VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

HODNOCENÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY VE FIREMNÍM AREÁLU
EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM IN THE COMPANY AREA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. Petr Novák

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Petr Novák ***ID:*** 172015

Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení fotovoltaické elektrárny ve firemním areálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s teorií fotovoltaických systémů. Vytvořte popis dané lokality pro instalaci FVE. Návrhněte vlastní optimální varianty FVE pro danou lokalitu s návazností na možnosti čerpání veřejné podpory. Vyhodnoťte ekonomické parametry FVE např. diskontní sazba, cash-flow.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020 ***Termín odevzdání:*** 3.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

NOVÁK, Petr. *Hodnocení fotovoltaické elektrárny ve firemním areálu.* Brno, 2020. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127393. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Vaněk.

Prohlášení autora o původnosti díla

„Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma hodnocení fotovoltaické elektrárny ve firemním areálu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 3.6.2020 ……

Bc. Petr Novák, podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za odbornou pomoc pří zpracování této diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na hodnocení fotovoltaické elektrárny ve firemním areálu. V prvních kapitolách je stručně rozebrána teorie výroby elektrické energie při použití fotovoltaických panelů. Je zde popsán princip funkce fotovoltaických panelů, historie, výroba atd. V praktické části diplomové práce se především věnujeme hodnocení firemní fotovoltaické elektrárny při srovnání reálných dat se simulacemi.

KLÍČOVÁ SLOVA: Fotovoltaický panel, fotovoltaická elektrárna, obnovitelný zdroj, slunce

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the evaluation of a photovoltaic power plant in the company premises. The first chapters briefly discuss the theory of electricity generation using photovoltaic panels. It describes the principle of operation of photovoltaic panels, history, production, etc. In the practical part of the thesis we focus on the evaluation of the company's photovoltaic power plant when comparing real data with simulations.

KEYWORDS: Photovoltaic panel, photovoltaic power plant, renewable, sun

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ 10

SEZNAM TABULEK 12

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 13

1 ÚVOD 14

2 ENERGIE ZE SLUNCE 15

2.1 PŘÍMÉ A DIFUZNÍ ZÁŘENÍ 15

2.2 SOUHRN KAPITOLY 17

3 TECHNOLOGIE FV PANELŮ 18

3.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA PŘECHODU PN 19

3.2 SOUHRN KAPITOLY 19

4 HISTORIE FOTOVOLTAIKY 21

4.1 FOTOVOLTAIKA V PRAXI 22

4.2 SOUHRN KAPITOLY 24

5 KONSTRUKCE A VÝROBA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A PANELŮ 25

5.1 ÚVOD 25

5.2 VÝROBA KŘEMÍKU 25

5.3 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY 27

5.3.1 TLUSTOVRSTVÉ FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY 29

5.3.2 TENKOVRSTVÉ FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY 30

5.3.3 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA FV ČLÁNKU 33

5.4 FOTOVOLTAICKÉ PANELY 34

5.4.1 BIFACIÁLNÍ PANEL 35

5.5 SOUHRN KAPITOLY 38

6 VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A MODULŮ 40

6.1 ČLÁNKY PRVNÍ GENERACE 40

6.2 ČLÁNKY DRUHÉ GENERACE 40

6.3 ČLÁNKY TŘETÍ GENERACE 40

6.4 ČLÁNKY ČTVRTÉ GENERACE 41

6.5 SOUHRN KAPITOLY 41

7 ROZDĚLENÍ TYPŮ ZAPOJENÍ FV ELEKTRÁREN 42
7.1 SÍŤOVÁ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA (ON-GRID) 42
7.2 HYBRIDNÍ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA (HFVE) 42
7.3 OSTROVNÍ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA (OFF-GRID) 43
7.4 SOUHRN KAPITOLY 43
8 MĚNIČE 44
8.1 SÍTOVÉ MĚNIČE 44
8.2 OSTROVNÍ MĚNIČE 44
8.3 SOUHRN KAPITOLY 45
9 LEGISLATIVA PODPORY OZE 46
9.1 FORMY PODPORY VÝKUPU ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ 46
9.1.1 PODPORA FORMOU VÝKUPNÍCH CEN 46
9.1.2 PODPORA FORMOU ZELENÝCH BONUSŮ 46
9.2 DANĚ 47
9.2.1 ODPISY 47
9.2.2 DAŇ Z PŘIDANÉ HODNOTY 47
9.2.3 ZDRAVOTNÍ POJIŠTĚNÍ 47
9.2.4 SOCIÁLNÍ POJIŠTĚNÍ 48
9.3 SOUHRN KAPITOLY 48
10 FIREMNÍ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA 49
10.1 POPIS FVE 49
10.1.1 FOTOVOLTAICKÉ PANELY 50
10.1.2 ROZVADĚČ R-DC 50
10.1.3 STŘÍDAČE 50
10.1.4 ROZVADĚČ R-FV 52
10.1.5 ROZVADĚČ MĚŘENÍ 52
10.1.6 VYVEDENÍ VÝKONU 52
10.1.7 KABELOVÉ VEDENÍ 52
10.1.8 JÍMACÍ SOUSTAVA 52
10.2 ROZDÍLY MEZI PREDIKCÍ A SKUTEČNOSTÍ U FIREMNÍ FVE 53

10.2.1 ZHODNOCENÍ VÝROBNÍ ČÁSTI 53
10.2.2 ZHODNOCENÍ FINANČNÍ ČÁSTI 54
10.2.3 ZHODNOCENÍ NÁVRATNOSTI 56
10.3 SIMULACE FIREMNÍ FVE V ROCE 2013 57
10.3.1 PV SOL 57
10.3.2 ROČNÍ SPOTŘEBA 58
10.3.3 UMÍSTĚNÍ PANELŮ NA STŘEŠE OBJEKTU 58
10.3.4 VLIV STÍNĚNÍ NA FV PANELY 59
10.3.5 ZAPOJENÍ PANELŮ 60
10.3.6 CELKOVÉ SCHÉMA FV ELEKTRÁRNY 61
10.3.7 FINANČNÍ ANALÝZA 61
10.3.8 VÝSLEDKY SIMULACE OPROTI SKUTEČNÉMU STAVU 61
10.4 SIMULACE FIREMNÍ FVE 2019 63
10.4.1 FINANČNÍ ANALÝZA 63
10.4.2 VÝSLEDKY SIMULACE Z ROKU 2019 OPROTI SIMULACI Z ROKU 2013 63
10.5 SOUHRN KAPITOLY 65
11 MĚŘENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH 67
11.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ FV PANELŮ OD VÝROBCŮ Z EU 67
11.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ FV PANELŮ OD VÝROBCŮ Z ASIE 68
11.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ FV PANELU OD VÝROBCE Z USA 69
11.3.1 SROVNÁNÍ VÝROBCŮ 69
11.4 MĚŘENÍ BIFACIÁLNÍHO ČLÁNKU 70
11.4.1 ELEKTROLUMINISCENČNÍ MĚŘENÍ 70
11.4.2 MĚŘENÍ VOLT-AMPÉROVÉ CHARAKTERISTIKY 71
11.5 SIMULACE PANELU EU-2 73
11.5.1 SIMULACE PANELŮ S HODNOTAMI VÝROBCE 73
11.5.2 SIMULACE PANELŮ S NÁMI NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI 75
11.6 SIMULACE PANELU EU-2 S PORUCHOU STŘÍDAČŮ 77
11.6.1 VÝSLEDKY SIMULACE PANELŮ S HODNOTAMI OD VÝROBCE PŘÍ PORUŠE STŘÍDAČŮ 77
11.6.2 .VÝSLEDKY SIMULACE PANELŮ S NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI PŘÍ PORUŠE STŘÍDAČŮ 78

11.7 SOUHRN KAPITOLY 79

12 ZÁVĚR 81

POUŽITÁ LITERATURA 83

SEZNAM PŘÍLOH 85

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- Sluneční konstanta[4] 15

Obrázek 2- Přímé vs difuzní záření[2] 16

Obrázek 3- Sluneční mapa ČR[4] 17

Obrázek 4 - Princip funkce fotoelektrického jevu [1] 18

Obrázek 5- Experimentální zařízení prof. Millikana "dílna ve vakuu" [6] 21

Obrázek 6- Vývoj cen fotovoltaických panelů [6] 23

Obrázek 7- Schematické znázornění postupu při výrobě Si polotovaru pro výrobu FV článků [7] 26

Obrázek 8- Standardní polovodičový FV článek na bázi monokrystalického křemíku [7] 28

Obrázek 9- Schéma křemíkového FV článku [7] 29

Obrázek 10- Struktury různých typů fotovoltaických článků [9] 31

Obrázek 11- Princip tenkých vrstev [9] 31

Obrázek 12- Solární článek CIGS [9] 32

Obrázek 13- Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku [9] 33

Obrázek 14- Vliv teploty na výkon FV článku[9] 34

Obrázek 15- Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [9] 34

Obrázek 16 - Detail sériového propojení FV článků[7] 35

Obrázek 17 -Svodový proud je způsoben napěťovým potenciálem a způsobují jej negativní (−) (fialová) ionty migrující od polovodičů a pozitivní (+), (bílá) ionty migrující z obalu skla a polovodičů a vnějšího prostředí. [15] 37

Obrázek 18 - Napěťový potenciál závisí na systému uzemnění, což může mít tyto čtyři základní klasifikace.[15] 38

Obrázek 19 - Pohled na FVE 49

Obrázek 20 – Firemní objekt 49

Obrázek 21 - Střešní pohled na FVE 50

Obrázek 22 – Umístění střídačů 51

Obrázek 23 – Detail střídače 51

Obrázek 24 - Pohled na jímací soustavu a FVE 52

Obrázek 25 - Spotřeba objektu 58
Obrázek 26 – Rozmístění panelů FVE v programu PV sol 59
Obrázek 27 – Objekty, které se podepisují na stínění FVE 59
Obrázek 28 – Předpokládané stínění FVE 60
Obrázek 29 – Rozdělení panelů do stringů 61
Obrázek 30 – Schéma FVE 61
Obrázek 31 – Tok energie skutečné FVE 62
Obrázek 32 – Návratnost skutečné FVE 62
Obrázek 33 – Tok energie simulované FVE z roku 2019 64
Obrázek 34 – Návratnost simulované FVE z roku 2019 64
Obrázek 35 – Elektroluminiscenční měření na straně A 70
Obrázek 36 - Elektroluminiscenční měření na straně B 70
Obrázek 37 - Volt-ampérová charakteristika na straně A 71
Obrázek 38 - Volt-ampérová charakteristika na straně B 72
Obrázek 39 – Tok energie FVE s hodnotami panelů od výrobce 73
Obrázek 40 – Návratnost FVE s hodnotami panelů od výrobce 74
Obrázek 41 – Tok energie FVE s hodnotami panelů námi naměřenými 75
Obrázek 42 – Návratnost FVE s hodnotami panelů námi naměřenými 76
Obrázek 43 – Návratnost FVE s hodnotami panelů od výrobce s poruchou střídačů 77
Obrázek 44 - Návratnost FVE s hodnotami panelů námi naměřenými s poruchou střídačů 78

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Predikovaný výkon FVE 53

Tabulka 2 – Skutečný výkon FVE 54

Tabulka 3 – Predikovaný roční výnos FVE 55

Tabulka 4 – Skutečný roční výnos FVE 55

Tabulka 5 – Predikovaná doba návratnosti FVE 56

Tabulka 6 – Skutečná doba návratnosti FVE 56

Tabulka 7 - Spotřeba objektu 58

Tabulka 8 - Parametry panelu Coenergy PowerPlus 235 58

Tabulka 9- Parametry střídače Sunway NT 10000 60

Tabulka 10 – Finanční tok skutečné FVE 63

Tabulka 11 – Finanční tok simulované FVE z roku 2019 65

Tabulka 12- Parametry panelů od evropských výrobců 67

Tabulka 13 - Parametry panelů od asijských výrobců 69

Tabulka 14 - Parametry panelu od amerického výrobce 69

Tabulka 15- Parametry panelu na straně A 71

Tabulka 16 - Parametry panelu na straně B 72

Tabulka 17 - Parametry panelu s označením EU-2, které udává výrobce 73

Tabulka 18– Finanční tok FVE s hodnotami panelů od výrobce 74

Tabulka 19 - Parametry panelu s označením EU-2, které jsme naměřili 75

Tabulka 20 – Finanční tok FVE s hodnotami panelů, které jsme naměřili 76

Tabulka 21 – Finanční tok FVE s hodnotami panelů od výrobce s poruchou střídačů 78

Tabulka 22 - Finanční tok FVE s hodnotami panelů námi naměřenými s poruchou střídačů 79

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

FV	Fotovoltaika
FVE	Fotovoltaická elektrárna.
OZE	Obnovitelné zdroje energie
EVA	Etylen vinyl acetát
MPP	Bod maximálního výkonu
P_{MPP}	Výkon v bodě maximálního výkonu ¨
U_{MPP}	Napětí v bodě maximálního výkonu
I_{MPP}	Proud v bodě maximálního výkonu
U_{OC}	Napětí naprázdno
I_{SC}	Proud nakrátko
kWh	Spotřeba elektrické energie
Wp	Výkon FV panelu
Wm^{-2}	Intenzita záření
ERÚ	Energetický regulační úřad
PID	Vysokonapěťový stres
HFVE	Hybridní fotovoltaická elektrárna
LPS III	Systém ochrany před bleskem úrovně 3

1 ÚVOD

Pro lidstvo je dnes život bez elektřiny nepředstavitelný. Lidé se setkávají s elektřinou nebo spíš přístroji napájenými elektřinou na každém kroku. Život s elektřinou je už dnes samozřejmost a většina lidí si ani neuvědomuje vliv výroby elektrické energie na životní prostředí. [21]

Velké procento vyrobené elektřiny pochází z uhlí, které se spaluje v tepelných elektrárnách. Tyto elektrárny mají negativní vliv na životní prostředí. Jako alternativu k této výrobě můžeme použít obnovitelné zdroje elektřiny. Jedná se o zdroje, které mají minimální vliv na životní prostředí. Mezi OZE patří energie z vody, větrné elektrárny, solární elektrárny. [21]

Obnovitelné zdroje energie lidstvo používá již od pravěku. Populační růst na planetě způsobil odlesňování krajiny. To zpomalilo využívání fosilních paliv. Od 19. století už nebyly obnovitelné zdroje energie schopné samy pokrýt spotřebu energie. Opětovný růst zájmu o obnovitelné zdorje energie přišel v 70. letech 20. století. Tento zájem by způsoben ropnou krizí. [21]

V roce 2006 bylo asi 18 % celosvětové energie vyrobeno z obnovitelných zdrojů energie. Největší podíl na této výrobě mělo spalování biomasy a to 13 %. Další 3 % světové výroby elektrické energie pocházelo z energie vody. 0,8 % bylo vyrobeno za pomocí energií větru, slunce a přílivu. [21]

Začátkem roku 2007 přestavitelé Evropské unie rozhodli, že do roku 2020 musí být minimálně 20 % energie vyráběno z obnovitelných zdrojů energie. A to z toho důvodu aby se omezily emise oxidu uhličitého. Německo v roce 2018 vyrobilo 38,2 % celkové energie z obnovitelných zdrojů energie a o rok později dokonce 42,6 % celkové energie. [21]

Česká republika se zavázala, že do roku 2020 bude z obnovitelných zdrojů energie generovat 13 % veškeré spotřebované energie. Ještě v roce 2005 bylo prostřednictvím obnovitelných zdrojů energie vyrobeno 4.4 %. Během dekády došlo k masivnímu růstu obnovitelných zdrojů energie a v roce 2014 už dosáhla výroba z obnovitelných zdrojů 13 % veškeré spotřebované energie. [22]

Nejvyužívanějšími obnovitelnými zdroji energie jsou v České republice je na prvním místě bioplyn, která je následován fotovoltaickými systémy a biomasou. A na čtvrtém místě vodní energie. Vodní energie byla ještě v polovině minulého desetiletí nejvýznamnějším výrobcem elektrické energie z obnovitelných zdrojů. [22]

Tato diplomová práce se primárně zabývá fotovoltaickou elektrárnou instalovanou ve firemním areálu. Nejprve je, ale potřeba si vysvětlit základy fotovoltaických elektráren a proto si v teoretické projdeme všechny důležité prvky abychom pochopili jejich funkci.

2 ENERGIE ZE SLUNCE

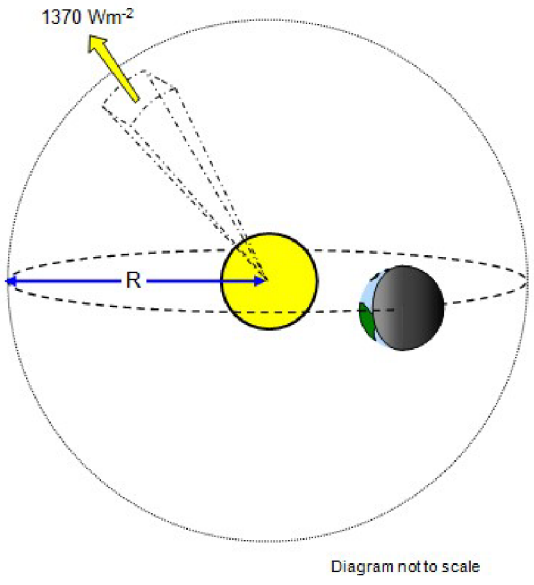
Sluneční záření je jednou z nejčistších a nejdostupnějších zdrojů energie na Zemi. Slunce produkuje zářivou energii v celém rozsahu spektra od nejmenších vlnových délek rentgenového a ultrafialového záření, až po metrové délky záření rádiového. Světelné a infračervené záření o vlnové délce 0,2 μm až 3 μm je však nejčetnější.[1]

Celková hodnota sluneční energie, která dopadá na Zemi dosahuje hodnoty 180000 TW. To je pro představu asi jedna dvou miliardtina celkového výkonu Slunce. Takové množství energie v jednom okamžiku nemůže lidstvo spotřebovat. Ze Slunečního záření nezískáváme pouze teplo, ale můžeme ho využít i na výrobu elektrické energie. Z ekologického hlediska a ochrany životního prostředí jde o mimořádně ekologický způsob, při kterém nedochází ke vzniku žádných škodlivých emisí ani hluku.[2]

Pro použití energie ze slunce nás zajímá hodnota intenzity záření a počet hodin slunečního svitu v jednotlivých ročních obdobích, případně i součinitel znečištění atmosféry. Energie ze slunce je svojí povahou rozptýlená, tj. málo koncentrovaná a její dostupnost je závislá především na počasí a ročním období, nicméně je dostupná a využitelná prakticky všude.[2]

2.1 Přímé a difuzní záření

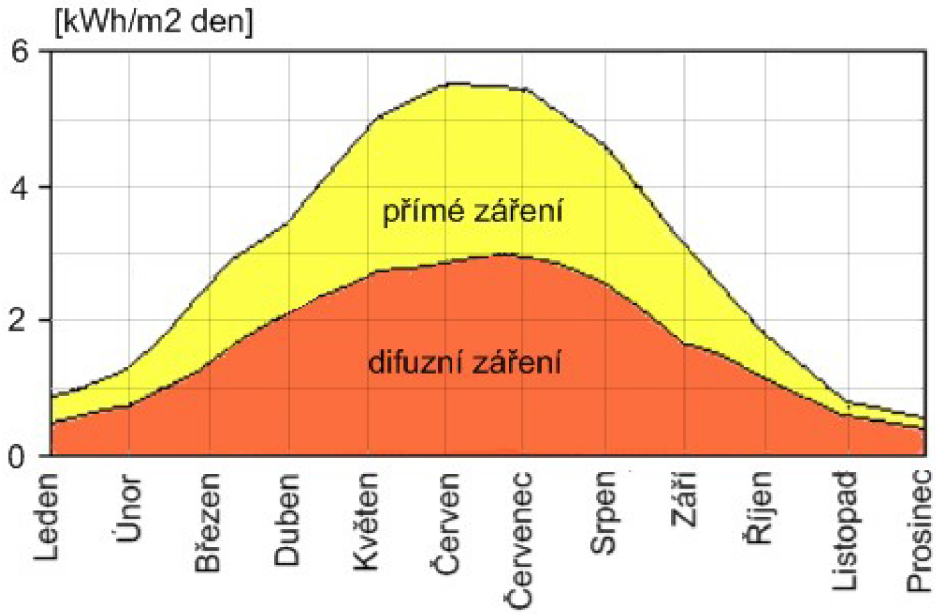
Při jasné a bezmračné obloze dopadá největší část slunečního záření na Zemi, aniž by změnilo směr. Takové sluneční záření nazýváme přímé a z velké části závisí na solární konstantě. Solární konstanta nám udává tok sluneční energie, který prochází plochou 1 m², kolmou na směr paprsků, za 1 s ve střední vzdálenosti Země od Slunce měřený mimo zemskou atmosféru. Tato konstanta se zabývá celým spektrem slunečního záření, nejen viditelným světlem. Jednotkou solární konstanty je hustota zářivého toku.[2]



Obrázek 1- Sluneční konstanta[4]

Na obrázku 1 můžeme vidět princip sluneční konstanty. Na každý m^2 na povrchu myšlené kulové plochy o poloměru 1,5 x 1011 metrů (což je vzdálenost Země od Slunce) dopadá sluneční konstanta.[4]

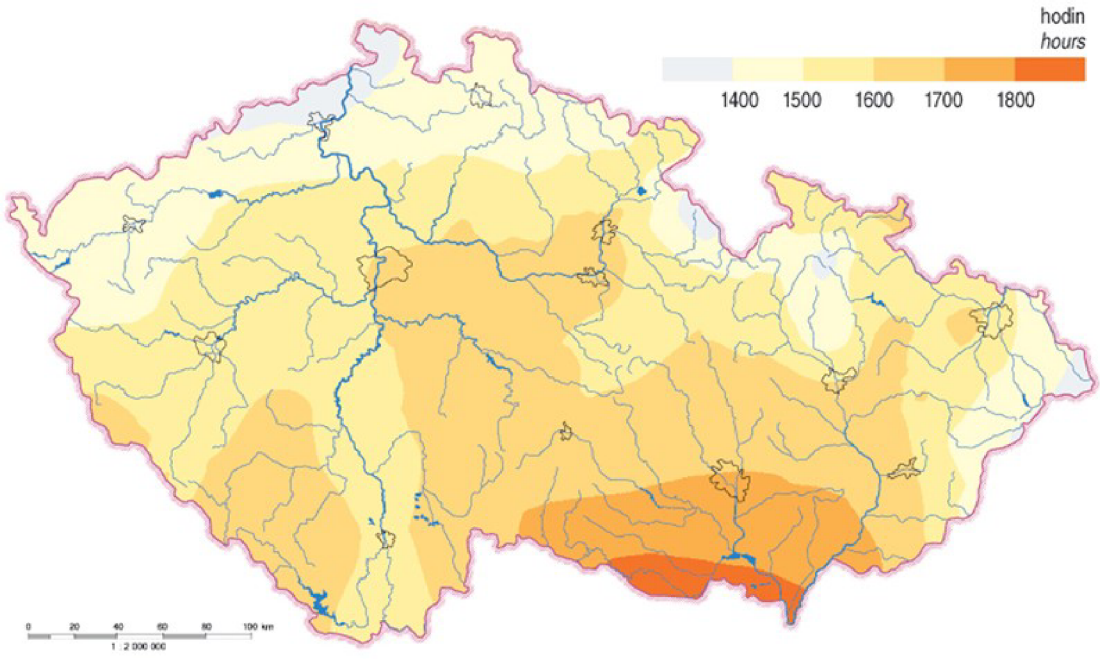
Dopadající záření se skládá ze dvou částí a to z přímého a difuzního záření. Přímé sluneční záření je taková část záření, která dopadá relativně bez omezení ze směru od Slunce a vytváří stíny. Difuzní záření je všesměrové a je vyvoláno v důsledku procesů rozptýlení a odrazů v atmosféře. Je podstatně závislé na klimatických a geografických podmínkách. Zatímco v létě je podíl difuzního záření cca 50% globálního záření, v zimě je jeho podíl podstatně větší.[2]



Obrázek 2- Přímé vs difuzní záření[2]

Smysluplné využití solární energie závisí na zeměpisné poloze. V České republice dopadne průměrně na zem okolo 950 až 1 340 kilowatthodin (kWh) sluneční energie na metr čtvereční. Průměrně v ČR svítí Slunce 1 330 až 1 800 hodin za rok. [3]

Pro využívání solární energie je ideální oblast jižní Moravy a nejméně vhodné jsou pak severní části Čech. Kromě zeměpisné polohy je též nutno zohledňovat konkrétní roční období. [2]



Obrázek 3- Sluneční mapa ČR[4]

2.2 Souhrn kapitoly

V první kapitole jsme si popsali energii ze Slunce. Celková sluneční energie, která dopadá na planetu Zemi je až 180000 TW. To je cca jedna dvou miliardtina celkového výkonu Slunce. Pro použití energie ze slunce je pro nás nejdůležitější hodnota intenzity záření a počet hodin slunečního svitu v jednotlivých ročních obdobích. [2]

Máme dva typy slunečního záření přímé a difuzní. Přímé sluneční záření je takové záření, která dopadá relativně bez omezení ze směru od Slunce a vytváří stíny. Difuzní záření je všesměrové a je vyvoláno v důsledku procesů rozptýlení a odrazů v atmosféře. Je podstatně závislé na klimatických a geografických podmínkách. Zatímco v létě je podíl difuzního záření cca 50% globálního záření, v zimě je jeho podíl podstatně větší. [2]

Využití solární energie je velmi závislé na zeměpisné poloze. V České republice dopadne průměrně na zem okolo 950 až 1 340 kilowatthodin (kWh) sluneční energie na metr čtvereční. Průměrně v ČR svítí Slunce 1 330 až 1 800 hodin za rok. [3]

3 TECHNOLOGIE FV PANELŮ

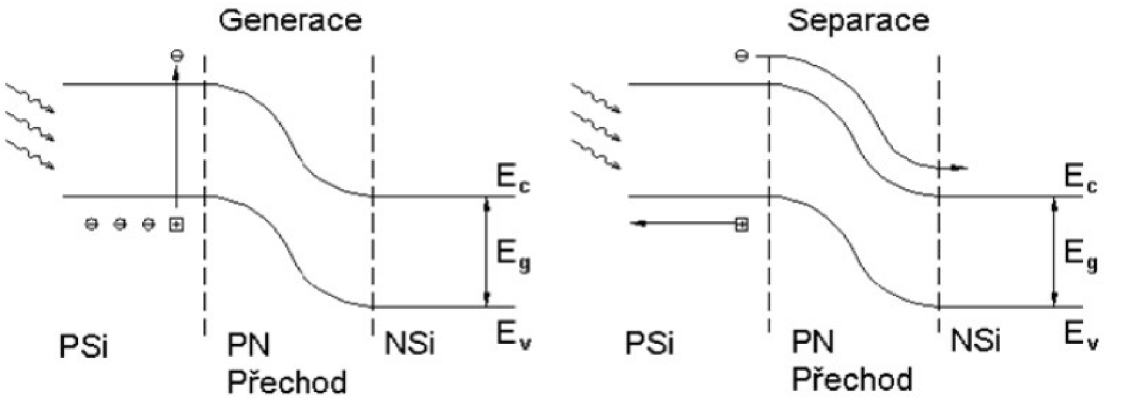
FV články využívají ke své činnosti fotoelektrický jev. Při fotoelektrickém jevu jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry)a mohou nastat tyto případy:

- interakce částice s mřížkou
  - využití nízkoenergetických fotonů
- interakce s volnými elektrony
  - dochází pouze ke zvýšení teploty (fototermální systémy)
- interakce s vázanými elektrony
  - vznikají volné nosiče náboje
  - může dojít k uvolnění elektronu z vazby [1]

Pro funkci FV článků je velice důležité, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. V kovech dochází k jejich okamžité rekombinaci. Tomuto je nutno zabránit a výsledný náboj odvézt z článku. Pro tento problém se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Nejjednodušší fotovoltaický článek můžeme definovat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem. Aby mohla fotovoltaická přeměna probíhat, musí být splněny následující podmínky:

- foton musí být pohlcen,
- foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu,
- vzniklá dvojice elektron (-) – díra (+) musí být separována, aby se znovu nespojila,
- oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči.

Na níže uvedeném obrázku 4 je vidět základní princip funkce fotoelektrického jevu. [1]



Psi – polovodičový křemík typu P, NSi – polovodičový křemík typu N, E_C – energie vodivostního pásu, E_V – energie valenčního pásu

Obrázek 4 - Princip funkce fotoelektrického jevu [1]

V oblasti PN přechodu, který je ozářen jsou generovány nosiče, které následně difundují směrem k PN přechodu. Hustotu proudu tvoří nosiče, které byly zachyceny oblastí prostorového náboje. Nosiče, které jsou generované mimo PN přechod musí k oblasti se silným elektrickým polem difundovat. Pokud zrekombinují dříve, než dosáhnou oblasti přechodu PN, neuplatní se při generaci fotovoltaického napětí.[1]

3.1 Fyzikální podstata přechodu PN

PN přechod nemůžeme vyrobit tak, že k sobě dáme jeden polovodič typu P a jeden polovodič typu N. Oba zmíněné typy polovodiče musíme propojit mikroskopické úrovni. Po úspěšném vytvořením PN přechodu bude docházet k difúzi děr z polovodiče typu P do polovodiče typu N. Díry i elektrony jsou nosiče náboje, které se stále nahodile pohybují. V polovodiči typu N díry rekombinují s elektrony. Na přechodu obou polovodičů se v polovodiči typu P objevují elektricky nevykompenzované nepohyblivé záporné ionty akceptorů. Díry z okolí přechodu obou polovodičů migrovaly částečně do polovodiče typu N a tam rekombinovaly s elektrony. Analogicky dochází k difúzi elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P, kde rekombinují s dírami. Na přechodu obou druhů polovodičů v polovodiči typu N se vytváří nehybné nevykompenzované kladné ionty donorů. Ionty jsou pevně vázány do krystalické mříže, z čehož plyne, že se nemohou pohybovat. I kdyby se pohybovat mohly, jejich hmotnost je mnohem větší než hmotnost elektronů - proto by se pohybovaly výrazně pomaleji.[5]

Tím vzniká hradlová vrstva o síle asi 1um s elektrickým polem, které má intenzitu směřující z prostoru polovodiče N do oblasti polovodiče P. Toto elektrické pole brání dalšímu pronikání elektronů a děr do oblasti přechodu PN. Při rovnovážném stavu se ve zmíněném prostoru nenalézají žádné částice s nábojem, z čehož plyne, že tato vrstva disponuje velkým odporem. Potřebujeme-li zapojit PN přechod do obvodu se stejnosměrným proudem, existují dvě varianty.

1. Připojíme-li PN přechod tak, že oblast P napojíme na kladný pól zdroje, vzniká v polovodiči působením elektrického pole, které je orientováno opačně než pole hradlové vrstvy. Dochází tedy k ztenčení této vrstvy a obvodem může procházet elektrický proud. Přechod PN je zapojen v propustném (přímém) směru. Díry jsou přitahovány k zápornému pólu zdroje, elektrony ke kladnému.
2. V případě, kdy zapojíme PN přechod tak, že ke kladnému pólu zdroje připojíme oblast N, hradlová vrstva se zvětší. Elektrony z části polovodiče N jsou přitahovány vnějším elektrickým polem ke kladnému pólu zdroje a díry z části polovodiče P jsou přitahovány k zápornému pólu zdroje. Zvětší se tak oblast, v níž nejsou žádné volné nositelé náboje. V tomto případě proud přechodem neprochází a přechod PN je zapojen v závěrném (zpětném) směru.[5]

3.2 Souhrn kapitoly

FV články využívají ke své činnosti fotoelektrický jev. Při fotoelektrickém jevu jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry). [1]

Pro funkci FV článků je velice důležité, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. V kovech dochází k jejich okamžité rekombinaci. Tomuto je nutno zabránit a výsledný náboj odvézt z článku. Pro tento problém se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. [1]

V oblasti PN přechodu, který je ozářen jsou generovány nosiče, které následně difundují

směrem k PN přechodu. Hustotu proudu tvoří nosiče, které byly zachyceny oblastí prostorového náboje. Nosiče, které jsou generované mimo PN přechod musí k oblasti se silným elektrickým polem difundovat. Pokud zrekombinují dříve, než dosáhnou oblasti přechodu PN, neuplatní se při generaci fotovoltaického napětí.[1]

PN přechod nemůžeme vyrobit tak, že k sobě dáme jeden polovodič typu P a jeden polovodič typu N. Oba zmíněné typy polovodiče musíme propojit mikroskopické úrovni. Po úspěšném vytvořením PN přechodu bude docházet k difúzi děr z polovodiče typu P do polovodiče typu N. Díry i elektrony jsou nosiče náboje, které se stále nahodile pohybují. V polovodiči typu N díry rekombinují s elektrony. Na přechodu obou polovodičů se v polovodiči typu P objevují elektricky nevykompenzované nepohyblivé záporné ionty akceptorů. Díry z okolí přechodu obou polovodičů migrovaly částečně do polovodiče typu N a tam rekombinovaly s elektrony. Analogicky dochází k difúzi elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P, kde rekombinují s dírami. Na přechodu obou druhů polovodičů v polovodiči typu N se vytváří nehybné nevykompenzované kladné ionty donorů. Ionty jsou pevně vázány do krystalické mříže, z čehož plyne, že se nemohou pohybovat. I kdyby se pohybovat mohly, jejich hmotnost je mnohem větší než hmotnost elektronů - proto by se pohybovaly výrazně pomaleji.[5]

4 HISTORIE FOTOVOLTAIKY

Začátky fotovoltaiky jsou dány objevením fotoelektrického jevu. Poznatkem, že proud mezi kovovými elektrodami, které jsou ponořeny v roztoku se odvíjí od intenzity osvětlení. Tento objev prezentoval francouzské Akademii věd 29. července 1839 Alexandre Edmond Becquerel. Avšak jako objevitel bývá uveden jeho otec Antoine César Becquerel. [6]

Roku 1887 objevil Heinrich Rudolf Hertz další závislost elektřiny a světla. A to, že elektrický výboj ve vzduchu (plynu) se generuje mnohem snadněji mezi elektrodami, na které dopadá UV záření. Avšak tyto jevy se nepodařilo popsat na základě vlnové teorie světla (elektromagnetického záření). [6]

Fotovoltaický jev teoreticky popsal v roce 1905 Albert Einstein v práci *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. Z jeho popisu vyplývá, že energie uvolněného elektronu závisí pouze na frekvenci záření (energii fotonů) a počet elektronů na intenzitě záření (počtu fotonů). [6]

V článku A *Direct Photoelectric Determination of Planck's "h"* potvrdil Einsteinovu experimentálně Robert Andrews Millikan. Využil k tomu Einsteinovy rovnice popisující fotoelektrický jev. Do této rovnice dosadil hodnotu elementárního elektrického náboje, který sám změřil nejdříve v roce 1909 a potom s vysokou přesností v roce 1912, a určil na tu dobu velmi přesně hodnotu Planckovy konstanty.[6]

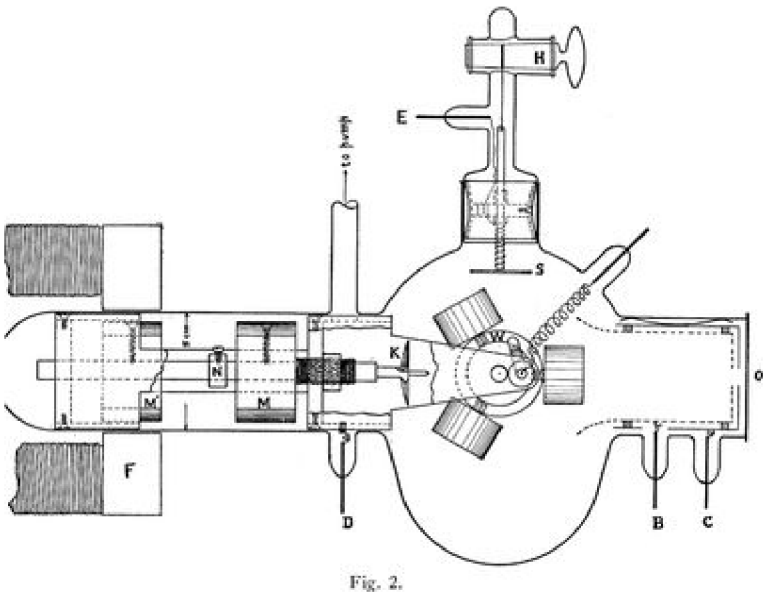


Fig. 2.

Obrázek 5- Experimentální zařízení prof. Millikana "dílna ve vakuu" [6]

Všechny tyto uvedené teorie se vztahují k vnějšímu fotoelektrickému jevu tzv. fotoemisi, kdy se elektrony z vodivostního pásu z ozařovaného kovu uvolňují do okolí (vakua, plynu, nebo elektrolytu). Kromě fotoemise známe další dvě formy fotoelektrického jevu, kdy elektrony zůstávají v materiálu – fotovoltaický jev a fotoionizaci. K fotoinizaci dochází při ozáření elektromagnetickým zářením o dostatečně vysoké frekvenci.

Fotovoltaický jev se generuje v polovodičích, když foton s dostatečně velkou energií dokáže uvolnit elektron z valenčního pásu do vodivostního pásu. Ve valenčním pásu po té zůstane díra. Díru můžeme popsat jako elementární kladný náboj (díra se může pohybovat tím způsobem, že se do ní přesune valenční elektron vedlejšího atomu). Můžeme říct to, že při dopadu fotonu se vytvoří pár nábojů elektron-díra. Tyhle náboje se difúzí nebo působením elektrického pole v okolí PN přechodu pohybují ve směru k elektrodě se stejnou polaritou – elektron k záporné a díra ke kladné. Při propojení elektrod vnějším obvodem putují elektrony k opačné elektrodě, kde rekombinují s děrami – vnějším obvodem prochází elektrický proud. [6]

Fotovoltaický jev jako první pozorovali v roce 1876 William Grylls Adams a Richard Evans Day na PN přechodu mezi selenem a platinou. Rozdíl mezi tímto pozorováním fotovoltaického jevu a fotoelektrickým jevem pozorovaným Becquerelem byl takový, že se proud elektrického článku měnil působením světla, v tomto případě vznikalo elektrické napětí (a proud) bez působení vnějšího elektrického pole pouze působením světla. [6]

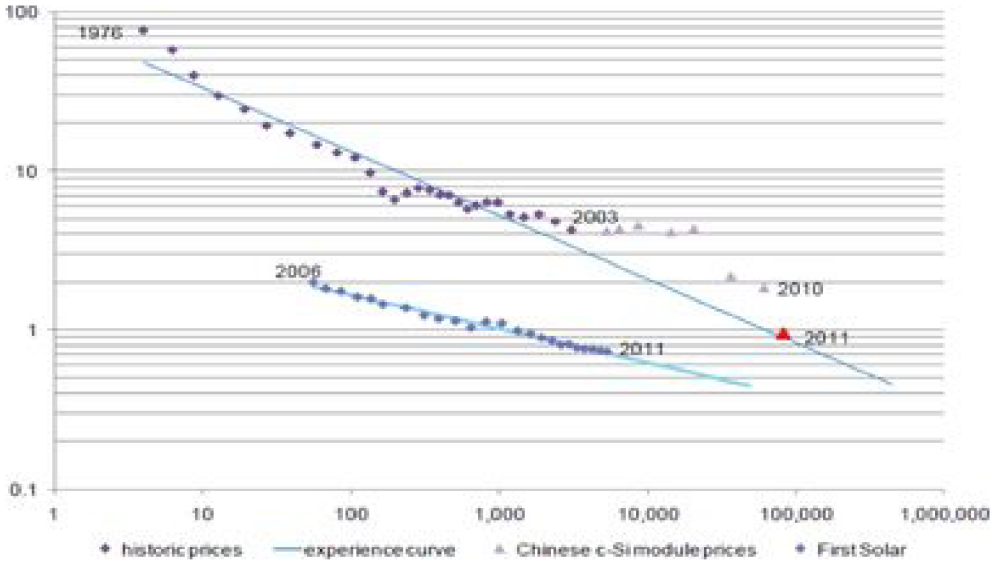
Jako další, kdo dokázal vyrobit fotovoltaické články na bázi selenu, byl v roce 1883 americký vědec Charles Fritts, účinnost článku, který vyrobil byla však velmi malá cca 1 %. I přes nízkou účinnost věřil, že by mohly konkurovat Edisonovým uhelným elektrárnám. [6]

V roce 1940 Russell Shoemaker Ohl vytvořil první PN přechod na bázi křemíku a objevil, že při osvětlení vyrábí proud. Tento objev si nechal patentovat. Účinnost se pohybovala kolem cca 1 % .[6]

4.1 Fotovoltaika v praxi

První FV článek, který se dal využít pro výrobu elektřiny, byl vyroben v roce 1954 v Bellových laboratořích. Tento článek byl vyroben z monokrystalického křemíku a měl účinnost 6 % . [6]

V roce 1958 se začaly fotovoltaické články používat na vesmírných družicích, kde se používají FV články ještě dnes. S několika výjimkami (např. vojenské satelity na nízkých drahách nebo sondy mířící do vzdálených oblastí sluneční soustavy) se jedná o naprosto převažující zdroj elektřiny pro zařízení, u nichž se předpokládá dlouhodobý provoz. Celkový výkon fotovoltaických panelů na Mezinárodní kosmické stanici (ISS) je 110 kWp. [6]



Obrázek 6- Vývoj cen fotovoltaických panelů [6]

Vedle původních článků z monokrystalického křemíku byla v průběhu let vyvinuta celá řada nových typů fotovoltaických článků, a to jak krystalických, tak tenkovrstvých. Avšak křemík je stále ve fotovoltaice nejpoužívanější materiál. [6]

V 50. letech 20. století se cena fotovoltaických panelů pohybovaly v tisících dolarech za watt jmenovitého výkonu a spotřebovaná energie na jejich výrobu vyžadovala větší množství elektřiny, než které tyto články vyrobily za celou dobu své životnosti. To bylo kromě nízké účinnosti způsobeno tím, že při výrobě fotovoltaických článků byly používány v podstatě stejné technologicky i energeticky náročné postupy jako při výrobě mikročipů. [6]

Kromě používání na vesmírných tělesech byly nejdříve fotovoltaické panely využívány k napájení menších spotřebičů v lokalitách, kde bylo prakticky nemožné je připojit do elektrizační soustavy. Hlavní výhodou fotovoltaických panelů oproti jiným zdrojům elektřiny bylo, že nepotřebovaly palivo ani obsluhu. Jednalo se obvykle o ostrovní systémy s akumulátory.

Zájem o fotovoltaiku vzrostl tak jako u ostatních obnovitelných zdrojů, díky ropným krizím v 70. letech minulého století. Tyto krize zapříčinily intenzivní výzkum a vývoj, v jehož důsledku rostla účinnost, klesala cena a zvyšovala se životnost fotovoltaických článků a panelů. Zároveň se snížila energetická náročnost výroby natolik, že panel za dobu svého života vyprodukoval mnohonásobně více energie, než se spotřebovalo na jeho výrobu.[6]

Nejstarší instalované systémy, které jsou dosud pořád v provozu jsou z počátku 80. let. V té době byly prakticky všechny články z krystalického křemíku, u kterých je v reálných podmínkách ověřena životnost minimálně 30 let. Výrobci na základě zkušeností garantují, že výkon panelu se po 25 letech sníží nejvýše o 20 % (výsledky zmíněných instalací jsou však podstatně lepší). U jiných typů panelů je životnost odhadována na základě zrychlených zkoušek. [6]

Velkého rozšíření však fotovoltaika dosáhla až příchodem různých systémů podpory. Prvním byl dotační program v Japonsku následovaný systémem výkupních cen v Německu. Obdobné systémy byly následně zavedeny v řadě dalších zemí.[6]

4.2 Souhrn kapitoly

Začátky fotovoltaiky jsou dány objevením fotoelektrického jevu. Poznatkem, že proud mezi kovovými elektrodami, které jsou ponořeny v roztoku se odvíjí od intenzity osvětlení. Tento objev prezentoval francouzské Akademii věd 29. července 1839 Alexandre Edmond Becquerel. Avšak jako objevitel bývá uveden jeho otec Antoine César Becquerel. [6]

Fotovoltaický jev jako první pozorovali v roce 1876 William Grylls Adams a Richard Evans Day na PN přechodu mezi selenem a platinou. Rozdíl mezi tímto pozorováním fotovoltaického jevu a fotoelektrickým jevem pozorovaným Becquerelem byl takový, že se proud elektrického článku měnil působením světla, v tomto případě vznikalo elektrické napětí (a proud) bez působení vnějšího elektrického pole pouze působením světla. [6]

Jako další, kdo dokázal vyrobit fotovoltaické články na bázi selenu, byl v roce 1883 americký vědec Charles Fritts, účinnost článku, který vyrobil byla však velmi malá cca 1 %. I přes nízkou účinnost věřil, že by mohly konkurovat Edisonovým uhelným elektrárnám. [6]

V roce 1940 Russell Shoemaker Ohl vytvořil první PN přechod na bázi křemíku a objevil, že při osvětlení vyrábí proud. Tento objev si nechal patentovat. Účinnost se pohybovala kolem cca 1 % .[6]

První FV článek, který se dal využít pro výrobu elektřiny, byl vyroben v roce 1954 v Bellových laboratořích. Tento článek byl vyroben z monokrystalického křemíku a měl účinnost 6 % . [6]

V roce 1958 se začaly fotovoltaické články používat na vesmírných družicích, kde se používají FV články ještě dnes. S několika výjimkami (např. vojenské satelity na nízkých drahách nebo sondy mířící do vzdálených oblastí sluneční soustavy) se jedná o naprosto převažující zdroj elektřiny pro zařízení, u nichž se předpokládá dlouhodobý provoz. Celkový výkon fotovoltaických panelů na Mezinárodní kosmické stanici (ISS) je 110 kWp. [6]

Zájem o fotovoltaiku vzrostl tak jako u ostatních obnovitelných zdrojů, díky ropným krizím v 70. letech minulého století. Tyto krize zapříčinily intenzivní výzkum a vývoj, v jehož důsledku rostla účinnost, klesala cena a zvyšovala se životnost fotovoltaických článků a panelů. Zároveň se snížila energetická náročnost výroby natolik, že panel za dobu svého života vyprodukoval mnohonásobně více energie, než se spotřebovalo na jeho výrobu.[6]

5 KONSTRUKCE A VÝROBA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A PANELŮ

5.1 Úvod

V dnešní době se nejvíce setkáváme s fotovoltaickými panely na bázi křemíku, ať už monokrystalické, polykrystalické či amorfní na bázi tenkých vrstev. Křemík má hodně plusů. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších prvků na Zemi. Z toho vyplívá, že je docela levný, je snadno dostupný, není jedovatý a patří mezi nejvíce využívané a asi i nejlépe prozkoumané polovodiče. Setkáváme se s ním většinou ve formě křemene neboli oxidu křemičitého (SiO_2). V této formě je mechanicky odolný a chemicky stabilní, drobná zrnka křemene tvoří všem dobře známý křemenný písek. Šířka zakázaného pásu čistého křemíku činní $\Delta E_G \approx 1{,}1$ eV.

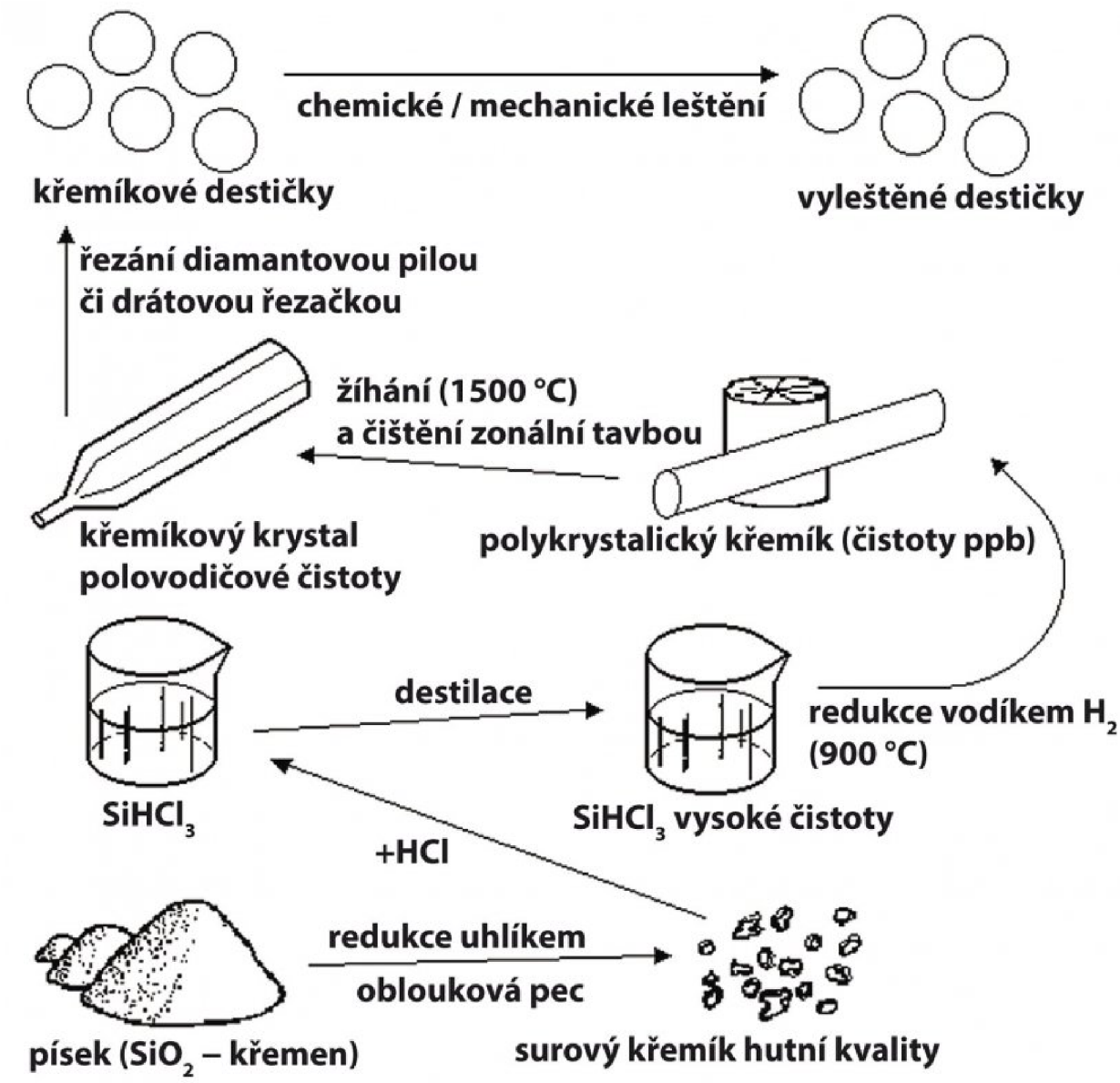
Fotovoltaické panely, které jsou založené na jiných bázích lze rozdělit do dvou skupin. Jedny jsou levnější a mají také podstatně menší účinnost přeměny energie, například fotovoltaické panely na bázi organických polymerních vrstev či nanovláken. Druhé mají lepší účinnost přeměny energie, ale za to jsou mnohem dražší. Tyto panely se využívají ke zvláštním účelům, například fotovoltaické panely na bázi GaAs, které používáme ve vesmíru. V této práci se budeme ale zabývat články zaleženými na křemíku.[7]

5.2 Výroba křemíku

Surový křemík získáme redukcí uhlíkem z písku v obloukové peci, kde nastává celá řada chemických reakcí. Pokud vyjádříme jenom výchozí a konečné produkty, můžeme vše zjednodušeně vyjádřit jedinou rovnicí a ta zní:

$$SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$$

Do obloukové pece se z vrchu kontinuálně dodává písek, který se promíchává s mletým karbonizovaným uhlím (koksem). Směrem ke spodní části pece roste hodnota teploty a v jednotlivých úrovních probíhají chemické reakce. V dolní v části s teplotou cca $T \approx 2\,000$ °C se hromadí roztavený křemík, který se v pravidelných intervalech odlévá. Křemík získaný touto cestou má čistotu až 99 %, zhruba 1 % jsou nečistoty, které jsou tvořeny nejvíce příměsemi Fe, Al a C. Pro polovodičovou výrobu však potřebujeme ještě lepší čistotu. Z tohoto důvodu musíme nejdříve surový křemík vytvořit a teprve pak vytvořit finální polotovar pro využití v následující polovodičové výrobě. K tomu účelu existuje celá řada různých technologií, příklad jedné z těchto technologií můžeme schematicky vidět na obr. 7. Převodem na kapalnou fázi a její destilací lze získat polotovar až čistoty tzv. ppb (nečistoty řádově 10^{-9}), která je dostačující pro výrobu integrovaných obvodů. Pro výrobu fotovoltaických článků běžně postačuje i nižší čistota, tzv. čistota ppm (nečistoty řádově 10^{-6}).[7]



Obrázek 7- Schematické znázornění postupu při výrobě Si polotovaru pro výrobu FV článků [7]

Nejvyužívanější cestou k čištění křemíku je postup firmy Siemens s chlórovým cyklem. Nejprve proběhne převod na trichlórsilan podle zjednodušených rovnic:

$Si + 2Cl \rightarrow SiCl_2$

$SiCl_2 + HCl \rightarrow SiHCl_3$

Po destilaci se z trichlórsilanu opět vyredukuje čistý křemík podle zjednodušených rovnic:

$4SiHCl_3 + H_2 \rightarrow 2Si + SiCl_4 + SiCl_2 + 6HCl$

$SiCl_4 + H_2 \rightarrow SiHCl_3 + HCl$

$SiCl_2 + HCl \rightarrow SiHCl_3$

Chlórový výrobní proces je velmi náročný na spotřebu energie a na ochranu bezpečnosti obsluhy i životního prostředí. V současnosti se firmy snaží vyvíjet nové technologie výroby

čistého křemíku, které už nepoužívají chlórový cyklus, aby tyto vysoké požadavky na výrobu eliminovali. Zatím jsou však tyto nové postupy jen testovány v poloprovozu a pokud se výroba osvědčí, mohou značně snížit energetickou náročnost výroby čistého křemíku i jeho cenu. Po vyčištění křemíku velmi často vzniknou hrudky čistého křemíku.Hrudky křemíku prochází kontrolou elektrického odporu. Menší rezistivita než očekávaná hodnota by naznačovala přítomnost příměsí a tedy nižší čistotu materiálu. Z tohoto polotovaru je možno vytvořit polykrystalické či monokrystalické ingoty.

Finální polykrystalický či monokrystalický ingot se v poslední fázi příčně řeže na destičky, které tvoří základ fotovoltaického článků. V technologii řezání článků došlo v posledních letech k výraznému posunu kvality, zejména u drátových řezaček. V minulosti technologie mohla řezat destičky o minimální tloušťce $d = 300$ μm, nyní je to až $d = 100$ μm. Ve stejném poměru se zmenšil i prořez. Úspora křemíku, energie potřebné k jeho výrobě i zefektivnění výroby je tak evidentní. [7]

5.3 Fotovoltaické články

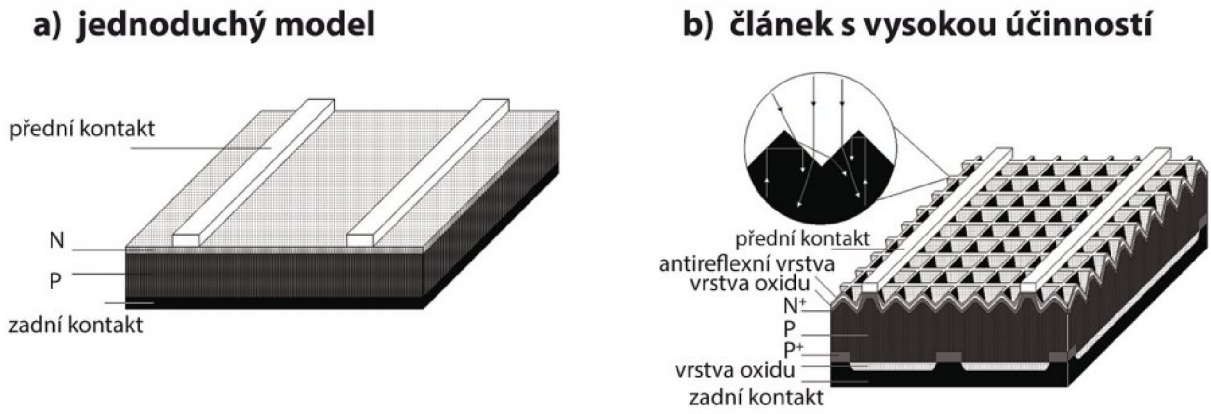
Fotovoltaický článek můžeme popsat jako velkoplošnou polovodičovou diodou s PN přechodem, který je orientovaným kolmo k čelní ploše. Klasický polovodičový fotovoltaický článek, který je založen na bázi polykrystalického křemíku je na obr. 8. Difúze příměsí donorů či akceptorů do materiálu polovodiče pro vytvoření přechodu PN se odehrává v difúzních pecích. Článek má z přední strany vytvořenou antireflexní úpravu povrchu kvůli minimalizaci odrazu. Tato úprava slouží k tomu, aby se využilo maximum dopadajícího záření. Články, které disponují největší účinností se tedy jeví jako černé. Pouze pro určité žádané dekorační účely se nanáší na přední stranu tenká průhledná vrstva pro zesílení odraženého záření určité vlnové délky v důsledku interference vln elektromagnetického záření na této vrstvě. Takové články v odraženém světle vykazují určitý barevný odstín. [7]

Obrázek 8- Standardní polovodičový FV článek na bázi monokrystalického křemíku [7]

Přední kontakt bývá vytvořen tak, aby zakrýval co nejmenší část plochy a aby světlo mohlo dopadat na co největší plochu článku. Zadní kontakt bývá u klasických panelů celoplošný. Kontakty můžeme na články nanést buď sítotiskem, nebo náročnějšími vakuovými technologiemi, například vakuovým napařováním. Pouze na speciální články určené například pro systémy s velkou koncentrací záření se dělají kontakty vnořené do materiálu polovodiče. Tak se zvětší plocha styku mezi kontaktem a polovodičem i průřez kontaktu kvůli větším proudovým hustotám, které článkem protékají.[7]

Schéma fotovoltaického článku z křemíku můžeme vidět na obr. 9. Na obr. 9 jsou znázorněny dva modely. V horní části je znázorněn jednoduchý model. Článek s touto strukturou pracuje podle výše popsaných, ale má nižší účinnost fotovoltaické přeměny energie hlavně v důsledku rekombinačních ztrát. Pro zvýšení účinnosti slouží u kvalitnějších článků mnoho konstrukčních zlepšení, které jsou patrné z obr. 9b). Antireflexní vrstva nacházející se na přední straně článku snižuje odraz, tak aby maximum fotonů vniklo do FV článku a proniklo až do oblasti přechodu PN. Vrstvy nevodivého oxidu (SiO_2 – křemen) chemicky pasivují povrch a jen v určitých místech je vrstva proleptána a jen zde se odvádí elektrický náboj. Vyleptaná struktura malých jehlanů na přední straně způsobuje, že fotony snadno vstupují do FV článku. Pokud ale projdou, aniž vyvolají fotovoltaickou přeměnu, a odrazí se od zadní elektrody, nemohou na přední straně vystoupit ven z článku a jsou totálním odrazem vráceny zpět, jak je znázorněno v detailu obr. 9b). Znovu pak procházejí přechodem PN a pravděpodobnost fotovoltaické přeměny energie se zvyšuje. Oboustranné FV články mají na zadní straně stejnou strukturu jako na přední straně, fotony tedy mohou dopadat současně z obou stran (na zadní stranu například po odrazu od země) a množství vyrobené elektrické energie je potom větší. Pro záření dopadající na zadní

stranu je však účinnost fotovoltaické přeměny nižší, neboť fotony kratších vlnových délek jsou pohlcovány už v silnější vrstvě polovodičového substrátu a nedorazí až k přechodu PN.[7]



Obrázek 9- Schéma křemíkového FV článku [7]

Hranice zrn v polykrystalech zhoršuje transportní vlastnosti polovodiče, u amorfních polovodičů je situace ještě horší. Účinnost fotovoltaických článků pracujících na bázi monokrystalického křemíku je cca 20 % u sériové výroby, účinnost laboratorních článků může převyšovat 30 %. Účinnost článků tvořených na bázi jiných typů polovodičů (např. GaAs, InP) je ještě vyšší. U těchto článků se účinnost pohybuje kolem cca 25 % u sériové výroby, tyto články jsou také několikanásobně vyšší. Proto se tyhle fotovoltaické články využívají hlavně v kosmických projektech, kde cena není limitujícím parametrem, je však nezbytná maximální účinnost a odolnost proti kosmickému záření. Pro kosmické projekty se využívají hlavně monokrystalické články na bázi InP či epitaxně připraveného GaAs/Ge. Článek na bázi GaAs má větší odolnost proti kosmickému záření a při vzrůstající teplotě článků klesá účinnost přeměny pomaleji, než je tomu u jiných polovodičů. Existuje i tzv. tandemové uspořádání, kdy články na odlišné bázi jsou umístěny za sebou a každý využívá jinou oblast spektra.[7]

Tenkovrstvové články bývají kromě křemíku např. na bázi CuInSe, CdTe či na bázi hetero přechodů mezi různými druhy polovodičů. Tyto články jsou sice relativně levné, ale také mají nižší účinnost kolem 10 % a navíc mají problém se stabilitou parametrů. Je možné vyrobit takový článek s účinností cca až 15 %, ale účinnost rychle padá a brzy bývá nižší než 10 %. To znamená, že solární systém by musel zaujímat větší plochu. [7]

5.3.1 Tlustovrstvé fotovoltaické články

Tlustovrstvé fotovoltaické články můžeme rozdělit na dva základní typy a to jsou monokrystalické a polykrystalické. V současnosti se vyrábějí dva druhy velikostí o rozměru strany přibližně 15 cm a 20 cm. Jejich tloušťka bývá kolem cca 0,2 mm. S rostoucí velikostí solárního článku stoupá proud, zatímco napětí zůstává konstantní. Napětí FV článku bývá kolem 0,6 - 0,7 V. [8]

5.3.1.1 Křemíkové polykrystalické články

Jedná se o nejběžnější typ článků. Polykrystalické články se vyrábějí odléváním čistého křemíku do vhodných forem. Odlévání je mnohem snažší metoda výroby článků než metoda tažení monokrystalu. Odléváním lze také vyrobit bloky se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem. Články vyrobené touto metodou mají o něco horší elektrické vlastnosti (zejména nižší proud a účinnost), protože na styku jednotlivých krystalických zrn (jejich rozměry jsou řádově v milimetrech) je větší odpor. Hlavní výhodou je, že hlavní surovina je levnější a můžeme ji vyrábět ve větších rozměrech.[8]

5.3.1.2 Křemíkové monokrystalické články

Monokrystalické články jsou základním a nejstarším typem fotovoltaických článků.Velikost krystalů je v řádu 10 cm. Články se vyrábí z ingotů polykrystalického křemíku za použití Czochralskéhometody tj. pomalým tažením zárodku krystalu z taveniny velmi čistého křemíku. Polovodičový P-N přechod se na článku vytvoří přídavkem fosforu, který na povrchu utvoří vrstvu s vodivostí typu N. Z tohoto postupu je vidět, že tato technologie je velmi energeticky i technicky náročná, proto se intenzivně hledaly způsoby, jak ji zlevnit.Jednou z cest je rovnou táhnout z taveniny tenký monokrystalický pásek, který se dá rozřezat na solární články mnohem snadněji a ze stejného množství křemíku se dá vyrobit dvojnásobná plocha fotovoltaických článků. Účinnost tohoto typu článku je však o něco nižší než u článků vyrobených řezáním z velkých ingotů monokrystalického křemíku.[8]

5.3.2 Tenkovrstvé fotovoltaické články

U tenkovrstvých článků jsou výrobní náklady a spotřeba materiálu podstatně nižší než u tlustovrtvých, mají také kratší dobu energetické návratnosti. Tenkovrstvá technologie má mnoho různých specifických vlastností například menší citlivost na teplotu a zastínění, ohebnost, lepší využití spektra slunce, různé rozměry a tvary, možná průhlednost materiálu, homogenní vzhled, možnost integrace a použití umělého světla. Nejvýznamnější je však automatizovaná výroba, která je jednodušší než u křemíkových destiček. Do budoucna má tenkovrstvá technologie velký potenciál a čím bude levnější, tím bude její podíl na trhu větší.

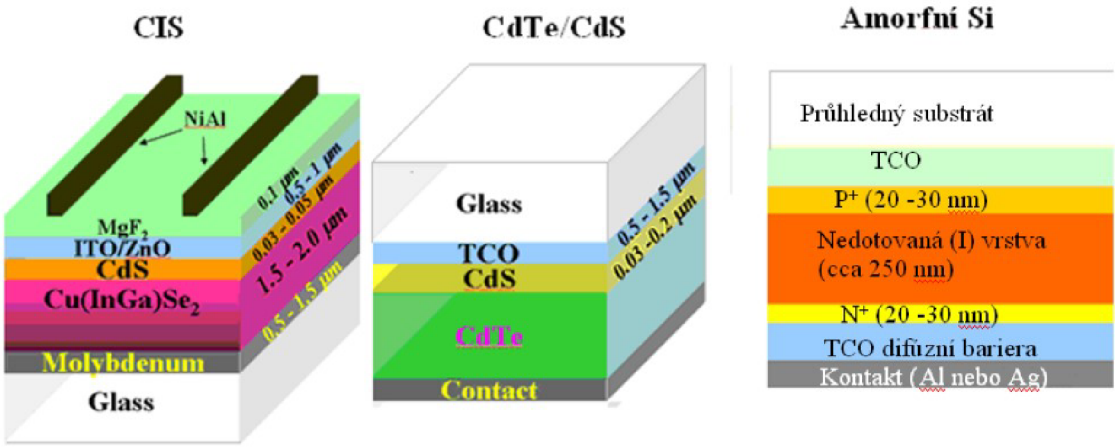
Nejperspektivnější technologie pro levné solární články jsou:

- nanokompozity - CIGS solární články,
- barvivové solární články (nanosolární články),
- solární článek s nanokrystaly (kvantovými tečkami),
- polymerové (plastové) solární články (s fullereny),
- nanosolární články ve formě antén.

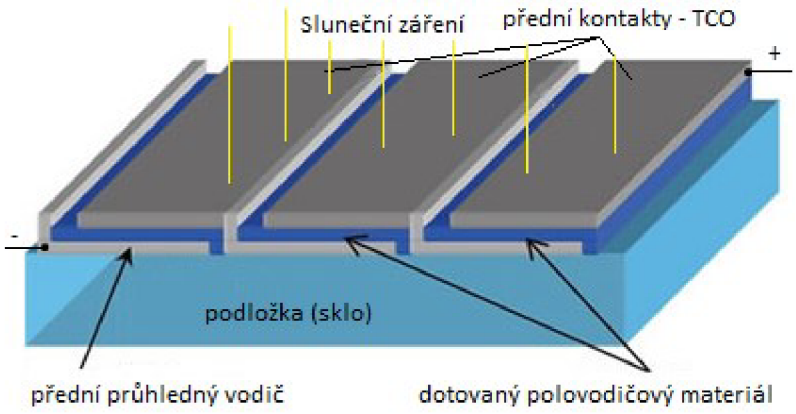
Tyto technologie mají jednu věc společnému a to, že pracují na různých principech při použití nanostruktur a to buď ve formě trubic, nebo koulí, které slouží jako kanály nebo cestičky pro uvolněné elektrony. Tímto způsobem dochází k výraznému vzrůstu účinnosti přeměny. Tenkovrstvá technologie je sice levnější, ale potřebuje pro stejný výkon větší solární plochu.

Tenkovrstvé články se vyrábějí z CdTe, amorfního křemíku (někdy v kombinaci s mikrokrystalickým křemíkem) a CulnSe2 nanášením několika mikrometrové tenoučké vrstvy materiálu na sklo. Místo skla se dále používají levné nosné materiály, jako jsou umělé hmoty a kovové fólie. Struktury různých typů tenkovrstvých článků můžeme vidět na obrázku 10.

Přední kontakty jsou tvořeny průhlednou vysoce vodivou vrstvou oxidu kovu TCO (Transparent Conductive Oxide), která je rozhodujícím nákladovým faktorem při výrobě viz. obrázek 11. Elektrické oddělení a propojení článků se provádí strukturními kroky zahrnutými do procesu výroby. Z důvodu ochrany je modul tvořen skleněnou tabulí a zapouzdřen materiály složených z různých prvků, jako kopolymer etylén - vinylacetát (EVA). Největší nevýhodou je malá účinnost 10 % a krátká doba životnosti. [9]



Obrázek 10- Struktury různých typů fotovoltaických článků [9]



Obrázek 11- Princip tenkých vrstev [9]

5.3.2.1 Amorfní články

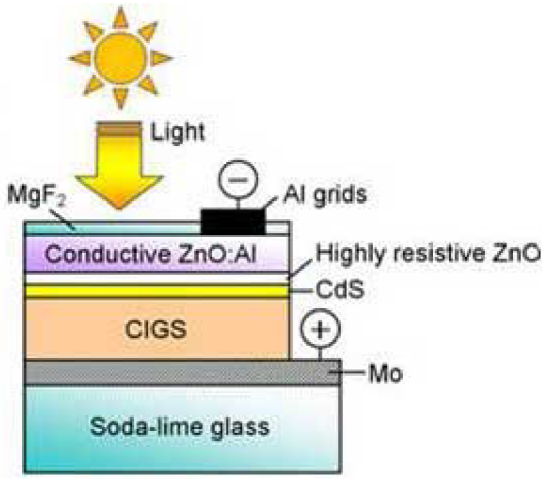
Amorfní články patří do tenkovrstvé technologie. Články jsou vyráběny z amorfního křemíku. Malé amorfní články můžeme najít například v kapesních počítačích, hodinkách, kapesních svítilnách atd. Amorfní moduly se stále častěji používají i ve velkých FV zařízeních [10].

Amorfní křemík je specifický tím, že netvoří pravidelnou krystalickou strukturu, ale vytváří neuspořádanou síť. K výrobě dochází chemickým odlučováním při teplotách okolo cca 200 °C z plynného silanu. Dotovaný amorfní křemík disponuje jen velmi krátkou difuzní vzdáleností, volné nosiče náboje by tedy hned rekombinovaly, příspěvek k výrobě proudu je tedy sotva minimální. Nápravu zajišťuje vestavba intristické (nedotované) vrstvy mezi vrstvy P a N, ve které je životnost nosičů náboje podstatně vyšší. Zde se odehrává absorpce světla a vytváření náboje, kdežto vrstvy P a N vytvářejí elektrické pole, které uvolněné nosiče náboje odděluje. Tato struktura se nazývá PIN. Velkou výhodou amorfních článků je, že jsou naneseny na ohebné kovové fólii [10].

Mezi nevýhody amorfních článků patří jejich velmi malá účinnost, která v důsledku stárnutí článků vyvolaného světlem v prvních 6 až 12 měsících ještě klesá. Amorfní články mají ve stabilizovaném stavu účinnost 5 až 7 %. [10]

5.3.2.2 CIGS články

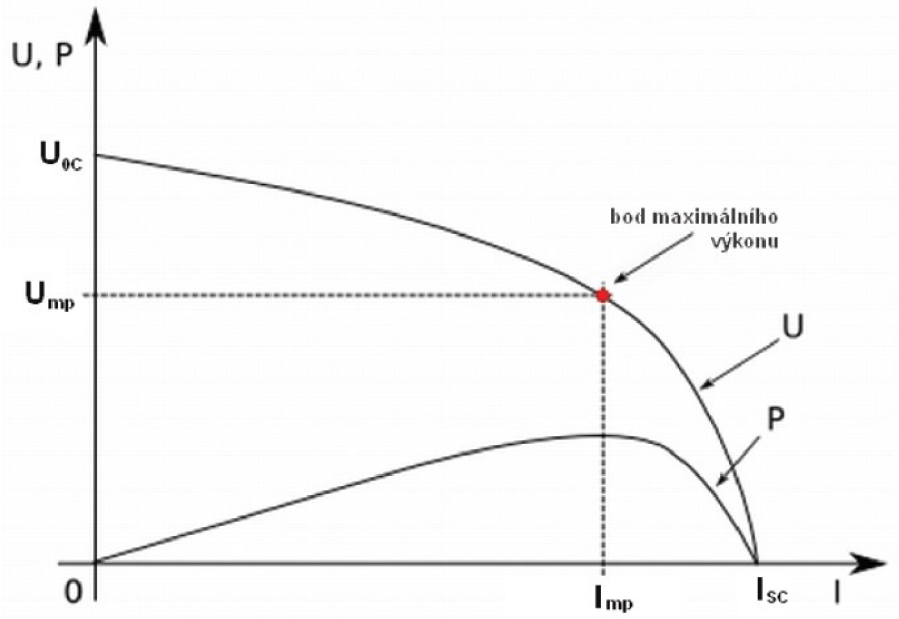
Tyto tenkovrstvé solární články jsou vyráběné tiskem fotocitlivé vrstvy v podobě inkoustu na velmi vodivou pružnou metalickou fólii. Polovodičový materiál CIGS je vytvořen z mědi (Copper), india (Indium), gallia (Gallium) a selenu (Selenium). Na rozdíl od křemíku zachycuje dopadající záření již v prvním mikrometru pod povrchem materiálu a může tak být tenký jen několik milimetrů. Článek je tvořen strukturami viz. obrázek 12, které se umísťují na podložku z molybdenem pokrytého skla, hliníku nebo nerezové oceli. V laboratorních podmínkách se povedlo dosáhnout 20,4% účinnosti. [9]



Obrázek 12- Solární článek CIGS [9]

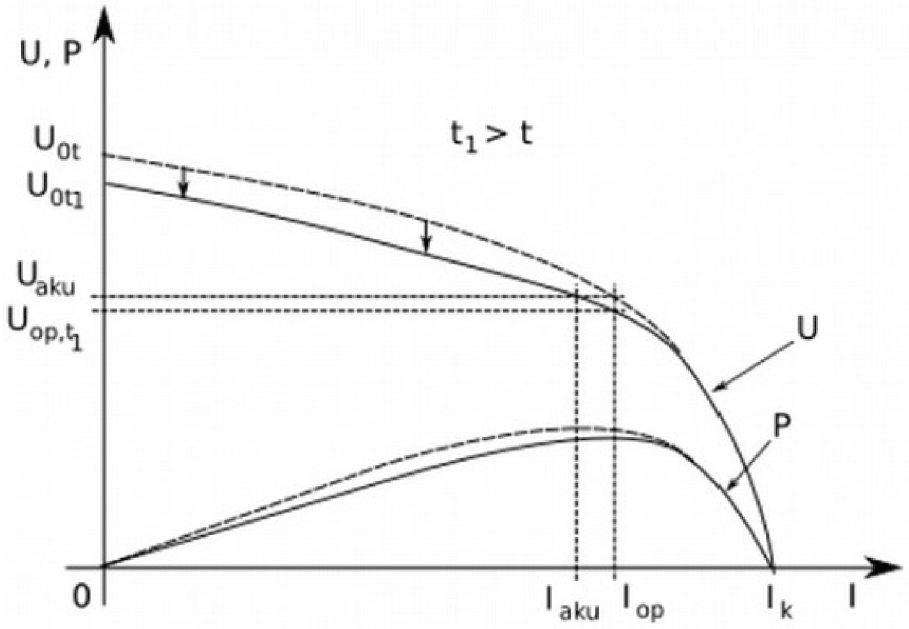
5.3.3 Voltampérová charakteristika FV článku

Voltampérová charakteristika FV článku zobrazuje základní parametry článku.

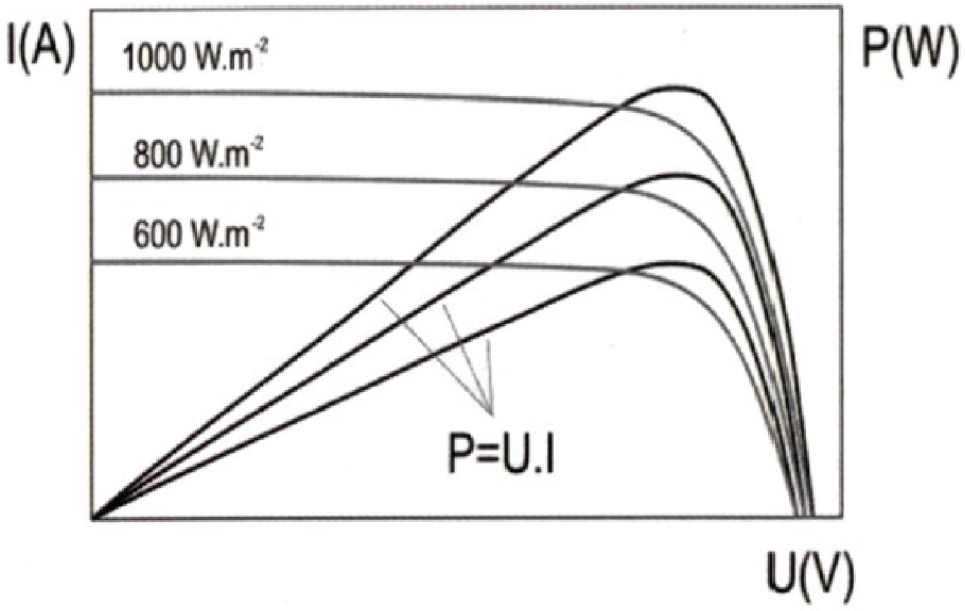


Obrázek 13- Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku [9]

Napětí naprázdno U_{0C} znázorňuje maximální možné napětí na článku v případě, kdy ke článku není připojen žádný spotřebič. Proud nakrátko I_{SC} znázorňuje maximální (zkratový) proud, který článek může dodávat. Bod maximálního výkonu (MPP) je pracovním bodem na charakteristice, při kterém je dosahovaný výkon největší. Výkon je dále závislý na intenzitě ozáření, jeho spektru a na teplotě článku. Například při bezvětří dosahuje povrchová teplota článku až 80°C. Zvýšením teploty se zvýší fotoproud, poklesne napětí naprázdno a dochází ke snížení zatěžovací charakteristiky tím i k nižšímu napětí. To způsobí pokles výkonu viz. obrázek 15, což je nežádoucí. Další faktory ovlivňující účinnost jsou intenzita záření a velikost sériového a paralelního odporu. Při malém sériovém odporu a s rostoucí intenzitou záření účinnost roste do maxima a až při velkých intenzitách záření klesá viz. Obrázek 16. Při velkém sériovém odporu, zejména u tenkovrstvých článků je průběh opačný.



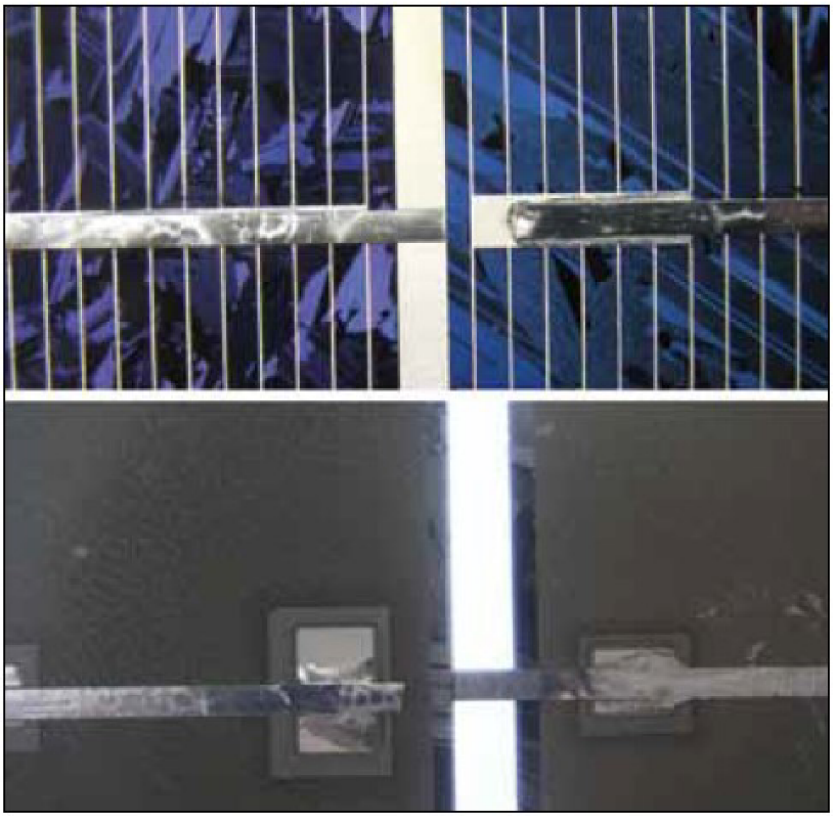
Obrázek 14- Vliv teploty na výkon FV článku[9]



Obrázek 15- Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [9]

5.4 Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely se skládají do sério-paralelní kombinací článků, aby při daném osvětlení poskytovaly požadované napětí a výkon. Hodnota celkového výkonu hlavně záleží na velikosti celkové plochy panelů. Nejklasičtější konstrukce fotovoltaických panelu je znázorněna na obr. 9: Na přední straně panelu se nachází temperované (tzv. kalené) sklo. Tato skla jsou velmi odolná proti nárazu a odolají i poměrně velkým kroupám. Na sklo se pokládá plastová EVA (etylvinylacetát) fólie a na ni se skládají propojené fotovoltaické články.[7]



Obrázek 16 - Detail sériového propojení FV článků[7]

Na obr. 16 můžeme sledovat detail sériového propojení fotovoltaického článků z přední i ze zadní strany, kovový pásek spojuje přední kontakt jednoho článku se zadním plošným kontaktem druhého článku. Přes články se po té znovu dává plastová EVA fólie a zadní stěnu tvoří zpravidla laminátová kompozice FVF-PET-FVF(polyvinylidenfluorid – polyetylénтereftalát-polyvinylidenfluorid). Poté se mezi těmito vrstvami vyčerpá vzduch a celý panel se zahřeje nad teplotu tání EVA fólie. Etylvinylacetát se díky teplotě rozteče a zalije FV články. Nakonec se panely rámují do hliníkových profilů a opatřují krabicí s výstupními kontakty. Takové FV panely jsou pak odolné proti vodě či jiným nečistotám. Životnost FV panelů pracujících na bázi krystalických polovodičů bývá 20 až 30 let. [7]

5.4.1 Bifaciální panel

V současnosti se objevuje v solárním průmyslu nový typ fotovoltaických panelů. Bifaciální solární panely jsou navrženy tak, aby byly schopné zachytit sluneční světlo jak na přední i zadní straně.[11]

Klasické solární panely zachycují sluneční světlo na jedné straně a solární energii, kterou nelze zachytit, jednoduše odrazí. Tohle, ale není případ bifaciálních solárních panelů. Tyto nové druhy panelů mají solární články na obou stranách. To umožňuje panelům absorbovat sluneční energii jak zezadu, tak i zepředu. Můžeme říct, že bifaciální solární panel může absorbovat světlo, které se odráží od země nebo jiného materiálu.[11]

Podle výzkumu při vhodném umístění, kdy jsou bifaciální články instalovány na místo s vysokou odrazivostí povrchu, mohou bifaciální články generovat až o 30% víc energie, která je generovaná druhou stranou těchto článků.[12]

Bifaciální moduly jsou na trhu v mnoha provedeních. Některé jsou orámované, zatímco jiné jsou bezrámové. Některé jsou z dvojitého skla a jiné používají jasné spodní listy. Většina používá monokrystalické buňky, ale existují i polykrystalické vzory. Jedna věc, která je konstantní, je, že energie je vyráběna z obou stran. Existují bezrámové moduly s dvojitým sklem, které odhalují zadní stranu buněk, ale nejsou bifaciální. Skutečné bifaciální moduly mají kontakty / přípojnice na přední i zadní straně buněk.[12]

Bifaciální solární panely disponují na rozdíl od klasických solárních panelů několika výhodami. Jako hlavní výhoda je to, že energii můžeme vyrábět z obou stran, což zvyšuje celkovou výrobu energie. Dále jsou odolnější, protože obě strany jsou odolné vůči UV záření a pokud je bifaciální modul bezrámový, jsou i sníženy ztráty způsobené degradací způsobené PID. Bifaciální panely také mají větší instalovaný výkon při podobné velikosti projektu. [13]

5.4.1.1 PID

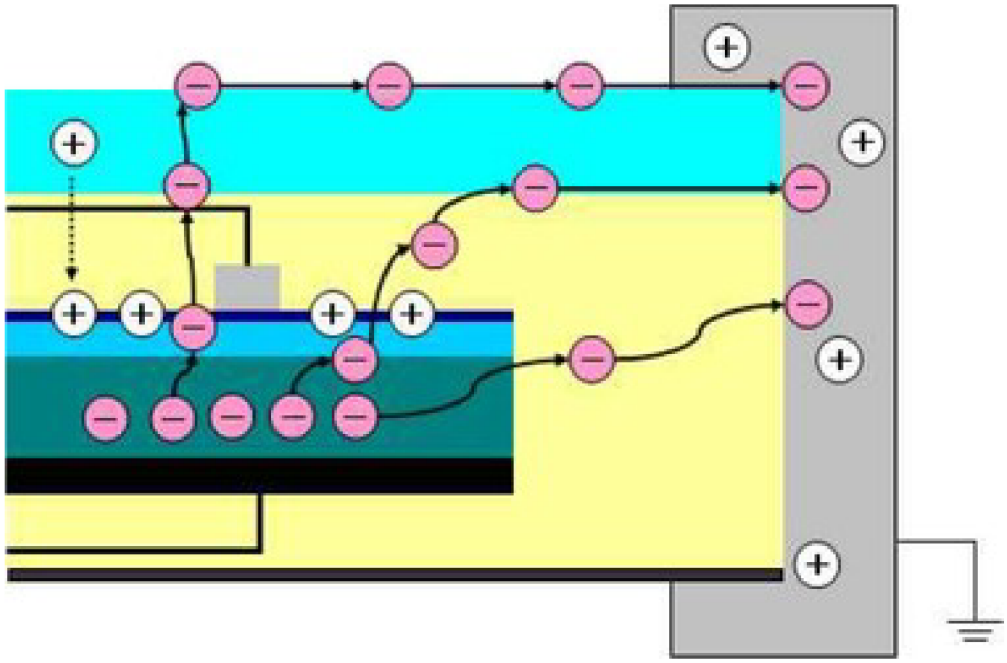
Zkratka PID vychází z anglického – potential induced degradation – Tato zkratka popisuje jev, kdy výstupní výkon z fotovoltaických článků klesá, jsou-li vystaveny vnějším vlivům, jako jsou vysoké teploty a vlhkost, přičemž uvnitř vnitřních okruhů (FV článků) a uzemněného rámu působí vysoké napětí. Bezprostřední příčinou PID u konvenčních krystalických křemíkových FV článků je akumulace elektrického náboje poblíž izolační vrstvy u povrchu FV článků.[14]

5.4.1.2 Prevence a regenerace PID

Zabránit vlivům PID na FV elektrárnu můžeme předejít při uzemnění jednoho z pólů generátoru v závislosti na typu panelu. Toto řešení má však výrazná omezení a změna neuzemněné soustavy na uzemněnou představuje také zvýšená bezpečnostní rizika. Je potřeba počítat s nutností periodických měření izolačních stavů. Některé elektrárny se jako uzemněné provozovat nemohou. [14]

Jako nejefektivnější se v současné době jeví instalace speciálního zařízení mezi měnič a fotovoltaické panely. Principem řešení je změna polarity zapojených panelů, čímž dojde k rychlé regeneraci postižených panelů. Pokud je toto zařízení umístěno na elektrárnu trvale, je problém PID tímto opatřením řešen po celou dobu životnosti FV elektrárny.[14]

5.4.1.3 Příčiny vzniku PID



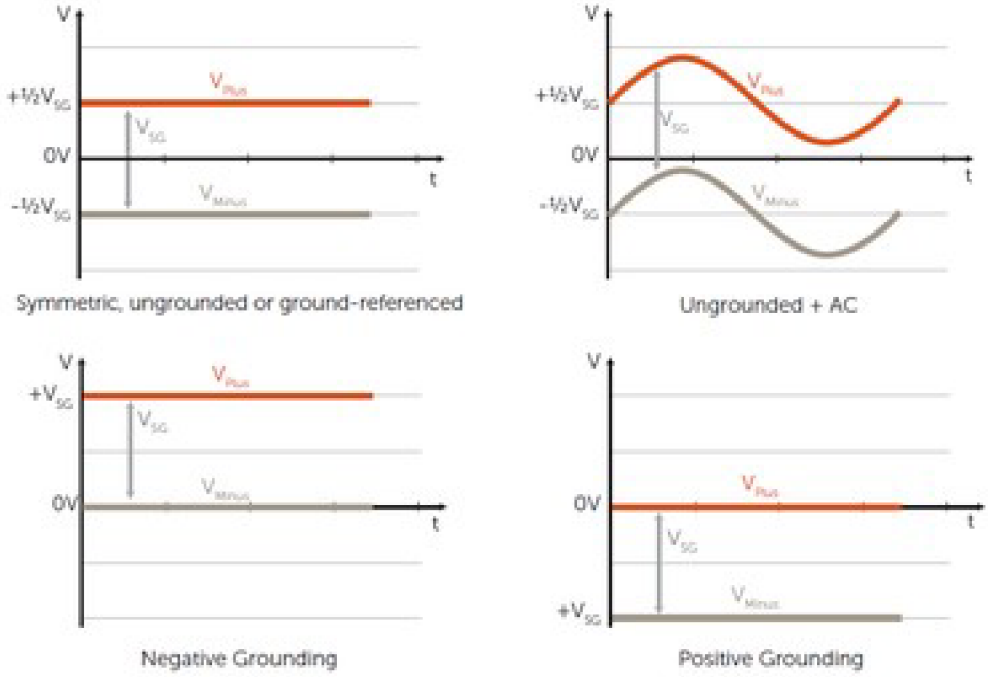
Obrázek 17 -Svodový proud je způsoben napěťovým potenciálem a způsobují jej negativní (−) (fialová) ionty migrující od polovodičů a pozitivní (+), (bílá) ionty migrující z obalu skla a polovodičů a vnějšího prostředí. [15]

Už podle názvu můžeme konstatovat, že k potenciální indukované degradaci dochází díky napětí v modulu a svodovému proudu tvořeného ionty procházejícími mezi polovodičový materiál a dalšími prvky modulu (např. sklo, rám, konstrukce). Toto máme znázorněno na obrázku 1, což způsobuje snižování výstupního výkonu. Mobilita iontů se zrychluje s rostoucí vlhkostí, teplotou a napěťovým potenciálem.[15]

5.4.1.4 Faktory životního prostředí

Urychlení degradačního efektu způsobeného PIDem způsobuje vysoká teplota a vlhkost. Bylo zjištěno, že nízké teploty a vlhkost dokáží pomoci s regenerací modulů zasažených PIDem [6]. Vzhledem k tomu, že vliv prostředí nelze ovlivnit, tak regeneraci panelů je potřeba řešit systémově.[15]

5.4.1.5 Systémové faktory



Obrázek 18 - Napěťový potenciál závisí na systému uzemnění, což může mít tyto čtyři základní klasifikace.[15]

Hlavními faktory jsou napětí ve stringu, pozice panelu ve stringu a systém uzemnění stringu. Standartně se můžeme setkat se čtyřmi variantami uzemnění.[15]

Na obrázku 18 můžeme vidět, že napětí se může lišit v závislosti na zemnicí topologii. PID je hlavně spojován s negativním napětím vůči zemi, i když například u panelů SunPower byl PID dokumentován i v případě uzemnění kladného pólu.[15]

Výzkum ukázal, že závislost napětí může mít kapacitní účinky. Iontové migrace způsobené určitou elektrickou silou v závislosti na velikosti napětí ve stringu vede k nasycení elektrického náboje se zachováním všech sil v termodynamické rovnováze. Tyto elektrické náboje ovlivňují polovodivé vlastnosti bez ohledu na úroveň napětí samotného degradačního procesu modulu.[15]

5.5 Souhrn kapitoly

Nejčastěji se setkáváme s fotovoltaickými panely, které jsou na bázi křemíku, ať už monokrystalické, polykrystalické či amorfní na bázi tenkých vrstev. Křemík má řadu výhod. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších prvků na Zemi. Z toho vyplívá, že je docela levný, je snadno dostupný, není jedovatý a patří mezi nejvíce využívané a asi i nejlépe prozkoumané polovodiče.

Fotovoltaické panely, které jsou založené na jiných bázích lze rozdělit do dvou skupin. Jedny jsou levnější a mají také podstatně menší účinnost přeměny energie, například fotovoltaické panely na bázi organických polymerních vrstev či nanovláken. Druhé mají lepší účinnost přeměny energie, ale za to jsou mnohem dražší. Tyto panely se využívají ke zvláštním účelům, například fotovoltaické panely na bázi GaAs, které používáme ve vesmíru.[7]

Fotovoltaický článek můžeme popsat jako velkoplošnou polovodičovou diodou s PN přechodem. Difúze příměsí donorů či akceptorů do materiálu polovodiče pro vytvoření přechodu PN se odehrává v difúzních pecích. Článek má z přední strany vytvořenou antireflexní úpravu povrchu kvůli minimalizaci odrazu. Tato úprava slouží k tomu, aby se využilo maximum dopadajícího záření. [7]

Tlustovrstvé fotovoltaické články můžeme rozdělit na dva základní typy a to jsou monokrystalické a polykrystalické. V současnosti se vyrábějí dva druhy velikostí o rozměru strany přibližně 15 cm a 20 cm. Jejich tloušťka bývá kolem cca 0,2 mm. S rostoucí velikostí solárního článku stoupá proud, zatímco napětí zůstává konstantní. Napětí FV článku bývá kolem 0,6 - 0,7 V. [8]

U tenkovrstvých článků jsou výrobní náklady a spotřeba materiálu podstatně nižší než u tlustovrtvých, mají také kratší dobu energetické návratnosti. Tenkovrstvá technologie má mnoho různých specifických vlastností například menší citlivost na teplotu a zastínění, ohebnost, lepší využití spektra slunce, různé rozměry a tvary, možná průhlednost materiálu, homogenní vzhled, možnost integrace a použití umělého světla. Nejvýznamnější je však automatizovaná výroba, která je jednodušší než u křemíkových destiček. [9]

Amorfní články patří do tenkovrstvé technologie. Články jsou vyráběny z amorfního křemíku. Malé amorfní články můžeme najít například v kapesních počítačích, hodinkách, kapesních svítilnách atd. Amorfní moduly se stále častěji používají i ve velkých FV zařízeních [10]

Fotovoltaické panely se skládají do sério-paralelní kombinací článků, aby při daném osvětlení poskytovaly požadované napětí a výkon. Hodnota celkového výkonu hlavně záleží na velikosti celkové plochy panelů.[7]

Klasické solární panely zachycují sluneční světlo na jedné straně a solární energii, kterou nelze zachytit, jednoduše odrazí. Tohle, ale není případ bifaciálních solárních panelů. Tyto nové druhy panelů mají solární články na obou stranách. To umožňuje panelům absorbovat sluneční energii jak zezadu, tak i zepředu. Můžeme říct, že bifaciální solární panel může absorbovat světlo, které se odráží od země nebo jiného materiálu.[11]

Zkratka PID vychází z anglického – potential induced degradation – Tato zkratka popisuje jev, kdy výstupní výkon z fotovoltaických článků klesá, jsou-li vystaveny vnějším vlivům, jako jsou vysoké teploty a vlhkost, přičemž uvnitř vnitřních okruhů (FV článků) a uzemněného rámu působí vysoké napětí. Bezprostřední příčinou PID u konvenčních krystalických křemíkových FV článků je akumulace elektrického náboje poblíž izolační vrstvy u povrchu FV článků.[14]

Zabránit vlivům PID na FV elektrárnu můžeme instalací speciálního zařízení mezi měnič a fotovoltaické panely. Principem řešení je změna polarity zapojených panelů, čímž dojde k rychlé regeneraci postižených panelů. Pokud je toto zařízení umístěno na elektrárnu trvale, je problém PID tímto opatřením řešen po celou dobu životnosti FV elektrárny.[14]

6 VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A MODULŮ

Současný vývoj ukazuje, že krystalický křemík bude stále patřit k nejdůležitějším materiálům pro výrobu fotovoltaických článků. A to minimálně v nejbližších letech. Krystalický křemík zůstává nejdůležitější díky pokračujícímu snižování cen vstupního materiálu, snižování energetické náročnosti a dalšímu zdokonalování technologie a s ohledem na vysokou spolehlivost a životnost modulů s články z krystalického křemíku. Také se budeme dále spoléhat na tenkovrstvou technologii, a to jak na bázi amorfního křemíku (případně Si-Ge), tak na bázi CdTe, nebo CIS. Podíl tenkovrstvých modulů na celkové produkci může dosáhnout v následujících pěti letech až 25%. Zároveň probíhá intenzivní vývoj a výzkum dalších technologií fotovoltaických článků a modulů, jako jsou

- články s vícenásobnými pásy
- články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jámách
- organické články
- Grätzlovy články (články na bázi nanočástic TiO2).

Výše uvedené technologie jsou velmi perspektivní a to hlavně z hlediska budoucích možností realizace velmi levných fotovoltaických článků a modulů. Tyto technologie jsou však v současné době stále ještě ve stádiu výzkumu, nebo vývoje. Nemůžeme tedy v nejbližších letech očekávat výraznější rozšíření těchto technologií. Z hlediska dlouhodobého vývoje můžeme fotvoltaické články rozdělit následovně: [1]

6.1 Články první generace

Jedná se o FV články z desek monokrystalického křemíku, které společně tvoří PN přechod. FV články první generace se prodávají už od sedmdesátých let minulého století až do dnes. Články první generace tvoří asi 90% trhu. Jsou známi velmi dobrou životností při zachování stejné účinnosti. Účinnost se v sériové výrobě pohybuje od 14% do 17%. Při výrobě pro laboratorní účely, může účinnost dosahovat až 25 %. Nevýhodou je to, že pro výrobu se musí používat velké množství velmi čistého křemíku. [1]

6.2 Články druhé generace

U této generace dochází k velkému snížení množství čistého křemíku. Také se začínají využívat i jiné prvky než křemík. Nejčastěji se jedná o záměnu polykrystalickým s amorfním křemíkem s podstatně tenčí vrstvou oproti předchozí generaci a to až 1000krát. Snížení množství křemíku negativně ovlivňuje účinnost panelu (okolo 10%). Naopak jeho výhodou je zlepšení mechanických vlastností, zejména pružnosti. [1]

6.3 Články třetí generace

Na této generaci článků probíhají stále intenzivní výzkumné práce. Jedná se zde o maximální využití energie dopadajících fotonů slunečního záření, nejčastěji ve formě několikanásobných

přechodů tenkých vrstev. Probíhá zde také snaha o použití jiné metody oddělování nábojů, než PN přechody. Fotoelektrochemické (fotogalvanické) články nebo použití nanostrukturve formě uhlíkových tyček a trubiček, nebo kvantových teček nanesených na vhodné podložky. Cíleně je zde pak možné ovlivňovat elektrické a optické vlastnosti pro nejefektivnější využití. [1]

6.4 Články čtvrté generace

Posledním vývojovým stupněm rozumíme vícevrstvé profily plně využívající širokého slunečního spektra. Vrstvení profilů je založeno na principu naladění vrstev na různé vlnové délky. Při dopadu slunečního záření na vrstvu, která ho nedokáže využít, pak dochází k propuštění záření k vrstvě, jejíž vlnová délka odpovídá vhodnému využití.[1]

6.5 Souhrn kapitoly

Současný vývoj ukazuje, že krystalický křemík bude stále patřit k nejdůležitějším materiálům pro výrobu fotovoltaických článků. Také se budeme dále spoléhat na tenkovrstvou technologii, a to jak na bázi amorfního křemíku (případně Si-Ge), tak na bázi CdTe, nebo CIS. Zároveň probíhá intenzivní vývoj a výzkum dalších technologií fotovoltaických článků a modulů, jako jsou

- články s vícenásobnými pásy
- články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jámách
- organické články
- Grätzlovy články (články na bázi nanočástic TiO2). [1]

Články první generace jsou FV články z desek monokrystalického křemíku, které společně tvoří PN přechod. Články první generace tvoří asi 90% trhu. Jsou známi velmi dobrou životností při zachování stejné účinnosti. Účinnost se v sériové výrobě pohybuje od 14% do 17%. Nevýhodou je to, že pro výrobu se musí používat velké množství velmi čistého křemíku. [1]

U článků druhé generace dochází k velkému snížení množství čistého křemíku. Také se začínají využívat i jiné prvky než křemík. Nejčastěji se jedná o záměnu polykrystalickým s amorfním křemíkem s podstatně tenčí vrstvou oproti předchozí generaci a to až 1000krát. Snížení množství křemíku negativně ovlivňuje účinnost panelu (okolo 10%). Naopak jeho výhodou je zlepšení mechanických vlastností, zejména pružnosti. [1]

Na třetí generaci článků se stále intenzivně pracuje. Jedná se zde o maximální využití energie dopadajících fotonů slunečního záření, nejčastěji ve formě několikanásobných přechodů tenkých vrstev. Probíhá zde také snaha o použití jiné metody oddělování nábojů, než PN přechody. Fotoelektrochemické (fotogalvanické) články nebo použití nanostrukturve formě uhlíkových tyček a trubiček, nebo kvantových teček nanesených na vhodné podložky. Cíleně je zde pak možné ovlivňovat elektrické a optické vlastnosti pro nejefektivnější využití. [1]

Články čtvrté generace jsou články využívající vícevrstvé profily plně využívající širokého slunečního spektra. Vrstvení profilů je založeno na principu naladění vrstev na různé vlnové délky. Při dopadu slunečního záření na vrstvu, která ho nedokáže využít, pak dochází k propuštění záření k vrstvě, jejíž vlnová délka odpovídá vhodnému využití.[1]

7 ROZDĚLENÍ TYPŮ ZAPOJENÍ FV ELEKTRÁREN

Fotovoltaické elektrárny, které jsou vystaveny slunečnímu záření se neskládají pouze z fotovoltaických panelů. Aby FV systémy byly schopné dodat proud do spotřebičů jsou k tomu potřeba další prvky jakými jsou baterie měnič, regulační zařízení a další. Tato sestava modulů, spotřebičů a dalších prvků se nazývá fotovoltaický systém, který můžeme skládat podle účelu využití.[16]

7.1 Síťová fotovoltaická elektrárna (On-grid)

On-grid FVE funguje souběžně s distribuční soustavou. To znamená, že vyráběná energie z FVE jde přes hlavní domovní rozvaděč. Z rozvaděče jsou napájeny v té době zapnuté spotřebiče a případný přebytek energie přetéká do distribuční soustavy. Tento princip funguje i opačným způsobem. V případě potřeby většího množství odebírané energie zapnutými spotřebiči, než vyrábí FVE, je energie dočerpána z DS a je tak možno bez omezení používat i výkonné spotřebiče.[16]

On-grid fotovoltaickou elektrárnu můžeme dle zákona instalovat jen tehdy, pokud máme povolení distributora o připojení zařízení do DS. Síťová (On-grid) elektrárna je bez bateriového uložiště, přebytky poté dodává do distribuční soustavy, případně do ohřevu vody.[16]

7.2 Hybridní fotovoltaická elektrárna (HFVE)

Mezníkem v cestě k nezávislosti je systém tzv. hybridních elektráren. Jde vlastně o rozšíření standartních on-grid systémů o záložní bateriový systém, do kterého se ukládají přebytky vyrobené energie. Takto uložená energie se pak může využívat při nedostatečném záření. Při vybití baterií pod definovanou úroveň nebo při vyšší spotřebě si hybridní střídač "dobírá" energii přímo ze sítě. Odběr ze sítě je ovšem minimální a při jejím výpadku se systém automaticky přepne do ostrovního režimu. Pro instalaci HFVE není třeba smlouva s ČEZ / PRE / EON, protože lze zcela zamezit přetokům ven do sítě. (Přesto je třeba splnit určité podmínky). Díky bateriím využijete 100% vyrobené energie a na ostrovní provoz můžete přejít kdykoliv – stáváte se prakticky nezávislými.[17]

Výhody oproti standardní instalaci FVE:

- není bezpodmínečně nutný souhlas distributora (ČEZ, EON, PRE)
- lze využít 100% vyrobené energie (při zanedbání ztrát v bateriích)
- nulové přebytky dodávané do sítě
- optimalizace výroby – akumulace – spotřeby – odběru ze sítě
- okamžitý přechod na ostrovní provoz při výpadku vnější sítě – nezávislost!
- v budoucnu možnost dobíjení baterií v nízkém tarifu a vybíjení ve špičkách[17]

7.3 Ostrovní fotovoltaická elektrárna (Off-grid)

Ostrovní fotovoltaický systém, někdy označovaný také jako off-grid, je typický tím, že není připojený do distribuční sítě a obsahuje baterie. Off-grid je vhodné využít na místech, kde není přístup k rozvodné síti, nebo kde by vybudování elektrické přípojky znamenalo vynaložení vysokých nákladů.[18]

Malinké ostrovní systémy můžeme vidět například na solárních lampách, dopravních značkách či směrových sloupcích. Sofistikované ostrovní systémy pro napájejí budov nebo osad mohou být využívány v odlehlých oblastech, kam není zavedena elektřina.[18]

7.4 Souhrn kapitoly

On-grid FVE funguje souběžně s distribuční soustavou. To znamená, že vyráběná energie z FVE jde přes hlavní domovní rozvaděč. Z rozvaděče jsou napájeny v té době zapnuté spotřebiče a případný přebytek energie přetéká do distribuční soustavy. V případě potřeby většího množství odebírané energie zapnutými spotřebiči, než vyrábí FVE, je energie dočerpána z DS a je tak možno bez omezení používat i výkonné spotřebiče.[16]

Mezníkem v cestě k nezávislosti je systém tzv. hybridních elektráren. Jde vlastně o rozšíření standartních on-grid systémů o záložní bateriový systém, do kterého se ukládají přebytky vyrobené energie. Při vybití baterií pod definovanou úroveň nebo při vyšší spotřebě si hybridní střídač “dobírá” energii přímo ze sítě. Odběr ze sítě je ovšem minimální a při jejím výpadku se systém automaticky přepne do ostrovního režimu. Pro instalaci HFVE není třeba smlouva s ČEZ / PRE / EON, protože lze zcela zamezit přetokům ven do sítě. (Přesto je třeba splnit určité podmínky). Díky bateriím využijete 100% vyrobené energie a na ostrovní provoz můžete přejít kdykoliv – stáváte se prakticky nezávislými.[17]

Ostrovní fotovoltaický systém, někdy označovaný také jako off-grid, je typický tím, že není připojený do distribuční sítě a obsahuje baterie. 18]

8 MĚNIČE

Měnič patří k hlavním prvkům každého systému. Můžeme říct, že nejvíce ovlivňuje míru úspory dosaženou zakoupením FV systému. Měniče můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

8.1 Sítové měniče

Tento typ měničů vždy dodává elektřinu z panelů či baterie do tzv. „živé“ linky. Tento druh měničů pouze mísí vyrobenou elektřinu do elektřiny proudící do domu z distribuční sítě. Pro použití těchto měničů tedy potřebujeme přístup do distribuční sítě a také neustálý odběr ze sítě. Tento permanentní odběr se zpravidla pohybuje okolo cca 100 W trvalého odběru 24 hodin denně. Vzniká tu problém, že i v při situaci, kdy máme úplně nabité baterie a plnou sluneční výrobu a dům spotřebovává například 300 W je pouze 200 W spotřebováno z vlastního zdroje a zbylou elektřinu musíme dodat ze sítě. Přes noc, když spotřeba domu spadne často na úroveň okolo 100 W, zejména přes léto si systém z baterií, které se přes dne nabily, neodebere téměř nic, jelikož potřebuje pro svůj chod odebírat elektřinu ze sítě. [19]

Tento druh měničů je hodně používaný zejména velkými korporacemi, které nemají až tak velký zájem na tom abychom neodebírali elektřinu ze sítě, nicméně pro použití v rodinných domech je ten typ měničů méně vhodné řešení. Tyto moduly nepřináší maximální možnou úsporu. Jako další nevýhodou tohoto typu měničů je malá funkčnost backup módu, tedy situace, kdy zcela vypadne veřejná síť a dům by měl být napájen pouze z FV systému. Buď tento mód úplně chybí, nebo je omezena na malé množství spotřebičů a napájení pak probíhá jen částečně u několika vybraných zařízení v domě. Je to dáno samotnou konstrukcí těchto zařízení, která není stavěná na větší zátěže a případná krátkodobá přetížení. O výkonové špičky se stará veřejná síť a tedy Vaše peněženka, měnič jen přidá dle svého uvážení něco z elektřiny k již stávajícímu toku z veřejné sítě.[19]

U síťových měničů, vzhledem k již popsanému řešení je velmi těžké zabránit nechtěným přetokům energie do veřejné sítě, a pokud je takový zdroj připojen k distribuční soustavě v režimu tzv. mikrozdroje bez přetoků, je jeho majitel často nevědomky vystaven pokutě od distributora za takovouto neoprávněnou dodávku do veřejné sítě.[19]

8.2 Ostrovní měniče

Tento typ měničů je sestrojen pro použití bez veřejné sítě. Ostrovní měniče se vždy snaží primárně spotřebovávat energii z vlastních zdrojů, tedy z baterie a solárních panelů. Ostrovní měniče ke svému provozu distribuční síť nepotřebují a pokud je dostatek energie ve fotovoltaickém systému jsou měniče od distribuční sítě galvanicky odpojené. Galvanické odpojení je fyzické přerušení vedení mezi distribuční sítí a domovním rozvodem. Díky tomuto odpojení nemůže dojít k žádným ani minimálním odběrům ze sítě. K odběrům ze sítě dochází v případě nedostatků energie, či výkonových špiček nad jeho možnosti. Tento typ měničů pracuje s vyrobenou energií mnohem lépe a je tedy pro dům výrazně lepší. Jako další výhoda těchto měničů je jejich velká odolnost proti krátkodobému přetížení, neodbornou manipulací ze strany

uživatele atd… Z principu se předpokládá, že tato zařízení jsou instalována v náročných podmínkách arktických expedičních táborů, pouštních oázách a všude tam, kde se veřejná energie nedostává. Jsou tedy mnohem odolnější a trvanlivější než měniče síťové. [19]

8.3 Souhrn kapitoly

Síťové měniče vždy dodávají elektřinu z panelů či baterie do tzv. „živé“ linky. Tento druh měničů pouze mísí vyrobenou elektřinu do elektřiny proudící do domu z distribuční sítě. Pro použití těchto měničů tedy potřebujeme přístup do distribuční sítě a také neustálý odběr ze sítě. [19]

U síťových měničů, vzhledem k již popsanému řešení je velmi těžké zabránit nechtěným přetokům energie do veřejné sítě, a pokud je takový zdroj připojen k distribuční soustavě v režimu tzv. mikrozdroje bez přetoků, je jeho majitel často nevědomky vystaven pokutě od distributora za takovouto neoprávněnou dodávku do veřejné sítě.[19]

Ostrovní měniče se používají bez veřejné sítě. Ostrovní měniče se vždy snaží primárně spotřebovávat energii z vlastních zdrojů, tedy z baterie a solárních panelů. Ostrovní měniče ke svému provozu distribuční síť nepotřebují a pokud je dostatek energie ve fotovoltaickém systému jsou měniče od distribuční sítě galvanicky odpojené. Galvanické odpojení je fyzické přerušení vedení mezi distribuční sítí a domovním rozvodem. Díky tomuto odpojení nemůže dojít k žádným ani minimálním odběrům ze sítě. K odběrům ze sítě dochází v případě nedostatků energie, či výkonových špiček nad jeho možnosti. [19]

9 LEGISLATIVA PODPORY OZE

Energie z fotovoltaických elektráren patří do obnovitelných zdrojů. Podnikání v energetických odvětvích a podporu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů řeší zákony č. 458/2000 Sb. a č. 180/2005 Sb. společně s vyhláškami Energetického regulačního úřadu ERÚ.

Zákon č. 458/2000 Sb., Energetický zákon, který pojednává o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů.

Zákon č. 180/2005 Sb.,Tento zákon pojednává o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů.[20]

9.1 Formy podpory výkupu elektrické energie z obnovitelných zdrojů

V České republice se výkup elektrické energie z obnovitelných zdrojů řídí zákonem č. 180/2005 Sb. a vyhlášky Energetického regulačního úřadu. Zmíněný zákon popisuje dva druhy podpory:

- podpora formou výkupních cen
- podpora formou zelených bonusů[21]

9.1.1 Podpora formou výkupních cen

V případě využití podpory na energii z obnovitelných zdrojů ve formě výkupních cen má provozovatel regionální distribuční soustavy nebo provozovatel přenosové soustavy povinnost od výrobce elektřiny z obnovitelných zdrojů vykoupit veškerý objem vyrobené elektřiny z daného zdroje. Tedy veškerá vyrobená elektrická energie z fotovoltaického systému je dodávána do distribuční soustavy. Výkup vyrobené elektřiny se řídí výkupní cenou stanovenou Energetickým regulačním úřadem platnou v roce uvedení výrobny do provozu a je uplatňována po dobu její životnosti. Předpokládaná doba životnosti nové výrobny je 20 let. Zákon také hovoří o každoročním navyšování výkupní ceny o index cen průmyslových výrobců (průmyslová inflace) o 2-4%. To znamená, že výkupní cena platná v roce uvedení výrobny elektřiny do provozu bude každým rokem navyšována minimálně o 2%, avšak maximálně o 4%.[21]

9.1.2 Podpora formou zelených bonusů

Při podpoře formou zelených bonusů si musí výrobce energie sám najít svého odběratele, kterému svou produkci prodá. Může to být přímo konečný spotřebitel nebo obchodník s elektřinou. V tomto případě se cena skládá z položky, za kterou výrobce svou elektřinu prodá svému odběrateli a z takzvaného zeleného bonusu. Zelený bonus se dá popsat jako prémie za to, že elektrická energie byla vyrobena z obnovitelného zdroje a vyplácí jej regionální provozovatel distribuční soustavy. Zelený bonus je stejně jako výkupní cena uplatňován po dobu životnosti výrobny, tedy 20 let a jeho výši stanovuje Energetický regulační úřad. Výše zeleného bonusu je garantována po dobu jednoho roku. [21]

U malých elektráren je výkup formou zelených bonusů vhodný z toho důvodu, že výrobce může být zároveň i odběratelem a vyrobenou elektřinu sám spotřebovat. I v takovém případě má nárok na vyplacení zeleného bonusu. Výrobce tedy ušetří za nenakoupenou elektřinu od svého dodavatele a ještě k tomu je mu vyplácena tato prémie. [21]

Pokud je odběratelem vyrobené elektrické energie sám výrobce, je připojení výrobny méně komplikované než u podpory formou výkupních cen, nebo při prodeji obchodníkovi s elektrickou energií, protože se připojuje přímo do rozvodů objektu. [21]

Měření objemu vyrobené elektrické energie, na základě, kterého se fakturuje zelený bonus, se měří nezávislým cejchovaným elektroměrem v místě elektrárny, elektrárna se tedy nemusí propojit s elektroměrovým rozvaděčem na hranici vlastnictví. V případě že vlastní spotřeba objektu nedosahuje výkonu výrobny, jsou provozovatelé distribuční soustavy většinou ochotni přebytky vykupovat i když to není jejich povinnost, a proto při připojení výrobny do distribuční sítě vymění stávající elektroměr za čtyřkvadrantní, který je schopen měřit dodávku i odběr.[21]

9.2 Daně

Používání FVE se charakterizuje jako podnikání podle zvláštního předpisu. Pro provoz je potřeba vlastnit „licenci pro podnikání v energetických odvětvích“. Tato licence povoluje podnikání v tomto oboru. Licence se podobá živnostenskému listu a vydává ji Energetický regulační úřad.[20]

Provozování fotovoltaické elektrárny vytváří příjmy z podnikání. Tyto příjmy jsou předmětem daně z příjmu, tudíž je nutné podat daňové přiznání a zaplatit vypočtenou daň.

9.2.1 Odpisy

Fotovoltaická elektrárna jako celek patří do odpisové skupiny č.4 – Stavby elektráren(díla energetická výrobní) SKP 2302 s dobou odpisu 20 let.[20]

9.2.2 Daň z přidané hodnoty

U provozování elektráren na rodinných, bytových domech atd platí § 48 zákona o dani z přidané hodnoty. Platí tu snížená 14% sazba DPH a to jak na montážní práce, tak na samotné technické prostředky fotovoltaické elektrárny.[20]

Kromě daňového přiznání musí plátce dodat také přehled příjmů Okresní správě sociálního zabezpečení a na svoji zdravotní pojišťovnu.[20]

9.2.3 Zdravotní pojištění

U zdravotního pojištění se rozlišuje, zda provozování FVE je pro OSVČ příjmem hlavním nebo vedlejším.

- Při provozu FVE jako hlavní zdroj přijmu. Musí provozovatel elektrárnyplatit buďto minimální pojistné, nebo pojistné vypočítané podle vzorce. Měsíční zálohy pojistného se pak stanoví jako 1/12 ročního pojistného.

- Při provozu FVE jako vedlejší zdroj přijmu. Provozovatelé platí jenom pojistné podle výše uvedeného vzorce, minimální pojistné se na tyto provozovatele nevztahuje.[20]

9.2.4 Sociální pojištění

Se sociálním pojištěním je to jako u zdravotního pojištění, také se rozlišuje, zda je fotovoltaická elektrárna provozována buď jako hlavní, nebo vedlejší příjem.

- Při provozu fotovoltaické elektrárny jako hlavní zdroj příjmu pak platí minimální pojistné, případně pojistné vypočítané podle vzorce výše, podle toho, která částka je vyšší. Měsíční zálohy pojistného se pak stanoví jako 1/12 ročního pojistného.
- Při provozu fotovoltaické elektrárny jako vedlejší zdroj příjmů se platí pouze pojistné podle výše uvedeného vzorce, a to pouze tehdy, pokud v daném roce podnikatelův základ daně (příjmy - výdaje) dosáhl alespoň částku 60.329 Kč (2012). Jinak se sociální pojistné platit nemusí.[20]

9.3 Souhrn kapitoly

V České republice se výkup elektrické energie z obnovitelných zdrojů řídí zákonem č. 180/2005 Sb. a vyhlášky Energetického regulačního úřadu. Zmíněný zákon popisuje dva druhy podpory a to podporu formou výkupních cen. [21]

V případě využití podpory na energii z obnovitelných zdrojů ve formě výkupních cen má provozovatel regionální distribuční soustavy nebo provozovatel přenosové soustavy povinnost od výrobce elektřiny z obnovitelných zdrojů vykoupit veškerý objem vyrobené elektřiny z daného zdroje. Výkup vyrobené elektřiny se řídí výkupní cenou stanovenou Energetickým regulačním úřadem platnou v roce uvedení výrobny do provozu a je uplatňována po dobu její životnosti. Předpokládaná doba životnosti nové výrobny je 20 let. Zákon také hovoří o každoročním navyšování výkupní ceny o index cen průmyslových výrobců (průmyslová inflace) o 2-4%. [21]

Při podpoře formou zelených bonusů si musí výrobce energie sám najít svého odběratele, kterému svou produkci prodá. Zelený bonus se dá popsat jako prémie za to, že elektrická energie byla vyrobena z obnovitelného zdroje a vyplácí jej regionální provozovatel distribuční soustavy. Zelený bonus je stejně jako výkupní cena uplatňován po dobu životnosti výrobny, tedy 20 let a jeho výši stanovuje Energetický regulační úřad. Výše zeleného bonusu je garantována po dobu jednoho roku. [21]

Měření objemu vyrobené elektrické energie, na základě, kterého se fakturuje zelený bonus, se měří nezávislým cejchovaným elektroměrem v místě elektrárny, elektrárna se tedy nemusí propojit s elektroměrovým rozvaděčem na hranici vlastnictví. [21]

10 FIREMNÍ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA

10.1 Popis FVE

Tato práce se zabývá fotovoltaickou elektrárnou umístěnou na střeše budovy, která je situována v Brně – Židenicích. Fotovoltaická elektrárna byla vybudována na přelomu roku 2012 a 2013

Obrázek 19 - Pohled na FVE

Obrázek 20 – Firemní objekt

10.1.1 Fotovoltaické panely

Vyrobená elektrická energie se používá pro spotřebu objektu, přebytek energie se poté prodává do distribuční sítě nn firmy E.ON Distribuce, a. s. Fotovoltaická elektrárna se skládá z pevných tenkovrstvých solárních panelů CONERGY PowerPlus 235 o špičkovém výkonu 235 Wp. Počet panelů, které tvoří FVE je 84 kusů. Celkový špičkový výkon fotovoltaické elektrárny je 19,74 kWp. Jednotlivé panely jsou rozděleny do šesti stringů a to 6x po 14 panelech. Panely jsou pevně připevněny na hliníkových profilech, které tvoří nosný rám. Rám je uchycen pomocí montážních svorek ke střeše. Panely jsou pospojovány do jednotlivých stringů pomocí vodičů XLS6 a jsou vedeny do rozvaděčů R-DC, tyto rozvaděče jsou umístněny na stěně suterénu. Kabely ze solárního pole, které vedou k rozvaděčům R-DC jsou svedeny po východní stěně vně budovy.

Obrázek 21 - Střešní pohled na FVE

10.1.2 Rozvaděč R-DC

Dva rozvaděče R-DC jsou umístěny na stěně suterénu domu. Přesné umístění je viditelné na obrázkách, které jsou označeny jako příloha C a D. V rozvaděči je každý string jištěn samostatně. Velikost napětí na DC straně při provozu je závislá ne intenzitě dopadajícího slunečního záření. V rozvaděči jsou instalované pojistky a přepěťové ochrany.

10.1.3 Střídače

Součástí elektrárny jsou i dva střídače Sunways NT 10000, které mají maximální výstupní výkon 10 kW. Střídače jsou stejně jako R-DC umístěny v suterénu objektu.

Obrázek 22 – Umístění střídačů

Obrázek 23 – Detail střídače

10.1.4 Rozvaděč R-FV

Rozvaděč s označením R-FV je situován stejně jako střídače viz příloha E. Ze střídačů jsou vyvedeny kabely CYKY 5x6 a připojeny na jističe 20A s vypínací charakteristikou B. V rozvaděči je též umístěna přepěťová ochrana AC strany. V neposlední řadě je zde umístěno hlídací a zpožďovací relé. Výkon je vyveden přes jistič 40A/B.

10.1.5 Rozvaděč měření

Jako rozvaděč měření je využit rozvaděč označením RE. V tomto rozvaděči se nachází čtyřkvadrantový elektroměr. Je zde také umístěn hlavní jistič 80A.

10.1.6 Vyvedení výkonu

Vyvedení výkonu z rozvaděče R-FV bude vodičem do hlavního rozvaděče RH. Zde bude provedeno jištění a výkon bude dál veden do rozvaděče RE. V tomto rozvaděči bude provedeno připojení na elektroměr.

10.1.7 Kabelové vedení

Kabelové rozvody na straně DC jsou provedeny kabely typu OLFLEX R SOLAR XLS 6. Tímto typem kabelů jsou nejen propojeny mezi solárním polem a rozvaděči R-DC, ale i propojení mezi rozvaděči R-DC se střídači. Kabely jsou uchyceny k nosným konstrukcím běžnými konstrukčními prvky. Rozvody střídačů na straně AC a rozvaděčem R-FV jsou provedeny kabely CYKY-J 5x6 mm^2 a mezi R-FV, RH a RE bude výkon vyveden kabelem CYKY-J 5x10 mm^2.

10.1.8 Jímací soustava

Objekt spadá do LPS III. Jímací soustava je řešena pomocí 3 jímačů umístěných na střeše. Jejich přesné umístění viz příloha B. Veškeré vybavení, které je umístěno na střeše je v ochranném pásmu jímačů. Jímače jsou vzdáleny od vodivých částí a FV systému z důvodu ochrany minimálně 40 cm. Dále je jímací soustava vedena po okraji objektu. Pro svod je použito 7 svodů viz příloha.

Obrázek 24 - Pohled na jímací soustavu a FVE

10.2 Rozdíly mezi predikcí a skutečností u firemní FVE

Při uvedení elektrárny do provozu koncem roku 2012 byla vytvořena predikční tabulka, která nám popisuje jak velký je roční výnos z elektrárny a za jak dlouho se elektrárna zaplatí. V této části diplomové práce zhodnotíme, jak moc se liší predikované hodnoty od skutečných hodnot, které se do konce roku 2019 naměřily.

10.2.1 Zhodnocení výrobní části

Tabulka 1 udává, jak se v průběhu let mění predikovaný výkon firemní FVE. Je zde uveden celkový výkon FVE, který je 19,74 kWp. Dále celková roční výroba v kWh, která se v tabulce předpokládala konstantní. A nejdůležitější je po té poslední sloupec, který udává přepokládaný skutečný výkon. Ten se vypočítal vynásobením roční výroby a koeficientu ztrát.

Rok provozu FVE	Výkon FVE	Roční výroba	Koef. ztrát	Předpokládaný výkon
[-]	[kWp]	[kWh]	[-]	[kWh]
1	19,74	19500	0,95	18525
2	19,74	19500	0,95	18525
3	19,74	19500	0,95	18525
4	19,74	19500	0,95	18525
5	19,74	19500	0,95	18525
6	19,74	19500	0,90	17550
7	19,74	19500	0,90	17550
8	19,74	19500	0,90	17550
9	19,74	19500	0,90	17550
10	19,74	19500	0,90	17550
11	19,74	19500	0,85	16575
12	19,74	19500	0,85	16575
13	19,74	19500	0,85	16575
14	19,74	19500	0,85	16575
15	19,74	19500	0,85	16575
16	19,74	19500	0,80	15600
17	19,74	19500	0,80	15600
18	19,74	19500	0,80	15600
19	19,74	19500	0,80	15600
20	19,74	19500	0,80	15600

Tabulka 1 – Predikovaný výkon FVE

Tabulka 2 Ukazuje skutečný výkon, který naše měřená FVE fyzicky vyrobila mezi lety 2013 – 2019. Můžeme zde sledovat rozdíl hodnot oproti tabulce s predikcí. Tyto rozdíly jsou způsobeny tím, že se každý rok liší objem dopadu slunečního záření na panely a tím pádem i k rozdílné výrobě elektrické energie.

Rok provozu FVE	Skutečný výkon
[-]	[kWh]
1	18848
2	19318
3	20555
4	17392
5	19718
6	20565
7	20020

Tabulka 2 – Skutečný výkon FVE

10.2.2 Zhodnocení finanční části

Tabulka 3 zobrazuje predikovaný výnos FVE v průběhu let. Díky tomu, že byla tato elektrárna spuštěna do provozu ještě v roce 2012 má nárok na zelený bonus za vyrobenou kWh. Tento bonus garantuje určitou peněžitou odměnu za každou vyrobenou kWh. Nezáleží ani jak se s vyrobenou kWh naloží, jestli se využije na vlastní spotřebu objektu, nebo prodá do distribuční soustavy. Samozřejmě je, ale mnohem výhodnější ji využít na vlastní spotřebu protože nejen, že za ní dostaneme zelený bonus, ale také ušetříme za její nákup od distributora. Dále můžeme v tabulce vidět provozní náklady, které se pohybují cca okolo 5500 kč. Je zde také uvedeno předpokládané využití vyrobené energie na vlastní spotřebu objektu, to vychází na 75%. V posledním sloupci je uveden roční výnos v kč za rok. Jde o součet zeleného bonusu s náklady, které se ušetřily díky tomu, že se vyrobená energie použila na vlastní spotřebu. Od toho součtu se odečetly roční náklady a vyšel celkový roční výnos.

Rok provozu FVE	Předpokládaný výkon	ZB za vyrobenou kWh	ZB za rok	Provozní náklady	Vlastní využití spotřeby	Cena za kWh	Vlastní využití spotřeby	Výnos
[-]	[kWh]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[kWh]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	18525	5,70	105593	5280	13894	4,69	65162	165474
2	18525	5,81	107704	5386	13894	4,78	66465	168784
3	18525	5,93	109858	5493	13894	4,88	67794	172159
4	18525	6,05	112056	5603	13894	4,98	69150	175603
5	18525	6,17	114297	5715	13894	5,08	70533	179115
6	17550	6,29	110447	5522	13163	5,18	68157	173082
7	17550	6,42	112656	5632	13163	5,28	69520	176544
8	17550	6,55	114909	5745	13163	5,39	70911	180074
9	17550	6,68	117207	5860	13163	5,50	72329	183676
10	17550	6,81	119551	5758	13163	5,60	73776	187569
11	16575	6,95	115168	5873	12431	5,72	71070	180365
12	16575	7,09	117471	5991	12431	5,83	72492	183972
13	16575	7,23	119820	6110	12431	5,95	73942	187652
14	16575	7,37	122217	6233	12431	6,07	75421	191405
15	16575	7,52	124661	5984	12431	6,19	76929	195606
16	15600	7,67	119675	6104	11700	6,31	73852	187423
17	15600	7,82	122068	6226	11700	6,44	75329	191171
18	15600	7,98	124509	6350	11700	6,57	76835	194995
19	15600	8,14	127000	6477	11700	6,70	78372	198895
20	15600	8,30	129540	6607	11700	6,83	79940	202872

Tabulka 3 – Predikovaný roční výnos FVE

Tabulka 4 zobrazuje skutečné roční výnosy, které elektrárna za svoji provozní dobu vygenerovala. Oproti tabulce s přepokládanými hodnotami se zde liší i pokrytí spotřeby využitém vlastní vyrobené energie z 75% kleslo využití vlastní spotřeby na 69%. Celkové výnosy se liší z důvodu toho, že je rozdílný skutečný a přepokládaný výkon.

Rok provozu FVE	Skutečný výkon	ZB za vyrobenou kWh	ZB za rok	Provozní náklady	Vlastní využití spotřeby	Cena za kWh	Vlastní využití spotřeby	Výnos
[-]	[kWh]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[kWh]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	18848	5,70	107434	5280	12628	4,69	59226	161380
2	19318	5,81	112315	5386	12943	4,78	61917	168846
3	20555	5,93	121897	5493	13772	4,88	67199	183603
4	17392	6,05	105202	5603	11653	4,98	57996	157595
5	19718	6,17	121657	5715	13211	5,08	67067	183009
6	20565	6,29	129421	5522	13779	5,18	71347	195246
7	20020	6,42	128511	5632	13413	5,28	70846	193724

Tabulka 4 – Skutečný roční výnos FVE

10.2.3 Zhodnocení návratnosti

Tabulka 5 udává cenu a přepokládanou návratnost elektrárny. Pořizovací cena FVE byla 1054170 kč. Na výstavbu FVE byl bankou poskytnut úvěr s úrokovou sazbou 6,5% p.a.. Z tabulky je patrné, že návratnost investice je za 8 let od spuštění elektrárny do provozu a za 20 let by FVE by měla vygenerovat 2375545 kč.

Rok provozu FVE	Pořizovací cena	Zbývající úvěr	Splátka jistiny	Úrok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	1054170	1054170	165474	68521	68521
2		888696	168784	57765	126286
3		719912	172159	46794	173081
4		547753	175603	35604	208684
5		372150	179115	24190	232874
6		193036	173082	12547	245422
7		19954	19954	1297	90129
8					-89946
9					-273622
10					-461190
11					-641555
12					-825527
13					-1013179
14					-1204584
15					-1400190
16					-1587612
17					-1778784
18					-1973778
19					-2172673
20					-2375545

Tabulka 5 – Predikovaná doba návratnosti FVE

Rok provozu FVE	Pořizovací cena	Zbývající úvěr	Splátka jistiny	Úrok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	1054170	1054170	161380	68521	68521
2		892790	168846	58031	126552
3		723944	183603	47056	173609
4		540341	157595	35122	208731
5		382746	183009	24878	233609
6		199737	195246	12983	246592
7		4490	19954	292	73114

Tabulka 6 – Skutečná doba návratnosti FVE

Tabulka 6 zobrazuje pořizovací hodnotu a skutečnou návratnost měřené FVE. Z naměřených dat vyplývá, že skutečná data jsou zatím o něco příznivější než ty, které se přepokládaly v době uvedení elektrárny do provozu. Je také velmi pravděpodobné, že v roce 2020 dojde k celkové návratnosti investice a elektrárna se stane výdělečnou.

10.3 Simulace firemní FVE v roce 2013

V této části diplomové práce provedeme v programu PV SOL celkovou simulaci FVE. Budeme vycházet ze skutečných dat. V poslední části srovnáme výsledky simulace se skutečnými hodnotami.

10.3.1 PV SOL

Program PV SOL od firmy Valentine Software slouží k návrhu a simulaci různých fotovoltaických elektráren. Tento program neschopen zpracovat všechny typů systémů, 3D vizualizace, výpočet stínění a také návrhy rozsáhlých systémů. PV SOL používá pro své simulace klimatická data z více než 8 000 meteorologických stanic, které se nachází po celém světě. Program nabízí velkou databázi komponent pro fotovoltaické elektrárny jako jsou fotovoltaické panely, měniče a baterie od více než 200 výrobců.[23]

Kompletní návrh je rozdělen do 7 hlavních částí:

- projektová data
- typ systému, klimatické podmínky a poloha
- spotřeba
- 3D návrh
- návrh kabelového vedení a ochranných prvků
- ekonomická analýza
- výsledky

Základním prvkem, který ovlivňuje simulaci při návrhu programu PVSOL je nastavení klimatických podmínek a polohy. Program dokáže ze zadané polohy využít potřebná klimatická data, která jsou dále použity pro výpočty a simulaci.

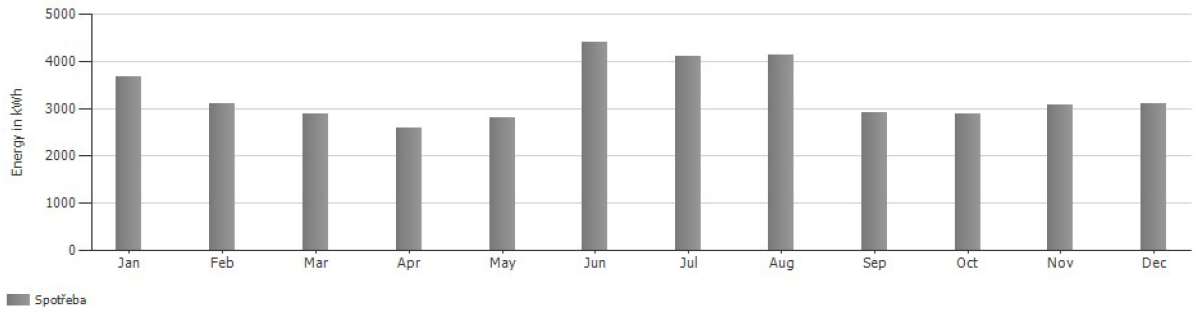
Po té je potřeba definovat spotřební profil objektu. Pro co nejpřesnější určení závislosti vlivu FV systému na vlastní spotřebu objektu je velmi důležité vložit naměřené hodnoty spotřeby objektu a to nejlépe ve formátu hodinových hodnot za celý rok.

Dalším krokem je návrh objektu ve 3D. V této části vytvoříme detailní 3D model objektu. Kromě objektu na kterém je umístěn FV systém, je zde nutné vytvořit i objekty, které způsobují stínění FV systému jakou jsou stromy a další objekty v okolí. V tomto kroku také navrhneme fotovoltaickou elektrárnu na střechu a navrhneme zde i střídače.

Po dokončení 3D návrhu musíme navrhnout kabelové rozvody a ochrany vedení. Díky návrhu kabelových rozvodů je program schopen vypočítat ztráty.

10.3.2 Roční spotřeba

Objekt má celkovou roční spotřebu 39790 kWh. Tento objekt je využíván jako komerční proto jeho spotřeba roste od rána cca od 7 hodin, kdy většina lidí chodí do práce. Tato spotřeba roste do maxima, kde se drží do odpoledních hodin, kdy zase klesá v době odchodů z práce. Největší spotřeba nastává v letních měsících, kdy se velkou měrou na téhle spotřebě podepisuje chod klimatizace. Kromě letních měsíců je spotřeba vcelku vyrovnaná.



Obrázek 25 - Spotřeba objektu

leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
3691	3116	2883	2599	2810	4402	4123	4149	2929	2890	3090	3108
Celková spotřeba je 39790 kWh											

Tabulka 7 - Spotřeba objektu

10.3.3 Umístění panelů na střeše objektu

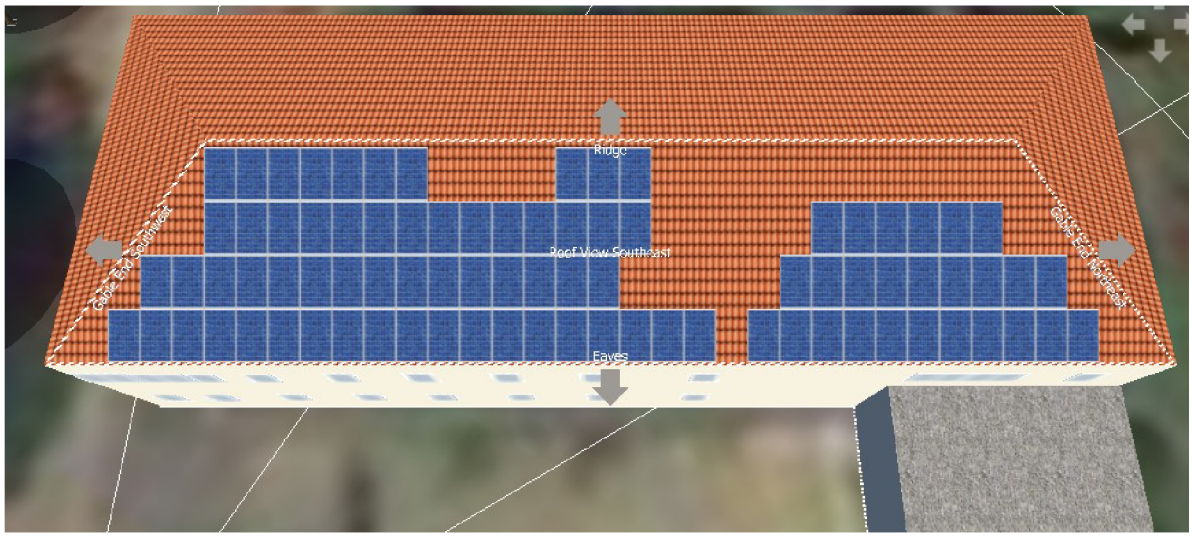
Na střeše je instalováno 84 panelu od výrobce Coenergy typ PowerPlus 235 Wp. V níže uvedené tabulce 8 se můžeme podívat na parametry fotovoltaického panelu

Jmenovitý výkon panelu	Proud MPP	Napětí MPP	Zkratový proud	Napětí naprázdno	Výška	Šířka	Hloubka	Hmotnost	Cena
[Wp]	[A]	[V]	[A]	[V]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[Kč]
235	7,98	29,76	8,45	36,64	1651	986	46	19	9583

Tabulka 8 - Parametry panelu Coenergy PowerPlus 235

V průběhu používání elektrárny dochází taktéž k degradaci panelů, která může být způsobena starnutím materiálu, slunečním zářením nebo také působením mrazu. Degradace uváděná výrobcem je 15 % pokles výkonu panelu za 20 let.

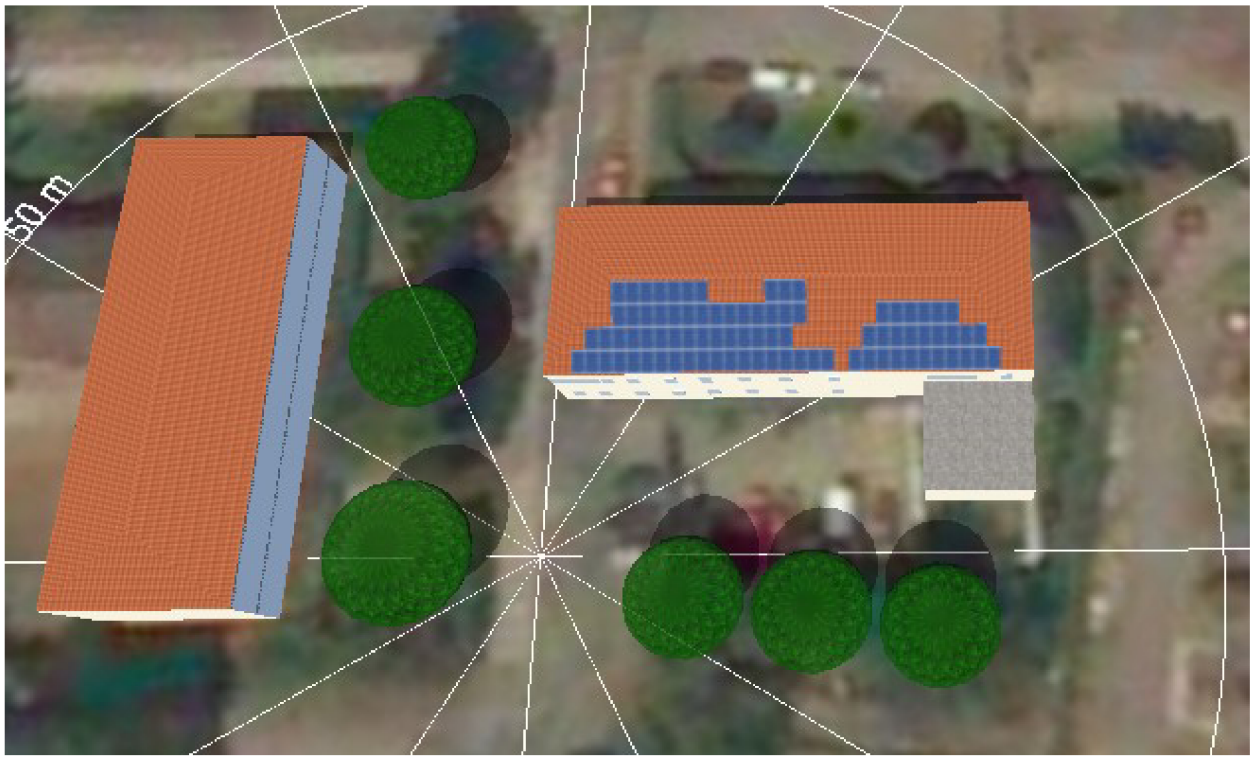
Na obrázku 26 je patrné rozmístění panelů na střeše objektu. Všechny panely jsou umístěny na jedné straně střechy. Panely jsou situovány na jihovýchodní stranu. Panely jsou rozmístěny v několika řadách nad sebou a pokrývají skoro celou plochu střechy.



Obrázek 26 – Rozmístění panelů FVE v programu PV sol

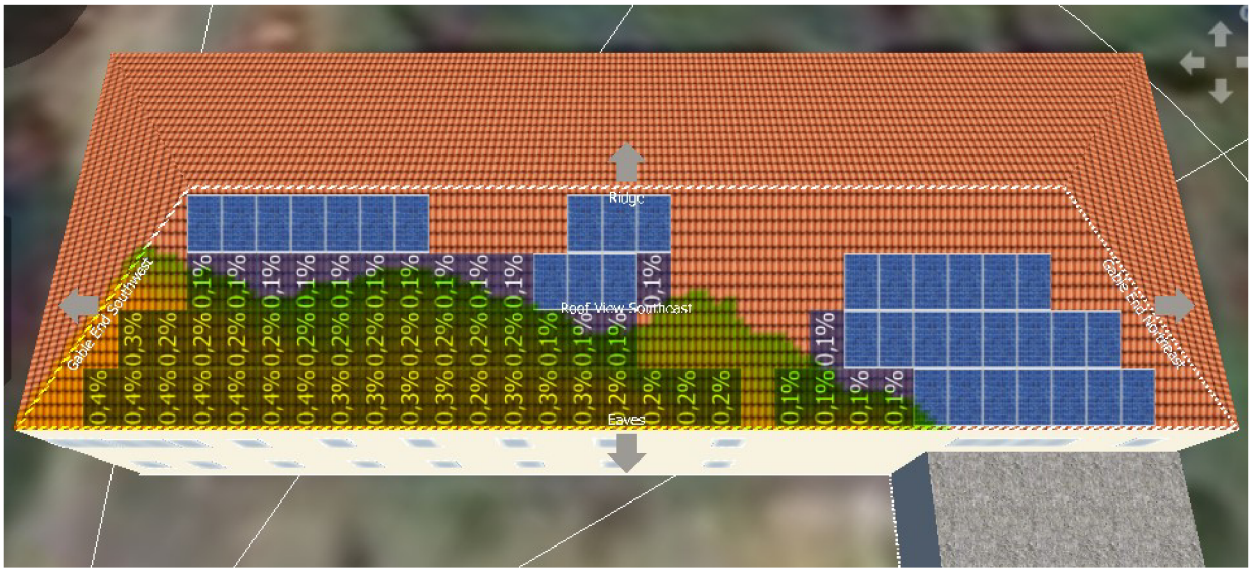
10.3.4 Vliv stínění na FV panely

Obrázek 27 zobrazuje větší okolní objekty, které se můžou svojí výškou podílet na stínění panelů. Elektrárna je dobře situovaná protože nesoudí s žádným velkým objektem. Jediné prvky, které se můžou ať už teď a nebo v budoucnu podílet na stínění jsou stromy, které rostou nedaleko od firemního objektu.



Obrázek 27 – Objekty, které se podepisují na stínění FVE

Na níže uvedeném obrázku 28 můžeme sledovat předpokládané stínění. Stínění je minimální. Největší míra stínění je situována v levé dolní části obrázku. Procentuální hodnota stínění se pohybuje mezi 0,4 – 0,1 %.



Obrázek 28 – Předpokládané stínění FVE

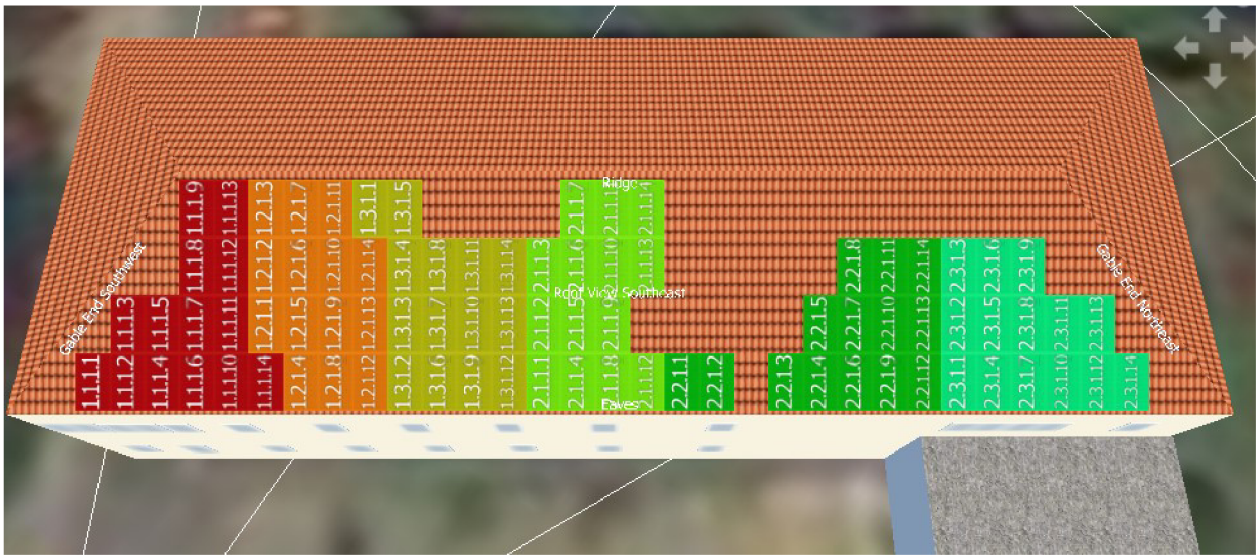
10.3.5 Zapojení panelů

Pro přeměnu energie z panelů jsou v areálu firemního objektu instalovány 2 střídače Sunways NT 10000. V níže uvedené tabulce 9 můžeme vidět základní technické parametry tohoto střídače.

Jmenovitý výkon střídače	Max. DC napětí	Max. DC napětí	MPP tracker	Výška	Šířka	Hloubka	Hmotnost	Cena
[W]	[V]	[A]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[Kč]
10000	900	33	3	840	530	210	31	27 119

Tabulka 9- Parametry střídače Sunway NT 10000

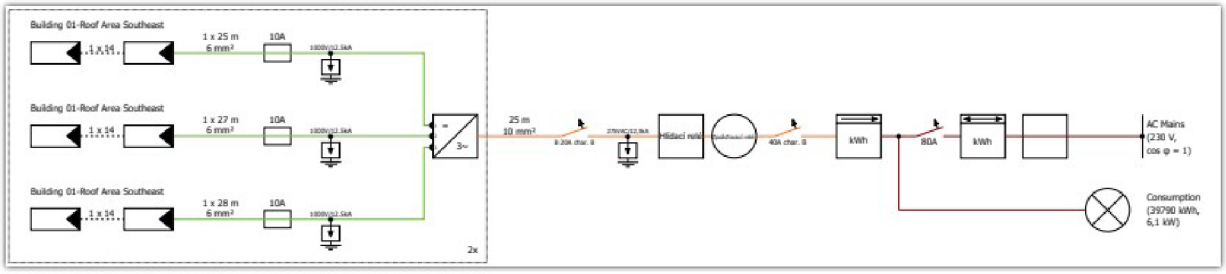
Na přiloženém obrázku 29 můžeme vidět, že panely jsou zapojeny sériově do 6 stringu po 14 panelech. To znamená, že na každý střídač jsou připojeny 3 stringy. Výkon, který je zapojen na každý střídač je 9780 W.



Obrázek 29 – Rozdělení panelů do stringů

10.3.6 Celkové schéma FV elektrárny

Na obrázku 30 je vidět celkové schéma FV elektrárny. Toto zapojení odpovídá zapojení, které odpovídá přiloženým přílohám a je podrobně popsáno na začátku kapitoly 10 Firemní FVE.



Obrázek 30 – Schéma FVE

10.3.7 Finanční analýza

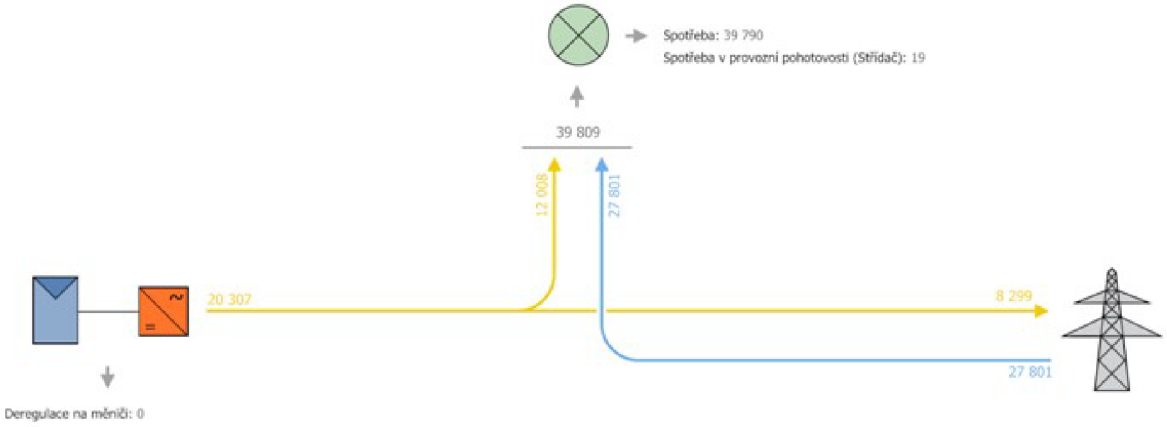
V poslední části před spuštěním simulace jsme si definovali finanční část FVE. Zadali jsme celkovou cenu elektrárny, která činí 1054170 kč. Také jsme zadali náklady na údržbu, které se v roce 2013 pohybovaly okolo 5280. V další části jsme si určili parametry úvěru na výstavbu FVE. Úvěr byl vystaven s úrokovou mírou 6,5 % p.a.. Jako poslední jsme si nastavili tarif na, který naše elektrárna funguje. Cena energie, kterou prodáváme do distribuce se pohybuje okolo 0,4 kč za 1 kWh. Nákupní cena elektrické energie je 4,69 kč za 1 kWh.

10.3.8 Výsledky simulace oproti skutečnému stavu

Celý soubor simulace je umístěn jako příloha F na přiloženém CD. Zde si ukážeme jen ty nejdůležitější výsledky a srovnáme si je se skutečností.

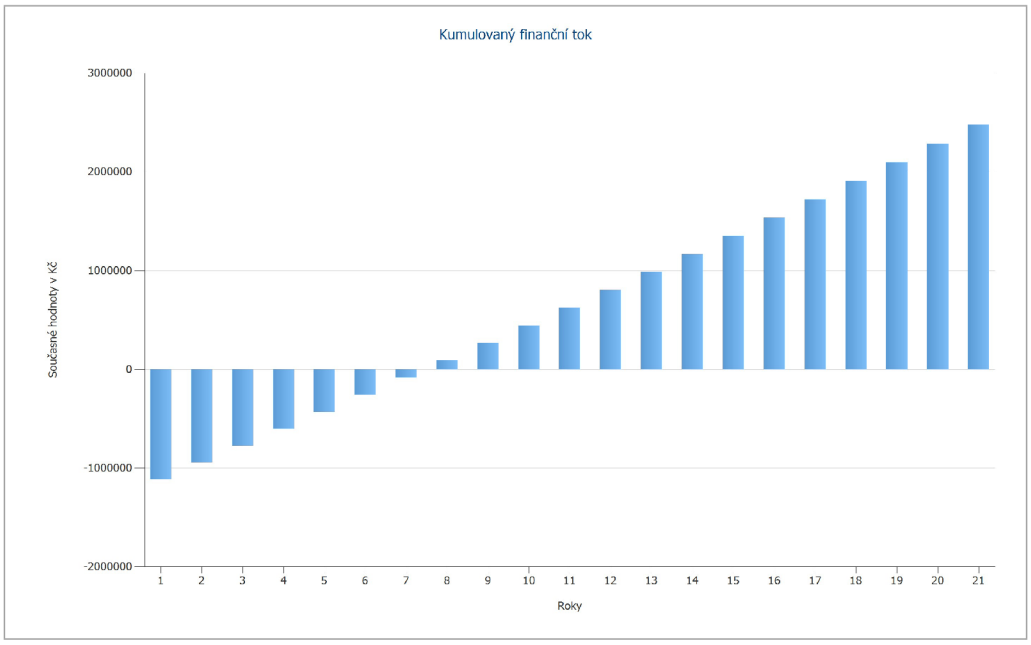
Na níže uvedeném obrázku 31 vidíme, že celková vyrobená energie z FVE je 20307 kWh z toho se na vlastní spotřebu použije 12008 kWh a prodá do distribuční sítě 8299 kWh. Z toho

plyne, že na vlastní spotřebu se využije okolo 59,1 %. Při porovnání se skutečnými daty z roku 2013 vidíme, že podle simulace bychom měli mít za rok více vyrobené energie a to cca o 1500 kWh, ale skoro o 10 % menší využití vyrobené energie na vlastní spotřebu. Podíl pokrytí celkové spotřeby objektu se po té v simulaci pohybuje okolo 30 %.



Obrázek 31 – Tok energie skutečné FVE

Na níže uvedeném obrázku 32 a tabulce 10 můžeme pozorovat návratnost investice do FVE. Z výsledků je patrné, že elektrárna bude v plusových číslech 8. rok od spuštění FVE do provozu stejně jako ve skutečnosti. Rozdíl v návratnosti na konci roku 2019 tedy na konci 7. roku od instalace se liší mezi skutečností a simulací o cca 14000 kč. Kdy nám lépe vychází skutečná elektrárna oproti simulaci. Tento rozdíl je způsoben tím, že skutečná elektrárna využívá o 10 % víc vyrobené energie na vlastní spotřebu než ta simulovaná. Tím pádem na skutečné elektrárně ušetříme víc peněz za nákup elektrické energie.



Obrázek 32 – Návratnost skutečné FVE

Rok	Provozní náklady	Úhrada za nabíjení	Úspory při odběru proudu	Příspěvky OTE	Splátky úvěru	Úroky z úvěru	Roční finanční tok	Komulovaný finanční tok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	-5 577,23	2 873,60	53 741,16	113 779,21	-149 104,67	-67 842,62	-52 130,55	-52 130,55	-1 114 483
2	-5 632,45	3 308,95	55 580,13	114 905,73	-147 628,38	-57 575,07	-37 041,08	-89 171,63	-946 320,95
3	-5 688,21	3 316,97	55 704,59	116 043,42	-146 166,72	-47 504,18	-24 294,15	-113 465,78	-776 944,20
4	-5 744,53	3 324,81	55 826,05	117 192,36	-144 719,52	-37 627,08	-11 747,90	-125 213,68	-606 345,51
5	-5 801,41	3 332,48	55 944,46	118 352,68	-143 286,65	-27 940,90	600,65 Kč	-124 613,03	-434 517,30
6	-5 858,85	3 339,96	56 059,76	119 524,49	-141 867,98	-18 442,84	12 754,55	-111 858,48	-261 451,94
7	-5 916,86	3 347,25	56 171,82	120 707,90	-140 463,34	-9 130,12	24 716,65	-87 141,83	-87 141,83
8	-5 975,44	3 354,35	56 280,66	121 903,03	0,00	0,00	175 562,60	88 420,77	88 420,77
9	-6 034,60	3 361,26	56 386,09	123 109,99	0,00	0,00	176 822,73	265 243,50	265 243,50
10	-6 094,35	3 367,96	56 488,15	124 328,90	0,00	0,00	178 090,66	443 334,16	443 334,16
11	-6 154,69	3 374,45	56 586,63	125 559,88	0,00	0,00	179 366,27	622 700,43	622 700,43
12	-6 215,63	3 380,74	56 681,57	126 803,05	0,00	0,00	180 649,72	803 350,15	803 350,15
13	-6 277,17	3 151,03	56 772,86	128 058,52	0,00	0,00	181 705,24	985 055,39	985 055,39
14	-6 339,32	2 596,30	56 860,39	129 326,43	0,00	0,00	182 443,79	1 167 499,18	1 167 499,18
15	-6 402,09	2 549,15	56 944,07	130 606,89	0,00	0,00	183 698,01	1 351 197,20	1 351 197,20
16	-6 465,47	2 502,67	57 023,81	131 900,02	0,00	0,00	184 961,03	1 536 158,23	1 536 158,23
17	-6 529,49	2 456,87	57 099,60	133 205,97	0,00	0,00	186 232,95	1 722 391,18	1 722 391,18
18	-6 594,14	2 411,73	57 171,25	134 524,84	0,00	0,00	187 513,68	1 909 904,86	1 909 904,86
19	-6 659,43	2 367,24	57 238,75	135 856,77	0,00	0,00	188 803,33	2 098 708,19	2 098 708,19
20	-6 725,36	2 323,40	57 301,99	137 201,88	0,00	0,00	190 101,91	2 288 810,10	2 288 810,10
21	-6 791,95	2 280,19	57 360,85	138 560,32	0,00	0,00	191 409,41	2 480 219,50	2 480 219,50

Tabulka 10 – Finanční tok skutečné FVE

10.4 Simulace firemní FVE 2019

V následující části zhodnotíme simulaci elektrárny, kdyby se realizovala v roce 2019. Fotovoltaické panely a střídače zůstanou stejné, tím pádem budeme mít i stejný výkon FVE. Jediný rozdíl nastane ve finanční části. Celková cena se oproti roku 2013 změní a bude jiná i cena elektřiny jak při nákupu tak i prodeji. Při této simulaci už nebudeme dostávat zelený bonus za vyrobenou kWh. Tyto bonusy dostávaly jen elektrárny, které byly spuštěné do provozu do konce roku 2013. Od roku 2014 byly tyto bonusy za vyrobenou kWh zrušeny.

10.4.1 Finanční analýza

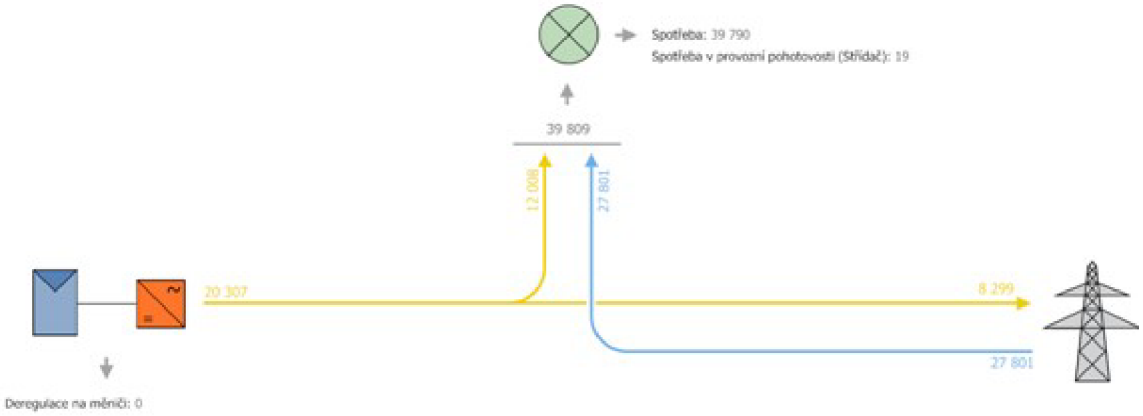
Celková cenu elektrárny v roce 2019 činí 1098152 kč. Náklady na provoz elektrárny byly v roce 2019 okolo 5633 kč. Parametry úvěru jsou stejné jak v simulaci z roku 2013. Úvěr má vystaven úrokovou míru 6,5 % p.a.. Museli jsme také předefinovat tarif na, který naše elektrárna funguje. Cena energie, kterou prodáváme do distribuce je 2 kč za 1 kWh. Nákupní cena elektrické energie je 4,91 kč za 1 kWh.

10.4.2 Výsledky simulace z roku 2019 oproti simulaci z roku 2013

Celý soubor simulace je umístěn jako příloha G na přiloženém CD.

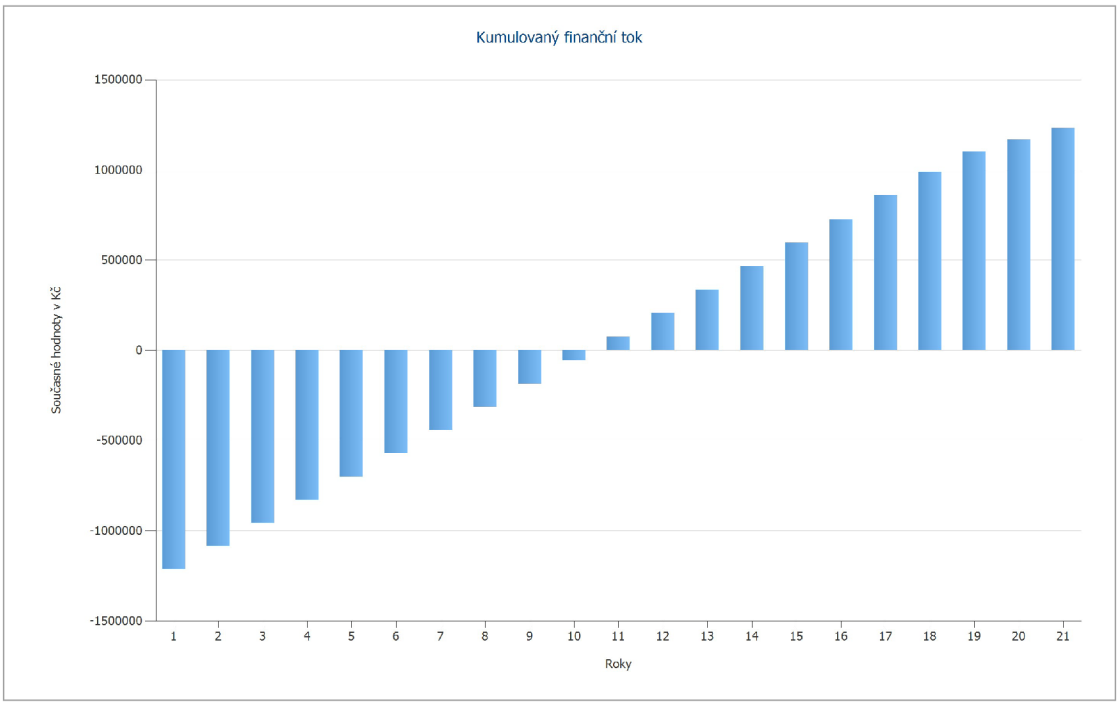
Na níže uvedeném obrázku 33 vidíme, že celková vyrobená energie z FVE je 20307 kWh z toho se na vlastní spotřebu použije 12008 kWh a prodá do distribuční sítě 8229 kWh. Z toho

plyne, že na vlastní spotřebu se využije okolo 59,1 %. Při porovnání se simulací nám tyto údaje vychází stejně.



Obrázek 33 – Tok energie simulované FVE z roku 2019

Na přiloženém obrázku 34 a tabulce 11 můžeme vidět průběh návratnosti investice do FVE. Z obrázku je patrné, že elektrárna bude v plusových číslech 11. rok od spuštění FVE do provozu. Rozdíl mezi simulacemi je tedy tři roky. Rozdíl je v tom, že pro elektrárnu instalovanou v roce 2019 nemůžeme využít tak výhodný tarif jako v roce 2013. Ale i tak můžeme říct, že postavit takovou elektrárnu se vyplatí i bez zeleného bonusu za vyrobenou kWh.



Obrázek 34 – Návratnost simulované FVE z roku 2019

Rok	Provozní náklady	Úhrada za nabíjení	Úspory při odběru proudu	Splátky úvěru	Úroky z úvěru	Roční finanční tok	Komulovaný finanční tok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	-5 577,23	68 454,20	56 262,07	-155 325,60	-70 673,15	-106 859,71	-106 859,71	-1 213 535,88
2	-5 632,45	75 297,28	58 187,30	-153 787,72	-59 977,21	-85 912,80	-192 772,51	-1 085 683,75
3	-5 688,21	75 479,81	58 317,59	-152 265,07	-49 486,15	-73 642,03	-266 414,54	-957 574,56
4	-5 744,53	75 658,37	58 444,76	-150 757,50	-39 196,95	-61 595,85	-328 010,39	-829 215,96
5	-5 801,41	75 832,85	58 568,72	-149 264,85	-29 106,65	-49 771,34	-377 781,73	-700 615,80
6	-5 858,85	76 003,16	58 689,43	-147 786,98	-19 212,31	-38 165,55	-415 947,28	-571 782,06
7	-5 916,86	76 169,19	58 806,74	-146 323,74	-9 511,04	-26 775,71	-442 722,99	-442 722,99
8	-5 975,44	76 330,84	58 920,69	0,00	0,00	129 276,10	-313 446,89	-313 446,89
9	-6 034,60	76 488,01	59 031,06	0,00	0,00	129 484,47	-183 962,43	-183 962,43
10	-6 094,35	76 640,59	59 137,92	0,00	0,00	129 684,15	-54 278,28	-54 278,28
11	-6 154,69	76 788,46	59 241,02	0,00	0,00	129 874,79	75 596,51	75 596,51
12	-6 215,63	76 931,53	59 340,41	0,00	0,00	130 056,31	205 652,82	205 652,82
13	-6 277,17	77 069,67	59 435,98	0,00	0,00	130 228,48	335 881,30	335 881,30
14	-6 339,32	77 202,78	59 527,61	0,00	0,00	130 391,07	466 272,37	466 272,37
15	-6 402,09	77 330,74	59 615,22	0,00	0,00	130 543,87	596 816,24	596 816,24
16	-6 465,47	77 453,42	59 698,70	0,00	0,00	130 686,65	727 502,89	727 502,89
17	-6 529,49	77 570,72	59 778,05	0,00	0,00	130 819,28	858 322,17	858 322,17
18	-6 594,14	77 682,51	59 853,06	0,00	0,00	130 941,43	989 263,59	989 263,59
19	-6 659,43	60 183,33	59 923,73	0,00	0,00	113 447,63	1 102 711,22	1 102 711,22
20	-6 725,36	11 616,99	59 989,93	0,00	0,00	64 881,56	1 167 592,78	1 167 592,78
21	-6 791,95	11 400,95	60 051,55	0,00	0,00	64 660,56	1 232 253,34	1 232 253,34

Tabulka 11 – Finanční tok simulované FVE z roku 2019

10.5 Souhrn kapitoly

V této části diplomové práce se zabýváme fotovoltaickou elektrárnou ve firemním prostředí. Tato fotovoltaická elektrárna je situována v Brně – Židenicích. FVE byla realizována na přelomu roků 2012 a 2013, její instalovaný výkon je 19,74kWp. Skládá se z 84 panelů od značky CONERGY a jedná se o typ PowerPlus 235. Tyto panely mají špičkový výkon 235 Wp. Panely jsou zapojeny sériově do 6 stringů po 14 panelech. Těchto 6 stringů je zapojeno do 2 střídačů od firmy Sunways jde o typ NT 10000, tyto střídače mají maximální výstupní výkon 10 kW.

Při uvedení elektrárny do provozu koncem roku 2012 byla vytvořena predikční tabulka, která nám popisuje jak velký je roční výnos z elektrárny a za jak dlouho se elektrárna zaplatí. Tuto tabulku jsme porovnali se skutečnými naměřenými daty, které jsme měli k dispozici od výstavby až do konce roku 2019. Skutečné data z firemní FVE nám vychází v hlavních aspektech jako výroba elektrické energie a výnosnost lépe než tabulka s predikovanými hodnotami, zejména díky tomu, že v tabulce s predikovanými hodnotami bylo počítáno s konstantní výrobou elektrické energie z FVE a nebraly se v potaz zásadní faktory jako nestálost počasí. Obě tabulky očekávají návratnost investice 8. rok od zprovoznění FVE a tato predikce se zdá jako velice reálná.

Pro další zhodnocení kvality firemní FVE byl použit simulační program PV SOL. Díky této simulaci můžeme zjistit s jakou kvalitou byla tato elektrárna postavena a zde tu není nějaká možnost ke zlepšení. Tento program umí 3D návrh objektu, který je určen pro výstavbu FVE a také ostatních objektů v okolí, které mohou být zdrojem stínění panelů. Pro tuto simulaci jsme využili všechny nutné parametry FVE abychom dosáhli co nejpřesnějších výsledků. Nejprve je potřeba znát celkovou elektrickou spotřebu objektu, která v našem případě je 39790 kWh. Jedná se o klasický kancelářský objekt, kdy spotřeba narůstá od ranních hodin a v odpoledních hodinách zase klesá. Dále jsme provedli 3D model objektu, kde jsme kromě modelu objektu provedli instalaci panelů a střídačů. Po té jsme se přesunuli do finanční analýzy. Tady jsme definovali celkovou cenu elektrárny, která je 1054170 kč, dále náklady na údržbu, které se v roce 2013 pohybovaly okolo 5280 a úvěr. Úvěr byl vystaven s úrokovou mírou 6,5 % p.a a pokryl celkové náklady FVE. Tarif, na který byla FVE postavena je cena energie, kterou prodáváme do distribuce se pohybuje okolo 0,4 kč za 1 kWh a nákupní cena elektrické energie je 4,69 kč za 1 kWh. Z výsledků jsme zjistili, že lépe nám vychází reálná FVE a to i když simulovaná FVE vyrábí více elektrické energie. Tento rozdíl je způsoben tím, že simulovaná FVE oproti reálné využívá méně elektřiny na svoji spotřebu a více ji prodává do distribuční soustavy.

Poslední částí kapitoly 10 je srovnání simulované FVE v roce 2013 se simulací FVE v roce 2019. Rozdíl mezí těmito elektrárnami je v tom, že v roce 2019 už neexistuje zelený bonus za vyrobenou kWh. Je tu i odlišný tarif na prodej a nákup elektřiny. Všechny tyhle aspekty se promítnou v celkové návratnosti, které se změní z 8 let při instalaci v roce 2013 na 11 let při instalaci v roce 2019

11 MĚŘENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH

Ve školní laboratoři jsme provedli měření 17 klasických fotovoltaických panelů, 10 z nich jsou panely od výrobců z Asie, 6 od výrobců z EU a 1 od výrobce z USA. Výsledky měření fotovoltaických panelů porovnáme s údaji o panelech, které udává výrobce. V dalším měření jsme proměřili bifaciální panel, který jsme podrobili elektroluminiscenčnímu měření a měření V-A charakteristiky daného panelu.

11.1 Výsledky měření FV panelů od výrobců z EU

EU	Zkratový proud	Napětí naprázdno	Účinnost	Fill factor	Jmenovitý výkon panelu	Napětí MPP	Proud MPP	Označení panelů
	[A]	[V]	[%]	[%]	[W]	[V]	[A]	[-]
Výrobce	9,25	38,40	17,20	78,92	280,00	32,90	8,52	EU-1
Naměřené	9,14	38,38	16,88	78,26	274,57	31,52	8,71	
Rozdíl v %	1,19	0,04	1,86	0,83	1,94	4,20	-2,24	
Výrobce	8,40	37,38	14,69	76,41	240,00	30,41	7,89	EU-2
Naměřené	8,32	36,79	12,96	75,74	231,80	29,45	7,87	
Rozdíl v %	0,98	1,58	11,78	0,88	3,42	3,15	0,24	
Výrobce	9,66	39,60	17,60	75,95	290,00	31,58	9,20	EU-3
Naměřené	9,11	38,34	16,30	77,07	269,20	31,29	8,60	
Rozdíl v %	5,69	3,18	7,39	-1,47	7,17	0,92	6,49	
Výrobce	9,60	45,98	20,15	74,98	330,00	36,98	8,95	EU-4
Naměřené	9,78	40,14	5,33	78,87	309,77	33,45	9,26	
Rozdíl v %	-1,92	12,70	73,55	-5,19	6,13	9,56	-3,49	
Výrobce	10,68	40,24	19,00	79,08	340,00	33,45	10,16	EU-5
Naměřené	10,52	40,48	18,86	79,36	337,97	33,66	10,04	
Rozdíl v %	1,50	-0,60	0,74	-0,36	0,60	-0,62	1,16	
Výrobce	9,43	39,01	17,14	76,12	280,00	31,08	9,01	EU-6
Naměřené	9,06	38,36	16,50	77,55	269,50	31,52	8,55	
Rozdíl v %	3,93	1,66	3,73	-1,87	3,75	-1,40	5,09	

Tabulka 12- Parametry panelů od evropských výrobců

V tabulce 12 vidíme základní parametry 6 fotovoltaických panelů. Na jednom řádku máme hodnoty udávané výrobcem, na dalším máme hodnoty, které jsme naměřili v laboratoři. Mezi těmito hodnotami je dopočítán rozdíl v procentech. Nejdůležitějším sloupcem je označený červeně. Tento sloupec obsahuje hodnoty jmenovitého výkonu panelu. Odchylky naměřených hodnot se od hodnot udávanými výrobcem liší v řádu procent. Nejmenší odchylku má panel

označený EU-5 a to 0,6 %, největší potom panel označený EU-3 , který má odchylku dosahující 7,17 %.

11.2 Výsledky měření FV panelů od výrobců z Asie

Asie	Zkratový proud	Napětí naprázdno	Účinnost	Fill factor	Jmenovitý výkon panelu	Napětí MPP	Proud MPP	Označení panelů
	[A]	[V]	[%]	[%]	[W]	[V]	[A]	[-]
Výrobce	9,13	39,00	16,50	75,83	270,00	31,18	8,66	Asie-1
Naměřené	9,04	37,98	16,29	77,38	265,80	31,23	8,51	
Rozdíl v %	0,94	2,61	1,27	-2,04	1,55	-0,15	1,71	
Výrobce	9,65	39,30	18,50	79,15	300,00	32,70	9,18	Asie-2
Naměřené	9,66	39,65	17,99	78,06	298,87	32,90	9,08	
Rozdíl v %	-0,06	-0,90	2,76	1,38	0,38	-0,62	1,05	
Výrobce	10,74	39,00	17,57	77,62	325,00	32,00	10,16	Asie-3
Naměřené	10,75	39,15	17,69	77,80	327,29	32,28	10,14	
Rozdíl v %	-0,06	-0,38	-0,68	-0,23	-0,70	-0,88	0,22	
Výrobce	10,12	40,20	18,80	76,29	310,00	33,30	9,32	Asie-4
Naměřené	9,55	40,82	18,72	78,12	304,63	33,06	9,22	
Rozdíl v %	5,61	-1,55	0,43	-2,40	1,73	0,73	1,13	
Výrobce	9,56	38,50	17,20	76,12	280,00	31,20	8,98	Asie-5
Naměřené	9,23	38,46	17,09	78,31	278,08	31,71	8,77	
Rozdíl v %	3,41	0,10	0,64	-2,87	0,68	-1,63	2,34	
Výrobce	10,46	41,36	20,20	78,61	340,00	34,63	9,82	Asie-6
Naměřené	10,19	40,60	19,56	79,51	329,00	33,74	9,75	
Rozdíl v %	2,56	1,84	3,17	-1,15	3,24	2,58	0,69	
Výrobce	10,15	40,90	19,55	77,16	320,00	33,40	9,59	Asie-7
Naměřené	9,96	40,51	18,85	77,91	314,45	32,86	9,57	
Rozdíl v %	1,84	0,95	3,58	-0,98	1,73	1,63	0,20	
Výrobce	8,68	22,10	13,90	72,99	140,00	17,70	7,91	Asie-8
Naměřené	8,43	22,12	13,54	72,73	135,68	17,34	7,83	
Rozdíl v %	2,83	-0,09	2,59	0,35	3,08	2,05	1,06	
Vyrobce	9,15	37,90	16,50	77,93	270,00	31,10	8,69	Asie-9
Naměřené	9,21	37,84	16,50	77,52	270,09	31,17	8,67	
Rozdíl v %	-0,63	0,16	0,00	0,53	-0,03	-0,21	0,28	

Výrobce	9,32	38,10	16,80	77,42	275,00	31,10	8,84	**Asie-10**
Naměřené	9,22	38,15	16,78	78,11	274,62	31,64	8,68	
Rozdíl v %	1,12	-0,14	0,12	-0,89	0,14	-1,74	1,81	

Tabulka 13 - Parametry panelů od asijských výrobců

V tabulce 13 máme základní parametry 10 fotovoltaických panelů od výrobců z Asie. Tato tabulka je sestavena stejně jako tabulka předchozí to znamená, že na jednom řádku máme hodnoty udávané výrobcem, na dalším máme hodnoty, které jsme naměřili v laboratoři. Mezi těmito hodnotami je dopočítán rozdíl v procentech. Sloupec, ve kterém jsou hodnoty jmenovitého výkonu panelů je vyznačen červeně. Odchylky naměřených hodnot od těch, které udává výrobce jsou v řádu procent, ale značně menší než u panelů od výrobců z EU. Jsou zde dokonce 2 panely, u kterých jsme naměřili větší výkon, než jaký udává výrobce a to u panelů označených Asie-3 a Asie-9. Největší odchylku má panel označený Asie-6 a to 3,24 %.

11.3 Výsledky měření FV panelu od výrobce z USA

USA	**Zkratový proud**	**Napětí naprázdno**	**Účinnost**	**Fill factor**	**Jmenovitý výkon panelu**	**Napětí MPP**	**Proud MPP**	**Označení panelů**
	[A]	**[V]**	**[%]**	**[%]**	**[W]**	**[V]**	**[A]**	**[-]**
Výrobce	6,58	75,60	22,60	80,42	400,00	65,80	6,08	**USA-1**
Naměřené	6,38	74,82	20,27	75,07	358,38	62,21	5,76	
Rozdíl v %	3,04	1,03	10,31	6,66	10,41	5,45	5,26	

Tabulka 14 - Parametry panelu od amerického výrobce

V tabulce 14 máme základní parametry pro 1 fotovoltaický panel od výrobce z USA. Tato tabulka je sestavena stejně jako tabulky předchozí a to tak, že na jednom řádku máme hodnoty udávané výrobcem, na dalším máme hodnoty, které jsme naměřili v laboratoři. Mezi těmito hodnotami je dopočítán rozdíl v procentech. Červeně vyznačený sloupec obsahuje hodnoty jmenovitého výkonu panelu. Odchylka naměřených hodnot od těch, které udává výrobce je u tohoto panelu největší jakou jsme tu měli a to 10,41 %. Tento panel vychází nejhůř ze všech panelů.

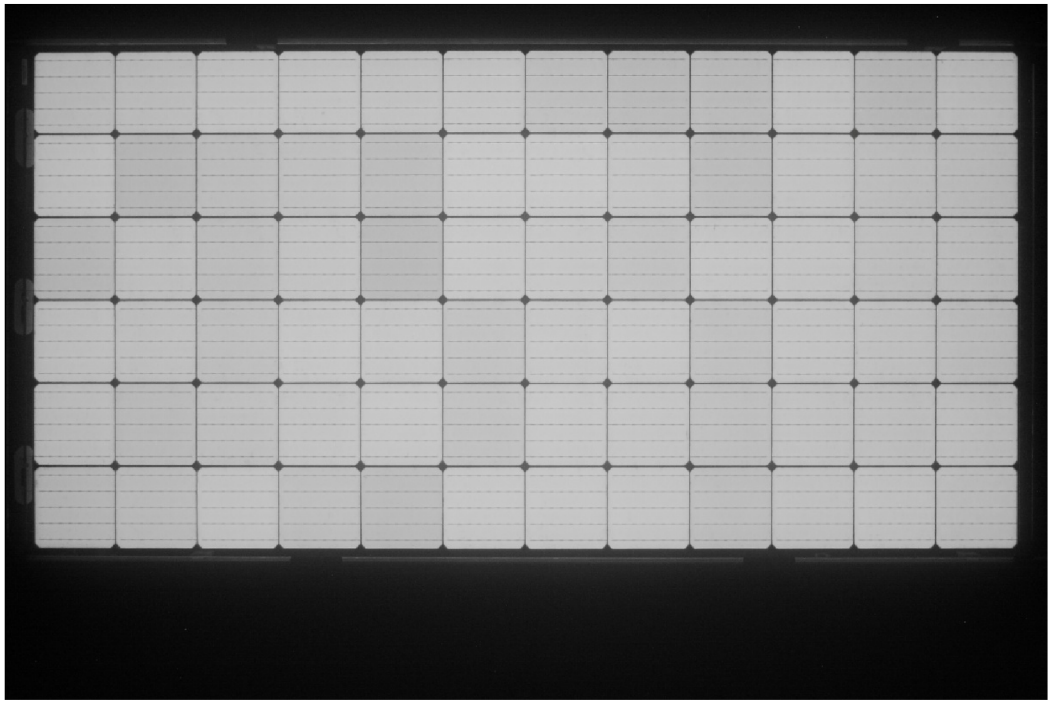
11.3.1 Srovnání výrobců

Z výsledku měření můžeme usoudit, že nejlepší panely pochází od výrobců z Asie. Kde se můžeme setkat i s tím, že panely jsou lepší, než jak udává výrobce. Na druhém místě skončily panely od výrobců z EU, kde už jsme naměřili větší odchylku než u panelů z Asie. Na třetím místě po té skončil panel z USA, který už měl odchylku přes 10 %.

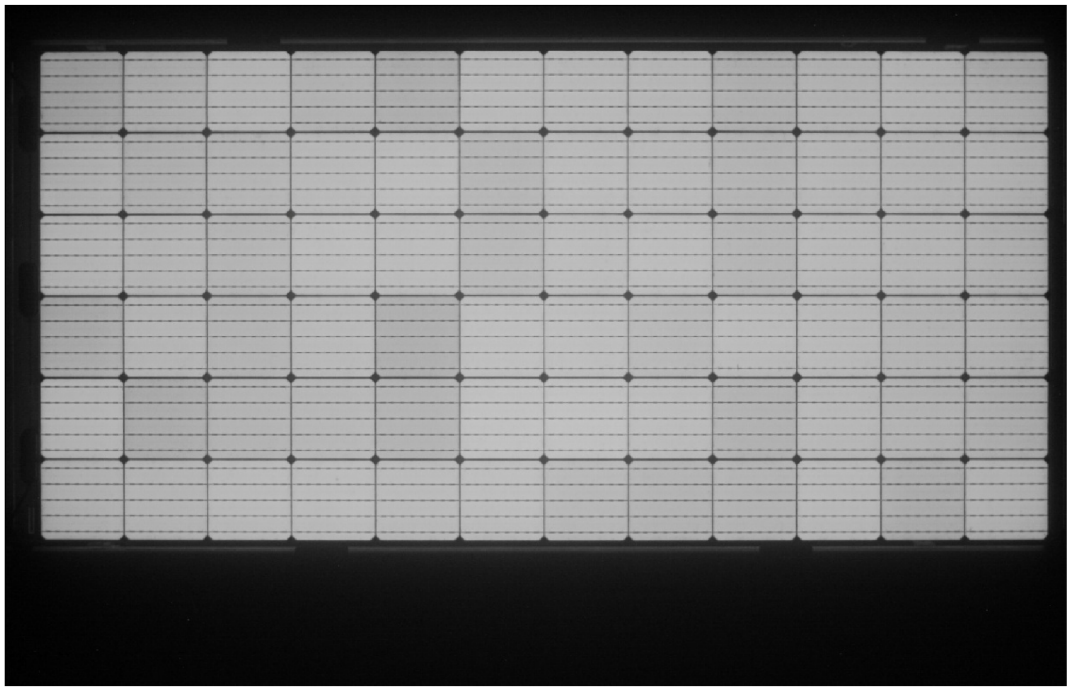
11.4 Měření bifaciálního článku

Ve školní laboratoři jsme měřili bifaciální modul. Měření probíhalo ve dvou fázích, v první proběhlo elektroluminiscenční měření a v druhé jsme měřili volt-ampérovou charakteristiku bifaciálního článku.

11.4.1 Elektroluminiscenční měření



Obrázek 35 – Elektroluminiscenční měření na straně A



Obrázek 36 - Elektroluminiscenční měření na straně B

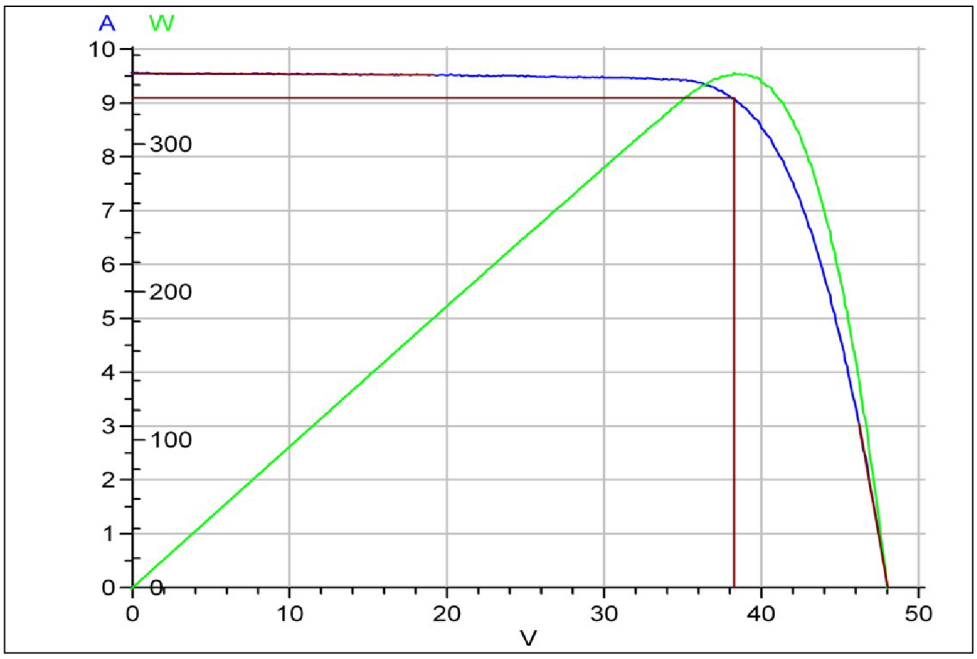
Z uvedených snímků je vidět, že obě strany měřeného modulu jsou bez viditelných závad.

11.4.2 Měření volt-ampérové charakteristiky

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky Bifacial strana A

Teplota okolí	**°C**	25.0
Intezita záření	**kW/m²**	1.0
Proud nakrátko	**A**	9.550
Napětí naprázdno	**V**	48.038
Účinnost	**%**	17.66
Fill factor	**%**	75.89
Jmenovitý výkon panelu	**W**	348.132
Napětí MPP	**V**	38.268
Proud MPP	**A**	9.097

Tabulka 15- Parametry panelu na straně A

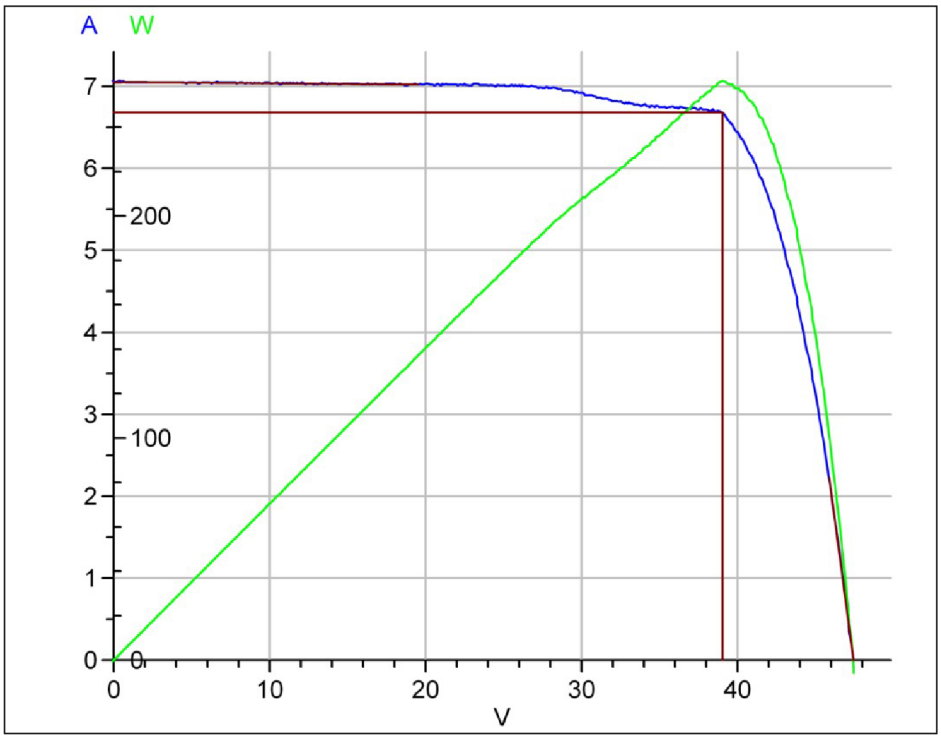


Obrázek 37 - Volt-ampérová charakteristika na straně A

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky Bifacial strana B

Teplota okolí	**°C**	25.0
Intezita záření	**kW/m²**	1.0
Proud nakrátko	**A**	7.053
Napětí naprázdno	**V**	47.428
Účinnost	**%**	13.23
Fill factor	**%**	77.97
Jmenovitý výkon panelu	**W**	260.818
Napětí MPP	**V**	39.043
Proud MPP	**A**	6.680

Tabulka 16 - Parametry panelu na straně B



Obrázek 38 - Volt-ampérová charakteristika na straně B

Z výsledků vidíme, že výkon strany A je 384,13 W a výkon strany B je 260,82 W. Výsledná volt-ampérová charakteristika na straně A je ideální. Naproti tomu volt-ampérová charakteristika na straně B má mezi napětím 30– 40 V výraznější pokles proudu.

11.5 Simulace panelu EU-2

V této části práce si porovnáme výsledky simulací FVE, která se skládá z měřených panelů EU-2 v programu PV SOL. V první simulaci jsou použity hodnoty, které udává výrobce. Ve druhé simulaci jsou použity hodnoty, které jsme naměřily ve školní laboratoři. Obě elektrárny jsou simulovány na objektu, kterým se zabývá tato diplomová práce. Tudíž spotřeba, stínění, použité ochrany a schéma zapojení je stejné jak v kapitole 10.3. Bude zde použito 82 panelů EU-2 o výkonu 240 Wp. Dále bude mít elektrárna 2 střídače Sunways NT 10000 o výkonu 10 kW. Cena fotovoltaické elektrárny je 735630 kč. Náklady na provoz elektrárny se pohybují kolem 5633 kč. Tarif nákupu a výkupu elektrické energie je nastaven stejně jako v kapitole 10.4.1. Pro připomenutí cena energie, kterou prodáváme do distribuce je 2 kč za 1 kWh. Nákupní cena elektrické energie je 4,91 kč za 1 kWh.

11.5.1 Simulace panelů s hodnotami výrobce

V tabulce 17 můžeme vidět technické parametry fotovoltaického panelu, které udává výrobce.

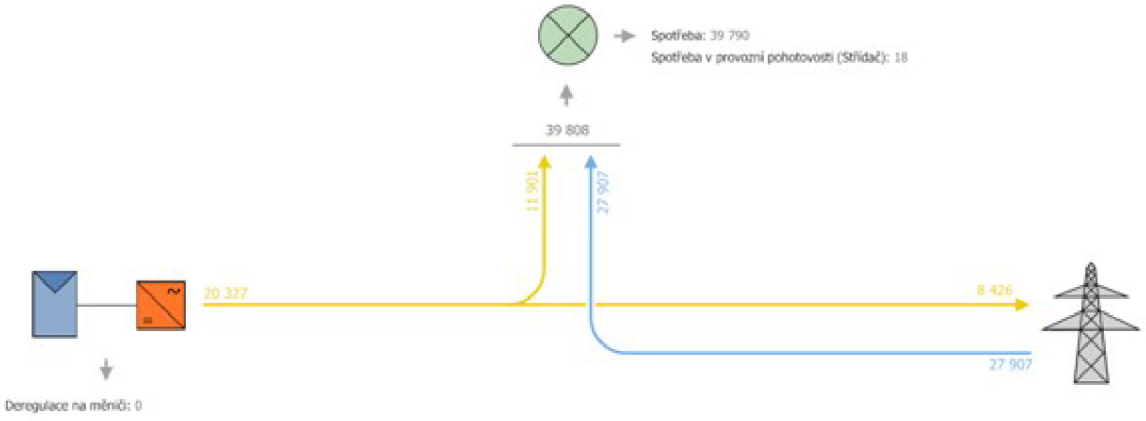
Jmenovitý výkon panelu	Proud MPP	Napětí MPP	Zkratový proud	Napětí naprázdno	Výška	Šířka	Hloubka	Hmotnost	Cena
[Wp]	[A]	[V]	[A]	[V]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[Kč]
240,00	7,89	30,41	7,89	37,38	1650	990	38	19,5	5456

Tabulka 17 - Parametry panelu s označením EU-2, které udává výrobce

11.5.1.1 Výsledky simulace panelů s hodnotami od výrobce

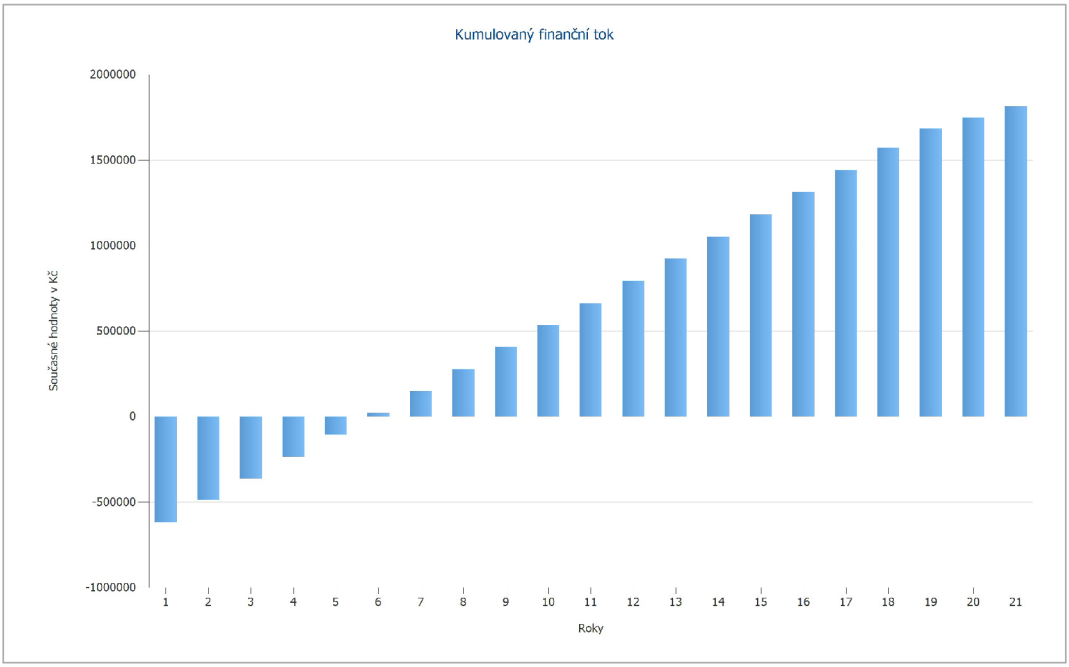
Celý soubor simulace je umístěn jako příloha H na přiloženém CD.

Na níže uvedeném obrázku 39 můžeme vidět to, že celková vyrobená energie z FVE je 20327 kWh. Z této vyrobené energie se na vlastní spotřebu použije 11901 kWh a prodá do distribuční sítě 8426 kWh. Z toho plyne, že na vlastní spotřebu se využije okolo 58,5 % celkové výroby.



Obrázek 39 – Tok energie FVE s hodnotami panelů od výrobce

Na obrázku 40 můžeme vidět graf návratnosti investice do FVE. Z grafu je patrné, že elektrárna bude v plusových číslech 6. rok od spuštění FVE do provozu.



Obrázek 40 – Návratnost FVE s hodnotami panelů od výrobce

Rok	Provozní náklady	Úhrada za nabíjení	Úspory při odběru proudu	Komulovaný finanční tok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	-5 577,23	68 160,07	55 780,13	-617 267,02	-617 267,02
2	-5 632,45	75 023,16	57 672,83	127 063,54	-490 203,48
3	-5 688,21	75 205,04	57 801,97	127 318,79	-362 884,69
4	-5 744,53	75 382,95	57 928,01	127 566,43	-235 318,27
5	-5 801,41	75 556,81	58 050,87	127 806,27	-107 511,99
6	-5 858,85	75 726,51	58 170,52	128 038,18	20 526,18
7	-5 916,86	75 891,95	58 286,79	128 261,88	148 788,06
8	-5 975,44	76 053,02	58 399,73	128 477,31	277 265,37
9	-6 034,60	76 209,63	58 509,12	128 684,15	405 949,52
10	-6 094,35	76 361,66	58 615,03	128 882,34	534 831,86
11	-6 154,69	76 509,01	58 717,22	129 071,54	663 903,40
12	-6 215,63	76 651,57	58 815,74	129 251,67	793 155,08
13	-6 277,17	76 789,22	58 910,46	129 422,51	922 577,59
14	-6 339,32	76 921,85	59 001,28	129 583,82	1 052 161,41
15	-6 402,09	77 049,36	59 088,11	129 735,38	1 181 896,79
16	-6 465,47	77 171,61	59 170,86	129 876,99	1 311 773,78
17	-6 529,49	77 288,49	59 249,51	130 008,51	1 441 782,29
18	-6 594,14	77 399,89	59 323,85	130 129,60	1 571 911,89
19	-6 659,43	60 119,34	59 393,90	112 853,81	1 684 765,70
20	-6 725,36	11 794,74	59 459,51	64 528,89	1 749 294,59
21	-6 791,95	11 575,41	59 520,59	64 304,05	1 813 598,64

Tabulka 18– Finanční tok FVE s hodnotami panelů od výrobce

V tabulce 18 můžeme pozorovat finanční tok simulované FVE při použití panelů s hodnotami, které udává výrobce. Návrat investice se předpokládá na 6. rok od spuštěný FVE.

11.5.2 Simulace panelů s námi naměřenými hodnotami

V tabulce 19 můžeme vidět technické parametry fotovoltaického panelu, které jsme naměřili. Rozdíl jmenovitého výkonu mezi udávaným výrobce a námi naměřeným je 3,42 %.

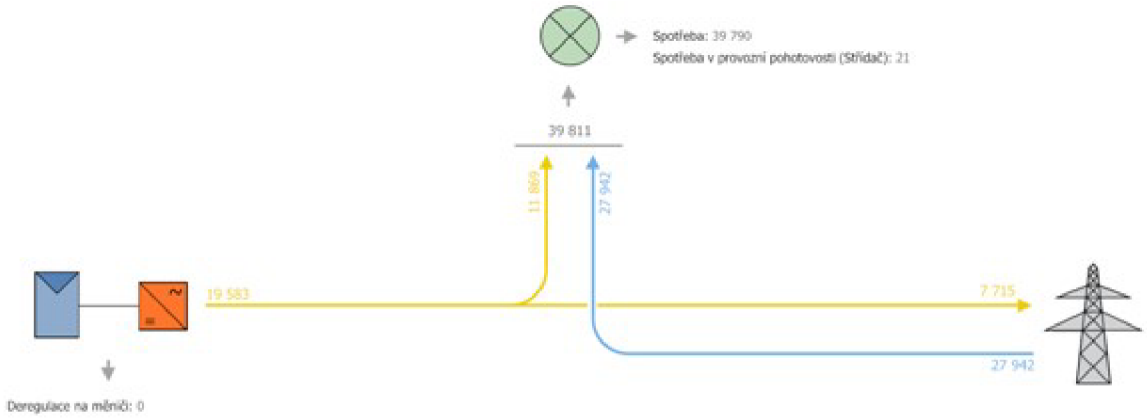
Jmenovitý výkon panelu	Proud MPP	Napětí MPP	Zkratový proud	Napětí naprázdno	Výška	Šířka	Hloubka	Hmotnost	Cena
[Wp]	[A]	[V]	[A]	[V]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[Kč]
231,80	7,87	29,45	8,32	36,79	1650	990	38	19,5	5456

Tabulka 19 - Parametry panelu s označením EU-2, které jsme naměřili

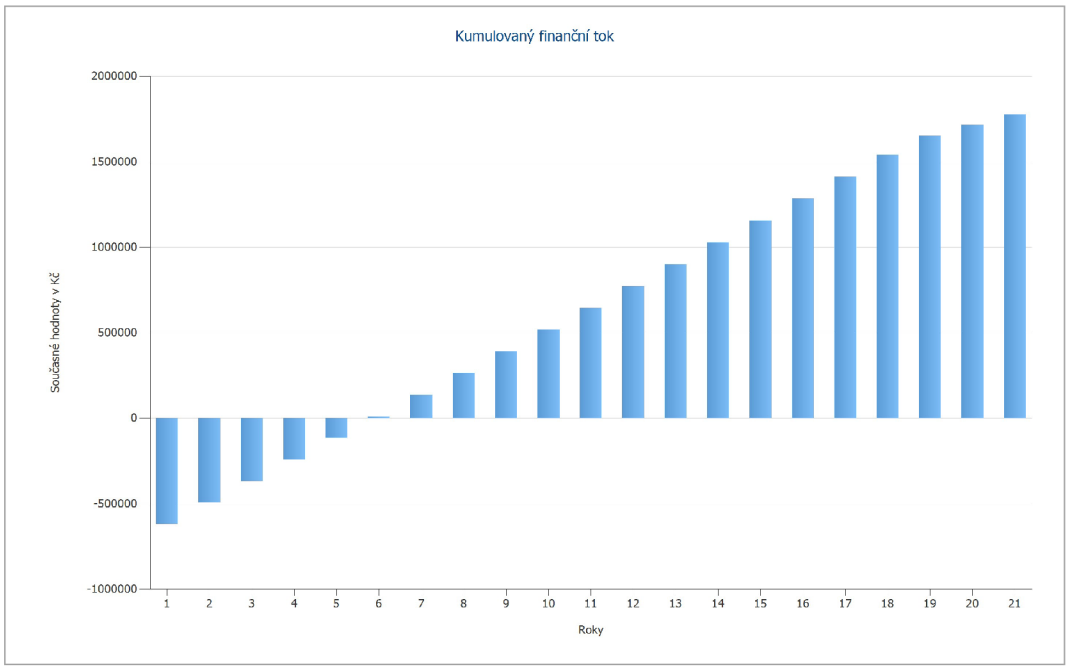
11.5.2.1 .Výsledky simulace panelů s naměřenými hodnotami

Celý soubor simulace je umístěn jako příloha I na přiloženém CD.

Na níže uvedeném obrázku 41 můžeme vidět to, že celková vyrobená energie z FVE je 19583 kWh. Z této vyrobené energie se na vlastní spotřebu použije 11869 kWh a prodá do distribuční sítě 7715 kWh. Z toho plyne, že na vlastní spotřebu se využije okolo 60,6 % celkové výroby.



Obrázek 41 – Tok energie FVE s hodnotami panelů námi naměřenými



Obrázek 42 – Návratnost FVE s hodnotami panelů námi naměřenými

Na obrázku 42 můžeme vidět graf návratnosti investice do FVE. Z grafu je patrné, že elektrárna bude v plusových číslech 6. rok od spuštění FVE do provozu.

Rok	Provozní náklady	Úhrada za nabíjení	Úspory při odběru proudu	Komulovaný finanční tok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	-5 577,23	66 792,12	55 608,89	-618 806,22	-618 806,22
2	-5 632,45	73 451,93	57 501,42	125 320,90	-493 485,31
3	-5 688,21	73 629,98	57 630,18	125 571,95	-367 913,36
4	-5 744,53	73 804,16	57 755,85	125 815,47	-242 097,89
5	-5 801,41	73 974,36	57 878,35	126 051,30	-116 046,59
6	-5 858,85	74 140,49	57 997,64	126 279,28	10 232,68
7	-5 916,86	74 302,45	58 113,57	126 499,16	136 731,84
8	-5 975,44	74 460,13	58 226,18	126 710,87	263 442,71
9	-6 034,60	74 613,45	58 335,25	126 914,09	390 356,80
10	-6 094,35	74 762,28	58 440,84	127 108,77	517 465,57
11	-6 154,69	74 906,53	58 542,73	127 294,56	644 760,13
12	-6 215,63	75 046,08	58 640,95	127 471,40	772 231,53
13	-6 277,17	75 180,83	58 735,40	127 639,06	899 870,59
14	-6 339,32	75 310,67	58 825,95	127 797,30	1 027 667,90
15	-6 402,09	75 435,49	58 912,52	127 945,93	1 155 613,82
16	-6 465,47	75 555,16	58 995,03	128 084,71	1 283 698,54
17	-6 529,49	75 669,58	59 073,44	128 213,53	1 411 912,07
18	-6 594,14	75 778,62	59 147,56	128 332,05	1 540 244,12
19	-6 659,43	58 518,74	59 217,40	111 076,72	1 651 320,84
20	-6 725,36	10 798,36	59 282,82	63 355,83	1 714 676,67
21	-6 791,95	10 597,55	59 343,72	63 149,32	1 777 825,99

Tabulka 20 – Finanční tok FVE s hodnotami panelů, které jsme naměřili

V tabulce 20 můžeme pozorovat finanční tok simulované FVE při použití panelů s hodnotami, které jsme naměřili. Se návrat investice také předpokládá na 6. rok od spuštěný FVE, ale s nižším výnosem. 6. rok od spuštění FVE je výnos elektrárny s panely, jejichž parametry udává výrobce 20526,18 kč. Výnos elektrárny s panely, jejichž parametry jsme naměřili je 10 232,68 kč. Rozdíl činí 10293,5 kč. Výnosy na konci sledovaného období potom jsou 1 813 598,64 kč oproti 1777825,99 kč. Rozdíl činí 35772,65 kč to je v procentech okolo 2 %.

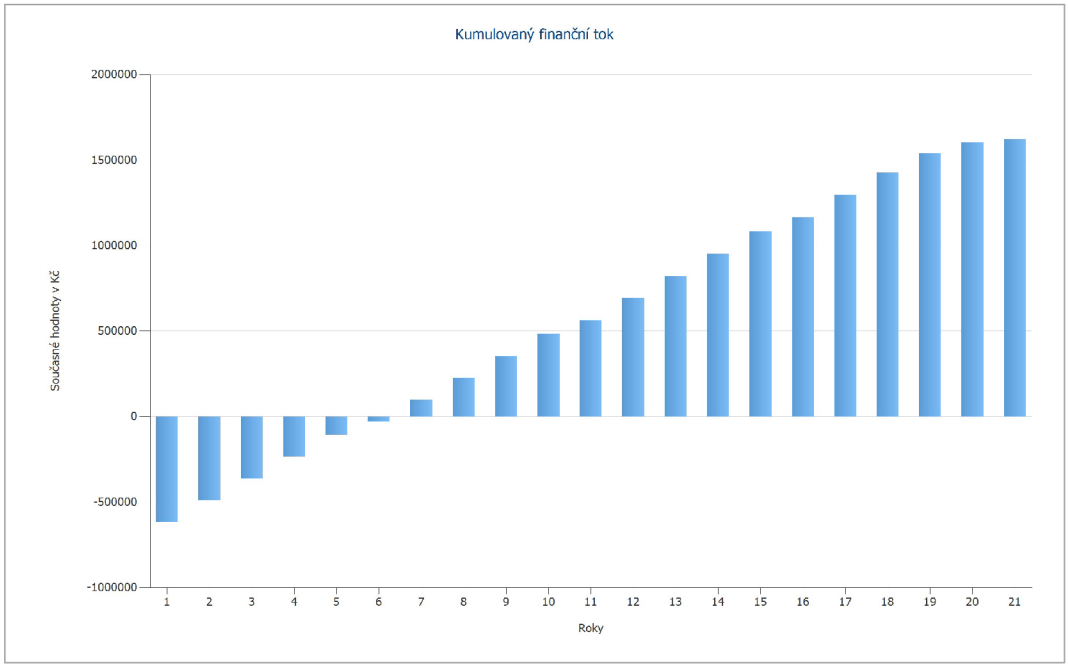
11.6 Simulace panelu EU-2 s poruchou střídačů

V této kapitole si porovnáme výsledky simulací FVE, která se skládá z měřených panelů EU-2 v programu PV Sol. Tato FVE bude rozdílná v tom, že po konci záruční doby dojde k poškození střídačů a bude zde nutná kompletní výměna. Záruční doba střídačů Sunways NT 10000 je 5 let. V první simulaci jsou použity hodnoty, které udává výrobce. Ve druhé simulaci jsou použity hodnoty, které jsme naměřily ve školní laboratoři. Ostatní parametry FVE jsou stejné jako v simulacích popsaných v kapitole 11.5.

11.6.1 Výsledky simulace panelů s hodnotami od výrobce pří poruše střídačů

Celý soubor simulace je umístěn jako příloha J na přiloženém CD.

Na obrázku 43 můžeme vidět graf návratnosti investice do FVE. Z grafu je patrné, že elektrárna bude v plusových číslech 7. rok od spuštění FVE do provozu.



Obrázek 43 – Návratnost FVE s hodnotami panelů od výrobce s poruchou střídačů

V tabulce 21 můžeme pozorovat finanční tok simulované FVE při použití panelů s hodnotami, které udává výrobce a při nutnosti výměny střídačů po vypršení záruční lhůty tedy každých 5 let. Návrat investice se předpokládá na 7. rok od spuštěný FVE.

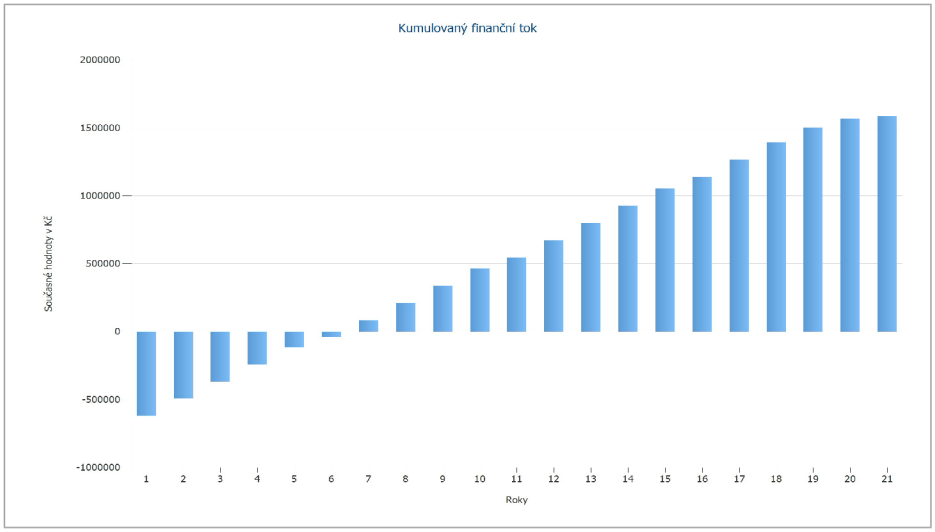
Rok	Invetice	Provozní náklady	Úhrada za nabíjení	Úspory při odběru proudu	Komulovaný finanční tok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	0,00	-5 577,23	68 160,07	55 780,13	-617 267,02	-617 267,02
2	0,00	-5 632,45	75 023,16	57 672,83	127 063,54	-490 203,48
3	0,00	-5 688,21	75 205,04	57 801,97	127 318,79	-362 884,69
4	0,00	-5 744,53	75 382,95	57 928,01	127 566,43	-235 318,27
5	0,00	-5 801,41	75 556,81	58 050,87	127 806,27	-107 511,99
6	-51 605,60	-5 858,85	75 726,51	58 170,52	76 432,58	-31 079,41
7	0,00	-5 916,86	75 891,95	58 286,79	128 261,88	97 182,46
8	0,00	-5 975,44	76 053,02	58 399,73	128 477,31	225 659,78
9	0,00	-6 034,60	76 209,63	58 509,12	128 684,15	354 343,93
10	0,00	-6 094,35	76 361,66	58 615,03	128 882,34	483 226,27
11	-49 100,95	-6 154,69	76 509,01	58 717,22	79 970,59	563 196,85
12	0,00	-6 215,63	76 651,57	58 815,74	129 251,67	692 448,53
13	0,00	-6 277,17	76 789,22	58 910,46	129 422,51	821 871,04
14	0,00	-6 339,32	76 921,85	59 001,28	129 583,82	951 454,86
15	0,00	-6 402,09	77 049,36	59 088,11	129 735,38	1 081 190,24
16	-46 717,87	-6 465,47	77 171,61	59 170,86	83 159,12	1 164 349,36
17	0,00	-6 529,49	77 288,49	59 249,51	130 008,51	1 294 357,87
18	0,00	-6 594,14	77 399,89	59 323,85	130 129,60	1 424 487,46
19	0,00	-6 659,43	60 119,34	59 393,90	112 853,81	1 537 341,27
20	0,00	-6 725,36	11 794,74	59 459,51	64 528,89	1 601 870,17
21	-44 450,45	-6 791,95	11 575,41	59 520,59	19 853,60	1 621 723,76

Tabulka 21 – Finanční tok FVE s hodnotami panelů od výrobce s poruchou střídačů

11.6.2 .Výsledky simulace panelů s naměřenými hodnotami pří poruše střídačů

Celý soubor simulace je umístěn jako příloha K na přiloženém CD.

Na obrázku 44 můžeme vidět graf návratnosti investice do FVE. Z grafu je patrné, že elektrárna bude v plusových číslech 7. rok od spuštění FVE do provozu.



Obrázek 44 - Návratnost FVE s hodnotami panelů námi naměřenými s poruchou střídačů

V tabulce 22 můžeme vidět finanční tok simulované FVE při použití panelů s hodnotami, které jsme naměřili v laboratoři. Návrat investice se předpokládá na 7. rok od spuštěný FVE, tedy stejně jako v předchozí simulaci. Rozdíl můžeme pozorovat v posledním sloupci tabulky. Kdy máme v simulaci s panely, které využívají námi naměřené hodnoty menší výnosnost než panely, které mají hodnoty udávané výrobcem. Tento rozdíl je způsoben tím, že jsme naměřili u panelů menší výkon něž udává výrobce. To znamená méně vyrobeného výkonu a tím pádem míň vydělaných peněz.

Rok	Invetice	Provozní náklady	Úhrada za nabíjení	Úspory při odběru proudu	Komulovaný finanční tok	Návratnost
[-]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	-735 630,00	-5 577,23	66 792,12	55 608,89	-618 806,22	-618 806,22
2	0,00	-5 632,45	73 451,93	57 501,42	125 320,90	-493 485,31
3	0,00	-5 688,21	73 629,98	57 630,18	125 571,95	-367 913,36
4	0,00	-5 744,53	73 804,16	57 755,85	125 815,47	-242 097,89
5	0,00	-5 801,41	73 974,36	57 878,35	126 051,30	-116 046,59
6	-51 605,60	-5 858,85	74 140,49	57 997,64	74 673,68	-41 372,91
7	0,00	-5 916,86	74 302,45	58 113,57	126 499,16	85 126,25
8	0,00	-5 975,44	74 460,13	58 226,18	126 710,87	211 837,12
9	0,00	-6 034,60	74 613,45	58 335,25	126 914,09	338 751,20
10	0,00	-6 094,35	74 762,28	58 440,84	127 108,77	465 859,97
11	-49 100,95	-6 154,69	74 906,53	58 542,73	78 193,61	544 053,58
12	0,00	-6 215,63	75 046,08	58 640,95	127 471,40	671 524,98
13	0,00	-6 277,17	75 180,83	58 735,40	127 639,06	799 164,04
14	0,00	-6 339,32	75 310,67	58 825,95	127 797,30	926 961,35
15	0,00	-6 402,09	75 435,49	58 912,52	127 945,93	1 054 907,27
16	-46 717,87	-6 465,47	75 555,16	58 995,03	81 366,84	1 136 274,11
17	0,00	-6 529,49	75 669,58	59 073,44	128 213,53	1 264 487,65
18	0,00	-6 594,14	75 778,62	59 147,56	128 332,05	1 392 819,70
19	0,00	-6 659,43	58 518,74	59 217,40	111 076,72	1 503 896,42
20	0,00	-6 725,36	10 798,36	59 282,82	63 355,83	1 567 252,24
21	-44 450,45	-6 791,95	10 597,55	59 343,72	18 698,87	1 585 951,11

Tabulka 22 - Finanční tok FVE s hodnotami panelů námi naměřenými s poruchou střídačů

11.7 Souhrn kapitoly

V této kapitole jsme se především věnovali měřením 17 fotovoltaických panelů ve školní laboratoři. 10 panelů bylo od výrobců z Asie 6 od výrobců z Evropy a 1 od výrobce z USA. Srovnávali jsme, jak se liší naměřené parametry panelu s parametry, které udává sám výrobce. Nejlépe nám v tomto vyšli výrobci z Asie. U jednoho panelu od Asijských výrobců jsme naměřili lepší parametry, než udává výrobce. Hůře po té dopadli panely od evropských výrobců, kde se hodnoty u jednoho z nejdůležitějších parametrů a to jmenovitého výkonu panelu lišily až o 7 %. Nejhůře se jevil panel od výrobce z USA, který se lišil v jmenovitém výkonu panelu o 10 %.

Dále jsme měřili relativní novinku na trhu a to bifaciální panel, který je osazen fotovoltaickými panely z obou stran. Proběhla dva měření panelu měření elektroluminiscence a měření V-A charakteristiky obou stran panelů.

V poslední části jsme se opět přesunuli do programu PV SOL a to proto abychom zjistili, jak je důležité znát přesné parametry panelů. Pro tuto simulaci jsme využili jeden z měřených panelů a vyzkoušeli dvě simulace jednu s parametry, které udává výrobce a druhou s námi naměřenými parametry. Rozdíl hodnot výkonů mezi měřeným a udávaným byl 3,42 % a celkový rozdíl návratnosti byl vypočten na 2 %. 2 % procenta se může zdát jako zanedbatelný rozdíl, ale u velkých FVE to může dělat slušnou částku peněz. Výsledků po té plyne, že znalost přesných parametrů FV panelů je velice důležitá. Také jsme si zde vyzkoušeli simulaci FVE, kdy pravidelně po skončení záruční lhůty dojde k poškození střídačů a je třeba zakoupit nové.

12 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala základní teorii fotovoltaických panelů v teoretické části a FVE instalované ve firemním prostředí v praktické části.

V teoretické části diplomové práce jsme si popsali fotovoltaické panely od principu funkce až po podpory OZE. V teoretické části byla též popsána novinka na trhu s fotovoltaickými panely a to bifaciální solární panel. Tyto panely jsou konstruovány tak aby dokázaly zachytit sluneční svit jak z přední tak i ze zadní strany panelu. To je způsobeno tím, že disponují solárními články z obou stran, takže jsou tyto články schopné absorbovat světlo, které se odráží od země nebo jiného materiálu. Podle výzkumů dokáží tyto panely při vhodné instalaci generovat o 30 % víc energie. Tyto panely jsou nejčastěji vyráběny jako monokrystalické.

V praktické části jsme se především věnovali hodnocení fotovoltaické elektrárny umístěné ve firemním areálu. Tato FVE se nachází na střeše objektu, který je situován v brněnské městské části Židenice. FVE byla uvedena do provozu koncem roku 2012. Její instalovaný výkon je 19,74 kWp. Tato elektrárna je sestavena z 84 panelů CONERGY PowerPlus 235 o jmenovitém výkonu 235 kWp a 2 střídačů Sunways NT 10000 o maximálním výstupním výkonu 10kW.

Nejprve jsme provedli srovnání predikční tabulky, která byla vytvořena současně s uvedením FVE do provozu se skutečnými daty naměřenými do konce roku 2019. Zde realita byla o něco lepší než očekávaní. FVE elektrárna totiž dokáže vyrobit více elektřiny něž se předpokládalo v predikční tabulce, kde se počítala výroba elektřiny jako konstantní. V konečném důsledku se to podepisuje na návratnosti, kdy reálná elektrárna dokázala vygenerovat za 7 let o 17015 kč víc než se přepokládalo.

V další části jsme si FVE nasimulovali v programu PV SOL. V tomto programu zjistíme jak kvalitně byla tato elektrárna vybudována. Nejprve jsme si museli definovat celkovou spotřebu objektu taje 39790 kWh za rok. Dále jsme provedli 3D model objektu, kde jsme kromě modelu objektu provedli instalaci panelů a střídačů. V další části jsme podle schématu skutečného stavu dodělali na FVE ochrany a nakonec jsme se přesunuli do finanční analýzy. Zde jsme nastavili celkovou cenu elektrárny, která je 1054170 kč, dále náklady na údržbu, které se v roce 2013 pohybovaly okolo 5280 kč a zelený bonus za vyrobenou 1 kWh, který v roce 2013 byl 5,70 kč za kWh. Úvěr byl vystaven s úrokovou mírou 6,5 % p.a a byl poskytnut na celkové náklady FVE. Tarif, za který elektřinu prodáváme do distribuce se pohybuje okolo 0,4 kč za 1 kWh a nákupní cena elektrické energie je 4,69 kč za 1 kWh. Závěrem můžeme konstatovat to, že lépe nám vychází reálná FVE a to i když simulovaná FVE vyrábí více elektrické energie. Tento rozdíl je především způsoben tím, že simulovaná FVE oproti reálné využívá méně elektřiny na svoji spotřebu a více ji prodává do distribuční soustavy.

Zabývali jsme se také rozdíly simulací FVE v roce 2013 se simulací FVE v roce 2019. Rozdíl mezí těmito fotovoltaickými elektrárnami je v tom, že v roce 2019 už nemůžeme dostat zelený bonus za vyrobenou kWh. Je tu i odlišný tarif na prodej a nákup elektřiny. Všechny tyhle rozdíly se promítnou v celkové návratnosti, které se změní z 8 let při instalaci v roce 2013 na 11 let při instalaci v roce 2019

V poslední kapitole jsme se hlavně věnovali měření fotovoltaických panelů ve školní laboratoři a to 17 klasických panelů. 10 panelů bylo od výrobců z Asie 6 od výrobců z Evropy a 1 od výrobce z USA. Porovnávali jsme, jak se liší naměřené parametry panelu s parametry, které udává sám výrobce. Nejlépe nám v tomto vyšli výrobci z Asie. U jednoho panelu od Asijských výrobců jsme naměřili dokonce o něco lepší parametry, než udává výrobce. Hůře po té dopadli panely od evropských výrobců, kde se hodnoty u jednoho z nejdůležitějších parametrů a to jmenovitého výkonu panelu lišily až o 7 %. Nejhůře se jevil panel od výrobce z USA, který se lišil v jmenovitém výkonu panelu o 10 %.

Také jsme provedli měření bifaciálního panelu, který je osazen fotovoltaickými články z obou stran. Proběhla dva měření panelu měření elektroluminiscence a měření V-A charakteristiky obou stran panelů.

V poslední části jsme provedli simulace v programu PV SOL. Tyto simulace mají poukázat na to jak je důležité znát přesné parametry panelů. Pro tuto simulaci jsme využili jeden z měřených panelů a to konkrétné panel s označením EU-2 a vyzkoušeli jsme si simulace parametry, které udává výrobce a s námi naměřenými parametry. Rozdíl hodnot výkonu mezi měřeným a udávaným byl 3,42 % a celkový rozdíl návratnosti byl vypočten na 2 %. Z těchto poznatků jsme došli k tomu, že znalost přesných parametrů panelů je velice důležitá.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] MPO Efekt. *MPO Efekt* [online]. Copyright © Petr Mastný, Jiří Drápela, Stanislav Mišák, Jan Macháček [cit. 08.12.2019]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/cz/programy-podpory/efekt/publikace/71117

[2] Úvod do FV systémů - CNE Czech Nature Energy, a. s.. Hlavní strana - CNE Czech Nature Energy, a. s. [online]. Copyright © 2019 [cit. 08.12.2019]. Dostupné z: http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/

[3] Slunce a jeho energie[online]. Dostupné z: https://www.oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/1948-slunce-a-jeho-energie

[4] Fyzikální podstata přechodu PN :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 08.12.2019]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn#

[5] Stručná historie fotovoltaiky [online]. Dostupné z: https://www.oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky

[6] Fotovoltaické články a panely jako prostředek k využití solární energie | AGROjournal.cz. Časopis o strojích, mechanizaci a nářadí pro zemědělství | AGROjournal.cz [online]. Copyright © 2011 [cit. 08.12.2019]. Dostupné z: https://www.agrojournal.cz/clanky/fotovoltaicke-clanky-a-panely-jako-prostredek-k-vyuziti-solarni-energie-169

[7] Konsturkce a výroba FV článků a panelů[online]. Dostupné z: https://www.publi.cz/books/91/03.html#3-4

[8] MAREČEK, Jan. Návrh system fotovoltaických panelů pro rodinný dům: bakalářská práce. Brno: Vysokéučenítechnické v Brně, Fakultaelektrotechniky a komunikačních technologií, Ústavelektroenergetiky, 2013. 58 s. Vedoucíprácebyl Ing. JiříPěcha

[9] ŠMATLO, F. *Návrh fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm pro firmu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2019. 41 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

[10] Bifacial Solar Panels: What You Need to Know | EnergySage. Solar News | Latest Solar Industry News And Insights | EnergySage [online]. Copyright © 2009 [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: https://news.energysage.com/bifacial-solar-panels-what-you-need-to-know/

[11] What are bifacial solar modules and how do they work?. Solar Power Installation | Development | Technology News and Features [online]. Copyright © 2019 WTWH Media, LLC. All Rights Reserved. [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: https://www.solarpowerworldonline.com/2018/04/what-are-bifacial-solar-modules/

[12] Bifacial solar modules [online]. Dostupné z: https://www.trace-software.com/blog/bifacial-solar-panels-characteristics-and-advantages/

[13] Potential induced degradation – Wikipedie. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Potential_induced_degradation

[14] Pokles výkonu FVE v důsledku vysokonapěťového stresu [online]. Dostupné z: https://www.oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektraren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu

[15] Síťová fotovoltaika - SVP Solar. Domů - SVP Solar [online]. Copyright © 2019 SVP SOLAR s.r.o. Všechna práva vyhrazena. [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: https://www.svp-solar.cz/sitova-fotovoltaika/

[16] Hybridní FVE - SVP Solar. Domů - SVP Solar [online]. Copyright © 2019 SVP SOLAR s.r.o. Všechna práva vyhrazena. [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: https://www.svp-solar.cz/fotovoltaika/hybridni-fotovoltaicke-elektrarny/

[17] Ostrovní systémy. Domů - SVP Solar [online]. Copyright © 2019 SVP SOLAR s.r.o. Všechna práva vyhrazena. [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: https://www.svp-solar.cz/fotovoltaika/ostrovni-systemy1/

[18] Na co pozor. Energie pro život [online]. Dostupné z: http://www.energieprozivot.eu/133-cemu-se-vyhnout-pri-nakupu-fv-systemu

[19] Fotovoltaika - zákony a předpisy. Isofen Energy - titulní stránka [online]. Copyright © 2009 Isofen Energy s.r.o. [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: http://www.elektrinazestrechy.cz/Zakony-fotovoltaika.aspx

[20] Fotovoltaické elektrárny - výkupní ceny. Isofen Energy - titulní stránka [online]. Copyright © 2009 Isofen Energy s.r.o. [cit. 14.12.2019]. Dostupné z: http://www.elektrinazestrechy.cz/Vykupni-ceny-fotovoltaika.aspx

[21] Obnovitelná energie – Wikipedie. [online] [cit. 15.4.2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Obnoviteln%C3%A1_energie

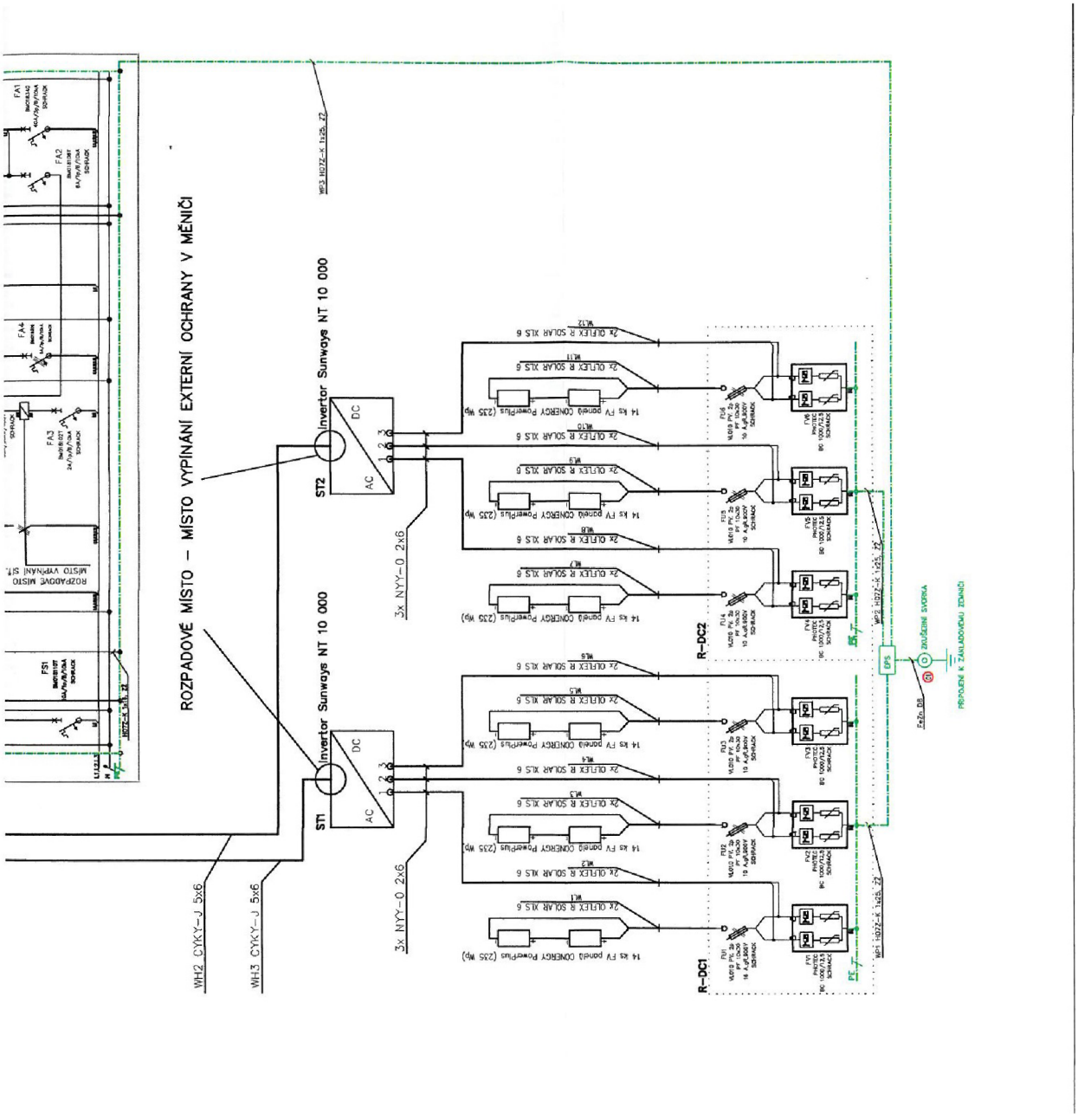
[22] Co jsou to obnovitelné zdroje energie? | E.ON. Pomáháme šetřit peníze i přírodu | E.ON [online] [cit. 15.4.2020]. Dostupné z: https://www.eon.cz/radce/obnovitelne-zdroje-energie

[23] Blog o energetice | EkoWATT. EkoWATT | Energetika a ekonomika pro ekologiiEkoWATT | Energetika a ekonomika pro ekologii [online]. Copyright © 1990 [cit. 17.05.2020]. Dostupné z: https://ekowatt.cz/novinky/ekowatt-se-stal-distributorem-programu-pro-navrhovani-fotovoltaickych-systemu-pvsol-pro-cr/

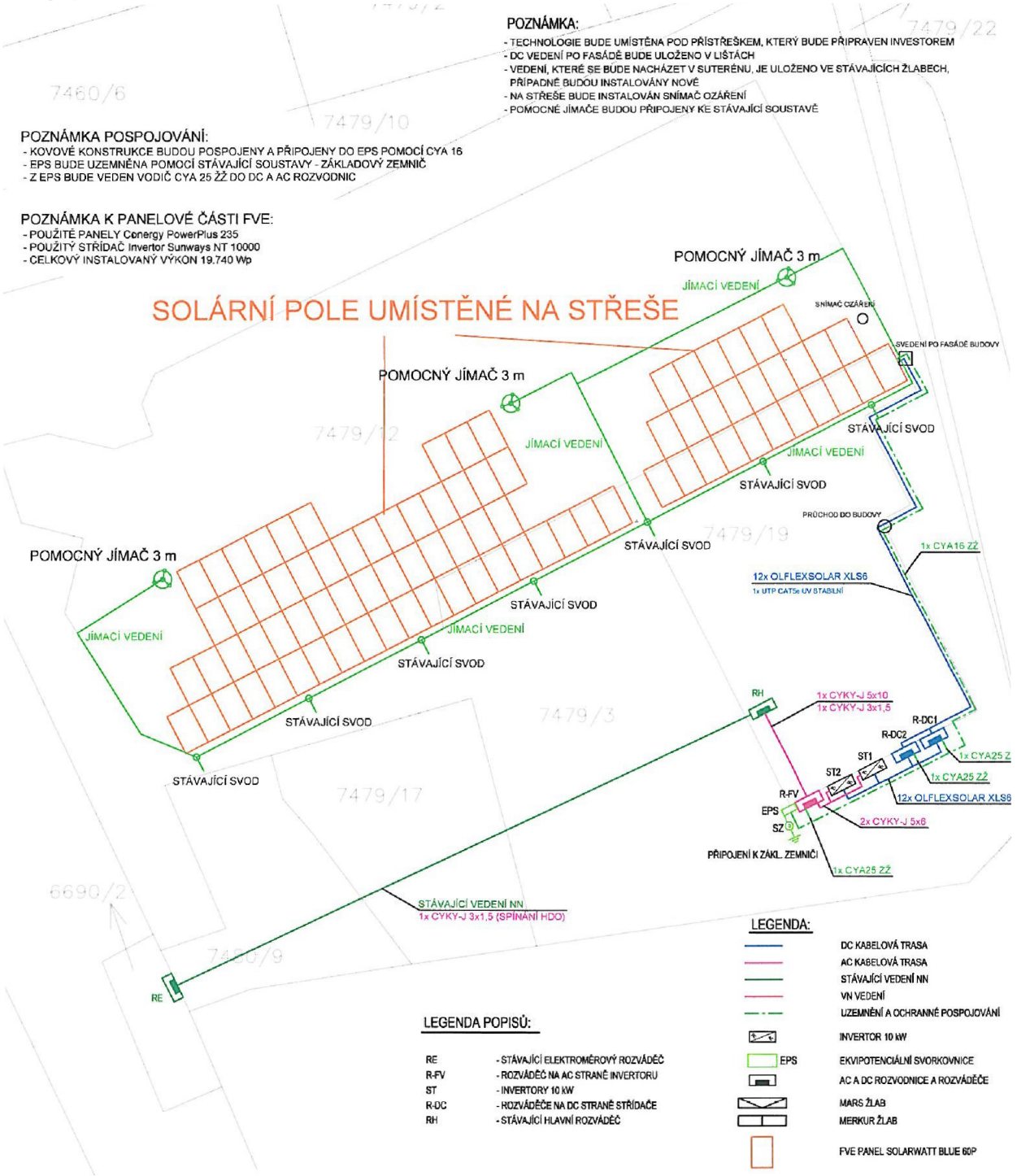
SEZNAM PŘÍLOH

- **Příloha A: Jednopólové schéma**
- **Příloha B: Situace**
- **Příloha C: Rozvaděč R-DC1**
- **Příloha D: Rozvaděč R-DC2**
- **Příloha E: Rozvaděč R-FV**
- **Příloha F: Simulace skutečné FVE**
- **Příloha G: Simulace FVE vybudované v roce 2019**
- **Příloha H: Simulace FVE s hodnotami panelů EU-2, které udává výrobce**
- **Příloha I: Simulace FVE s hodnotami panelů EU-2, které jsme naměřili**
- **Příloha J: Simulace FVE s hodnotami panelů EU-2, které udává výrobce a poruchou střídačů**
- **Příloha K: Simulace FVE s hodnotami panelů EU-2, které jsme naměřili a poruchou střídačů**

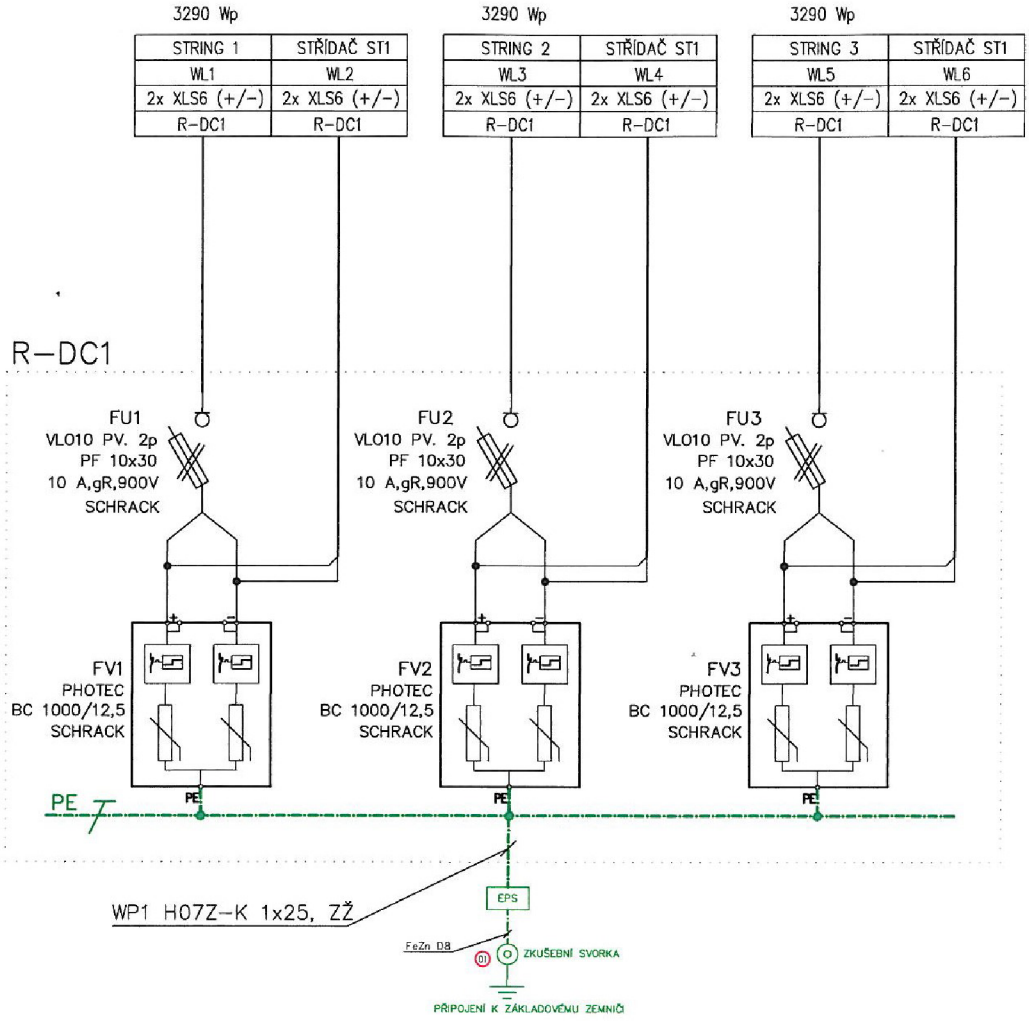
- **Příloha A: Jednopólové schéma**



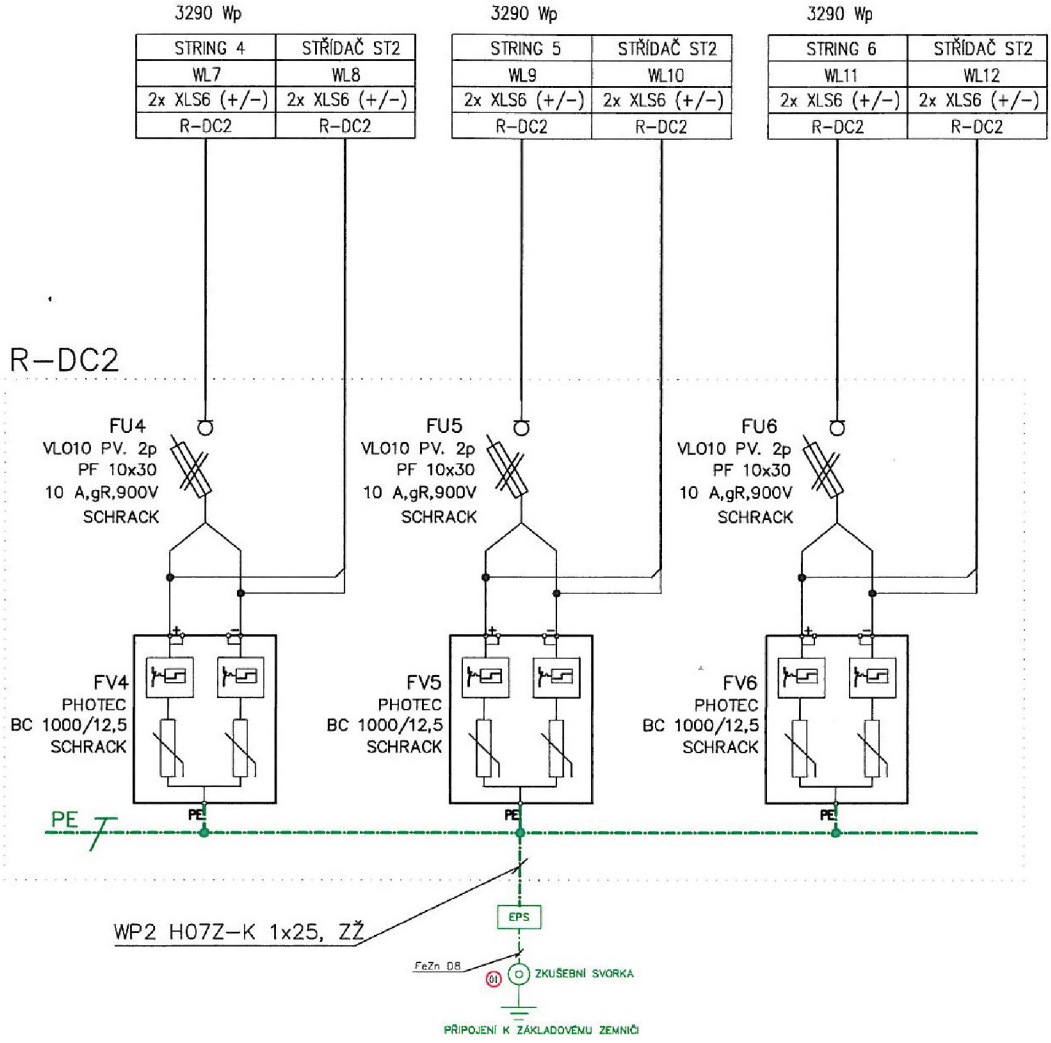
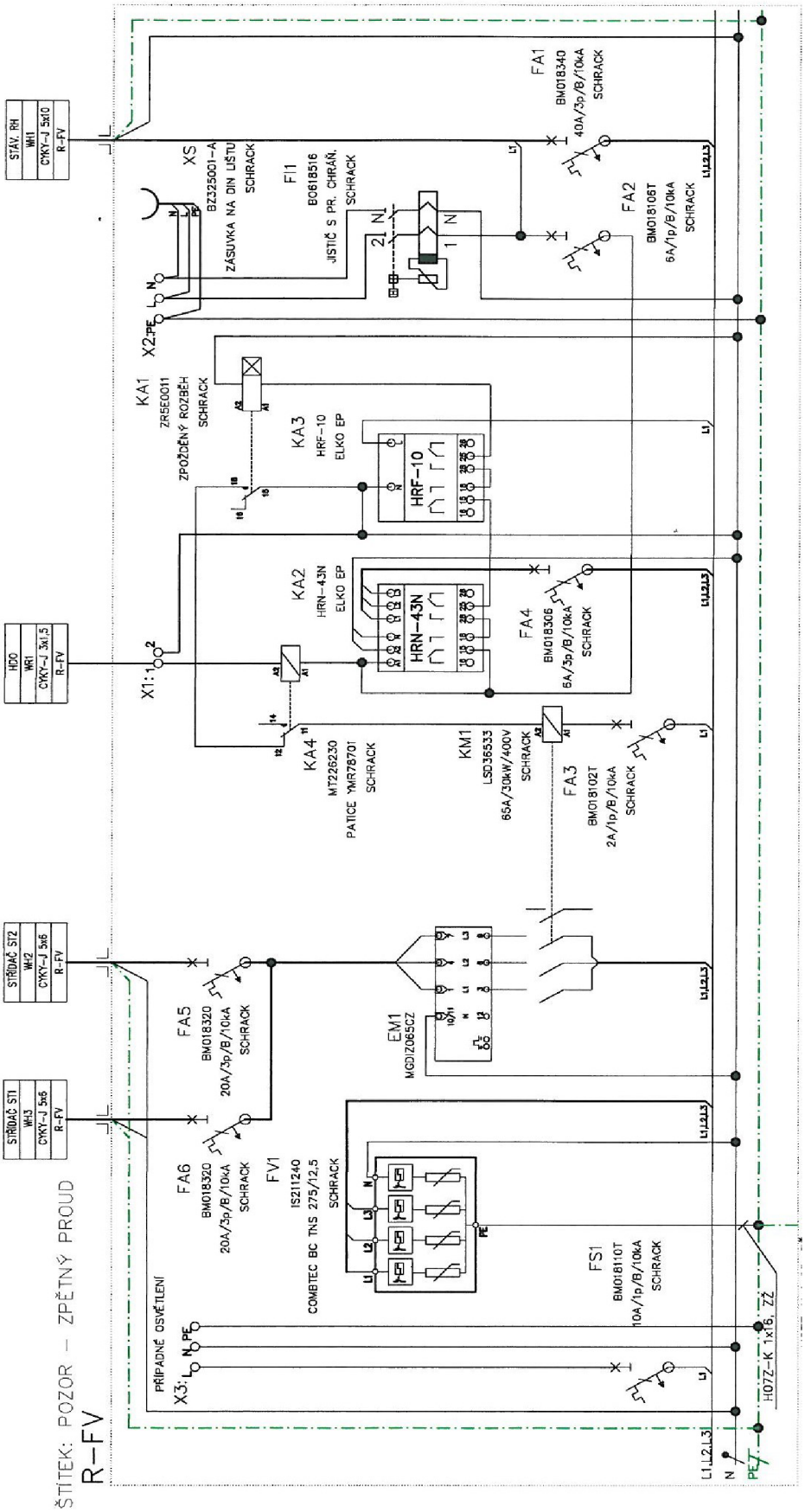
Příloha B: Situace



Příloha C: Rozvaděč R-DC1



Příloha D: Rozvaděč R-DC2



Příloha E: Rozvaděč R-FV