

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky



Bakalářská práce

Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné  
osvětlení

Design of a stand-alone solar electric system for street  
lighting

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika  
Vedoucí práce: Vít Klein, Ph.D.  
Vypracoval: Matouš Rožánek

**Praha 2019**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rožánek** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **466096**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of a stand-alone solar electric system for street lighting**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principy přeměny sluneční energie na elektrickou a proveďte rešerši solárních panelů.
2. Seznamte se s principem funkce DC měniče a MPPT regulátoru a proveďte jejich analýzu z hlediska účinnosti a aplikace v ostrovních solárních systémech.
3. Prostudujte možnosti ukládání elektrické energie ze solárních panelů.
4. Navrhněte ostrovní solární systém pro daný spotřebič včetně dimenzování jednotlivých komponent systému.
5. Zhodnoťte navržený systém z energetického, environmentálního a ekonomického hlediska.

Seznam doporučené literatury:

1. LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
2. FEMIA, Nicola. Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2013]. ISBN 9781466506909.
3. HANKINS, Mark. Stand-alone solar electric systems: the Earthscan expert handbook for planning, design, and installation. Washington, DC: Earthscan, 2010. ISBN 9781844077137.
4. Hansen, A. D., Sørensen, P. E., Hansen, L. H., & Bindner, H. W. (2001). Models for a stand-alone PV system.
5. BALFOUR, John, Michael SHAW a Nicole Bremer NASH. Advanced photovoltaic system design. Burlington, Mass.: Jones & Bartlett Learning, c2013. ISBN 1449624693.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.09.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2021**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Čestné prohlášení

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

V Praze dne

---

Podpis

## **Poděkování**

Za pomoc při vypracování bakalářské práce bych rád poděkoval Doc. Ing. Tomáši Tichému Ph.D., MBA, který mi pomohl téma bakalářské práce vybrat a následně mi poskytoval odbornou pomoc s vypracováním. Dále bych rád poděkoval Ing. Milošovi Nerudovi, DiS, který mi poskytl technické rady ohledně samotného návrhu ostrovního systému. V poslední řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Mgr. Vítu Kleinovi, Ph.D., který mi pomáhal v průběhu celé doby psaní závěrečné práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá základní strukturou ostrovních solárních systémů, popisuje principy fungování jednotlivých komponent, které lze v ostrovních systémech nalézt, analyzuje problémy, výhody a nevýhody jednotlivých konceptuálních řešení a rozebírá struktury spojené s danou tematikou. Dále obsahuje samotný návrh ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení, přičemž je provedena analýza energetického potenciálu a následně podle vypočtených hodnot je systém navržen tak, aby byl po celý rok plně funkční. V poslední části se práce věnuje zhodnocení navrženého systému z hlediska energetického, ekonomického a enviromentálního aspektu.

## **Klíčová slova**

Princip fotovoltaického panelu, ukládání energie, hledání MPP, samotný návrh, předpokládaná výroba, soběstačnost v průběhu celého roku, zhodnocení

## **Abstract**

This thesis deals with the basic structures of stand-alone solar systems, principles of functioning of individual components, which are available to find in stand-alone systems, analyzes problems, advantages and disadvantages of individual conceptual solutions and analyzes structures with the given topic. It also includes the design of the stand-alone system for use in public lighting, while the analysis of energy potential is carried out and then according to calculated values, the system is designed to be fully functional throughout the year. The last part of the thesis is devoted to the evaluation of the proposed system in terms of energy, economic and environmental aspects.

## **Keywords**

Photovoltaic panel principle, energy storage, MPP search, proposed design, expected production, self-sufficiency throughout the year, evaluation

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| Úvod .....   | 1  |
| 1. Solární panel .....   | 2  |
| 1.1. Stručná historie .....                                      | 2  |
| 1.2. Princip fotovoltaického článku .....                        | 3  |
| 1.3. Typy článků .....   | 8  |
| 1.3.1. Fotovoltaické články první generace .....                 | 8  |
| 1.3.2. Fotovoltaické články druhé generace .....                 | 11 |
| 1.3.3. Fotovoltaické články třetí generace .....                 | 12 |
| 1.4. Elektrické vlastnosti fotovoltaického panelu .....          | 14 |
| 1.4.1. Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku ..... | 14 |
| 1.4.2. Náhradní schéma článku .....                              | 15 |
| 1.4.3. Propojení článků .....                                    | 17 |
| 1.5. Provozní podmínky PV panelů v České republice .....         | 19 |
| 1.5.1. Sluneční podmínky .....                                   | 19 |
| 1.5.2. Sklon a orientace panelu .....                            | 21 |
| 2. Ukládání energie ze solárních panelů .....                    | 23 |
| 2.1. Elektrochemické akumulátory .....                           | 23 |
| 2.1.1. Olovené akumulátory s kapalným elektrolytem .....         | 25 |
| 2.1.2. Olovené akumulátory s pevným elektrolytem .....           | 27 |
| 2.1.3. Alkalické akumulátory .....                               | 28 |
| 2.1.4. Lithiové akumulátory .....                                | 31 |
| 2.2. Elektrostatické akumulátory .....                           | 34 |
| 2.2.1. Superkondenzátor .....                                    | 34 |
| 3. Fotovoltaické systémy .....                                   | 35 |
| 4. Měníče pro fotovoltaické systémy .....                        | 36 |
| 4.1. DC-DC měniče .....  | 37 |
| 4.1.1. Step-Down základní .....                                  | 38 |
| 4.1.2. Step-Up základní .....                                    | 42 |
| 4.1.3. Step-Up+Down základní .....                               | 44 |
| 4.1.4. SEPIC, Zeta .....   | 45 |
| 4.1.5. Nábojová pumpa .....                                      | 47 |
| 4.1.6. Galvanicky oddělené .....                                 | 48 |
| 4.2. MPPT regulátory .....                                       | 50 |
| 4.2.1. Fractional Open-Circuit Voltage .....                     | 51 |
| 4.2.2. Short-Circuit current .....                               | 52 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.3. Temperature Method .....                    | 52 |
| 4.2.4. Perturb and Observe (P&O) .....             | 52 |
| 4.2.5. P&O with Adaptive Step Size .....           | 54 |
| 4.2.6. P&O with Parabolic Approximation .....      | 55 |
| 4.2.7. Incremental Conductance (IC).....           | 55 |
| 4.2.8. P&O via Output Parameters .....             | 55 |
| 4.2.9. Soft Computing Methods .....                | 56 |
| 4.2.10. Účinnost MPPT .....                        | 58 |
| 4.3. Střídač .....                                 | 59 |
| 4.3.1. Střídač bez transformátoru .....            | 60 |
| 4.3.2. Střídače s transformátorem na NF .....      | 61 |
| 4.3.3. Střídače s transformátorem na VF .....      | 61 |
| 4.3.4. Účinnost střídačů a jejich dimenzování..... | 62 |
| 5. Samotný návrh.....                              | 65 |
| 5.1. Energetický potenciál .....                   | 65 |
| 5.2. Spotřebič .....                               | 70 |
| 5.3. Fotovoltaický panel.....                      | 72 |
| 5.4. Akumulátor .....                              | 75 |
| 5.5. Jasový spínač .....                           | 78 |
| 5.6. Step-Up měnič .....                           | 79 |
| 5.7. Solární regulátor .....                       | 79 |
| 5.8. Jištění a přepět'ové ochrany... ..            | 80 |
| 5.9. Kabeláž a spojovací svorky .....              | 82 |
| 6. Hodnocení navrženého systému .....              | 84 |
| 6.1. Energetické hodnocení.....                    | 84 |
| 6.2. Ekonomické hodnocení.....                     | 86 |
| 6.2.1. Pořizovací náklady .....                    | 87 |
| 6.2.2. Čistá současná hodnota NPV.....             | 88 |
| 6.2.3. Vnitřní výnosové procento IRR.....          | 91 |
| 6.2.4. Prostá doba návratnosti $TN_p$ .....        | 92 |
| 6.2.5. Reálná doba návratnosti $TN_r$ .....        | 92 |
| 6.2.6. Cena elektřiny za energii LCOE.....         | 93 |
| 6.3. Enviromentální hodnocení .....                | 93 |
| 6.3.1. Doba energetické návratnosti panelů.....    | 94 |
| 6.3.2. Recyklace panelů .....                      | 94 |
| 6.3.3. LCA akumulátoru.....                        | 95 |
| 7. Závěr.....                                      | 96 |



|  |     |
|--|-----|
| Seznam použité literatury a pramenů: ..... | 98  |
| Seznam obrázků.....                        | 106 |
| Seznam tabulek.....                        | 109 |
| Seznam vzorců.....                         | 110 |

## Seznam zkratek

PV – Fotovoltaický (*Photovoltaic*)

ČR – Česká republika

MPP – Bod maximálního výkonu (*Most power point*)

MPPT – Regulátor sledování maximálního bodu výkonu (*Most power point tracker*)

VA – Voltampérová

AGM – Akumulátory s vázaným elektrolytem (*Absorbent glass mat*)

RAM – Alkalické primární dobíjecí články (*Rechargeable Alkaline Manganese*)

STC – Standartní testovací podmínky (*Standard Test Conditions*)

NOCT – Nominální operační teplota článku (*Nominal Operating Cell Temperature*)

SC – Obvod nakrátko (*Short circuit*)

OC – Obvod naprázdno (*Open circuit*)

BMS – Udržovací systém baterie (*Battery management system*)

CC – Konstantní proud (*Constant current*)

CV – Konstantní napětí (*Constant voltage*)

AC – Střídavý proud (*Alternating Current*)

DC – Stejnoseměrný proud (*Direct current*)

NF – Nízkofrekvenční

VF – Vysokofrekvenční

RCD – Reziduální proudová ochrana (*Residual current protective device*)

PWM – Pulzně šířková modulace (*Pulse width modulation*)

RMS – Efektivní hodnota (*Root mean square*)

AV – Střední hodnota (*Average*)

GMPP – Globální bod maxima (*Global maximum power point*)

SEPIC – (*Single-Ended Primary Inductor Converter*)

FOCV – (*Fractional Open-Circuit Voltage*)

DoD – Hloubka vybití (*Depth of discharge*)

UV – Ultrafialové záření (*Ultraviolet*)

NPV – Čistá současná hodnota (*Net present value*)

IRR – Vnitřní výnosové procento (*Internal Rate of Return*)

LCOE – Cena elektřiny za energii (*Levelized cost of energy*)

FDP – Potenciální vyčerpání fosilních paliv (*Fossil depletion potential*)

GWP – Potenciální globální oteplování (*Global warming potential*)

TAP – Potenciální acidifikace (*Terrestrial acidification potential*)

HTP – Potenciální lidská toxicita (*Human toxicity potential*)

FEP, MEP – Sladkovodní a mořská eutrofizace (*Freshwater and marine eutrophication*)

MEP – Potenciál vyčerpání kovů (*The metal depletion potential*)

BMS – Systém správy baterie (*Battery management system*)



## Úvod

Cílem této práce je rozložit jednotlivé prvky ostrovního solárního systému a u každého z nich popsat základní principy fungování a možné výhody a nevýhody jednotlivých řešení. Ze získaných informací je pak vypracován návrh ostrovního solárního systému s využitím pro veřejné osvětlení, přičemž při dimenzování jednotlivých komponent budou využity znalosti nashromážděné v předchozích částech. Navržený systém není určen pro konkrétní lokaci ani pro konkrétní provedení, jedná se pouze o obecné sestavení komponent určených pro hůře dostupný terén v České republice, například v horských oblastech.

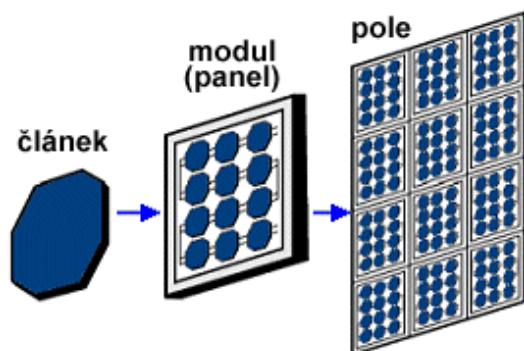
Fotovoltaika zažívá v poslední době velký rozmach po celém světě jako nový zdroj obnovitelné energie. Při reálných aplikacích se spíše využívají síťové systémy, nicméně s klesající cenou panelů a technologií akumulace narůstá počet ostrovních systémů, které jsou zcela soběstačné a vystačí si pouze se sluneční energií. Výhodou ostrovních systémů je navíc jednoduchost a mobilita, například v případě opravy silnice lze umístit semafor zcela napájený fotovoltaickým zdrojem a není třeba řešit přípojku k síti nebo velký pojízdný generátor. Velkou výhodou je také absence síťových ochranných a jističích prvků, ostrovní systémy jsou tak podstatně jednodušší z hlediska lehkého výběru základních součástí a jejich topologie je výrazně srozumitelnější. Při navrhování ostrovního systému je ovšem zapotřebí znát veškerou spotřebu zátěže, energetický sluneční potenciál, ve kterém bude systém provozován, okolní klimatické podmínky a hodnotu akumulace, která bude potřeba pro celoroční provoz. Solární systémy jsou určeny především pro letní výrobu, jinými slovy jejich energetický potenciál je v zimě výrazně nižší než v letních měsících. V současné době je aplikována spíše topologie dvojího napájení, systém je tak po většinu roku soběstačný, v zimních měsících doplňuje nedostatky energie ze sítě. Pokud ovšem musí být systém zcela soběstačný v průběhu celého roku, musí být silně předdimenzovaný jak na akumulaci, tak na výrobu. Jeho základní struktura necílí na maximální efektivitu výroby, ale na maximální soběstačnost, což se projeví například jiným úhlem naklonění panelu a jinými použitými technologiemi. Při navrhování hraje také zásadní roli hledání optima velikosti akumulace a výroby. Je totiž možné nalézt konfiguraci při které hodnota výroby zcela převyšuje hodnotu akumulace, nebo naopak, a systém je v obou případech soběstačný. Přitom ekonomické náklady v obou řešeních mohou být zcela rozdílné z důvodu vysokého rozdílu ceny panelů a baterií.

V případě veřejného osvětlení je nastolen požadavek celoročního provozu nehlédě na špatné vnější podmínky. Při navrhování je třeba postupovat tak, aby systém dokázal spotřebič napájet vždy, proto bude provedena analýza energetického potenciálu lokace pro nalezení minimálních hodnot dopadené energie, které poslouží jako výchozí hodnoty při dimenzování.

Data o dopadené energii jsou brána z NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources, přičemž obsahují veškeré informace o dopadené energii mezi lety 1985 až 2019. Hodnoty dopadené energie je třeba korigovat, neboť nakloněný panel je při sklonu schopný pojmout větší množství energie než vodorovná ozářená plocha. Základem při hledání energetického potenciálu je nalézt návrhový měsíc, kdy hodnota vyrobené energie byla nejmenší, a podle tohoto měsíce následně systém dimenzovat. Je třeba také zohlednit možnost, že měsíc, při kterém byla hodnota dopadené energie nejmenší, nemusí být měsíc, kdy byla hodnota vyrobené energie panelem také nejmenší vzhledem k proměnnému úhlu slunce vůči panelu. Po nalezení návrhového měsíce je pak celý systém sestaven na nepřetržitý provoz v tomto období. Veškeré výpočty, kromě ekonomického zhodnocení, které je vypočteno v excelu, budou provedeny v programu Wolfram Mathematica.

## 1. Solární panel

Solární panel je zařízení, které je schopné přeměnit energii elektromagnetického záření na energii elektrickou. Nejčastěji je složeno z jednotlivých fotovoltaických článků, přičemž nejčastějším typem jsou články na bázi krystalického křemíku. Soustava malých článků na modulu tvoří panel, který je pak skládán do pole.<sup>1</sup>



Obrázek 1 – Složení solárního pole<sup>2</sup>

Důvodem takového uskupení je malé výstupní napětí jednotlivého fotovoltaického článku a jeho malý výkon. Jednotlivé články bývají různorodě pospojovány (paralelně, sériově, paralelně s diodami, ...) podle druhu využití daného panelu. Samotný článek je velmi křehký, a proto se ukládá do modulu, který mu zajistí mechanickou pevnost a odolnost vůči vnějším vlivům.

### 1.1. Stručná historie

Základem technologie solárního článku je souvislost mezi světelnou a elektrickou energií. První krok k objevu této souvislosti učinil 29. července 1839 Alexandre Edmond Becquerel, když pozoroval závislost proudu mezi elektrodami kovu na intenzitě světla.<sup>3</sup> Roku 1887 Heinrich Rudolf Hertz učinil další objev závislosti světla a elektřiny, který spočíval ve vytvoření výboje mezi 2 elektrodami v plynu. Při těchto pokusech bylo prokázáno, že takový výboj se snadněji vytvoří při přítomnosti dopadu ultrafialového záření. Jeden z hlavních milníků nastal poté, co Albert Einstein teoreticky popsal roku 1905 fyzikální princip fotoelektrického jevu. Tato teorie vychází z kvantové hypotézy pojetí světla od německého fyzika Maxe Plancka. Teorie jasně formuluje závislost vyražených elektronů v závislosti na dopadajícím světle. Roku 1916 Robert Andrews Millikan tuto teorii experimentálně potvrdil. Oba tyto vědci poté za své objevy obdrželi Nobelovu cenu. Pro využití vnitřního fotoelektrického jevu je zapotřebí struktury s vlastním polem, která je schopna urychlit volné nosiče náboje za účelem vytvoření rozdílných potenciálů. Tomuto jevu se říká fotovoltaický jev. Pro vytvoření struktury s vlastním polem se využívá přechod P-N. William Grylls Adams a Richard Evans Day roku 1876 poprvé pozorovali vznik fotovoltaického jevu na této struktuře. První solární článek byl zkonstruován roku 1883 americkým vynálezcem Charlesem Frittssem. Tento článek obsahoval selen potažený zlatem, jednalo se tak o velmi málo účinný a drahý zdroj. Účinnost takového článku se pohybovala okolo 1 %, což bylo

<sup>1</sup> KUSALA, Jaroslav. Solární (fotovoltaické) články. CEZ [online]. 2006 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>

<sup>2</sup> KUSALA, Jaroslav. Solární (fotovoltaické) články. CEZ [online]. 2006 [cit. 2018-10-21]. Obrázek ve formátu GIF. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>

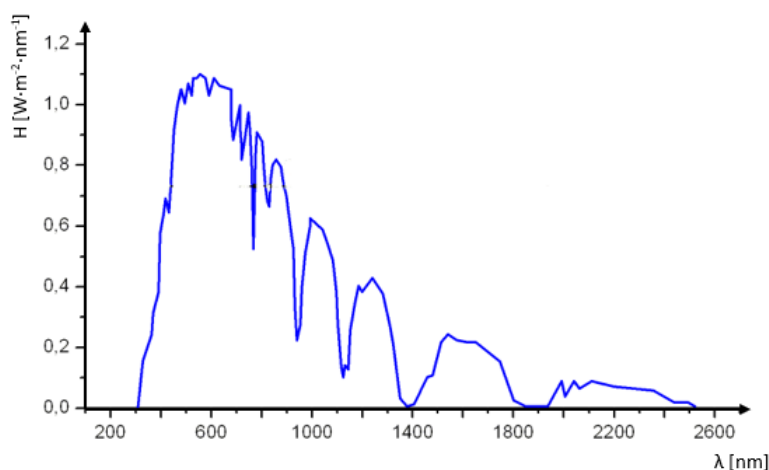
<sup>3</sup> BECHNIK, Bronislav. Stručná historie fotovoltaiky. tzb-info [online], 1.9.2014 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>

zcela nepoužitelné pro reálné aplikace.<sup>4</sup> V roce 1940 si nechal Russell Shoemaker Ohl patentovat první solární článek s technologií PN přechodu na bázi křemíku. Největší rozmach zažila fotovoltaika s příchodem kosmonautiky. Roku 1954 byl v Bellových laboratořích vyroben první článek s účinností okolo 6 %, který byl reálně použitelný pro výrobu elektřiny. Solární panely byly rozumným zdrojem pro vesmírné družice a obstarávaly napájení vědeckých přístrojů a dalších systémů. Postupně se začaly aplikovat solární systémy i na Zemi, nicméně byly drahé na výrobu a stále dosahovaly nízké účinnosti. S postupným boomem hledání alternativních zdrojů nastal velký rozvoj ve výrobě. Panely výrazně snížily svou pořizovací cenu, což mělo za následek rychlou návratnost investice, a tak výrazné navýšení poptávky.

### 1.2. Princip fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek ke svému účelu využívá fotovoltaický jev. Tento jev se vyznačuje rozdílem energetických potenciálů dvou různých struktur spojeného materiálu. Pro vytvoření rozdílu potenciálů je využito fotoelektrického jevu. Vysvětlení samotného principu přeměny energie elektromagnetického záření na elektrickou energii je třeba popsat postupně, pro plné pochopení daného principu. Proto budou v této kapitole nejdříve popsány základy fotoelektrického jevu, struktury P-N přechodu a konečné spojení s fotovoltaickým jevem.

Na zemský povrch působí sluneční záření, které má své určité vlastnosti. Pro specifikaci množství energie dopadené na ozařovaná tělesa se využívají radiometrické veličiny, mezi které patří např. zářivý tok  $\Phi_e$ , zářivost  $I_e$ , ozáření  $G_e$ , a intenzita vyzařování  $H_e$ . Každé těleso o určité teplotě  $T$  (termodynamická teplota) vyzařuje záření o různých vlnových délkách  $\lambda$ . Pro popis části energie jednotlivých složek záření o různých vlnových délkách z celkové energie se využívá pojem spektrální hustota intenzity záření  $H(\lambda, T)$ .



Obrázek 2 – Sluneční spektrum AM 1.5 na povrchu země

Záření dopadající na zemský povrch také obsahuje své energetické spektrum, přičemž jednotlivé složky záření obsahují různou intenzitu. Elektromagnetické záření lze popsat jako vlnu nebo jako částici. Pro objasnění fotoelektrického jevu je třeba přistupovat k vlnění jako proudu částic, tedy proudu fotonů. Takový foton disponuje energií  $E$  podle rovnice (1.1), kde:

<sup>4</sup> Galileo Corporation s.r.o. Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny. CNE [online]. 21.10.2018 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [\text{J}; \text{J}\cdot\text{s}, \text{Hz}; \text{J}\cdot\text{s}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{m}] \quad (1.1)$$

- $h$  je Planckova konstanta ( $h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ).
- $c$  je rychlost světla – ( $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).
- $\nu$  je frekvence fotonu.

Je-li umístěna na povrch země destička, je ozářena dopadajícím zářením. Při dopadu na povrch destičky se část odrazí, zatímco část prostupuje dále do materiálu. Z neodraženého záření část začne interagovat s částicemi hmoty destičky, část prostupuje dále skrz. V případě monochromatického záření a označení neodražené intenzity záření  $\Phi_0$  ve směru  $x$  lze popsat průchod materiálem následující rovnicí.

$$\Phi(x, \lambda) = \Phi_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot x} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}; \text{W}\cdot\text{m}^{-2}, \text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (1.2)$$

Z rovnice (1.2) vyplývá, že intenzita záření v destičce klesá ve směru  $x$  exponenciálně v závislosti na parametru  $\alpha$ , který se nazývá absorpční koeficient. Tento parametr je závislý na vlnové délce a vlastnostech daného materiálu. Zbývá intenzita záření se projeví absorpcí, tedy předáním energie částicím hmoty. Interakce fotonu může být s:

- Volnými elektrony.
- Kmity mřížky.
- Vázanými elektrony.

Pokud dojde k absorpci fotonu s volnými elektrony nebo kmity mřížky dojde k navýšení střední kinetické energie těchto částic, která se projeví navýšením teploty. Pokud dojde k absorpci s vázanými elektrony může u materiálu s kovalentní vazbou dojít k uvolnění této částice. V takovém případě dochází k vnitřnímu fotoelektrickému jevu, který je definován rovnicí (1.3). U polovodičů vzniká pár elektron-díra, který se může volně pohybovat ve struktuře materiálu a přenášet náboj, tento jev se označuje generace nosičů náboje.

$$h \cdot \nu = E_{kmax} + \Phi_{min} \quad [\text{J}\cdot\text{s}, \text{Hz}; \text{J}, \text{J}] \quad (1.3)$$

- $E_{kmax}$  je maximální kinetická energie uvolněného elektronu.
- $\Phi_{min}$  je minimální výstupní práce pro uvolnění elektronu.

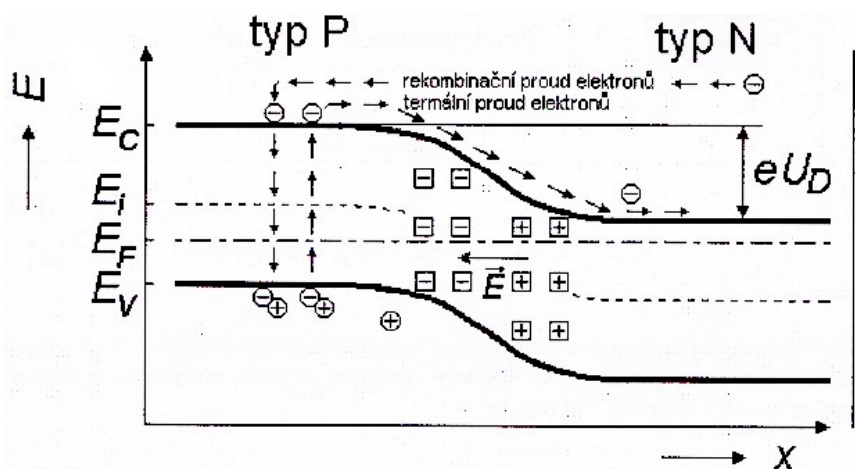
Fotoelektrická rovnice (1.3) platí pouze za podmínky  $h \cdot \nu \geq \Phi_{min}$ , tedy energie fotonu musí být dostatečně velká pro uvolnění elektronu z vazby. Jedním z hlavních aspektů tohoto jevu je fakt, že energie elektronu je závislá pouze na frekvenci dopadajícího záření, nikoliv však na intenzitě. Intenzita ovlivňuje pouze počet generovaných uvolněných elektronů. V případě že energie fotonu je mnohonásobně vyšší, než je minimální potřebná práce pro uvolnění elektronu dochází k interakci přebytečné energie s mřížkou, což se projeví zvýšením teploty. Tento jev se nazývá termalizace.

Uvolněný elektron se opět může vrátit do svého původního vázaného stavu ve vazbě. Jedná se o opačný jev generace, který se označuje rekombinace. V ustáleném stavu dochází k dynamické rovnováze generace a rekombinace, proto pro vytvoření rozdílu energetických potenciálů je třeba využít struktury s vlastním elektrickým polem a k tomu se využívá P-N přechod.

Samotný fotovoltaický článek se dá v zásadě prezentovat jako polovodičová dioda. Nejdříve je třeba si ujasnit vlastnosti P-N přechodu bez zásahu vnějšího vlivu (záření). P-N přechod



je bariéra mezi nevlastními polovodiči typu P a typu N. Polovodič typu P je křemík dotovaný trojmocným prvkem, což má za následek vytvoření „pomocné“ hladiny v zakázaném pásu blíže k valenčnímu. Z důvodu dotace má přebytek děr a jeví se tedy jako kladný (Positive). Polovodič typu N je dotován 5-ti mocným prvkem a má tak přebytek volných elektronů. Jeví se tedy záporně (Negative) a vytváří energetickou hladinu blízko u vodivostního pásu. Spojením těchto nevlastních polovodičů dostaneme oblast zvanou P-N přechod. Při bezprostředním propojení začnou volné elektrony z N oblasti rekombinovat s děrami v P oblasti. Při tomto procesu rekombinované majoritní nosiče odkryly náboj iontů příměsí. Tyto ionty jsou vázané struktury v krystalové mřížce a nemohou se tak pohybovat. Vznikla tedy oblast, která nábojem iontů příměsí vytvořila elektrické pole. Toto pole brání přechodu dalších volně nabitých částic, vytváří tak potenciálovou bariéru. Výsledkem tohoto procesu je rozdělení na 3 oblasti, přičemž prostřední oblast (P-N přechod) se jeví jako místo bez volných nosičů náboje.<sup>5</sup>



Obrázek 3 – Neozářený P-N přechod<sup>6</sup>

Celá soustava neztrácí svůj náboj, nachází se v rovnovážném stavu, tedy ve stavu elektricky neutrálním. Připojením voltmetru na konce P a N bychom dostali nulové napětí. Nicméně je třeba si uvědomit, že tento stav není rovnováhou statickou, ale dynamickou. Tím je míněno, že celek je neutrální, tedy v rovnovážném stavu, nicméně procesy generace a rekombinace elektronů a děr stále probíhají. Některé elektrony mohou potenciálovou bariéru překonat a následně v určité oblasti rekombinovat, vzniká tak rekombinační proud. Reakcí je vznik párů volných elektronů a děr. Minoritní nosiče náboje mají opačnou polaritu než majoritní, a proto je vzniklé pole urychluje přes P-N přechod. Proud elektronů (majoritních) z typu N do P je kompenzován proudem elektronů (minoritních) z P do N. Vzniká nám tedy proud, který nazýváme termální. Pro díry je pak situace analogická. Tyto proudy se vzájemně kompenzují a vytváří tak stabilitu.<sup>7</sup>

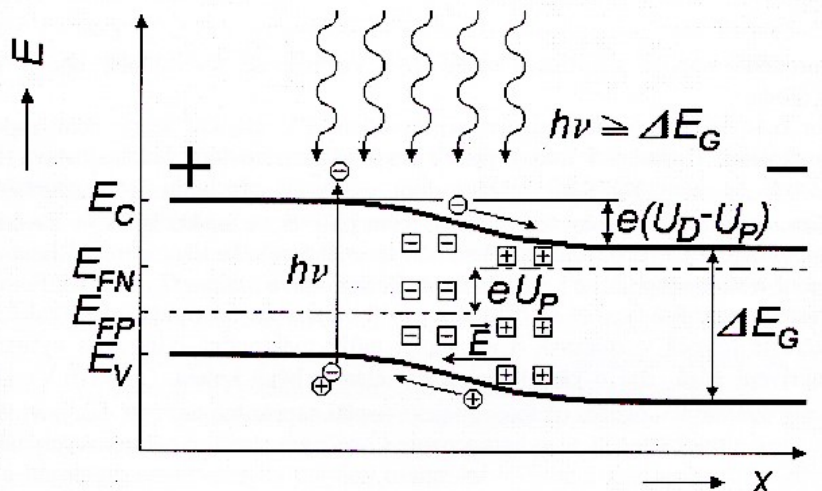
Při osvětlení přechodu P-N nastane porucha rovnovážného stavu. Část fotonů se absorbuje, a dodá tak potřebnou energii pro generaci páru elektron-díra. Tyto volné nosiče náboje difundují k P-N přechodu. V přechodu jsou uvolněné elektrony usměřňovány proti směru vnitřního pole, analogicky díry po směru. Lze tedy říct, že typ N se „plní“ elektrony, zatímco typ P děrami. V důsledku tohoto jevu klesá potenciálová bariéra P-N přechodu, přičemž dochází k vychýlení Fermiho hladin a ke vzniku fotovoltaického jevu. Mezi jednotlivými

<sup>5</sup> LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.

<sup>6</sup> LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Poznámka 5

<sup>7</sup> LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Poznámka 5

polovodiči (typ P, typ N) vzniká malé napětí. Pro krystalický křemík se jedná o hodnotu okolo 0,6 V.<sup>8</sup>



Obrázek 4 – Ozářený P-N přechod, rozdíl  $eU_p$  ukazuje vychýlení hladin<sup>9</sup>

Při difundování nerovnovážných nosičů náboje k P-N přechodu mohou tyto nosiče cestou rekombinovat. Pokud dojde k rekombinaci před dosažením P-N přechodu, nemají tyto nosiče možnost podílet se na vzniku napětí mezi oblastmi, a vznikají tak rekombinační ztráty. Proudová hustota je tak tvořena nosiči, které byly urychleny oblastí přechodu P-N.<sup>10</sup>

$$J_{PV}(\lambda) = J_{PVN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) + J_{PVPN}(\lambda) \quad [A \cdot m^{-2}; A \cdot m^{-2}, A \cdot m^{-2}, A \cdot m^{-2}] \quad (1.4)$$

- $J_{PVN}$  je proudová hustota v N oblasti.
- $J_{PVP}$  je proudová hustota v P oblasti.
- $J_{PVPN}$  je proudová hustota v PN oblasti.

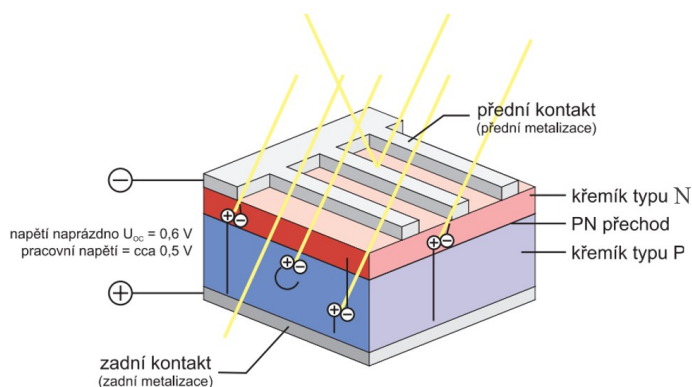
Jednoduché provedení takového článku může být realizováno tenkou křemíkovou destičkou na bázi krystalického křemíku. Jedná se o nejrozšířenější a nejznámější typ článku, přičemž články na bázi jiného polovodiče mají analogicky podobný princip. Na křemíkové destičce je vytvořen P-N přechod pomocí difúze. Na straně N jsou realizovány přední kontakty tak, aby co nejméně bránili zastínění, na straně P je zadní kontakt. Tento jednoduchý model by fungoval podle popsaných principů, nicméně by dosahoval malé účinnosti v důsledku vysokých rekombinačních a optických ztrát. Při takovém konceptu dochází k velkému odrazu slunečních paprsků. Pro zamezení odražení světla se aplikují různé designy a technologie za účelem dosažení maximální možné pohltivosti pro maximální optickou účinnost. Příkladem je antireflexní vrstva a texturace povrchu, které tvoří základní funkci minimalizaci odrazu elektromagnetického vlnění. Rekombinační ztráty se minimalizují optimalizací designu struktury destičky, čistotou materiálu a výrobního procesu.<sup>11</sup>

<sup>8</sup> KUSALA, Jaroslav. Fotovoltaický jev. CEZ [online]. 2006 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>

<sup>9</sup> LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Poznámka 5

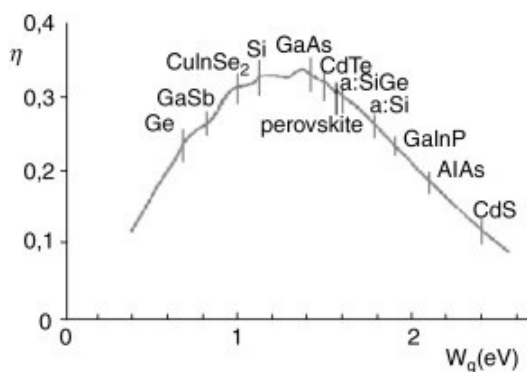
<sup>10</sup> MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaický jev a parametry fotovoltaického článku. O energetice [online]. 2017 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/polovodiče-fotovoltaicky-jev-parametry-fotovoltaickeho-clanku/>

<sup>11</sup> LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Poznámka 5



Obrázek 5 – Jednoduchá konstrukce solárního článku<sup>12</sup>

Je-li fotoelektrický jev podmíněn dostatečnou energií fotonu pro uvolnění elektronu z vazby, a tedy následnou generací páru elektron-díra, je třeba brát při úvahách účinnosti přeměny energie elektromagnetického vlnění na energii elektrickou, jaká je minimální výstupní práce struktury materiálu pro uvolnění elektronu z vazby. Dalším aspektem je množství generovaných nerovnovážných nosičů náboje při určité vlnové délce, jinými slovy, jak dokáže daný materiál využít intenzitu záření na dané vlnové délce pro generaci těchto nosičů. V případě čistého krystalického křemíku je nutno dodat energii alespoň 1,1 eV<sup>13</sup>, tedy lze využít pouze záření v oblasti pro které platí přibližně  $\lambda \leq 1100$  nm. Za předpokladu ideálního PV článku s ideálním přechodem bez parazitního odporu, lze určit teoretickou maximální možnou účinnost přeměny, která se nazývá Quasier–Shockley limit. Ten vychází z předpokladu, že veškeré záření s dostatečnou energií je ve struktuře přeměněno na generaci elektron-díra. Lze tedy určit jakou maximální možnou energii je možné dostat ze slunečního spektra.<sup>14</sup>



Obrázek 6 – Závislost maximální možné účinnosti materiálů na energii záření<sup>15</sup>

Jednou z možností, jak obejít tento limit, je použití tandemové struktury článku, tedy použití vícero přechodů různých materiálů s optimalizovanými energetickými přechody. Část

<sup>12</sup> MOTLÍK, Jan et al. *OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE a možnosti jejich uplatnění v České republice* [online].

Praha: ČEZ, 2007 [cit. 2018-10-27]. ISBN ISBN 978-80-239-8823-9. Dostupné z:

[https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne\\_zdoje\\_energie\\_a\\_moznosti\\_jejich\\_vyuziti\\_pro\\_cr.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf)

<sup>13</sup> POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. *Konstrukce a výroba fotovoltaických článků*. ELEKTRO [online]. 2010(3), 6-9 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>

<sup>14</sup> LETCHER, Trevor M. a Vasilis M. FTHENAKIS. *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems: With Special Focus on Photovoltaic Systems* [online]. Academic Press, 2018 [cit. 2019-06-08]. ISBN 9780128114803. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=tU84DwAAQBAJ&pg=PA169&lpg=PA169&dq=quasier+shockley+limit&source=bl&ots=7i8ZFjFN2Z&sig=ACfU3U110kMOvc-bmCwCiN9d\\_K1ji9S7Pw&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKewja96idfiAhWEzaQKHWjNDGcQ6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q=quasier%20shockley%20limit&f=false](https://books.google.cz/books?id=tU84DwAAQBAJ&pg=PA169&lpg=PA169&dq=quasier+shockley+limit&source=bl&ots=7i8ZFjFN2Z&sig=ACfU3U110kMOvc-bmCwCiN9d_K1ji9S7Pw&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKewja96idfiAhWEzaQKHWjNDGcQ6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q=quasier%20shockley%20limit&f=false)

<sup>15</sup> LETCHER, Trevor M. a Vasilis M. FTHENAKIS. *Poznámka 14*

spektra se je tak absorbována na jedné vrstvě materiálu, zbylá je využita na další vrstvě nebo vrstvách odlišných materiálů. Tímto lze Quasier–Shockley limit článku výrazně zvýšit, nicméně stále platí, že se jedná o teoretickou účinnost, reálné aplikace tandemových struktur dosahují mnohých komplikací, které jejich reálnou účinnost výrazně snižují.

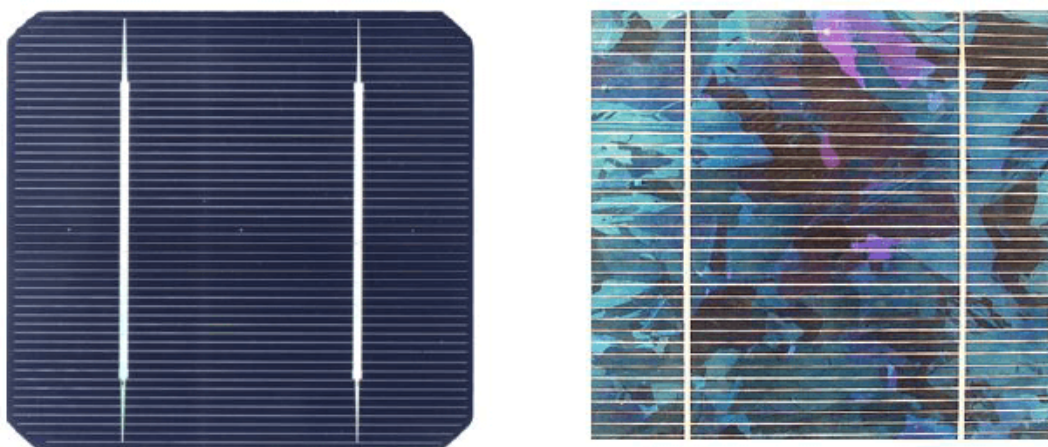
### 1.3. Typy článků

Solární články dnes obsahují nepřeberné množství technologií a trendů, proto je těžké je obecně generalizovat do určitých typů, skupin a podskupin. V zásadě se dají rozdělit chronologicky, tedy podle postupu jejich vývoje a konstrukce. Následující rozdělení není nijak závazné a není obecně platné.

#### 1.3.1. Fotovoltaické články první generace

Za články první generace se označují objemové materiály, mezi které se řadí polykrystalický a monokrystalický křemík. Účinnost takového článku se pohybuje okolo 16 % až 25 %<sup>16</sup>. Tato technologie je založená na bázi krystalického křemíku a tvoří hlavní strukturu většiny vyrobených solárních panelů. Samotná výroba článků má velkou spotřebu polovodičových materiálů a klade vysoké technologické nároky na použitá zařízení během dílčích procesů výroby. Křemík je snadno dostupný a hojně zastoupený prvek v zemské kůře, avšak při výrobě těchto článků jsou kladeny vysoké požadavky na jeho čistotu. Technologické procesy čištění křemíku jsou energeticky a technologicky velmi náročné, a z toho důvodu je čistý křemík relativně drahou surovinou.

Na začátku výroby hutní křemík projde redukcí uhlíkem v obloukové peci. Takový křemík má čistotu až 99 %, nicméně to je pro reálné aplikace silně nedostačující, proto je podle typu článku dále čištěn určitou metodou.



Obrázek 7 – Provedení monokrystalického a polykrystalického článku<sup>17</sup>

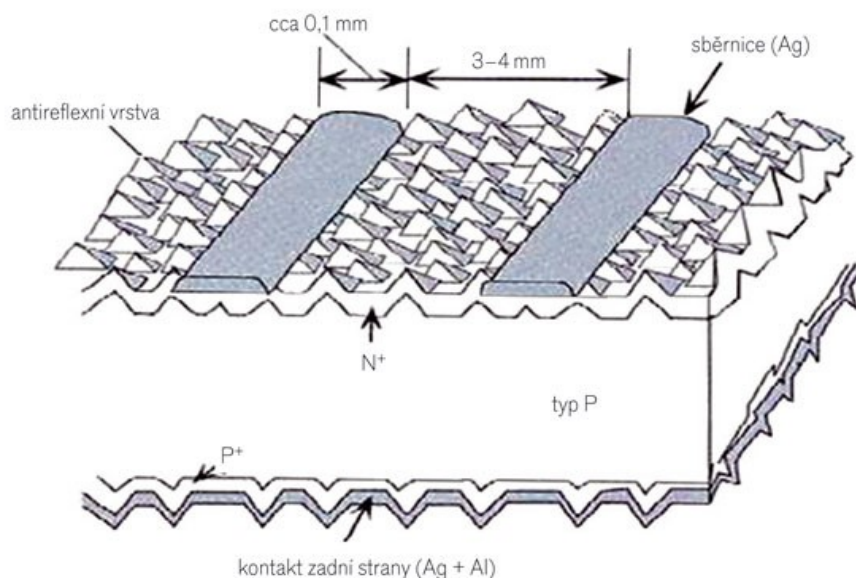
**Monokrystalický** čistý křemík se nejčastěji vyrábí Czochralského metodou, kdy je na malém zárodku postupně tažen celý krystal. Výsledkem je monokrystalický ingot s vysokou čistotou. Jednotlivý ingot je posléze příčně řezán na destičky. Řezání se provádí drátem a je

<sup>16</sup> TRENDS 2018 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2017. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme [online]. IEA PVPS, 2018 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=92>

<sup>17</sup> MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články. In: O Energetice [online]. 2017 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky/>

možné při tomto procesu ztratit až 50 % materiálu. S postupným rozvojem technologií je možné řezat jednotlivé destičky se stále menší tloušťkou, což vede k úspoře materiálu a levnější ceně.<sup>18</sup> Samotný krystal tvoří pak základ jednoho samotného článku. Celá metoda je poměrně dlouhá a energeticky náročná. Klade vysoké požadavky na technologii čištění.<sup>19</sup> Výhodou takového článku je pak pomalejší degradace, větší účinnost a homogenní vzhled daného panelu.<sup>20</sup>

**Polykrystalické články** jsou vyráběny odléváním roztaveného křemíku do forem, kde se řízeně nechají chladnout, za účelem vytvoření co největších zrn ve struktuře<sup>21</sup>. To je z důvodu eliminování rekombinačních ztrát, které na hranici zrn vznikají. Mezi možný typ výroby se řadí Bridgmanova metoda. Články jsou tvořené jednotlivými strukturami atomů křemíku. Výhodou takového procesu je snížení obsahu použitého materiálu a jednodušší proces výroby. Technologie lití je mnohem méně energeticky náročná a výrazně levnější než metoda tažení monokrystalu. Nevýhodou článků byla výrazně nižší účinnost, nicméně ta již je s novými technologiemi srovnatelná s monokrystalickým článkem<sup>22</sup>. Výhodou je pak také fakt, že polykrystal má lepší energetické vlastnosti při dopadu difúzního světla (například při nepříznivé oblačnosti).<sup>23</sup>



Obrázek 8 – Struktura křemíkového článku<sup>24</sup>

<sup>18</sup> MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články. O energetice [online]. 2017 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky/>

<sup>19</sup> MORAVEC, Jan. Poznámka 18

<sup>20</sup> Jaký je rozdíl mezi monokrystalickým a polykrystalickým panelem? Joyce-energie [online]. Brno: JOYCE ČR [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: [https://www.joyce-energie.cz/files/joyce-energie.cz/files/Mono\\_poly\\_rozdl.pdf](https://www.joyce-energie.cz/files/joyce-energie.cz/files/Mono_poly_rozdl.pdf)

<sup>21</sup> POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Poznámka 13

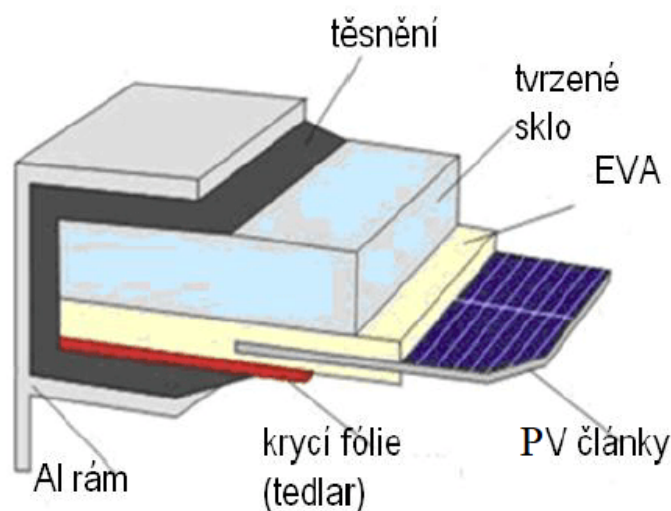
<sup>22</sup> MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články. O ENERGETICE [online]. 2017 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky/>

<sup>23</sup> CHROBÁK, Pavel. Alternativní zdroje energie, solární energie. Posterus [online]. 2012, 5(12), 1-6 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=14223&output=pdf>

<sup>24</sup> BENDA, Vítězslav. Fotovoltaické články – historie a současné trendy vývoje. In: TZB HAUSTECHNIK [online]. 2010 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-asoucasne-trendy-vyvoje>

Při samotném výrobním procesu monokrystalického nebo polykrystalického článku jsou jednotlivé nařezané destičky chemicky opracovávány, poté je pomocí difúze vytvořen přechod P-N ve vzdálenosti 0,2 – 0,5  $\mu\text{m}$  od povrchu. Dále je nanášena antireflexní vrstva, která má za úkol minimalizovat odraz světla a dosáhnout tak co největší možné pohltivosti záření. Pro vytvoření sběrných kontaktů se nanáší nejčastěji sítotiskem na antireflexní vrstvu vodivá pasta ze stříbra, která při následném vysoušení odstraní antireflexní vrstvu a vytvoří tak ohmický kontakt s článkem. Z druhé strany je připojen zadní kontakt, který se skládá nejčastěji ze směsi stříbra a hliníku. Jednotlivé články se pak nejčastěji spojují sériově a vytvořené řetězce paralelně (dle typu užití) a následně se vkládají do modulů, které slouží jako ochrana proti vnějším vlivům. Na tyto moduly jsou kladeny mnohočetné nároky, neboť celkový solární panel musí mít vysokou životnost a odolnost proti atmosférickým vlivům, musí být dostatečně průhledný na aktivní straně a také by měl dobře odvádět teplo, které článek v sobě akumuluje. Moduly jsou opatřeny na zadní straně svorkovnicí, na které jsou vyvedeny vývody jednotlivých sběrnic.<sup>25</sup>

Články jsou působením tepla zataveny v průhledné fólii EVA (ethylen-vinyl-acetát). Nejčastější poruchou těchto panelů je koroze těchto fólií, a proto pro zlepšení životnosti se dají použít jiné materiály než EVA, například polysiloxanový gel<sup>26</sup>. Přes těsnění může být pak soustava uchycena rámem složeného nejčastěji z hliníku. Zadní vrstva je pak nejčastěji tvořena plastem, někdy sklem.<sup>27</sup>



Obrázek 9 – Konstrukce PV modulu<sup>28</sup>

První generace článků tvoří na trhu podíl okolo 97 %, a to i přes dražší energetické výrobní náklady. Tato technologie se stále zdokonaluje a postupně zlevňuje. Její největší výrobní náklady jsou na materiál čisté Si destičky. Potenciál této technologie tak silně závisí na technologiích čištění křemíku a jeho následného nařezání při minimálních ztrátách materiálu. Mezi největší výhodu se řadí vysoká účinnost a životnost článků.<sup>29</sup>

<sup>25</sup> BENDA, Vítězslav. Fotovoltaické články – historie a současné trendy vývoje. TZb HAUSTECHNIK [online]. 2010 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-asoucasne-trendy-vyvoje>

<sup>26</sup> POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Fotovoltaické panely nové generace. Energie kolem nás [online]. 2017 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://ekn.cz/fotovoltaicke-panely-nove-generace/>

<sup>27</sup> MORAVEC, Jan. Poznámka 22

<sup>28</sup> MORAVEC, Jan. Poznámka 22

<sup>29</sup> CHROBÁK, Pavel. Poznámka 23

### 1.3.2. Fotovoltaické články druhé generace

Výrobci se stále snaží snížit výrobní ceny PV panelu, a proto investují do výzkumu nových materiálů a technologií. Vysoká cena klasického čistého krystalického křemíku vedla k hledání alternativy za tento prvek. Výsledkem vývoje jsou tenkovrstvé fotovoltaické články, které řadíme mezi články druhé generace. Alternativou krystalického křemíku jsou materiály, které mají vysokou absorpční schopnost a jsou nanášeny na substrát, kde tvoří mikro vrstvy. Mezi nejčastěji používané prvky se řadí:

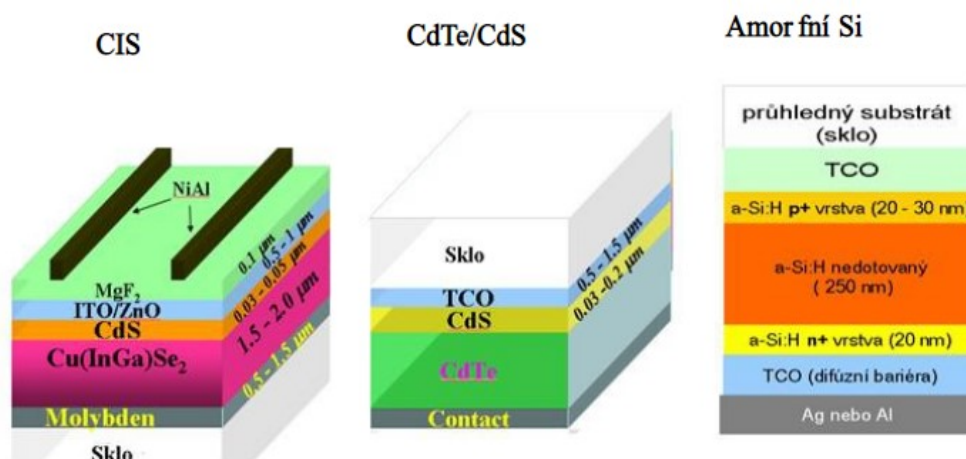
- a:Si (amorfní křemík),
- a:Ge (amorfní germanium).

Dále se využívají směsi různých polovodičů jako je Cu, In, S, Se, Ga. Hlavní aplikované směsi jsou:

- CdTe (kadmium – telur),
- CuInSe<sub>2</sub> (měď – indium – selen),
- CIS, CIGS (měď – indium – galium – selen).<sup>30</sup>

Na rozdíl od článků první generace většinou nejsou kompletovány jednotlivé články do modulů, ale rovnou tvoří celý modul.<sup>31</sup> Základem takového modulu je nosná podložka (substrát), která bývá nejčastěji ze skla, ale může být i z textilie, kovu nebo plastu.<sup>32</sup>

Postup vytváření panelu může být proveden například pro CdTe následovně. Na podložku se nanáší vrstva TCO (SnO<sub>2</sub>, ITO, ZnO), což jsou oxidy, které mají vodivé vlastnosti. Tato vrstva má za úkol odvádět proud a zároveň slouží jako antireflexní prvek. Kvalita dané vrstvy je silně závislá na metodě, jakou byla nanášena. Mezi nejčastější metody patří napařování, napařování nebo chemické depozice (CVD techniky). Po vypálení určitých částí oxidu se nanáší tenké vrstvy obvykle chemickou depozicí. Následně jsou naneseny vodivé kontakty, které jsou spečeny obvykle do sériového řazení. Na spodní straně je pak nainstalována krycí vrstva (EVA, plasty nebo sklo).<sup>33</sup>



Obrázek 10 – Typy struktur tenkovrstvých článků na různých polovodičích<sup>34</sup>

<sup>30</sup> BENDA, Vítězslav. Poznámka 25

<sup>31</sup> BENDA, Vítězslav. Poznámka 25

<sup>32</sup> CHROBÁK, Pavel, Poznámka 23

<sup>33</sup> BENDA, Vítězslav. Poznámka 25

<sup>34</sup> Fotovoltaický jev, fotovoltaické články a jejich charakteristiky. In: Slideplayer [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3370736/>

Tyto výsledné panely mají mnohé výhody a nevýhody. Díky jejich konstrukci se v nich tolik neakumuluje teplo a dosahují tak vyšších účinností v letních měsících než klasické panely. Panel je dobře chráněn z obou stran, a je tak velmi odolný. Podobně jako polykrystalické články neztrácí svůj výkon při náhlém poklesu svitu, a udržují si tak svoji stabilitu. Celkové panely jsou navíc stavěné jako celky a nevyžadují vytváření mnohých vodivých spojení. Také mají možnost výroby na ohebném substrátu a mohou být tak lépe aplikovány spotřebitelem.<sup>35</sup> Tyto články sice silně šetří materiál, nicméně jejich výroba je technologicky náročná. Potenciálně jsou levnější na výrobu než klasické krystalické články. Mezi komerčně úspěšné lze zařadit CdTe, CIGS a CIS technologie. V roce 2017 dosáhla technologie CdTe v laboratorních podmínkách 21 % účinnosti,<sup>36</sup> nicméně velmi rychle časem degradují, proto je třeba zvážit při jakých aplikacích mají navrch oproti klasickým článkům první generace.<sup>37</sup>

### 1.3.3. Fotovoltaické články třetí generace

Při výběru solárního panelu je třeba zohlednit cenu, výkon, ale je třeba také brát ohled na účinnost. Při vysoké ceně parcel je třeba panel dimenzovat s vyšší účinností, aby byl prostor maximálně využit. Proto přichází na trh články třetí generace, které se soustředí hlavně na vývoj z hlediska účinnosti a aplikování nových technologií a materiálů s perspektivními vlastnostmi. Druhů technologií této generace je celá řada, mezi nejznámější patří vícevrstvé, koncentrátorové, organické a termofotonické články. Často se sem také řadí oboustranné články, které se snaží využít vlnění odražené od povrchu umístění.<sup>38</sup>

Vícevrstvé neboli tandemové články se skládají z jednotlivých tenkých vrstev, přičemž každá vrstva si bere za cíl přeměnit určitou část spektra. Tyto články jsou vyrobeny tak, aby záření s menší energií bylo absorbováno na vnější vrstvě, zatímco záření s větší energií (v jiné spektrální oblasti) prošlo skrze vrstvu na další vrstvu uzpůsobenou pro absorbování tohoto záření. Jejich výroba je ekonomicky náročná a jejich pořizovací cena je až 3x větší oproti klasickým panelům.<sup>39</sup>

Koncentrátorové panely využívají optiku pro maximalizaci koncentrace slunečního svitu. Často mísí technologii optiky a vícevrstvých článků. Sestava pak obsahuje nejčastěji Fresnelovu čočku nebo klasické zrcadlo a má za úkol koncentrovat záření na článek, nebo rozdělit záření na jednotlivé složky spektra, přičemž tyto složky budou posléze absorbovány na odlišných typech polovodičů. Mezi nejnovější trendy patří miniaturní články se zabudovanými čočkami v mikro měřítku. Tato technologie dokáže pracovat při přímém ozáření článku až s 44,5 % účinností, nicméně se jedná o velmi drahou a zatím nákladnou technologii výroby.<sup>40</sup>

---

<sup>35</sup> Hlavní výhody amorfních (CIS) fotovoltaických panelů. In: Solární novinky [online]. 2010 [cit. 2018-10-30].

Dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/index.php?rs=4&rl=2010012003&rm=15:29>

<sup>36</sup> TRENDS 2018 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS. Poznámka 16

<sup>37</sup> POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Poznámka 13

<sup>38</sup> CHROBÁK, Pavel. Poznámka 23

<sup>39</sup> Galileo Corporation s.r.o. Poznámka 4

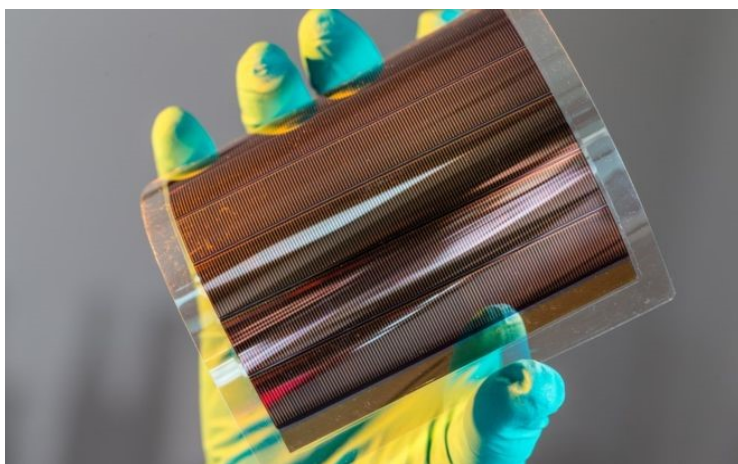
<sup>40</sup> Scientists Design Solar Cell that Captures Nearly All Energy of Solar Spectrum. Media relations [online]. 2017, 1 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <https://mediarelations.gwu.edu/scientists-design-solar-cell-captures-nearly-all-energy-solar-spectrum>





Obrázek 11 – Oboustranný solární panel s pohyblivým automatickým stojanem a koncentrátorem záření<sup>41</sup>

Organické fotovoltaické články jsou moderním směrem vývoje aplikací organických struktur v anorganickém prostředí. Berou si za cíl nahradit klasický drahý křemík organickými látkami. Tyto články jsou tvořeny materiály na bázi uhlíku a jsou nanášeny formou tenkých vrstev na transparentní fólii. Po aplikaci kovových elektrod z obou stran se sestava překryje polymerní fólií jako ochrana proti vnějším vlivům. Vodivé elektrody mohou být realizovány i z vodivých polymerů, proto jsou někdy tyto články označovány jako plastové.<sup>42</sup> Díky tomu může celý koncept vznikat na 3D tiskárně, proto je jeho výroba značně levnější a rychlejší. Celý panel je pak flexibilní, lehký a může být velmi malý, což otevírá další možnosti pro reálné aplikace. Účinnost těchto panelů se pohybuje mezi 15-20 %, přičemž technologický pokrok toto číslo stále zvyšuje. Nevýhodou těchto panelů je vysoká tendence rychlého stárnutí a ztracení svých elektrických vlastností.<sup>43</sup>



Obrázek 12 – Organický solární modul se šesti články<sup>44</sup>

<sup>41</sup> POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Fotovoltaické panely nové generace. In: Ekn [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <http://ekn.cz/fotovoltaicke-panely-nove-generace/>

<sup>42</sup> WEITER, Martin. Vývoj a aplikace organických fotovoltaických systémů. Chempoint [online]. 2011 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/weiter1>

<sup>43</sup> MCGRATH, Matt. Organic solar cells set 'remarkable' energy record. BBC [online]. 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/science-environment-45132427>

<sup>44</sup> MCGRATH, Matt. Organic solar cells set 'remarkable' energy record. In: BBC [online]. 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/science-environment-45132427>

I v těchto panelech se využívá technologie vícevrstvých struktur, kde každá absorbuje jinou část spektra, a způsobuje tak vyšší účinnost. Jako nejperspektivnější organické články se zatím jeví dvouvrstvé články. Bohužel potenciál v globálních energetických aplikacích těchto panelů zatím nedosahuje takových hodnot jako u klasických křemíkových panelů.

### 1.4. Elektrické vlastnosti fotovoltaického panelu

#### 1.4.1. Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

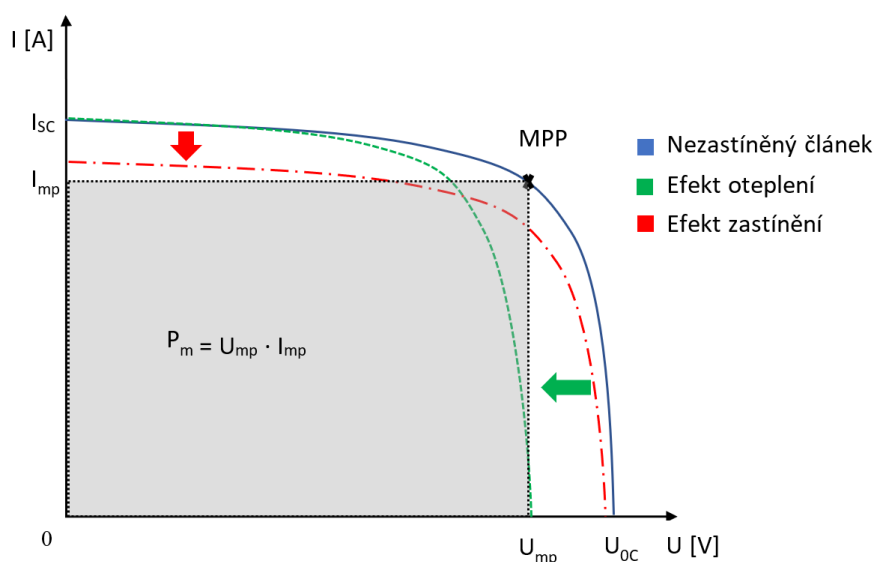
Samotný fotovoltaický článek má svou typickou VA charakteristiku, ze které lze vyčíst jakými elektrickými parametry (výkon, napětí, proud, ...) článek disponuje. Vzhledem k faktu, že výkon článku závisí především na ozáření a oteplení panelu, určují se tyto parametry při standardních testovacích podmínkách (STC), při kterých platí:

- Teplota článku je 25°C.
- Ozáření je 1000 W·m<sup>-2</sup>.
- Koeficient atmosférické masy je 1.5 (AM).

Mezi základní elektrické parametry článku při STC se řadí:

- I<sub>SC</sub> – maximální hodnota proudu zvaná zkratový proud.
- U<sub>OC</sub> – maximální hodnota napětí zvaná napětí naprázdno.
- P<sub>m</sub> – maximální hodnota výkonu.
- I<sub>mp</sub> – hodnota proudu v bodě MPP.
- U<sub>mp</sub> – hodnota napětí v bodě MPP.

Maximální možný výkon P<sub>m</sub>, který z článku můžeme při vnějších podmínkách naměřit, je definován součinem proudu I<sub>mp</sub> a napětí U<sub>mp</sub>. Při těchto parametrech je splněna podmínka maximálního výkonu (a tedy i ploše) v bodě nazývaném MPP na VA křivce.<sup>45</sup>



Obrázek 13 – Voltampérová charakteristika článku při různých podmínkách a maximální výkon

Na charakteristikách viz obrázek 13 lze pozorovat negativní vnitřní a vnější děje silně ovlivňující VA charakteristiku článku. Při zastínění článku dochází k menší generaci

<sup>45</sup> MORAVEC, Jan. Poznámka 10

volných nosičů náboje, a tak k výraznému poklesu generovaného proudu a zároveň dochází k logaritmickému poklesu napětí naprázdno. Při oteplení se snižuje výstupní napětí a mírně se zvyšuje hodnota generovaného proudu.

Dalším parametrem článku patří činitel plnění, který definuje poměr vyprodukovaného výkonu v bodě MPP vůči výkonu při zkratovém proudu a napětí naprázdno. Z tohoto údaje lze určit jakou má článek jakost nehledě na jeho výkon.

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad [-; V, A, V, A] \quad (1.5)$$

Elektrická referenční účinnost článku je definována při STC:

$$\eta_{STC} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{dop}} \quad [-; V, A, W] \quad (1.6)$$

- $P_{dop}$  je faktický výkon záření dopadený na článek.<sup>46</sup>

Jednotlivé články jsou řazeny nejčastěji v sérii pro vytvoření pracovního napětí, kde tvoří řetězec. Modul pak obsahuje několik těchto řetězců. VA charakteristika modulu je tak tvořena superpozicí jednotlivých VA charakteristik článků, takže i v případě modulu jsou určovány stejné parametry při STC jako pro článek. Nicméně protože jsou články chráněny od okolí konstrukcí modulu, určuje se ještě parametr NOCT, který je definován při:

- Teplotě okolí 20°C.
- Ozáření na povrchu článku 800 W·m<sup>-2</sup>.
- Rychlosti větru 1 m·s<sup>-1</sup>.

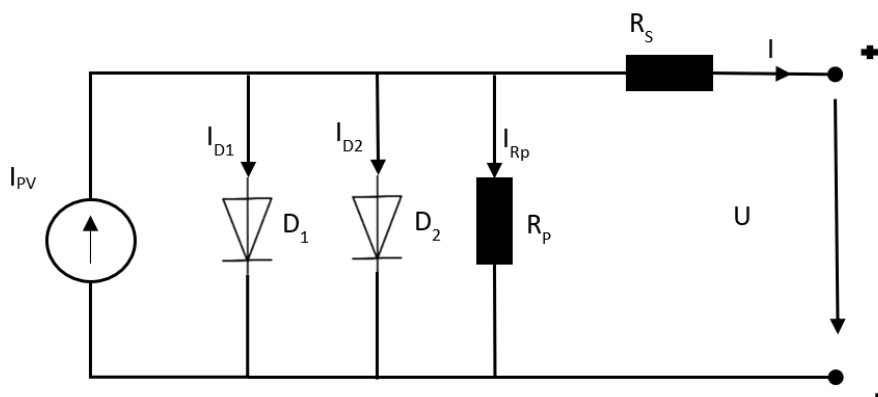
### 1.4.2. Náhradní schéma článku

Za fotovoltaický článek považujeme zdroj proudu, který je ovlivněn parametry vnějšího prostředí (světlo, teplota, ...) a vnitřního (vnitřní odpor, svod, ...). Pro elektrické vlastnosti je definováno náhradní schéma článku, díky kterému lze odvodit vztahy pro jednotlivé elektrické veličiny.

- Zdroj proudu reprezentuje indukovaný proud článku  $I_{PV}$ , který je závislý na ozáření, teplotě a použitém materiálu článku při výrobě.
- Paralelní dioda  $D_1$  simuluje fyzikální jevy v polovodiči, které závisí opět na použitém materiálu a teplotě.
- Dioda  $D_2$  simuluje rekombinační procesy v prostoru nabitých částic.
- Paralelní odpor  $R_p$  reprezentuje ztráty svodovým proudem článku, je tedy závislý na kvalitě provedení. Čím vyšší hodnota  $R_p$ , tím je odebíraný celkový proud  $I$  vyšší a článek má tak tvrdší VA charakteristiku v oblasti malých napětí. Nižší hodnota způsobuje pokles  $U_{OC}$ .
- Sériový odpor  $R_s$  reprezentuje dílčí odpor jednotlivých částí konstrukce článku. Tím je myšleno např. odpor báze, kontakt kov-polovodič a odpor sběrnice. Čím je menší, tím má „protáhlejší“ tvar VA charakteristiky v oblasti vyšších napětí. Vyšší hodnota se projeví snížením  $I_{SC}$ .<sup>47</sup>

<sup>46</sup> MORAVEC, Jan. Poznámka 10

<sup>47</sup> FEMIA, Nicola a etc. Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2013]. ISBN 9781466506909.



Obrázek 14 – Náhradní dvou diodové schéma fotovoltaického článku

Výstupem článku je napětí  $U$  a proud  $I$ , pro které platí následující rovnice. Výstupní proud  $I$  je složen z přírůstku zdroje proudu a ztrát na paralelních složkách. Po dosazení podle Kirchhoffových zákonů:

$$I = I_{PV} - I_{D1} - I_{D2} - I_{RP} \quad [A; A, A, A, A] \quad (1.7)$$

Po vyjádření jednotlivých členů:

$$I = I_{PV} - I_{sat1} \cdot \left( e^{\frac{U+I \cdot R_s}{\eta_1 \cdot U_T}} - 1 \right) - I_{sat2} \cdot \left( e^{\frac{U+I \cdot R_s}{\eta_2 \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1.8)$$

- $\eta_1, \eta_2$  jsou faktory ideálnosti diody ( $1 \leq \eta_1 \leq 2, \eta_2 \geq 2$ ).<sup>48</sup>
- $I_{sat1}, I_{sat2}$  jsou saturační proudy článkem.
- $U_t$  je termální napětí.

Pro termální napětí platí:

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad [V, J \cdot K^{-1}, K, C] \quad (1.9)$$

- $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ ).
- $T$  je absolutní teplota.
- $q$  je elementární náboj ( $q = 1,60217646 \cdot 10^{-19} C$ ).

S rostoucí teplotou klesá  $R_p$ , stoupá  $R_s$ , klesá  $FF$  a  $\eta$ . Vzhledem k faktu, že Joulovy ztráty jsou úměrné kvadrátu proudu, ovlivňuje  $R_s$  závislost  $\eta$  na intenzitě záření. Pro dosažení maximálního výkonu, je třeba zajistit maximální generaci nosičů náboje v blízkosti přechodu P-N a minimalizovat ztráty. Ztráty se dělí na:

- Optické.
- Rekombinační.
- Elektrické.

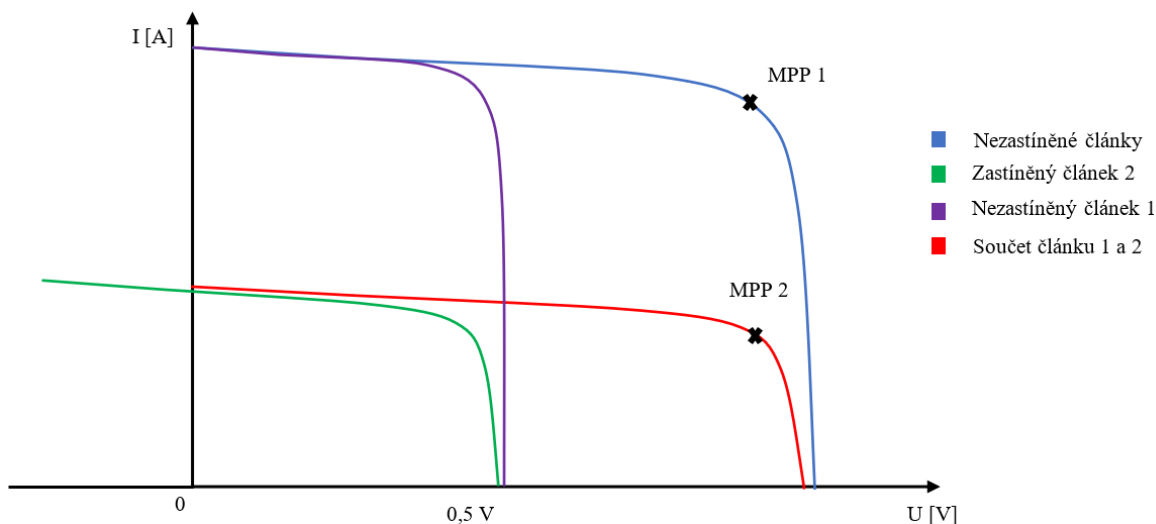
<sup>48</sup> HRZINA, Pavel. Fotovoltaický článek [online]. 2017 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/59449/mod\\_resource/content/1/EZF2-b.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/59449/mod_resource/content/1/EZF2-b.pdf). Prezentace. ČVUT, Fakulta elektrotechnická.

## 1.4.3. Propojení článků

Samotný článek je schopný dodat jen velmi malý výkon a jeho hodnota napětí se pohybuje okolo 0,5 V. Články je proto nutné vhodně pospojovat v modulu, aby v konečném složení dodaly při provozních podmínkách co největší výkon. V zásadě se články dají zapojit sériově, paralelně nebo kombinovaně. Uživatel si nejčastěji zakoupí již zkompletovaný modul s definovaným maximálním výkonem a napětím.

Při plně sériovém zapojení se sčítá napětí na jednotlivých článcích, ale proud je v každém článku totožný. Spojením určitého počtu článků jsme tak schopni vytvořit provozní napětí (12, 24, 48, ... V) využitelné pro reálné aplikace, avšak vznikl zdroj, který je limitován proudem jednoho článku. Při plně sériové kombinaci by výkon šel zvyšovat počtem článků, které by zvyšovali napětí mezi koncovými kontakty na neefektivní hodnoty pro převod na provozní napětí a dosahovalo by nebezpečných hodnot pro průraz izolace.

Každý článek má svůj vnitřní odpor a výkon v závislosti na osvětlení a na teplotě. V případě plně sériové kombinaci dodává celá soustava výkon v závislosti na nejméně osvětleném článku, neboť při zastínění začne článek produkovat malý proud, zvýší se tak jeho odpor a proud protlačený osvětlenými články vyvolá výkonový ubytek na neosvětleném článku. Tento výkon se přemění v teplo a článek se začne nebezpečně ohřívat, až se může eventuálně roztavit, čímž způsobí výpadek provozu celého systému. Celkový proud soustavy je tedy omezen proudem v nejméně osvětleném článku.<sup>49</sup>

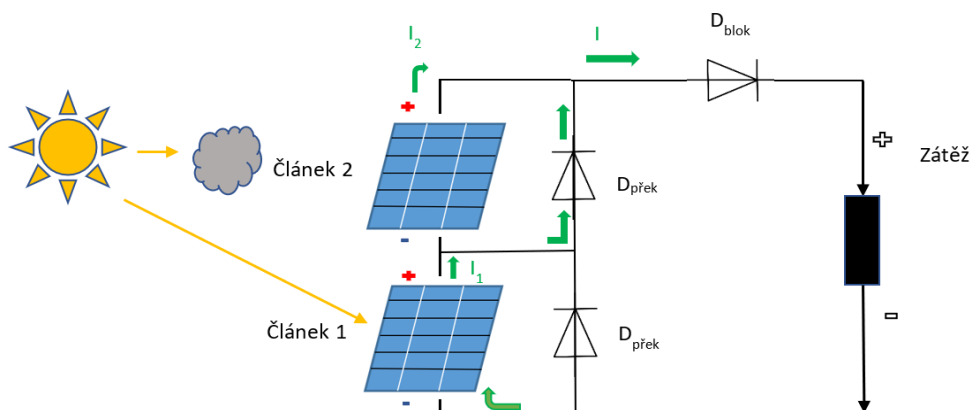


Obrázek 15 – Voltampérová charakteristika dvou článků v sérii při odlišných podmínkách bez překlenovacích diod

Články se proto někdy chrání překlenovacími diodami. Tyto diody jsou při normálním provozu neaktivní, neboť pokud je každý článek rovnoměrně osvětlen generuje napětí opačné polaroty pro překlenovací diodu a ta je tak zavřená. Při poklesu výkonu na jednom článku vzniká napětí opačné polaroty mezi osvětlenými články, které otevírá překlenovací diodu a proud tak může proudit pouze s omezením překlenovací diody.

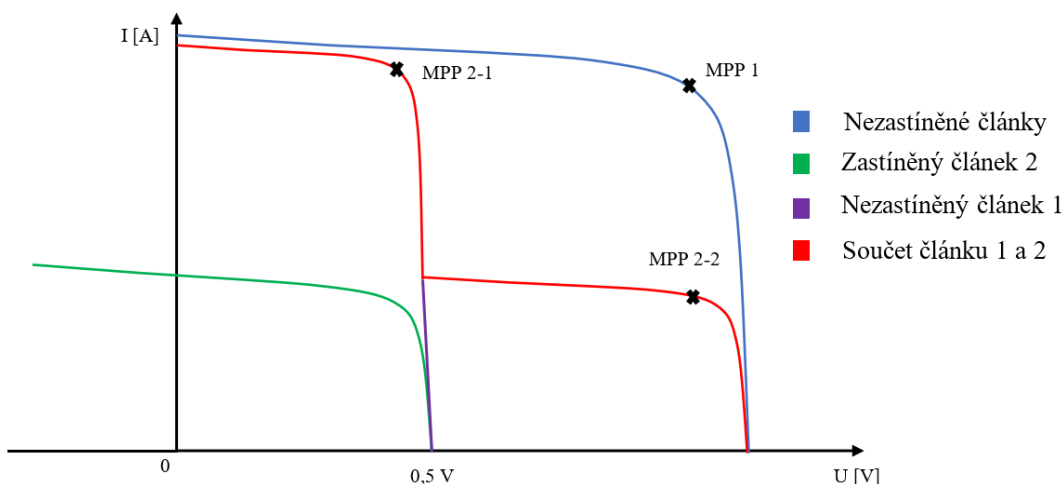
Výsledkem tohoto řešení je vznik dvou absolutních MPP. Při malém napětí je proud produkovaný osvětleným článkem vyšší než článkem zastíněným, přičemž překlenovací dioda vede proud  $I_1 - I_2$ . Na diodě vzniká úbytek napětí, který má za následek vznik proudu do zastíněného článku.

<sup>49</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47



Obrázek 16 – Princip přemostění proudu pomocí překlenovacích diod při zastínění jednoho článku

Výkon je tak dodáván z prvního článku, přičemž část je spotřebována na překlenovací diodě a na druhém článku. Při vyšším napětí klesá proud  $I_1$  až dojde do bodu, kdy je roven  $I_2$ , překlenovací dioda se zavře a výstupem je pak charakteristika odpovídající dvěma sériovým článkům při stejných vnějších podmínkách.<sup>50</sup>



Obrázek 17 – Voltampérová charakteristika dvou článků v sérii při odlišných podmínkách s překlenovacími diodami

Při plně paralelní kombinaci se sčítají proudy z jednotlivých článků, přičemž napětí na koncových kontaktech je stejné jako na každém článku (okolo 0,5 V). Je tedy zřejmé, že při zastínění jednoho článku ztrácíme výkon pouze v jedné větvi systému a při poškození jednoho článku dochází k malé ztrátě celkového výkonu.<sup>51</sup>

Nejčastější zapojení je kombinované, které využívá předností sériové a paralelní kombinace. Sériové řazení je využito pro nastavení výstupního pracovního napětí v jedné větvi, přičemž nejčastěji jsou jednotlivé větve článků přemostěny překlenovací diodou (překlenovací dioda na každém článku by byla neekonomická), výstupní větve jsou jištěny blokovacími diodami, které mají za úkol zajistit správný směr proudu a zamezit tak případnému vybíjení baterie (pokud je napětí na baterii vyšší než na panelu) přes panel bez použití regulátoru.<sup>52</sup>

<sup>50</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>51</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>52</sup> Bypass Diodes & Blocking Diodes in Solar Panels [online]. 2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.altestore.com/blog/2016/09/bypass-diodes-blocking-diodes-solar-panels/#.XA07wGhKiUk>

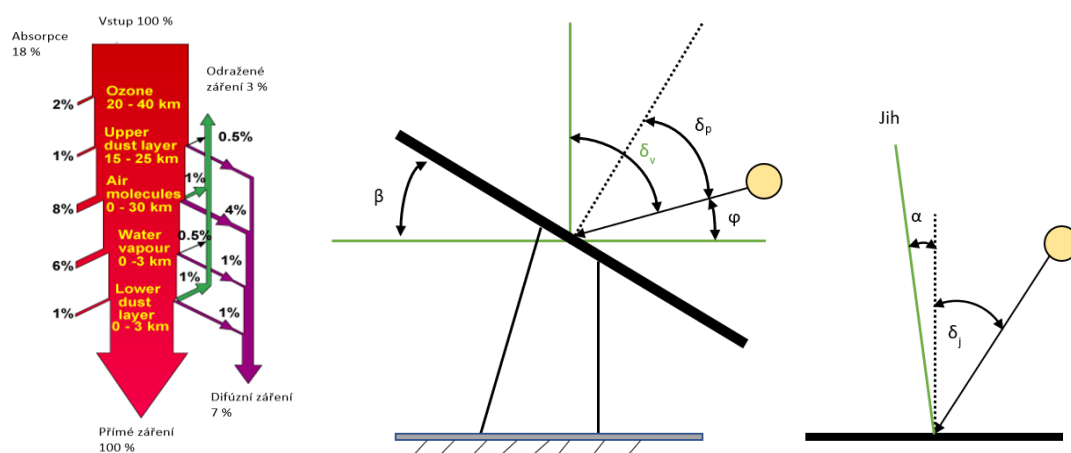
## 1.5. Provozní podmínky PV panelů v České republice

Při instalaci PV panelů je třeba dobře vědět v jaké krajině a v jakých podmínkách bude panel provozován. Podle toho je pak třeba rozhodnout jaký typ panelu bude použit na základě parametrů jako je životnost, účinnost, výkon a další.

### 1.5.1. Sluneční podmínky

Při popisu elektromagnetického záření dopadajícího na území České republiky je třeba začít od samotného zdroje, tedy Slunce. Je potřeba si uvědomit, že na intenzitu záření má vliv vzdálenost Země a Slunce, která je v průběhu roku proměnná, a také úhel pod kterým světlo dopadá na povrch. Pouze určitá část výkonu vyzářeného ze Slunce dorazí až k Zemi. Střední hodnota intenzity záření nad zemskou atmosférou se nazývá solární konstanta a je rovna  $G_{e0} = 1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Při prostupu záření na povrch závisí na mnohých faktorech jako je zeměpisná šířka, meteorologické podmínky, vrstva ozonu, roční období a další faktory.<sup>53</sup> Při takovém uvažování je třeba také dbát na obsah prachových částí, částic vzduchu a vody. Graficky zpracované množství intenzity prošlé při jasné obloze lze pozorovat viz obrázek 18. Část intenzity se při prostupu odrazí, část se absorbuje a část projde přímo. Pokud je umístěna destička na povrch země, dopadá na ní také záření odražené od okolních předmětů v závislosti na odrazivosti jejich povrchu. Toto záření se označuje termínem albedo. Celkové dopadené záření na destičku se tak skládá ze tří složek záření, přímého, difúzního a odraženého.



Obrázek 18 – Prostup záření skrz atmosféru při čisté obloze vlevo<sup>54</sup>, zobrazení dopadových úhlu na destičku v bočním řezu uprostřed, dopadový úhel seshora vpravo

V důsledku rozdílné absorpce částic atmosféry prostupuje světlo, které má spektrum viz obrázek 2. V případě bezoblačné oblohy dopadá na destičku umístěnou na zemském povrchu záření popsané rovnicí (1.10).

$$G_{dop}(t) = G_{e0} \cdot 0,7^{AM} \cdot \cos \delta_p(t) \cdot \cos \delta_j(t) \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}; \text{W}\cdot\text{m}^{-2}, -, -, -] \quad (1.10)$$

- $G_{e0}$  je solární konstanta ( $G_{e0} = 1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

<sup>53</sup> LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Poznámka 5

<sup>54</sup> HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Atmospheric Effects. In: Pveducation [online]. 2019 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvc/drom/properties-of-sunlight/atmospheric-effects>

- $G_{dop}$  je celkové dopadené záření na destičku.
- $\delta_p$  je úhel mezi normálou roviny destičky a slunečním paprskem pro pohled z boku.
- $\delta_j$  je úhel mezi normálou roviny destičky a slunečním paprskem pro pohled shora.
- AM je koeficient atmosférické masy. Ten vychází z úhlu slunečního zenitu, je tedy závislý na poloze Slunce a Země. Určuje se v daném geografickém bodě pro danou nadmořskou výšku.

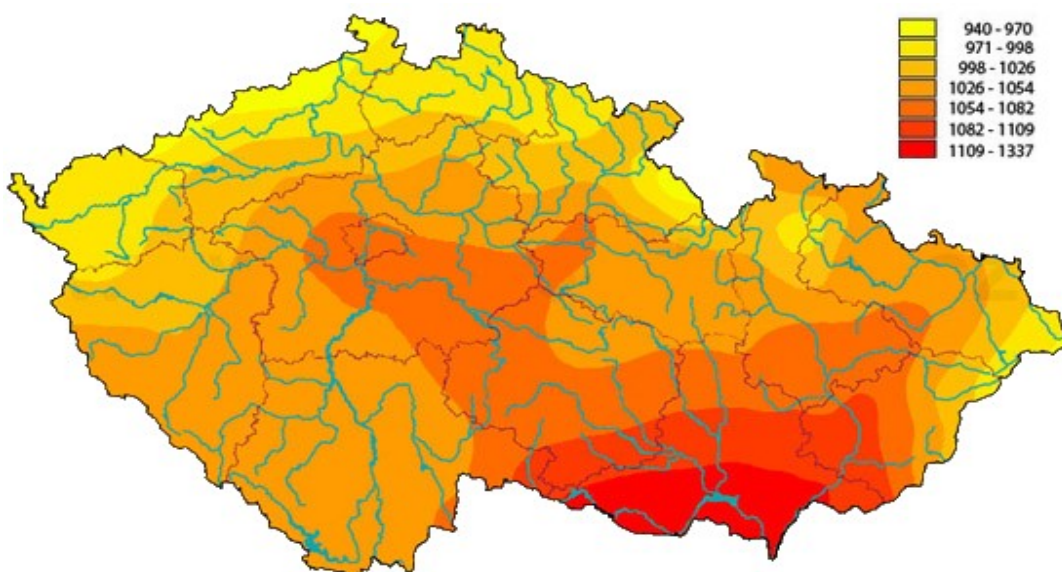
$$AM = \frac{1}{\sin \varphi(t)} \quad [ -; - ] \quad (1.11)$$

Koeficient atmosférické masy se projevuje na velikosti intenzit ve spektrální hustotě světla. Mezi nejpoužívanější hodnotu se řadí AM 1,5, která reprezentuje roční průměr pro střední výšky.

Pro analýzu využití slunečního výkonu dopadajícího na povrch se definuje doba ozáření H.

$$H = \int G_{dop}(t) \cdot dt \quad [ \text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W} \cdot \text{m}^{-2}, \text{s} ] \quad (1.12)$$

Místo Joulů se častěji používají kWh, přičemž se výsledný údaj ještě dává do poměrných hodnot za rok. Vzniká tak údaj, který definuje kolik dopadá množství kWh energie na  $\text{m}^2$  za uplynulý rok. Při určování dopadené energie se vychází ze statických naměřených dat.<sup>55</sup>



Obrázek 19 – Roční úhrn solární energie dopadající na jednotkovou plochu ve směru normály povrchu [ $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ ]<sup>56</sup>

Česká republika nemá ve světě tak velký fotovoltaický potenciál jako ostatní země blízko rovníku, nicméně se sníženými pořizovacími náklady solárních panelů se i zde do nich vyplatí investovat. Z mapy viz obrázek 19 lze vyvodit, že největší výkon v ČR z instalovaného panelu lze dostat na jižní Moravě, nejmenší pak v severních Čechách.

<sup>55</sup> WOLF, Petr. Předpověď výroby fotovoltaických systémů. OZE [online]. ČVUT UCEEB, 2017 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/15928-predpoved-vyroby-fotovoltaickych-systemu>

<sup>56</sup> SRDEČNÝ, Karel. In: Fotovoltaika v budovách: dosavadní zkušenosti pro budoucí rozvoj [online]. 2009. Praha: EkoWATT, 2009 [cit. 2018-11-26]. ISBN 978-80-87333-04-4. Dostupné z: [http://www.projektymzp.cz/data/prilohy/2009/247/247\\_09\\_brozura.pdf](http://www.projektymzp.cz/data/prilohy/2009/247/247_09_brozura.pdf)



### 1.5.2. Sklon a orientace panelu

Významným faktorem pro provoz PV panelu je úhel a směr natočení. Je třeba si uvědomit, že Slunce mění svou orientaci vůči panelu v průběhu dne a sklon v průběhu roku, nicméně tato analogie může být i obrácená, neboť panel se také může vůči Slunci pohybovat. Technologie PV panel umožňuje:

- Pevnou instalaci – panel nemění svou pozici a úhel natočení vůči zemi, je zcela fixován ve své pozici. V ideální atmosféře by pro takový panel platila rovnice (1.10)
- Jednoosé natáčení – panel může měnit svou orientaci nebo sklon. Tato změna může být provedena automaticky nebo ručně. V případě ideálního sledování slunečního svitu lze rovnici (1.10) upravit na rovnici (1.13) nebo (1.14).

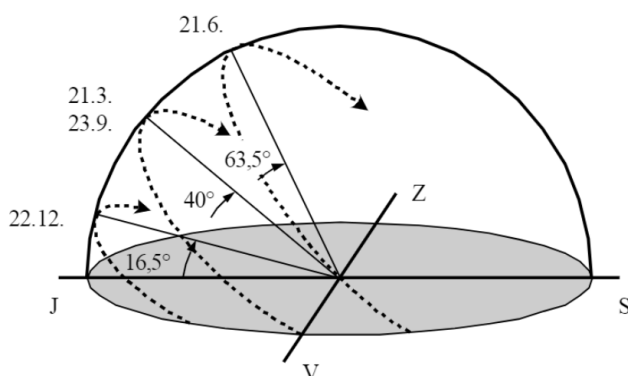
$$G_{dop}(t) = G_{e0} \cdot 0,7^{AM} \cdot \cos \delta_p(t) \quad [W \cdot m^{-2}; W \cdot m^{-2}, -, -, -] \quad (1.13)$$

$$G_{dop}(t) = G_{e0} \cdot 0,7^{AM} \cdot \cos \delta_j(t) \quad [W \cdot m^{-2}; W \cdot m^{-2}, -, -, -] \quad (1.14)$$

- Dvouosého natáčení – panel může měnit sklon a zároveň orientaci. Sklon panelu se nejčastěji mění na zimní a letní provoz. Opět v případě ideálního dvouosého sledovače lze dostat rovnici pro dopadené záření.<sup>57</sup>

$$G_{dop}(t) = G_{e0} \cdot 0,7^{AM} \quad [W \cdot m^{-2}; W \cdot m^{-2}, -, -, -] \quad (1.15)$$

Nejefektivnějšími systémy s ohledem na orientaci jsou systémy s trackery, tedy zařízeními, které mají vlastní sledovací systém aktuálního slunečního svitu a pohonnou jednotku, která je schopna otočit panelem v závislosti na maximálním osvětlení. Problém systémů využívajících trackery je objem zabíraného místa, pořizovací náklady a nevhodný vzhled, který se často nehodí na fasády domů, nicméně účinnost těchto systémů je až o 30 %<sup>58</sup> vyšší než systémů pevných instalací.<sup>59</sup>



Obrázek 20 – Pohyb slunce na 50° severní šířky<sup>60</sup>

<sup>57</sup> BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. Fotovoltaické systémy [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10537342-Fotovoltaicke-systemy.html?fbclid=IwAR13ry5pslX3FOT-XYhAiw0Pq73w2mqtwtSPaukzDlF-KQgQukTLEFCgzA>. Učební text k semináři. VUT.

<sup>58</sup> BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. Poznámka 57

<sup>59</sup> LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Poznámka 5

<sup>60</sup> BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. Poznámka 57

Následující stanovení optimálních podmínek je určeno pouze pro ČR a pro pevné instalace. Pokud lze uvažovat skutečnost, že panel se nemůže nacházet ve stínu jiného pozemního objektu, pak optimální náklon panelu vůči zemi dne 21.6, když je slunce přesně orientováno na jih, podle pohybu slunce viz obrázek 20. Obrázek 20 by se jevil  $\beta = 26,5^\circ$  ( $\beta = 90 - 63,5(\varphi)$ ). Při stejné úvaze lze odvodit nastavení panelu při dalším extrému, tedy v zimě 22.12. Z hlediska statických dat lze vyvodit, jaký je ideální kompromis sklonu pro pevné instalace. V praxi se uvádí sklon okolo  $35^\circ$  ( $\beta = 55^\circ$ ), což je ideální bod z hlediska maximálního využití PV panelu po celý rok. Úhel sklonu samozřejmě není průměrem hodnot zimního a letního slunovratu, protože slunce v zimě je na obloze kratší dobu a převládá větší oblačnost. Při určení sklonu jsme nejčastěji limitováni konstrukčními požadavky daného PV panelu a místem jeho instalace. Při dimenzování je třeba také brát v úvahu ostatní provozní požadavky jako je například samočistitelnost panelu, které mohou instalovaný sklon ovlivnit.<sup>61</sup>

Při hledání optimální orientace je třeba opět počítat s rozdílnými podmínkami v zimním a letním období. V zimním období je ideální orientace  $\alpha = 0^\circ$ , maximum využití se přímo nachází na jihu. V letním období je výhodnější odchylka k jihojihozápadu než k jihojihovýchodu, neboť v dopoledních hodinách dochází k častějšímu úhrnu srážek. Při takových úvahách jsou brány na vědomí i negativní vlivy vysoké teploty na účinnost PV panelu, které se negativněji projeví na orientaci s jihojihozápadní orientací, neboť v odpoledních hodinách je dosaženo vyšších teplot. V celoročním srovnání jsou stále produktivnější panely s jihojihozápadní odchylkou než panely s odchylkou jihojihovýchodní a celkově je tedy vhodné nastavit panel s orientací na jih s možnou jihojihozápadní odchylkou (do  $22,5^\circ$ ).<sup>62</sup>



Obrázek 21 – Přibližná orientace a sklon panelu pro maximální výnos energie v ČR<sup>63</sup>

<sup>61</sup> SRDEČNÝ, Karel. Fotovoltaika v budovách: dosavadní zkušenosti pro budoucí rozvoj [online]. 2009. Praha: EkoWATT, 2009 [cit. 2018-11-26]. ISBN 978-80-87333-04-4. Dostupné z: [http://www.projektympz.cz/data/prilohy/2009/247/247\\_09\\_brozura.pdf](http://www.projektympz.cz/data/prilohy/2009/247/247_09_brozura.pdf)

<sup>62</sup> SRDEČNÝ, Karel. Poznámka 56

<sup>63</sup> BECHNÍK, Bronislav. Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů. In: Oze.tzb-info [online]. 2017 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>

## 2. Ukládání energie ze solárních panelů

Při realizování návrhu ostrovního solárního systému je třeba zhodnotit jaké jsou možnosti ohledně ukládání vyrobené energie a následného čerpání. Ostrovní systém není připojen na síť a nemá tak žádnou zálohu energie, proto akumulování energie je zcela klíčové pro celoroční funkčnost daného systému. energii lze skladovat v následujících základních formách, jako je:

- Mechanická
  - Potenciální – ukládání energie hmotného předmětu do výšky v gravitačním poli.
  - Kinetická – ukládání energie hmotného předmětu do rychlosti nebo úhlové rychlosti. Příkladem jsou setrvačnické.
  - Stlačený plyn
- Tepelná
  - Fázová přeměna – využití uložení energie do skupenského tepla.
  - Kapacita – využití tepelné kapacity látek, např. vody.
- Elektrická
  - Elektrochemická – využití elektrochemických vazeb.
  - Ve formě náboje – přímé ukládání náboje, např. kondenzátor.
  - Ve formě magnetického pole – uložení energie v supravodivých magnetických úložištích

Nejčastěji se můžeme setkat se solárními akumulátory fungujícími na odlišných principech elektrochemických technologií (olověné, gelové, lithiové, alkalické, ...). Při hledání optimálního systému na ukládání energie je třeba dbát na odolnost akumulátoru vůči vnějším vlivům jako je okolní teplota, mechanické namáhání, prašnost prostředí, odolnost vůči vodě a dalším okolním vlivům. Z energetického hlediska je pak třeba určit účinnost, životnost, časový pokles výkonu a kapacitu, a samozřejmě je třeba ekonomicky zhodnotit pořizovací náklady a kvalitu daného akumulátoru. V této kapitole budou probrány především hlavní formy úschovy energie z hlediska menších solárních systémů.

### 2.1. Elektrochemické akumulátory

Elektrochemické akumulátory akumulují elektrickou energii ve formě energie chemické. Akumulátor je v tomto případě baterie, která lze opětovaně nabíjet a vybíjet narozdíl od primárních článků. Pro vytvoření elektrochemického systému je zapotřebí dvou elektrod, elektrolytu a vnějšího obvodu. V souvislosti s elektrochemickými procesy se rozdělují vodiče na:

- Vodiče 1. třídy – zprostředkovávají přenos náboje volnými elektrony a při vedení proudu chemicky nemění svoje složení. Patří sem například kovy.
- Vodiče 2. třídy – zprostředkovávají přenos náboje volnými elektricky nabitými ionty. Při vedení proudu mění své chemické složení. Patří sem především elektrolyty.

K elektrochemickým procesům dochází především na rozhraní elektrod a elektrolytu. Elektrody se označují jako:

- Anoda – probíhá zde oxidace, slouží k odvádění elektronů.
- Katoda – probíhá zde redukce, slouží k přívodu elektronů.

U elektrod je vyžadováno, aby měly velký povrch a byly trvanlivé. Elektrolyt je roztok (popřípadě tavenina), který je kyselý, zásaditý nebo neutrální.<sup>64</sup> Je třeba, aby elektrolyt byl netoxický a neagresivní vůči elektrodám. Většina systémů obsahuje také separátor, který je umístěn mezi anodu a katodu. Zastává funkci fyzického oddělení elektrod z důvodu zabránění vzniku vnitřního zkratu.

Pro správné použití baterií v solárních systémech je třeba plně pochopit jejich specifické parametry a požadavky. Nesprávné zacházení vede ke kratší životnosti, nebo dokonce k úplnému zničení akumulátoru. Mezi hlavní parametry baterie patří:

- Kapacita (C, E) – jedná se o jednotku energie uložené v baterii. Značí se C [Ah] nebo E [Wh]. Ah udává, kolik hodin je baterie schopna dodat ampér při nominálním napětí. Wh bere v úvahu navíc proměnné napětí, vyjadřuje tak celkovou energii, která umí baterie dodat.
- Elektrické veličiny
  - Napětí naprázdno ( $U_0$ ) – napětí na svorkách bez připojené zátěže.
  - Jmenovité napětí ( $U_N$ ) – pracovní napětí za standardních podmínek
  - Maximální nabíjecí napětí ( $U_{MAX}$ ) – maximální povolené napětí, při kterém nehrozí poškození akumulátoru.
  - Minimální vybíjecí napětí ( $U_{MIN}$ ) – stanovená hranice pod kterou nelze akumulátor dále vybíjet bez rizika trvalého poškození.
  - Udržovací napětí ( $U_S$ ) – hodnota napětí po kterou lze akumulátor trvale udržovat nabitý.
  - Plynovací napětí ( $U_P$ ) – hranice nad kterou již akumulátor začíná plynovat.
  - Maximální trvalý vybíjecí proud ( $I_N$ ) – hodnota proudu garantovaná výrobcem jako hraniční konstantní hodnota, kterou lze vybíjet. Hodnota vybíjecího proudu je někdy určena podle kapacity baterie.
  - Špičkový vybíjecí proud – jaký proud může akumulátor dodat, bývá určeno, po jakou dobu.
  - Udržovací proud – hodnota proudu, která prochází akumulátorem i při plném nabití při procesu nabíjení.
- Energetická účinnost – tento parametr slouží k porovnávání jednotlivých technologií baterií z hlediska jejich schopnosti akumulace energie vztažené na váhu daného systému. Udává se v  $Wh \cdot kg^{-1}$ .
- Vnitřní odpor ( $R_i$ ) – udává, jak je zdroj tvrdý. Hodnoty se většinou pohybují v  $m\Omega$ .
- Samovybití – každý akumulátor se časem vybití, přičemž tato hodnota se silně mění se stárnutím a kvalitou daného systému.
- Počet cyklů – parametr určuje přibližný odhad kolikrát lze baterii plně nabít a vybit při standardních podmínkách.<sup>65</sup>

Mezi základní požadavek, který se musí při využívání ale i skladování dodržet, patří udržet baterii v její pracovní oblasti. Ta je vymezena maximální hodnotou (nabitím) a minimální hodnotou (vybitím) napětí a maximální a minimální teplotou. U moderních bateriových systémů se o udržení v pracovní oblasti stará BMS, který monitoruje jednotlivé veličiny na každém článku zvlášť.

Akumulátory jsou uloženy v nádobách, konstrukce těchto systémů je:

---

<sup>64</sup> HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Atmospheric Effects. In: Pveducation [online]. 2019 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/basic-battery-operation>

<sup>65</sup> HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Atmospheric Effects. In: Pveducation [online]. 2019 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/battery-characteristics>

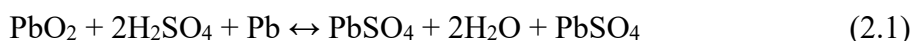
- Otevřená – elektrolyt je ve styku se vzduchem.
- Uzavřená – nádoba je opatřena uzavíratelným víkem. Lze doplnit vodu i elektrolyt.
- Ventilem řízená – jedná se o soustavu ventilů, které jsou při určitém tlaku na okamžik otevřeny. Do takové nádoby nelze nic dolévat.
- Uzavřená plynotěsná – nádoba je opatřena bezpečnostním ventilem pro případný krajní případ.
- Hermeticky uzavřena – soustava je zcela uzavřená bez jakéhokoliv ventilu.

Akumulátory se řadí k nejčastěji používaným systémům akumulace v ostrovních solárních systémech hlavně kvůli jejich nízké ceně, dlouholeté technologii a spolehlivosti. Baterie se může skládat pouze z jednoho článku, nebo z více zapojených do série za účelem vytvoření pracovního napětí, neboť klasické články dosahují napětí od 1,1 do 4 V. Elektrochemické baterie pak mohou tvořit velké bateriové systémy.<sup>66</sup>

### 2.1.1. Olověné akumulátory s kapalným elektrolytem

Jedná se o jeden z nejstarších akumulátorů, který vyžaduje údržbu v podobě pravidelné kontroly hladiny elektrolytu a případného doplňování destilované vody. Olověné akumulátory obsahují elektrody z olova (Pb) a oxidu olovičitého (PbO<sub>2</sub>). Nejčastější konstrukcí elektrod je mřížkové a deskové provedení. Elektrolyt je kyselý, tvoří ho zředěná 38 % kyselina sírová (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Separátor je deskový, listový, někdy obálkový a je vkládán mezi dvě elektrody. Tato soustava tvoří jeden článek o napětí U<sub>N</sub> = 2 V. Celkový akumulátor pak nejčastěji tvoří 6 článků zapojených v sérii pro vytvoření pracovního napětí 12 V nebo 12 článků pro 24 V.<sup>67</sup>

Pro pochopení ukládání energie je dobré si popsat jednotlivé stavy ve kterých se akumulátor může nacházet, přičemž využijeme elektrochemické rovnice:



(šipka vpravo značí vybíjení a vlevo nabíjení akumulátoru)

Při nabíjení se síran přemísťuje z desky a slučuje se s vodíkem, vzniká tak kyselina sírová (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a elektrolyt houstne. Volný kyslík se slučuje s olovem, na kladné elektrodě tak vzniká oxid olovičitý (PbO<sub>2</sub>), zatímco na záporné je rozprášeno čisté olovo (Pb). Ke konci procesu nabíjení rozkládá elektrický proud vodu na vodík a kyslík. Olověné akumulátory jsou opatřeny ventilem, kterým je v případě přetlaku plyn vypuštěn. Při vybíjení je proces opačný, kdy se slučuje olovo a elektrolyt se rozkládá na vodík (H<sub>2</sub>) a síran (SO<sub>4</sub>). Zpětně je vytvářena voda sloučením kyslíku a vodíku, spojením olova se síranem na obou elektrodách vzniká síran olovnatý (PbSO<sub>4</sub>). Velkou výhodou takového uskupení je měnící se hustota elektrolytu v závislosti na aktuálním nabití akumulátoru. Měření hustoty je tak přesnou metodou k určení aktuálního stupně nabití.<sup>68</sup>

Samotné nabíjení a vybíjení akumulátoru je celkem složité, neboť procesy přeměny chemické energie na elektrickou probíhají různými postupnými fázemi. Nabíjení je definováno pro 3 specifické charakteristiky. Jedná se o nabíjení:

- Konstantním proudem CC.

---

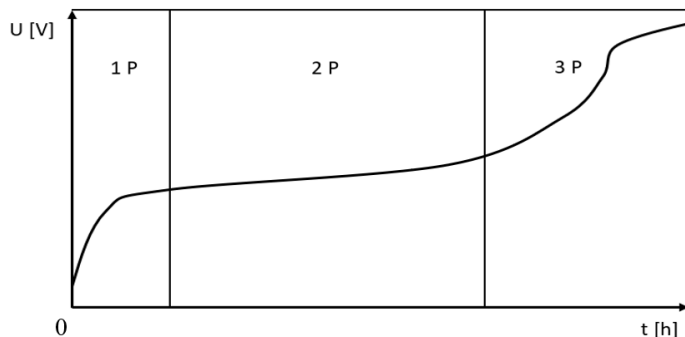
<sup>66</sup> MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. Elektro [online]. 2011, 2011(2), 6-10 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>

<sup>67</sup> MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Poznámka 66

<sup>68</sup> VLASAKOVA, Zuzana. Olověné automobilové akumulátory. Zvlasak [online]. 2002 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: [http://www.zvlasak.net/baterie\\_s.pdf](http://www.zvlasak.net/baterie_s.pdf)

- Konstantním napájecím napětí CV
- S klesajícím proudem v závislosti na vzestupu napětí na článku. Nejdříve je tedy nabíjení CC, poté CV a následný pokles na udržovací napětí.

Při nabíjení konstantním proudem lze tyto procesy rozdělit do 3 pásem.<sup>69</sup>



Obrázek 22 – Proces nabíjení olověného akumulátoru

V prvním pásmu jsou přiloženy napájecí elektrody ke zdroji proudu. Začíná tvorba kyseliny a rychlý nárůst napětí na elektrodách. Ve druhém pásmu dochází k ustálenému růstu napětí. Ve třetím pásmu se začne rozkládat kromě síranu také voda na vodík a kyslík, jednotlivé články totiž přesáhnou  $U_P = 2,4$  V. Akumulátor tak provádí elektrolyzu vody a dochází k jeho plynování. Po dosažení dostatečného napětí je síran zcela rozložen a další nabíjení by vedlo pouze k přebíjení akumulátoru.<sup>70</sup>

Nabíjení CV je většinou využíváno na staničních akumulátorech, tedy systémech, které mají především za úlohu zálohovat napájení v případě výpadku hlavního zdroje. Napájení je tak nastaveno na udržovací napětí, v případě olověného článku  $U_S = 2,27$  V. U takových systémů je vyžadována dlouhá životnost, naproti tomu jsou kladeny nižší nároky na počet cyklů baterie, protože tyto zdroje jsou většinu času plně nabité. Nevýhodou nabíjení CV je vysoký počáteční proud na začátku nabíjení při počátečním hlubokém vybití.

Poslední možnost je použita hlavně z důvodu šetrnosti vůči baterii. Počáteční nabíjení probíhá v režimu CC, aby nebyl překročen dovolený proud nabíjení, po dosažení požadované hodnoty napětí dané výrobcem přepíná nabíječka do režimu CV a proud začne klesat. Proud je měřen a ve chvíli, kdy klesne na určitou úroveň, je napětí přepnuto na udržovací napětí. Přepnutí na udržovací napětí může být také provedeno na základě časového odpočtu od přepnutí do režimu CV. Moderní nabíječky často s baterií komunikují a dostávají z ní různé parametry pro maximální efektivní správu.

Životnost těchto zdrojů silně závisí na okolní teplotě, konstrukci elektrod a způsobu nabíjení. S rostoucí teplotou se zvyšuje obsah antimonu, který podporuje korozi olova, což má za následek zvýšené samovybíjení a pokles kapacity. Obecně platí, že typy těchto akumulátorů nesmí být podbíjeny, neboť dochází k sulfataci elektrod, a tak celkovému snížení životnosti. Kapalný elektrolyt přináší nevýhodu, neboť při nesprávné poloze nádoby hrozí jeho vytečení. Na druhou stranu v případě otevřené nebo uzavřené konstrukce lze doplňovat vodu, v případě nutnosti vyměnit elektrolyt.

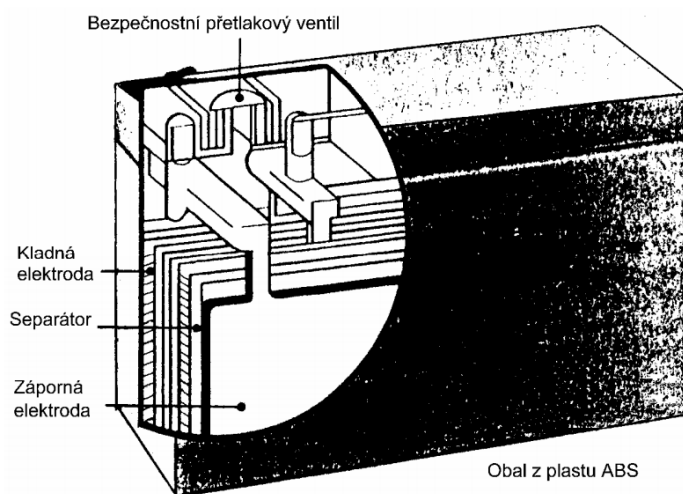
<sup>69</sup> CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.

<sup>70</sup> HAMMERBAUER, Jiří. Olověné akumulátory. Jergym [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>

## 2.1.2. Olověné akumulátory s pevným elektrolytem

Tento typ akumulátorů je technologickým nástupcem otevřených a uzavřených akumulátorů. Jedná se o bezúdržbový koncept, kdy je celek uzavřen a nevyžaduje žádnou údržbu v průběhu své životnosti. Nejčastějším provedením bývá ventilem řízená konstrukce, dalšími jsou pak uzavřené plynotěsné a hermeticky uzavřené. Jejich provedení umožňuje odolnou stavbu o malých rozměrech. Jednou z dalších výhod je schopnost práce v širokém teplotním rozsahu. Z hlediska chemických procesů a složením materiálů jednotlivých komponent je princip akumulace energie stejný jako u akumulátorů s kapalným elektrolytem<sup>71</sup>

Mezi bezúdržbové akumulátory řadíme technologii AGM. Jedná se o stavbu s vázaným elektrolytem, který je vsáklý do skelných mikrovláken. Elektrolyt je tak fixován v jedné pozici a lépe odolává vnějším vlivům jako jsou vibrace. Díky fixaci je možné akumulátor natáčet do různých poloh a nehrozí jeho zničení nebo vylití. Uzavřený koncept zvyšuje požadavky na správné nabíjení akumulátoru, neboť při přebíjení dochází k plynování a ke zvyšování vnitřního tlaku. Tento tlak by mohl mít za následek vznik zkratu, nebo dokonce explozi celého zařízení, proto jsou skoro vždy akumulátory vybaveny jednosměrnými bezpečnostními ventily. Technologie AGM se vyznačuje možností rychlého nabíjení a vybíjení při relativně nízké hmotnosti. Svou kapacitou dosahuje středních hodnot, je však schopna dodat vysoké výkony i při nízkých teplotách. Nejčastěji se tak využívá jako startovací baterie nebo jsou využívány pro různé cyklické aplikace.<sup>72</sup>



Obrázek 23 – Uzavřený plynotěsný deskový akumulátor<sup>73</sup>

Dalším bezúdržbovým konceptem je gelový akumulátor. Na rozdíl od technologie AGM není elektrolyt vázán v separátoru, zato je vázán v tixotropním (netečný) křemičitém gelu. Tato technologie dosahuje podobných vlastností jako AGM, avšak v mnoha provozních vlastnostech jí předčí. Gelová struktura je ještě více odolná vůči vnějším mechanickým vlivům a je méně citlivá na vysoké teploty. Gelový akumulátor je méně citlivý na podbíjení, má menší tendenci ztrácet svou kapacitu a má delší životnost.<sup>74</sup>

<sup>71</sup> HAMMERBAUER, Jiří. Poznámka 70

<sup>72</sup> ŠRUBAŘOVÁ, Petra. Jak funguje olověný akumulátor?. Tzbinfo [online]. 2017 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>

<sup>73</sup> HAMMERBAUER, Jiří. Olověné akumulátory. In: Jergym [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>

<sup>74</sup> CENEK, Miroslav. Poznámka 69

### 2.1.3. Alkalické akumulátory

Na rozdíl od olověných baterií alkalické akumulátory využívají jako elektrolyt vodný roztok alkalického kovu, jedná se tak o zásadu. Nejčastěji je používán hydroxid draselný (KOH) nebo hydroxid sodný (NaOH). Tyto zdroje lze rozdělit podle aktivní hmoty elektrod. Alkalické akumulátory dělíme na:

- nikel-kadmiové (Ni-Cd)
- nikel-železné (Ni-Fe)
- nikel-metalhydridové (Ni-MH)
- nikel-zinkové (Ni-Zn)
- stříbro-zinkové (Ag-Zn)
- stříbro-kadmiové (Ag-Cd)

Často se mezi alkalické akumulátory se nesprávně řadí technologie RAM, u které je anoda tvořena zinkem a aktivní hmotu tvoří oxid manganičitý ( $\text{MnO}_2$ ). Články RAM se odlišují od alkalických svým elektrodovým napětím a faktem, že po sestavení jsou plně nabity a funkční.<sup>75</sup>

Nikel-kadmiové akumulátory mají různá konstrukční uspořádání v závislosti na vybíjecím proudu. Vyrábí se ve všech možných typech konstrukčního provedení kromě hermetického uspořádání. Konstrukce je často vybavena odšroubovatelným víkem a tlakovou pojistkou z důvodu možné výměny elektrolytu po nahromadění uhličitánů. Elektrolyt je tvořen hydroxidem draselným někdy s příměsí hydroxidu lithného (LiOH), který prodlužuje životnost. Materiál elektrod se liší podle výrobce, nicméně kladné elektrody jsou nejčastěji složeny z hydroxidu nikelnatého  $\text{Ni(OH)}_2$  s příměsí práškového grafitu, popřípadě kobaltu. Záporné elektrody tvoří například hydroxid kademnatý  $\text{Cd(OH)}_2$  s možnou směsí železa nebo kadmia. Elektrody jsou sintrované a stlačené. Separátor je tvořen nejčastěji plastem ve formě mřížky obsahující mikrovlákná. Proces nabíjení a vybíjení lze popsat následující rovnicí:<sup>76</sup>



(šipka vpravo značí nabíjení a vlevo vybíjení akumulátoru)

Oproti ostatním systémům elektrochemických akumulátorů NiCd článek nevyžaduje přenos materiálu z jedné elektrody na druhou. Při nabíjení hydroxid nikelnatý oxiduje na hydroxid-oxid nikelnatý ( $\text{NiOOH}$ ) a hydroxid kademnatý se redukuje na kadmiový kov. Při vybíjení probíhá reakce v opačném směru, hydroxid-oxid nikelnatý se redukuje přijímáním elektronů z externího obvodu a hydroxidové ionty oxidují kadmium na hydroxid kademnatý. Hustota elektrolytu při nabíjení a vybíjení je prakticky neměnná, a proto nelze podle ní určit stupeň nabití. U otevřených článků je třeba hustotu občas změřit, neboť s časem klesá a pokud klesne pod určitou úroveň, je třeba elektrolyt vyměnit.<sup>77</sup>

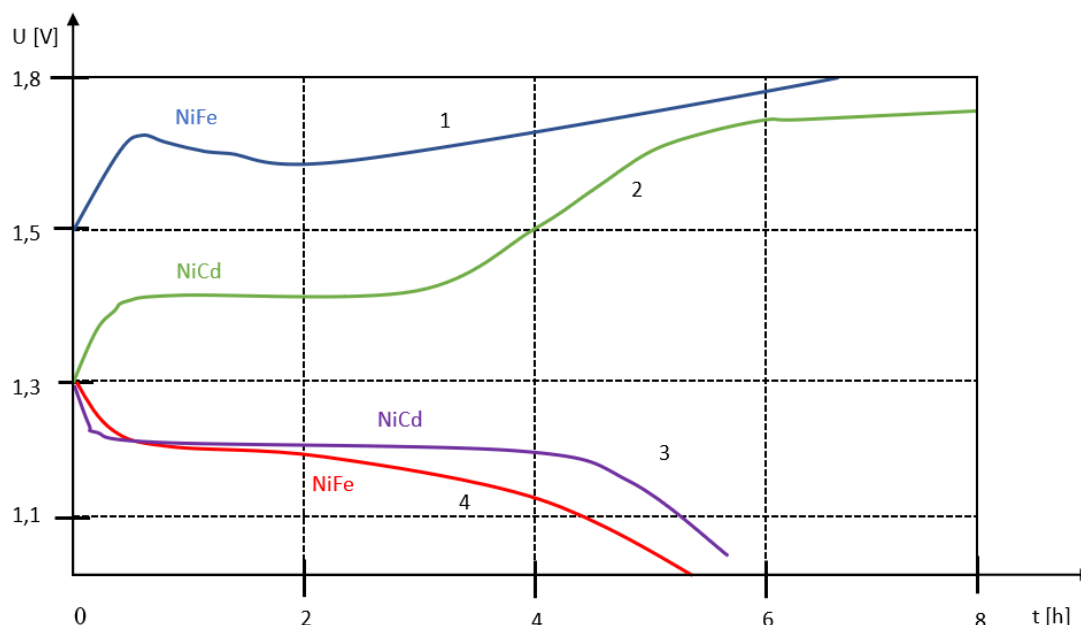
Pro jeden článek platí  $U_N = 1,2 \text{ V}$ , zatímco  $U_P = 1,6 \text{ V}$ . Pro vytvoření pracovního napájení se tak většinou využívá 10 článků v sérii. NiCd akumulátory disponují vyšší kapacitou a jsou více odolnější na "hrubší" zacházení.

<sup>75</sup> CENEK, Miroslav. Poznámka 69

<sup>76</sup> CENEK, Miroslav. Poznámka 69

<sup>77</sup> HAMMERBAUER, Jiří. Akumulátory NiFe a NiCd [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: [http://www.malavoda.cz/akum\\_nife\\_nicd.pdf](http://www.malavoda.cz/akum_nife_nicd.pdf). Západočeská univerzita v Plzni.





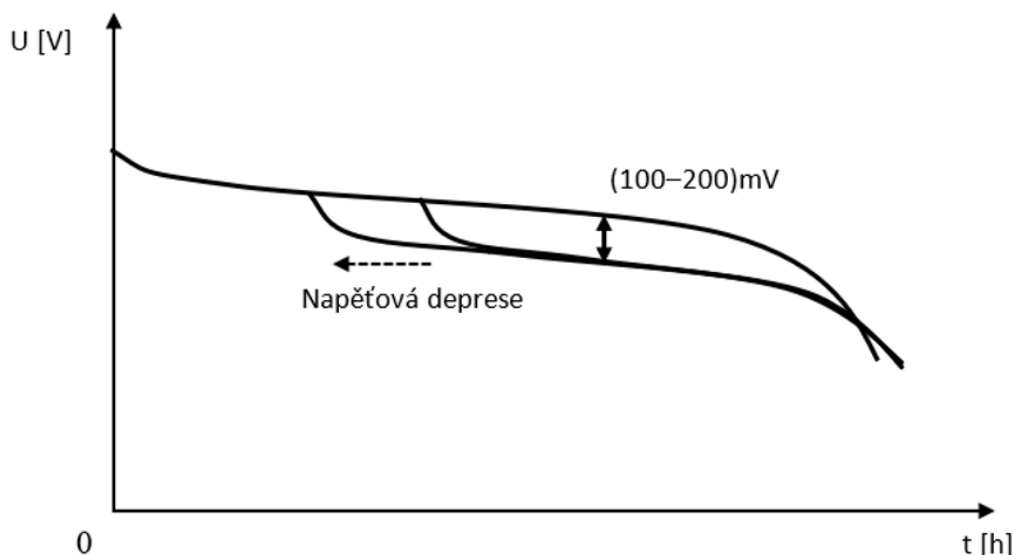
Obrázek 24 – Obecné nabíjecí (křivka 1 a 2) a vybíjecí (křivka 3 a 4) křivky pro NiCd a NiFe akumulátor

Nabíjení alkalických akumulátorů se obvykle provádí CV nebo dvoustupňovým systémem, kdy po určitém nabití, klesá hodnota napájení na udržovací napětí (pro 1 článek  $U_S$  okolo 1,4 V). Také je možnost nabíjet CC nebo klesajícím proudem. Při provozu je třeba dbát ohled na možné nebezpečné přebíjení a podbíjení. Samotné přebíjení akumulátoru není škodlivé, nicméně se zvýší spotřeba vody z elektrolytu, protože dochází k elektrolyze vody a následnému úniku plynů vodíku a kyslíku. Proto při otevřené konstrukci je třeba občas tuto vodu doplnit. Při nabíjení CC jsou určeny specifické nabíjecí a vybíjecí křivky. Například při rychlonabíjení CC dochází ke konci nabíjení k náhlému poklesu napětí, který je patřičným obvodem zaznamenán a baterie je odpojována.<sup>78</sup>

Provozování uzavřených alkalických akumulátorů musí brát ohled na nebezpečné podbíjení. Jestliže je akumulátor složen z jednotlivých článků, pak hrozí, že jeden článek se vyčerpá dříve než ty ostatní. Přes tento článek je posléze protlačován vybíjecí proud. Z vybíjecí křivky NiCd akumulátoru lze pozorovat, že během vybíjení je napětí v zásadě konstantní, dokud není článek zcela vybit, poté dochází k poklesu napětí. Úplné vybití má za následek poškození článku, proto je většina těchto zdrojů hlídána elektronickým nebo hardwarovým obvodem, který má za úkol zdroj včas odpojit. V důsledku častého opakování cyklu vybíjení přesně na stejnou úroveň může docházet k tzv. „paměťovému efektu“. Tento jev má za následek pokles kapacity. Nicméně v praxi se již v zásadě neprojevuje, neboť dnešní nabíječky jsou proti tomuto jevu uzpůsobeny například jednoduchou změnou úrovně hladiny odpojení. Na druhou stranu existuje jev „napěťová deprese“, ke kterému dochází častěji a je nesprávně za paměťový efekt zaměňován. Vzniká v důsledku častého přebíjení a projeví se poklesem napětí někde na vybíjecí křivce. V důsledku poklesu napětí může být zdroj chybně odpojen mnohem dříve před vybitím a může tak dojít k mylnému závěru, že došlo k poklesu kapacity. Tento jev je reverzibilní a lze odstranit plným vybitím a nabitím jednotlivých článků, tedy pokud konstrukce tuto možnost umožňuje.<sup>79</sup>

<sup>78</sup> HAMMERBAUER, Jiří. Poznámka 77

<sup>79</sup> HAMMERBAUER, Jiří. Poznámka 77



Obrázek 25 – Projev napěťové deprese v důsledku dlouhodobého přebíjení

Nikl-železné akumulátory mají stejnou konstrukci elektrod jako nikl-kadmiové, ale liší se složením aktivní hmoty. Záporná aktivní hmota tvoří oxid železnato-železitý ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) s přísadami síranu nikelnatého ( $\text{NiSO}_4$ ), sulfidu železnatého ( $\text{FeS}$ ) a grafitu. Chemické reakce jsou v zásadě stejné jako u nikl-kadmiových akumulátorů, akorát je zde místo kadmium nahrazeno železem. Tyto zdroje nelze nabíjet na konstantní napětí, a proto se nehodí v aplikacích s trvalým dobíjením. Oproti nikl-kadmiové technologii mají větší hodnotu samovybíjení, ovšem neobsahují toxické kadmium a jsou odolnější vůči přebíjení a hlubokému vybíjení.<sup>80</sup>

Ze zmíněných typů alkalických akumulátorů stojí ještě za zmínku technologie slitiny kovu s vodíkem tzv. metalhydridem ( $\text{NiMH}$ ). Místo použití kadmia se aplikuje slitina kovu, která je schopná, jak vodík pohltit, tak uvolnit. Stejně jako  $\text{NiCd}$  článku tvoří kladnou elektrodu hydroxid-oxid nikelnatý, zápornou pak zmíněný metalhydrid. Vybíjení je tak podobné, akorát na záporné elektrodě dochází k oxidaci metalhydridu na kovovou slitinu ( $\text{M}$ ). Při přebíjení se na kladné elektrodě uvolňuje kyslík, který prochází porézním separátorem na elektrodu zápornou, kde je redukován. Na záporné elektrodě nedochází k tvorbě vodíku a díky tomu lze celou soustavu hermetizovat. Tyto zdroje se vyznačují velkou kapacitou pro skladování vodíku, která se projeví velkou vybíjecí kapacitou. Články mají poměrně vysokou hodnotu samovybíjení a vhodné kinetické vlastnosti, aby mohli být provozovány dlouhodobě i při velkých a nabíjecích proudech. Oproti  $\text{NiCd}$  článkům mají až o 30 % větší kapacitu, neobsahují toxické látky, jsou méně citlivé na teplotu a přebíjení. Mezi nevýhody  $\text{NiMH}$  článků se řadí menší životnost, nižší vybíjecí a nabíjecí proud a vyšší cena.<sup>81</sup>

Rozebírání dalších typů aktivních hmot elektrod je zbytečné, protože fungují na podobných principech a jejich podrobný popis je nad rámec této práce. Obecně alkalické akumulátory jsou primárně určeny pro dlouhodobou životnost. Oproti klasickým olověným akumulátorům může doba života těchto zdrojů být až čtyřnásobná. Vyznačují se svou spolehlivostí a odolností. Lépe snášejí přebíjení a dají se rychleji nabít. Na druhou stranu jsou dražší a mají menší energetickou účinnost.

<sup>80</sup> CENEK, Miroslav. Poznámka 69

<sup>81</sup> HAMMERBAUER, Jiří. Poznámka 77

## 2.1.4. Lithiové akumulátory

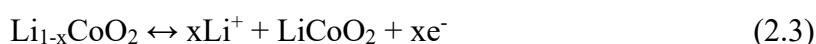
Lithiová technologie prošla za posledních pár let velmi rychlým vývojem a svými vlastnostmi dokáže v mnoha ohledech předčít ostatní typy akumulátorů. Lithium je lehký reaktivní kov, který se těží z lithných solí. Světové zásoby lithia jsou víc než dostatečné, nicméně problém je v těžbě pomocných materiálů, které s touto technologií souvisí. Mezi největší ekologickou zátěž patří těžba kobaltu. Většina lithiových článků má pracovní napětí mezi 2,8 – 4,2 V a svou životností často převyšují olověné články až desetinásobně.

Princip činnosti spočívá v přechodu iontů  $\text{Li}^+$  mezi elektrodami při nabíjení a vybíjení. Materiály elektrod jsou velmi rozmanité a jejich složení silně ovlivňuje vlastnosti článku, lze však všechny označit za interkalační sloučeniny, to znamená, že jejich hlavním úkolem je umístit iont nebo molekulu do své krystalové mřížky. Tyto sloučeniny se používají, protože lithium je osamocené vysoce nestabilní, stabilitu získává v cizí materiální struktuře. Oproti ostatním typům akumulátorů tak nedochází k chemické reakci se samotným materiálem, a proto lze dosáhnout vysoké životnosti bez závažnějších změn elektrických parametrů.<sup>82</sup> Jedna elektroda je tvořena nejčastěji uhlíkem, druhá je tvořena směsí podle použité technologie. Mezi současné hlavní technologie patří:

- Li-Ion (Lithium-iontové)
- Li-Pol (Lithium-polymer)
- LFP (Lithium-železo-fosfát)
- NCA (Lithium-nikl-kobalt-hliník-oxid)
- LTO (Lithium-titan-oxid)
- NMC (Lithium-nikl-mangan-kobalt-oxid)

Lithium-iontový akumulátor obsahuje bezvodý kapalný elektrolyt, přičemž nejčastěji se jedná o směs lithium-hexafluorofosfát ( $\text{LiPF}_6$ ). Zápornou elektrodu je tvořena grafitovým uhlíkem, např. různé směsi grafitu, kladnou elektrodu tvoří sloučeniny lithium-kobalt oxid ( $\text{LiCoO}_2$ ), lithium-mangan oxid ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) nebo lithium-nikl dioxid ( $\text{LiNiO}_2$ ).<sup>83</sup>

V případě složení kladné elektrody z lithium-kobaltového oxidu a záporné uhlíkové elektrody lze popsat systém nabíjení a vybíjení na kladné elektrodě následující rovnicí:



(šipka vpravo značí vybíjení a vlevo nabíjení akumulátoru)

Na záporné elektrodě probíhá reakce:



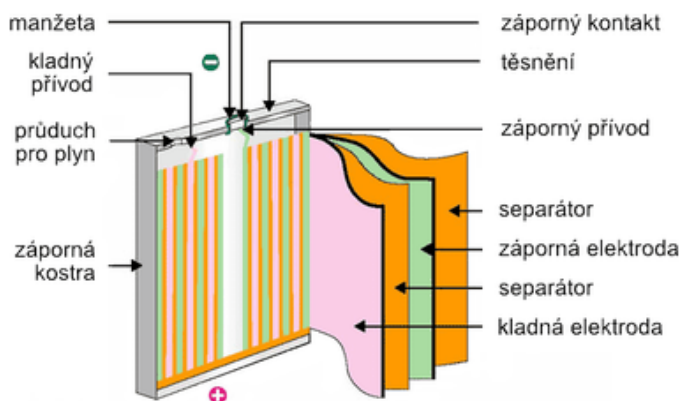
(šipka vpravo značí vybíjení a vlevo nabíjení akumulátoru)

Při nabíjení se kladné ionty  $\text{Li}^+$  uvolňují z kladné elektrody a pronikají do záporné. Elektrony skrze elektrolyt a separátor neproniknou, a tak jsou transportovány vnějším obvodem skrze nabíjecí zdroj. Problém vzniká v konceptu neproniknutelného elektrolytu, pokud elektrony přichází do kontaktu s elektrolytem dochází k jeho degradaci, což může vyústit ve vnitřní zkrat. V praxi se naštěstí neprojeví díky procesu, který vzniká při prvním nabití. Část lithných iontů je při přechodu pokryta elektrolytem a při styku s uhlíkem vytvoří vrstvu zvanou SEI. Elektrony se tak k elektrolytu skrze SEI nemohou dostat. Část lithia se při tomto

<sup>82</sup> CENEK, Miroslav. Poznámka 69

<sup>83</sup> TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory. Tzbinfo [online]. 2015 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://oze.tzbinfo.cz/akumulace-elektřiny/13612-lithiove-akumulatory>

procesu nenávratně spotřebuje, zbytek se uloží mezi vrstvy uhlíku na grafitové elektrodě. Při vybíjení je proces reverzní, kdy z grafitové elektrody se uvolňují ionty  $\text{Li}^+$  a dostávají se skrze elektrolyt do stabilního stavu na kladnou elektrodu, elektrony opět nemohou proniknout a jsou tak transportovány vnějším obvodem přes zátěž. Nabíjení se vždy provádí nabíječkami určenými na daný typ akumulátoru, nabíjí se tak různými proudy podle stupně nabití, ovšem napětí je striktně omezeno na poměrně malé rozpětí 4,1 až 4,2 V. Napětí jednoho článku je pak  $U_N = 3,6 \text{ V}$ <sup>84</sup>



Obrázek 26 – Konstrukční uspořádání lithiového článku<sup>85</sup>

Elektrody se konstruují ve formě ohybných struktur nanesených na sebe do požadovaného tvaru. Záporná elektroda obsahuje měděný základ, na který je oboustranně nanesen uhlík, kladná obsahuje hliníkový základ, na který je nanesen po obou stranách např.  $\text{LiCoO}_2$ . Plášť konstrukce je tvořen kovem a tlakovou pojistkou pro únik plynů, jedná se tak o relativně mechanicky odolný koncept. Li-Ion články neobsahují lithium ve formě kovu, což je jeden z důvodů proč lze tyto zdroje považovat i za relativně bezpečné. Mezi velkou nevýhodou těchto zdrojů se řadí samotné použití lithia a jeho sloučenin. Při styku s vlhkostí a kyslíkem dochází k nechtěným reakcím, které velmi snadno mohou zapříčinit požár, nebo rovnou explozivní destrukci článku. Proto je zapotřebí s akumulátory zacházet opatrně a skladovat je v teplotně přijatelných podmínkách, aby nedošlo k jejich protržení nebo k vnitřnímu zkratu. Používají se v bateriích notebooků nebo ve výkonových aplikacích.<sup>86</sup>

Li-Pol technologie je velmi podobná technologii Li-Ion. Zásadně se však liší stavbou elektrolytu. Na rozdíl od Li-Ion akumulátorů není elektrolyt v kapalně fázi ale ve formě tuhé polymerní sloučeniny. Koncepte tuhé elektrolytu umožňuje výrobu článku nezvyklých tvarů, pružnosti a dochází k výraznému snížení hmotnosti. Články se nejčastěji nachází v obalu z hliníku, přičemž neobsahují bezpečnostní ventil, a bývají často označovány za články špičkových parametrů. I když jsou články pružné, může lehce při mechanické manipulaci dojít ke zkratům a následně možné destrukci. Mezi hlavní výhody této technologie se řadí velký měrný vybíjecí výkon a dlouhá životnost. Na druhou stranu tyto kladné parametry se negativně projeví na ceně akumulátoru. Mezi nejčastěji používané druhy s řadí  $\text{Li-CoO}_2$  a  $\text{Li-Mn}_2\text{O}_4$  s jmenovitým napětím 3,6 V.<sup>87</sup>

<sup>84</sup> CENEK, Miroslav. Poznámka 69

<sup>85</sup> TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory. In: Tzbinfo [online]. 2015 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://oze.tzbinfo.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>

<sup>86</sup> TICHÝ, Jiří. Poznámka 83

<sup>87</sup> NOVÁK, Jaroslav, Ondřej SADÍLEK a Petr SÝKORA. Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu (1. část). Elektro [online]. 2016, (11), 8-12 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/11/Elektro\\_11\\_2016/index.html#p=11](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/11/Elektro_11_2016/index.html#p=11)

Dalším významným typem jsou články lithium-železo-fosfát, zkráceně jako technologie LFP, která využívá materiálové sloučeniny LiFe, LiFePO<sub>4</sub>, popřípadě LiFeYPO<sub>4</sub>. Poslední sloučenina využívá příměsi yttria na kladné elektrodě, které má pozitivní dopady na vodivost a stabilitu. Oproti Li-Ion technologii se může LFP pochlubit vyšší proudovou zatížitelností. Také se vyznačuje vyšší bezpečností v trakčních aplikacích kvůli silné chemické vazbě železa, fosforu a kyslíku. Tyto zdroje se často využívají jako alternativa ke klasickému 12 V olověnému akumulátoru, který lze napodobit spojením 4 článků LFP. Nevýhodou této technologie je nižší energetická hustota a kapacita.<sup>88</sup>

Konstrukce kladné elektrody u technologie NCA je tvořena sloučeninou lithium-nikl-kobalt-hliník-oxid (LiNiCoAlO<sub>2</sub>). Má podobné vlastnosti jako technologie NMC, avšak přidáním hliníku se zlepšuje chemická stabilita. NCA nabízí slušný nabíjecí, vybíjecí výkon a vyšší energetickou hustotu, bohužel ale jsou tyto články drahé a méně bezpečné.<sup>89</sup>

Technologie LTO se odlišuje modifikovaným složením záporné elektrody. Na rozdíl od použití grafitu u Li-Ion článků je použita sloučenina Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. Nominální napětí článku se pohybuje okolo 2,4 V, což je velmi malá hodnota a projevuje se i energetickou hustotou. Na druhou stranu disponují články mnohými výhodami, jako je možnost rychlého vybíjení a nabíjení, dlouhou životnost, bezpečnost a velmi dobré vlastnosti i při nízkých teplotách. Velikou nevýhodou této technologie je jednoznačně cena.<sup>90</sup>

NMC technologie lze svým poměrovým složením zaměřit na energetické nebo výkonové baterie. Tím je myšlena možnost dodání vysokého proudu nebo vysoké kapacity, nicméně obě vlastnosti zároveň tato baterie mít nemůže. Základ tvoří směs niklu a manganu. Nikl disponuje vysokou energií, zato nízkou stabilitou. Mangan se může pochlubit malým vnitřním odporem, avšak malou energetickou účinností. Mixování těchto prvků tak využívá předností obou složek. Většinou je NMC využívána jako zdroj pro nástroje, e-kola, e-koloběžky a další e-spotřebiče. Oproti technologii NCA využívá méně kobaltu, který je drahý, proto je cena NMC nižší. NCA je založena na vysoké energetické účinnosti, NMC naproti tomu má vyšší životnost.<sup>91</sup>

Technologie lithiových baterií je vysoce citlivá na okolní prostředí a míry nabití, či podbití. Obecně akumulátorům nesvědčí extrémy, jejich životnost tedy silně závisí na správném provozování jejich stavu nabití. Většina moderních baterií obsahuje elektroniku a software, který zabraňuje přebíjení a podbíjení, nicméně z dlouhodobého hlediska má také značný vliv na životnost, jak uživatel baterii provozuje. Přebíjení způsobuje usazování lithia, ztrátu kapacity a nebezpečné zahřívání článku, podbíjení pak zapříčiňuje rozklad kolektoru anody. V praxi se ukazuje, že je dobré provozovat nabití baterie mezi 70 % až 30 % kapacity. Lithiové akumulátory také vyžadují velmi přísný BMS, neboť jsou daleko citlivější na balancování například oproti olověným konkurentům. BMS má za úkol udržet systém v bezpečné pracovní oblasti. Ta je omezena právě správným operačním napětím a teplotou. Pod 0 °C se lithium usazuje při nabíjení a akumulátor nelze nabít, což je velký problém při řešení venkovních instalací. Při vysokých teplotách se rozpadají jednotlivé vrstvy a separátor. Proto jsou často jednotlivé baterie, které jsou uspořádány do battery packu, opatřeny tepelnými a chladicími články, kterými lze ovlivnit teplotu baterií. Další hlavní

---

<sup>88</sup> TICHÝ, Jiří. Poznámka 83

<sup>89</sup> BUCHMAN, Isidor. BU-205: Types of Lithium-ion. Battery university [online]. 2018 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)

<sup>90</sup> NOVÁK, Jaroslav. Poznámka 87

<sup>91</sup> BUCHMAN, Isidor. Poznámka 89

snahou je zabránění požárů, protože aktivní hmota se při vysokých teplotách rozpadá a uvolňuje kyslík, který ještě podporuje hoření, proto je hašení těchto baterií velmi náročné.

## 2.2. Elektrostatické akumulátory

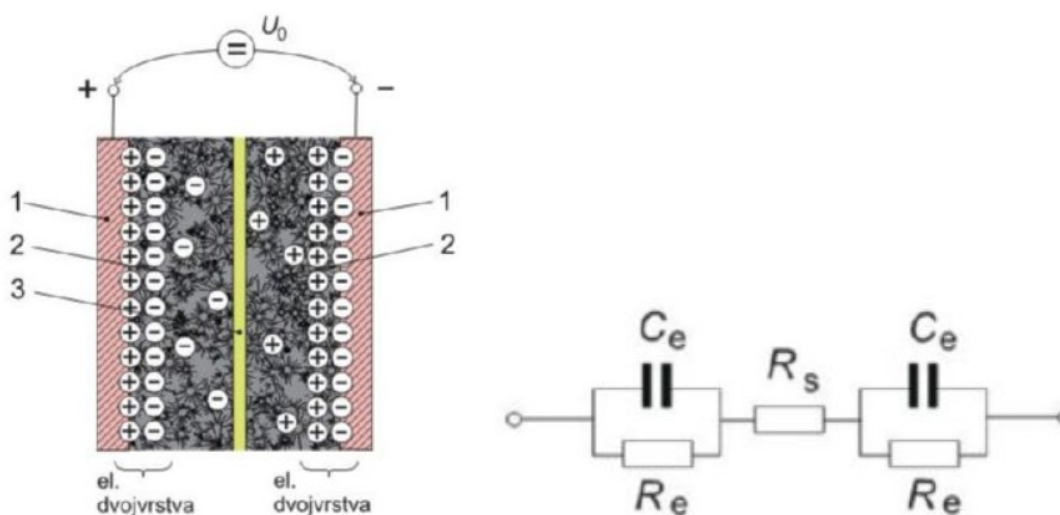
Elektrostatické systémy uchovávají energii ve formě elektrostatického pole. Jedná se tedy o koncept přímé úschovy elektrického náboje. Princip přímé úschovy umožňuje mžikové nabití a vybití oproti elektrochemickým systémům. Zásadní nevýhodou je však množství akumulované energie takových uskupení a s tím spojené velké samovybití. Nejčastějším zařízením pro úschovu náboje je kondenzátor, který lze nalézt snad v každém elektrickém obvodu. Energie pole kondenzátoru je definována podle rovnice (2.5).

$$E = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad [J; C, V; F, V] \quad (2.5)$$

Za předpokladu, že dnešní klasické kondenzátory dosahují maximálně jednotek faradů, je možné množství akumulované energie v kWh minimální, proto nemá smysl se zabývat akumulací energie v klasických kondenzátorech ale superkondenzátorech. Vztah (2.5) platí i pro superkondenzátory.

### 2.2.1. Superkondenzátor

Technologie superkondenzátorů (někdy označovaná ultrakondenzátorů) označuje kondenzátory s kapacitou v řádech jednotek až tisíců faradů. Obdobně jako u elektrochemických systémů je elektrické pole vytvářeno mezi 2 elektrodami, přičemž snahou je docílit maximální možné plochy elektrod.<sup>92</sup>



Obrázek 27 – Princip superkondenzátoru vlevo, 1 – elektrody, 2 – porézní vodivé prostředí a elektrolyt, 3 – separátor. Náhradní schéma superkondenzátoru vpravo<sup>93</sup>.

Elektrody se běžně dělají z hliníkových fólií, na které jsou nanášeny povlaky aktivního porézního uhlíku. Plocha elektrod se tak dokáže zvýšit až  $10^5$ krát. V oblasti vývoje dalších

<sup>92</sup> MAYER, Daniel. ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku [online]. 2016, (1), 6-10 [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/01/Elektro\\_01\\_2016/#p=7](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/01/Elektro_01_2016/#p=7)

<sup>93</sup> MAYER, Daniel. Poznámka 92

porézních povlaků figurují např. uhlíkové aerogely, nanovlákná apod. Elektrody jsou poměrně levné, chemicky stabilní a netoxické. Klasický kondenzátor je vyplněn dielektrikem, naproti tomu superkondenzátor obsahuje vodivý nebo gelový elektrolyt a separátor. Separátor chrání před zkratem, propouští ionty elektrolytu, skládá se nejčastěji z polypropylenu nebo kondenzátorového papíru a je velmi úzký. Elektrolyt byl v rané fázi vývoje alkalický nebo kyselý. S vývojem technologií se přešlo na organické elektrolyty typu propylen karbonát, sulfolan a další. Oproti předchozích jsou většinou toxické a dražší, nicméně jejich provozní napětí je vyšší.<sup>94</sup>

Přiložením napětí na elektrody dochází k rozpadu neutrálních molekul elektrolytu, záporné ionty jsou přitahovány ke kladné elektrodě, kladné ionty jsou přitahovány k záporné. Náboj iontů neutralizuje povrchový náboj elektrody. Na elektrodě se náboj rozloží rovnoměrně na povrchu. Vzniká tak elektrická dvojvrstva mezi elektrodou a elektrolytem. Vrstvy jsou na sebe vázány Coulombovými a absorpčními silami. Je-li tato vrstva na druhé elektrodě opačná tvoří celek dva sériově zapojené kondenzátory. Vrstva samotná disponuje díky velké ploše elektrod velkou kapacitou, nicméně její elektrická pevnost je velmi malá. Z tohoto důvodu s provozní napětí pohybuje velmi nízko, a to asi okolo 1,2 V. Za účelem vytvoření vyššího pracovního napětí je třeba sériového řazení.<sup>95</sup>

Maximální provozní napětí superkondenzátorů se pohybuje mezi 2,3 až 3,5 V a lze je použít pouze ve stejnosměrných obvodech. Tyto zdroje obsahují velmi malý vnitřní odpor a mnohou tak dodat až tisíce ampér v řádech sekund. Díky tak malému vnitřnímu odporu se používají při jejich nabíjení napěťové měniče. Disponují dlouhou životností a vysokou účinností akumulace. Jejich nevýhodou je dosavadní cena, která je stále limitující pro širokou oblast použití. V současné době se jeví jejich perspektiva ve vykrývání krátkodobých výkyvů ve fotovoltaických systémech. V budoucnu by mohli konkurovat elektrochemickým systémům například v oblasti ostrovních systémech.<sup>96</sup>

### 3. Fotovoltaické systémy

Tato kapitola stručně popisuje základní rozdělení fotovoltaických systémů. Ty se dělí na:

- Ostrovní solární systémy (OFF – grid)
  - Bez akumulace energie – Spotřebič je přímo napojen na panel. Napětí a proud, které jsou na spotřebič dodávány, jsou ovlivněny pouze odporem spotřebiče a provozními podmínkami panelu. Je zřejmé, že takový systém funguje pouze při dostatečném ozáření.
  - S akumulací energie – Spotřebič vyžaduje většinou trvalé napájení, nebo napájení v čase, kdy není panel ozářen, proto nastupuje systém akumulace, který zajistí potřebnou dodávku energie i v případě nedostatečného ozáření panelu. Je klíčové, aby u systémů, kde je vyžadována především stálá funkčnost spotřebiče, byl dobře dimenzován panel a akumulátor, aby byl systém schopen fungovat po celý rok nehledě na nepříznivé podmínky počasí.
  - Hybridní systémy – Jedná se o solární soustavu, která funguje v ostrovním režimu, nicméně v případě nedostatku energie ze solárních panelů je připojen záložní zdroj. Tento zdroj může být větrná turbína, vodní turbína, spalovací generátor atd.

---

<sup>94</sup> MAYER, Daniel. Poznámka 92

<sup>95</sup> MAYER, Daniel. Poznámka 92

<sup>96</sup> MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Poznámka 6766

- Systémy připojené k síti (ON – grid)
  - Bez akumulace energie – Fotovoltaický panel dodává energii přes střídač přímo do sítě. Systém neobsahuje akumulční prvek, je tak mnohem jednodušší na instalaci a cenu. Veškerá energie je dodávána do sítě. V případě přímého využití spotřebičem blízko instalace zdroje je třeba řídit tok energie ve střídači tak, aby většina energie pocházela z panelu místo energie ze sítě. Změna toku energie se provádí například změnou impedance vedení.
  - S akumulací energie – Systémy s akumulací využívají akumulátory především k regulaci. Akumulátor je tak většinou nabit na 50 %, aby byl schopen energii regulovat. Energie je využita pro vlastní spotřebu, přebytek se dodává do sítě.

Hybridní a systémy připojené k síti obsahují mnohé komplexní problémy, které ovšem nebudou probrány, protože tato práce cílí na ostrovní systémy.

## 4. Měníče pro fotovoltaické systémy

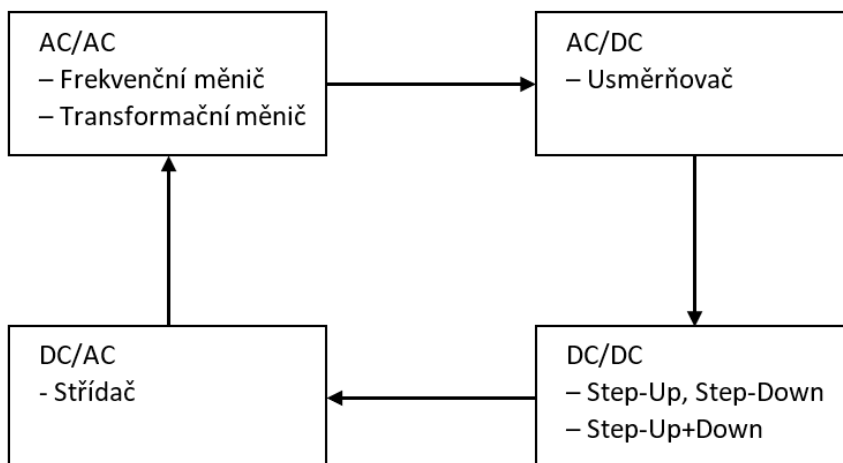
Základem většin fotovoltaických systémů je měnič. Jedná se o zařízení, které má schopnost měnit elektrické parametry. Je to základní stavební kámen, který sjednocuje jednotlivé další komponenty fotovoltaického systému. Jeho umístění se nachází zpravidla mezi zdrojem (PV zdroj) a spotřebičem (může být i síť). Měníč také monitoruje elektrické parametry a zabezpečuje celou soustavu. Mezi základní elektrické parametry se řadí:

- Napětí (U) [V].
- Proud (I) [A].
- Výkon (P) [W].
- Frekvence (f) [Hz].

Je-li výkon který je dodáván na vstupu měniče  $P_{in}$  a výkon který je odebírán na výstupu měniče  $P_{out}$ , pak účinnost  $\eta$  měniče je definována následujícím vztahem.

$$\eta (P) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad [-; W, W] \quad (4.1)$$

Při rozdělení měničů je třeba určit co mají dělat, respektive s jakými typy proudů a napětí budou pracovat, co bude na jejich vstupu a požadovaném výstupu.



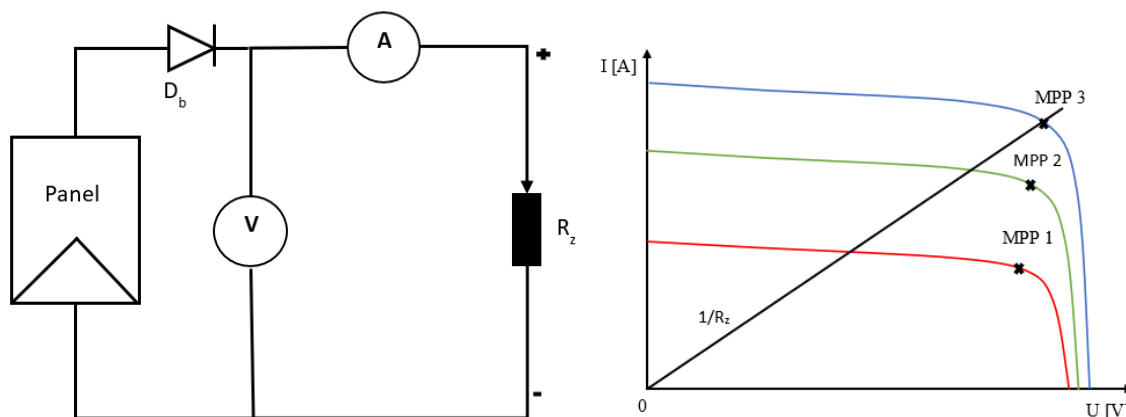
Obrázek 28 – Blokové schéma typů měničů



Měnič je sám o sobě komplikované zařízení, který obsahuje soubor komponentů, které obstarávají jednotlivé funkce. Pokud je použit například střídač, pak je tím myšleno, že vstupem do tohoto měniče je stejnosměrné napětí a výstup je střídavý, nicméně uvnitř střídače lze najít další měniče, které jsou např. typu DC/DC a jiné, slovem střídač je tak myšlen celek, který obsahuje množství zařízení, které mají za úkol vzít DC vstup a proměnit ho na AC výstup. V případě fotovoltaických systémů může celkový měnič také obsahovat:

- Monitorovací a bezpečnostní funkce.
- Regulátor baterie.
- Jištění přepětí DC a AC strany.
- Ochrana proti zkratu DC a AC strany.
- BMS

Vstupem do měniče je fotovoltaický panel. Jedná se o nestabilní stejnosměrný zdroj, který v čase neustále mění své elektrické parametry v závislosti na ozáření, teplotě a dalších faktorech. Takový zdroj lze přímo zapojit na zátěž, nicméně na grafu viz obrázek 29 lze pozorovat, že panel je plně využit (přímka zátěže protíná VA charakteristiku v MPP) pouze při určitých podmínkách.



Obrázek 29 – Schéma zapojení solárního panelu přímo na odporovou zátěž bez akumulace vlevo, VA charakteristika při různých ozáření vpravo

Z VA charakteristiky PV panelu je zřejmé, že MPP se nachází v začínající měkké oblasti proudového zdroje. Pokud je vyžadováno pevné stejnosměrné napětí na výstupu, lze využít jednoduchého DC/DC měniče, který tento požadavek zajistí, nicméně je jisté, že bude většinu času operovat v jiném bodě než v MPP, nebude tedy plně využívat potenciál panelu. Tato nevýhoda se odstraňuje MPPT regulátory, které sledují bod MPP a uzpůsobují podle něho zátěž pro panel.

### 4.1. DC-DC měniče

Základní princip DC/DC měniče je vzít stejnosměrný napěťový vstup a nehladě na jeho zkreslení vytvořit stejnosměrný výstup o určité napěťové hladině. Díky měniči lze v podstatě nezávisle na zátěži zvolit napětí na zdroji, takže například při navýšení ozáření panelu, lze udržet napětí na PV zdroji konstantní, a tak se pohybovat stále okolo bodu MPP. Při práci se stejnosměrnými veličinami se využívá především střední hodnoty  $x_{AV}$ , která je vypočtena z určitého časového úseku. V případě, že je střední hodnota počítána z času 0 do času  $t_1$  s periodou  $T$  počítané hodnoty, pak je definována podle vzorce (4.2).

$$x_{AV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{t_1} x(t) dt \quad [-; s, s] \quad (4.2)$$

Měnič pracuje s veličina U a I. Vždy bude pracovat se ztrátami, nicméně pokud by byl ideální se 100 % účinností, pak by pro něj platila rovnice jako pro transformátor.

$$P_1 = U_{PV} \cdot I_{PV} = U_z \cdot I_z = P_2 \quad [W; V, A; V, A; W] \quad (4.3)$$

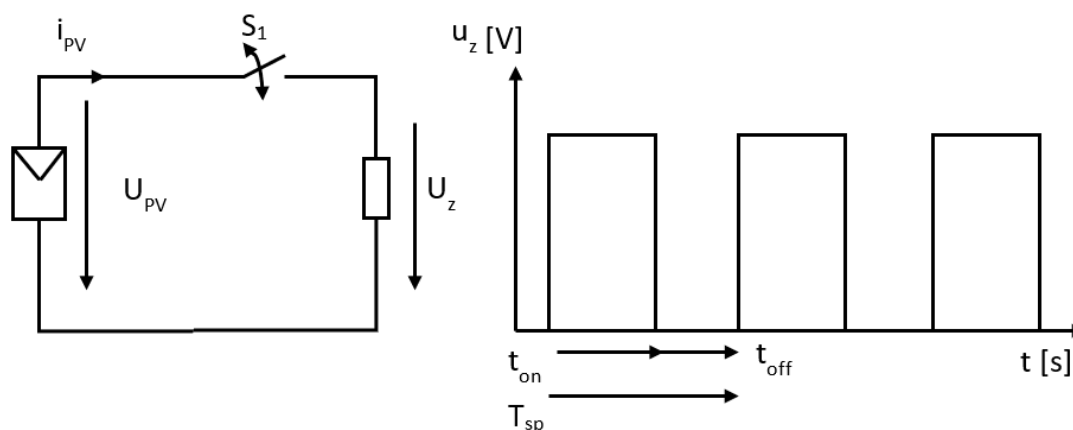
Měniče mohou výstupní napětí zvyšovat nebo snižovat oproti zdroji. Také mohou být v přímém nebo galvanicky odděleném provedení.

| Typ obvodu            |                      | Množství součástek | Cena    | Výstupní výkon | Zvlnění |
|-----------------------|----------------------|--------------------|---------|----------------|---------|
| Galvanicky neoddělený | Základní             | Malé               | Malá    | Velký          | Malé    |
|                       | SEPIC, Zeta          | Střední            | Střední | Střední        | Střední |
|                       | Nábojová pumpa       | Malé               | Střední | Malý           | Střední |
| Galvanicky oddělený   | Forward transformer  | Velké              | Velká   | Velký          | Střední |
|                       | Fly-back transformer | Střední            | Střední | Střední        | Velké   |

Tabulka 1 – Typy obvodů DC/DC měničů a jejich vlastností<sup>97</sup>

#### 4.1.1. Step-Down základní

Měniče typu Step-Down mají na výstupu menší napětí než na vstupu. Základy takového měniče lze objasnit viz obrázek 30. Je zde spínač  $S_1$ , který s periodou  $T_{sp}$  otevírá a zavírá obvod. Spínač může být realizován pomocí tranzistoru, přičemž nejčastěji se jedná o typ MOSFET. Je řízen vnějším řídicím obvodem, který zde pro zjednodušení není zakreslen. Na zátěži se objevují pulzační obdélníky, které mají amplitudu zdroje. Spínač  $S_1$  je sepnut po dobu  $t_{on}$  a rozeprt po dobu  $t_{off}$ . Součet těchto časů pak tvoří periodu  $T_{sp}$  spínače. Tento proces se označuje jako PWM.



Obrázek 30 – Základní schéma měniče jednoduchého měniče vlevo, časový průběh na zátěži vpravo

<sup>97</sup> Circuit Design Guide for DC/DC Converters: What is DC/DC Converter?. TOREX. TOREXSEMI [online]. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.torexsemi.com/technical-support/application-note/design-guide-for-dcdc-converter/whats-dcdc-converters/>

Z rovnice (4.2) lze odvodit, že při konstantním napětí na zdroji, napětí na zátěži  $U_z$  bude přímo úměrné době sepnutí spínače  $S_1$ . Pro jednoduchost se zlomek  $t_{on}/T_{S1}$  označuje jako  $D$  (Duty factor).<sup>98</sup>

$$U_z = U_{PV} \cdot \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = U_{PV} \cdot \frac{t_{on}}{T_{S1}} = U_{PV} \cdot D \quad [V; V, s, s, s; V, s, s; V, -] \quad (4.4)$$

Tento jednoduchý obvod vytváří pulzační obdélníky, které nejsou na výstupu žádoucí. Proto je do topologie přidána výstupní cívka  $L$  a kondenzátor  $C_2$  viz obrázek 31. Cívka plní funkci vyhlazování proudu  $i_z$ , zatímco kondenzátor vyhlazuje napětí  $U_z$ . Kondenzátor  $C_1$  zabraňuje pulzaci proudu ve zdroji. Dioda  $D$  slouží k vedení proudu, když je  $S_1$  rozepnut. Pro analýzu funkce obvodu je nejdříve popsána situace, **když je  $S_1$  zapnut**. Dioda je zavřená, a proto je  $U_D = U_{PV}$ . Z toho vyplývají následující rovnice.<sup>99</sup>

$$U_L = U_D - U_z = U_{PV} - U_z \quad [V; V, V, V, V] \quad (4.5)$$

Indukované napětí na cívce v čase je definováno podle indukčního zákona (4.6).

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad [V; H, A, s] \quad (4.6)$$

Za předpokladu lineárního vzrůstu proudu po dobu periody lze definovat vztah (4.7). Prochází-li cívkou proud se zvlněním  $\Delta i_L$ , pak je jeho amplituda nepřímo úměrná indukčnosti cívce  $L$ .

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{U_{PV} - U_z}{L} \quad [A, s; V, H; V, V, H] \quad (4.7)$$

V době, **když je spínač  $S_1$  rozepnut**, proudí skrze diodu  $D$  proud  $i_z$ . Za předpokladu ideální diody je napěťový úbytek na ní nulový, tedy napětí  $U_D = 0$ . Po dosazení vztahu (4.4) do rovnice (4.7) vychází vztah (4.8).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{0 - U_z}{L} = \frac{-U_{PV} \cdot D}{L} \quad [A, s; V, H; V, H; V, -, H] \quad (4.8)$$

Rovnice (4.8) je odvozena pro kontinuální průběh, tedy proud v cívce nikdy nedosáhne nuly. Pokud by  $i_L$  dosáhl nuly, pak by se jednalo o diskontinuální režim a výstupní napětí by také záviselo na výstupním proudu  $i_z$  podle rovnice (4.9).<sup>100</sup>

$$U_z = U_{PV} \cdot \frac{1}{\frac{2 \cdot L \cdot i_z}{D^2 \cdot U_{PV} \cdot T_{S1}} + 1} \quad [V; V, H, A, -, V, s] \quad (4.9)$$

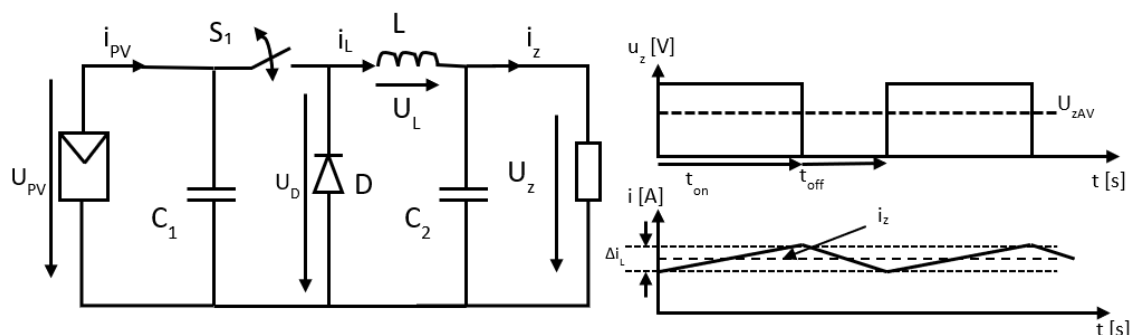
V případě že je diskontinuální režim nežádoucí, zvyšuje se spínací frekvence spínače (snižuje se spínací perioda) na maximální možnou hranici. Reakcí vzniká velmi kvalitní

<sup>98</sup> MERTENS, Konrad. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*. United Kingdom (West Sussex): John Wiley, 2014. ISBN 9781118634165.

<sup>99</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>100</sup> HUGO. Buck (step down) converter/regulator. OnMyPhD [online]. University of Porto [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <http://www.onmyphd.com/?p=voltage.regulators.buck.step.down.converter>

stabilní výstup i při malých hodnotách L a C, nicméně se zvyšující spínací frekvencí výrazně vzrostou spínací ztráty.<sup>101</sup>



Obrázek 31 – Schéma základního Step-Down měniče s výstupním filtrem vlevo, časový průběh na zátěži vpravo

Step-Down měnič samozřejmě není ideální a při jeho provozu dochází ke ztrátám. Ty jsou vodivostního nebo dynamického charakteru, přičemž vodivostní jsou především způsobeny vnitřním odporem součástek, které způsobují napěťové úbytky. Hlavní ztráty jsou způsobeny:<sup>102</sup>

- Úbytkem napětí na diodě v propustném směru.
- Odparem spínače v sepnutém stavu.
- Ekvivalentním sériovým odporem kondenzátorů.
- Ekvivalentním sériovým odporem cívek.
- Spínacími a vypínacími ztrátami.

Rovnice určené pro následující jednotlivé ztráty jsou odvozeny pro trojúhelníkový kontinuální signál.

**Úbytek napětí na diodě v propustném směru** se projevuje při průchodu proudem diodou, tedy v čase, kdy je spínač rozepnut. Obvyklý napěťový úbytek standardní křemíkové diody je okolo 0,7 V. Často se využívají spíše Schottkyho diody, které disponují úbytkem okolo 0,3 V a rychlejším přechodem z nevodivého do vodivého stavu. Výkonové ztráty jsou pak definovány pomocí napětí  $U_D$ , tedy napěťovým úbytkem na diodě a proudem v cívce v čase rozepnutého spínače.<sup>103</sup>

$$P_D = U_D \cdot I_{L(off)} \cdot (1 - D) \quad [W; V, A, -] \quad (4.10)$$

Pro zmenšení těchto ztrát se využívá konceptu náhrady diody tranzistorem. Tranzistor musí přesně sepnout v době, kdy by dioda vedla proud a úbytek je pak dán sériovým odporem tranzistoru, který je menší než na diodě. Z důvodu přesného přepínání se tento koncept nazývá synchronní obvod.

**Odpor spínače v sepnutém stavu**  $R_{on}$  závisí na typu použitého tranzistoru. MOSFET tranzistory mívají tento odpor v řádech jednotek až stovek mΩ. Při průchodu proudem vyvolá odpor výkonový úbytek  $P_S$ . Proud, který jde přes spínač, je stejný jako proud  $i_L$ , který jde přes cívku.<sup>104</sup>

<sup>101</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>102</sup> HUGO. Poznámka 100

<sup>103</sup> HUGO. Poznámka 100

<sup>104</sup> HUGO. Poznámka 100

$$P_S = \left(i_z^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12}\right) \cdot D \cdot R_{on} \quad [\text{W}; \text{A}, \text{A}, -, \Omega] \quad (4.11)$$

**Ekvivalentní sériový odpor cívky** je dán odporem materiálu, ze kterého je cívka vyrobena. Je-li cívka vyrobena z drátu, který je namotán v určitém tvaru, bude mít daný elektrický odpor  $R_L$ , který vyvolá výkonový úbytek  $P_L$ .

$$P_L = \left(i_z^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12}\right) \cdot R_L \quad [\text{W}; \text{A}, \text{A}, \Omega] \quad (4.12)$$

**Ekvivalentní sériový odpor kondenzátorů** představuje nedokonalost kondenzátorů. Ideální představa je, že kondenzátor nepropouští žádný proud mezi svými kontakty (v pojetí DC obvodů), nicméně vždy nějaký proud zde téct bude. Proudová průchodnost se projeví na ztrátě proudu za cívku, a tedy i výkonovým úbytkem. Ztráty vznikají při procesu nabíjení a vybíjení na vstupním a výstupním kondenzátoru.<sup>105</sup>

$$P_{Cout} = \frac{\Delta i_L^2}{12} \cdot R_{Cout} \quad [\text{W}; \text{A}, \Omega] \quad (4.13)$$

$$P_{Cin} = \left(D(i_z^2 \cdot (1 - D) + \frac{\Delta i_L^2}{12})\right) \cdot R_{Cin} \quad [\text{W}; -, \text{A}, -, \text{A}, \Omega] \quad (4.14)$$

**Spínací a vypínací ztráty** jsou jediné, které závisí na spínací periodě (frekvenci  $f_{sp}$ ). Se zvyšující se spínací frekvencí budou tyto ztráty růst. Závislost není lineární, proto od určité kritické frekvence začnou být tyto ztráty dominantní. Průběh spínacího procesu je ovlivněn výstupním napětím, vnitřní impedancí, maximálním možným proudem na budiči a napětím na drainu. Při spínacím procesu je zapotřebí na gate dostat množství náboje  $Q_G$ , při rozpínacím procesu je pak potřeba tento náboj odebrat. Ztráty tak vznikají jak na hradle  $P_{GS}$ , tak mezi částmi drain-source  $P_{DS}$ . Časy přechodů stavů reprezentuje doba náběhu  $t_{rise}$  a doba vypnutí  $t_{fall}$ , střední hodnota proudu cívku při sepnutém stavu je  $i_{LAV(on)}$ , napětí na tranzistoru při vypnutém stavu je  $U_{(off)}$ .

$$P_{DS} = U_{(off)} \cdot I_{LAV(on)} \cdot f_{sp} \cdot (t_{rise} + t_{fall}) \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, \text{Hz}, \text{s}, \text{s}] \quad (4.15)$$

$$P_{GS} = Q_G \cdot U_{GS} \cdot f_{sp} \quad [\text{W}; \text{C}, \text{V}, \text{Hz}] \quad (4.16)$$

Vzorce (4.10) až (4.16) jsou odvozeny pro kontinuální průběh. Základní koncept Step-Down měniče obsahuje přeměnu vstupu na výstup při účinnosti  $\eta_{SD}$ . Při výpočtu jsou také zahrnuty ztráty  $P_{other}$ , které v této práci nejsou detailněji popsány.

$$\eta_{SD} = \frac{P_{in}}{P_{in} + P_D + P_S + P_L + P_{Cout} + P_{Cin} + P_{DS} + P_{GS} + P_{other}} \quad [-; \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}, \text{W}] \quad (4.17)$$

Účinnost závisí na velkém množství faktorů, při určitých situacích se uplatňují různé ztráty s různou dominancí. Většina moderních Step-Down měničů pracuje s účinností nad 90 %. V příloze 1 a 2 jsou vyneseny některé závislosti účinnosti a ztrát při různých parametrech. Step-Down měnič vyžaduje oproti ostatním měničům vyšší kapacitu vstupního kondenzátoru pro vyhlazení nekontinuálního proudu z PV zdroje. Také tyto měniče vyžadují

<sup>105</sup> HUGO. Poznámka 100

High-side vypínače, což celý koncept dělá složitějším a dražším. Navíc při zapojení k PV zdroji je zapotřebí další blokovací diody pro maximální zužitkování proudu. Step-Down měnič se nejvíce hodí pro PV řetězce řazené v sérii, neboť při zastínění dochází k poklesu vstupního proudu, což není pro Step-Down měnič zásadní faktor na jeho funkčnost. Celý koncept navíc v sobě ukrývá již překlenovací diodu, která se hodí v sériovém zapojení.<sup>106</sup>

### 4.1.2. Step-Up základní

Často je zapotřebí výstupní napětí oproti vstupu zvýšit a k tomu se využívají Step-Up měniče. Viz obrázek 32 se nachází základní schéma takového měniče. Pro pochopení funkce je opět zapotřebí rozdělit stav měniče na 2 části. **Nejdříve je spínač S<sub>1</sub> sepnut**, za předpokladu ideálního tranzistoru bez napěťového úbytku je  $U_{S1} = 0$  a  $U_L = U_{PV}$ . Obdobně jako u základního Step-Down měniče platí podobné rovnice.<sup>107</sup>

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{U_{PV}}{L} \quad [A, s; V, H; V, H] \quad (4.18)$$

Procházející proud vybavuje cívku energií po dobu  $t_{on}$ . **Posléze je spínač S<sub>1</sub> rozepnut** a proud začne přecházet přes diodu D. Při předchozím stavu dioda sloužila k zabránění vybití kondenzátoru C<sub>2</sub> přes spínač S<sub>1</sub>.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{U_{PV} - U_Z}{L} \quad [A, s; V, H; V, V, H] \quad (4.19)$$

Proud začne klesat a  $di_L/dt$  tak bude záporné, proto je zřejmé, že  $U_Z > U_{PV}$ . Z časového průběhu vstupu a výstupu lze odvodit rovnici (4.20).

$$U_Z = U_{PV} \cdot \frac{T}{t_{off}} = U_{PV} \cdot \frac{T}{T - t_{on}} = U_{PV} \cdot \frac{1}{1 - D} \quad [V; V, s, s; V, s, s, s; V, -] \quad (4.20)$$

V případě diskontinuálního režimu přestane cívkou téct proud před dalším plnicím cyklem. Rovnice se tak opět výrazně mění, neboť výstupní napětí závisí opět na výstupním proudu  $i_z$ .<sup>108</sup>

$$U_Z = U_{PV} \cdot \left(1 + \frac{U_{PV} \cdot D^2 \cdot T_{S1}}{2 \cdot L \cdot i_z}\right) \quad [V; V, V, -, s, H, A] \quad (4.21)$$

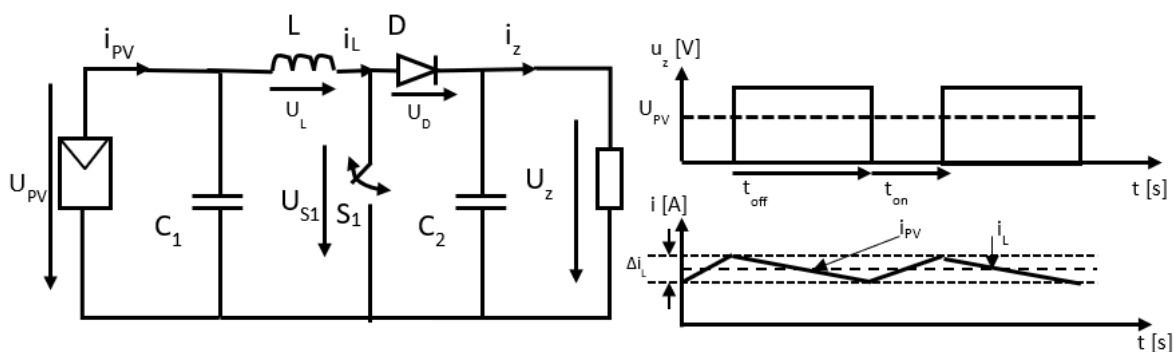
Step-Up měnič využívá v zásadě stejné součástky jako Step-Down měnič, proto i jeho ztráty budou podobné.

---

<sup>106</sup> BAHARUDIN, Nor Hanisah et al. Topologies of DC-DC Converter in Solar PV Applications [online]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Malaysia: Institute of Advanced Engineering and Science., 2017, s. 368-374 [cit. 2019-07-15]. DOI: 10.11591/ijeecs.v8.i2.pp368-374. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/de17/076d79013600eeffc9ac44da81ab18451f22.pdf>

<sup>107</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>108</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98



Obrázek 32 – Schéma základního Step-Up měniče vlevo, časové průběhy vpravo

**Úbytek napětí na diodě v propustném směru** způsobí ztrátový výkon, proto opět jsou používány diody s minimálním napěťovým úbytkem, což jsou Schottkyho diody. Na diodě vzniká úbytek v době, kdy vede proud, což je v době, kdy je  $S_1$  vypnut, takže pro něj platí rovnice (4.10). Stejně se využívá koncept synchronního měniče, tedy dioda je nahrazena dalším tranzistorem, který spíná v čase, kdy by dioda vedla proud v propustném směru.

**Odpor spínače v sepnutém stavu**  $R_{on}$  se podílí na úbytku v časovém úseku vybavování cívky.

$$P_S = i_{L(on)(rms)}^2 \cdot D \cdot R_{on} = \left( i_L^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right) \cdot D \cdot R_{on} \quad [W; A, -, \Omega; A, A, -, \Omega] \quad (4.22)$$

**Ekvivalentní sériový odpor cívky** opět závisí na odporu materiálu, ze kterého je cívka vyrobena. Proud cívku ovšem proudí jak skrz zátěž, tak skrz sepnutý  $S_1$ .

$$P_L = i_{L(rms)}^2 \cdot R_L = \left( i_L^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right) \cdot R_L \quad [W; A, \Omega; A, A, \Omega] \quad (4.23)$$

**Ekvivalentní sériový odpor kondenzátorů** je opět za vinou ztráty na vstupu a výstupu. Na ztrátách na výstupu tentokrát hraje roli zvlnění proudu, které jde přes diodu  $i_D$ .

$$P_{Cout} = \frac{\Delta i_D^2}{12} \cdot R_{Cout} \quad [W; A, \Omega] \quad (4.24)$$

$$P_{Cin(rms)} = i_{Cin(rms)}^2 \cdot R_{Cout} \quad [W; A, \Omega] \quad (4.25)$$

**Spínací a vypínací ztráty** se projeví na  $S_1$  stejně jakou Step-Down měniče. Opět platí, že ztráty stoupají se zvyšující se spínací frekvencí. Při určení vztahu pro ztráty se objeví funkční konstanta  $k$  ( $0,17 < k < 0,5$ ) a maximální  $i_{LMax}$  a minimální  $i_{LMin}$  hodnoty proudu na indukčnosti<sup>109</sup>. Dynamické ztráty se projeví i na diodě, avšak tato ztráta bude zařazena mezi ostatní ztráty  $P_{other}$ .<sup>110</sup>

<sup>109</sup> BULUT, Enis Baris a Korhan CENGIZ. DETERMINATION THE EFFECTS OF DUTY CYCLE AND SWITCHING FREQUENCY ON EFFICIENCY OF BOOST CONVERTER FOR FIXED LOAD APPLICATIONS. EPSTEM [online]. 2017, (1), 69-75 [cit. 2019-08-04]. ISSN 2602-3199. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/379914>

<sup>110</sup> BULUT, Enis Baris a Korhan CENGIZ. TRAKYA UNIVERSITY. ICONTES2017: International Conference on Technology, Engineering and Science: DETERMINATION THE EFFECTS OF DUTY CYCLE AND SWITCHING FREQUENCY ON EFFICIENCY OF BOOST CONVERTER FOR FIXED LOAD APPLICATIONS [online]. ISRES, 2017, s. 69-75 [cit. 2019-07-17]. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/379914>

$$P_{DS} = k \cdot U_z \cdot f_{sp} \cdot (t_{rise} \cdot i_{LMax} + t_{fall} \cdot i_{LMin}) \quad [W; -, V, Hz, s, A, s, A] \quad (4.26)$$

Účinnost  $\eta_{SU}$  se počítá stejně jako u Step-Down měniče podle vzorce (4.17). Na jejím průběhu se projeví spínací frekvence, zátěž, požadovaný napěťový výstup vůči vstupu a další faktory. V příloze 3 jsou vyneseny některé matematicky vypočtené závislosti  $\eta_{SU}$  a poměrného výstupního  $U_z$  na  $D$ . Účinnost Step-Up měničů je většinou nižší než účinnost Step-Down měničů v důsledku chvilkového toku proudu přímo na záporný (nebo nulový) potenciál, nicméně rozdíl mezi nimi není až tak výrazný. Platí, že mezi nejúčinnější měniče tohoto typu patří synchronní provedení, kde hodnota účinnosti může dosahovat až 96 %, avšak typická hodnota se pohybuje okolo 90 %. Step-Up měnič vyžaduje větší indukčnost cívky oproti Step-Down měniči, na druhou stranu již v sobě obsahuje blokovací diodu, takže nehrozí, že by tok energie proudil zpět přes články. Koncept Step-Up je méně účinnější a trpí limity ve výkonu a rozdílu napěťového vstupu a výstupu. Step-Up měnič je vhodný pro řetězce v paralelním zapojení, neboť vstupní proud je klíčovou složkou pro funkci, a proto v případě zastínění jednoho z článků nehrozí velký pokles celkového součtu proudů na vstupu.<sup>111</sup>

### 4.1.3. Step-Up+Down základní

V případě nutnosti stabilního napětí na výstupu je zapotřebí použít DC/DC měniče. Napětí na vstupu je buďto vyšší, stejné nebo menší než na výstupu. Je-li vstupem v zásadě stabilní zdroj, pak lze určit, zda je zapotřebí Step-Up nebo Step-Down měniče, ale pokud je vstup nestálý a často je vyšší nebo menší než výstup, pak je zapotřebí použít Step-Up+Down měniče. Takový nestálý vstup může být právě fotovoltaický panel.

Základní schéma pro pochopení funkce je znázorněno viz obrázek 33. Opět se v konceptu nachází spínač  $S_1$ , který je řízen PWM logikou. Dioda je tentokrát zapojena s opačnou polaritou oproti předchozím typům. **Nejdříve je spínač  $S_1$  sepnut**, proud  $i_L$  roste podle indukčnosti cívky  $L$  a vybavuje ji energií. Z předchozího cyklu je nabitý kondenzátor  $C$ , ten se vybíjí do zátěže, proud  $i_C$  je tak záporný a napětí  $U_z$  je kladné. Polarita výstupního napětí je opačná než polarita vstupního a napětí na cívce. Platí, že  $U_L > U_z$ , a proto je dioda  $D$  zavřená. Při sepnutém  $S_1$  platí (4.27) a (4.28) pro změnu proudu na cívce.<sup>112</sup>

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{U_{PV}}{L} \quad [A, s; V, H; V, H] \quad (4.27)$$

$$\Delta i_{L(closed)} = \frac{U_{PV}}{L} \cdot D \cdot T \quad [A; V, H; -, s] \quad (4.28)$$

**Poté je spínač  $S_1$  rozepnut**, cívka musí udržet proud, neboť je v ní nahromaděná energie. Proud teče do  $C$  a do zátěže, poté skrz diodu,  $i_C$  je tak kladný. Napětí na cívce  $U_L$  je rovno opačné polaritě na zátěži  $-U_z$ .

<sup>111</sup> BAHARUDIN, Nor Hanisah et al. Poznámka 106

<sup>112</sup> Buck Boost Converter. ELECTRICAL4U. Electrical4U [online]. 2018 [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/buck-boost-converter/>



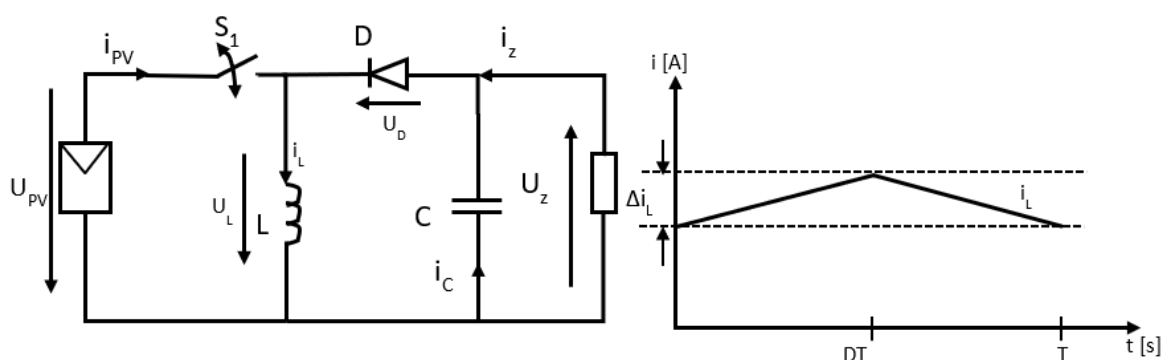
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{-U_Z}{L} \quad [\text{A; s; V; H; V; H}] \quad (4.29)$$

$$\Delta i_{L(\text{open})} = \frac{-U_Z}{L} \cdot (1 - D) \cdot T \quad [\text{A; V; H; -, s}] \quad (4.30)$$

Součet změny proudů  $\Delta i_{L(\text{closed})}$  a  $\Delta i_{L(\text{open})}$  by měl být nulový. Z tohoto předpokladu vyplývá rovnice (4.31) pro výstupní napětí při kontinuálním režimu.

$$U_Z = U_{PV} \cdot \frac{D}{1 - D} \quad [\text{V; V; -, -}] \quad (4.31)$$

Je-li tedy  $D = 0,5$ , pak je na výstupu stejné napětí jako na vstupu, pokud ovšem  $D > 0,5$ , pak se výstupní napětí zvyšuje, pokud  $D < 0,5$ , pak se výstupní napětí snižuje.<sup>113</sup>



Obrázek 33 – Schéma základního Step-Up+Down měniče vlevo, časový průběh proudu na cívce vpravo

Dalším možným provedením, jak zkonstruovat Step-Up+Down měnič, by bylo zapojení Step-Down měniče následované Step-Up měničem, který by přepínal své spínače v závislosti na vstupu. Jednalo by se tak o koncept neinvertujícího měniče na rozdíl od výše zmíněného typu.

Analogicky ztráty vznikají stejně jako na Step-Up nebo Step-Down měniči, neboť koncept obsahuje kondenzátor, cívku, diodu a spínač, které provázejí své nedokonalosti. V příloze 4 je uveden příklad grafu normalizovaného napětí ( $U_Z/U_{PV}$ ) na normalizovaném proudu  $[(L \cdot I_Z)/(T \cdot U_{PV})]$ . Step-Up+Down měnič se v praxi ukazuje jako nejefektivnější řešení při hledání bodu MPP. Nejlépe totiž dokáže kopírovat MPP i při rychlých změnách okolních podmínek a jeho efektivita se tak ukazuje vyšší i přes jeho méně efektivní topologii.<sup>114</sup>

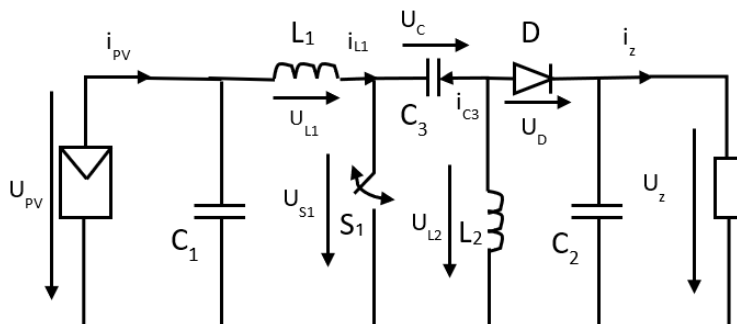
#### 4.1.4. SEPIC, Zeta

Dalším měničem, který umí napětí zvýšit nebo snížit na výstupu, je typ **SEPIC**. Svou funkci zakládá na výstupní indukci, která je klíčovým prvkem této topologie. Stejně jako základní Step-Up+Down měnič ovlivňuje svůj výstup v závislosti na  $D$ , nicméně má tu výhodu, že jeho výstup nemá obrácenou polaritu vůči vstupu. Obrázek 34 vyobrazuje základní schéma pro pochopení principu SEPIC měniče. **Je-li spínač  $S_1$  sepnut**, pak se vybavuje cívka  $L_1$ , zároveň je napětí  $U_C$  kladné a kondenzátor  $C_3$  se vybíjí. Vybíjení  $C_3$  je provázeno kladnou polaritou proudu  $i_{C3}$  a proudem skrz cívku  $L_2$ . Při tomto průběhu se tak vybavuje i cívka  $L_2$  a  $U_{L2}$  je tak záporné. Dioda  $D$  je zavřena, napětí a proud skrz zátěž existuje jenom díky

<sup>113</sup> Buck Boost Converter. Poznámka 112

<sup>114</sup> BAHARUDIN, Nor Hanisah et al. Poznámka 106

kondenzátoru  $C_2$  nabitému z předchozího cyklu. **Je-li spínač vypnut** energie uložená v cívce  $L_1$  nabíjí kondenzátor  $C_3$ , zároveň změna na cívce  $L_2$  vyvolá kladnou polaritu  $U_{L2}$ , která je vyšší než  $U_z$  a dioda  $D$  je tak otevřena. Kondenzátor  $C_2$  je nabíjen a  $i_{C3}$  je záporný.<sup>115</sup>



Obrázek 34 – Schéma SEPIC měniče

Pro obvod SEPIC platí rovnice (4.31) a pro kontinuální mód pro  $D$  platí (4.32). Ztráty se opět dělí na střídavé a stejnosměrné a projeví se na diodě, spínači, kondenzátorech a cívkách. Koncept SEPIC má malé vstupní zvlnění proudu, a hlavně je vstupní proud kontinuální, což je často vyžadováno u některých zdrojů, například u baterií. Dále disponuje vysokým stupněm izolace mezi vstupem a výstupem, lze tak využívat ve vysokonapěťových PV aplikacích.

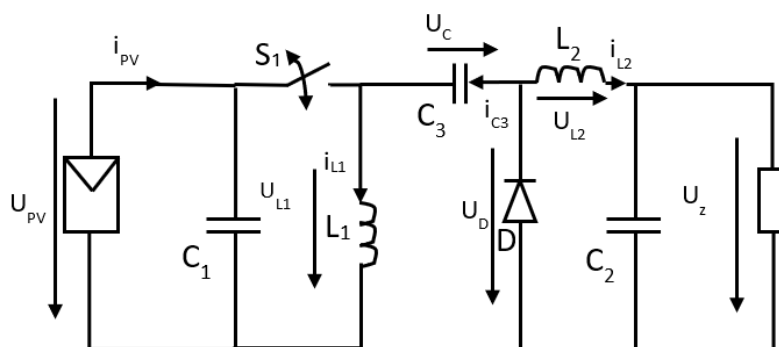
$$D = \frac{U_z + U_D}{U_{PV} + U_z + U_D} \quad [-; V, V, V, V, V] \quad (4.32)$$

Topologie **Zeta** je velmi podobná topologii SEPIC. Rozdíly lze nalézt v záměně spínače  $S_1$  s cívkou  $L_1$  a zároveň diody  $D$  s cívkou  $L_2$ , jak lze pozorovat viz obrázek 35. Zeta vyžaduje high-side vypínač a není tak často využívána jako SEPIC. **Pokud je  $S_1$  rozepnut**, napětí  $U_{L2}$  na cívce  $L_2$  je záporné a je rovno  $-U_z$ . Proud  $i_{L2}$  pokračuje na zátěž a do kondenzátoru  $C_2$ . Zdroj není připojen,  $i_{C3}$  má kladnou polaritu, přičemž pochází z otevřené diody  $D$ . Dále platí, že  $U_{L1}$  je záporné a je rovno  $-U_z$ , takže na spínači by bylo naměřeno napětí  $U_{PV} + U_z$ . **Je-li  $S_1$  sepnut**, dochází k vybavování cívky  $L_1$  a  $L_2$ , proto  $U_{L1}$  a  $U_{L2}$  jsou kladné. Kondenzátor  $C_3$  je nabíjen na napětí zdroje a na zavřené diodě  $D$  se objevuje napětí  $U_{PV} + U_z$ . Obdobně jako u obvodu SEPIC platí rovnice (4.31) pro kontinuální režim.<sup>116</sup>

Zásadní rozdíly mezi SEPIC a Zeta se projeví na kondenzátoru  $C_3$ , kde u obvodu SEPIC se objevuje napětí  $U_{PV}$ , zatímco u Zeta se objevuje  $U_z$ . Zeta má malé výstupní a velké vstupní zvlnění proudu, naproti tomu SEPIC má tyto vlastnosti přesně obrácené. Zeta se častěji používá se synchronním obvodem, aby byly minimalizovány ztráty na diodě. V příloze 4 lze nalézt graf závislosti účinnosti a ztrát na výstupním proudu pro dané typy měničů.

<sup>115</sup> BHAVIN, Trivedi a etc. Analysis of SEPIC Converter. GDEC COLLEGE. IJEDR [online]. 2018, 6(2), 489-494 [cit. 2019-07-25]. ISSN 2321-9939. Dostupné z: <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1802085.pdf>

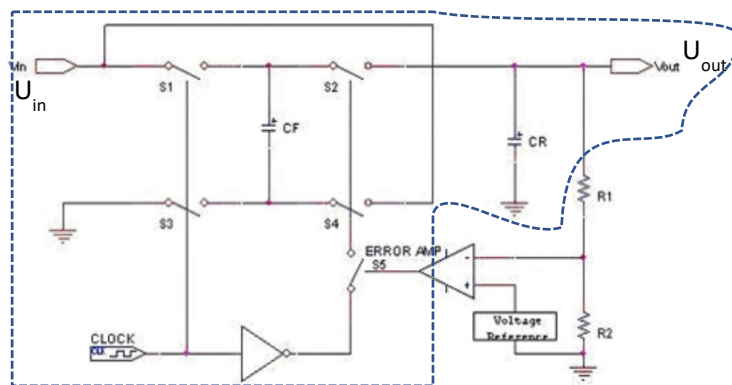
<sup>116</sup> BETTEN, John. Synchronous Zeta Converter Outperforms The SEPIC. TEXAS INSTRUMENTS. HOW2POWER [online]. 2014, , 1-7 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: [http://www.how2power.com/pdf\\_view.php?url=/newsletters/1405/articles/H2PToday1405\\_design\\_Texas%20Instruments.pdf](http://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1405/articles/H2PToday1405_design_Texas%20Instruments.pdf)



Obrázek 35 – Schéma měniče s topologií Zeta

#### 4.1.5. Nábojová pumpa

Základní princip funkce nábojové pumpy využívá úschovy energie v kondenzátorech. Na rozdíl od svých konkurentů tak nevyužívá cívky, což má pozitivní i negativní dopady na různé aplikace. Jedním z častých provedení je zdvojovací nábojová pumpa, která se vyznačuje dvojnásobným napětím na výstupu oproti vstupu ( $U_{out} = 2 \cdot U_{in}$ ) a její základní schéma lze nalézt viz obrázek 36. **Během nabíjení** jsou sepnuty spínače  $S_1$  a  $S_3$ , zatímco  $S_2$  a  $S_4$  jsou rozepnuty. Vstupní napětí se objeví na kondenzátoru  $C_F$ , který se nazývá flying kondenzátor. Výstupní kondenzátor  $C_R$  byl během předchozí fáze nabit na napětí  $2 \cdot U_{in}$  a nyní dodává proud na zátěž. **Během vybíjení** jsou spínače  $S_1$  a  $S_3$  rozepnuty, zatímco  $S_2$  a  $S_4$  jsou sepnuty. Mezi zdrojem a zemí je kondenzátor  $C_F$  a  $C_R$  v sérii, proto je napětí na  $C_F$  dvojnásobné oproti vstupu.  $C_F$  je tak při procesu vybíjení zdrojem jak pro nabíjení kondenzátoru  $C_R$ , tak pro zátěž.<sup>117</sup>



Obrázek 36 – Schéma regulované nábojové pumpy, modře přerušovaná čára bez spínače  $S_5$  označuje obvod zdvojovací nábojové pumpy<sup>118</sup>

Celý proces přepínání fáze nabíjení a vybíjení je řízen hodinami. Kondenzátory  $C_F$  a  $C_R$  potřebují při standardních podmínkách poměrně vysokou kapacitu na správné fungování, avšak platí, že při vyšší frekvenci je kapacitance kondenzátoru menší, a proto je možno tuto kapacitu zmenšit při změně frekvence. Zdvojovací pumpa je nestabilní a neregulovaný zdroj, proto je modifikována přidáním zpětné vazby, která porovnává chtěnou napěťovou referenci s výstupem, a označuje se jako regulovaná nábojová pumpa. Zpětná vazba je často realizována komparátorem s hysterezí pro zabránění oscilací. Výstup komparátoru ovládá

<sup>117</sup> DENG, Qi. Comparing regulated charge-pump and inductor-based DC/DC converters. In: MICROCHIP TECHNOLOGY. Eetimes [online]. 2006 [cit. 2019-07-26]. Dostupné z: [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1273125](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273125)

<sup>118</sup> DENG, Qi. Poznámka 117

spínač  $S_5$ , který ovlivňuje  $S_2$  a  $S_4$  během vybíjecí fáze. Je-li tedy napětí na výstupu pod požadovanou hodnotou, je spínač  $S_5$  sepnut a tím i spínače, které ovládá. Spínač je sepnut, dokud není na výstupu požadovaná hodnota. Analogicky pokud je napětí na výstupu nad požadovanou hodnotou, je spínač  $S_5$  rozepnut, dokud se napětí na výstupu nezmenší. V případě topologie viz obrázek 36 je zřejmé, že výstup může být regulován mezi nulou a dvojnásobkem vstupního napětí ( $0 < U_{out} < 2 \cdot U_{in}$ ). Regulovaná nábojová pumpa je tak měničem, který dokáže napětí na výstupu oproti vstupu zvýšit nebo snížit.<sup>119</sup> Při velkém zatížení a následném dosažení kritické hodnoty proudu dochází k negativním jevům, které mohou způsobit nefunkčnost celého konceptu, proto jsou nábojové pumpy efektivním řešením pouze pro nízko proudové aplikace.

### 4.1.6. Galvanicky oddělené

DC/DC měniče jsou často dimenzovány na malé napětí, pro dosažení dostatečného výkonu je tak zapotřebí dodat větší proud, avšak Jouleovy ztráty stoupají s kvadrátem proudu, proto při vyšších výkonech dochází ke ztrátě účinnosti. Řešením je samozřejmě napětí zvýšit, ovšem s tím přichází negativní jevy. Jedním z problémů je fakt, že se vůči zemi část PV pole polarizuje kladně, část záporně. Při překročení určité hranice záporné polarizace dochází k nenávratnému poškození panelu. U tenkovrstvých modulů dochází k difúzi sodíkových iontů ze skla na vrstvu TCO. Při styku s vodou dochází k elektrochemické reakci, která způsobí korozi TCO. U objemových materiálů dochází k rekombinaci nabitých částic vygenerovaných světlem. Ta sama o sobě nezpůsobuje poškození článku, ale dochází k polarizačním efektům v EVA. Pro zabránění této degradace se uzemňuje záporný pól na obou stranách soustavy a veškeré PV pole je tak polarizováno kladně vůči zemi. Dalším důvodem použití galvanicky oddělného obvodu je jistě bezpečnost soustavy.<sup>120</sup>

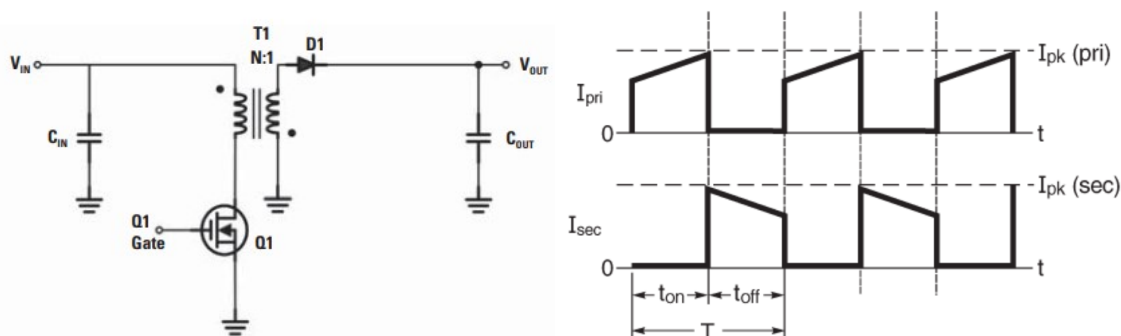
Jedním z představitelů galvanicky oddělných DC/DC měničů je **fly-back transformer**. Je především určen pro nízko výkonové aplikace a vyznačuje se nízkou cenou, vysokou účinností a možností invertovaného výstupu. Také je schopný pracovat v širokém rozsahu vstupního a výstupního napětí. Opět se jedná o měnič, který může zvyšovat nebo snižovat napětí na výstupu oproti vstupu a platí pro něj rovnice (4.31), kde logicky viz obrázek 37  $U_{in}$  je  $U_{PV}$  a  $U_{out}$  je  $U_Z$ . Podle topologie viz obrázek 37 je výstup invertovaný. Pokud je zapotřebí neinvertovaného výstupu je nutno změnit smysl vinutí transformátoru (obě tečky by byly nahoře). **Pokud je spínač  $Q_1$  sepnut**, dochází k nárůstu průchodu proudu primárním vinutím. Cívka společně s magnetickým jádrem se začne vybavovat energií. Obrácená polarita vinutí způsobí, že na výstupu působí záporné napětí, které zabraňuje otevření diody  $D_1$ . **Je-li spínač  $Q_1$  rozepnut**, nahromaděná energie je transformována na sekundární stranu, a protože je polarita napětí obrácena, je  $D$  otevřena a proud směřuje do kondenzátoru  $C_{out}$  a do zátěže. Topologie měniče fly-back transformer je provázána pulzujícím nekontinuálním proudem na vstupu, což může některým zdrojům vadit. Výstupní proud je velmi zvlněný a často tak koncept vyžaduje přidání dalších kondenzátorů. Nejhorší situace nastává při maximálním zatížení na výstupu a minimálním napětí na vstupu. Pokud je zatížení příliš velké, dochází k poklesu primární indukčnosti a kapacita úschovy energie je nedostatečná, proto nakonec dojde ke ztrátě kontroly regulace. Typicky je výkon na výstupu tohoto měniče

---

<sup>119</sup> DENG, Qi. Poznámka 117

<sup>120</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

akceptovaný do 150 W. Fly-back transformer se vyznačuje především svou jednoduchostí, neboť na výstupu není zapotřebí výstupní cívky.<sup>121</sup>



Obrázek 37 – Schéma měniče fly-back transformer vlevo<sup>122</sup>, časové průběhy proudu na primární a sekundární straně pro kontinuální režim vpravo<sup>123</sup>

Dalším typem je měnič **Forward transformer**, který se vyznačuje nepulzujícím výstupním proudem z důvodu použití výstupní cívky. Oproti předchozímu typu energie již není uchovávána v magnetickém poli cívky transformátoru během prvního cyklu, místo toho je přenášena během tohoto cyklu. Proto je základní smysl vinutí obráceně a požadavky na transformátor jsou zcela jiné. Základní schéma měniče forward transformer lze pozorovat viz obrázek 38. **Pokud je spínač Q<sub>1</sub> sepnut**, proud začne stoupat ve vinutí N<sub>P</sub>. Na diodu D<sub>1</sub> působí kladné napětí a je tak otevřena, zatímco na diodu D<sub>2</sub> a D<sub>3</sub> působí záporné napětí a jsou tak zavřeny. Proud v sekundárním vinutí pomalu stoupá kvůli indukčnosti L<sub>out</sub>. **Poté je spínač Q<sub>1</sub> rozepnut**, na N<sub>P</sub> se objeví záporná polarita napětí, která způsobí otevření D<sub>3</sub> a průchod proudu skrz resetovací vinutí N<sub>R</sub>. Na sekundární straně také dojde ke změně polarity napětí, D<sub>1</sub> se tak zavře a proud pokračuje skrze D<sub>2</sub>. Pro výstupní napětí platí rovnice (4.33), kde N<sub>sec</sub> je počet závitů na sekundární straně transformátoru a N<sub>prim</sub> na primární straně.<sup>124</sup>

$$U_{out} = U_{in} \cdot D \cdot \frac{N_{sec}}{N_{prim}} \quad [V; V, -, -, -] \quad (4.33)$$

Díky cívce L<sub>out</sub> je zajištěn kontinuální proud, což silně redukuje ztráty střídavou složkou. Oproti klasickým můstkovým typům je oblíbenou volbou pro jednoduché provedení galvanicky oddělených měničů. Svým výkonem na výstupu může dosáhnout až 200 W a svojí účinností se pohybuje okolo 96 %.<sup>125</sup>

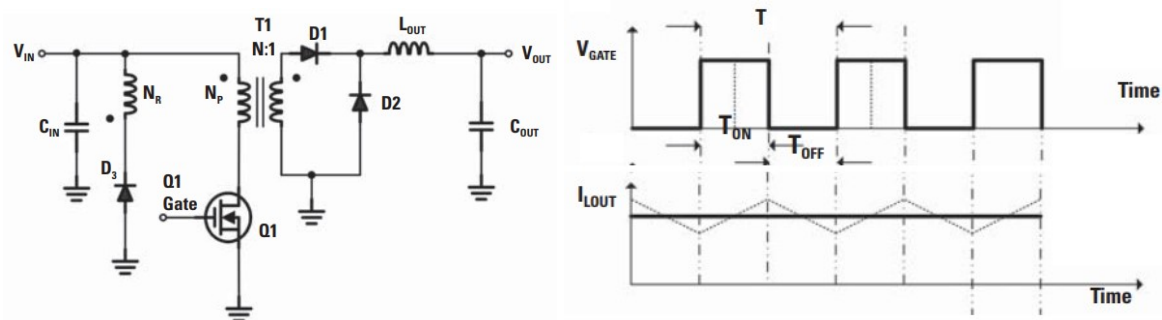
<sup>121</sup> BABA, David. Isolated Supply Overview and Design Trade-Offs. TEXAS INSTRUMENTS. Power designers: Expert tips, tricks, and techniques for powerful designs [online]. (124), 1-9 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snva603/snva603.pdf>

<sup>122</sup> BABA, David. Poznámka 121

<sup>123</sup> A Guide to Flyback Transformers. In: COILCRAFT. Coilcraft [online]. 2019 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: [https://www.coilcraft.com/edu/flyback\\_transformer.cfm](https://www.coilcraft.com/edu/flyback_transformer.cfm)

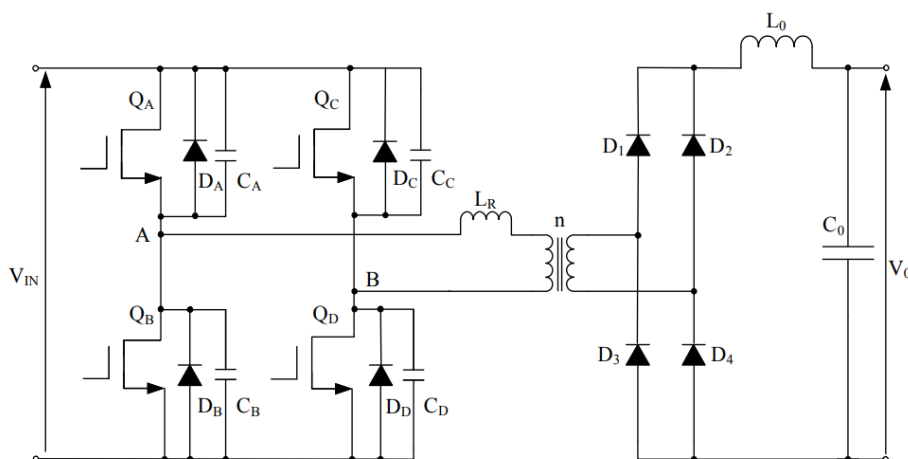
<sup>124</sup> BABA, David. Poznámka 121

<sup>125</sup> BABA, David. Poznámka 121



Obrázek 38 – Schéma měniče forward transformer vlevo, časový průběh proudu na výstupu vpravo<sup>126</sup>

Další možností, jak realizovat galvanicky oddělený měnič, je vytvoření PWM můstku na primární straně transformátoru. Na sekundární straně je pak můstek složený z diod, výstupního kondenzátoru a LC filtru. Tento měnič se nazývá **plně můstkový měnič**. Je především určen pro vysoké výkony nad 500 W a je schopen napětí na výstupu zvyšovat nebo snižovat. Oproti předchozím měničům obsahuje větší množství součástek a je komplikovanější na řízení. Pro minimalizaci objemu železa transformátoru se opět využívá vyšší spínací frekvence, nicméně pro nízko výkonové aplikace je tento měnič nevhodný, neboť nedosahuje tak vysokých účinností při malém zatížení.



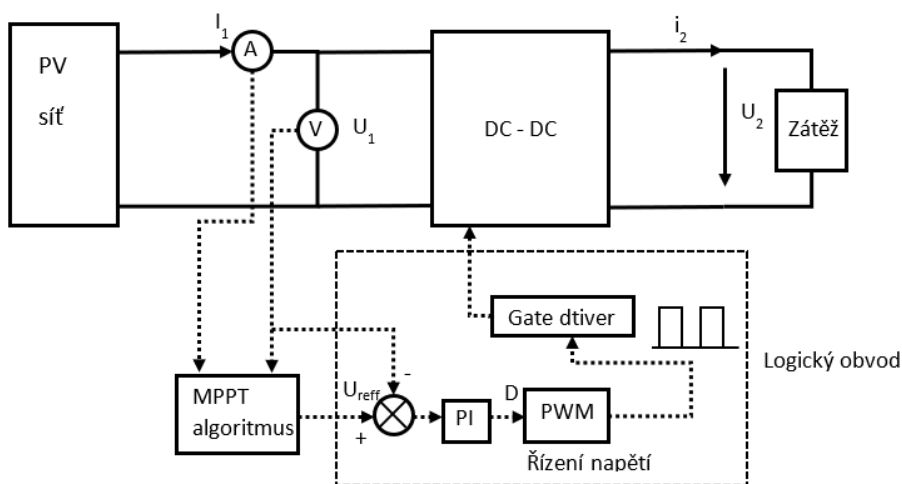
Obrázek 39 – Plně můstkový měnič<sup>127</sup>

## 4.2. MPPT regulátory

VA charakteristika PV zdroje silně závisí na vnějších podmínkách jako je ozáření, teplota atd. Pro maximalizaci výkonu, který z panelu lze dostat, se používají MPPT, které nehledě na zátěž na výstupu umí upravit vstupní odpor tak, aby se PV zdroj pohyboval v MPP. Přitom změny vnějších podmínek u PV zdroje mohou být velmi dynamické a MPPT musí umět na ně správně reagovat. PV zdroj je zapojen na vstup DC/DC měniče, kde je měřen proud  $i_1$  a napětí  $U_1$ . Podle typu algoritmu je vypočítána hodnota, která je přes regulátor poslána pomocí PWM logiky na hradla spínače do DC-DC měniče.

<sup>126</sup> BABA, David. Poznámka 121

<sup>127</sup> DIKER, A. a etc. Design and Implementation of A Single-Stage Full-Bridge DC/DC Converter with ZVS Mode. Mechatronics [online]. 2013, , 347-348 [cit. 2019-08-04]. DOI: 10.1007/978-3-319-02294-9\_44. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-02294-9\\_44](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-02294-9_44)



Obrázek 40 – Základní schéma MPPT

Metody získávání MPP jsou rozlišovány jako:

- Nepřímé – MPP se určují podle průměrných statistických hodnot, přičemž občas změří veličiny na vstupu a výstupu. Výhodou je absence kontinuálních měřících přístrojů, což se pozitivně projeví na ceně a jednoduchosti. Nevýhodou je nepřesné sledování MPP, neboť okolní podmínky jsou dynamicky proměnné.
- Přímé – Měří neustále alespoň jednu veličinu v čase a podle ní mění své parametry. Často využívají faktu, že v bodě MPP je  $dP/dU = 0$ . Velkou výhodou je, že nepotřebují znát data ohledně svého PV zdroje, dokážou se přizpůsobit v závislosti na ozáření a oteplení.<sup>128</sup>

#### 4.2.1. Fractional Open-Circuit Voltage

Metoda Fractional Open-Circuit Voltage je nepřímou metodou získávání MPP. Je uveden předpoklad, že MPP se typicky nachází blízko 76 %  $U_{OC}$  panelu. Později bylo toto číslo přeměněno na interval 70-82 % mezi  $U_{MPP}$  a  $U_{OC}$ . Tento interval byl odvozen z experimentálních měření panelů na trhu. Jednoduše je tak aplikována rovnice (4.34), která vychází z lineárního průběhu mezi závislostí  $U_{OC}$  a  $U_{MPP}$ . Konstanta  $k_{OC}$  náleží mezi  $0,7 < k_{OC} < 0,9$ .<sup>129</sup>

$$U_{MPP} = U_{OC} \cdot k_{OC} \quad [V; V, -] \quad (4.34)$$

K určení MPP je tak zapotřebí změřit  $U_{OC}$ , to je možné pouze při rozpojeném vstupním obvodu. Během měření tak nedochází k napájení vstupu a energie nemůže skrz systém proudit, což vede ke značným ztrátám. Čím vyšší je hodnota ozáření, tím jsou tyto ztráty vyšší. Tento problém se často řeší přidáním pilotního článku, který je stejný jako články použité v PV systému. Článek slouží pouze k měřicím účelům, nemůže tak dodávat energii do systému, nicméně při měření nedochází k odpojení zátěže.<sup>130</sup>

Další možnou aplikací je použití semi-pilotního článku. Ten je integrovaný do panelu a v době, kdy není měřeno  $U_{OC}$  dodává energii do systému. V době měření je překlenut

<sup>128</sup> BAIMEI, Dmitry a etc. Improved Fractional Open Circuit Voltage MPPT Methods for PV Systems. Electronics [online]. 2019, 8(231), 1-20 [cit. 2019-07-22]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/journal/electronics>

<sup>129</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>130</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

spínačem (tranzistorem MOSFET) a odpojen od obvodu. Posléze je na tomto článku měřeno  $U_{OC}$ . Ztráty tak vznikají především na jednom nevyužitém článku a na spínači.<sup>131</sup>

### 4.2.2. Short-Circuit current

Při nepřímé metodě Fractional Open-Circuit Voltage (FOCV) je měřeno napětí, nicméně MPP lze statisticky odhadnout také podle proudu nakrátko  $I_{SC}$ . Obdobně jako u FOCV přichází předpoklad lineární závislosti proudu  $I_{MPP}$  na  $I_{SC}$  podle rovnice (4.35), kde  $k_{SC}$  je mezi  $0,78 < k_{SC} < 0,92$ .<sup>132</sup>

$$I_{MPP} = I_{SC} \cdot k_{SC} \quad [A; A, -] \quad (4.35)$$

Nejčastěji se volí hodnota  $k_{SC}$  tak, že  $I_{MPP}$  je 90 %  $I_{SC}$ , tedy  $k_{SC} = 0,9$ . Měření proudu nakrátko je ale problémové. V případě použití Step-Up měniče, lze obvod vyzkratovat přímo v měniči. Účinnost Short-Circuit current metody je mírně vyšší oproti FOCV a má také rychlejší reakci na změny.<sup>133</sup>

### 4.2.3. Temperature Method

Zatímco hodnota  $I_{SC}$  je silně závislá na ozáření ale nijak významně na oteplení, hodnota  $U_{OC}$  má tyto vlastnosti opačně. Napětí naprázdno u Temperature Method je tak počítáno s lineární závislostí na teplotě článku podle rovnice (4.36).  $U_{OC(STC)}$  je napětí při STC,  $T$  je teplota článku,  $dU_{OC}/dT$  je teplotní gradient a  $T_{STC}$  je teplota při STC. Lze tak měřit okolní teplotu a podle ní vypočítat  $U_{OC}$ , následně se pokračuje jako u FOCV podle vzorce (4.34). Výhodou je, že není třeba řešit ztráty způsobené při měření. Jedná se tedy opět o nepřímou metodu, kde pro PI regulátor je měřeno  $T$  a  $U_{PV}$ . Výhodou takového uskupení je stabilita, protože teplota článku neprochází dynamickými změnami, a levná cena teplotních senzorů.<sup>134</sup>

$$U_{OC} \cong U_{OC(STC)} + \frac{dU_{OC}}{dT} \cdot (T - T_{STC}) \quad [V; V, V, K, ^\circ C, ^\circ C] \quad (4.36)$$

### 4.2.4. Perturb and Observe (P&O)

Jedná se o nejznámější a nejoblíbenější přímou metodu hledání MPP. Je založena na neustálém směřování do bodu MPP pomocí P&O algoritmu. Ten se zakládá na principu periodické změny napětí na vstupu a poté porovnávání změny výkonu před a po změně. Pokud po změně nastal vzrůst výkonu, pak je zřejmé, že aktuální pracovní bod se posunul k MPP a smysl změny napětí (znaménko) zůstane zachován. Pokud po změně dojde k poklesu výkonu, znamená to, že pracovní bod se odchýlil od bodu MPP, proto musí nastat

<sup>131</sup> BAIMEL, Dmitry a etc. Poznámka 128

<sup>132</sup> KUMAR, J. Surya a Ch. Sai BABU. COMPARISON OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHMS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM. International Journal of Advances in Engineering & Technology [online]. 2011, 1(5), 133-148 [cit. 2019-07-22]. ISSN 2231-1963. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9739/dc880d63cb90a57f023e07d4b67dc45da7ce.pdf>

<sup>133</sup> KUMAR, J. Surya a Ch. Sai. Poznámka 132

<sup>134</sup> FARANDA, Robert a SONIA LEVA. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. WSEAS Transactions on Power Systems [online]. 2008, 6(3), 446-455 [cit. 2019-07-22]. ISSN 1790-5060. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/a535/786eaceec7333e1e2c1325a538c4a2b1265b.pdf>

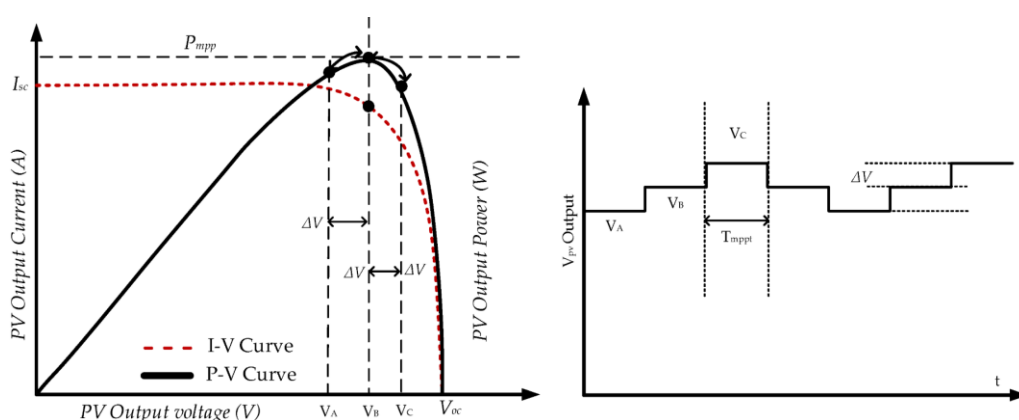


změna smyslu změny napětí, aby se pracovní bod nadále od MPP neoddaloval. Obecná rovnice pro P&O algoritmus je (4.37), kde  $k$  je  $k$ -tá veličina a  $T_p$  je interval mezi změnami.<sup>135</sup>

$$x_{((k+1)T_p)} = x_{(kT_p)} \pm \Delta x$$

$$= x_{(kT_p)} + (x_{(kT_p)} - x_{((k-1)T_p)}) \cdot \text{sign}(P_{(kT_p)} - P_{((k-1)T_p)}) \quad \begin{matrix} [-; -, -; -, -, \\ W, W] \end{matrix} \quad (4.37)$$

V zásadě jsou dvě základní možnosti, jak implementovat P&O algoritmus do PV systému. První možnost zahrnuje otevřený cyklus po každé implementaci (Perturbing), který mění  $D(t)$  v závislosti na čase. Druhá možnost je použití reference napětí, která je porovnávána s aktuální hodnotou. Obvod je tak vybaven zpětnou napěťovou vazbou. Při aplikaci na rovnici (4.37) je v případě první možnosti  $x$  nahrazeno  $D(t)$ , v případě druhé možnosti  $u_{\text{ref}}(t)$  nahrazuje  $x$ .<sup>136</sup>



Obrázek 41 – VA a PV charakteristika vlevo (balancování mezi 3 body), konstantní změny napětí vpravo<sup>137</sup>

Tento koncept sledování MPP ovšem obsahuje mnohé problémy. Při procesu posouvání se po VA charakteristice PV zdroje závisí změna na  $\Delta x$  a  $T_p$ . Rozdíl  $\Delta x$  ovlivňuje, jak velká změna proběhne při jednom cyklu. Lze tedy nastavit, aby  $\Delta x$  bylo velké, díky tomu je při velké změně vnějších podmínek rychlejší posun k MPP, nicméně zase vzniká problém ve velké nestabilitě okolo MPP při ustálených podmínkách. Při malém  $\Delta x$  je nestabilita menší, ale při velkých změnách je posun do MPP pomalejší. Praxe ukazuje, že minimální počet kroků, aby bylo zajištěno, že bude docházet periodicky k oscilaci okolo bodu MPP, je tři. To přibližně odpovídá změně  $2\Delta x$  a periodě  $4T_p$ . Správná volba těchto parametrů je velmi důležitá, neboť při statických podmínkách stále dochází ke ztrátám, neboť systém se nikdy neudrží v MPP. Navíc také často dochází k situaci, kdy soustava osciluje mezi 3 body, prostřední bod se nenachází v MPP, a to vede k dalším ztrátám.<sup>138</sup>

Při volbě  $T_p$  je v zásadě stejný problém jako u  $\Delta x$ . Malé  $T_p$  může snadno způsobit nestabilitu, velké zase příliš pomalé hledání MPP. Velký problém tohoto algoritmu nastává při náhlé změně ozáření  $G$ . Je-li při kroku ( $k$ ) rozhodnuto, že systém provede změnu o  $\Delta x$ , která při konstantním  $G$  způsobí změnu  $\Delta P_x$ , zatímco při změně  $G$  a nulovém  $\Delta x$  by jinak došlo ke změně výkonu  $\Delta P_G$ , pak P&O algoritmus funguje správně za podmínky  $|\Delta P_x| \geq |\Delta P_G|$ . Tato

<sup>135</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>136</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>137</sup> MACAULAY, John a Zhongfú ZHOU. A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System. *Energies* [online]. Swansea, 2018, 11(6), 1-15 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1340/htm>

<sup>138</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

podmínka je zcela logická, pokud například systém bude v MPP a během cyklu nastane výrazná změna G, navíc při kroku (k) dojde ke snížení P a U, pak při kroku (k+1) bude při dodržení podmínky zaznamenán nižší výkon a U bude správně navýšeno. Tím se systém přiblíží opět k MPP. Ovšem při nedodržení podmínky bude při kroku (k+1) naměřena vyšší hodnota výkonu, systém tak zareaguje snížením U, čímž se posouvá od bodu MPP.<sup>139</sup>

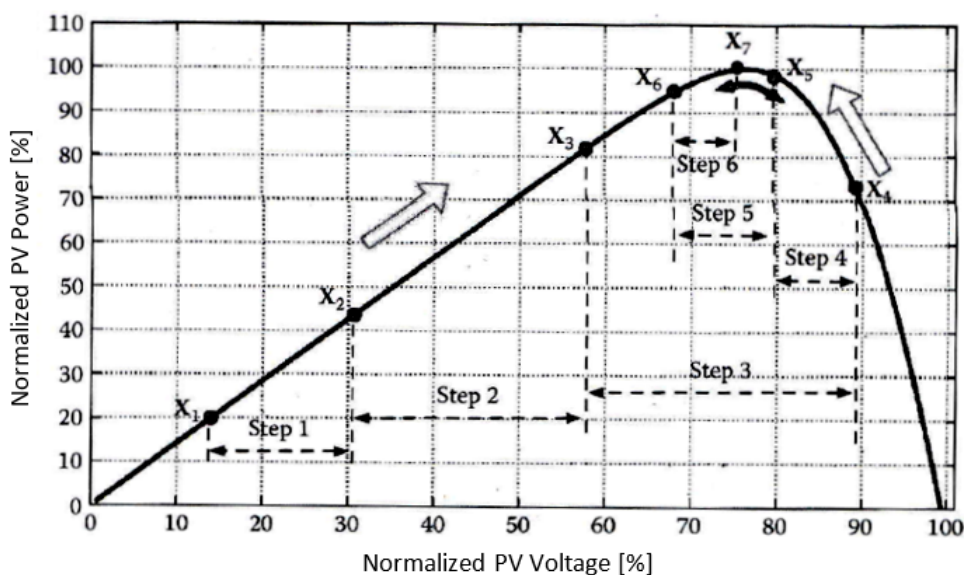
### 4.2.5. P&O with Adaptive Step Size

Vylepšenou příomou metodou je Perturb and Observe with Adaptive Step Size, která již nevyužívá parametry  $\Delta x$  a  $T_p$  jako fixní, nýbrž jako proměnné. Zásadní rozdíl tak vzniká v konceptu změny kroku v závislosti na změně výkonu ( $dP/dU$ ). Je-li změna výkonu malá, pak následující krok bude menší. Díky této modifikaci je sledování MPP velmi přesné a stabilní. Rovnice (4.37) přechází na tvar (4.38), kde N je rozměrový faktor, který je nastaven na začátku periody za účelem regulace kroku.<sup>140</sup>

$$d_{((k+1)T_p)} = d_{(kT_p)} \pm \Delta d$$

$$= d_{(kT_p)} \pm N \cdot \frac{\left| P_{(kT_p)} - P_{((k-1)T_p)} \right|}{\left| U_{PV(kT_p)} - U_{PV((k-1)T_p)} \right|} \quad \left[ \begin{matrix} -, -, -, -, W, \\ W, V, V \end{matrix} \right] \quad (4.38)$$

Rozměrový faktor N je často nastaven manuálně pro daný systém. Přesné zjišťování optimální hodnoty probíhá experimentálním měřením. Účinnost systému je velmi vysoká, a to hlavně při statických změnách. V důsledku změny velikosti kroku je systém stabilní okolo MPP a dosahuje vysoké účinnosti. Při dynamických změnách je schopen rychle se dostat do maxima.



Obrázek 42 – Jednotlivé proměnné kroky posunu po VA při metodě Perturb and Observe with Adaptive Step Size<sup>141</sup>

<sup>139</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>140</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>141</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

#### 4.2.6. P&O with Parabolic Approximation

Na rozdíl od předchozích přímých metod využívá tato 3 poslední naměřené body. Ty se využívají k výpočtu interpolace parabolické funkce, protože funkce výkonu okolo bodu MPP se tvarem nejvíce podobá parabole. Důvod vzniku této metody je především kvůli přítomnosti ztrát při balancování algoritmu P&O okolo bodu MPP. Při balancování často totiž dochází i k 4 bodové oscilaci, která vede ještě k vyšším ztrátám oproti stabilnímu 3 bodovému stavu. Také může snadno docházet k chybám při malých rozdílech výkonu mezi dvěma kroky. Myšlenka této metody je následující. Ze 3 posledních vzorků je provedena interpolace paraboly, vrchol této paraboly je určen jako další operační bod v následujícím kroku. Přitom jsou využívány proměnné  $\Delta x$  a  $T_p$  jako v metodě Perturb and Observe with Adaptive Step Size. Snadno se může stát, že před interpolací jsou 3 naměřené body v oblasti  $I_{sc}$ , pak by se další operační bod mohl ocitnout za hranicí  $U_{oc}$ , ovšem proti takovému kroku je algoritmus chráněn. P&O with Parabolic Approximation je rychlá a jednoduchá metoda při hledání MPP, která se dokáže dostat do oblasti okolo MPP během několika kroků.<sup>142</sup>

#### 4.2.7. Incremental Conductance (IC)

Jedná se o další přímou metodu, která ovšem pracuje na odlišném principu než P&O. Metoda vychází z podmínky (4.39) pro umístění bodu MPP.

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U \cdot I)}{dU} = 0 \quad [W, V; V, A, V] \quad (4.39)$$

Derivace složené funkce lze upravit na tvar (4.40). V zásadě lze rovnici prezentovat, že v bodě MPP je absolutní hodnota vodivosti  $G_e$  stejná jako absolutní hodnota změny vodivosti  $dG_e$ .

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad [A, V; A, V] \quad (4.40)$$

Pro dosažení této podmínky je opět zapotřebí správně měnit napětí na PV zdroji. Pro nespojitý signál přechází rovnice (4.40) na (4.41).

$$\frac{I_k}{U_k} = -\frac{I_k - I_{k-1}}{U_k - U_{k-1}} \quad [A, V; A, A, V, V] \quad (4.41)$$

Z rovnice (4.40) lze odvodit, že je-li levá strana větší než pravá, pak se operační bod pohybuje nalevo od MPP. Analogicky, pokud je větší, systém se nachází od MPP napravo. Na základě těchto úvah je pak pro dosažení MPP operační napětí zvýšeno nebo sníženo. Oproti P&O IC systém pozná, zda se nachází nalevo či napravo od MPP. IC je také schopno vyhnout se oscilacím okolo MPP a díky tomu může dosáhnout až o 8 % vyšší účinnosti. Při náhlých změnách vnějších podmínek trpí stejnými problémy jako P&O, ovšem při statickém stavu je výrazně výkonnější.<sup>143</sup>

#### 4.2.8. P&O via Output Parameters

Sledování maximálního bodu výkonu bylo ve všech zmíněných metodách prováděno na straně u PV zdroje. Hledání maximálního výkonu ovšem může být provedeno měřením na

<sup>142</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>143</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

výstupu DC/DC měniče, neboť maximální výkon na výstupu je zároveň reakcí na maximální výkon na vstupu. MPPT algoritmus je velmi zjednodušen, protože k nalezení k MPP stačí monitorovat pouze jeden z výstupních parametrů (napětí nebo proud). Ve většině praktických systémů se zálohovanou baterií jsou ovšem pro jistotu monitorovány obě složky pro kontrolu a bezpečnost baterie a zjednodušení tak ztrácí význam. Výstup DC/DC měniče je vstupem pro P&O algoritmus, který ovlivňuje D. Tato metoda může být aplikována na prakticky jakoukoliv zátěž. Na druhou stranu je méně stabilní a může snadno způsobovat nepřesnosti.

### 4.2.9. Soft Computing Methods

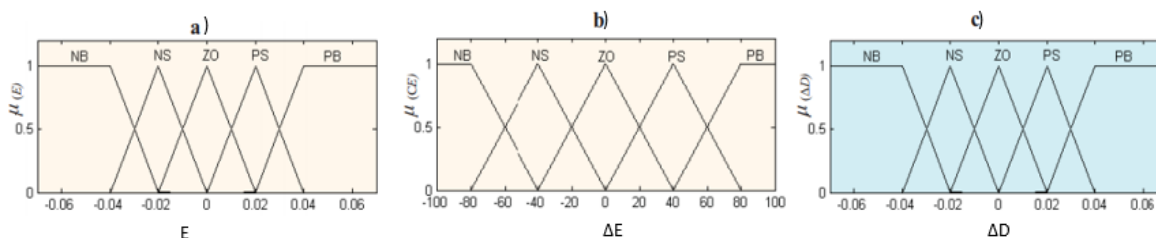
Mezi pokročilejší přímé metody se řadí Fuzzy Logic Control a Artificial Neural Network. Oproti klasickým metodám se vyznačují vyšší cenou, nicméně také vyšší účinností.

**Fuzzy Logic Control** vychází z P&O, avšak snaží se především limitovat ztráty při změně ozáření. Typická fuzzy logika obsahuje 3 komponenty – fuzzification module, inference engine a defuzzification module. První komponent obstarává funkci převodu reálných vstupních dat pomocí transformace na tzv. „fuzzy“ proměnné. Při vzorkování vstupu (proudu a napětí) je definována chyba E a změna chyby  $\Delta E$  při vzorku k.<sup>144</sup>

$$E_k = \frac{P_k - P_{k-1}}{I_k - I_{k-1}} \quad [-; W, W, A, A] \quad (4.42)$$

$$\Delta E_k = E_k - E_{k-1} \quad [-; -, -] \quad (4.43)$$

$E_k$  ukazuje na jaké straně je operační bod od MPP a strmost ovlivňuje změnu D,  $\Delta E_k$  pak ukazuje směr posunu tohoto bodu. Fuzzy proměnné jsou násobeny odpovídajícími měřítky a transformovány na 5 lingvistických proměnných – PB(positive big), PS (positive small), ZO (zero), NS (negative small) a NB (negative big). Jednotlivé přiřazené lingvistické proměnné pro různé vstupy lze vidět viz obrázek 43.<sup>145</sup>



Obrázek 43 – Lingvistické proměnné pro vstup a) E, b)  $\Delta E$  a c)  $\Delta D$ <sup>146</sup>

Inference engine obsahuje pravidla pro dané vstupy. Tabulka 2 – Pravdivostní tabulky fuzzy logiky Tabulka 2 rozhoduje o výstupu, který nabude jedné z lingvistických hodnot. Je-li teda například  $E = PB$  a  $\Delta E = NB$ , pak výstup  $\Delta D$  je PB. Je tedy zřejmé, že operační bod je hodně

<sup>144</sup> BENDIB, B. a etc. Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system. THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. Energy Procedia [online]. 2014, , 383-392 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214007826>

<sup>145</sup> BENDIB, B. a etc. Poznámka 144

<sup>146</sup> BENDIB, B. a etc. Poznámka 144

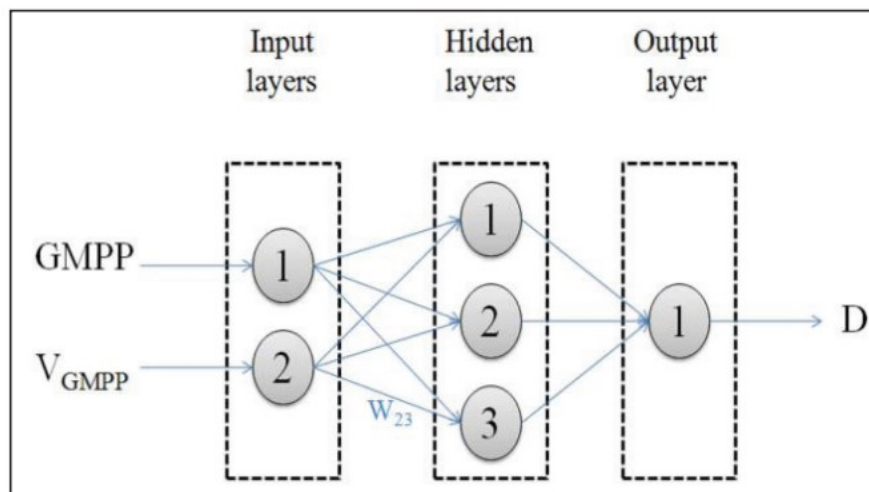
vzdálený od MPP vlevo a v důsledku bude hodně zvednuto D, takže systém se rychleji přiblíží MPP.<sup>147</sup>

| $\Delta E$<br>E | NB | NS | ZE | PS | PB |
|-----------------|----|----|----|----|----|
| NB              | ZE | ZE | NB | NB | NB |
| NS              | ZE | ZE | NS | NS | NS |
| ZE              | NS | ZE | ZE | ZE | PS |
| PS              | PS | PS | PS | ZE | ZE |
| PB              | PB | PB | PB | ZE | ZE |

Tabulka 2 – Pravdivostní tabulky fuzzy logiky, intenzity barvy rozlišují velikosti vstupních proměnných

Defuzzification module provádí opačnou operaci než první modul. Proces převodu se běžně provádí 2 algoritmy – Center of Area (COA) a the Max Criterion Method (MCM). Výsledek algoritmů je změna  $\Delta D_k$ , která je opět přes měřítko převedena na aktuální hodnotu.<sup>148</sup>

**Artificial Neural Network** naproti tomu je matematický model, který je vystaven na principu funkce biologické neurální sítě. Obrázek 44 ukazuje strukturu 3 vrstvé neurální sítě. Vstupní vrstva obsahuje dva vstupy, které vznikly při skenování systému. Mezi skenované veličiny patří proud, napětí, teplota a ozáření. Skrytá vrstva obsahuje funkce, které jsou aktivovány na základě vážené hodnoty spojení mezi neurony, přičemž uzpůsobení váhy mezi neurony se nazývá trénování. Ze skryté vrstvy je výstup funkce přenesen na výstupní vrstvu, kde je signál transformován na signál určený pro spínače. Postupným získáváním informací o vstupech a výstupech systém trénuje, tedy uzpůsobuje váhy k jednotlivým funkcím, a zlepšuje tak svoji efektivitu, dá se tedy říct, že se učí.<sup>149</sup> Metoda tak časem dosahuje vyšší účinnosti a efektivity při hledání MPP, nicméně musí být nastavena pro konkrétní typ panelu. Navíc panel mění časem své vlastnosti a díky již „naučenému“ systému je třeba ho občas překonfigurovat.<sup>150</sup>



Obrázek 44 – Struktura neurální sítě

<sup>147</sup> BENDIB, B. a etc. Poznámka 144

<sup>148</sup> BENDIB, B. a etc. Poznámka 144

<sup>149</sup> BOUSELHAM, Loubna a etc. A new MPPT-based ANN for photovoltaic system under partial shading conditions. ScienceDirect [online]. 2017, (111), 924-933 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217302886>

<sup>150</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

#### 4.2.10. Účinnost MPPT

Účinnost jednotlivých algoritmů je zkoumána spíše experimentálními měřeními a nelze ji jen tak obecně generalizovat. Výrazně se liší ve statickém a dynamickém prostředí, proto se často na tyto dvě složky rozděluje. Někteří autoři měření často uvádějí, že dvě nejznámější metody hledání MPP (P&O a IC) jsou z hlediska účinnosti na tom v zásadě stejně.<sup>151</sup>

Vzhledem k faktu, že účinnost je závislá na vnějších podmínkách, odebraném výkonu a dalších faktorech, je někdy lepší se vyhnout údajům o maximální možné účinnosti, místo toho je zaveden parametr Euro účinnost  $\eta_{Eu}$ , který respektuje výkyvy dodávaného výkonu a dává obecný přehled, jak je vlastně měnič účinný v přibližných možných provozních stavech. Z rovnice (4.44) je vidět, že 50 % účinnost má váhu 0,48, tedy nejvýše se projeví na celkové Euro účinnosti. Další účinnosti mají jinou váhu podle pravděpodobnosti stavu, ve kterém s bude měnič nacházet.<sup>152</sup>

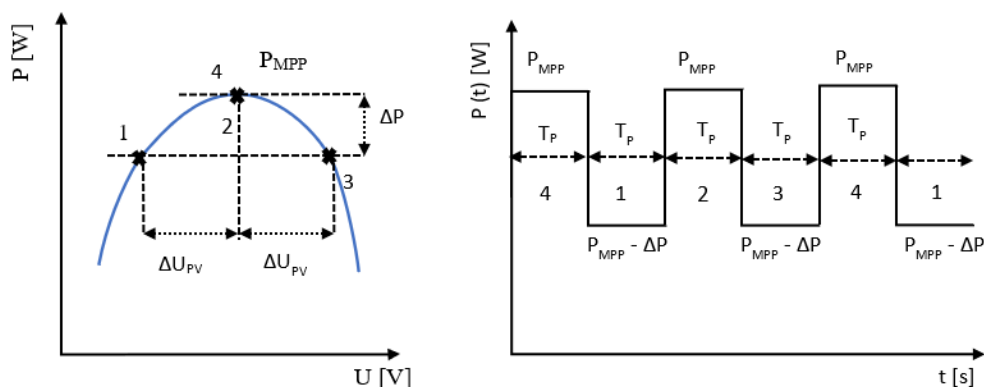
$$\eta_{Eu} = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,1 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,2 \eta_{100\%} \quad \begin{matrix} [\%; \%, \%, \%, \\ \%, \%, \%, \end{matrix} \quad (4.44)$$

Při hlubokém zkoumání vlastností MPPT je brána v úvahu MPPT účinnost  $\eta_{MPPT}$ , která je definována následovně.

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{MPP}(t) dt} \quad [-; W, s, W, s] \quad (4.45)$$

Z rovnice (4.45) vyplývá, že maximální  $\eta_{MPPT}$  je v případě, že operační bod je v bodě MPP od doby  $t_1$  do  $t_2$ . Při analýze účinnosti je zaveden předpoklad, že VA charakteristika okolo MPP je parabola. V případě základního algoritmu P&O lze ukázat, že pokud je systém ve stabilním ideálním 3 bodovém stavu, což znamená, že prostřední bod se nachází v MPP, pak probíhá balancování z jednoho bodu do druhého, kde jeden přechod trvá  $T_P$ . Viz obrázek 45 je perioda výkonu  $4T_P$  a účinnost pak přechází z tvaru (4.45) na (4.46).<sup>153</sup>

$$\eta_{MPPT} = 1 - \frac{\Delta P}{2 \cdot P_{MPP}} \quad [-; W, W] \quad (4.46)$$



Obrázek 45 – 3 bodová P&O na VA vlevo, výkon v čase vpravo

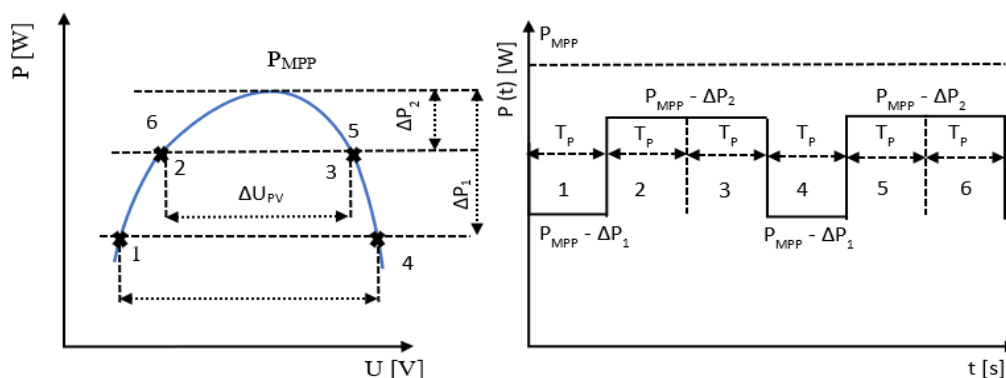
<sup>151</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

<sup>152</sup> Photovoltaic (PV) balance of system components: Basics, performance. PEARSALL, Nicola. The Performance of Photovoltaic (PV) Systems [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017, s. 135-181 [cit. 2019-07-08]. ISBN 978-1-78242-336-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/inverter-efficiency>

<sup>153</sup> FEMIA, Nicola a etc. Poznámka 47

Změna výkonu  $\Delta P$  je závislá na změně amplitudy podle použité P&O metody, na PV zdroji a vnějších podmínkách. Tato účinnost je odvozena pro nejlepší stav, ve kterém se systém může nacházet, ovšem může se také nacházet v nejhorším stavu, a to sice 4 bodovém, kdy 2 body odpovídají stejnému výkonu a MPP se tak nachází mezi 2 a 3 bodem. Ztráta výkonu je navýšena o další krok a rovnice (4.45) přechází na tvar (4.47).

$$\eta_{MPPT} = 1 - \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{2 \cdot P_{MPP}} \quad [--; W, W, W] \quad (4.47)$$



Obrázek 46 – 4 bodová P&O na VA vlevo, výkon v čase vpravo

V reálných aplikacích se pak statická účinnost u P&O bude pohybovat mezi těmito 2 stavy. Dynamická účinnost je měřena nebo matematicky počítána při různých typech změn ozáření. Mezi druhy změn patří například skoková, trojúhelníková, obdélníková atd. V závislosti na prostředí je jedna z těchto účinností dominantnější, a to je třeba zohlednit při dimenzování systému.

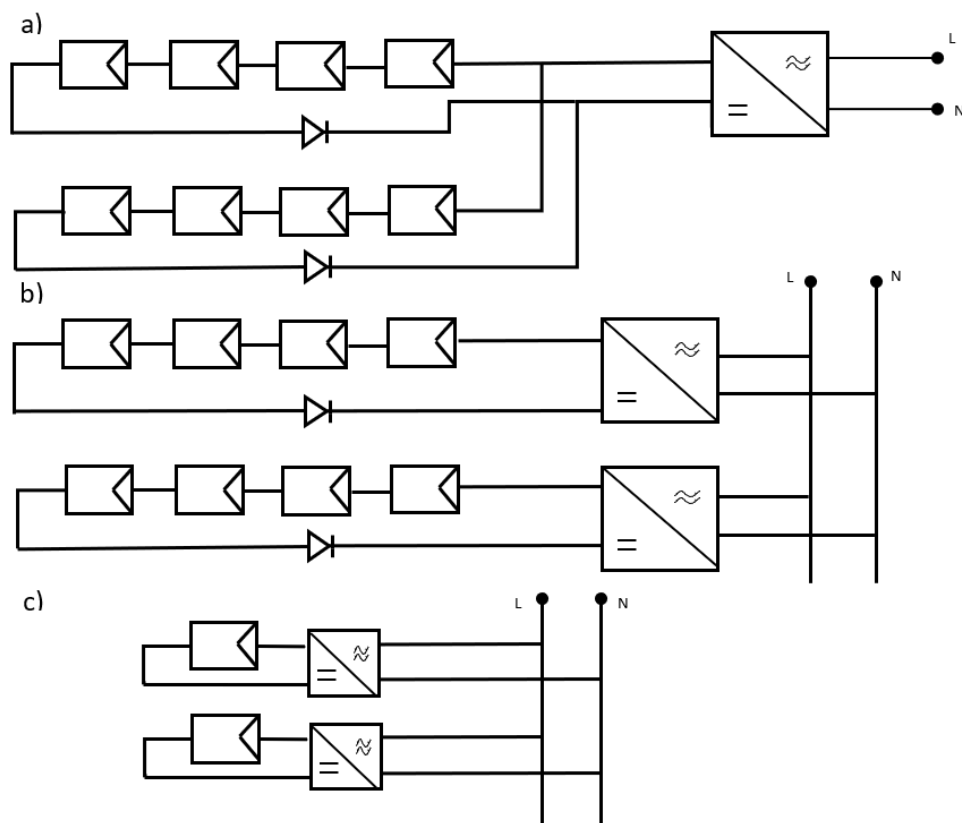
### 4.3. Střídač

V síti se využívá střídavé napětí, a proto je ve fotovoltaických systémech připojených k síti zapotřebí střídače, tedy zařízení, které převede stejnosměrné napětí na střídavé. Střídače samozřejmě nejsou zapotřebí jenom u systémů se sítí, ale lze je nalézt i u ostrovních, kde jsou vyžadovány pro střídavý spotřebič. Většina zemí v Evropě využívá na vedení nízkého napětí síť s fázovým napětím 230 V na frekvenci 50 Hz. Střídače se dělí podle způsobu zapojení na:<sup>154</sup>

- Centrální střídače – Výhodou tohoto řešení je použití pouze jednoho měniče, což se projeví pozitivně na ceně. Nevýhodou jsou ztráty, které snadno vzniknou při rozdílných MPP na řetězcích v důsledku možného zastínění. Použití jednoho měniče také vede ke ztrátě spolehlivosti.
- Řetězové střídače – Každý řetězec obsahuje svůj měnič, který hledá MPP, koncept tak dosahuje vysoké účinnosti. Kabeláž na DC straně je jednodušší, nicméně větší počet měničů se projeví negativně na ceně.
- Modulové (integrované) střídače – Každý modul obsahuje vlastní měnič umístěn přímo na modulu, takže může být přímo řízen. Nevýhodou je, že měnič je vystaven vnějším atmosférickým podmínkám jako modul, což hluboce snižuje jeho životnost. Navíc je při vyřazení měniče obtížná jeho výměna.<sup>155</sup>

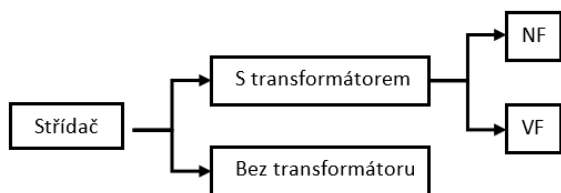
<sup>154</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>155</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98



Obrázek 47 – Variace zapojení střídačů, a) centrální střídač, b) Řetězový střídač, c) modulový střídač

Střídače pracující v síti musí být synchronizovány s frekvencí sítě a poskytovat správné fázové napětí. Při větších výkonech solárních systémů se využívá 3-fázové připojení, tedy soustava obsahuje měnič s 6 polovodičovými součástkami za účelem vytvoření 3 sinusových signálů posunutých vzájemně o  $120^\circ$ . Podrobný popis 3-fázového systému není pro tuto práci zapotřebí, proto budou probírány jenom základní 1-fázové systémy. Pro vytvoření sinusového střídavého signálu se využívá různých architektur hardwaru a softwaru. Díky rozvoji polovodičové techniky je možné snadněji a levněji střídače vyrobit, nicméně různá řešení přináší rozdílné problémy.



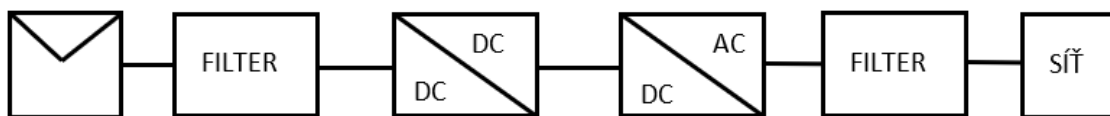
Obrázek 48 – Rozdělení střídačů podle typu transformace

### 4.3.1. Střídač bez transformátoru

Jedná se o moderní zařízení určené především pro řetězové měniče. Pokud střídač neobsahuje galvanické oddělení od sítě, vzniká parazitní kapacita mezi fotovoltaickými články a uzemněným rámem modulu. Tato kapacita se nabíjí a vybíjí, čímž vzniká svodový proud, který může přispět k degradaci modulu a ke zvýšení bezpečnostního rizika. Z toho



důvodu je třeba tento proud monitorovat, což se dělá pomocí RCD jednotky. Další problém je záporná polarizace panelu vůči zemi, která je probána v kapitole 4.1.6.<sup>156</sup>

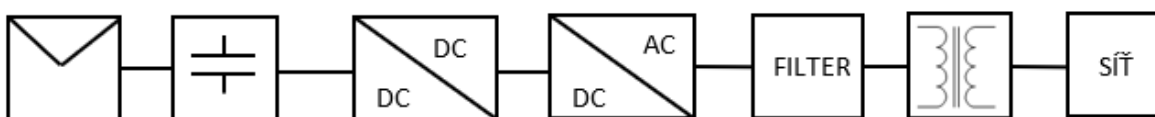


Obrázek 49 – Blokové schéma bez transformátorového měniče

Podrobnější schéma střídače bez transformátoru je prezentováno v příloze 5. Vstupem do střídače je řetězec, který je vyfiltrován a ochráněn před přepětím a zkratem. DC/DC měnič je tvořen step-up měničem, který může být řízen MPP logikou. K řízení MPP je samozřejmě zapotřebí řídicích obvodů a měření napětí a proudu. V části DC/AC je PWM můstek, který je řízen tak, aby měnil svou střihu pro vytvoření obdélníkového signálu, který nabude po vyfiltrování sinusového tvaru. Základní princip PWM můstku je vyobrazen v příloze 5. Mezi filtrací a můstkem je umístěno RCD. Síť zde reprezentuje spotřebič, který musí být měničem monitorován.<sup>157</sup>

### 4.3.2. Střídače s transformátorem na NF

Tyto střídače se řadí spíše ke starším typům technologií měničů. Jsou dimenzovány na velmi nízké napětí ( $U < 120 \text{ V}$ ) a disponují vyšší bezpečností. Nevýhodou je především 50 Hz transformátor, neboť zabírá velké místo, je těžký a především drahý. Navíc dosahuje při provozu vysokých ztrát. Výhodou je galvanické oddělení od sítě, díky tomu lze zamezit nárůstu parazitního napětí na modulech a zvýšit bezpečnost.<sup>158</sup>

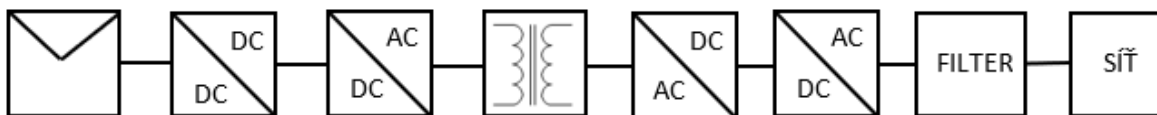


Obrázek 50 – Blokové schéma střídače s transformátorem na NF

Obdobně jako u střídače bez transformátoru je na vstupu zdroj, který je řízen DC/DC měničem. Přes PWM můstek se stává signál střídavý a přes transformátor se transformuje na vyšší napětí, tedy na požadované napětí sítě.

### 4.3.3. Střídače s transformátorem na VF

Typem je to moderní měnič, který využívá vysoké frekvence převodu napětí. Díky vyšší frekvenci není zapotřebí takového množství železa a mědi na závitech, což se pozitivně projeví na ceně transformátoru, na objemu zabíraného místa, a přitom měnič disponuje galvanickým oddělením. Oproti bez transformátorovým měničům ovšem nedosahuje tak vysoké účinnosti.



Obrázek 51 – Blokové schéma střídače s transformátorem na VF

<sup>156</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>157</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>158</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

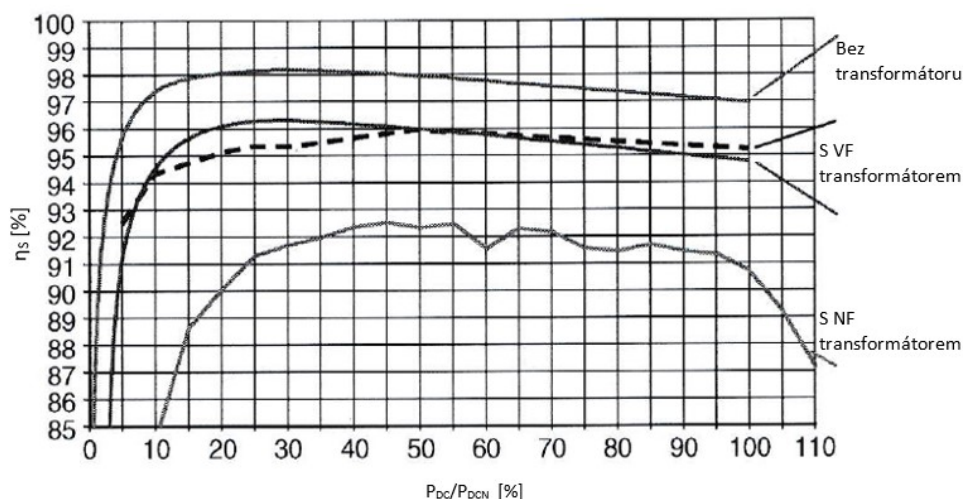
Vstup je opět hlídán DC/DC měničem zajišťující MPPT. Pomocí vysokofrekvenčního střídače je DC signál změněn na VF signál, který je transformován. AC/DC měnič pomocí můstku usměrňuje opět na DC napětí, které je na PWM můstku a následné filtraci přeměněno na síťové napětí.

### 4.3.4. Účinnost střídačů a jejich dimenzování

Je-li účinnost měniče určena podle vzorce (4.1), pak účinnost převodu střídače je následující.

$$\eta_S(P) = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad [-; W, W] \quad (4.48)$$

Účinnost není nezávislá na provozním stavu, naopak je závislý na odebíraném výkonu střídače a napětí na vstupu. Měnič může dosahovat například maximální účinnosti ve 40 % svého nominálního výkonu. Samotný vrchol ovšem není až tak důležitý, neboť při reálné aplikaci je důležitější celoroční účinnost. Proto je zaveden parametr Euro účinnost  $\eta_{Eu}$ , který je stejný jako v rovnici (4.44). Moderní měniče dosahují Euro účinnosti nad 94 % a to jak s transformátorem, tak bez.<sup>159</sup>



Obrázek 52 – Závislost účinnosti  $\eta_s$  na vstupním poměrném výkonu ( $P_{DC}$  je aktuální výkon,  $P_{DCN}$  je nominální výkon střídače)<sup>160</sup>

Dimenzování střídače je klíčovou složkou dobře navrhnutého systému, protože se jedná o hlavní složku solárního systému jak z hlediska energetické výnosnosti, tak z hlediska pořizovací ceny. Střídač se dimenzuje podle PV panelu, popř. podle zátěže, tak aby byly obě složky optimalizovány. Mezi klíčové parametry, podle kterých se dimenzují střídače, se řadí:

- Vstupní výkon  $P_{DC}$ .
- Vstupní napětí  $U_{In}$ .
- Vstupní proud  $I_{In}$ .

**Vstupní výkon** je samozřejmě ovlivněn vnějšími podmínkami, které působí na panel, je tedy nestálý, nicméně požadovaný výstupní výkon  $P_{ACN}$  už stabilní být musí v mezích vnějších

<sup>159</sup> Photovoltaic (PV) balance of system components: Basics, performance. PEARSALL, Nicola. The Performance of Photovoltaic (PV) Systems [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017, s. 135-181 [cit. 2019-07-08]. ISBN 978-1-78242-336-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/inverter-efficiency>

<sup>160</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

podmínek stanovených výrobcem. V důsledku dosažení vysoké účinnosti střídačů je zaveden koeficient  $SR_{AC}$  (Sizing Ratio).<sup>161</sup>

$$SR_{AC} = \frac{P_{STC}}{P_{ACN}} \quad [-; W_p, W] \quad (4.49)$$

- $P_{STC}$  je nominální výkon PV zdroje při STC.

Typické hodnoty  $SR_{AC}$  se pohybují okolo jedničky ( $0,83 < SR_{AC} < 1,25$ ), kde doporučená hodnota je  $SR_{AC} = 0,9$ . V případě úvah stabilního výstupního výkonu je uveden rozsah ( $0,8 \cdot P_{STC} < P_{ACN} < 1,2 \cdot P_{STC}$ ), kde doporučená hodnota je ( $P_{ACN} = 1,1 \cdot P_{STC}$ ). Pokud jsou inventory instalovány venku, na střeších nebo ve vyšších výškových hladinách mohou být poddimenzovány, protože můžou zde být vystaveny vyšším teplotám.<sup>162</sup>

**Vstupní napětí** je určeno sériovým řazením článků v řetězci panelu. Je silně ovlivněno teplotou panelu a méně intenzitou ozáření. Pokud nastane situace, že panel se nachází ve stavu velmi nízké teploty a je silně ozářen, pak je při rozpojeném obvodu schopen dodat příliš velké napětí. Proto je nejdříve třeba určit u střídače maximální povolené vstupní napětí  $U_{InMax}$ , protože jeho překročení by mohlo vést k poškození střídače. Je-li vnitřní teplota modulu  $\vartheta_m = -10^\circ C$ , pak je určen maximální počet modulů v řetězci  $n_{Max}$ .<sup>163</sup>

$$n_{Max} = \frac{U_{InMax}}{U_{OC(Modul -10^\circ C)}} \quad [-; V, V] \quad (4.50)$$

Veličina  $U_{OC(Modul -10^\circ C)}$  je napětí naprázdno při dané teplotě modulu, nicméně tento údaj se často v dokumentaci od výrobce nevyskytuje. Místo toho bývá zpravidla uveden teplotní koeficient  $\beta_{OC}$  pro otevřený obvod. Ten je uveden jako změna napětí v % nebo mV za  $^\circ C$ . Díky tomuto koeficientu je možné přepočítat napětí naprázdno při  $\vartheta_m = -10^\circ C$ .<sup>164</sup>

$$U_{OC(Modul -10^\circ C)} = \left(1 - \frac{\Delta\vartheta_{(35)} \cdot \beta_{OC}}{100}\right) \cdot U_{OC(STC)} \quad [V; ^\circ C, \%/^\circ C, V] \quad (4.51)$$

$$U_{OC(Modul -10^\circ C)} = U_{OC(STC)} - \Delta\vartheta_{(35)} \cdot \beta_{OC} \quad [mV; mV, ^\circ C, mV/^\circ C] \quad (4.52)$$

Pokud není ani jeden z koeficientů možný získat, pak lze zjednodušeně pro polykrystalický a monokrystalický modul použít vzorec (4.53).

$$U_{OC(Modul -10^\circ C)} = 1,13 \cdot U_{OC(STC)} \quad [V; V] \quad (4.53)$$

Dalším potřebným parametrem je minimální vstupní napětí  $U_{InMin}$ , které vzniká analogicky při opačném extrému než maximální. V letních měsících se snadno může například střecha domu dostat nad  $70^\circ C$  a silně tak zmenšit výstupní napětí panelu, který je na ní instalován.

<sup>161</sup> DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. Lanning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers [online]. 3rd. Abingdon: Routledge, 2013 [cit. 2019-07-09]. ISBN 978-1-84971-343-6. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=AWIqAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>

<sup>162</sup> DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. Poznámka 161

<sup>163</sup> DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. Poznámka 161

<sup>164</sup> DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. Poznámka 161

Panel se může dostat pod minimální MPP střídače, v nejhorším případě zcela přestat dodávat energii. Proto minimální napětí určuje minimální počet modulů  $n_{Min}$  při vnitřní teplotě modulu  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .<sup>165</sup>

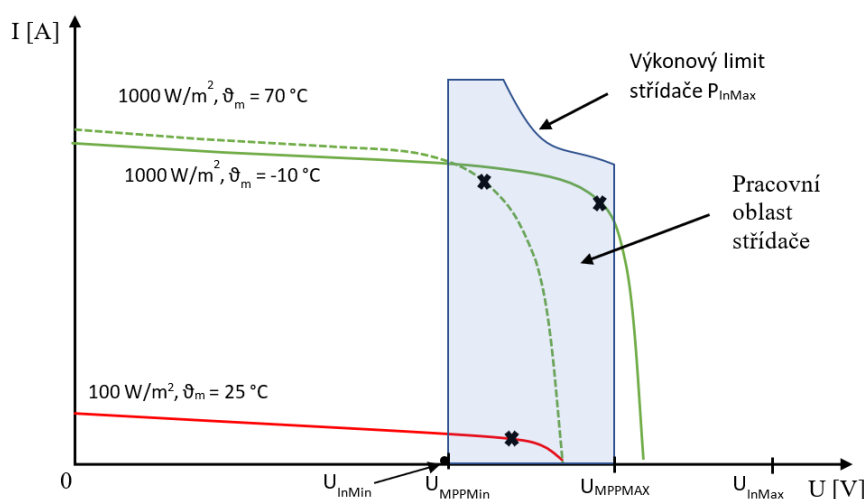
$$n_{Min} = \frac{U_{MPPMin}}{U_{MPP(Modul\ 70^{\circ}\text{C})}} \quad [--; V, V] \quad (4.54)$$

- $U_{MPPMin}$  je minimální hodnota napětí ve které je schopen střídač nalézt MPP.
- $U_{MPP(Modul\ 70\text{ }^{\circ}\text{C})}$  je hodnota napětí modulu v bodě MPP při teplotě  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Opět vzniká problém s často chybějícím údajem v dokumentaci. Tentokrát hraje roli teplotní koeficient  $\beta_{MPP}$  pro MPP, který se může od  $\beta_{OC}$  značně lišit. Opět se uvádí v % nebo mV za  $^{\circ}\text{C}$ . Díky tomuto koeficientu je možné přepočítat napětí  $U_{MPP(Modul\ 70\text{ }^{\circ}\text{C})}$  v bodě MPP při  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rovnice pro výpočet napětí jsou skoro stejné jako rovnice (4.51) a (4.52), ovšem  $U_{MPP(Modul\ 70\text{ }^{\circ}\text{C})}$  nahrazuje  $U_{OC(Modul\ -10\text{ }^{\circ}\text{C})}$ ,  $\Delta\vartheta_{(45)}$  nahrazuje  $\Delta\vartheta_{(35)}$ ,  $U_{MPP(STC)}$  nahrazuje  $U_{OC(STC)}$  a  $\beta_{MPP}$  nahrazuje  $\beta_{OC}$ . Opět v případě, že není koeficient k dispozici, pak pro monokrystalický a polykrystalický modul lze využít zjednodušeného vztahu, že napětí spadne okolo 20 % oproti STC.<sup>166</sup>

$$U_{MPP(Modul\ 70^{\circ}\text{C})} = 0,8 \cdot U_{MPP(STC)} \quad [V; V] \quad (4.55)$$

Okolní teplota může v různých instalacích dosahovat i vyšších hodnot, pak je třeba podle předchozí úvahy dané limity přepočítat, neboť se jedná o vliv, který není zanedbatelný.



Obrázek 53 – VA charakteristiky připojeného panelu. Modře je vyobrazená pracovní oblast střídače a křížky jsou označeny body MPP.

**Vstupní proud** je veličina ovlivněná možným počtem řetězců  $n_{String}$  na vstupu. Střídač má povolený maximální proud  $I_{InMax}$ , se kterým může pracovat, řetězec pak dodává maximální proud  $I_{StringMax}$ .

<sup>165</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>166</sup> DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. Poznámka 161

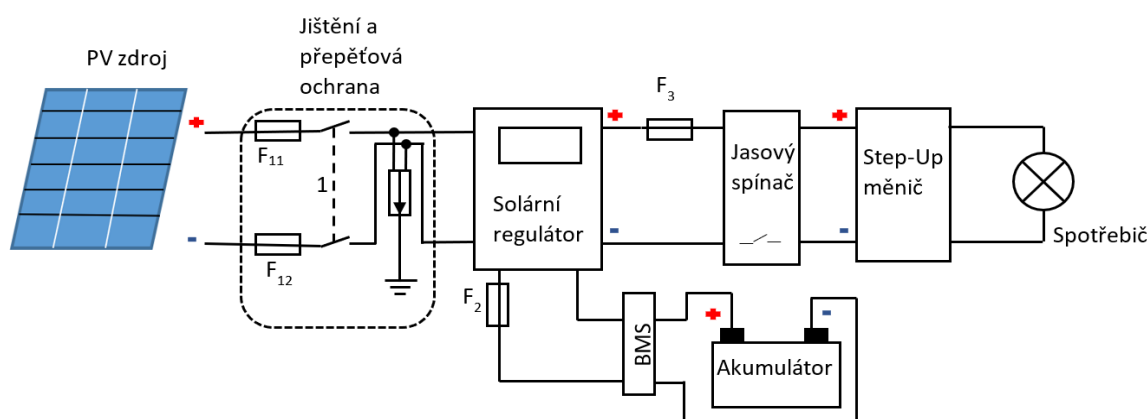
$$n_{String} \leq \frac{I_{InMax}}{I_{StringMax}} \quad [--; A, A] \quad (4.56)$$

Jako opatření se určuje  $I_{StringMax} = 1,25 \cdot I_{MPP}$ .<sup>167</sup>

## 5. Samotný návrh

Při realizaci ostrovního solárního systému je třeba počítat se základními faktory, které ovlivní výběr součástek a celkové provedení. Veřejné osvětlení bude stále ve venkovním prostředí, takže systém bude muset být schopen neustále čelit vnějším klimatickým podmínkám. Dalším nutným požadavkem je schopnost celoročního provozu, a to i za velmi nepříznivých klimatických podmínkách. Při výběru komponent je třeba především hledět na spolehlivost, životnost a cenu.

Navrhovaný systém bude napájen pouze jedním solárním panelem z důvodu zachování jednoduchosti a snadné montovatelnosti na případný stožár. Solární regulátor bude použit typ se vstupem a dvěma výstupy, jeden na baterii, druhý na spotřebič. Spotřebič, tedy světelný zdroj, bude spínán pomocí jasového spínače, který bude připojovat napětí na zátěž v závislosti na vnějším osvětlení. Světelný zdroj bude dimenzován na stejnosměrné napětí, přičemž jeho velikost se bude odvíjet od spotřeby proudu dodané výrobcem. Napětí požadované na vstupu světelného zdroje bude větší než na baterii, a tedy i výstupu regulátoru, proto je do systému začleněn Step-Up měnič. Systém bude jistiť nadproudovou a přepětovou ochranou. Jednopolové schéma systému lze nalézt v příloze 6.



Obrázek 54 – Základní elektrické schéma navrhovaného systému

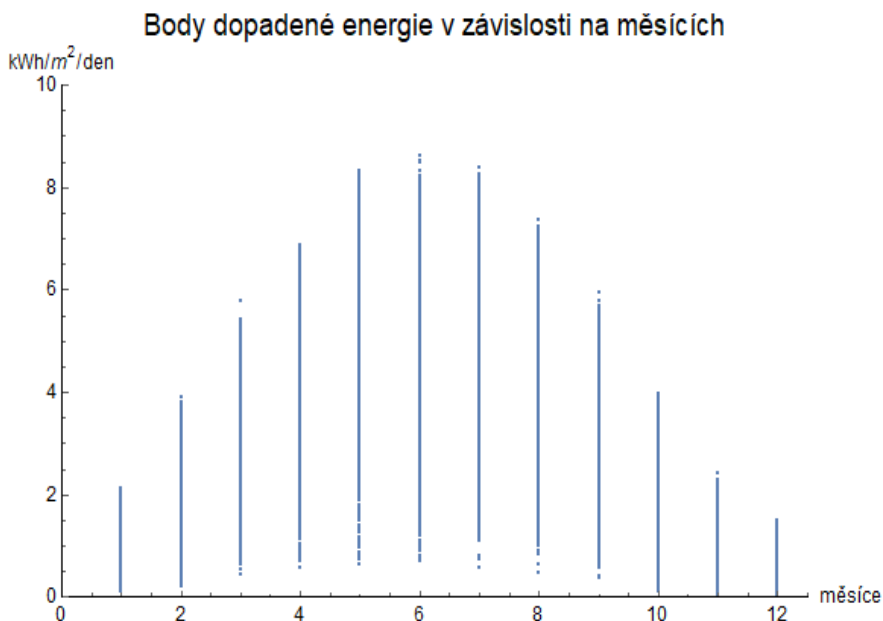
### 5.1. Energetický potenciál

Ostrovní solární systém je vhodný zejména pro oblasti s nedostatečnou infrastrukturou, tedy míst, kde není samozřejmá rozsáhlá elektrická síť. Smysl této práce není cílit na jednu konkrétní oblast, na přesné místo určené pro vybudování systému, spíše nabídnout obecný přehled výtěžnosti solárního potenciálu v České republice v méně vhodných klimatických podmínkách. Pro získání dat je vybrána horská oblast v okolí obce Říčky v Orlických horách, která se navíc nachází na přibližné zeměpisné severní šířce jako Praha. Data jsou dostupná z databáze NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources<sup>168</sup> od roku 1985 do

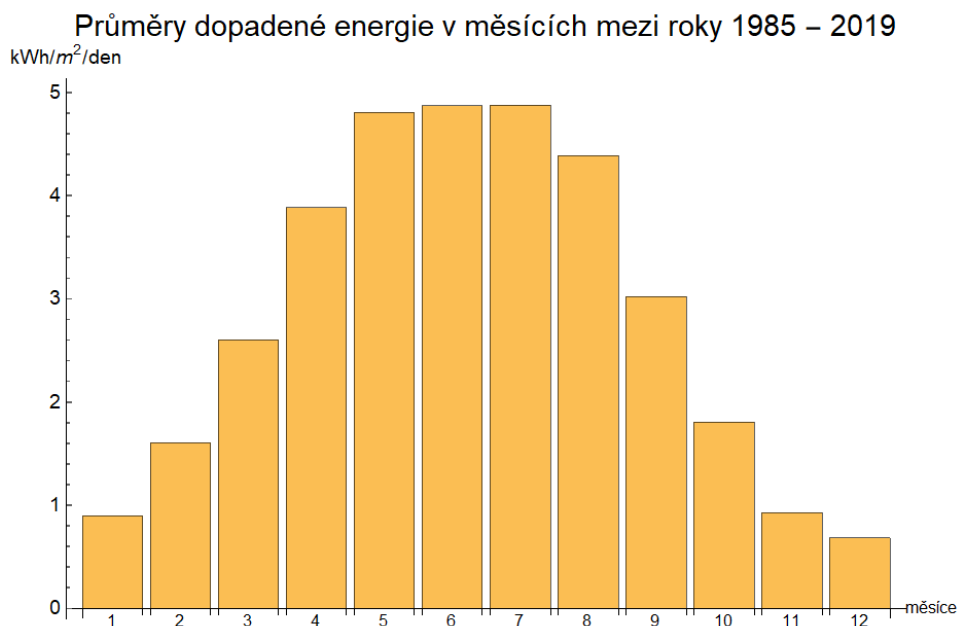
<sup>167</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

<sup>168</sup> NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources [online]. [cit. 2019-09-06]. Dostupné z: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

2019. Jedná se o hodnoty dopadené energie za den na metr čtvereční, teploty a rychlosti větru.

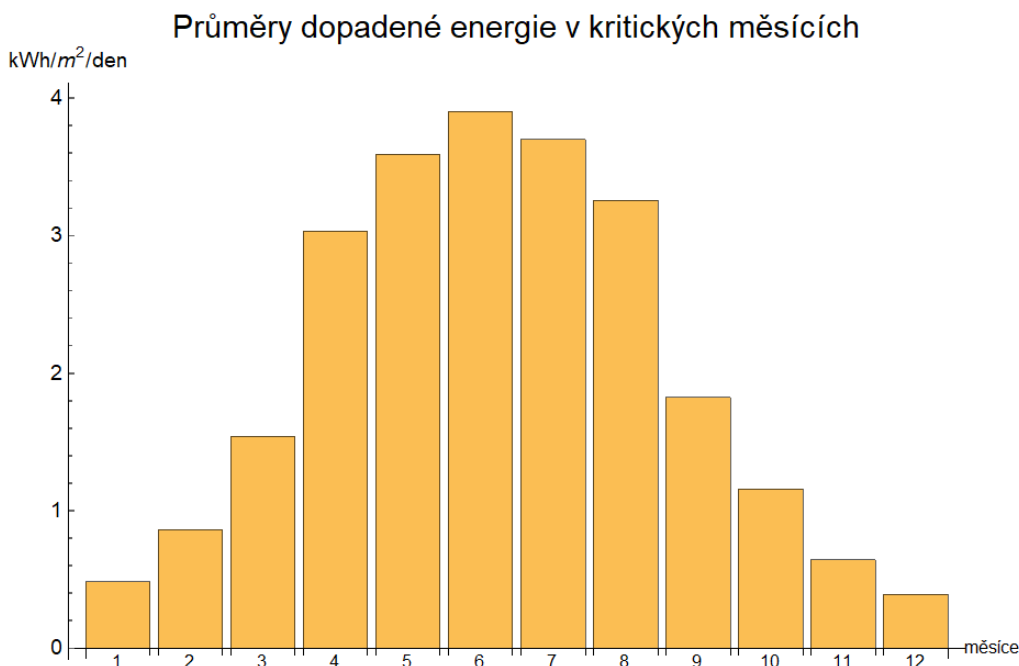


Obrázek 55 – Vynesené body energie v jednotlivých měsících vlevo



Obrázek 56 – Průměrné roční hodnoty dopadené energie vpravo

Nejmenší ozáření nastává v zimních měsících v důsledku počasí, sklonu slunce a kratšího dne. Aby systém byl zcela funkční i během zcela nepříznivých podmínek, bude dimenzován na tzv. návrhový měsíc, tedy měsíc, kdy byla průměrná vyrobená energie v určitý rok nejmenší. Z dostupných dat byla vypočtena průměrná hodnota dopadené energie pro kritické měsíce, což jsou měsíce, kdy hodnota dopadené energie byla v daném roce nejmenší. Nejmenší hodnota průměrné dopadené energie nastala v prosinci roku 2018, přičemž se jedná o hodnotu 0,38 kWh/m<sup>2</sup>/den a lze ji odečíst viz obrázek 57 a tabulka 3. Tento prosinec bude předpokládán měsíc, podle kterého bude systém dimenzován.



Obrázek 57 – Nejmenší průměrné měsíční hodnoty dopadené energie

| Měsíc  | Leden | Únor  | Listopad | Prosinec |
|--|-------|-------|----------|----------|
| Dopadená energie na plochu [kWh·m <sup>-2</sup> ·den <sup>-1</sup> ] | 0,482 | 0,863 | 0,641    | 0,38     |

Tabulka 3 – Nejmenší průměrné měsíční hodnoty dopadené energie na plochu

Je potřeba si uvědomit, že hodnoty dopadené energie na plochu představují data z plochy vodorovné pozice. Při návrhu solárního systému se počítá s náklonem panelu, který hodnotu dopadené energie zvýší. Největší hodnota pak nastane při přímém ozáření plochy, tedy viz obrázek 18 je  $\delta_p + \varphi = 0$  a zároveň  $\delta_j + \alpha = 0$ . Takového stavu lze dosáhnout se systémy s dvouosými trackery, avšak navržený systém bude typu pevné instalace, proto je třeba přepočítat jisté parametry.

Pro jisté měsíce byla zpracována data o pohybu slunce z webu Suncalc<sup>169</sup>. Následně byla interpolována a vynesena do grafu viz obrázek 58. Je zřejmé, že nejkratší doba, po kterou bude slunce nad obzorem, nastane v prosinci, přičemž nejvyšší sklon dosáhne hodnoty  $\varphi \approx 16,5^\circ$ , což odpovídá viz obrázek 20. Vzhledem k faktu, že poskytnutá data dopadené energie platí pro stálou orientaci  $\alpha = \text{konst}$ , je třeba korekci učinit především pro sklon panelu. Pro jisté měsíce je tak vypočtena střední hodnota sklonu slunce v průběhu dne.

| Měsíc                       | Leden | Únor  | Listopad | Prosinec |
|-----------------------------|-------|-------|----------|----------|
| Střední sklon $\varphi$ [°] | 13,33 | 18,76 | 14,7     | 11,65    |

Tabulka 4 – Střední hodnoty sklonu slunce pro určité měsíce

Za předpokladu, že celková dopadená energie odpovídá proměnné hodnotě ozáření v průběhu dne, lze z rovnice (1.13) odvodit zjednodušený vztah pro dopadenou energii na desku pod úhlem  $\beta = 0$ , tedy pro vodorovnou pozici.

<sup>169</sup> AGAFONKIN, Vladimír. Suncalc [online]. 2018 [cit. 2019-09-08]. Dostupné z: <https://www.suncalc.org>

$$E_{\beta=0} = E_{max} \cdot \cos \delta_v \quad [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}; \text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}, -] \quad (5.1)$$

- $E_{max}$  je maximální možná energie dopadená na plochu

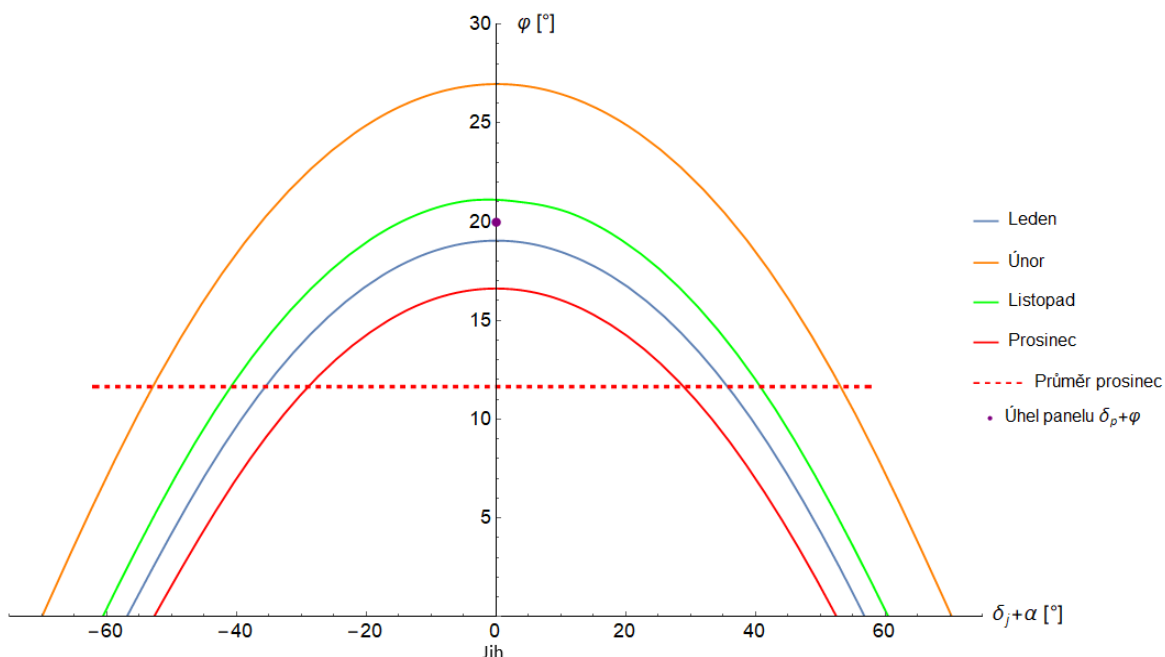
Stejná rovnice jako (5.1) platí pro PV nakloněný panel se sklonem  $\delta_p + \varphi$  a je ve tvaru rovnice (5.2). Pro rovnici (5.1) platí, že lze místo  $\delta_v$  dosadit (90 - Střední sklon) a pro rovnici (5.2) platí, že lze za  $\delta_p$  dosadit (Sklon panelu – Střední sklon). Po dosazení první rovnice do druhé vychází tvar rovnice (5.3) pro celkovou dopadenou energii na panel.

$$E_{PV} = E_{max} \cdot \cos \delta_p \quad \begin{matrix} [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}; \\ \text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}, -] \end{matrix} \quad (5.2)$$

$$E_{PV} = \frac{E_{\beta=0} \cdot \cos(\text{Sklon panelu} - \text{Střední sklon})}{\cos(90 - \text{Střední sklon})} \quad \begin{matrix} [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}; \\ \text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}, -] \end{matrix} \quad (5.3)$$

V kapitole 1.5.2 byla probrána ideální orientace a sklon panelu pro maximální výtěžnost energie pro podmínky v ČR. Navrhovaný systém je však ostrovního typu, přebytek energie nelze vyvézt do sítě, a proto maximální dosažitelná vyrobená energie v průběhu celého roku není klíčovým faktorem pro návrh. Zásadním faktorem je výtěžnost systému při extrémě nízkého ozáření a docílení tak celoročního provozu. Proto je nezbytné ustoupit využití potenciálu více ozářených letních dní a volit menší sklon panelu tak, aby byl zajištěn trvalý zimní provoz. Zároveň však nesmí být přehnaně nízký, aby byl schopen provozu i v letních měsících. Navíc je výhodou, že nízký sklon zajišťuje lepší prevenci vůči zastínění napadlým sněhem, nicméně při úvahách výtěžnosti systému se s tímto faktorem nepočítá. S ohledem na výpočty pro jednotlivé varianty byl zvolen sklon  $20^\circ$  s jižní orientací.

Funkce pohybu slunce pro jednotlivé měsíce



Obrázek 58 – Pohyb slunce v průběhu dne pro jednotlivé měsíce

Pro určité kritické měsíce pak odpovídá hodnota dopadené energie na plochu se sklonem  $20^\circ$  následovně.



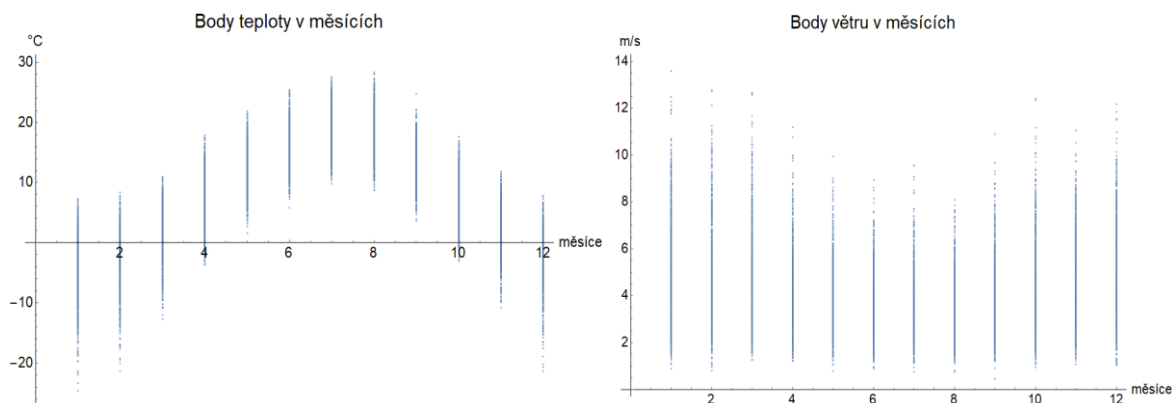
## Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení

| Měsíc  | Leden | Únor  | Listopad | Prosinec |
|--|-------|-------|----------|----------|
| Dopadená energie na PV panel $E_{PV}$<br>[kWh·m <sup>-2</sup> ·den <sup>-1</sup> ] | 2,075 | 2,681 | 2,515    | 1,8      |

Tabulka 5 – Hodnoty dopadené energie za den pro kritické měsíce na plochu se sklonem 20°.

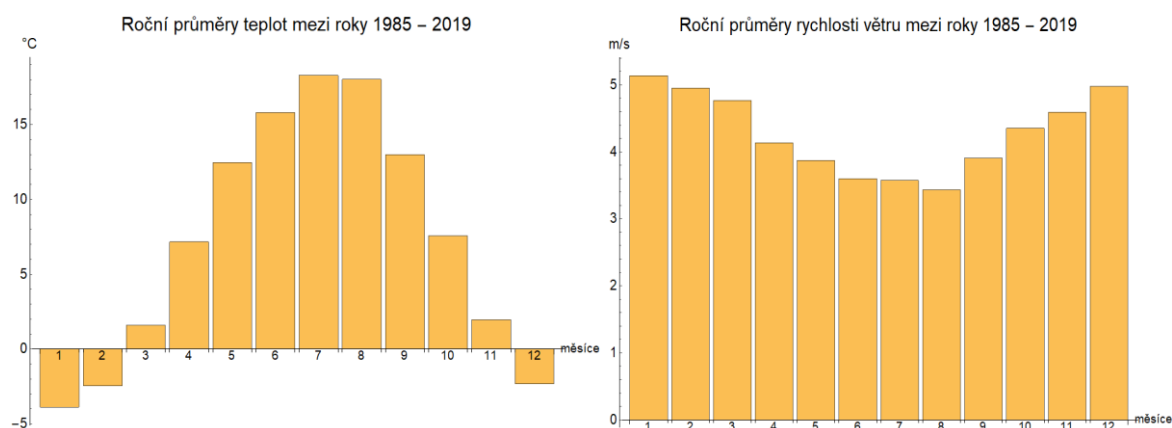
Příklad výpočtu pro leden:  $E_{PV} = \frac{0,482 \cdot \cos(20-13,33)}{\cos(90-13,33)} = 2,075 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$

Dále byla zpracována data o rychlosti větru a teplotě, které panují v dané lokalitě. Co se týče rychlosti větru, nebude mu věnována taková pozornost jako teplotě, spíše budou zohledněny možné extrémní, které by mohli hrát důležitou roli při návrhu.



Obrázek 59 – Body teplot pro různé měsíce vlevo, body větru vpravo

V případě teploty jsou důležité především extrémní nízké a vysoké teploty. VA charakteristika PV zdroje uvádí závislost napětí naprázdno na teplotě, je tedy vhodné zjistit minimální teplotu pro určení maximálního  $U_{OC}$  a maximální teplotu pro minimální  $U_{OC}$ .



Obrázek 60 – Roční průměry teplot mezi roky 1985–2019 vlevo, průměry rychlosti větru vpravo

Dále je třeba určit průměrné minimální a maximální hodnoty v kritických měsících stejně jako u ozáření. Tyto hodnoty jsou využity pro korekci výpočtu výkonu panelu např. v bodě MPP v jistých měsících.

| Měsíc                                   | Leden  | Únor   | Listopad | Prosinec |
|---|--------|--------|----------|----------|
| Průměrná minimální měsíční teplota [°C] | -11,29 | -8,81  | -2,09    | -8,03    |
| Minimální denní teplota [°C]            | -24,6  | -21,36 | -10,8    | -21,3    |

Tabulka 6 – Minimální hodnoty teploty pro určité měsíce

| Měsíc                                   | Červenec | Srpen |
|---|----------|-------|
| Průměrná maximální měsíční teplota [°C] | 21,88    | 22,29 |
| Maximální denní teplota [°C]            | 27,54    | 28,36 |

Tabulka 7 – Maximální hodnoty teploty pro určité měsíce

### 5.2. Spotřebič

Veřejné osvětlení, v případě návrhu spotřebič, slouží k osvětlení venkovního prostoru, dodává světlo na pozemní komunikace, silnice atd. Mělo by správně osvětlovat, ale zároveň neoslňovat. Mezi světelné zdroje používané ve veřejném osvětlení se řadí<sup>170</sup>:

- Lineární zářivky.
- Kompaktní zářivky.
- Nízkotlaké sodíkové výbojky.
- Vysokotlaké sodíkové výbojky.
- Halogenidové výbojky s hořákem z křemenného skla.
- Halogenidové výbojky s hořákem z keramického skla.
- LED COB.
- LED moduly.

Mezi neúčinnější světelné zdroje patří technologie LED, která nabízí vysoký index podání barev a velký rozsah teploty chromatičnosti (2700–6500 K). V souvislosti s touto technologií se v dnešní době hodně řeší bílé světlo a jeho účinky na lidský organismus. Je totiž přirozenější pro lidské oko, na druhou stranu ovlivňuje biologický rytmus člověka, a to hlavně kvůli citlivosti lidského oka na modrou spektrální složku. Navíc přebytek modré složky způsobuje horší viditelnost mezi kontrasty osvětleného a neosvětleného prostoru, což může vést k nebezpečným situacím. Pomocí luminoforu lze vyrobit i LED zdroje, které modrou složku zcela postrádají, na druhou stranu mají horší účinnost. Větší požadavek na příkon vede ke kratší životnosti a k vyššímu budicímu proudu. LED zdroje dosahují vysokých jasů a velké světelné účinnosti na plochu, mohou být tak snadno zdrojem oslnění.<sup>171</sup>

Ze světelného zdroje vychází užitečné a neúžitečné světlo. Neúžitečné světlo následně může způsobovat rušivé světlo, a to světelné znečištění. V tuto chvíli se světelným znečištěním legislativně zabývá pouze vyhláška 268/2009 Sb. (§10) o technických požadavcích na stavby<sup>172</sup>. Ministerstvo životního prostředí doporučuje, jaké konkrétní parametry by veřejné osvětlení mělo mít.

<sup>170</sup> ŠAFAŘÍK, Miroslav a etc. PORSENA O.P.S. Jak na chytré veřejné osvětlení?: Příručka pro města a obce [online]. Ministerstvo životního prostředí, 2017, 68 s. [cit. 2019-08-20]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne\\_znecistení/\\$FILE/NNO\\_Prirucka\\_obce\\_20180911.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne_znecistení/$FILE/NNO_Prirucka_obce_20180911.pdf)

<sup>171</sup> ŠAFAŘÍK, Miroslav. Poznámka 170

<sup>172</sup> ŠAFAŘÍK, Miroslav. Poznámka 170

## Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení

| Parametr               | Doporučená hodnota                                | Povolené hranice   |
|------------------------|---|--|
| Poloha svítidel        | Uložení ve vodorovné poloze                       | Nejvýše 10° náklon, pokud to umožní dosažení významně lepších parametrů osvětlení cílového prostoru.                       |
| Krytí svítidel         | Svítidla vyzařující pouze do dolního poloprostoru | Když není možné změnit polohu světelného místa lze použít svítidla s maximálně 1 % světelného toku do dolního poloprostoru |
| Typy světelného zdroje | Preferování teplého odstínu světla                | Maximálně 10 % energie ve vlnových délkách $\lambda < 500$ nm  |
|                        |   | Maximální náhradní teplota chromatičnosti CCT $\leq 3000$ K  |
| Přímé osvětlení oken   | Pokud možno žádné                                 | Maximálně 2 lx, v době nočního klidu 1 lx  |

Tabulka 8 – Doporučené parametry od Ministerstva životního prostředí<sup>173</sup>

Vybrané svítidlo je Marut S G1 2K0 730. Jedná se o moderní venkovní LED svítidlo, které je vybaveno prepětřovou ochranou a nastavitelným kloubem  $\pm 10^\circ$ . Je určený pro venkovní teploty  $-40/+45$  °C se stupněm ochrany IP66 a mechanickou odolností IK09.

| Příkon $P_L$ [W] | Světelný tok [lm] | Teplota chromatičnosti [K] | Životnost [h] | Index podání barev [-] | Hmotnost [kg] |
|------------------|-------------------|----------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| 15               | 2000              | 3000                       | > 100 000     | Ra > 70                | 4             |

Tabulka 9 – Základní vlastnosti vybraného svítidla

Napájení je řešeno vyvedeným kabelem s konektorem a příkonem 15 W s tolerancí 10 %. Při DC zapojení je odebíraný proud 280 mA a z Ohmova zákona vychází napětí 53,57 V.

Pro zajištění celoročního provozu je třeba počítat s nejdelší dobou svícení pouličního osvětlení. Logicky tento čas nastává o zimním slunovratu, kdy je doba dne nejkratší. Z webu Suncalc je tak odečtena přibližná doba, po kterou musí světelný zdroj svítit v daný měsíc.

| Měsíc                  | Leden | Únor | Listopad | Prosinec |
|------------------------|-------|------|----------|----------|
| Doba svícení $t_d$ [h] | 14,4  | 14,2 | 13,95    | 14,8     |

Tabulka 10 – Doba svícení světelného zdroje pro vybrané měsíce

Pro řízení zapnutí a vypnutí spotřebiče, je třeba mezi regulátor a spotřebič zapojit jasový spínač. Napájení spínače vyžaduje kontinuální spotřebu energie, proto bude i tento faktor při výpočtu celkové spotřeby započítán. Pro výpočet denní maximální spotřeby energie je použit následující vzorec.<sup>174</sup>

<sup>173</sup> BAREŠ, Michal. ČESKÁ ASTRONOMICKÁ SPOLEČNOST A ODBORNÁ SKUPINA PRO SVĚTELNÉ ZNEČIŠTĚNÍ. Jednoduchá osvětlovací příručka pro obce: Doporučení pro šetrné moderní osvětlování [online]. Ministerstvo životního prostředí a Svaz měst a obcí České republiky, 2017 [cit. 2019-08-20]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne\\_znecistení/\\$FILE/SOPS-jednoducha\\_osvelovaci\\_prirucka\\_pro\\_obce-20180122.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne_znecistení/$FILE/SOPS-jednoducha_osvelovaci_prirucka_pro_obce-20180122.pdf)

<sup>174</sup> HANKINS, Mark. Stand-alone solar electric systems: the Earthscan expert handbook for planning, design, and installation. Washington, DC: Earthscan, 2010. ISBN 9781844077137.

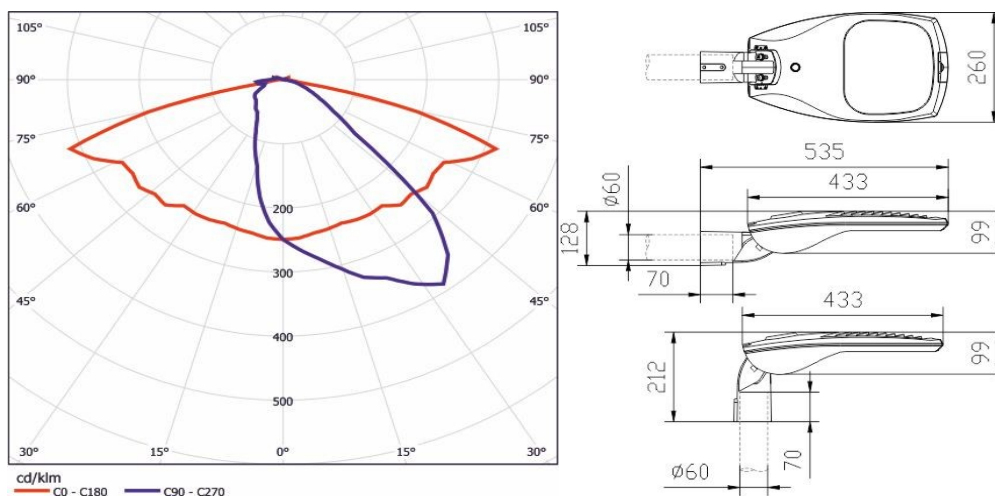
$$E_C = P_L \cdot t_d \cdot k_P + P_L \cdot t_d \cdot k_P \cdot k_{loss} \quad [\text{Wh} \cdot \text{den}^{-1}; \text{W} \cdot \text{den}^{-1}, \text{h}, -, \text{W} \cdot \text{den}^{-1}, \text{h}, -] \quad (5.4)$$

- Koeficient  $k_P$  reprezentuje výkyvy ve spotřebě světelného zdroje,  $k_P$  je v tomto případě rovno 1,1.
- Koeficient  $k_{loss}$  reprezentuje ztráty na vedení, regulátoru, step-up měniči a spotřebě jasového spínače,  $k_{loss}$  je voleno jako 0,3.

| Měsíc  | Leden  | Únor   | Listopad | Prosinec |
|--|--------|--------|----------|----------|
| Spotřeba energie $E_C$ [ $\text{Wh} \cdot \text{den}^{-1}$ ] | 308,88 | 304,59 | 299,23   | 317,46   |

Tabulka 11 – Spotřeba energie systému pro různé měsíce za den

Příklad výpočtu pro leden:  $E_C = 15 \cdot 14,4 \cdot 1,1 \cdot (1 + 0,3) = 308,88 \text{ Wh} \cdot \text{den}^{-1}$



Obrázek 61 – Údaje z měření na goniofotometru poskytnuté výrobcem vlevo, rozměry spotřebiče vpravo<sup>175</sup>

### 5.3. Fotovoltaický panel

Pro zvolení dostatečně výkonného panelu je třeba opětovně počítat korekční hodnoty účinnosti, plochy a teploty pro různé modely za účelem určení celkové možné energie, kterou lze z panelu dostat. Je dobré se zaměřit na značky stávajících hlavních prodejců panelů na trhu. Informace o hlavních výrobcích lze získat z webu Bloomberg<sup>176</sup>.

Ve zvolené lokaci převládá složka difuzního záření, přičemž celkové hodnoty ozáření v průběhu roku jsou podprůměrné, proto je třeba vybrat panel, který dosahuje vysoké účinnosti i při malých hodnotách ozáření. S ohledem na tyto podmínky byl vybrán panel CS6K-275 od firmy Canadian solar. Jedná se o polykrystalický panel s výstupním výkonem 275 Wp za STC. Panel se také může pochlubit vysokou účinností a odolností vůči vnějším atmosférickým podmínkám.

<sup>175</sup> MARUT S. Eektro Lumen [online]. [cit. 2019-10-09]. Dostupné z: <http://el-lumen.cz/produkty/svitidlo-marut-s/>

<sup>176</sup> Bloomberg Tier 1 Solar Panels List 2019. Renvu [online]. 2018 [cit. 2019-09-11]. Dostupné z: <https://www.renuv.com/Learn/Bloomberg-Tier-1-Solar-Panels-List-2019>

## Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení

| Elektrické parametry   |      |      | Teplotní parametry  |                 |
|--|------|------|---|-----------------|
| Canadian solar CS6K-275  | STC  | NOCT | Teplotní koeficient $P_{max} \beta$ [%/K]                               | -0,40           |
| $U_{OC}$ [V]   | 38,0 | 35,4 | Teplotní koeficient $U_{OC} \alpha$ [%/K]                               | -0,31           |
| $I_{SC}$ [A]   | 9,45 | 7,63 | Teplotní koeficient $I_{SC}$ [%/K]                                      | 0,05            |
| $U_{MPP}$ [V]  | 31,0 | 28,5 | NOMT (Modul) [°C]   | 45±3            |
| $I_{MPP}$ [A]  | 8,88 | 7,1  | Mechanické parametry  |                 |
| $P_{MPP}$ [W]  | 275  | 202  | Velikost 1 článku [mm]  | 156 x 156       |
| $\eta_{PV}$ [%]  | 16,8 | -    | Počet článků  | 60              |
| $U_{Max}$ [V]  | 1000 |      | Velikost modulu [mm]  | 1650 x 992 x 35 |
| Jištění modulu [A]   | 15   |      | Váha [kg]   | 18,2            |
| Relativní účinnost mezi 200 W/m <sup>2</sup> a 1000 W/m <sup>2</sup> [%] | 96,5 |      | Připojovací skříň – 3 překlenovací diody, krytí IP68, konektor T4 série |                 |
| Výkonová tolerance [W]   | 5    |      | Zatížení sněhem až do 6000 Pa a větrem do 4000 Pa                       |                 |

Tabulka 12 – Hlavní parametry panelu CS6K-275

Pro konečný výpočet, kolik lze dostat energie pro daný kritický měsíc, je zapotřebí nejdříve přepočítat hodnotu ozáření článků a započtení vlivu teploty. Pro zjednodušení bude opět počítáno s průměrnými hodnotami a nebude započten vliv rozdílů teplot mezi jednotlivými články. Průměrné denní ozáření je vypočteno podle vzorce (5.5).

$$G_{PV} = \frac{E_{PV} \cdot 1000}{24 - t_d} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}; kWh \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}, h] \quad (5.5)$$

| Měsíc   | Leden  | Únor   | Listopad | Prosinec |
|---|--------|--------|----------|----------|
| Průměrná hodnota ozáření $G_{PV}$ [W·m <sup>-2</sup> ·den <sup>-1</sup> ] | 216,15 | 273,53 | 250,23   | 202,28   |

Tabulka 13 – Průměrné ozáření v určitých měsících

Příklad výpočtu pro leden:  $G_{PV} = \frac{2,075 \cdot 1000}{24 - 14,4} = 216,15 W \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}$

Dále je přepočítána hodnota teploty článků  $T_{cell}$  při průměrné roční okolní teplotě  $T_a$  a průměrného denního ozáření pomocí vzorce (5.6)<sup>177</sup>. Čím je teplota vyšší, tím je výkon nižší, bylo by tedy logické najít nejteplejší zimní měsíce, avšak nalezené zimní měsíce jsou vybrány podle hodnoty nejnižšího ozáření, proto je logické předpokládat, že okolní teplota nebude pak dosahovat vysokých hodnot, proto jsou při výpočtech brány průměrné roční průměry teplot mezi roky 1985–2019 viz obrázek 60 vlevo. Vypočítané hodnoty teploty článků pro určité měsíce jsou uvedeny viz tabulka 14.

$$T_{cell} = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20}{800} \cdot G_{PV} \quad [^{\circ}C; ^{\circ}C, ^{\circ}C, W \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}] \quad (5.6)$$

| Měsíc                              | Leden | Únor | Listopad | Prosinec |
|------------------------------------|-------|------|----------|----------|
| Průměrná teplota článků $T_{cell}$ | 2,88  | 6,09 | 9,78     | 4,01     |

Tabulka 14 – Hodnoty teploty článků pro určité kritické měsíce

<sup>177</sup> HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Nominal Operating Cell Temperature. PV EDUCATION [online]. 2019 [cit. 2019-09-15]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/nominal-operating-cell-temperature>

Příklad výpočtu pro leden:  $T_{cell} = -3,87 + \frac{45-20}{800} \cdot 216,15 = 2,88 \text{ } ^\circ\text{C}$

**První možností**, jak vypočítat vyrobenou energii panelem je předpoklad, že v oblasti ozáření mezi 200 až 1000  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$  je lineární závislost relativní účinnosti na ozáření. Po vyřešení dvou lineárních rovnic vzniká rovnice (5.7) pro relativní účinnost  $\eta_{rel}$ .

$$\eta_{rel}(G_{PV}) = 0,004375 \cdot G_{PV} + 95,625 \quad [\%; \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}] \quad (5.7)$$

Vyrobena energie panelu  $E_{m1}$  je pak vypočtena ze vztahu (5.8), kde  $S_{PV}$  je plocha článků ( $S = 60 \cdot 0,156 \cdot 0,156$ ). Výsledné hodnoty pro kritické měsíce jsou uvedeny viz tabulka 15.

$$E_{m1} = \frac{\eta_{rel}}{100} \cdot \frac{\eta_{PV}}{100} \cdot E_{PV} \cdot 1000 \cdot S_{PV} \quad [\text{Wh} \cdot \text{den}^{-1}; \%, \%, \text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}, \text{m}^2] \quad (5.8)$$

| Měsíc   | Leden  | Únor   | Listopad | Prosinec |
|---|--------|--------|----------|----------|
| Vyrobena energie $E_{m1}$ [ $\text{Wh} \cdot \text{den}^{-1}$ ] | 491,56 | 636,68 | 596,66   | 440,57   |

Tabulka 15 – Hodnoty vyrobené energie panelem pro určité měsíce při použití relativní účinnosti

Příklad výpočtu pro leden:  $E_{m1} = \frac{96,57}{100} \cdot \frac{16,8}{100} \cdot 2,075 \cdot 1000 \cdot 1,46 = 491,56 \text{ Wh} \cdot \text{den}^{-1}$

**Druhou možností**, jak vypočítat vyrobenou energii  $E_{m2}$  panelem je využít při přepočtu účinnosti  $\eta_{kor}$  teplotní koeficient  $P_{max} \beta$ , hodnotu ozáření  $G_{PV}$  a teplotu článků  $T_{cell}$ . Korekce účinnosti je vypočtena podle vzorce (5.9) a celková vyrobená energie podle vzorce (5.10).<sup>178</sup>

$$\eta_{kor} = \frac{\eta_{PV}}{100} \cdot \left[ 1 - \frac{\beta}{100} \cdot \left\{ T_a - T_{STC} + (NOCT - T_a) \cdot \frac{G_{PV}}{800} \right\} \right] \quad \begin{matrix} [-; \%, \% \cdot \text{K}^{-1}, \\ ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, \\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}] \end{matrix} \quad (5.9)$$

$$E_{m2} = \eta_{kor} \cdot E_{PV} \cdot 1000 \cdot S_{PV} \quad [\text{Wh} \cdot \text{den}^{-1}; -, \text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}, \text{m}^2] \quad (5.10)$$

| Měsíc   | Leden  | Únor   | Listopad | Prosinec |
|---|--------|--------|----------|----------|
| Vyrobena energie $E_{m2}$ [ $\text{Wh} \cdot \text{den}^{-1}$ ] | 487,15 | 642,83 | 606,52   | 437,1    |

Tabulka 16 – Hodnoty vyrobené energie panelem pro určité měsíce při použití korekce účinnosti

Nejmenší hodnota vyrobené energie nastává v prosinci, jak bylo předpokládáno na začátku z hodnot ozáření, a to při obou metodách výpočtu. Vyrobena energie je vyšší oproti spotřebované a má velikou rezervu, takže systém bude energeticky zajištěn v průběhu celého roku. Kritický měsíc prosinec je tedy i návrhový měsíc.

Dále je dobré vědět, jaké maximální napětí může panel dosáhnout a podle toho dimenzovat povolenou hodnotu napětí na regulátoru. Napětí  $U_{OC}$  je silně závislé na teplotě a méně závislé na ozáření. Maximální napětí bude určeno podle vzorce (5.11)<sup>179</sup> při minimální teplotě, která nastala v lednu viz tabulka 6. Hodnota ozáření bude při výpočtech zanedbána. Za  $x_1$  je dosazeno  $OC_{Max}$ , za  $T$  je dosazena minimální teplota, za  $k$  je dosazen teplotní koeficient  $U_{OC} \alpha$  a za  $x_2$  je dosazeno  $OC_{STC}$ .

<sup>178</sup> DUBEY, Swapnil, Jatin Narotam SARVAIYA a Bharath SESHADRI. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World. Energy Procedia [online]. Singapore, 2012, 2013(33), 311-321 [cit. 2019-09-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213000829>

<sup>179</sup> MERTENS, Konrad. Poznámka 98

$$U_{x1} = \left\{ 1 - (T_{STC} - T) \cdot \frac{k}{100} \right\} \cdot U_{x2} \quad [V; ^\circ C, ^\circ C, \% \cdot K^{-1}, V] \quad (5.11)$$

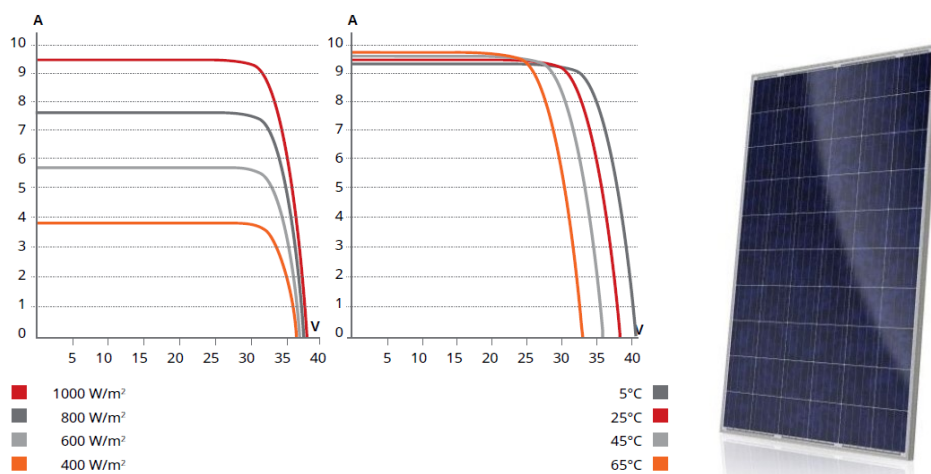
Užitečné je také určit minimální napětí v bodě MPP, protože některé regulátory neumějí pracovat pod určité vstupní napětí. Minimální pracovní napětí je určeno opět z rovnice (5.11), avšak za  $x1$  je dosazeno  $MPP_{Min}$ , za  $T$  je dosazena maximální možná teplota, za  $k$  je dosazen teplotní koeficient  $P_{Max}$   $\beta$ , za  $x2$  je dosazeno  $MPP_{STC}$ . Pro zajištění maximálních možných extrémů teplot se dosazuje teplota  $-40$  a  $+70$   $^\circ C$  pro minimální a maximální teplotu. Za teplotu je dosazována okolní teplota místo přepočtené teploty článků, protože je předpokládán největší extrém, kdy články mají podobnou teplotu jako je teplota okolí.

| Teplota [ $^\circ C$ ]        | -40   | -24,6 | 28,36 | 70    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Napětí naprázdno $U_{OC}$ [V] | 45,66 | 43,84 | 37,6  | 32,7  |
| Pracovní napětí $U_{MPP}$ [V] | 39,06 | 37,15 | 30,58 | 25,42 |

Tabulka 17 – Hodnoty přepočtených napětí pro různé teploty

Některé základní VA charakteristiky poskytuje výrobce v datasheetu, nicméně jsou poskytnuty pouze pro verzi 280 Wp, avšak ta se liší pouze o 5 Wp, proto jsou charakteristiky 275 Wp v zásadě stejné a jsou vyobrazeny viz obrázek 62.

Maximální zkratový proud  $I_{SC}$  není třeba analyzovat, protože je výrobcem určena hodnota jistění modulu na 15 A. Modul není schopen i při maximálním ozáření dodat takový proud, aby pojistka, popř jistič, neměl dostatečnou vypínací schopnost obvod přerušit.



Obrázek 62 – VA charakteristiky panelu CS6K-280P vlevo, vybraný panel vpravo<sup>180</sup>

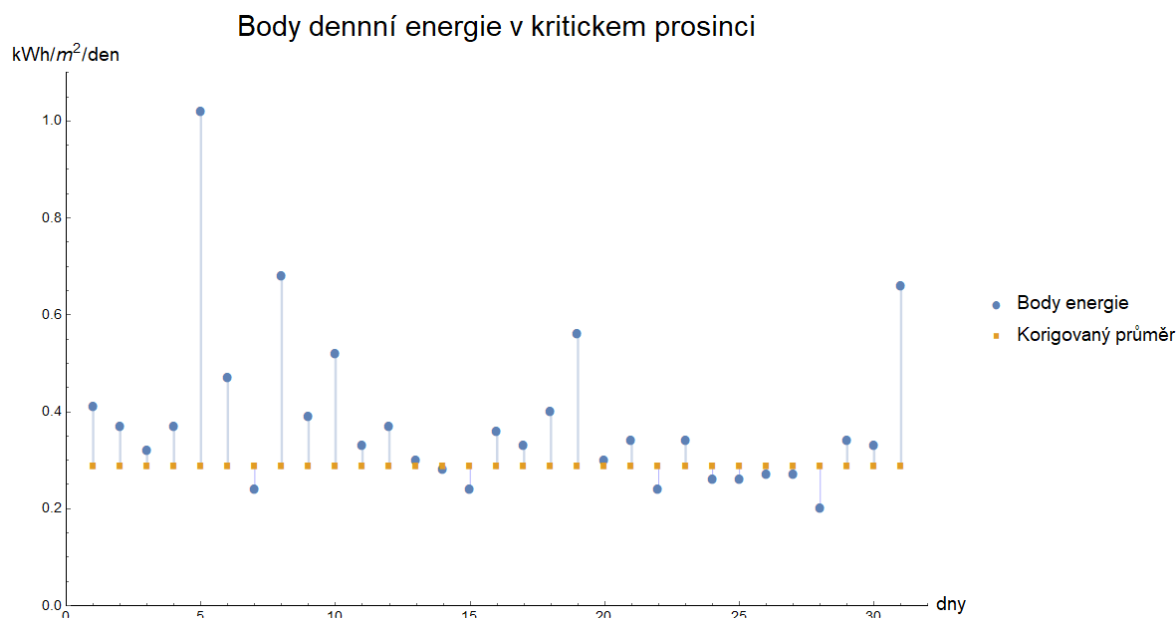
### 5.4. Akumulátor

Při výběru akumulační jednotky je třeba se zaměřit na jeho kapacitu, cenu, životnost a vybraný typ podle prostředí a jeho účelu. Výpočet kapacity je ovlivněn počtem rezervních dní, spotřebou systému a dovolenou úrovní vybití a nabití akumulátoru.

Rezervní dny  $t_{rezerv}$  určují, jak velkou zálohu energie systém bude mít v případě přerušení dodávky z panelu. Je zřejmé, že akumulátor bude v noci dodávat energii pro spotřebič, takže

<sup>180</sup> Solární panel Canadian Solar 275Wp POLY: Datasheet Canadian solar CS6K-P. IFTECH S.R.O. IFTECH [online]. 2015 [cit. 2019-09-17]. Dostupné z: <https://shop.itech.cz/solarni-panely/798-solarni-panel-canadian-solar-275wp-poly.html>

jeho Wh kapacita musí zcela pokrýt tuto spotřebu, nicméně při nedostatečně slunečném dnu je třeba mít zálohu, aby byl systém zcela provozuschopný. V předchozích kapitolách byl určen návrhový měsíc prosinec, ve kterém byla průměrná dopadená energie nejmenší a zároveň i nejmenší energie vyrobená panelem. Při zkoumání bodů ozáření v tomto návrhovém měsíci lze určit odchylky od vypočteného průměru. Body ozáření na  $m^2$  sice nevypovídají o hodnotě vyrobené energie, ale procentuální výpočty odchylek jsou stejné jako u výroby. Vybraný panel je schopen v tomto měsíci vyrobit až o 25 % více energie, než je spotřeba, to lze zohlednit navýšením o 25 % všech bodů ozáření nebo snížením o 25 % průměru. Podstatné je zmínit, že jsou počítány jenom záporné odchylky, protože kladné hodnoty nevaří pro fungování systému. Poté je nalezen nejmenší součet za sebou jdoucích záporných odchylek. Hodnota byla určena mezi dny 24–27 jako  $-0,164 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ , to znamená, že oproti dimenzovanému průměru byla dodána energie pouze z 56,86 %. Rezervní kapacita musí přesně takový výkyv pokrýt, přičemž z výpočtu vychází počet rezervních dnů na 1,76. S ohledem na určitou rezervu a přesné výpočty je hodnota volena jako 1,8 dní, akumulátor by měl být schopen dodávat 1,8 dní energii poté co byl plně nabit.<sup>181</sup>



Obrázek 63 – Body energie v návrhovém prosinci a korigovaný průměr podle panelu

Dovolená úroveň nabití a vybití definuje pracovní oblast, ve které by se měl akumulátor nacházet. Hluboké přebíjení a vybití se negativně projeví na životnosti a spolehlivosti, proto je výhodné držet úroveň nabití v mezích doporučených výrobcem. Pro jistý základní přehled se určuje orientační hodnota maximální DoD. Ta je pro olověné kyselé baterie okolo 50 % zatímco u lithiových až 80 %. Dále je třeba se ujistit, že baterie je schopna pracovat ve zvoleném prostředí a že je to trakční typ, který je schopen pracovat s dlouhodobým vybíjením a nabíjením. Baterie bude dimenzována na  $U_{bat} = 12 \text{ V}$  a hledaná kapacita  $C_{bat}$  se pak vypočte podle následujícího vzorce. Pro výpočet Wh kapacity (energie) je použit stejný vzorec, akorát bez veličiny napětí  $U_{bat}$ .

$$C_{bat} = \frac{Ec}{U_{bat}} \cdot t_{rezerv} \cdot \frac{1}{\frac{DoD}{100}} \quad [\text{Ah}; \text{Wh}, \text{V}, -, \%] \quad (5.12)$$

<sup>181</sup> HANKINS, Mark. Poznámka 174



## Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení

|                       |         |         |        |
|-----------------------|---------|---------|--------|
| DoD [%]               | 30      | 50      | 80     |
| C [Ah]                | 158,73  | 95,24   | 59,52  |
| E <sub>bat</sub> [Wh] | 1904,76 | 1142,86 | 714,29 |

Tabulka 18 – Hodnoty kapacity pro různé hodnoty cyklického vybíjení

Příklad výpočtu pro olověné kyselé baterie:  $C_{bat} = \frac{317,46}{12} \cdot 1,8 \cdot \frac{1}{\frac{50}{100}} = 95,24 \text{ Ah}$

Zásadní problém při výběru hraje okolní teplota, protože akumulátor musí být schopný nabíjet i při teplotách pod nulou. To bohužel v zásadě vylučuje použití LFP technologie, protože bez nějakého vnějšího izolačního nebo zahřívacího boxu nelze při nízkých teplotách akumulátor nabít. Olověná technologie sice není takto omezena, trpí však velice nízkou životností a omezenou pracovní oblastí.

Vybraný akumulátor je sestaven z 12 článků, přičemž vždy bude dvojice paralelně, články tak budou v paralelně sériovém řazení 2P6S. Jedná se o články EVL-LTO-30AH od výrobce Yinlong Energy s technologií LTO. Paralelně sériovým spojením je vytvořen 60 Ah akumulátor, který dosahuje napětí 13,8 V. Akumulátor se může pochlubit vysokou životností a velkou oblastí operační teploty. Nominální napětí je 2,3 V, lze tak vypočítat Wh energii složeného akumulátoru  $E_{bat} = 2,3 \cdot 30 \cdot 12 = 828 \text{ Wh}$ .

| Elektrické parametry   |       | Teplotní parametry    |                    |
|------------------------|-------|-----------------------|--------------------|
| Kapacita [Ah]          | 30    | Operační teplota [°C] | nabíjení -50 až 65 |
| U <sub>N</sub> [V]     | 2,3   |                       | vybíjení -50 až 65 |
| R <sub>i</sub> [Ω]     | ≤ 0,7 | Mechanické parametry  |                    |
| Max nabíjecí proud [-] | 10 C  | Rozměry [mm]          | 66 x 160           |
| U <sub>MAX</sub> [V]   | 2,8   | Hmotnost [kg]         | 1,1                |
| U <sub>MIN</sub> [V]   | 1,5   | Počet cyklů           | 30000              |

Tabulka 19 – Základní vlastnosti jednoho článku EVL-LTO-30AH<sup>182</sup>



Obrázek 64 – Technický výkres akumulátoru vlevo, vybraný akumulátor ve prostřed<sup>183</sup>, paralelně sériové zapojení článků 2P6S vpravo<sup>184</sup>

Vzhledem k tomu, že je akumulátor sestaven z jednotlivých LTO článků, je třeba dodat BMS, který bude udržovat články na stejné hodnotě napětí a chránit tak baterii jako celek. Vybraný BMS je od firmy Changsha Deligreen Power Co. typ LTO-10S-80A QNBBM. Disponuje krytím IP67 a 6ti typy ochran. Tím je míněno ochrana článků proti podbití, přebití, přepětí, zkratu a samotné balancování. BMS má společný port pro vstup a výstup, takže energie může proudit oběma směry.

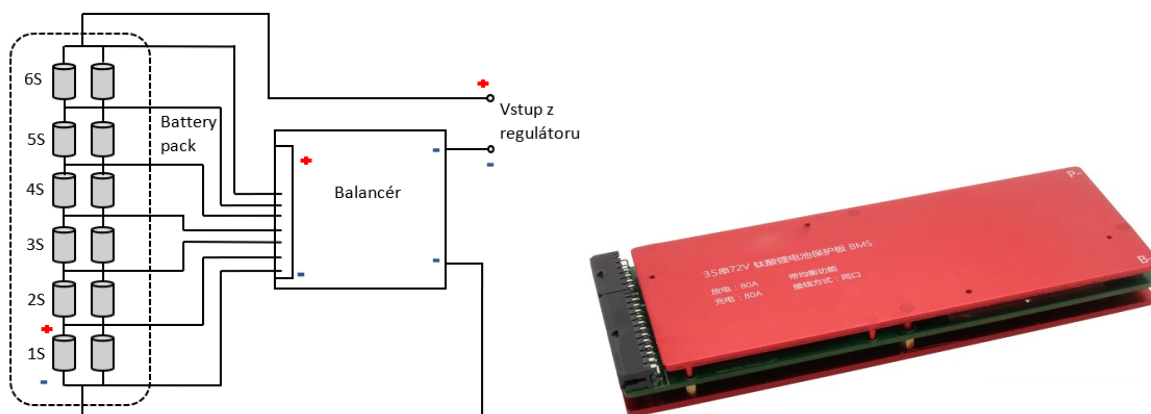
<sup>182</sup> Lto Yinlong 2,3V / 30Ah. FOTOVOLTAIK SLUNEČNÍ ENERGIE POR KAŽDÉHO. Fotovoltaik [online]. [cit. 2019-09-26]. Dostupné z: <https://www.fotovoltaiik.cz/Lto-Yinlong-2-3V-30Ah-d79.htm?tab=download#anch1>

<sup>183</sup> Lto Yinlong 2,3V / 30Ah. Poznámka 182

<sup>184</sup> Sérioparalelní spojení (článků nebo baterií). In: BATTEX. Abeceda baterií a akumulátorů [online]. 2019 [cit. 2019-09-26]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/s%C3%A9rioparaleln%C3%AD+spojen%C3%AD+%28%C4%8D%C3%A1nk%C5%AF+nebo+bateri%C3%AAD%29>

| Elektrické parametry             |          | Teplotní parametry    |               |
|----------------------------------|----------|-----------------------|---------------|
| Maximální nabíjecí napětí [V]    | 2,8±0,05 | Operační teplota [°C] | -30 až 80     |
| Napětí pro opětovné nabíjení [V] | 2,6±0,05 | Mechanické parametry  |               |
| Balanční napětí [V]              | 2,65     | Rozměry [mm]          | 65 x 180 x 16 |
| Balanční proud [mA]              | 40±5     |                       |               |
| Maximální vybíjecí napětí [V]    | 1,6±0,05 |                       |               |
| Napětí pro opětovné vybíjení [V] | 1,8±0,05 |                       |               |

Tabulka 20 – Základní parametry BMS LTO-10S-80A QNBBM



Obrázek 65 – Zapojení BMS na články a regulátor vlevo, vzhled BMS vpravo<sup>185</sup>

## 5.5. Jasový spínač

Jasový spínač má zajistit vypínání a zapínání spotřebiče na základě vnější intenzity osvětlení, proto se spíše označuje jako soumrakový spínač. Vybraný spínač musí mít DC napájení a vysoký stupeň krytí, proto byl vybrán spínač AZH 106 12V. Jedná se o vestavěnou hermetickou konstrukcí se senzorem a stupněm krytí IP65.

| Elektrické parametry  |             | Světelné parametry   |          |
|-----------------------|-------------|----------------------|----------|
| Napájení DC [V]       | 10,2 – 13,2 | Rozsah [lx]          | 2 – 1000 |
| Maximální proud [A]   | 10          | Hystereze [lx]       | 15       |
| Vlastní spotřeba [W]  | 0,56        | Zpoždění zapnutí [s] | 10       |
| Operační teplota [°C] | -25 až 50   | Zpoždění vypnutí [s] | 20       |

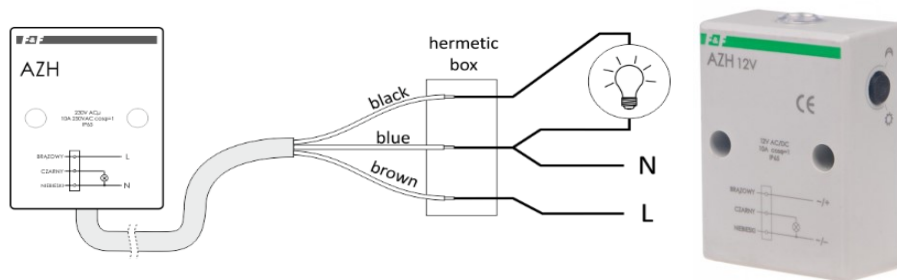
Tabulka 21 – Základní parametry jasového spínače AZH 106 12V

Vybraný spínač dostatečně vyhovuje spínacími parametry pro spotřebič a nabízí vysokou odolnost vůči vnějším podmínkám. Hodnota spínacího osvětlení je zvolena na 17 lx<sup>186</sup> s ohledem na dostatečné osvětlení prostoru.

<sup>185</sup> Protection circuit Module 80A. In: Deligreen alibaba [online]. 2019 [cit. 2019-09-27]. Dostupné z:

[https://deligreen.en.alibaba.com/product/60824631339-0/5S\\_10S\\_15S\\_20S\\_25S\\_30S\\_35S\\_PCM\\_PCB\\_Protection\\_circuit\\_Module\\_80A\\_100A\\_200A\\_Lto\\_Lithium\\_Titanate\\_bms\\_Customized.html?spm=a2700.icbuShop.41413.9.2388548bYhvpVf](https://deligreen.en.alibaba.com/product/60824631339-0/5S_10S_15S_20S_25S_30S_35S_PCM_PCB_Protection_circuit_Module_80A_100A_200A_Lto_Lithium_Titanate_bms_Customized.html?spm=a2700.icbuShop.41413.9.2388548bYhvpVf)

<sup>186</sup> ŠAFAŘÍK, Miroslav a et. Poznámka 170



Obrázek 66 – Schéma zapojení soumrakového spínače AZH 106 12V vlevo, soumrakový spínač vpravo<sup>187</sup>

### 5.6. Step-Up měnič

Spotřebič je dimenzován na napětí 53,57 V, proto je třeba mezi něj a jasový spínač umístit Step-Up měnič, který bude dodávat konstantní požadované výstupní napětí, resp. konstantní výstupní proud 280 mA. Protože tato hodnota napětí je nestandartní, je třeba zvolit měnič s nastavitelným výstupním napětím v určitém rozsahu. Vybraný měnič je TUSOTEK model TS-IPS-V03 385W s krytovaným provedením. Výrobce sice uvádí výkon až 385 W, ovšem bez vysoce kvalitního chlazení je tato hodnota nereálná, avšak pro spotřebič v tomto návrhu je výkon zcela dostatečný.

| Elektrické parametry   |           |                       |      |
|------------------------|-----------|-----------------------|------|
| Vstupní napětí DC [V]  | 6 – 35    | Účinnost [%]          | 90   |
| Výstupní napětí DC [V] | 6 – 55    | Napěťová regulace [%] | ±0,5 |
| Operační teplota [°C]  | -40 až 85 | Bez výstupní ochrany  |      |

Tabulka 22 – Základní parametry měniče TS-IPS-V03<sup>188</sup>



Obrázek 67 – Step-Up měnič TS-IPS-V03<sup>189</sup>

### 5.7. Solární regulátor

V kapitole 5.3 byly popsány možné vstupy do regulátoru od panelu. Výstup by měl jít na jasový spínač, který umožňuje rozsah 10,2 až 13,2 V. Dále by měl regulátor zvládat správně nabíjet vybraný akumulátor. Při dnešních cenách MPPT regulátorů již nemá cenu uvažovat o jiné variantě jako jsou např. PWM regulátory. Navíc je při výpočtech výroby z panelu počítáno s tím, že panel se bude nacházet v MPP jen s minimální odchylkou.

Vybraný regulátor je EPsolar REG-XTRA2210, který dokáže poskytnout až 260 W nabíjecí výkon. Při přesažení výkonu panelu přes tuto hodnotu omezí regulátor nabíjecí výkon na

<sup>187</sup> Domestic and industrial automation. In: Fif [online]. Pabianice, 2019 [cit. 2019-09-20]. Dostupné z: <https://www.fif.com.pl/en/light-dependent-relays/685-light-dependent-relay-azh-12-v-123456789011.html>

<sup>188</sup> DC-DC měnič CN5139. Hezký den [online]. 2019 [cit. 2019-10-07]. Dostupné z: <http://www.hezkyden.cz/shop/dc-dc-menic-cn5139/>

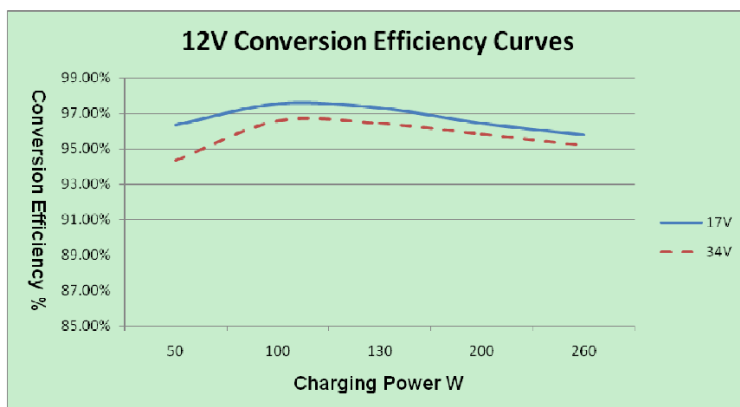
<sup>189</sup> DC-DC měnič CN5139. Poznámka 188

toto maximum. Dosažený výkon panelu přitom nesmí přesáhnout hodnotu 390 W, jinak hrozí nenávratné poškození regulátoru.

| Elektrické parametry  |         | Teplotní parametry    |                |
|---|---------|-----------------------|----------------|
| Max PV vstup [V]  | 100     | Operační teplota [°C] | -25 až 50      |
| Vstup baterie [V]   | 9 až 17 | Mechanické parametry  |                |
| Ochrana proti zkratu a přetížení na výstupu, ochrana proti přehřátí, přepólování na vstupu, vybíjení baterie skrz regulátor |         | Rozměry [mm]          | 255 x 185 x 68 |
|   |         | Hmotnost [kg]         | 1,2            |
| Odebíraný proud [mA]  | ≤ 12    | Krytí                 | IP32           |

Tabulka 23 – Základní parametry regulátoru EPsolar REG-XTRA2210<sup>190</sup>

Akumulátor se může nacházet v různých stavech nabití, přičemž regulátor kontroluje tyto stavy měřením jeho napětí. Podle hodnot napětí se pak určují řídicí parametry stavu akumulátoru a regulátor na ně reaguje. Celkem těchto stavů je 14, přičemž 2 se týkají časových hodnot. Uživatel buďto zvolí typ napojené baterie nebo každý stav nastaví manuálně, přitom může volit hodnoty napětí 9 – 17 V. To je velmi výhodné, protože v tomto návrhu je neobvyklé řešení za pomoci sériového řazení LTO článků a vytvoření tak 13,8 V nominálního napětí. Primární regulace akumulátoru je již řešena BMS, a proto je nastavení parametrů na regulátoru pouze sekundární regulací. V zásadě by tak byli parametry nastaveny jako na BMS, jen vždy s o trochu vyšší rezervou.



Obrázek 68 – Závislost účinnosti regulátoru na nabíjecím výkonu při dvou hodnotách napětí vlevo, samotný regulátor vpravo<sup>191</sup>

### 5.8. Jištění a přepět'ové ochrany...

Proudové ochrany ve formě pojistek budou umístěny v oblasti 1, dále budou instalovány pojistky 2 a 3 viz obrázek 54, přičemž oblast 1 bude navíc zahrnovat odpínač a svodič přepětí.

V oblasti 1 budou nejdříve zařazeny pojistky, poté dvoupólový odpínač. Podle výrobce má být panel jištěn na 15 A, nicméně se jedná o spíše nestandardní hodnotu, proto bude volena hodnota 16 A na válcových pojistkách OEZ 16A PV10-GG. Odpínač je dimenzován na vyšší hodnotu proudové zátěže tak, aby nehrozilo jeho poškození nebo opotřebení při odpínacím procesu. Vybraný odpínač je OEZ VARIUS OPVP10-2, který je přímo konstruován tak, aby byla do něj vsunuty zvolené pojistky. Je schopen odepnout zátěž do 32 A při maximálním

<sup>190</sup> Regulátor EPsolar REG-XTRA2210: Regulátor, solární MPPT, 12/24V, 20A, vstup 100V [online]. 2019 [cit. 2019-09-27]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/cs/211222-regulator-epsolar-reg-xtra2210>

<sup>191</sup> Regulátor EPsolar REG-XTRA2210. Poznámka 190

## Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení

stejnoseměrném napětí 440 V. Svodič přepětí byl vybrán Citel DS240S 75V DC, který slouží k ochraně regulátoru a dalších následujících zařízení. Obsahuje tepelný odpojovač, optickou indikaci poruchy a dálkovou signalizaci stavu vodiče. S přídatnou pojistkou pro svodič není počítáno, protože je pojistka  $F_{11}$  a  $F_{12}$  dimenzována pod 50 A a podle výrobce tak není třeba.<sup>192</sup>

Pojistka  $F_2$  musí chránit baterii před možným zkratem nebo nadproudem z regulátoru. Vzhledem k maximálnímu možnému nabíjecímu výkonu z regulátoru je volena hodnota pojistky 32 A, přičemž konkrétní typ je vybrána válcová pojistka OEZ 32A PV10-GG. V rámci snadné výměny a instalace bude pojistka umístěna do pojistkového pouzdra na lištu DIN. Konkrétní pouzdro je PMX10X38-1I-24, které je dimenzováno až na stejnosměrné napětí 24 V.

Pojistka  $F_3$  chrání spotřebičovou část od výstupu z regulátoru. Tento výstup by měl být v mezích maximálního výkonu regulátoru, takže je zvolena válcová pojistka OEZ 4A PVA10-GG, přičemž opět bude v pouzdru PMX10X38-1I-24.

| Zařízení              | OEZ 16A PV10-GG | OEZ VARIUS OPVP10-2 | Citel DS240S 75V DC | OEZ 32A PV10-GG | PMX10X38-1I-24     | OEZ 4A PVA10-GG |
|-----------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| $U_N$ DC [V]          | 250             | 440                 | 75                  | 250             | 24                 | 250             |
| $I_N$ DC [A]          | 16              | 32                  | <0,001              | 32              | 32                 | 4               |
| Pracovní teplota [°C] | -               | -                   | -40 až 85           | -               | -20 až 70          | -               |
| Krytí                 | -               | IP20                | IP20                | -               | IP20               | -               |
| Rozměry [mm]          | 10 x 38         | 86 x 36,33 x 63     | 99 x 18 x 67        | 10 x 38         | 88,8 x 17,5 x 74,8 | 10 x 38         |

Tabulka 24 – Základní parametry přepětové a proudové ochrany



Obrázek 69 – Dvoupólový pojistný odpináč vlevo<sup>193</sup>, svodič přepětí veprostřed vlevo<sup>194</sup>, pojistka OEZ 32A veprostřed vpravo<sup>195</sup>, držák na pojistku vpravo<sup>196</sup>

<sup>192</sup> Svodič přepětí Citel DS240S 75V DC. Ecoproduct [online]. 2019 [cit. 2019-10-04]. Dostupné z:

<https://www.ecoproduct.cz/solarni.panely/dc.jisteni/dc.prepetove.ochrany/svodice.prepeti.citel.ds240s.75v.dc>

<sup>193</sup> Dvoupólový pojistný odpináč do 32A. SVP SOLAR. Solar-eshop [online]. Praha 4, 2019 [cit. 2019-10-06].

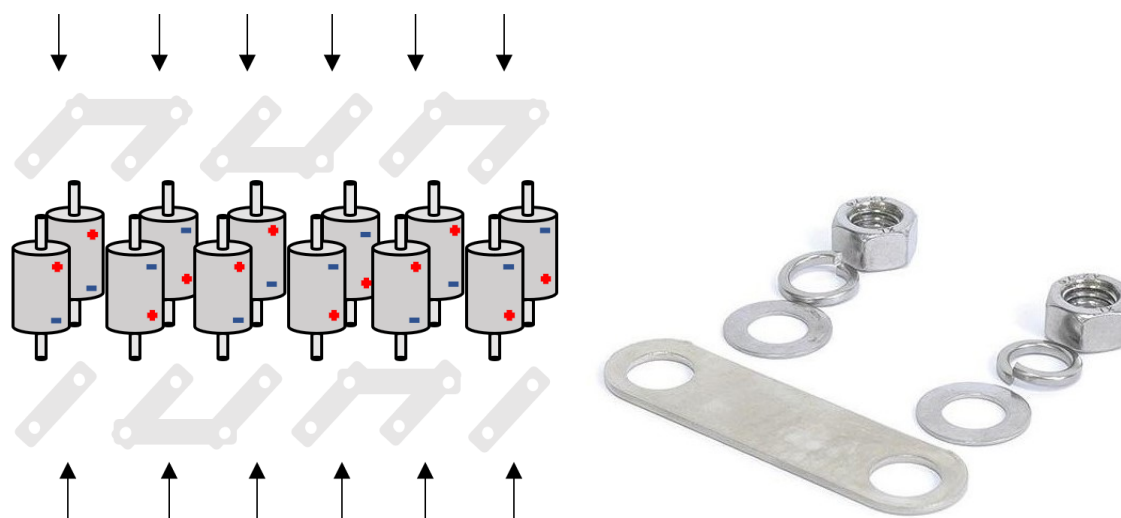
<https://www.solar-eshop.cz/p/dvoupolovy-pojistny-odpinac-do-32a/>

<sup>194</sup> Svodič přepětí Citel DS240S 75V DC. Poznámka 192

<sup>195</sup> OEZ Pojistka válcová 32A PV10-GG 400V. ELFETEX. Elfetex elektronický velkoobchod [online]. 2019 [cit. 2019-10-06]. Dostupné z: <https://eshop.elfetex.cz/10-081-650-oez-pojistka-valcova-4a-pva10-gg>

<sup>196</sup> DF ELECTRIC 485114. Tme [online]. 2019 [cit. 2019-10-06]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/pmx10x38-1i-24/pojistkova-pouzdra-na-listu-din/df-electric/485114/>

## 5.9. Kabeláž a spojovací svorky



Obrázek 70 – Schéma propojení článků vlevo, propojky LTO článků vpravo

Spojovací svorky jsou zapotřebí na propojení článků pro vytvoření 60 Ah akumulátoru. Obrázek 70 ukazuje, že je třeba 17 propojek pro vytvoření 2P6S baterie.

Kabeláž u solárního panelu by měla být UV rezistentní a neměla by být vystavena přímému slunečnímu záření. Pro připojení panelu je třeba podle výrobce konektor typu MC 4 a kabel s doporučeným průřezem  $4 \text{ mm}^2$ , přitom k regulátoru lze připojit drát o maximálním průřezu  $6 \text{ mm}^2$ . Pojistný odpínač dovoluje připojit kabel o průřezu  $0,75\text{--}25 \text{ mm}^2$  a svodič přepětí  $1,5\text{--}10 \text{ mm}^2$ . Pro návrh je vybrán konektor MC4 STAUBLI s krytím IP68 (1 pár, samec a samice). Jedná se o šroubovací konektor, který lze spojit s kabelem při použití lisovacích kleští. Vybraný solární kabel je  $4 \text{ mm}^2$  H1Z2Z2-K (1 pár), který nabízí ochranu proti UV a je určený pro vnitřní a venkovní použití. Podle výrobce disponuje kabel měrným odporem  $5,09 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$  a izolací do  $1,5 \text{ kV DC}$ . Návrh není konkrétní, proto se délky kabelů budou určovat pouze orientačně, přičemž délka kabeláže od solárního panelu k regulátoru je volena  $5 \text{ m}$ .

Další část je připojení baterie k regulátoru a pojistce  $F_2$ . Je třeba zajistit minimální vzdálenost mezi těmito částmi, neboť zde budou vznikat největší ztráty. Výrobce regulátoru doporučuje zvolení průřezu  $6 \text{ mm}^2$ , avšak jedná se o doporučenou hodnotu a v případě velké vzdálenosti by měl být tento průměr větší. Držák na pojistku umožňuje připojení kabelu s průřezem  $0,75\text{--}16 \text{ mm}^2$ . Vybraný kabel je opět H1Z2Z2-K (1 pár) s délkou  $1,5 \text{ m}$  a průřezem  $6 \text{ mm}^2$ . Jmenovité napětí je stejné jako u předchozího kabelu, avšak měrný odpor je  $3,39 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ . Připojení kladného pólu je realizováno přes držák na pojistku a poté již přímo na baterii. Připojení baterie je realizováno pomocí OL 16-M10 lisovacího kabelového oka s průřezem  $10,5 \text{ mm}$  pro navázání kontaktu se šroubem akumulátoru. Kabelové oko bude také na záporném pólu, který bude spojen s okem BMS přes vodivý šroub s maticí.

Výstup z regulátoru napájí jasový spínač, Step-Up měnič a světelný zdroj. Světelný zdroj je schopen odebírat až  $16 \text{ W}$ , přičemž měnič s určitou rezervou pracuje s  $80 \%$  účinností a má vlastní spotřebu  $0,24 \text{ W}$ . Při sečtení i vlastní spotřeby jasového spínače lze vypočítat přibližnou hraniční hodnotu proudu, která bude z regulátoru téct. Jedná se o hodnotu  $2,1 \text{ A}$  při minimální hodnotě napětí akumulátoru. Vybraný kabel je dvoužilový H07RN-F  $2 \times 1,5$  s průměrem  $1,5 \text{ mm}^2$ . I přes malé zatížení od regulátoru ke spínači je třeba minimalizovat ztráty napětí na kabelu a na přípojnicích k pojistce  $F_3$ . Napětí musí být dostatečné pro napájení

## Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení

jasového spínače, proto byla vybrána hodnota průřezu 1,5 mm<sup>2</sup>. Odhadovaná délka je 6 m a kabel disponuje dostatečnou odolností vůči klimatickým podmínkám. Další 2 m je pak počítáno s cestou ke Step-Up měničů.

Za Step-Up měničem bude již nastavena hodnota napětí na 53,57 V pro zajištění proudu 280 mA, navíc při vyšším úbytku lze tuto hodnotu napětí ještě mírně zvýšit. Mezi Step-Up měničem a spotřebičem je proud minimální, proto je opět volen dvoužilový kabel H07RN-F 2x1, ovšem s průměrem 1 mm<sup>2</sup> a délkou 1,5 m.

Na solárním panelu, svítidlu je třeba vyvést PE vodič, který slouží jako ochranný vodič pro svedení proudu v případě poruchy nebo zásahu bleskem. Uzemnění je na panelu připojeno na vnější hliníkovou konstrukci, na svítidlu pak obdobně. Také je na tento vodič připojen svodič přepětí, aby mohl správně vykonávat svou funkci a v případě zásahu bleskem do vnějších ochran svést přepětíovou vlnu. Vybraný vodič je H07V-K-6 s průřezem 6 mm<sup>2</sup> a předpokládanou délkou 7 m.

Odpor jednotlivých kabelů je většinou stanoven výrobcem jednotkou  $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ . Pro výpočet ztrát  $\Delta P$  a napěťových úbytků  $\Delta U$  jsou použity následující vzorce. Při výpočtech budou použity hraniční hodnoty provozních proudů  $I_{\text{Max}}$  pro analyzování maximálních úbytků, a přitom jsou zanedbány ztráty na kontaktech.

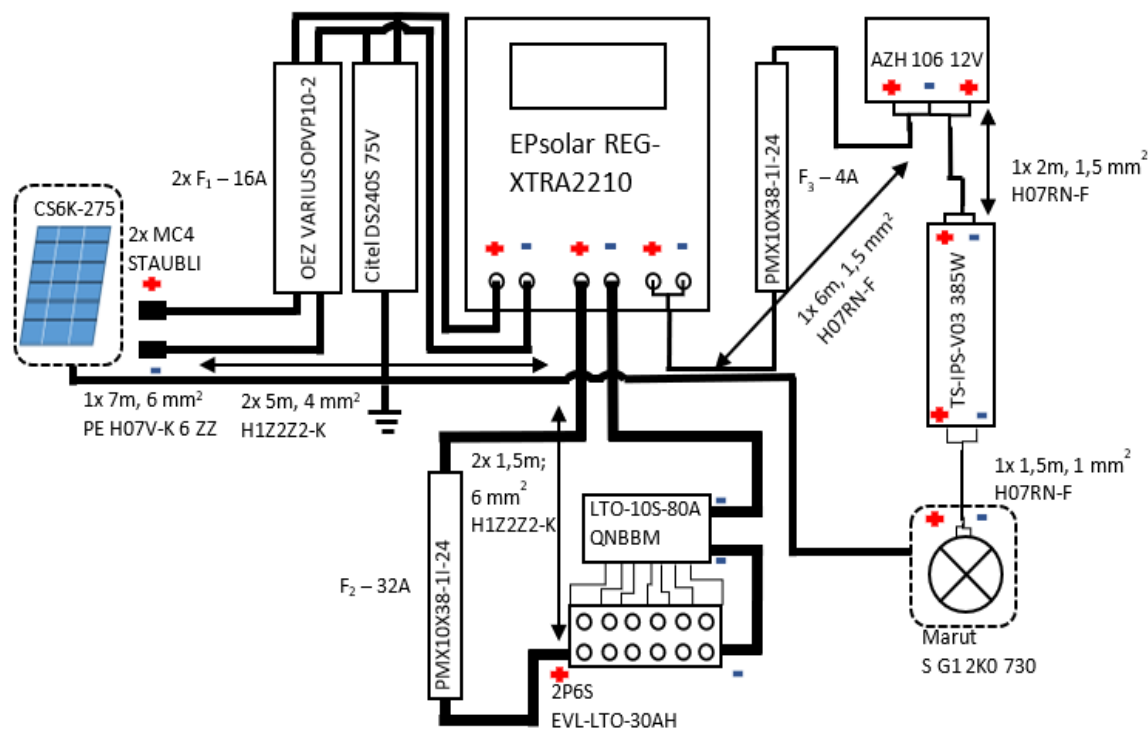
$$\Delta P = 2 \cdot R_{\text{kabel}} \cdot I_{\text{Max}}^2 = 2 \cdot \frac{r_{\text{kabel}}}{1000} \cdot l_{\text{kabel}} \cdot I_{\text{Max}}^2 \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{m}, \text{A}] \quad (5.13)$$

$$\Delta U = 2 \cdot R_{\text{kabel}} \cdot I_{\text{Max}} = 2 \cdot \frac{r_{\text{kabel}}}{1000} \cdot l_{\text{kabel}} \cdot I_{\text{Max}} \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{m}, \text{A}] \quad (5.14)$$

| Kabel  | H1Z2Z2-K |      | H07RN-F |      | H07V-K-6 |
|--|----------|------|---------|------|----------|
| Průřez [mm <sup>2</sup> ]                            | 4        | 6    | 1,5     | 1    | 6        |
| Délka [m]  | 5        | 1,5  | 8       | 1,5  | 7        |
| $I_N$ [A]  | 55       | 70   | 16      | 10   | -        |
| $I_{\text{Max}}$ [A]                                 | 8,88     | 20   | 2       | 0,28 | -        |
| $r_{\text{kabel}}$ [ $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ] | 5,09     | 3,39 | 13,3    | 19,5 | -        |
| $\Delta U$ [V]                                       | 0,45     | 0,2  | 0,22    | 0,01 | -        |
| $\Delta P$ [W]                                       | 4,01     | 4,07 | 0,9     | 0,01 | -        |

Tabulka 25 – Základní informace o ztrátách na kabelech

Příklad výpočtu pro kabel H1Z2Z2-K o průřezu 4 mm<sup>2</sup>:  $\Delta P = 2 \cdot \frac{5,09}{1000} \cdot 5 \cdot 8,88^2 = 4,01 \text{ W}$



Obrázek 71 – Přehledové schéma navrženého systému s kabeláží

## 6. Hodnocení navrženého systému

Navržený systém cílí především na jistou soběstačnost. Dále se zaměřuje na životnost, cenu a další faktory. V této kapitole bude zhodnocen systém ze 3 parametrů, avšak opět se bude jednat spíše o teoretické hodnocení, neboť systém není navržen v konkrétní lokalitě při konkrétní infrastruktuře, je tak například nemožné porovnat přesnou cenu instalace oproti připojení na elektrickou síť.

### 6.1. Energetické hodnocení

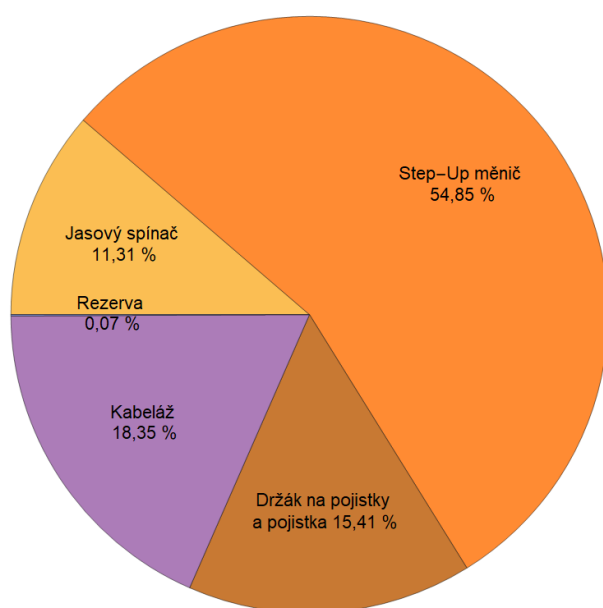
Systém je navržen na základech výpočtů o energetickém využití lokality a následně je vypočtena hodnota předpokládané výroby podle zvoleného panelu. Energetické hodnocení je tak již obsaženo v celé kapitole 655. V kapitole 5.2, přesněji ve vzorci (5.4), je počítáno se ztrátami 30 % pomocí koeficientu  $k_{loss}$ . Z vybraných komponentů systému je nutné si ověřit, jestli ztráty na kabeláži a vlastní spotřebě nepřekračují tuto hodnotu, neboť systém byl na ně dimenzován. Spotřebičová část se nachází na výstupu z regulátoru, proto bude počítáno s komponenty za tímto výstupem. Ze vzorce (5.4) vychází ztrátový výkon na 4,95 W, přičemž z této hodnoty budou počítány procentuální ztráty na jednotlivých částech. Většina dat je poskytnuta od výrobce, nicméně se jedná o data vlastní spotřeby a ztrátách při jmenovitém výkonu. Většina komponent pracuje pod jmenovitou hodnotu, proto ztráty při těchto hodnotách nejsou relevantní pro výpočet. Bude tak zjednodušeně vypočítán jejich teoretický odpor  $R_{ztrát}$  z Joulova tepelného zákona ( $P_{Nztrát} = R_{ztrát} \cdot I_N^2$ ) a následně vypočítán jejich ztrátový výkon v závislosti na očekávaném maximálním proudu. Step-Up měnič je deklarován, že je schopen pracovat až s 90 % účinností, avšak pouze za ideálních podmínek. V rámci jisté rezervy bude započítán s účinností 85 %.



| Zařízení                | Pojistkový držák | Pojistka F <sub>3</sub> | Jasový spínač | Step-Up měnič |
|-------------------------|------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Vlastní spotřeba [W]    | -                | -                       | 0,56          | 0,24          |
| I <sub>N</sub> [A]      | 32               | 4                       | 10            | -             |
| P <sub>Nztrát</sub> [W] | 3                | 0,75                    | -             | -             |
| I <sub>Max</sub> [A]    | 2,1              | 2,1                     | 2,1           | 2,1           |
| R <sub>ztrát</sub> [mΩ] | 2,93             | 0,22                    | -             | -             |
| P <sub>ztrát</sub> [W]  | 0,01             | 0,00                    | 0,56          | 2,72          |

Tabulka 26 – Základní ztráty na spotřebičové části systému

### Podíl ztrát z celkových očekávaných ztrát

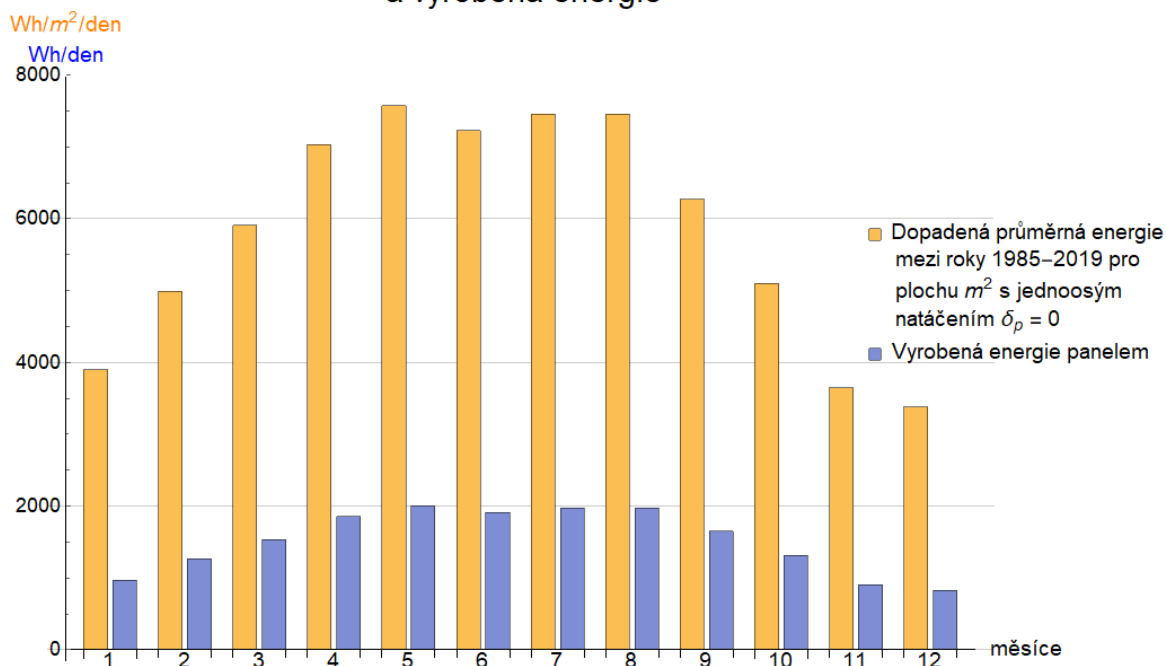


Obrázek 72 – Podíl výkonových ztrát jednotlivých komponent z očekávaných výkonových ztrát

Při sečtení celkových ztrát na komponentech a kabelech vychází hodnota 4,95 W, což odpovídá 99,93 % předpokládaných ztrát. Systém je tak navržen na dostatečnou očekávanou spotřebou.

Navržený systém je schopen celoročního provozu, protože byl navržen na základě návrhového měsíce, tedy měsíce, kdy hodnota vyrobené energie byla nejmenší. Z energetického hlediska lze zhodnotit systém, kolik je schopen vyrobit energie pro daný měsíc podle vypočteného průměru dopadené energie z každého měsíce zvlášť z dat od roku 1985 do 2019. Jak bylo zmíněno v kapitole 5.1, data o dopadené energii vychází z vodorovné pozice  $\beta = 0$ . Pro názorné zobrazení vyrobené a dopadené energie je třeba korigovat data tak, aby hodnota dopadené energie vypovídala o reálném využití potenciálu sluneční energie dopadené na plochu pod ideálním úhlem, tedy v každém okamžiku  $\delta_p = 0$ , což odpovídá ideálnímu systému s jednoosým sledovačem. Vyrobená energie je vypočtena podle druhé možnosti viz. kapitola 5.3, přičemž dopadená energie tentokrát vychází z průměrných hodnot viz obrázek 56. Obrázek 73 ukazuje mírný propad vyrobené energie v červnu v důsledku vyššího úhlu slunečního svitu vůči zvolenému sklonu panelu.

## Průměry dopadené energie v měsících mezi roky 1985 – 2019 a vyrobená energie



Obrázek 73 – Průměry dopadené energie pod úhlem  $\delta_p = 0$  a vyrobená energie panelem

Průměrná vyrobená energie není ovšem pro návrh nijak podstatná, protože se jedná o ostrovní systém a přebytky nelze nikam dále distribuovat. Vyrozená energie v návrhovém prosinci tvoří 52,78 % vyrobené energie v průměrném prosinci. Průměrná vyrobená energie po celý rok je  $1515,86 \text{ Wh} \cdot \text{den}^{-1}$ , přičemž průměrná spotřeba spotřebičové části návrhu je po celý rok  $236,58 \text{ Wh} \cdot \text{den}^{-1}$ . Na první pohled se zdá, že je systém předimenzovaný na výrobu, nicméně když se započítá vliv menšího dopadu energie v zimních měsících a zároveň větší spotřebě a vezme se v úvahu kriticky slabý měsíc na dopadenou energii oproti průměru je toto předimenzování nutné na celoroční fungování. V kapitole 5.3 je vypočtena hodnota energie pro návrhový prosinec, přičemž v kapitole 5.2 je vypočtena hodnota spotřeby pro prosinec. Spotřeba odebírá okolo 75 % vyrobené energie, zbytek je využit pro pokrytí ztrát na kabelech, kontaktech, ... mezi samotným panelem a akumulátorem. Navíc je tento přebytek využit pro zmenšení hodnoty rezervních dní v kapitole 5.4, čímž je umožněna menší náročnost na Wh kapacitu akumulátoru.

## 6.2. Ekonomické hodnocení

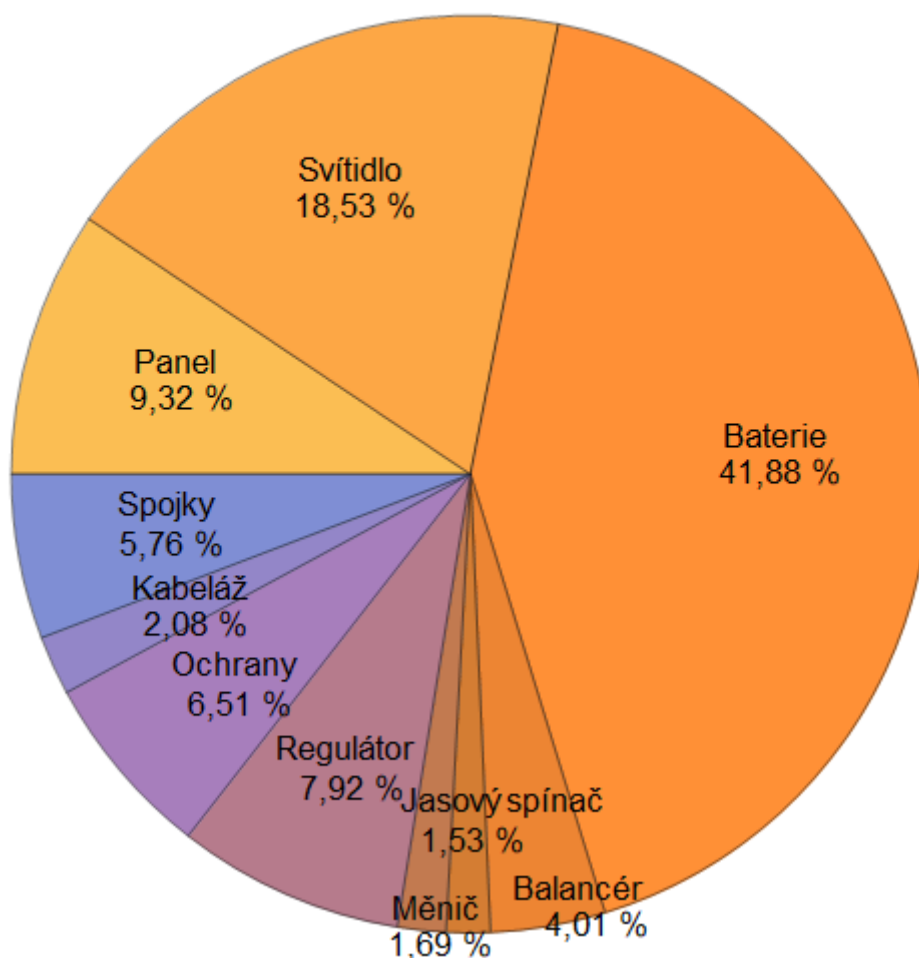
Ekonomické zhodnocení projektu je obtížné, neboť návrh je obecný, není pro konkrétní lokaci a je ostrovního typu, nelze tak počítat s výkupními cenami energie. Tato zhodnocení se nejčastěji určují na době návratnosti, která určí za jak dlouhou dobu se investice vrátí. Aby bylo možné porovnání ostrovního a neostrovního systému, je třeba počítat s možností přímé přípojky na elektrickou síť v místě instalace, nicméně vznikne velmi nepřesné zhodnocení, protože ostrovní systémy jsou instalovány především v místech, kde je elektrická síť obtížně dostupná a její výstavba by náklady na systém výrazně zvýšila.

### 6.2.1. Pořizovací náklady

| Položka                                |                              | Životnost [rok] | Počet kusů | Cena za kus bez DPH [Kč] | Celková cena bez DPH [Kč] |
|--|------------------------------|-----------------|------------|--------------------------|---------------------------|
| Solární panel CS6k-275                 |                              | 25              | 1          | 2110                     | 2110                      |
| Svítilno Marut S G1 2K0 730            |                              | 20              | 1          | 4196                     | 4196                      |
| Článek EVL-LTO-30AH                    |                              | 30              | 12         | 790                      | 9480                      |
| BMS LTO-10S-80A QNBBM                  |                              | 10              | 1          | 909                      | 909                       |
| Jasový spínač AZH 106 12V              |                              | 20              | 1          | 348                      | 348                       |
| Step-Up měnič TS-IPS-VO3               |                              | 10              | 1          | 382                      | 382                       |
| Solární regulátor EPsolar REG-XTRA2210 |                              | 20              | 1          | 1795                     | 1795                      |
| Pojistky                               | OEZ 16A PV10-GG              | 10              | 2          | 17                       | 35                        |
|  | OEZ 32A PV10-GG              | 10              | 1          | 23                       | 23                        |
|  | OEZ 4A PVA10-GG              | 10              | 1          | 17                       | 17                        |
| Odpínač OEZ VARIUS OPVP10-2            |                              | 20              | 1          | 170                      | 170                       |
| Svodič přepětí Citel DS240S 75V DC     |                              | 20              | 1          | 1185                     | 1185                      |
| Držák na pojistky PMX10X38-1I-24       |                              | 20              | 2          | 107                      | 215                       |
| Kabeláž                                | H1Z2Z2-K 4 mm <sup>2</sup>   | 30              | 2          | 95                       | 190                       |
|  | H1Z2Z2-K 6 mm <sup>2</sup>   | 30              | 2          | 31                       | 62                        |
|  | H07RN-F 1,5 mm <sup>2</sup>  | 25              | 1          | 120                      | 120                       |
|  | H07RN-F 1 mm <sup>2</sup>    | 25              | 1          | 17                       | 17                        |
|  | H07V-K 6 ZZ 6mm <sup>2</sup> | 25              | 1          | 83                       | 83                        |
| Spojky                                 | MC4 STAUBLI                  | 30              | 1          | 63                       | 63                        |
|  | na baterii                   | 30              | 17         | 71                       | 1209                      |
|  | kabel (oko)                  | 30              | 2          | 9                        | 19                        |
| Šroub                                  | s T hlavou                   | 30              | 1          | 13                       | 13                        |
| Celkem                                 |                              |                 |            |                          | 22638,24                  |

Tabulka 27 – Pořizovací náklady ostrovního systému, zelená barva značí nezbytné komponenty nutné i při instalaci napájenou ze sítě

## Podíl ceny jednotlivých komponent



Obrázek 74 – Kruhový diagram podílu ceny jednotlivých komponent navrženého systému

Při analyzování životnosti jednotlivých komponent se vycházelo z údajů poskytnutých výrobcem, pokud údaje nebyly k dispozici, byly dosazeny obvyklé hodnoty životnosti podobných součástek. Na diagramu viz obrázek 74 lze pozorovat podíl ceny jednotlivých součástí systému. Baterie je nejdražší a tvoří tak největší podíl na celkové ceně, naproti tomu panel, jakožto elektrický zdroj, tvoří pouze 9,32 % nákladů. Ceny panelů se v poslední době výrazně snížily a jejich dostupnost je tak o mnoho vyšší, lze tak pozorovat, že fotovoltaický zdroj tvoří pouze malou část z celkových nákladů. Při výpočtech pořizovacích nákladů nebyla brána cena za montáž, konstrukci, dopravu, údržbu, revizi a dalších spojených nákladů, byla brána pouze základní cena komponentů navrženého systému. Ostatní náklady nebyly zahrnuty, protože systém není navržen na konkrétní oblast ani na konkrétní umístění v prostředí (sloup, bok budovy, ...).

### 6.2.2. Čistá současná hodnota NPV

Pro ekonomické zhodnocení projektu bude využita NPV, což je finanční veličina respektující veškerý tok peněz s ohledem na čas. Mezi vstupní investice se řadí pořizovací náklady, v nultém roce je tak peněžní tok  $CF_0$  záporný, v dalších pak vyplývají kladné

hodnoty z ušetřené energie. Ušetřenou energií je myšlena energie, která by byla nutná dodat z veřejné sítě při absenci fotovoltaického zdroje. Doba životnosti  $n$  je odhadována na 20 let, reálná diskontní sazba je volena jako 0; 3; 5; 7,8; a 10. NPV je vypočteno z následujícího vzorce.<sup>197</sup>

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+R_N)^i} \quad [\text{Kč}; \text{Kč}, -, -] \quad (6.1)$$

$$CF_i = E_{\text{spotřebovaná}} \cdot P_{\text{elektriny}} \quad [\text{Kč} \cdot \text{rok}^{-1}; \text{kWh} \cdot \text{rok}^{-1}, \text{Kč} \cdot \text{kWh}^{-1}] \quad (6.2)$$

- $R_N$  je nominální diskontní sazba, jedná se o úrokovou míru, která oproti zhodnocování financí dělá opak, tedy znehodnocuje. Ukazuje tak rozdíl mezi hodnotou určité částky dnes a v budoucnosti.<sup>198</sup>
- $CF_i$  je peněžní tok v roce  $i$ . Představuje rozdíl mezi příjmy a výdaji v daném roce.
- $E_{\text{spotřebovaná}}$  je spotřebovaná energie spotřebičem v roce  $i$ .
- $P_{\text{elektriny}}$  je nominální cena elektriny za 1 kWh roce  $i$ .

Cena elektriny je proměnná, přičemž hodnota koruny také, proto je při výpočtech provedena korekce. Nominální diskont zahrnuje reálný diskont a inflaci, přičemž za tu se vezme referenční hodnota 2,1 %. Výpočet nominálního diskontu je proveden podle vzorce (6.3).<sup>199</sup> Odhad ceny elektriny je problematický, nicméně při úvahách bude použita referenční hodnota 2 Kč/kWh s ročním růstem 3,5 % podle odhadu<sup>200</sup>. Při výstavbě veřejného osvětlení nelze počítat s výnosem projektu ve formě prodeje vyrobeného světla, kladný peněžní tok tak bude tvořen pouze cenou spotřebované elektriny, za kterou není třeba platit z distribuční sítě.

$$R_N = (1 + R_R) \cdot (1 + I_E) - 1 \quad [-; -, -] \quad (6.3)$$

|                             |     |      |     |      |       |
|-----------------------------|-----|------|-----|------|-------|
| Reálný diskont $R_R$ [%]    | 0   | 3    | 5   | 7,8  | 10    |
| Nominální diskont $R_N$ [%] | 2,1 | 5,16 | 7,2 | 10,6 | 12,31 |

Tabulka 28 – Hodnoty vypočtených nominálních diskontů

Příklad výpočtu pro reálný diskont 0 %:  $R_N = (1 + 0) \cdot (1 + 0,021) - 1 = 2,1 \%$

V 10. roce života je třeba vyměnit součástky s životností 10 let, proto je peněžní tok v tomto roce záporný.

<sup>197</sup> Evaluating Commercial Solar ROI, Payback, IRR, and NPV. REC SOLAR COMMERCIAL CORPORATION. REC Solar [online]. 2018 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://recsolar.com/blogs/evaluating-commercial-solar-payback-roi-npv-and-irr/>

<sup>198</sup> CIHLÁŘ, Jan. Investice do decentrálních zdrojů energie – 1. díl: Fotovoltaická elektrárna. O Energetice [online]. 2015 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/urady-institute/investice-do-decentralnich-zdroju-energie-1-dil-fotovoltaicka-elektrama>

<sup>199</sup> ČÍŽEK, Bohuslav. Diskontní sazba (Discount rate). Středoevropské centrum pro finance management [online]. 2012 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <http://www.finance-management.cz/080vypisPojmu.php?IdPojPass=116>

<sup>200</sup> ČAMBALA, Petr a etc. Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: [https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107\\_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf](https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf). Oponentura. EGÚ Brno, a. s.

## Návrh solárního ostrovního systému s využitím pro veřejné osvětlení

| i      | CF [Kč]   | Cena elektřiny [Kč/kWh] | NPV [Kč]           |          |          |          |          |          |
|--------|-----------|-------------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        |           |                         | R <sub>N</sub> [%] | 2,1      | 5,16     | 7,20     | 10,06    | 12,31    |
| 0      | -22638,24 | 2,00                    |                    | -22638,2 | -22638,2 | -22638,2 | -22638,2 | -22638,2 |
| 1      | 178,75    | 2,07                    |                    | 175,1    | 170,0    | 166,7    | 162,4    | 159,2    |
| 2      | 185,00    | 2,14                    |                    | 177,5    | 167,3    | 161,0    | 152,7    | 146,7    |
| 3      | 191,48    | 2,22                    |                    | 179,9    | 164,6    | 155,4    | 143,6    | 135,2    |
| 4      | 198,18    | 2,30                    |                    | 182,4    | 162,0    | 150,0    | 135,0    | 124,6    |
| 5      | 205,12    | 2,38                    |                    | 184,9    | 159,5    | 144,9    | 127,0    | 114,8    |
| 6      | 212,30    | 2,46                    |                    | 187,4    | 157,0    | 139,8    | 119,4    | 105,8    |
| 7      | 219,73    | 2,54                    |                    | 190,0    | 154,5    | 135,0    | 112,3    | 97,5     |
| 8      | 227,42    | 2,63                    |                    | 192,6    | 152,0    | 130,3    | 105,6    | 89,8     |
| 9      | 235,38    | 2,73                    |                    | 195,2    | 149,6    | 125,8    | 99,3     | 82,8     |
| 10     | -1120,71  | 2,82                    |                    | -910,4   | -677,4   | -558,9   | -429,6   | -351,0   |
| 11     | 252,14    | 2,92                    |                    | 200,6    | 144,9    | 117,3    | 87,8     | 70,3     |
| 12     | 260,97    | 3,02                    |                    | 203,4    | 142,6    | 113,2    | 82,6     | 64,8     |
| 13     | 270,10    | 3,13                    |                    | 206,2    | 140,4    | 109,3    | 77,7     | 59,7     |
| 14     | 279,55    | 3,24                    |                    | 209,0    | 138,2    | 105,5    | 73,0     | 55,0     |
| 15     | 289,34    | 3,35                    |                    | 211,8    | 136,0    | 101,9    | 68,7     | 50,7     |
| 16     | 299,47    | 3,47                    |                    | 214,8    | 133,8    | 98,4     | 64,6     | 46,7     |
| 17     | 309,95    | 3,59                    |                    | 217,7    | 131,7    | 95,0     | 60,7     | 43,1     |
| 18     | 320,79    | 3,71                    |                    | 220,7    | 129,6    | 91,7     | 57,1     | 39,7     |
| 19     | 332,02    | 3,85                    |                    | 223,7    | 127,6    | 88,5     | 53,7     | 36,6     |
| 20     | 343,64    | 3,98                    |                    | 226,8    | 125,6    | 85,5     | 50,5     | 33,7     |
| Celkem | -18947,6  |                         |                    | -19749,2 | -20528,8 | -20881,7 | -21234,1 | -21432,6 |

Tabulka 29 – Základní NPV pro samotný systém bez korekce

Příklad výpočtu  $NPV_1$  pro 1. rok a  $R_N = 2,5$ :  $NPV_1 = \frac{178,75}{(1+0,021)^1} = 175,1 \text{ Kč}$

Návrh ostrovního systému zahrnuje komponenty, které by byly nutné pořídit i při instalaci systému připojeného na síť viz zelené buňky tabulka 27. Dále by síťový systém vyžadoval elektroměr, odpínač, AC/DC měnič, svodič přepětí a hlavní jistič.<sup>201</sup> Při úvaze záporného peněžního toku v 0. roce je v od celkových pořizovacích nákladů odečtena suma, která zahrnuje právě náklady spojené se síťovou instalací. Je tak vypočtena ještě tabulka 30 s touto korekcí.

Čistá současná hodnota vyšla v každém výpočtu záporně, ovšem to je především způsobeno předpokladem, že v místě instalace mám jednoduše dostupnou veřejnou síť. V případě obtížně dostupné sítě dostává systém teprve kladný potenciál na výstavbu. Z ekonomického hlediska je jakýkoliv systém se zápornou NPV nevýhodný a nevyplatí se do něj investovat.

<sup>201</sup> MUŠÁLKOVÁ, Ilona a Jiří KOTAS. Standardy pro zařízení veřejného osvětlení: ČEZ Energetické služby, s.r.o [online]. ČEZ. 2018 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file-other/cezes/nase-sluzby/verejne-osvetleni/standardy-vo\\_cez-energeticke-sluzby\\_final.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file-other/cezes/nase-sluzby/verejne-osvetleni/standardy-vo_cez-energeticke-sluzby_final.pdf)

| i      | CF [Kč]   | Cena elektřiny [Kč/kWh] | NPV [Kč]           |          |          |          |          |          |
|--------|-----------|-------------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        |           |                         | R <sub>N</sub> [%] | 2,10     | 5,16     | 7,20     | 10,06    | 12,31    |
| 0      | -14806,18 | 2,00                    |                    | -14806,2 | -14806,2 | -14806,2 | -14806,2 | -14806,2 |
| 1      | 178,75    | 2,07                    |                    | 175,1    | 170,0    | 166,7    | 162,4    | 159,2    |
| 2      | 185,00    | 2,14                    |                    | 177,5    | 167,3    | 161,0    | 152,7    | 146,7    |
| 3      | 191,48    | 2,22                    |                    | 179,9    | 164,6    | 155,4    | 143,6    | 135,2    |
| 4      | 198,18    | 2,30                    |                    | 182,4    | 162,0    | 150,0    | 135,0    | 124,6    |
| 5      | 205,12    | 2,38                    |                    | 184,9    | 159,5    | 144,9    | 127,0    | 114,8    |
| 6      | 212,30    | 2,46                    |                    | 187,4    | 157,0    | 139,8    | 119,4    | 105,8    |
| 7      | 219,73    | 2,54                    |                    | 190,0    | 154,5    | 135,0    | 112,3    | 97,5     |
| 8      | 227,42    | 2,63                    |                    | 192,6    | 152,0    | 130,3    | 105,6    | 89,8     |
| 9      | 235,38    | 2,73                    |                    | 195,2    | 149,6    | 125,8    | 99,3     | 82,8     |
| 10     | -739,14   | 2,82                    |                    | -600,4   | -446,8   | -368,6   | -283,3   | -231,5   |
| 11     | 252,14    | 2,92                    |                    | 200,6    | 144,9    | 117,3    | 87,8     | 70,3     |
| 12     | 260,97    | 3,02                    |                    | 203,4    | 142,6    | 113,2    | 82,6     | 64,8     |
| 13     | 270,10    | 3,13                    |                    | 206,2    | 140,4    | 109,3    | 77,7     | 59,7     |
| 14     | 279,55    | 3,24                    |                    | 209,0    | 138,2    | 105,5    | 73,0     | 55,0     |
| 15     | 289,34    | 3,35                    |                    | 211,8    | 136,0    | 101,9    | 68,7     | 50,7     |
| 16     | 299,47    | 3,47                    |                    | 214,8    | 133,8    | 98,4     | 64,6     | 46,7     |
| 17     | 309,95    | 3,59                    |                    | 217,7    | 131,7    | 95,0     | 60,7     | 43,1     |
| 18     | 320,79    | 3,71                    |                    | 220,7    | 129,6    | 91,7     | 57,1     | 39,7     |
| 19     | 332,02    | 3,85                    |                    | 223,7    | 127,6    | 88,5     | 53,7     | 36,6     |
| 20     | 343,64    | 3,98                    |                    | 226,8    | 125,6    | 85,5     | 50,5     | 33,7     |
| Celkem | -10734,0  |                         |                    | -11607,2 | -12466,1 | -12859,4 | -13255,8 | -13481,1 |

Tabulka 30 – Základní NPV s korigovaným peněžním tokem

### 6.2.3. Vnitřní výnosové procento IRR

IRR je ukazatel, který vypovídá o hodnotě procentuálního zisku při zvážení životnosti projektu. Obecně je IRR využíváno ke zhodnocení efektivnosti investice, z matematického hlediska se jedná o diskont, u kterého vychází NPV = 0. Platí, že čím vyšší je IRR, tím je vyšší návratnost investice. Tento systém obsahuje dvakrát záporný peněžní tok, poprvé v 0. roce při pořizovacích nákladech ( $CF_0$  = Pořizovací náklady), podruhé při výměně součástí v 10. roce ( $CF_{10}$  = Výdělek v 10. roce – pořizovací náklady měněných součástí). Protože výpočet IRR je prováděn numerickým řešením, bude vzorec (6.4) upraven na vzorec (6.5) pro pochopitelnost výpočtu, samotná kalkulace však bude proveden v excelu pomocí funkce MIRA.VÝNOSNOSTI.<sup>202</sup>

$$0 = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1 + IRR)^i} \quad [\text{Kč}; \text{Kč}, -, -] \quad (6.4)$$

$$0 = \sum_{i=1}^9 \frac{CF_i}{(1 + IRR)^i} + \sum_{i=11}^n \frac{CF_i}{(1 + IRR)^i} + \frac{CF_{10}}{(1 + IRR)^i} + CF_0 \quad [\text{Kč}; \text{Kč}, -, \text{Kč}, -, \text{Kč}, -, \text{Kč}] \quad (6.5)$$

<sup>202</sup> ZIKMUND, Martin. Hodnocení investic: Vnitřní výnosové procento (IRR). BusinessVize [online]. 2010 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/hodnoceni-investic-vnitni-vynosove-procento-irr>

| IRR [%]                    |     |                          |     |
|----------------------------|-----|--------------------------|-----|
| Systém bez korekce bez DPH | -12 | Systém s korekcí bez DPH | -9  |
| Systém bez korekce s DPH   | -13 | Systém s korekcí s DPH   | -11 |

Tabulka 31 – Hodnoty IRR pro systém s korekcí a bez korekce

#### 6.2.4. Prostá doba návratnosti $TN_p$

Tento ukazatel je nejjednodušší a zároveň velmi nepřesný údaj doby návratnosti investice. Nezohledňuje úrokovou míru, nepracuje tak s vlivem času. Ukazuje dobu, po kterou se bude investice vracet, aby vyrovnala investiční náklady  $IN$ .<sup>203</sup>

$$TN_p = \frac{IN}{CF} \quad [\text{roky; Kč, Kč} \cdot \text{rok}^{-1}] \quad (6.6)$$

| $TN_p$ [roky] přes         |     |                          |     |
|----------------------------|-----|--------------------------|-----|
| Systém bez korekce bez DPH | 131 | Systém s korekcí bez DPH | 85  |
| Systém bez korekce s DPH   | 165 | Systém s korekcí s DPH   | 108 |

Tabulka 32 – Hodnoty prostých dob návratnosti pro systém s korekcí a bez korekce

Příklad výpočtu pro systém bez korekce a DPH:  $TN_p = \frac{22638,24}{172,7} \cong 131 \text{ let}$

#### 6.2.5. Reálná doba návratnosti $TN_r$

Reálná doba návratnosti obsahuje vliv diskontní míry, a tak i vliv inflace v čase. Počítá se podle vzorce (6.7).<sup>204</sup>

$$\sum_{i=1}^{TN_r} CF_i \cdot (1+r)^{-i} - IN = 0 \quad [\text{Kč, -, -, Kč; Kč}] \quad (6.7)$$

| $TN_r$ [roky] přes         | $R_N$ [%] |    |
|----------------------------|-----------|----|
| Systém bez korekce bez DPH |           | 74 |
| Systém s korekcí bez DPH   |           | 56 |
| Systém bez korekce s DPH   |           | 66 |
| Systém s korekcí s DPH     |           | 86 |

Tabulka 33 – Reálná doba návratnosti pro diskontní míru 2,1 % pro systém s korekcí a bez korekce

Při výpočtech není zahrnut větší diskontní sazba jak 2,1 %, neboť pro vyšší sazby neexistuje řešení. Vypočtené hodnoty daleko převyšují dobu životnosti systému, což bylo očekávatelné již z kapitoly 6.2.2.

<sup>203</sup> MALEČKOVÁ, Veronika a etc. METODA DOBY NÁVRATNOSTI INVESTICE: ČASTO VYUŽÍVANÁ METODA ANALÝZY BÁŇSKÝCH INVESTIC. Geologie.vsb [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5\\_theorie.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5_theorie.html)

<sup>204</sup> PETR TYL, Jan. Hodnocení přínosů zateplení 2: doba návratnosti. Projekty-inkapo [online]. 2016 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.projekty-inkapo.cz/doba-navratnosti/>



### 6.2.6. Cena elektřiny za energii LCOE

LCOE je měřítko, které je využíváno k porovnání výroby elektřiny z různých zdrojů. Srovnání zahrnuje veškeré náklady a energii systému v průběhu svého života. Jedná se tak spíše o ukazatel, který porovnává typ systémů na výrobu energii s ostatními typy. LCOE se počítá podle vzorce (6.8), který po zahrnutí veškerých vlivů přechází na tvar (6.9). Při výpočtech je brán náklad na údržbu 500 Kč ročně a 1000 Kč v 10. roce při výměně komponent.

$$LCOE = \frac{\text{Celková cena v průběhu života}}{\text{Celková energie vyrobená v průběhu života}} \quad [\text{Kč} \cdot \text{Wh}^{-1}; \text{Kč}, \text{Wh}] \quad (6.8)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{IN_i + M_i + F_i}{(1 + R_N)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1 + R_N)^i}} \quad [\text{Kč} \cdot \text{Wh}^{-1}; \text{Kč}, \text{Kč}, \text{Kč}, -, \text{Wh}, -] \quad (6.9)$$

- $IN_i$  jsou investiční náklady v daném roce  $i$ .
- $M_i$  jsou náklady na údržbu v daném roce  $i$ .
- $F_i$  jsou náklady na palivo v daném roce  $i$  (v případě PV nulové).
- $E_i$  je vyrobená energie v roce  $i$ .
- $R_N$  je nominální diskont.

| $R_N$ [%]                  | 2       | 5,16    | 7,2     | 10,06   | 12,31   |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Systém bez korekce s DPH   | 1398,96 | 2601,49 | 3347,46 | 4348,51 | 5113,25 |
| Systém s korekcí s DPH     | 1028,97 | 1873,08 | 2382,56 | 3054,56 | 3561,82 |
| Systém bez korekce bez DPH | 1172,35 | 2156,35 | 2758,48 | 3559,67 | 4168,18 |
| Systém s korekcí bez DPH   | 891,18  | 1597,37 | 2014,29 | 2556,19 | 2960,97 |

Tabulka 34 – Hodnoty vypočtené LCOE pro dané systémy v Kč/kWh

Hodnoty jsou samozřejmě obrovské, protože za vyrobenou energii je počítána pouze spotřeba svítidla v průběhu roku. Pro celoroční funkčnost je systém předimenzovaný, a proto je jeho cena za kWh tak vysoká.

### 6.3. Enviromentální hodnocení

Z hlediska enviromentálního dopadu je důležité zhodnotit, zda lze fotovoltaický systém považovat za zelený zdroj energie, obzvláště pak ostrovní systém. V průběhu života systému je zanechána ekologická stopa a je tak otázka, zda je tento typ obnovitelného zdroje opravdu "čistý". Pro toto hodnocení se používá metoda LCA, která hodnotí dopad na životní prostředí v průběhu celého života, což obsahuje těžbu surovin, výrobu, transport, provoz a likvidace po skončení technické způsobilosti života. Další otázkou je estetičnost systému, kolik a jaký typ plochy pokrývá a za jakou dobu svého života je schopen pokrýt energetické náklady na jeho výrobu. Mezi další faktory ovlivňující životní prostředí patří vliv na ovzduší, klima, povrchové a podzemní vody apod. Při úvahách enviromentálního dopadu navrženého systému bude zohledněn pouze vliv baterie a panelu, podružné součásti budou zanedbány.<sup>205</sup>

<sup>205</sup> ČERNÁ, Ladislava a etc. EKONOMICKÁ BILANCE VÝROBY A LIKVIDACE FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ INSTALOVANÝCH V ČR: Vypracováno pro REsolar s.r.o [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: [https://www.solarniasociace.cz/tmp/studie\\_cvut\\_bilance\\_solarni\\_panely.pdf](https://www.solarniasociace.cz/tmp/studie_cvut_bilance_solarni_panely.pdf). ČVUT.

Solární panel je nejdříve potřeba vyrobit, provozovat a poté ho ekologicky zlikvidovat. To samozřejmě platí i pro použité akumulátory. V průběhu výroby jsou spotřebovány zdroje a energie. Mezi environmentální dopady výroby se uvádí spotřeba energie, vody, primárních či recyklovaných zdrojů, použití toxických materiálů a chemie. V průběhu svého života je pak posouzení vlivu na zabírané místo v krajině, ohrožení místní fauny a flóry a další faktory. Při likvidaci je to pak obdobné jako při výrobě, přičemž při recyklaci je zahrnut pozitivní vliv získaných materiálů.

### 6.3.1. Doba energetické návratnosti panelů

Výroba fotovoltaického panelu je proces, který je energeticky náročný. Je-li tedy při výrobě elektrického zdroje, který bude sám při určité účinnosti produkovat energii, nejdříve potřeba dodat velké množství energie, vyvstává v úvahu otázka, za jakou dobu svého života dokáže zdroj vyrobit energii, která byla spotřebována při jeho výrobě. Tento ukazatel se nazývá doba energetické návratnosti a je samozřejmě závislý na použité technologii výroby, lokaci, ve které bude panel provozován a na výsledné účinnosti výrobku. Jedná se o ekonomický ukazatel, avšak v rámci úvah environmentálního dopadu systému nebyl zařazen mezi ekonomické hodnocení. Vypracované studie uvádějí, že pro polykrystalický modul je tato návratnost okolo 2,7 let, z recyklovaných materiálů je tomu pak 1,5 let. Nicméně tyto úvahy počítají s tím, že veškerá vyrobená energie je využita, což v případě ostrovního systému tak není.<sup>206</sup>

### 6.3.2. Recyklace panelů

Fotovoltaický modul je složen z rámu, skla, EVA, tedlaru a FV článků. Celé uskupení modulu obsahuje hliník, sklo, plast, měď, stříbro, křemík a vzácné kovy. Z těchto materiálů se nejlépe recykluje hliník a sklo. Poměrně jednoduchými a energeticky nenáročnými metodami lze z recyklovat až 95 % skleněného materiálu, u hliníku je to téměř 100 %. U recyklování vodivých materiálů lze dostat okolo 90 % mědi z kabelů, zatímco u stříbra je to okolo 50 %. Úspěšnost recyklace vzácných kovů je pak závislá na specifickém prvku a použité metodě. Mezi používané metody recyklace se řadí:

- Termicko-chemická – Metoda začíná odstraněním kovového rámu a EVA fólie a postupuje odpařením plastů teplem.
- Mechanicko-chemická – Podstata metody je založená na drcení materiálů na jemnou drť a následným elektrodynamickým tříděním.

Celkově je pak účinnost recyklace okolo 81 %, přičemž především díky získanému drahému stříbru je recyklace i ekonomicky výhodná. Samotná recyklace je sama o sobě proces, který zatěžuje životní prostředí, nicméně pokud je tento proces vztažen k zatížení, jež by vznikalo z nutnosti používání pouze primárních surovin k výrobě fotovoltaických panelů, pak se recyklace jeví jako účinná metoda ekologické likvidace. Navržený systém obsahuje pouze jeden fotovoltaický panel, přičemž úvahy recyklace a zátěže na životní prostředí jsou spíše aplikovány na velké globální systémy s vysoko kapacitním výkonem.<sup>207</sup>

---

<sup>206</sup> ČERNÁ, Ladislava a etc. Poznámka 205

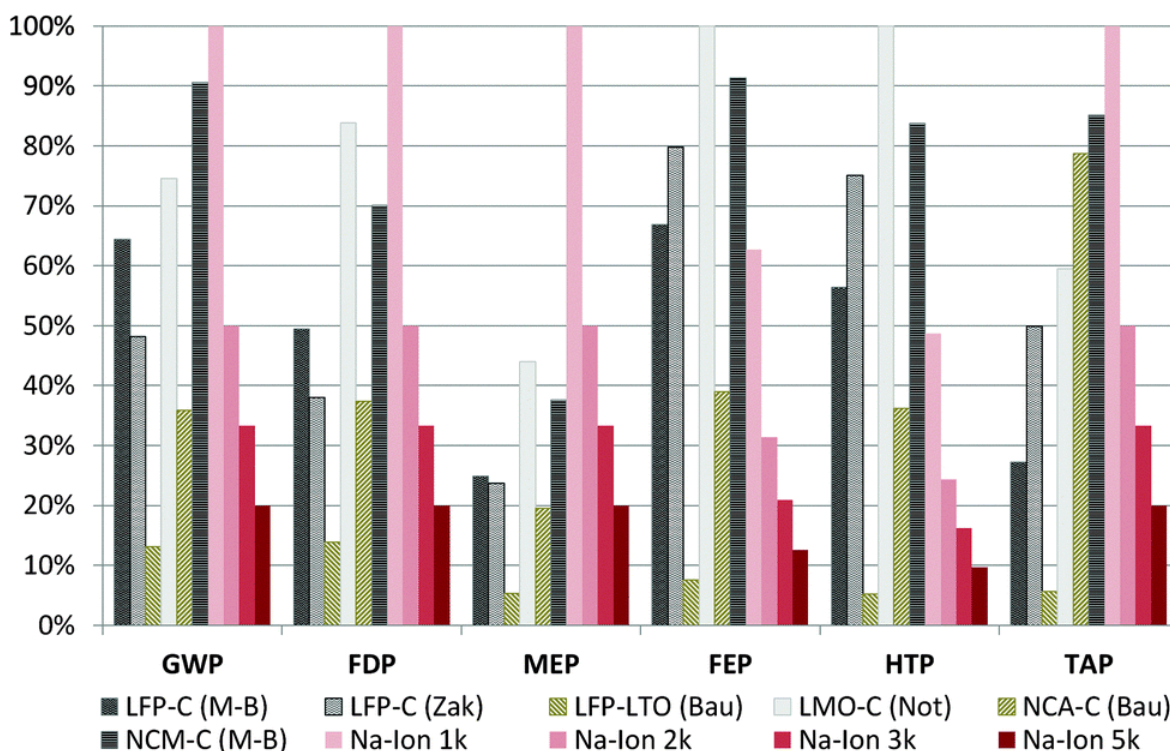
<sup>207</sup> ČERNÁ, Ladislava a etc. Poznámka 205

### 6.3.3. LCA akumulátoru

Určit přesný dopad na životní prostředí způsobený celým průběhem života akumulátoru je velmi těžká záležitost, především kvůli nedostatku údajů a zanedbání různých vlivů. Jednotlivé enviromentální dopady jsou rozděleny do několika skupin:<sup>208</sup>

- FDP – Potenciální vyčerpání fosilních paliv
- GWP – Potenciální globální oteplování
- TAP – Potenciální acidifikace
- HTP – Potenciální lidská toxicita
- FEP, MEP – Sladkovodní a mořská eutrofizace
- MEP – Potenciál vyčerpání kovů

Enviromentální dopad se vztahuje na 1 kWh uložené energie pro danou technologii. Relativní dopad z výše zmíněných hledisek jednotlivých technologií lze pozorovat viz obrázek 75.



Obrázek 75 – Relativní enviromentální dopad technologií akumulátoru na kWh<sup>209</sup>

LTO technologie nemůže svou energetickou hustotou konkurovat NCA nebo LCO technologiím, nicméně neobsahují kobalt, který doprovází velmi neekologická masová těžba v méně rozvinutých zemích. Navíc LTO technologie disponuje vysokým počtem cyklů nabití a vybití, což samozřejmě celkový enviromentální dopad snižuje.

<sup>208</sup> PETERS, Jens F. a etc. Life cycle assessment of sodium-ion batteries. Energy & Environmental Science [online]. 2016, , 1-9 [cit. 2019-12-04]. DOI: 10.1039/C6EE00640J. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c6ee00640j#1divAbstract>

<sup>209</sup> PETERS, Jens F. a etc. Poznámka 208

## 7. Závěr

Tato práce shrnuje základní stávající technologie ostrovních solárních systémů. Rozebírá jednotlivé základní části systému a analyzuje jejich principy činnosti, provozní stavy a jejich kompatibilitu v současném prostředí. V závěru této práce je shrnutí výstupů, posouzení obsahu v závislosti na zadání a pojednání o celkovém navrženém systému, která tato práce nabízí.

Z počátku je rozebrán solární panel, jeho princip výroby elektřiny a dostupné technologie na trhu. Praxe ukazuje, že očekávaný průběh nahrazení článků první generace články druhé a třetí generace nenastal. Je to především z ekonomického důvodu, neboť objemové materiály tvořené především křemíkem dokázali zvýšit svou účinnost, a přitom výrazně snížit svou cenu, přestože přesně takový vývoj byl očekávaný od tenkovrstvých článků. V současné době tvoří objemové materiály okolo 95 % ze všech reálných aplikací na trhu, avšak technologie tenkých vrstev a nanotechnologie se jeví jako materiály budoucnosti. Především jejich nízké energetické náklady při výrobě a možnost tvarování do jakéhokoliv tvaru dává zcela nový rozměr při aplikaci v běžném prostředí. Navíc vzniká možnost lepší kombinace s architektonickým a designovým řešením nových projektů, které jsou lépe environmentálně vnímané. Technologie termických panelů není probrána, neboť z hlediska využití pro veřejné osvětlení nemá tato inovace žádný smysl.

Dále jsou rozebrány základní parametry panelu, princip jeho zapojení a okolní vlivy, které působí na jeho výrobu. Tím jsou myšleny především efekty zastínění, vliv teploty, a zejména sklon a orientace. Přitom sklon a orientace hraje zásadní roli při dimenzování a výpočtu energetické bilance samotného systému. Základní parametry panelu je třeba správně pochopit před samotným navrhováním, protože parametry, které poskytuje výrobce jsou uvedeny pouze při určitých podmínkách, reálné výstupy z panelu mohou být zcela jiné.

Práce dále obsahuje pojednání o technologiích ukládání energie, vysvětlení jejich principů a popis jejich výhod a nevýhod. Dále jsou obsaženy základní provozní stavy, způsoby nabíjení a vybíjení a podmínky, ve kterých se dají systémy provozovat. V kapitole jsou zahrnuty i některé moderní způsoby, které nabízejí nové možnosti v technologiích akumulace. V praxi pro trh s fotovoltaickou akumulací je již většina olověné technologie nahrazena lithiovou, která přináší mnohé výhody a nevýhody. Vývoj ukládání jde rychle dopředu a při hledání nových technologií cílí inovace na použití lehce dostupných materiálů při zachování energetické hustoty jako lithiový konkurent. Navíc je při současném evropském vývoji na poli elektro-automobilového průmyslu kladen důraz také na vysoký počet cyklů a nízký vnitřní odpor pro tzv. "rychlónabíjení".

V další části jsou probrány jednotlivé principy stejnosměrných měničů a střídačů. Jsou rozebrány jejich struktury, schémata a základní výhody a nevýhody komplexních řešení. Jsou nastíněny základní matematické rovnice, které osvětlují princip činnosti různorodých topologií. Kapitola také obsahuje základy algoritmů při hledání MPP a opět zhodnocuje výhody a nevýhody jednotlivých struktur. Jsou tak osvětleny způsoby, jak se dá pracovat se stejnosměrným nebo střídavým napětím a díky tomu lze pochopit co obnáší jednotlivé technologie. Střídače jsou zahrnuty především z důvodu široké nabídky veřejného osvětlení na střídavý síťový proud. Střídač je nicméně drahé a málo životné zařízení, proto byla snaha se střídavému napětí v samotném návrhu vyhnout. Většina nových regulátorů považuje MPPT logiku za standart, lze ještě nalézt starší měniče s PWM logikou, nicméně tato technologie již v moderní době nemá smysl.

Dále pak následuje samotný návrh, který je založen na energetické analýze lokace, která byla vybrána tak, aby byla v ČR a zároveň v horské oblasti. Analýza energetického potenciálu je

vyobrazena jak graficky, tak číselně. Z hodnot dopadené energie byly nalezeny nejméně energeticky výnosné měsíce z dostupné databáze od roku 1985 až 2019. Mezi tyto měsíce patří leden, únor, listopad a prosinec. Nejméně dopadené energie připadá na prosinec, to však neznamená, že je to jistě návrhový měsíc pro systém, neboť v jiném měsíci může být hodnota vyrobené energie panelem menší, proto při výpočtech bylo dále počítáno pořád se všemi 4 měsíci. Pro zjednodušení je pak vypočtena střední hodnota sklonu slunečního svitu a na základě optimální výtěžnosti je zvolen sklon panelu 20°. Po korekci dat je již poté podle vybraného panelu vypočtena hodnota vyrobené energie, přičemž prosinec je nakonec opravdu návrhový měsíc a podle něho je následně celý systém sestaven. Použitý akumulátor byl nakonec sestaven z jednotlivých LTO článků v paralelně sériovém zapojení a ty vyžadují BMS pro správnou funkci. Systém je navržen na celoroční provoz pro práci v horských oblastech, výběr komponent se tak snažil cílit na více klimaticky odolná zařízení. Každá část podkapitoly obsahuje technické informace o daném komponentu systému, výpočet, podle kterého byla daná součástka vybrána a základní informace o provozu daného produktu.

V poslední části je pak zhodnocení samotného systému z ekonomického, energetického a environmentálního hlediska. Kapitola shrnuje navržený systém, vyzdvihuje jeho výhody a nevýhody. Ekonomická analýza zahrnuje pouze cenu komponent a základních prvků systému, není tak započtena cena práce, konstrukce apod. Vzhledem k faktu, že navržený systém není určen pro konkrétní lokaci, je provedeno srovnání s myšlenkovým systémem, který má možnost připojení sítě přímo v místě instalace, je tak samozřejmé, že výsledkem jsou ohromně nevýhodná čísla v porovnání s takovou možností. Environmentální zhodnocení obsahuje spíše obecně stručné vlivy, které systém provázejí. Popisují se zde kritéria, která definují některé základní dopady v průběhu života systému, nicméně podrobná precizní stopa zanechaná navrženým systémem chybí kvůli nedostatku dat a konkrétní specifikace daného návrhu.

## Seznam použité literatury a pramenů:

### Knižní zdroje (řazeno abecedně)

- [1] CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.
- [2] FEMIA, Nicola a etc. Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2013]. ISBN 9781466506909.
- [3] HANKINS, Mark. Stand-alone solar electric systems: the Earthscan expert handbook for planning, design, and installation. Washington, DC: Earthscan, 2010. ISBN 9781844077137
- [4] LETCHER, Trevor M. a Vasilis M. FTHENAKIS. A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems: With Special Focus on Photovoltaic Systems [online]. Academic Press, 2018 [cit. 2019-06-08]. ISBN 9780128114803. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=tU84DwAAQBAJ&pg=PA169&lpg=PA169&dq=q uasier+shockley+limit&source=bl&ots=7i8ZFjFN2Z&sig=ACfU3U110kMOvc-bmCwCiN9d\\_K1ji9S7Pw&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwja96iI0dfiAhWEzaQKHWjNDGcQ6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q=quasier%20shockley%20limit&f=false](https://books.google.cz/books?id=tU84DwAAQBAJ&pg=PA169&lpg=PA169&dq=q uasier+shockley+limit&source=bl&ots=7i8ZFjFN2Z&sig=ACfU3U110kMOvc-bmCwCiN9d_K1ji9S7Pw&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwja96iI0dfiAhWEzaQKHWjNDGcQ6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q=quasier%20shockley%20limit&f=false)
- [5] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [6] MERTENS, Konrad. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*. United Kingdom (West Sussex): John Wiley, 2014. ISBN 9781118634165.

### Internetové zdroje (řazeno abecedně):

- [1] A Guide to Flyback Transformers. In: COILCRAFT. Coilcraft [online]. 2019 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: [https://www.coilcraft.com/edu/flyback\\_transformer.cfm](https://www.coilcraft.com/edu/flyback_transformer.cfm)
- [2] AGAFONKIN, Vladimir. Suncalc [online]. 2018 [cit. 2019-09-08]. Dostupné z: <https://www.suncalc.org>
- [3] BABA, David. Isolated Supply Overview and Design Trade-Offs. TEXAS INSTRUMENTS. Power designers: Expert tips, tricks, and techniques for powerful designs [online]. (124), 1-9 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snva603/snva603.pdf>
- [4] BAHARUDIN, Nor Hanisah et al. Topologies of DC-DC Converter in Solar PV Applications [online]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Malaysia: Institute of Advanced Engineering and Science., 2017, s. 368-374 [cit. 2019-07-15]. DOI: 10.11591/ijeecs.v8.i2.pp368-374. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/de17/076d79013600eefcc9ac44da81ab18451f22.pdf>
- [5] BAIMEL, Dmitry a etc. Improved Fractional Open Circuit Voltage MPPT Methods for PV Systems. Electronics [online]. 2019, 8(231), 1-20 [cit. 2019-07-22]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/journal/electronics>
- [6] BAREŠ, Michal. ČESKÁ ASTRONOMICKÁ SPOLEČNOST A ODBORNÁ SKUPINA PRO SVĚTELNÉ ZNEČIŠTĚNÍ. Jednoduchá osvětlovací příručka pro obce: Doporučení pro šetrné moderní osvětlování [online]. Ministerstvo životního

- prostředí a Svaz měst a obcí České republiky, 2017 [cit. 2019-08-20]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne\\_znecistení/\\$FILE/SOPS-jednoducha\\_osvelovaci\\_prirucka\\_pro\\_obce-20180122.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne_znecistení/$FILE/SOPS-jednoducha_osvelovaci_prirucka_pro_obce-20180122.pdf)
- [7] BECHNÍK, Bronislav. Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů. In: Oze.tzb-info [online]. 2017 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [8] BECHNIK, Bronislav. Stručná historie fotovoltaiky. tzb-info [online], 1.9.2014 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [9] BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. Fotovoltaické systémy [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10537342-Fotovoltaicke-systemy.html?fbclid=IwAR13ry5pslX3FOT-XYhAiw0Pq73w2mqtwtSPaukzDI-f-KQgQukTLEFCgzA>. Učební text k semináři. VUT.
- [10] BENDA, Vítězslav. Fotovoltaické články – historie a současné trendy vývoje. TZB HAUSTECHNIK [online]. 2010 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-asoucasne-trendy-vyvoje>
- [11] BENDIB, B. a etc. Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system. THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. Energy Procedia [online]. 2014, , 383-392 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214007826>
- [12] BETTEN, John. Synchronous Zeta Converter Outperforms The SEPIC. TEXAS INSTRUMENTS. HOW2POWER [online]. 2014, , 1-7 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: [http://www.how2power.com/pdf\\_view.php?url=/newsletters/1405/articles/H2PToday1405\\_design\\_Texas%20Instruments.pdf](http://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1405/articles/H2PToday1405_design_Texas%20Instruments.pdf)
- [13] BHAVIN, Trivedi a etc. Analysis of SEPIC Converter. GDEC COLLEGE. IJEDR [online]. 2018, 6(2), 489-494 [cit. 2019-07-25]. ISSN 2321-9939. Dostupné z: <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1802085.pdf>
- [14] Bloomberg Tier 1 Solar Panels List 2019. Renvu [online]. 2018 [cit. 2019-09-11]. Dostupné z: <https://www.renvu.com/Learn/Bloomberg-Tier-1-Solar-Panels-List-2019>
- [15] BOUSELHAM, Loubna a etc. A new MPPT-based ANN for photovoltaic system under partial shading conditions. ScienceDirect [online]. 2017, (111), 924-933 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217302886>
- [16] Buck Boost Converter. ELECTRICAL4U. Electrical4U [online]. 2018 [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/buck-boost-converter/>
- [17] BUCHMAN, Isidor. BU-205: Types of Lithium-ion. Battery university [online]. 2018 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
- [18] BULUT, Enis Baris a Korhan CENGİZ. DETERMINATION THE EFFECTS OF DUTY CYCLE AND SWITCHING FREQUENCY ON EFFICIENCY OF BOOST

- CONVERTER FOR FIXED LOAD APPLICATIONS. EPSTEM [online]. 2017, (1), 69-75 [cit. 2019-08-04]. ISSN 2602-3199. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/379914>
- [19] BULUT, Enis Baris a Korhan CENGIZ. TRAKYA UNIVERSITY. ICONTES2017: International Conference on Technology, Engineering and Science: DETERMINATION THE EFFECTS OF DUTY CYCLE AND SWITCHING FREQUENCY ON EFFICIENCY OF BOOST CONVERTER FOR FIXED LOAD APPLICATIONS [online]. ISRES, 2017, s. 69-75 [cit. 2019-07-17]. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/379914>
- [20] Bypass Diodes & Blocking Diodes in Solar Panels [online]. 2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.altestore.com/blog/2016/09/bypass-diodes-blocking-diodes-solar-panels/#.XA07wGhKiUk>
- [21] CIHLÁŘ, Jan. Investice do decentrálních zdrojů energie – 1. díl: Fotovoltaická elektrárna. O Energetice [online]. 2015 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/urady-institute/investice-do-decentralnich-zdroju-energie-1-dil-fotovoltaicka-elektrarna>
- [22] Circuit Design Guide for DC/DC Converters: What is DC/DC Converter?. TOREX. TOREXSEMI [online]. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.torexsemi.com/technical-support/application-note/design-guide-for-dcdc-converter/whats-dcdc-converters/>
- [23] ČAMBALA, Petr a etc. Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: [https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107\\_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf](https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf). Oponentura. EGÚ Brno, a. s.
- [24] ČERNÁ, Ladislava a etc. EKONOMICKÁ BILANCE VÝROBY A LIKVIDACE FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ INSTALOVANÝCH V ČR: Vypracováno pro REsolar s.r.o [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: [https://www.solarniasociace.cz/tmp/studie\\_cvut\\_bilance\\_solarni\\_panely.pdf](https://www.solarniasociace.cz/tmp/studie_cvut_bilance_solarni_panely.pdf). ČVUT.
- [25] ČÍŽEK, Bohuslav. Diskontní sazba (Discount rate). Středoevropské centrum pro finance management [online]. 2012 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <http://www.finance-management.cz/080vypisPojmu.php?IdPojPass=116>
- [26] DC-DC měnič CN5139. Hezký den [online]. 2019 [cit. 2019-10-07]. Dostupné z: <http://www.hezkyden.cz/shop/dc-dc-menic-cn5139/>
- [27] DENG, Qi. Comparing regulated charge-pump and inductor-based DC/DC converters. In: MICROCHIP TECHNOLOGY. Eetimes [online]. 2006 [cit. 2019-07-26]. Dostupné z: [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1273125](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273125)
- [28] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. Lanning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers [online]. 3rd. Abingdon: Routledge, 2013 [cit. 2019-07-09]. ISBN 978-1-84971-343-6. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=AWIqAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>



- [29] DF ELECTRIC 485114. Tme [online]. 2019 [cit. 2019-10-06]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/pmx10x38-1i-24/pojistkova-pouzdra-na-listu-din/df-electric/485114/>
- [30] DIKER, A. a etc. Design and Implementation of A Single-Stage Full-Bridge DC/DC Converter with ZVS Mode. Mechatronics [online]. 2013, , 347-348 [cit. 2019-08-04]. DOI: 10.1007/978-3-319-02294-9\_44. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-02294-9\\_44](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-02294-9_44)
- [31] Domestic and industrial automation. In: Fif [online]. Pabianice, 2019 [cit. 2019-09-20]. Dostupné z: <https://www.fif.com.pl/en/light-dependent-relays/685-light-dependent-relay-azh-12-v-123456789011.html>
- [32] DUBEY, Swapnil, Jatin Narotam SARVAIYA a Bharath SESHADRI. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World. Energy Procedia [online]. Singapore, 2012, 2013(33), 311-321 [cit. 2019-09-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213000829>
- [33] Dvoupólový pojistný odpínač do 32A. SVP SOLAR. Solar-eshop [online]. Praha 4, 2019 [cit. 2019-10-06]. Dostupné z: <https://www.solar-eshop.cz/p/dvoupolovy-pojistny-odpinac-do-32a/>
- [34] Evaluating Commercial Solar ROI, Payback, IRR, and NPV. REC SOLAR COMMERCIAL CORPORATION. REC Solar [online]. 2018 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://recsolar.com/blogs/evaluating-commercial-solar-payback-roi-npv-and-irr/>
- [35] FARANDA, Robert a SONIA LEVA. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. WSEAS Transactions on Power Systems [online]. 2008, 6(3), 446-455 [cit. 2019-07-22]. ISSN 1790-5060. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/a535/786eaceec7333e1e2c1325a538c4a2b1265b.pdf>
- [36] Fotovoltaický jev, fotovoltaické články a jejich charakteristiky. In: Slideplayer [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3370736/>
- [37] Galileo Corporation s.r.o. Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny. CNE [online]. 21.10.2018 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [38] HAMMERBAUER, Jiří. Akumulátory NiFe a NiCd [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: [http://www.malavoda.cz/akum\\_nife\\_nicd.pdf](http://www.malavoda.cz/akum_nife_nicd.pdf). Západočeská univerzita v Plzni.
- [39] HAMMERBAUER, Jiří. Olověné akumulátory. Jergym [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>
- [40] Hlavní výhody amorfních (CIS) fotovoltaických panelů. In: Solární novinky [online]. 2010 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/index.php?rs=4&rl=2010012003&rm=15:29>
- [41] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Atmospheric Effects. In: Pveducation [online]. 2019 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/atmospheric-effects>

- [42] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Atmospheric Effects. In: Pveducation [online]. 2019 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/basic-battery-operation>
- [43] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Atmospheric Effects. In: Pveducation [online]. 2019 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/battery-characteristics>
- [44] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. Nominal Operating Cell Temperature. PV EDUCATION [online]. 2019 [cit. 2019-09-15]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/nominal-operating-cell-temperature>
- [45] HRZINA, Pavel. Fotovoltaický článek [online]. 2017 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/59449/mod\\_resource/content/1/EZF2-b.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/59449/mod_resource/content/1/EZF2-b.pdf). Prezentace. ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [46] HUGO. Buck (step down) converter/regulator. OnMyPhD [online]. University of Porto [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <http://www.onmyphd.com/?p=voltage.regulators.buck.step.down.converter>
- [47] CHROBÁK, Pavel. Alternativní zdroje energie, solární energie. Posterus [online]. 2012, 5(12), 1-6 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=14223&output=pdf>
- [48] Jaký je rozdíl mezi monokrystalickým a polykrystalickým panelem? Joyce-energie [online]. Brno: JOYCE ČR [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: [https://www.joyce-energie.cz/files/joyce-energie.cz/files/Mono\\_poly\\_rozdl.pdf](https://www.joyce-energie.cz/files/joyce-energie.cz/files/Mono_poly_rozdl.pdf)
- [49] KUMAR, J. Surya a Ch. Sai BABU. COMPARISON OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHMS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM. International Journal of Advances in Engineering & Technology [online]. 2011, 1(5), 133-148 [cit. 2019-07-22]. ISSN 2231-1963. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9739/dc880d63cb90a57f023e07d4b67dc45da7ce.pdf>
- [50] KUSALA, Jaroslav. Fotovoltaický jev. CEZ [online]. 2006 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>
- [51] KUSALA, Jaroslav. Solární (fotovoltaické) články. CEZ [online]. 2006 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [52] KUSALA, Jaroslav. Solární (fotovoltaické) články. CEZ [online]. 2006 [cit. 2018-10-21]. Obrázek ve formátu GIF. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [53] Lto Yinlong 2,3V / 30Ah. FOTOVOLTAIK SLUNEČNÍ ENERGIE POR KAŽDÉHO. Fotovoltaik [online]. [cit. 2019-09-26]. Dostupné z: <https://www.fotovoltaik.cz/Lto-Yinlong-2-3V-30Ah-d79.htm?tab=download#anch1>
- [54] MACAULAY, John a Zhongfu ZHOU. A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System. Energies [online]. Swansea, 2018, 11(6), 1-15 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1340/htm>
- [55] MALEČKOVÁ, Veronika a etc. METODA DOBY NÁVRATNOSTI INVESTICE: ČASTO VYUŽÍVANÁ METODA ANALÝZY BÁŇSKÝCH INVESTIC.

- Geologie.vsb [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z:  
[http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5\\_teorie.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5_teorie.html)
- [56] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro* [online]. 2011, 2011(2), 6-10 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>
- [57] MARUT S. *Elektro Lumen* [online]. [cit. 2019-10-09]. Dostupné z: <http://el-lumen.cz/produkty/svitidlo-marut-s/>
- [58] MAYER, Daniel. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2016, (1), 6-10 [cit. 2019-06-18]. Dostupné z:  
[http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/01/Elektro\\_01\\_2016/#p=7](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/01/Elektro_01_2016/#p=7)
- [59] MCGRATH, Matt. Organic solar cells set 'remarkable' energy record. *BBC* [online]. 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/science-environment-45132427>
- [60] MCGRATH, Matt. Organic solar cells set 'remarkable' energy record. In: *BBC* [online]. 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/science-environment-45132427>
- [61] MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články. *O energetice* [online]. 2017 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z:  
<http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky/>
- [62] MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články. In: *O Energetice* [online]. 2017 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z:  
<http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky/>
- [63] MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články. *O ENERGETICE* [online]. 2017 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z:  
<http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky/>
- [64] MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaický jev a parametry fotovoltaického článku. *O energetice* [online]. 2017 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z:  
<http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicky-jev-parametry-fotovoltaickeho-clanku/>
- [65] MOTLÍK, Jan et al. *OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE a možnosti jejich uplatnění v České republice* [online]. Praha: ČEZ, 2007 [cit. 2018-10-27]. ISBN 978-80-239-8823-9. Dostupné z:  
[https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne\\_zdoje\\_energie\\_a\\_moznosti\\_jejich\\_vyuziti\\_pro\\_cr.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf)
- [66] MUŠÁLKOVÁ, Ilona a Jiří KOTAS. Standardy pro zařízení veřejného osvětlení: ČEZ Energetické služby, s.r.o [online]. ČEZ. 2018 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z:  
[https://www.cez.cz/edee/content/file-other/cezes/nase-sluzby/verejne-osvetleni/standardy-vo\\_cez-energeticke-sluzby\\_final.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file-other/cezes/nase-sluzby/verejne-osvetleni/standardy-vo_cez-energeticke-sluzby_final.pdf)
- [67] NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources [online]. [cit. 2019-09-06]. Dostupné z: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

- [68] NOVÁK, Jaroslav, Ondřej SADÍLEK a Petr SÝKORA. Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu (1. část). *Elektro* [online]. 2016, (11), 8-12 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/11/Elektro\\_11\\_2016/index.html#p=11](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/11/Elektro_11_2016/index.html#p=11)
- [69] OEZ Pojistka válcová 32A PV10-GG 400V. ELFETEX. Elfetex elektronický velkoobchod [online]. 2019 [cit. 2019-10-06]. Dostupné z: <https://eshop.elfetex.cz/10-081-650-oez-pojistka-valcova-4a-pva10-gg>
- [70] PETERS, Jens F. a etc. Life cycle assessment of sodium-ion batteries. *Energy & Environmental Science* [online]. 2016, , 1-9 [cit. 2019-12-04]. DOI: 10.1039/C6EE00640J. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c6ee00640j#!divAbstract>
- [71] PETR TYL, Jan. Hodnocení přínosů zateplení 2: doba návratnosti. *Projekty-inkapo* [online]. 2016 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.projekty-inkapo.cz/doba-navratnosti/>
- [72] Photovoltaic (PV) balance of system components: Basics, performance. PEARSALL, Nicola. *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems* [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017, s. 135-181 [cit. 2019-07-08]. ISBN 978-1-78242-336-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/inverter-efficiency>
- [73] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Fotovoltaické panely nové generace. *Energie kolem nás* [online]. 2017 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://ekn.cz/fotovoltaicke-panely-nove-generace/>
- [74] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Fotovoltaické panely nové generace. In: *Ekn* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <http://ekn.cz/fotovoltaicke-panely-nove-generace/>
- [75] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků. *ELEKTRO* [online]. 2010(3), 6-9 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>
- [76] Protection circuit Module 80A. In: *Deligreen alibaba* [online]. 2019 [cit. 2019-09-27]. Dostupné z: [https://deligreen.en.alibaba.com/product/60824631339-0/5S\\_10S\\_15S\\_20S\\_25S\\_30S\\_35S\\_PCM\\_PCB\\_Protection\\_circuit\\_Module\\_80A\\_100A\\_200A\\_Lto\\_Lithium\\_Titanate\\_bms\\_Customized.html?spm=a2700.icbuShop.41413.9.2388548bYhvpVf](https://deligreen.en.alibaba.com/product/60824631339-0/5S_10S_15S_20S_25S_30S_35S_PCM_PCB_Protection_circuit_Module_80A_100A_200A_Lto_Lithium_Titanate_bms_Customized.html?spm=a2700.icbuShop.41413.9.2388548bYhvpVf)
- [77] Scientists Design Solar Cell that Captures Nearly All Energy of Solar Spectrum. *Media relations* [online]. 2017, 1 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <https://mediarelations.gwu.edu/scientists-design-solar-cell-captures-nearly-all-energy-solar-spectrum>
- [78] Sérioparalelní spojení (článků nebo baterií). In: *BATTEX*. *Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. 2019 [cit. 2019-09-26]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/s%C3%A9rioparaleln%C3%AD+spojen%C3%AD+%28%C4%8D1%C3%A1nk%C5%AF+nebo+bateri%C3%AD%29>

- [79] Solární panel Canadian Solar 275Wp POLY: Datasheet Canadian solar CS6K-P. IFTECH S.R.O. IFTECH [online]. 2015 [cit. 2019-09-17]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/solarni-panely/798-solarni-panel-canadian-solar-275wp-poly.html>
- [80] SRDEČNÝ, Karel. Fotovoltaika v budovách: dosavadní zkušenosti pro budoucí rozvoj [online]. 2009. Praha: EkoWATT, 2009 [cit. 2018-11-26]. ISBN 978-80-87333-04-4. Dostupné z: [http://www.projektympz.cz/data/prilohy/2009/247/247\\_09\\_brozura.pdf](http://www.projektympz.cz/data/prilohy/2009/247/247_09_brozura.pdf)
- [81] SRDEČNÝ, Karel. In: Fotovoltaika v budovách: dosavadní zkušenosti pro budoucí rozvoj [online]. 2009. Praha: EkoWATT, 2009 [cit. 2018-11-26]. ISBN 978-80-87333-04-4. Dostupné z: [http://www.projektympz.cz/data/prilohy/2009/247/247\\_09\\_brozura.pdf](http://www.projektympz.cz/data/prilohy/2009/247/247_09_brozura.pdf)
- [82] Svodič přepětí Citel DS240S 75V DC. Ecoproduct [online]. 2019 [cit. 2019-10-04]. Dostupné z: <https://www.ecoproduct.cz/solarni.panely/dc.jisteni/dc.prepetove.ochrany/svodice.prepeti.citel.ds240s.75v.dc>
- [83] ŠAFAŘÍK, Miroslav a etc. PORSENNA O.P.S. Jak na chytré veřejné osvětlení?: Příručka pro města a obce [online]. Ministerstvo životního prostředí, 2017, 68 s. [cit. 2019-08-20]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne\\_znecisteni/\\$FILE/NNO\\_Prirucka\\_obce\\_20180911.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne_znecisteni/$FILE/NNO_Prirucka_obce_20180911.pdf)
- [84] ŠRUBAŘOVÁ, Petra. Jak funguje olovený akumulátor?. Tzbinfo [online]. 2017 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [85] TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory. Tzbinfo [online]. 2015 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [86] TRENDS 2018 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2017. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme [online]. IEA PVPS, 2018 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=92>
- [87] VLASAKOVA, Zuzana. Olovené automobilové akumulátory. Zvlasak [online]. 2002 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: [http://www.zvlasak.net/baterie\\_s.pdf](http://www.zvlasak.net/baterie_s.pdf)
- [88] WEITER, Martin. Vývoj a aplikace organických fotovoltaických systémů. Chempoint [online]. 2011 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/weiter1>
- [89] WOLF, Petr. Předpověď výroby fotovoltaických systémů. OZE [online]. ČVUT UCEEB, 2017 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/15928-predpoved-vyroby-fotovoltaickych-systemu>
- [90] ZIKMUND, Martin. Hodnocení investic: Vnitřní výnosové procento (IRR). BusinessVize [online]. 2010 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/hodnoceni-investic-vnitri-vynosove-procento-irr>

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 – Složení solárního pole .....  | 2  |
| Obrázek 2 – Sluneční spektrum AM 1.5 na povrchu země .....  | 3  |
| Obrázek 3 – Neozářený P-N přechod .....   | 5  |
| Obrázek 4 – Ozářený P-N přechod, rozdíl $eU_p$ ukazuje vychýlení hladin.....  | 6  |
| Obrázek 5 – Jednoduchá konstrukce solárního článku.....   | 7  |
| Obrázek 6 – Závislost maximální možné účinnosti materiálů na energii záření.....  | 7  |
| Obrázek 7 – Provedení monokrystalického a polykrystalického článku.....   | 8  |
| Obrázek 8 – Struktura křemíkového článku .....  | 9  |
| Obrázek 9 – Konstrukce PV modulu .....  | 10 |
| Obrázek 10 – Typy struktur tenkovrstvých článků na různých polovodičích.....  | 11 |
| Obrázek 11 – Oboustranný solární panel s pohyblivým automatickým stojanem a koncentrátorem záření .....   | 13 |
| Obrázek 12 – Organický solární modul se šesti články.....   | 13 |
| Obrázek 13 – Voltampérová charakteristika článku při různých podmínkách a maximální výkon .....   | 14 |
| Obrázek 14 – Náhradní dvou diodové schéma fotovoltaického článku .....  | 16 |
| Obrázek 15 – Voltampérová charakteristika dvou článků v sérii při odlišných podmínkách bez překlenovacích diod .....  | 17 |
| Obrázek 16 – Princip přemostění proudu pomocí překlenovacích diod při zastínění jednoho článku .....  | 18 |
| Obrázek 17 – Voltampérová charakteristika dvou článků v sérii při odlišných podmínkách s překlenovacími diodami.....  | 18 |
| Obrázek 18 – Prostup záření skrz atmosféru při čisté obloze vlevo, zobrazení dopadových úhlu na destičku v bočním řezu uprostřed, dopadový úhel seshora vpravo .....  | 19 |
| Obrázek 19 – Roční úhrn solární energie dopadající na jednotkovou plochu ve směru normály povrchu [ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ ].....         | 20 |
| Obrázek 20 – Pohyb slunce na $50^\circ$ severní šířky .....   | 21 |
| Obrázek 21 – Přibližná orientace a sklon panelu pro maximální výnos energie v ČR .....  | 22 |
| Obrázek 22 – Proces nabíjení olověného akumulátoru .....  | 26 |
| Obrázek 23 – Uzavřený plynotěsný deskový akumulátor .....   | 27 |
| Obrázek 24 – Obecné nabíjecí (křivka 1 a 2) a vybíjecí (křivka 3 a 4) křivky pro NiCd a NiFe akumulátor .....   | 29 |
| Obrázek 25 – Projev napěťové deprese v důsledku dlouhodobého přebíjení .....  | 30 |
| Obrázek 26 – Konstrukční uspořádání lithiového článku .....   | 32 |
| Obrázek 27 – Princip superkondenzátoru vlevo, 1 – elektrody, 2 – porézní vodivé prostředí a elektrolyt, 3 – separátor. Náhradní schéma superkondenzátoru vpravo. .... | 34 |
| Obrázek 28 – Blokové schéma typů měničů .....   | 36 |
| Obrázek 29 – Schéma zapojení solárního panelu přímo na odporovou zátěž bez akumulace vlevo, VA charakteristika při různých ozáření vpravo.....                        | 37 |
| Obrázek 30 – Základní schéma měniče jednoduchého měniče vlevo, časový průběh na zátěži vpravo .....   | 38 |
| Obrázek 31 – Schéma základního Step-Down měniče s výstupním filtrem vlevo, časový průběh na zátěži vpravo.....  | 40 |
| Obrázek 32 – Schéma základního Step-Up měniče vlevo, časové průběhy vpravo.....   | 43 |
| Obrázek 33 – Schéma základního Step-Up+Down měniče vlevo, časový průběh proudu na cívce vpravo.....   | 45 |
| Obrázek 34 – Schéma SEPIC měniče.....   | 46 |
| Obrázek 35 – Schéma měniče s topologií Zeta .....   | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 36 – Schéma regulované nábojové pumpy, modře přerušovaná čára bez spínače $S_5$ označuje obvod zdvojnásobovací nábojové pumpy .....         | 47 |
| Obrázek 37 – Schéma měniče fly-back transformer vlevo, časové průběhy proudu na primární a sekundární straně pro kontinuální režim vpravo.....      | 49 |
| Obrázek 38 – Schéma měniče forward transformer vlevo, časový průběh proudu na výstupu vpravo .....  | 50 |
| Obrázek 39 – Plně můstkový měnič .....  | 50 |
| Obrázek 40 – Základní schéma MPPT .....   | 51 |
| Obrázek 41 – VA a PV charakteristika vlevo (balancování mezi 3 body), konstantní změny napětí vpravo .....  | 53 |
| Obrázek 42 – Jednotlivé proměnné kroky posunu po VA při metodě Perturb and Observe with Adaptive Step Size .....                                    | 54 |
| Obrázek 43 – Lingvistické proměnné pro vstup a) E, b) $\Delta E$ a c) $\Delta D$ .....  | 56 |
| Obrázek 44 – Struktura neurální sítě .....  | 57 |
| Obrázek 45 – 3 bodová P&O na VA vlevo, výkon v čase vpravo .....  | 58 |
| Obrázek 46 – 4 bodová P&O na VA vlevo, výkon v čase vpravo .....  | 59 |
| Obrázek 47 – Variace zapojení střídačů, a) centrální střídač, b) Řetězový střídač, c) modulový střídač .....  | 60 |
| Obrázek 48 – Rozdělení střídačů podle typu transformace .....   | 60 |
| Obrázek 49 – Blokové schéma bez transformátorového měniče .....   | 61 |
| Obrázek 50 – Blokové schéma střídače s transformátorem na NF.....   | 61 |
| Obrázek 51 – Blokové schéma střídače s transformátorem na VF.....   | 61 |
| Obrázek 52 – Závislost účinnosti $\eta_S$ na vstupním poměrném výkonu ( $P_{DC}$ je aktuální výkon, $P_{DCN}$ je nominální výkon střídače) .....    | 62 |
| Obrázek 53 – VA charakteristiky připojeného panelu. Modře je vyobrazená pracovní oblast střídače a křížky jsou označeny body MPP. ....              | 64 |
| Obrázek 54 – Základní elektrické schéma navrhovaného systému.....   | 65 |
| Obrázek 55 – Vynesené body energie v jednotlivých měsících vlevo .....  | 66 |
| Obrázek 56 – Průměrné roční hodnoty dopadené energie vpravo .....   | 66 |
| Obrázek 57 – Nejmenší průměrné měsíční hodnoty dopadené energie .....   | 67 |
| Obrázek 58 – Pohyb slunce v průběhu dne pro jednotlivé měsíce.....  | 68 |
| Obrázek 59 – Body teplot pro různé měsíce vlevo, body větru vpravo .....  | 69 |
| Obrázek 60 – Roční průměry teplot mezi roky 1985–2019 vlevo, průměry rychlosti větru vpravo .....   | 69 |
| Obrázek 61 – Údaje z měření na goniofotometru poskytnuté výrobcem vlevo, rozměry spotřebiče vpravo.....   | 72 |
| Obrázek 62 – VA charakteristiky panelu CS6K-280P vlevo, vybraný panel vpravo .....  | 75 |
| Obrázek 63 – Body energie v návrhovém prosinci a korigovaný průměr podle panelu .....   | 76 |
| Obrázek 64 – Technický výkres akumulátoru vlevo, vybraný akumulátor veprostřed, paralelně sérové zapojení článků 2P6S vpravo .....                  | 77 |
| Obrázek 65 – Zapojení BMS na články a regulátor vlevo, vzhled BMS vpravo .....  | 78 |
| Obrázek 66 – Schéma zapojení soumrakového spínače AZH 106 12V vlevo, soumrakový spínač vpravo.....  | 79 |
| Obrázek 67 – Step-Up měnič TS-IPS-V03 .....   | 79 |
| Obrázek 68 – Závislost účinnosti regulátoru na nabíjecím výkonu při dvou hodnotách napětí vlevo, samotný regulátor vpravo .....                     | 80 |
| Obrázek 69 – Dvoupólový pojistný odpínač vlevo, svodič přepětí veprostřed vlevo, pojistka OEZ 32A veprostřed vpravo, držák na pojistku vpravo ..... | 81 |
| Obrázek 70 – Schéma propojení článků vlevo, propojky LTO článků vpravo .....  | 82 |
| Obrázek 71 – Přehledové schéma navrhnutého systému s kabeláží.....  | 84 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 72 – Podíl výkonových ztrát jednotlivých komponent z očekávaných výkonových ztrát ..... | 85 |
| Obrázek 73 – Průměry dopadené energie pod úhlem $\delta_p = 0$ a vyrobená energie panelem .     | 86 |
| Obrázek 74 – Kruhový diagram podílu ceny jednotlivých komponent navrženého systému .....        | 88 |
| Obrázek 75 – Relativní enviromentální dopad technologií akumulátoru na kWh .....                | 95 |



## Seznam tabulek

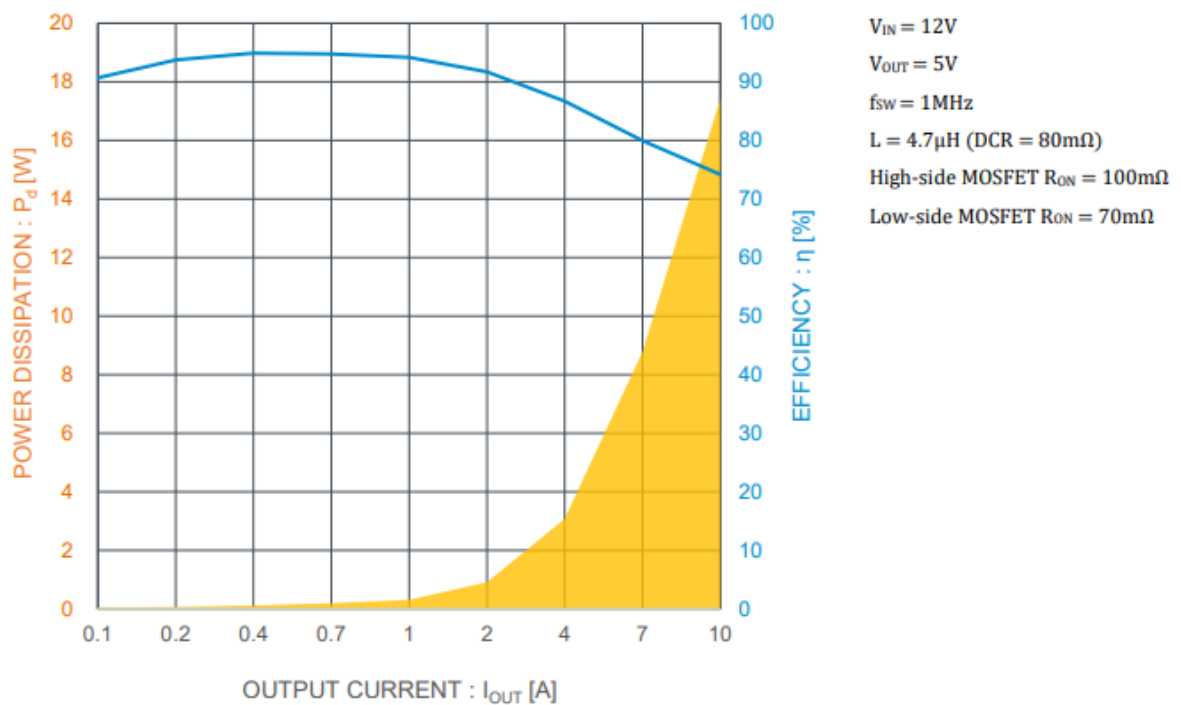
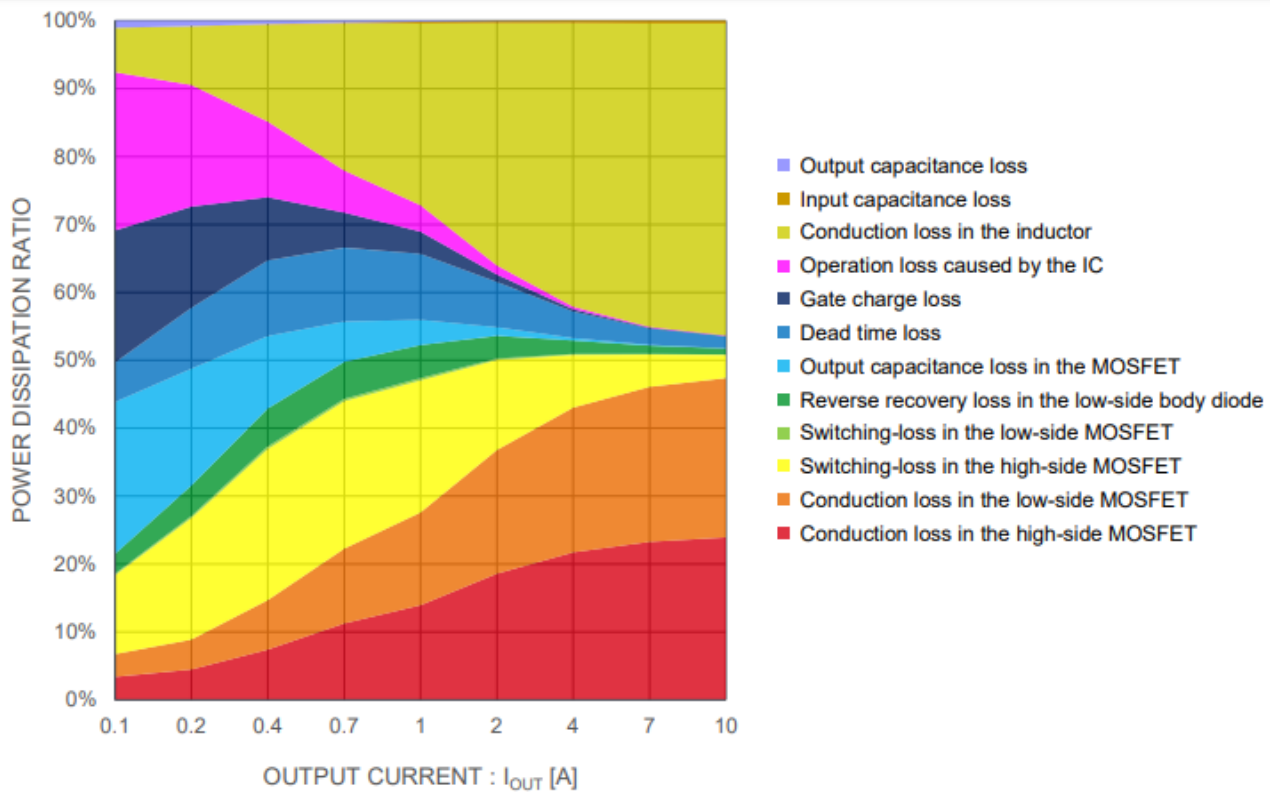
|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 – Typy obvodů DC/DC měničů a jejich vlastnosti.....   | 38 |
| Tabulka 2 – Pravdivostní tabulky fuzzy logiky, intenzity barvy rozlišují velikosti vstupních proměnných .....                           | 57 |
| Tabulka 3 – Nejmenší průměrné měsíční hodnoty dopadené energie na plochu .....  | 67 |
| Tabulka 4 – Střední hodnoty sklonu slunce pro určité měsíce .....   | 67 |
| Tabulka 5 – Hodnoty dopadené energie za den pro kritické měsíce na plochu se sklonem 20° .....  | 69 |
| Tabulka 6 – Minimální hodnoty teploty pro určité měsíce .....   | 69 |
| Tabulka 7 – Maximální hodnoty teploty pro určité měsíce.....  | 70 |
| Tabulka 8 – Doporučené parametry od Ministerstva životního prostředí.....   | 71 |
| Tabulka 9 – Základní vlastnosti vybraného svítidla.....   | 71 |
| Tabulka 10 – Doba svícení světelného zdroje pro vybrané měsíce.....   | 71 |
| Tabulka 11 – Spotřeba energie systému pro různé měsíce za den .....   | 72 |
| Tabulka 12 – Hlavní parametry panelu CS6K-275 .....   | 73 |
| Tabulka 13 – Průměrné ozáření v určitých měsících .....   | 73 |
| Tabulka 14 – Hodnoty teploty článků pro určité kritické měsíce.....   | 73 |
| Tabulka 15 – Hodnoty vyrobené energie panelem pro určité měsíce při použití relativní účinnosti .....                                   | 74 |
| Tabulka 16 – Hodnoty vyrobené energie panelem pro určité měsíce při použití korekce účinnosti .....                                     | 74 |
| Tabulka 17 – Hodnoty přepočtených napětí pro různé teploty .....  | 75 |
| Tabulka 18 – Hodnoty kapacity pro různé hodnoty cyklického vybíjení .....   | 77 |
| Tabulka 19 – Základní vlastnosti jednoho článku EVL-LTO-30AH.....   | 77 |
| Tabulka 20 – Základní parametry BMS LTO-10S-80A QNBBM.....  | 78 |
| Tabulka 21 – Základní parametry jasového spínače AZH 106 12V .....  | 78 |
| Tabulka 22 – Základní parametry měniče TS-IPS-V03 .....   | 79 |
| Tabulka 23 – Základní parametry regulátoru EPsolar REG-XTRA2210.....  | 80 |
| Tabulka 24 – Základní parametry přepět'ové a proudové ochrany .....   | 81 |
| Tabulka 25 – Základní informace o ztrátách na kabelech.....   | 83 |
| Tabulka 26 – Základní ztráty na spotřebičové části systému .....  | 85 |
| Tabulka 27 – Pořizovací náklady ostrovního systému, zelená barva značí nezbytné komponenty nutné i při instalaci napájenou ze sítě..... | 87 |
| Tabulka 28 – Hodnoty vypočtených nominálních diskontů.....  | 89 |
| Tabulka 29 – Základní NPV pro samotný systém bez korekce.....   | 90 |
| Tabulka 30 – Základní NPV s korigovaným peněžním tokem .....  | 91 |
| Tabulka 31 – Hodnoty IRR pro systém s korekcí a bez korekce .....   | 92 |
| Tabulka 32 – Hodnoty prostých dob návratnosti pro systém s korekcí a bez korekce.....   | 92 |
| Tabulka 33 – Reálná doba návratnosti pro diskontní míru 2,1 % pro systém s korekcí a bez korekce.....                                   | 92 |
| Tabulka 34 – Hodnoty vypočtené LCOE pro dané systémy v Kč/kWh.....  | 93 |

## Seznam vzorců

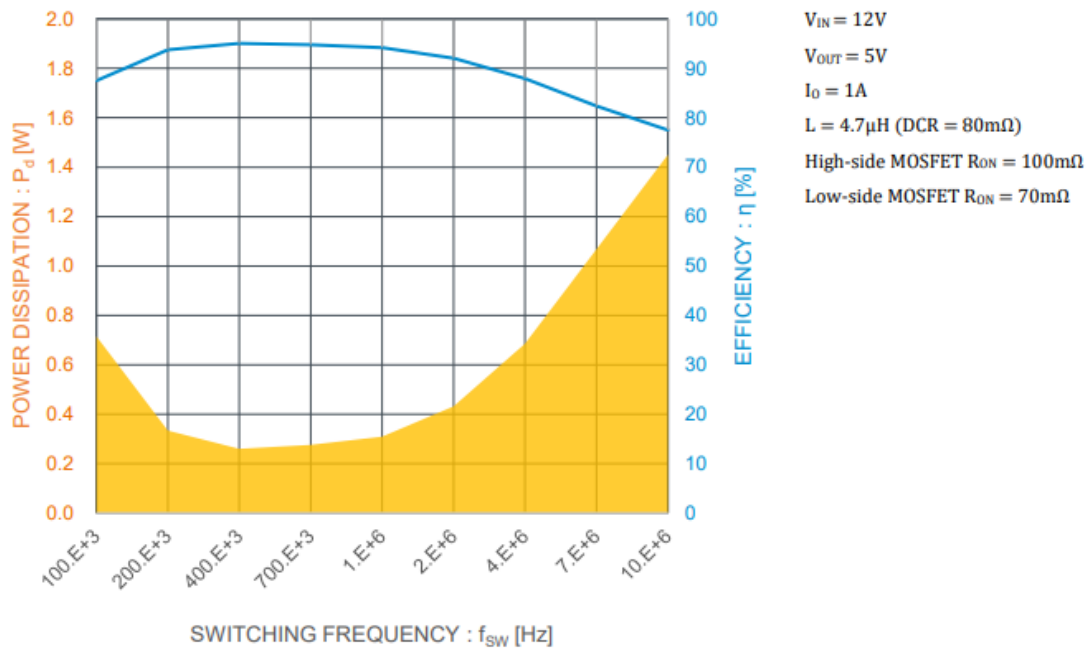
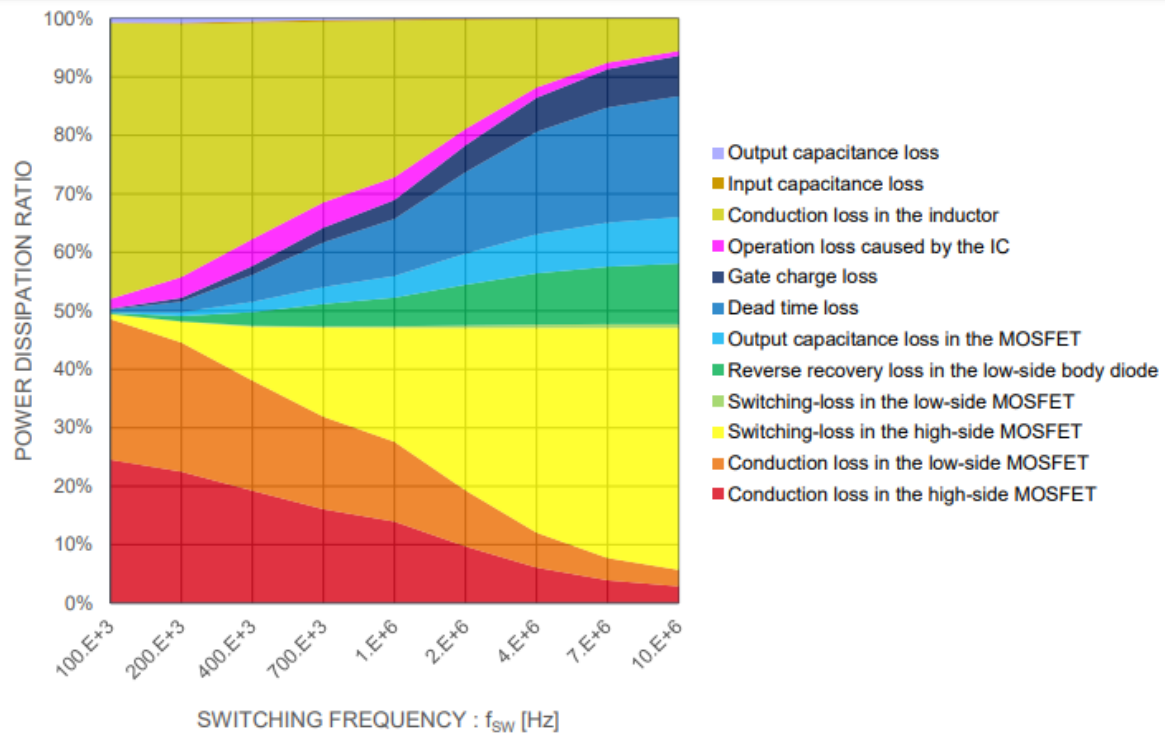
|              |    |
|--------------|----|
| (1.1) .....  | 4  |
| (1.2) .....  | 4  |
| (1.3) .....  | 4  |
| (1.4) .....  | 6  |
| (1.5) .....  | 15 |
| (1.6) .....  | 15 |
| (1.7) .....  | 16 |
| (1.8) .....  | 16 |
| (1.9) .....  | 16 |
| (1.10) ..... | 19 |
| (1.11) ..... | 20 |
| (1.12) ..... | 20 |
| (1.13) ..... | 21 |
| (1.14) ..... | 21 |
| (1.15) ..... | 21 |
| (2.1) .....  | 25 |
| (2.2) .....  | 28 |
| (2.3) .....  | 31 |
| (2.4) .....  | 31 |
| (2.5) .....  | 34 |
| (4.1) .....  | 36 |
| (4.2) .....  | 38 |
| (4.3) .....  | 38 |
| (4.4) .....  | 39 |
| (4.5) .....  | 39 |
| (4.6) .....  | 39 |
| (4.7) .....  | 39 |
| (4.8) .....  | 39 |
| (4.9) .....  | 39 |
| (4.10) ..... | 40 |
| (4.11) ..... | 41 |
| (4.12) ..... | 41 |
| (4.13) ..... | 41 |
| (4.14) ..... | 41 |
| (4.15) ..... | 41 |
| (4.16) ..... | 41 |
| (4.17) ..... | 41 |
| (4.18) ..... | 42 |
| (4.19) ..... | 42 |
| (4.20) ..... | 42 |
| (4.21) ..... | 42 |
| (4.22) ..... | 43 |
| (4.23) ..... | 43 |
| (4.24) ..... | 43 |
| (4.25) ..... | 43 |
| (4.26) ..... | 44 |
| (4.27) ..... | 44 |
| (4.28) ..... | 44 |

|              |    |
|--------------|----|
| (4.29) ..... | 45 |
| (4.30) ..... | 45 |
| (4.31) ..... | 45 |
| (4.32) ..... | 46 |
| (4.33) ..... | 49 |
| (4.34) ..... | 51 |
| (4.35) ..... | 52 |
| (4.36) ..... | 52 |
| (4.37) ..... | 53 |
| (4.38) ..... | 54 |
| (4.39) ..... | 55 |
| (4.40) ..... | 55 |
| (4.41) ..... | 55 |
| (4.42) ..... | 56 |
| (4.43) ..... | 56 |
| (4.44) ..... | 58 |
| (4.45) ..... | 58 |
| (4.46) ..... | 58 |
| (4.47) ..... | 59 |
| (4.48) ..... | 62 |
| (4.49) ..... | 63 |
| (4.50) ..... | 63 |
| (4.51) ..... | 63 |
| (4.52) ..... | 63 |
| (4.53) ..... | 63 |
| (4.54) ..... | 64 |
| (4.55) ..... | 64 |
| (4.56) ..... | 65 |
| (5.1) .....  | 68 |
| (5.2) .....  | 68 |
| (5.3) .....  | 68 |
| (5.4) .....  | 72 |
| (5.5) .....  | 73 |
| (5.6) .....  | 73 |
| (5.7) .....  | 74 |
| (5.8) .....  | 74 |
| (5.9) .....  | 74 |
| (5.10) ..... | 74 |
| (5.11) ..... | 75 |
| (5.12) ..... | 76 |
| (5.13) ..... | 83 |
| (5.14) ..... | 83 |
| (6.1) .....  | 89 |
| (6.2) .....  | 89 |
| (6.3) .....  | 89 |
| (6.4) .....  | 91 |
| (6.5) .....  | 91 |
| (6.6) .....  | 92 |
| (6.7) .....  | 92 |
| (6.8) .....  | 93 |

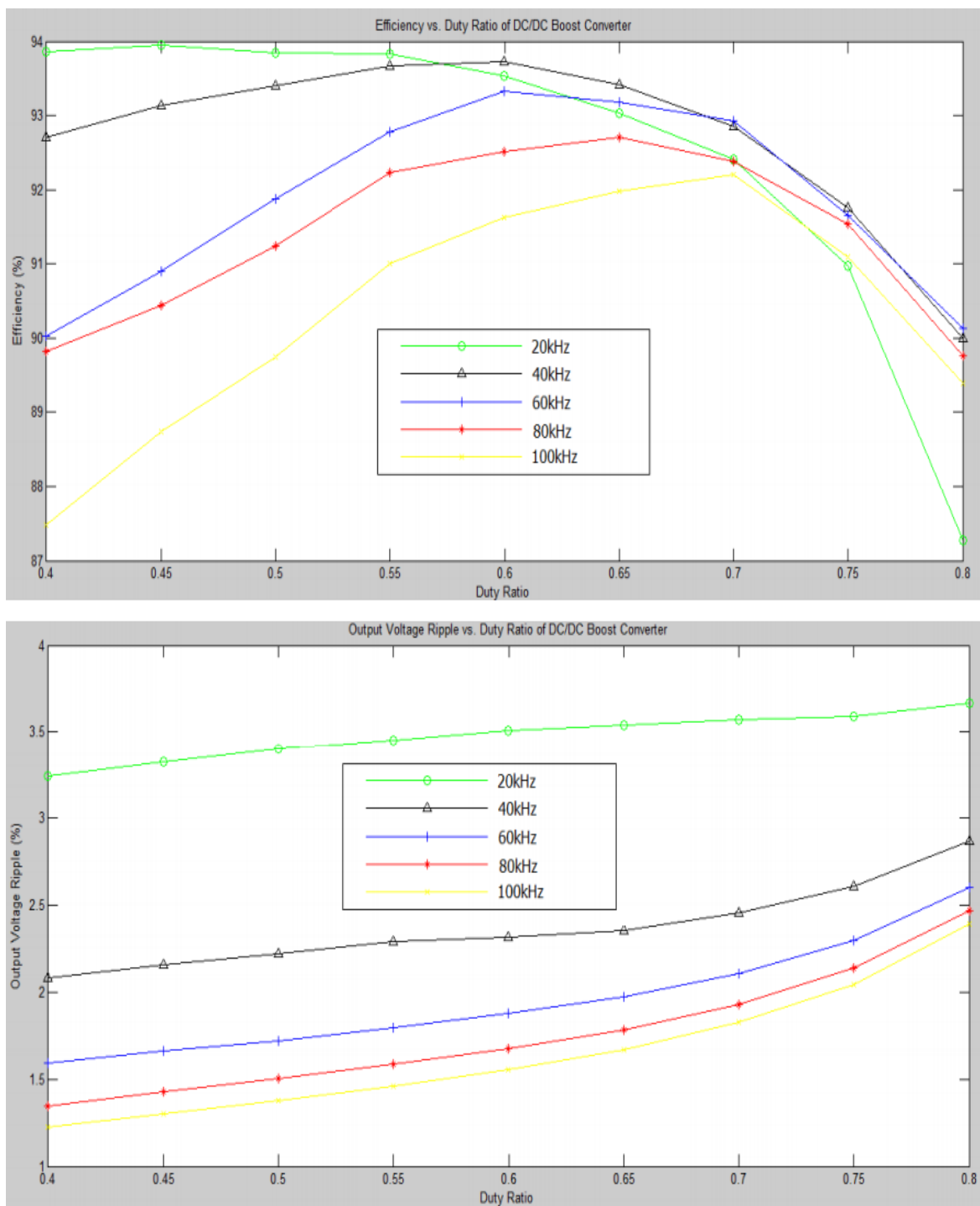
(6.9) ..... 93



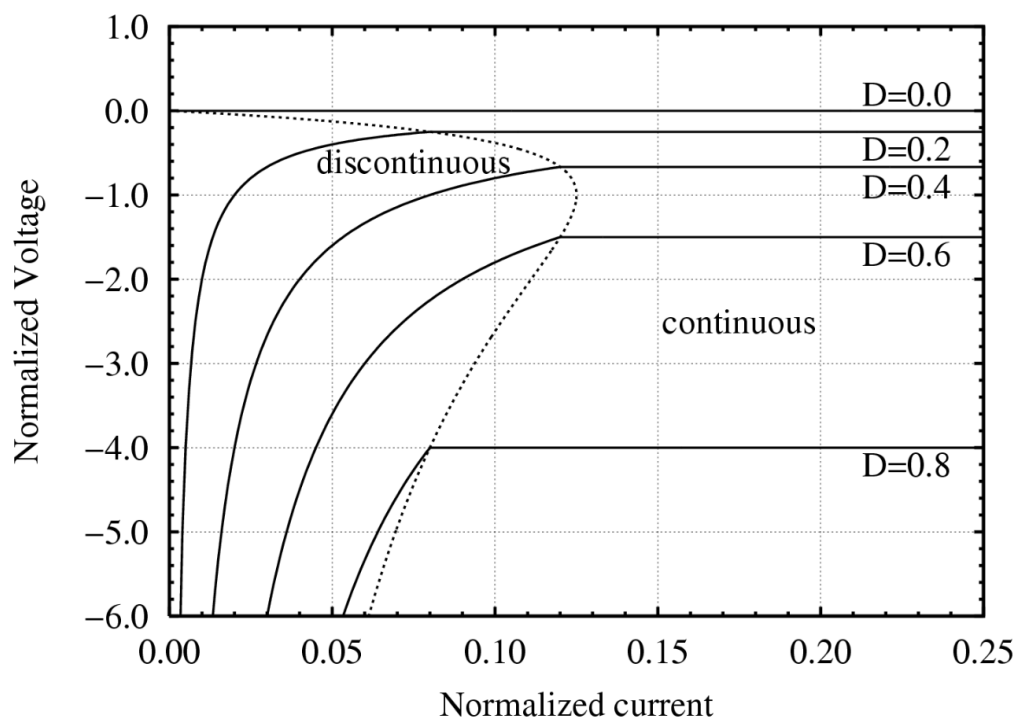
**Závislost účinnosti a výkonové ztráty na výstupním proudu Step Down základního měniče** – zdroj: Efficiency of Buck Converter. ROHM SEMICONDUCTOR. Rohm [online]. 2016 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: [http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applnote/ic/power/switching\\_regulator/buck\\_converter\\_efficiency\\_app-e.pdf](http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applnote/ic/power/switching_regulator/buck_converter_efficiency_app-e.pdf)



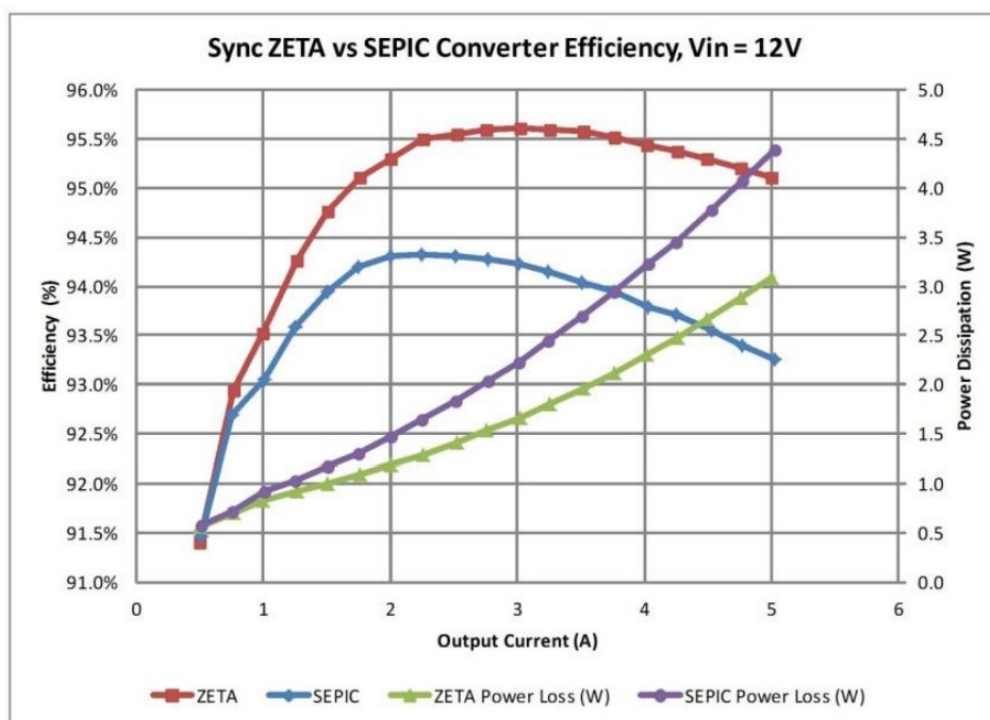
**Závislost účinnosti a výkonové ztráty na spínací frekvenci Step-Down základního měniče** – zdroj: Efficiency of Buck Converter. ROHM SEMICONDUCTOR. Rohm [online]. 2016 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: [http://rohmfs.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching\\_regulator/buck\\_converter\\_efficiency\\_app-e.pdf](http://rohmfs.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/buck_converter_efficiency_app-e.pdf)



**Závislost účinnosti a poměrného napětového výstupu na D (Duty factor) Step-Up základního měniče** – zdroj: BULUT, Enis Baris a Korhan CENGİZ. TRAKYA UNIVERSITY. ICONTES2017: International Conference on Technology, Engineering and Science: DETERMINATION THE EFFECTS OF DUTY CYCLE AND SWITCHING FREQUENCY ON EFFICIENCY OF BOOST CONVERTER FOR FIXED LOAD APPLICATIONS [online]. ISRES, 2017, s. 69-75 [cit. 2019-07-17]. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/download/article-file/379914>

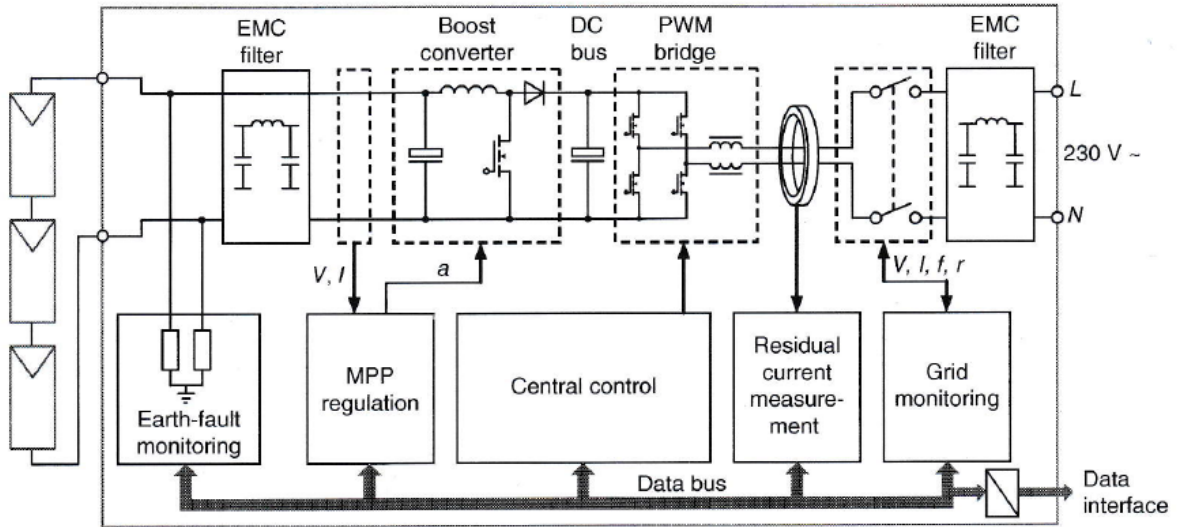


**Závislost normalizovaného napětí na normalizovaném proudu při různých D** – zdroj: Buck-boost continuous discontinuous. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck-boost\\_continuous\\_discontinuous.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck-boost_continuous_discontinuous.png)

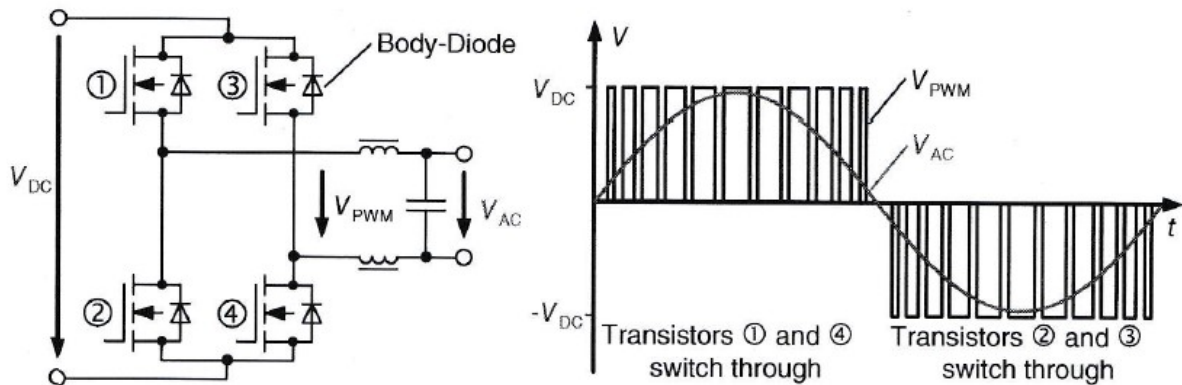


**Závislost účinnosti a ztrát na výstupním proudu pro dané typy měničů** – zdroj: BETTEN, John. Synchronous Zeta Converter Outperforms The SEPIC. TEXAS INSTRUMENTS. HOW2POWER [online]. 2014, , 1-7 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: [http://www.how2power.com/pdf\\_view.php?url=/newsletters/1405/articles/H2PToday1405\\_design\\_Texas%20Instruments.pdf](http://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1405/articles/H2PToday1405_design_Texas%20Instruments.pdf)

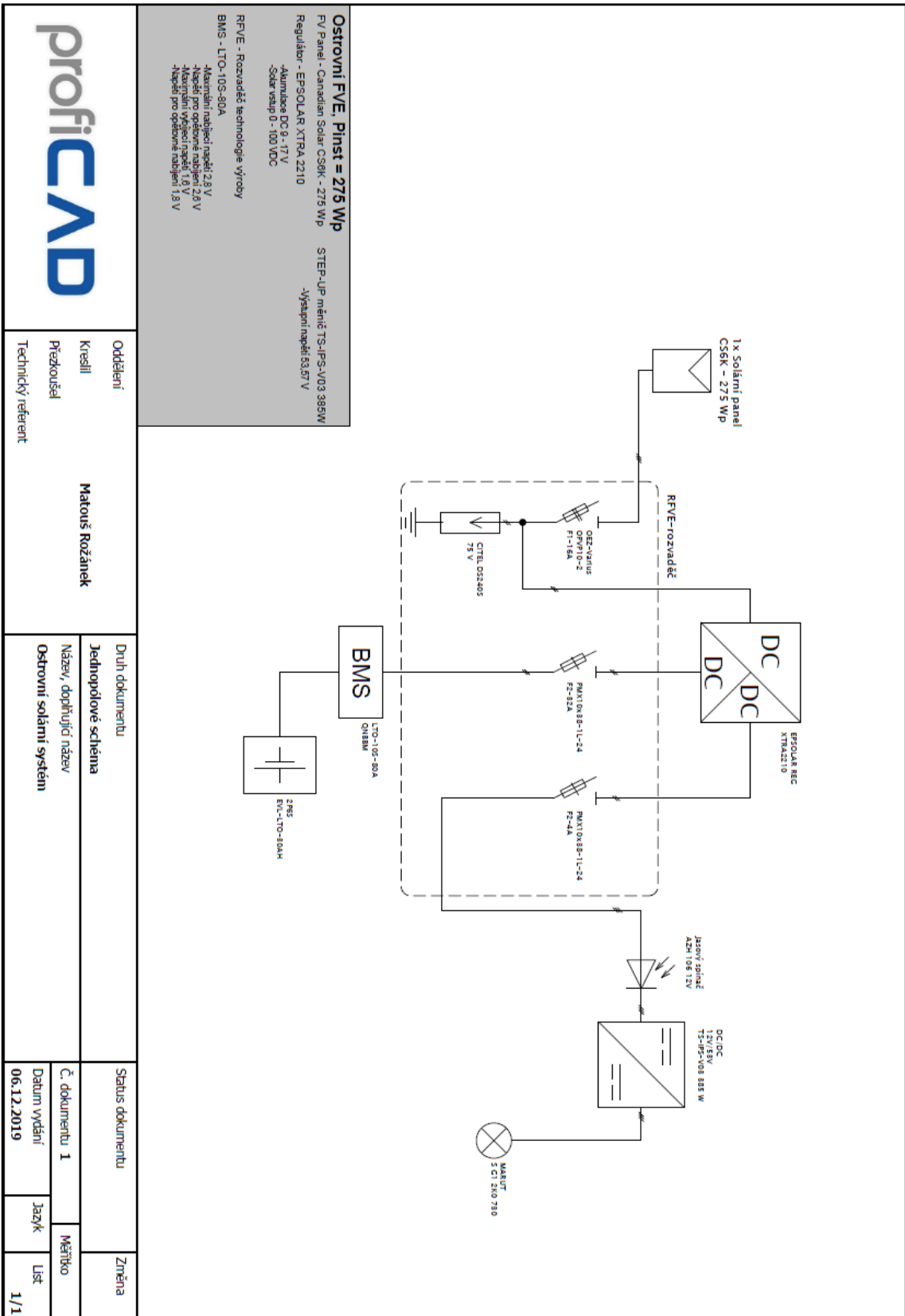




**Střídač bez transformátoru** – zdroj: MERTENS, Konrad. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*. United Kingdom (West Sussex): John Wiley, 2014. ISBN 9781118634165.



**PWM můstek a jeho výstup** – zdroj: MERTENS, Konrad. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*. United Kingdom (West Sussex): John Wiley, 2014. ISBN 9781118634165.



|                 |                    |                       |                         |                         |                  |       |         |  |
|-----------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|-------|---------|--|
| <b>proficAD</b> | Oddělení           | <b>Matouš Rožánek</b> | Druh dokumentu          |                         | Status dokumentu |       | Změna   |  |
|                 | Kreslí             |                       | Jednopolové schéma      | Název, doplňující název | Č. dokumentu     | 1     | Měřítka |  |
|                 | Přezkoušel         |                       | Ostrovní solární systém | Datum vydání            | 06.12.2019       | Jazyk | List    |  |
|                 | Technický referent |                       |                         |                         |                  |       | 1/1     |  |

Jednopolové schéma ostrovního systému