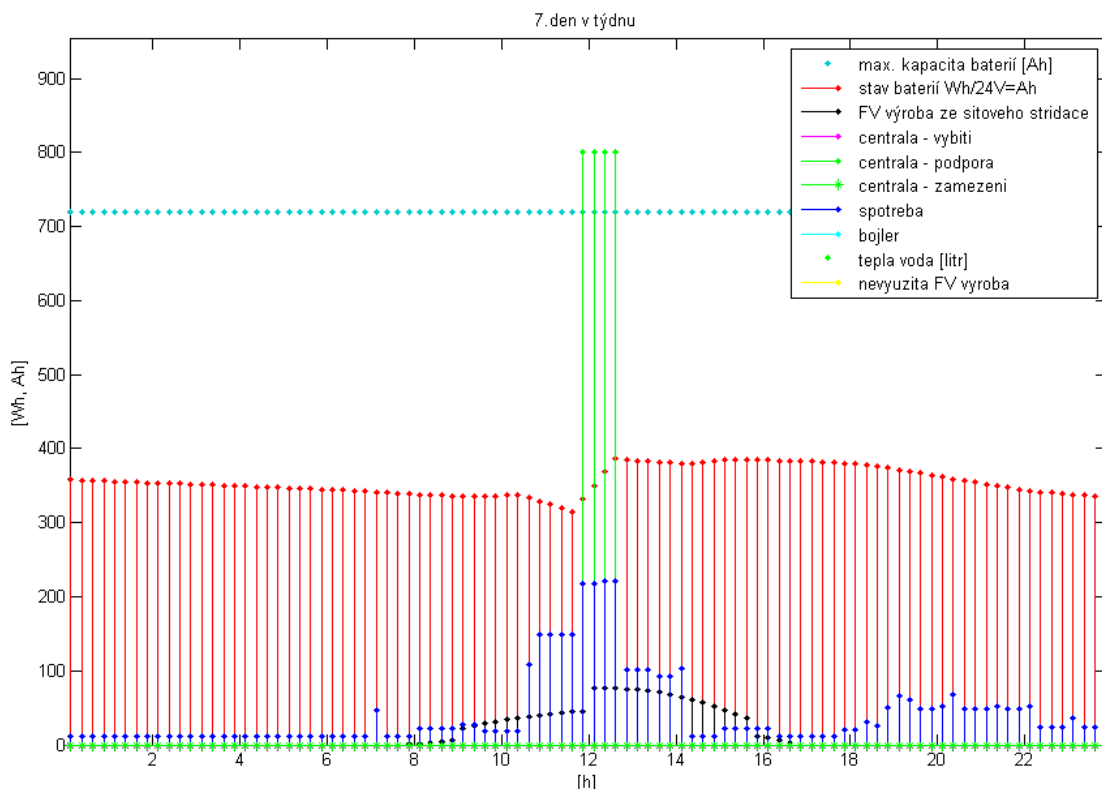
Centrála – podpora výkonu

Další funkce, kterou plní elektrocentrála ve spojení se střídačem/nabíječem Studer Innotec Xtender, je podpora výkonu. Pokud není schopen střídač Xtender dodat požadovaný výkon, je spuštěna centrála. Střídač Studer XTM je dimenzován na dodávku až trojnásobku jmenovitého výkonu po dobu pěti sekund. Největší odběr mají asynchronní motory při svém rozběhu. Doba pěti sekund je na rozběh většiny motorů dostatečná. Pokud se nejedná o krátkodobé přetížení vlivem startu motoru, ale dlouhodobou zátěž, kterou není schopen střídač pokrýt, spustí se elektrocentrála. Přepnutí přenosového relé, po kterém dojde k aktivaci nabíječky baterií a napájení spotřebičů elektrocentrálou, je o určitý čas zpožděno právě proto, aby se předešlo startování centrály při krátkodobém přetížení. Velikost tohoto zpoždění lze nastavit. Sdílení energie mezi spotřebiči a nabíječkou je řízeno automaticky.

Současně používané spotřebiče v posuzované domácnosti by střídač Studer XTM pravděpodobně zvládnul. Kritickým spotřebičem by asi byla pračka, ale díky možnosti několikanásobně přetížít střídač po dobu rozběhu motoru by ani pračka neměla činit potíže. Po dobu pěti sekund je Studer XTM 3500-24 schopen dodávat výkon až 9 kVA. Navíc ve slunných dnech dodává velkou část výkonu síťový střídač a proto výkon střídače Studer XTM nemusí být tak velký.

V modelu je nastaveno spouštění centrály jen, pokud je FV výroba ve dvou po sobě jdoucích patnáctiminutových krocích menší než jsou dvě po sobě jdoucí spotřeby a zároveň musí mít součet těchto dvou spotřeb určitou velikost, která odpovídá právě spotřebě pračky. Dále musí být baterie vybité pod určitou úroveň, která dává předpoklad, že nebudou schopné

dodávat požadovaný výkon po delší dobu. To jednoduše znamená, že se pračka v zatažených dnech napájí centrálou. Toto opatření vede k úspoře energie akumulované v bateriích a právě v zatažených dnech je tato úspora velmi znát. Na druhou stranu to vede k větším nákladům na provoz centrály. Doba chodu centrály je znázorněna zelenými sloupci s tečkou (viz. Obr. 29).



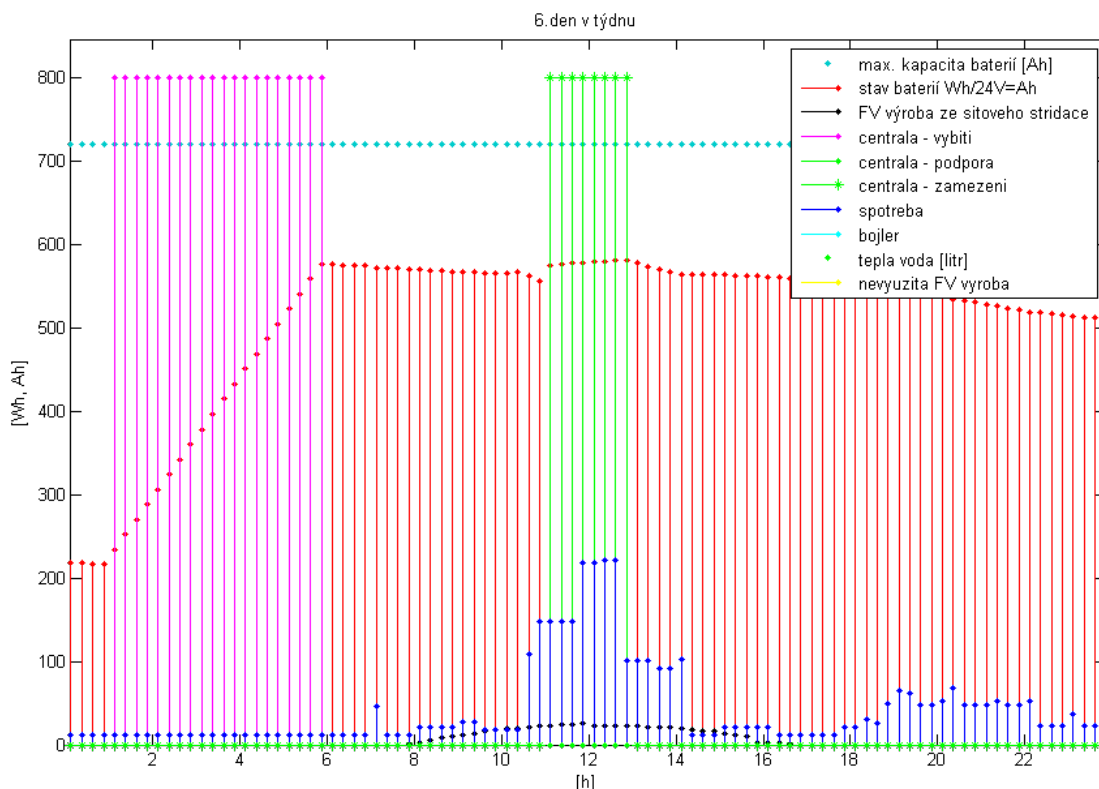
Obr. 29 Spuštění centrály na podporu výkonu střídače Studer XTM

Centrála – zamezení vybití baterií

Tato podmínka spuštění centrály vyplynula z pozorování grafických průběhů stavu nabití baterie při odladování programu. Jde o případ, kdy se přes noc vybijí baterie. Ráno se vlivem poklesu napětí pod stanovenou minimální mez spustí elektrocentrála a nabije baterie na nastavenou hodnotu, potom se opět vypne. V dalším průběhu dne bude zataženo, a proto bude čerpána energie z baterií, kterou jsme tam ráno uložili. Účinnost akumulace je poměrně nízká a dochází při ní ke ztrátám, proto bychom se měli snažit z baterií čerpat co nejméně. Z tohoto důvodu, pokud dojde ke zvýšené spotřebě po tom, co byly nabití baterie, bych spustil elektrocentrálu a napájel z ní spotřebiče.

V modelu je tato podmínka řešena podobně jako spuštění centrály na podporu výkonu. Rozdíl je v tom, že se spouští již při menší spotřebě a při libovolném nabití baterií. Toto

spuštění centrály zabrání vybití baterií a zajistí tak dostatek akumulované energie na večer a noc. V reálném provozu by uživatel pravděpodobně svou spotřebu omezil a čekal až bude svítit slunce. Kdyby ale neměl možnost spotřebu odložit, bylo by využití centrály rozumné. Průběh této situace je zachycen na Obr. 30. Provoz centrály je znázorněn zelenými sloupci s hvězdičkou, tím je odlišen od startu na podporu výkonu.

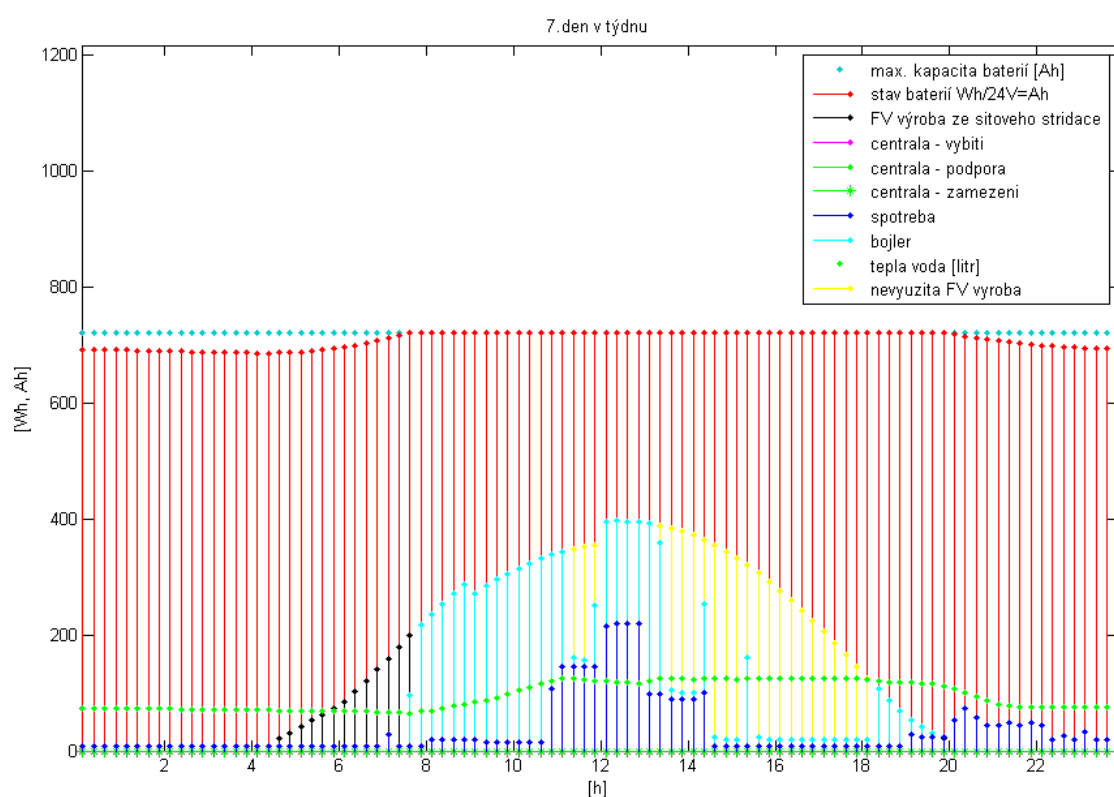


Obr. 30 Spuštění centrály na zamezení vybití baterií

Bojler

Do bojleru jsou ukládány pouze přebytky FV výroby, které nelze jinak využít. To znamená, že aktuální spotřeba je plně pokryta a baterie jsou nabitě na maximální kapacitu. V modelu je bojler umístěn na konci celého vnořeného cyklu *for*, který se opakuje pro každých 15 min. Pokud je v předchozím průběhu cyklu vyhodnocen ztrátový výkon jako nenulový, je tento přebytek puštěn do bojleru. Jestliže je přebytečný FV výkon větší, než je maximální příkon spirály bojleru, je výkon omezen. Také je zohledněn objem bojleru. Dosazeny jsou konkrétní hodnoty použitého bojleru. Maximální příkon topné spirály: 2000 W, objem: 125 litrů, tepelné ztráty za den: 1090 Wh. Hodnoty příkonu a tepelných ztrát byly přepočteny pro patnáctiminutový úsek. Účinnost elektrického ohřevu je 98 %.

Vstupní data obsahují údaje o průběhu denní spotřeby teplé vody vyjádřené v procentech z celkové denní spotřeby. Její průběh je jiný pro pracovní den a pro víkendový den. Pokud budeme uvažovat denní spotřebu 100 litrů, jedno procento bude odpovídat jednomu litru. Na ohřev jednoho litru vody z teploty 10 °C na 50 °C je zapotřebí přibližně 47 Wh. Odběr teplé vody z bojleru jsem tak vyjádřil jako odběr určitého počtu Wh. V modelu je nastaven počáteční stav vody v bojleru, vyjádřený násobkem energie potřebné na ohřev jednoho litru vody (47 Wh). V zimním období se ohřev vody příliš neočekává, proto je počáteční hodnota v zimě nastavena na nulu.



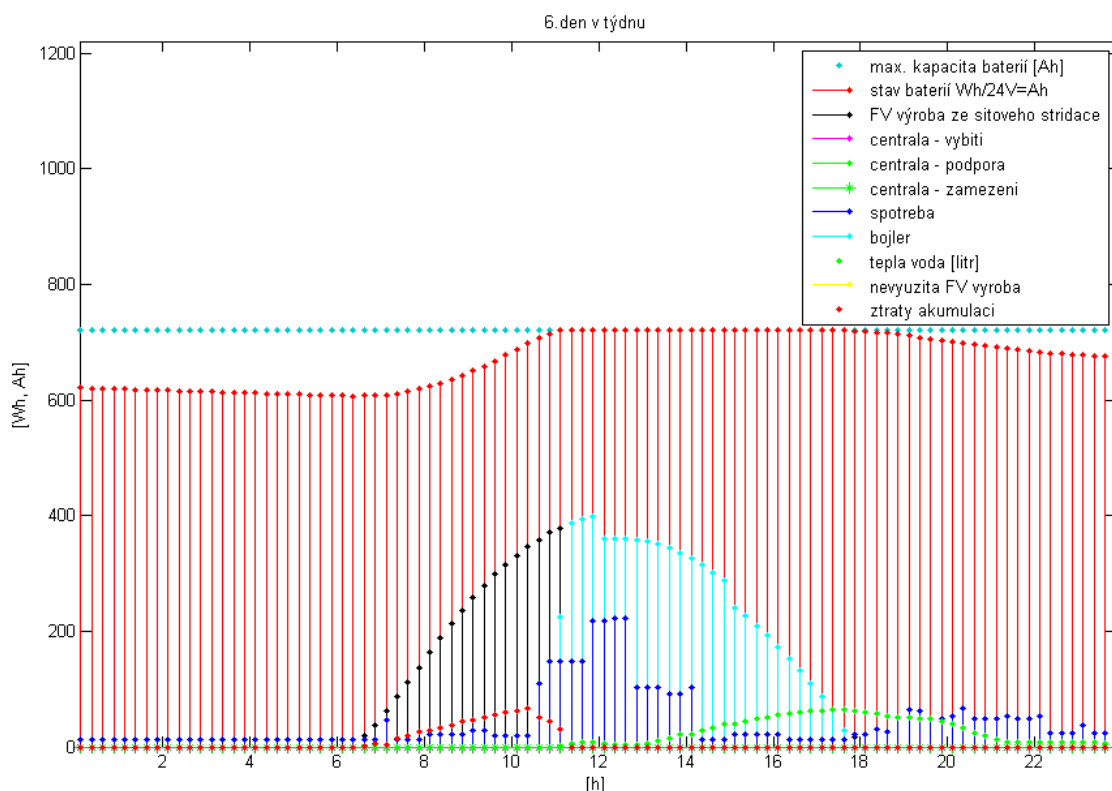
Obr. 31 Stav pro červnový jasný den

Na Obr. 31 je grafický výstup z modelu pro červnový jasný den. Je vidět, že výroba z FV panelů bez problémů pokryje spotřebu elektrických spotřebičů. Baterie se již dopoledne nabíjí na svoji maximální kapacitu. V té chvíli nemáme kam energii ukládat, proto s ní ohříváme vodu v bojleru. Objem teplé vody v litrech je znázorněn zelenými body. V průběhu dne dojde k ohřátí celého objemu bojleru a energii z FV výroby není možno nijak využít. Ztrátová energie z FV výroby je zobrazena žlutou plochou. Vlivem tepelných ztrát bojleru a spotřeby teplé vody dochází k průběžnému dohřívání vody v bojleru. Po západu slunce jsou

spotřebiče opět napájeny z baterie. K situaci, kdy nedokážeme využít energii z FV panelů ani uložením do bojleru, by mělo docházet při dobře dimenzovaném FV výkonu pouze za jasných letních dnů.

Ztráty

V každém 15-min intervalu jsou počítány ztráty, ke kterým v systému dochází. Jsou to ztráty při akumulaci elektrické energie do baterií, ztráty na střídači Studer, ztráty na síťovém střídači, ztráty na vedení. Dále je počítána nevyužitá FV výroba, množství energie uložené do bojleru, množství energie získané a uložené do baterií a nevyužitá energie centrály. Výkon centrály je větší než nabíjecí výkon nabíječky Studer XTM. Proto když je centrála spuštěna v době malé spotřeby, zbývající energie by měla jít do baterií, ale ta má omezený nabíjecí proud. Nemůže se tak využít celá energie. Hodnoty výše uvedených ztrát a dalších veličin jsou tisknuté na výstupu z modelu.



Obr. 32 Ztráty akumulací elektrické energie

11. Závěr

V této diplomové práci byl navržen systém autonomního zásobování rodinného domu elektřinou ze střešních FV panelů. Z důvodu rozsáhlosti a komplexnosti byl návrh systému rozdělen do následujících kroků: odhad a optimalizace spotřeby elektrické energie, posouzení místa instalace, dimenzování FV výkonu, teoretický návrh autonomního systému a ekonomická analýza návrhu.

Odhad spotřeby rodinného domu byl proveden pro pracovní a víkendový den v letním a zimním období. Odhadnutá spotřeba byla příliš velká na to, aby mohla být pokryta ekonomicky efektivně navrženým FV systémem. Proto musela být optimalizována. Provedená optimalizace zahrnovala vyřazení spotřebičů s malou energetickou účinností, nahrazení elektrického ohřevu vody jiným zdrojem a přesun co největší části spotřeby do doby, kdy je FV energie dostatek. Tyto optimalizační úpravy vedly k výraznému snížení spotřeby elektrické energie. Odhad spotřeby a její optimalizace byl proveden v kapitole 4.

Posuzován byl konkrétní rodinný dům. Stanoviště bylo ohodnoceno jako vhodné k instalaci FV systému. Plocha střechy objektu je vyhovující z hlediska velikosti, sklonu i zastínění. Plocha střechy poskytuje dostatečný prostor pro instalaci FV monokrystalických nebo polykrystalických panelů odhadem o celkovém výkonu až 9 kWp. K posouzení energetického výnosu stanoviště jsem použil odhadní model PVGIS. Pro odhad denních výrobních diagramů pro posuzované stanoviště jsem v programu MATLAB vytvořil matematický model fotovoltaické elektrárny. Vytvořený model umožňuje získat denní výrobní diagram elektrické energie pro průměrný den ve zvoleném měsíci a pro zvolený výkon.

Na základě posouzení stanoviště byla provedena vlastní teoretická realizace FV systému. Byly zvoleny monokrystalické panely o celkovém výkonu 3510 Wp. Uvedený výkon byl zvolen na základě průměrné optimalizované denní spotřeby v zimním období a s uvážením pořizovacích nákladů. Bylo zvoleno napájení všech spotřebičů ze střídače. Pro napájení spotřebičů v noci a při zatažené obloze byly zvoleny lithium železo fosfátové baterie. Jako záložní zdroj je použita elektrocentrála. Celý systém je řízen střídačem/nabíječkou Studer XTM 3500-24.

Byla provedena ekonomická analýza navrženého FV systému. Z důvodu použití kvalitních komponentů byla pořizovací cena poměrně vysoká. Návratnost investice lze

předpokládat pouze při poměrně velkém nárůstu cen elektřiny. Z toho důvodu je v současné době navržený FV systém hodnocen jako nevhodný pro realizaci v posuzovaném místě. Projekt by mohl najít uplatnění v místě bez přípojky elektrické energie.

Na závěr byl v programu MATLAB vytvořen zjednodušený model, simulující denní respektive týdenní průběh ustáleného stavu navrženého ostrovního FV systému. Jedná se především o simulaci řídicích funkcí Studer XTM ve spojení centrálou.

12. Seznam použité literatury a informačních zdrojů

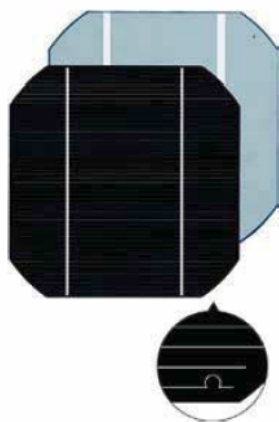
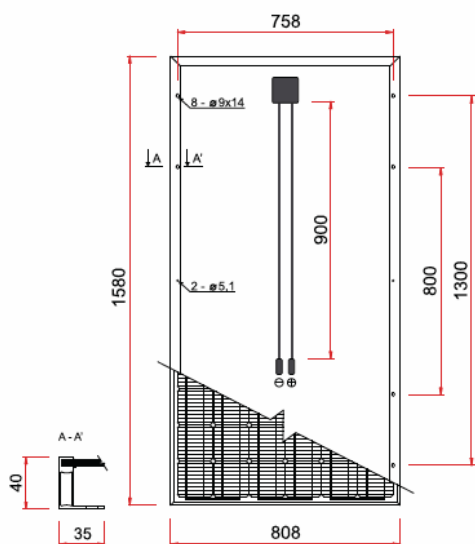
- [1] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika, budovy jako zdroj proudu*. 1. čes. vyd. Ostrava: HEL, 2010. 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [2] HENZE, Andreas a HILLEBRAND, Werner. *Elektrický proud ze slunce: fotovoltaika v praxi: technika, přehled trhu, návody ke stavbě*. 1. vyd. Ostrava: HEL, 2000. 129 s. ISBN 80-86167-12-7.
- [3] KRIEG, Bernhard. *Elektřina ze Slunce: Fotovoltaika v teorii a praxi*. 1. čes. vyd. Ostrava: HEL, 1993. 223 s.
- [4] ITOH, Masaya a kolektiv. *Evaluation of electric energy performance by democratic module PV system field test*. [online]. [cit. 3. 3. 2012] Dostupné z WWW: <<http://biblioteca.cinvestav.mx/>>.
- [5] SOLARTEC. *Fotovoltaika*. [online]. [cit. 7.3.2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.solartec.cz/cs/fv-systemy/o-fotovoltaice/fotovoltaika.html>>.
- [6] BROOKS, David R. *Monitoring Solar Radiation and Its Transmission through the Atmosphere*. [online]. [cit. 2.1.2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.pages.drexel.edu/~brooksdr/>>.
- [7] GREEN RHINO ENERGY. *The Principles of Photovoltaics*. [online]. [cit. 16.2.2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.greenrhinoenergy.com/solar/>>.
- [8] BENDA, Vítězslav, STAŇEK, Kamil, WOLF, Petr. *Fotovoltaické systémy* [online]. [cit. 2. 3. 2012]. Brno, 2011. 60 s. Učební texty k semináři. VUT v Brně. Dostupné z WWW: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf>.
- [9] HNILICA, Pavel. *Jaký solární regulátor nebo MPPT měnič si pořídit pro solární panely*. [online]. [cit. 18 .2. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.solarnimoduly.cz/>>.
- [10] HNILICA, Pavel. *Akumulátory pro měniče napětí*. [online]. [cit. 18. 2. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.menice-napeti.cz/>>.
- [11] AVIS-SOLAR. *Sluneční záření na území České republiky*. [online]. [cit. 22. 2. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.solar-aleo.cz/zareni.html>>.
- [12] SRDEČNÝ, Karel. *Fotovoltaika v budovách, dosavadní zkušenosti pro budoucí rozvoj*. [online]. [cit. 20. 2. 2012]. EkoWATT, Praha, 2009, ISBN: 978-80-87333-04-4. Dostupné z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/cz/publikace/>>.

- [13] MRÁČEK, Jakub. *Soumrak fotovoltaiky v Česku a na Slovensku, nebo „ta správná“ regulace trhu?*. [online]. [cit. 20. 2. 2012].
Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika>>.
- [14] fg-FORTE. *Lithiové baterie – LiFePO4*. [online]. [cit. 19. 2. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.fg-forte.cz/cz/kategorie/241-lithiove-baterie--lifepo4.aspx>>.
- [15] KOLAŘÍK, Martin. *Ostrovní fotovoltaické elektrárny. Baterie LiFeYPO4*. [online]. [cit. 25. 2. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.ostrovni-elektrarny.cz/>>.
- [16] SOUKUP, Michal. *Řízení provozu mikro-sítí napájených OZE*. Plzeň, 2006. diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.
- [17] ONDEO Česká Republika. *Spotřeba vody*. [online]. [cit. 14. 2. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://www.ondeo.cz/spotreba-vody>>.
- [18] ČEZ DISTRIBUCE. *Hromadné dálkové ovládání*. [online]. [cit. 24. 3. 2012].
Dostupné z WWW: <www.cezdistribuce.cz>.
- [19] EUROPEAN COMMISSION – Joint Research Centre. *Photovoltaic Geographical Information System*. [online]. Dostupné z WWW: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>.
- [20] E-SHOP. *ostrovni-elektrarny.cz. Kompletní elektrárny*. [online]. [cit. 10. 4. 2012].
Dostupné z WWW: <www.ostrovni-elektrarny.cz>
- [21] E-SHOP. *Solární Panely.CZ, s.r.o.. Ostrovní systémy*. [online]. [cit. 10. 4. 2012].
Dostupné z WWW: <<http://solarni-panely.cz/e-shop/ostrovni-systemy>>.
- [22] METEOPRESS. *Archiv článků*. [online]. [cit. 5. 4. 2012].
Dostupné z WWW: <<http://www.meteopress.cz/s/vice/archiv/>>.

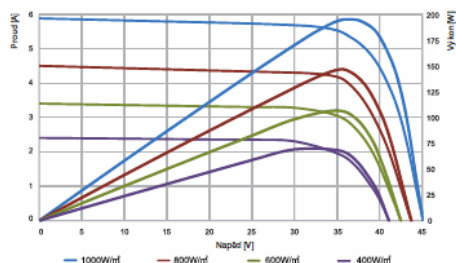
Přílohy

Příloha A – technický list FV panelu MY195-M

TECHNICKÝ POPIS



Výkonová charakteristika (195 W)



Elektrické vlastnosti

Modul	MY190-M	MY195-M
Jmenovitý výkon (Pmax)	190 W	195 W
Účinnost modulu	14,88 %	15,27 %
Tolerance výkonu	±3 %	±3 %
Jmenovité napětí (Vmp)	36,0 V	36,4 V
Jmenovitý proud (Imp)	5,28 A	5,36 A
Napětí naprázdno (Voc)	44,9 V	45,1 V
Proud nakrátko (Isc)	5,81 A	5,88 A
Maximální systémové napětí	1000 V	1000 V
Max hodnota pojistky v sérii	15 A	15 A

STC: 1000W/m², 25 °C, AM=1,5

Mechanické vlastnosti

Typ buňky	Motech X-CELL monokrystalická 125 x 125 mm
Počet buněk	72 (6 x 12)
Rozměry	1580 x 808 x 40 mm
Hmotnost	16 kg
Krycí sklo	3,2 mm tvrzené sklo
Připojovací box	IP 65, 3 by-pass diody
Spojovací kabely	délka 900 mm, 4 mm ² , MC4 konektory
Rám	eloxovaná slitina hliníku

Teplotní koeficienty

Nominální provozní teplota buněk	45 ±2 °C
Teplotní koeficient max. výkonu Pmax	-0,46 % / °C
Teplotní koeficient napětí naprázdno Voc	-0,33 % / °C
Teplotní koeficient proudu nakrátko Isc	0,037 % / °C

Provozní podmínky

Provozní teplota	-40 °C až +85 °C
Max zatížení větrem/sněhem	2400 Pa / 5400 Pa

Balení

Počet modulů na paletě	24 ks
Počet modulů v kontejneru 40 ft HC	728 ks
Rozměry palety	1640 x 1140 x 980 mm

Záruka

5 let na použité materiály a řemeslné zpracování	Garance výkonu v průběhu 25-ti let 5 let / 95 %, 12 let / 90 %, 18 let / 85 %, 25 let / 80 %
--	--

Příloha B – technický list síťového střídače Sunny Boy 4000TL

Technické údaje SUNNY BOY 4000TL / 5000TL

	SB 4000TL	SB 5000TL
Vstup (DC)		
Max. DC výkon	4200 W	5300 W
Max. DC napětí	550 V	550 V
Rozsah FV napětí, sledovače MPPT	125 V - 440 V	125 V - 440 V
Doporučený rozsah při jmenovitém výkonu	175 V - 440 V	175 V - 440 V
Max. vstupní proud	2 x 15 A	2 x 15 A
Počet sledovačů MPPT	2	2
Max. počet stringů (paralelně)	2 x 2	2 x 2
Výstup (AC)		
Jmenovitý AC výkon	4000 W	4600 W
Max. AC výkon	4000 W	5000 W
Max. výstupní proud	22 A	22 A
Jmenovité AC napětí / rozsah	220 V - 240 V / 180 V - 280 V	220 V - 240 V / 180 V - 280 V
Síťová frekvence AC / rozsah	50 Hz, 60 Hz / ±5 Hz	50 Hz, 60 Hz / ±5 Hz
Účinník (cos φ)	1	1
AC připojení	jednofázové	jednofázové
Účinnost		
Max. účinnost / Euro-Eta	97,0 % / 96,4 %	97,0 % / 96,5 %
Ochranná zařízení		
Ochrana proti DC přepólování	●	●
DC odpojovač zátěže ESS	●	●
Odolnost proti AC zkratu	●	●
Kontrola zemního spojení	●	●
Kontrola stavu sítě (SMA Grid Guard)	●	●
Integrovaná kontrolní jednotka poruchového AC / DC proudu	●	●
Všeobecné údaje		
Rozměry (Š / V / H) v mm	470 / 445 / 180	470 / 445 / 180
Hmotnost	25 kg	25 kg
Rozsah provozních teplot	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C
Emise hluku (typická)	≤ 29 dB(A)	≤ 29 dB(A)
Vlastní spotřeba (noc)	< 0,5 W	< 0,5 W
Topologie	beztransformátorová	beztransformátorová
Způsob chlazení	OptiCool	OptiCool
Místo instalace: uvnitř / venku (elektronika IP65, oblast připojení IP54)	●/●	●/●
Vybavení		
DC připojení: SUNCLIX	●	●
AC připojení: pružinová svorka	●	●
Grafický displej	●	●
Rozhraní: Bluetooth / RS485	●/○	●/○
Záruka: 5 let / 10 let / 15 let / 20 let / 25 let	●/○/○/○/○	●/○/○/○/○
Certifikáty a osvědčení	www.SMA.de	www.SMA.de
● sériové vybavení ○ volitelné vybavení		
Údaje platí pro jmenovité podmínky - stav: březen 2010		

Křivka účinnosti SUNNY BOY 4000TL/5000TL

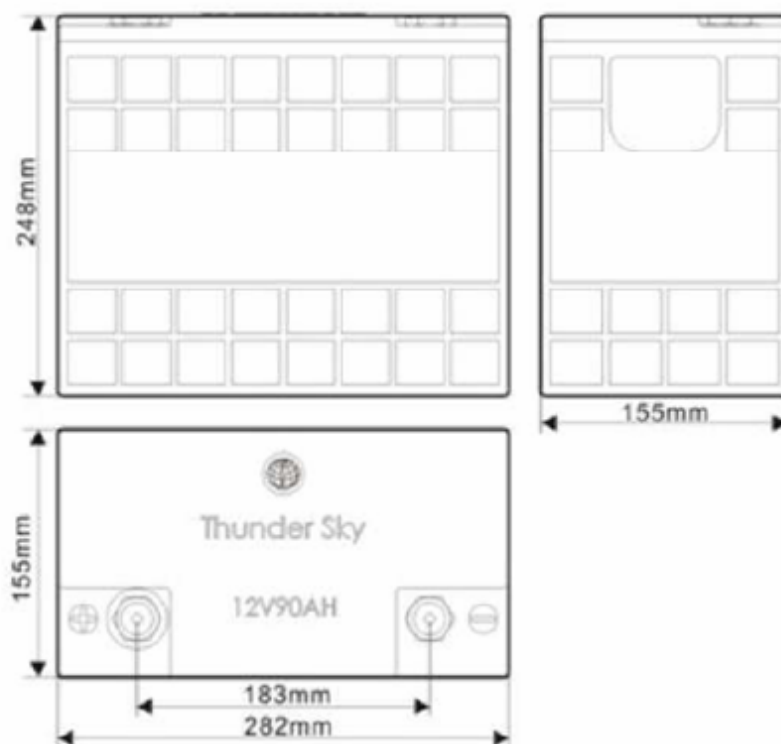
Prislušenství
Rozhraní RS485
DM485CB-10

Příloha C – technický list baterie použité v návrhu

GWL/ Power Group Technology Solutions – Stay Powered for the Future

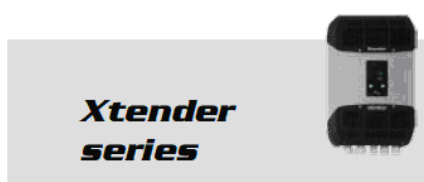
LP12V90AH+ battery specification

Model name	LP12V90AH+	Alternative product marking TS-LP12V90AH
Nominal voltage	12 V	Operating voltage under load is 12.0 V
Capacity	90 AH	+/- 5%
Operating voltage	max 16.0V - min 11.0V	At 80% DOD
Deep discharge voltage	10 V	The cells is damaged if voltage drops bellow this level
Maximal charge voltage	17 V	The cells is damaged if voltage exceeds this level
Optimal discharge current	< 45 A	0.5 C
Maximal discharge current	< 90 A	1 C, continuous for max 30 minutes from full charge
Max peak discharge current	< 1000 A	10 C, maximal 10 seconds in 1 minute
Optimal charge current	< 45 A	0.5 C
Maximal charge current	< 90 A	< 1 C with battery temperature monitoring
Maximal continuous operating temperature	80 °C	The battery temperature should not increase this level during charge and discharge
Dimensions	283 x 248 x 155	Millimeters (tolerance +/- 2 mm)
Weight	15 kg	Kilograms (tolerance +/- 150g)



<http://www.yttrium-power.com/>

Příloha D – technický list výrobků Studer série Xtender



Xtender series

Model	XTM 2000-12	XTH 3000-12	XTM 3500-24	XTH 5000-24	XTM 4000-48	XTH 6000-48	XTH 8000-48
Inverter (factory setting/range adjustable with RCC-02 or RCC-03)							
Nominal battery voltage	12V		24V		48V		
Input voltage range	9.5 - 17V		19 - 34V		38 - 68V		
Continuous power @ 25°C	2000VA	2500VA	3000VA	4500VA	3500VA	5000VA	7000VA
Power 30 min. @ 25°C	2000VA	3000VA	3500VA	5000VA	4000VA	6000VA	8000VA
Power 5 sec. @ 25°C	4.8kVA	7.5kVA	9kVA	12kVA	10.5kVA	15kVA	21kVA
Power Smart-Boost 30 min. @ 25°C	2000VA	3000VA	3500VA	5000VA	4000VA	6000VA	8000VA
Maximum load	Up to short-circuit						
Maximum asymmetric load	Up to Pcont.						
Load detection (stand-by)	2 to 25 W						
Cos phi	0.1-1						
Maximum efficiency	93%		94%		96%		96%
Consumption OFF/Stand-by/ON	1.2W/2.2W/9W	1.7W/2.2W/14W	1.3W/2.5W/11W	1.3W/2.5W/20W	1.6W/3W/12W	1.6W/3W/22W	1.6W/3.8W/30W
Output voltage	Sine wave 230Vac (+/- 2%) / 190-245Vac						
Output frequency	50 Hz adjustable 45-65Hz +/- 0.05% (crystal controlled)						
Harmonic distortion	<2%						
Dynamic behaviour	1 ms (on load change 0 to 100%)						
Overload and short-circuit protection	Automatic disconnection with 3 time restart attempt						
Overheat protection	Warning before shut-off - with automatic restart						
Battery charger 6 step adjustable : I-U-Uo-Equalize-Uo(ow)-U(periodic)							
Charging current adjustable	0 - 100A	0 - 160A	0 - 90A	0 - 140A	0 - 50A	0 - 100A	0 - 120A
Input current balance adjustment	1 - 50A						
Maximum input voltage	265Vac						
Input AC voltage range	Adjustable threshold from 150 to 230Vac						
Input frequency	45 - 65Hz						
Power Factor Correction (PFC)	EN 61000-3-2						
Battery control (factory setting/range adjustable with RCC-02 or RCC-03)							
Absorption end	By duration 2 / 0.25 - 10h or by current - / 4 - 30A						
Absorption voltage	14.4 / 9.5 - 17V		26.8 / 19 - 34V		57.6 / 38 - 68V		
Periodic absorption voltage	- / 9.5 - 17V		- / 19 - 34V		- / 38 - 68V		
Floating voltage	13.6 / 9.5 - 17V		27.2 / 19 - 34V		54.4 / 38 - 68V		
Reduced floating voltage	- / 9.5 - 17V		- / 19 - 34V		- / 38 - 68V		
Equalization	By number of cycles (- / 1 - 100) or at set interval (- / 52 weeks)						
Equalization end	By duration 4 / 0.25 - 10h or by current - / 4 - 30A						
Equalization voltage	- / 9.5 - 17V		- / 19 - 34V		- / 38 - 68V		
Deep-discharge protection	10.8 / 9.5 - 17V		21.6 / 19 - 34V		43.2 / 38 - 68V		
Reduced floating time	- / 0 - 32 days						
Periodic absorption time	- / 0 - 10 hours						
Temperature compensation	-5 / 0 to -8mV/°C/Cell (only with optional BTS-01)						
General data	XTM 2000-12	XTH 3000-12	XTM 3500-24	XTH 5000-24	XTM 4000-48	XTH 6000-48	XTH 8000-48
Multifunction contact adjustable	2 independent contacts 16A 250Vac (potential free 3 points)						
Max. current on transfer relay	50A / 11.5kVA						
Transfer time	<15ms						
Weight	18.5kg	34kg	21.2kg	40kg	22.9kg	42kg	46kg
Dimension hxbxL [mm]	133x322x466	230x300x500	133x322x466	230x300x500	133x322x466	230x300x500	
Protection index	IP23						
Conformity	EN 61000-6-1, EN 61000-6-3, EN 55014, EN 55022, EN 61000-3-2, Dir. 89/336/EEC, LVD 73/23/EEC						
Operating temperature range	-20 to 55°C						
Ventilation	Forced from 55°C						
Acoustic level	<40dB / <45dB (without/with ventilation)						
Warranty	2 years						
Options							
Remote control and programming centre RCC-02 or RCC-03		•		•		•	•
Communication cable for 3ph and parallel CAB-RJ45-8-2 (2 m)		•		•		•	•
Battery temp. Sensor BTS-01 (5 m)		•		•		•	•
Remote command module RCM-10 + 3 m cable	•		•		•		

Data may change without any notice.