

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**Návrh řídicího algoritmu pro rekonfigurátor  
solárního fotovoltaického pole**

David Kaplan

Diplomová práce

2016



Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Kaplan**  
Osobní číslo: **I12446**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**  
Název tématu: **Návrh řídicího algoritmu pro rekonfigurátor solárního  
fotovoltaického pole**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Cílem práce je návrh řídicího algoritmu pro již zkonstruovaný re-konfigurátor solárního fotovoltaického pole, kdy v případě zastínění části pole dojde k vhodné rekonfiguraci panelů za účelem optimalizace výstupního výkonu. Pole je tvořeno 12-ti PV panely a každý panel je tvořen sériovým spojením 3 modulů s 20-ti monokrystalickými články, přičemž každý modul je překlenut ByPass diodou, která významně ovlivňuje výstupní V-A charakteristiky panelů. Teoretická část práce bude obsahovat popis chování PV článku a jeho náhradní matematický model. Dále bude proveden rozbor možností řešení rekonfigurace pro SP a TCT topologii. Uveden bude také základní popis rekonfigurátoru. Praktická část práce bude obsahovat modelování různých konfigurací a simulace rekonfigurací panelů, tvorbu vhodného řídicího algoritmu, jeho implementaci do rekonfigurátoru a závěrečné měření s výsledky po implementaci nového firmware.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **80**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**Damiano La Manna, Vincenzo Li Vigni, Eleonora Riva Sanseverino, Vincenzo Di Dio, Pietro Romano, Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, May 2014, Pages 412-426, ISSN 1364-0321**

**Koray İener Parlak, PV array reconfiguration method under partial shading conditions, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 63, December 2014, Pages 713-721, ISSN 0142-0615**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2015

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 26. května 2016

David Kaplan

## **Poděkování**

Na tomto místě děkuji především panu Prof. Giaconia Giuseppe Costantino a paní Prof. Eleonora Riva Sanseverino za poskytnutí zázemí pro výzkumné činnosti spojené s projektem Reconfigurator 1.0 a dále za pomoc a cenné rady při zpracování této diplomové práce na univerzitě v Palermu. Mé poděkování patří také vedoucímu práce panu Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D, který mě po celou dobu vedl správným směrem účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomocí. Tímto bych také rád poděkoval svým rodičům, kamarádům a přítelkyni, kteří mě po celou dobu mého studia velmi podporovali.

## **Anotace**

Cílem práce je návrh řídicího algoritmu pro již zkonstruovaný rekonfigurátor solárního fotovoltaického pole, kdy v případě zastínění části pole dojde k vhodné rekonfiguraci panelů za účelem optimalizace výstupního výkonu. Pole je tvořeno 12-ti PV panely a každý panel je tvořen sériovým spojením 3 modulů s 20-ti polykrystalickými články, přičemž každý modul je překlenut By-Pass diodou, která významně ovlivňuje výstupní I-V charakteristiky panelů. Teoretická část práce bude obsahovat popis chování PV článku a jeho náhradní matematický model. Dále bude proveden rozbor možností řešení rekonfigurace pro SP a TCT topologii. Uveden bude také základní popis rekonfigurátoru. Praktická část práce bude obsahovat modelování různých konfigurací a simulace rekonfigurací panelů, tvorbu vhodného řídicího algoritmu, jeho implementaci do rekonfigurátoru a závěrečné měření s výsledky po implementaci nového firmware.

## **Klíčová slova**

Algoritmus, Rekonfigurátor, PV panel, Bypass dioda, 3x4 TCT zapojení, MPPT, SLPS

## **Title**

Design of control algorithm for reconfiguration of solar photovoltaic array

## **Annotation**

The aim of this thesis is to design a control algorithm for the already constructed reconfigurator of solar photovoltaic array. In the case of partially shaded array, occurs suitable reconfiguration of PV panels to optimize output array power. The PV array is made up of 12 PV modules, which are formed by a serial connection of 3 strings with 20 polycrystalline PV cells. Each string in module is bridged by ByPass diode, which significantly affects the output I-V characteristics of the panels. Theoretical part of thesis contains description of the PV cell behavior and equivalent mathematical model. Further includes also analyzing of the possible solutions of reconfiguration for SP and TCT topology and provides the basic description of the reconfigurator device. Practical part of thesis should include modeling of various configurations and simulation of executed reconfiguration of the PV modules. A suitable control algorithm should be created and implemented into the reconfigurator device and final measurements performed after installing of new firmware.

## **Keywords**

Algorithm, Reconfigurator, PV module, Bypass diode, 3x4 TCT topology, MPPT, SLPS

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Teorie Fotovoltaiky</b> .....	<b>13</b>
2.1 Polovodičový přechod P-N.....	14
2.2 Princip fotovoltaického jevu.....	15
2.3 Sluneční spektrum AM 1.5 Global.....	16
2.4 Fotodioda.....	17
<b>3 PV článek - základní komponent fotovoltaiky</b> .....	<b>18</b>
3.1 Typy PV článků.....	19
3.1.1 Monokrystalické křemíkové články .....	20
3.1.2 Polykrystalické křemíkové články.....	20
3.1.3 Tandemové články.....	21
3.2 Elektrické parametry PV článku.....	21
3.3 Náhradní matematický model PV článku.....	22
3.4 Určení parametrů náhradního matematického modelu PV článku.....	25
3.5 Efektivní model PV článku .....	28
<b>4 Propojení PV komponent - článek-modul-panel-řetězec-pole</b> .....	<b>29</b>
4.1 Nesoulad a výkonový pokles při vzájemném propojení PV komponentů.....	30
4.2 Sériové a paralelní propojení.....	31
4.3 Ochranné blokovací a ByPass diody .....	32
4.4 MPPT - sledovač maximálního výkonu .....	35
<b>5 Strategie propojení PV panelů a možnosti rekonfigurace</b> .....	<b>36</b>
5.1 Příčiny vzniku nesouladu vlivem rozdílných I-V charakteristik.....	37
5.1.1 Technologické příčiny a stárnutí .....	37
5.1.2 Rozdílné provozní podmínky .....	38
5.2 Nejčastější způsoby zapojení PV panelů.....	40
5.2.1 Sério-paralelní spojení PV panelů (SP).....	41
5.2.2 Kompletně propojené spojení PV panelů (TCT).....	42
5.3 Moderní řešení nesouladu panelů – výkonové optimalizéry se střídačem.....	43
<b>6 Rekonfigurátor – hardware</b> .....	<b>44</b>
6.1 Řídící část rekonfigurátoru - PVEqualizer .....	45
6.2 Přepínací matice rekonfigurátoru .....	46

6.3	Obvody pro měření napětí a proudu PV panelu .....	48
6.4	Měření teploty PV panelu.....	49
<b>7</b>	<b>Praktická část - tvorba simulačního modelu.....</b>	<b>50</b>
7.1	Modelování diody pomocí SPICE stejnosměrného modelu.....	51
7.2	Simulace v programu LTspiceIV .....	54
7.3	SPICE simulační model v programu OrCAD-Capture / OrCAD-PSpice .....	60
7.3.1	OrCAD-Capture: Práce s projekty a organizace simulačních souborů .....	61
7.3.2	OrCAD-Capture: Simulační schéma PV panelu .....	63
7.3.3	OrCAD-Capture: Simulační schéma rekonfigurační matice.....	65
7.3.4	OrCAD-Capture: Schéma řídicích prvků simulačního modelu.....	67
7.3.5	OrCAD-PSpice: Nastavení řídicích parametrů a simulace modelu .....	68
7.4	OrCAD-PSpice a Simulink: Kosimulace pomocí SLPS interface. ....	70
7.4.1	Požadavky na softwarové vybavení a instalace SLPS.....	71
7.4.2	Způsob použití SLPS interface v Simulinku .....	71
7.4.3	Praktické zkušenosti se správným použitím SLPS interface.....	73
7.4.4	Konfigurace SLPS a nastavení parametrů simulace.....	74
7.5	Řídicí algoritmus simulačního modelu v programu MATLAB .....	78
7.5.1	Definice parametrů simulace - popis vstupních matic.....	78
7.5.2	M-funkce pro zápis simulačních parametrů do includovaných souborů.....	80
7.5.3	M-skripty pro přímé řízení simulace .....	82
7.6	MPPT simulace I-V a P-V charakteristik, výstupní hodnoty v matici .....	87
7.7	MEASURE simulace - popis výstupních hodnot v matici .....	91
<b>8</b>	<b>PV pole – měření a aktuální rekonfigurační strategie .....</b>	<b>92</b>
8.1	Použité PV panely .....	93
8.2	Měření parametrů PV pole v základní 3x4 TCT konfiguraci.....	94
8.3	Aktuálně používaný rekonfigurační algoritmus .....	99
8.4	Měření parametrů PV pole v reálném provozu - specifikace problému.....	101
<b>9</b>	<b>Simulátor – praktické použití, výstupy, simulace zastínění .....</b>	<b>103</b>
<b>10</b>	<b>Diskuze – postup v projektu .....</b>	<b>108</b>
10.1	Předpokládané vylepšení hardware rekonfigurátoru. ....	108
10.2	Využití genetických algoritmů s pamětí.....	109
10.3	Návrh pomocných měřících jednotek.....	111
<b>11</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>112</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>114</b>
	<b>Seznam příloh práce na datovém nosiči .....</b>	<b>115</b>

## Seznam zkratek

- AC** - Alternating Current, střídavý proud [A]
- AM1.5** – Air Mass 1.5, koeficient spektra slunečního záření na povrchu země
- BIPV** – Building Integrated Photo Voltaics, fotovoltaické prvky jako stavební materiály
- BP** – ByPass, překlenovací dioda (jedná se většinou o výkonovou Schottkyho diodu)
- DC** – Direct Current, stejnosměrný proud [A]
- DPDT** – Double Pole Double Throw, dvopólové přepínací relé
- DPST** - Double Pole Single Throw, dvopólové spínací relé
- G** – Solar irradiance, intenzita slunečního záření [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- I<sub>PV</sub>** – Photovoltaics Current, generovaný fotovoltaický proud [A]
- I<sub>SC</sub>** - Short Circuit current, proud nakrátko při zkratu [A]
- I-V** – Current-Voltage, voltampérová charakteristika
- MPP** – Maximum Power Point, maximální bod výkonu [W]
- MPPT** – Maximum Power Point Tracker, sledovač bodu maximálního výkonu
- PN** – Positive Negative, Oblast styku dvou polovodičů s opačným typem vodivosti
- PV** – Photo Voltaic, fotovoltaický
- P-V** – Power-Voltage, výkonová charakteristika
- SLPS** – SimuLink PSpice, simulační interface propojující Simulink a PSpice simulátory
- SP** – Serial Parallel, sério paralelní propojení prvků
- SPICE** - Simulation Program With Integrated Circuit Emphasis – simulační program
- SPST** – Single Pole Single Throw, klasické jednopólové spínací relé
- STC** – Standard Test Conditions, standardní testovací podmínky  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$
- T** – Temperature, teplota [ $^\circ\text{C}$ ]
- TCT** – Total Cross Tied, úplné sériové a paralelní propojení všech prvků
- V<sub>OC</sub>** - Open Circuit voltage, napětí naprázdno při odpojení zátěže [V]

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Polovodičový přechod PN bez přiloženého napětí [2].....	14
Obrázek 2 – Polovodičový přechod PN v závěrném směru [2].....	14
Obrázek 3 - Polovodičový přechod PN v propustném směru [2].....	14
Obrázek 4 - Spektrum slunečního záření při průchodu zemskou atmosférou [web] .....	15
Obrázek 5 - Princip fotovoltaického jevu [web].....	16
Obrázek 6 - I-V charakteristika PV diody a její operační režimy .....	18
Obrázek 7 - I-V charakteristika PV článku (panelu) při změně podmínek [5] .....	19
Obrázek 8 - Monokrystalický (vlevo) a polykrystalický (vpravo) PV článek v detailu [web] .....	20
Obrázek 9 - Pracovní oblasti PV článku (panelu).....	22
Obrázek 10 - Náhradní matematický model PV článku .....	23
Obrázek 11 – Průběh Lambertovy W-funkce [Matlab].....	25
Obrázek 12 – Znázornění jednotlivých PV komponent .....	29
Obrázek 13 – Sériové a paralelní spojení PV komponentů .....	31
Obrázek 14 – Znázornění funkce ByPass diody.....	32
Obrázek 15 - Funkce ByPass diod při zastínění části PV panelu a vliv na celkový výkon .....	33
Obrázek 16 - Zapojení ochranných blokovacích a ByPass diod .....	34
Obrázek 17 – Používané architektury zapojení měničů u PV polí [6].....	36
Obrázek 18 – Vznik částečného zastínění PV panelů vlivem fixní překážky [5] .....	38
Obrázek 19 – Znečištění PV panelů – sníh a prach [web] .....	39
Obrázek 20 - Teplotní snímek fotovoltaické elektrárny na střeše domu [9].....	39
Obrázek 21 – Způsoby propojení PV panelů [6].....	40
Obrázek 22 – Rekonfigurační strategie v SP propojení [6] .....	41
Obrázek 23 – Rekonfigurační strategie v TCT propojení [6] .....	42
Obrázek 24 - Výkonový optimizer SolarEdge [9].....	43
Obrázek 25 - Rekonfigurator PV pole: pohled na kompletní zařízení umístěné v boxu. ....	44
Obrázek 26 - Blokové schéma řídicí části rekonfiguratoru .....	45
Obrázek 27 – Blokové schéma prepínací matice .....	47
Obrázek 28 - Blokové schéma měřících obvodů umístěných na desce s prepínacími relé.....	48
Obrázek 29 - Umístění teplotních senzorů na středu zadní části PV panelů.....	49
Obrázek 30 - Typická struktura simulačního programu založeného na jádru PSpice [11].....	50
Obrázek 31 - Stejnoseměrná I-V charakteristika modelu diody ve SPICE [12].....	52
Obrázek 32 - Stejnoseměrný náhradní DC SPICE model diody [12] .....	53
Obrázek 33 - Struktura simulačního programu LTspiceIV [13] .....	54
Obrázek 34 - Simulační schéma PV panelu v editoru schémat LTspiceIV .....	55
Obrázek 35 - Nastavení simulace PV panelu v programu LTspiceIV.....	56
Obrázek 36 - I-V charakteristika PV panelu při STC - simulace v programu LTspiceIV.....	57
Obrázek 37 - P-V charakteristika PV panelu při STC - simulace v programu LTspiceIV.....	57
Obrázek 38 - Simulační zapojení PV pole (12 panelů 3x4 TCT) v editoru schémat LTspiceIV.....	58
Obrázek 39 - P-V charakteristika PV pole 3x4 TCT - simulace v programu LTspiceIV .....	59
Obrázek 40 - Struktura projektového adresáře v OrCAD-Capture – projekt rekonfigurator .....	61
Obrázek 41 - Simulační schéma modelu PV panelu v programu OrCAD-Capture.....	64
Obrázek 42 - Zapojení PV panelu v hlavním simulačním schématu MAINBOARD.....	65
Obrázek 43 - Simulační schéma podobvodu DPST relé v programu OrCAD-Capture.....	65
Obrázek 44 - Simulační schéma podobvodu DPDT relé v programu OrCAD-Capture .....	66
Obrázek 45 - Simulační schéma prepínací matice (jeden panel) v programu OrCAD-Capture .....	67
Obrázek 46 - Schéma řídicích prvků simulačního modelu v programu OrCAD-Capture .....	68
Obrázek 47 - Nastavení parametrů simulace pomocí editoru OrCAD-Capture .....	69

Obrázek 48 - P-V charakteristika PV pole 3x4 TCT - simulace v programu OrCAD-PSpice.....	69
Obrázek 49 - Nastavení řídicích zdrojů v prostředí Matlab – Simulink .....	70
Obrázek 50 - Princip SLPS interface – přiřazení schéma z OrCAD-Capture editoru .....	70
Obrázek 51 – Simulink: knihovna SLPS interface po zadání příkazu slpslib .....	72
Obrázek 52 - SLPS interface: přiřazení projektu a základní nastavení vstupů a výstupů.....	74
Obrázek 53 - SLPS interface: nastavení parametrů simulace .....	75
Obrázek 54 - Výměna dat mezi Simulinkem a PSpice A/D simulátorem [15] .....	76
Obrázek 55 – Nastavení simulačních parametrů simulinkových modelů .....	77
Obrázek 56 - P-V charakteristika pole při určených podmínkách ozáření a teplot.....	88
Obrázek 57 - I-V charakteristika pole při určených podmínkách ozáření a teplot.....	88
Obrázek 58 - P-V charakteristika pole a panelu při max. ozáření a určených teplotách .....	89
Obrázek 59 - I-V charakteristika pole a panelu při max. ozáření a určených teplotách .....	90
Obrázek 60 – Blokové schéma zapojení PV elektrárny s rekonfiguratorem .....	92
Obrázek 61 – PV Panel Conergy E215P – vnitřní elektrické zapojení.....	93
Obrázek 62 - PV Panel Conergy E215P – elektrické parametry [štítek panelu] .....	94
Obrázek 63 - PV Panel Conergy E215P – Zapojení BP diod v připojovacím boxu.....	94
Obrázek 64 - PV pole umístěné na střeše budovy DEIM, univerzita PALERMO, ITALIE.....	95
Obrázek 65 – Naměřené teploty PV panelů při základním zapojení 3x4 TCT s zátěží 230W .....	96
Obrázek 66 – Naměřené napětí PV panelů při základním zapojení 3x4 TCT s zátěží 230W .....	96
Obrázek 67 – Naměřené proudy PV panelů při základním zapojení 3x4 TCT s zátěží 230W .....	97
Obrázek 68 – Výkony řad a celkový příkon do zátěže 230W při zapojení 3x4 TCT .....	97
Obrázek 69 – Výstupní výkon pole při rekonfiguraci PV panelů. Zátěž 280W .....	99
Obrázek 70 - Výstupní výkon při rekonfiguraci PV panelů. Zátěž 650W.....	100
Obrázek 71 – Simulace PV panelu při nerovnoměrném ozáření při různých úrovních .....	101
Obrázek 72 - Simulace PV panelu při nerovnoměrném ozáření při různých úrovních .....	102
Obrázek 73 - Simulace výstupního výkonu PV pole v standardním 3x4 TCT zapojení .....	103
Obrázek 74 - P-V charakteristika PV pole při rovnoměrných provozních podmínkách.....	104
Obrázek 75 - P-V charakteristika PV pole při nerovnoměrných provozních podmínkách.....	105
Obrázek 76 - P-V charakteristika PV pole po provedené rekonfiguraci panelů .....	107
Obrázek 77 - Předpokládaný upgrade přepínací matice .....	109

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Defaultní hodnoty modelu diody D ve SPICE [web].....	51
Tabulka 2 - Význam parametrů simulace pro SPICE modely [15].....	76
Tabulka 3 - Počáteční konfigurace vstupních matic pro simulaci.....	78
Tabulka 4 - Počáteční konfigurace matice RelaysState .....	79
Tabulka 5 - Matice MPPT_slow: vstupní a výstupní hodnoty skriptu MpptSlow.m.....	87
Tabulka 6 - Matice MPPT_MS_slow: vstupní a výstupní hodnoty skriptu MpptMsSlow.m.....	89
Tabulka 7 - Matice MPPT_fast: vstupní a výstupní hodnoty skriptu MpptFast.m.....	90
Tabulka 8 - Matice MEASURE_ALL: vstupní a výstupní hodnoty měřících skriptů.....	91
Tabulka 9 - PV Panel Conergy E215P – elektrické parametry při STC [datasheet] .....	93
Tabulka 10 - Simulace PV pole při rovnoměrných provozních podmínkách .....	104
Tabulka 11 - Simulace PV pole při nerovnoměrných provozních podmínkách .....	105
Tabulka 12 - Simulace PV pole po provedené rekonfiguraci panelů.....	106
Tabulka 13 - Výstupní parametry PV pole před a po provedené rekonfiguraci .....	107

# 1 Úvod

Fotovoltaika - přímá přeměna slunečního záření na elektrickou energii - je v poslední době významným obnovitelným zdrojem energie. Výhody fotovoltaických (PV) elektráren jsou jejich jednoduchý provoz, malý dopad na ráz krajiny a život člověka, dlouhá životnost a v neposlední řadě také výhodné dotační programy. Důvodem rapidního rozvoje PV elektráren je především technický pokrok v oblasti výroby PV panelů, který výrazně snižuje pořizovací cenu celého systému. Tak jako se postupně vyvíjí samotné PV panely, je třeba věnovat pozornost dalším částem systému, které s takovou výrobou energie přímo souvisí.

PV systémy vyžadují kombinaci sériového a paralelního propojení jednotlivých PV článků za účelem zvyšování napětí a proudu pro následnou účinnou přeměnu energie nebo přímé využití ve spotřebiči. Jednotlivé PV články, případně PV panely však mají při odlišných pracovních podmínkách (úroveň ozáření, teplota) rozdílné I-V charakteristiky. Při jejich vzájemném propojení dochází k nesouladu a tím i ke ztrátě výkonu vlivem odchýlení se od maximálního pracovního bodu MPP. V krajní situaci se mohou některé PV články namísto zdrojů energie chovat i jako spotřebiče, což pak výrazně ovlivňuje celkový maximálně dosažitelný výkon PV pole.

V dnešní době existuje stále mnoho PV systémů, které využívají pouze jeden centrální MPPT pro celé PV pole. Díky centrálnímu sledování MPP a také funkci ByPass diod je celková energetická ztráta výkonu při vzniku nesouladu mnohem větší, než je aktuální reálná ztráta jednotlivých panelů. Takové systémy jsou velmi neefektivní a naskýtá se zde velký prostor pro optimalizaci. Nesoulad PV panelů při společném propojení se řeší různými způsoby. PV panely se například zapojují do různých topologií, používají se detailnější architektury s více MPPT a nebo se panely rekonfigurují (přepojují) za účelem vytvoření vyvážených stringů a řad.

Moderní, komerční a čím dál více se rozšiřující řešení nesouladu PV panelů ve společném zapojení spočívá ve sledování MPP na úrovni panelů. K tomu jsou vyvinuté takzvané power optimizéry, které se připojují na výstup každého PV panelu a sledují jejich MPP lokálně. Nejnovější moderní PV panely jsou takovýmito zařízením vybaveny přímo z výroby. Taková koncepce je sice velice efektivní, neboť zamezuje všem energetickým ztrátám, ovšem stále vyžaduje nemalé finanční investice.

Koncepce řešení nesouladu vzájemně propojených PV panelů pomocí jejich rekonfigurace je méně rozšířený obor. Takováto myšlenka vyžaduje návrh sofistikovaného zařízení (rekonfigurator PV panelů) a následnou tvorbu inteligentního rekonfiguračního algoritmu. Využití rekonfigurační strategie a výroba rekonfiguratoru pro rozsáhlé PV elektrárny s mnoha PV panely je z technického hlediska velmi náročná věc, navíc vzhledem k již navrženým power optimizérům je takové řešení nevýhodné. Rekonfigurator se dá efektivně použít především u malých PV systémů s menším počtem PV panelů, jako je například PV elektrárna na střeše rodinného domu.

Primárním cílem této práce je návrh řídicího algoritmu pro již zkonstruovaný, částečně funkční, mikroprocesorem řízený reléový rekonfigurátor dvanácti PV panelů. Při vzniku odlišných pracovních podmínek, například při částečném zastínění některého PV panelu, nebo při změně teploty, dochází k poklesu výkonu PV pole. Pokud by byly panely celou dobu zapojené v základním zapojení (3x4 TCT) tak není možné získat takový výstupní výkon, jako po provedení vhodné rekonfigurace. Rekonfigurátor měří v reálném provozu teplotu, výstupní proud a výstupní napětí každého panelu. Pokud jsou panely vzájemně propojeny (což jsou vždy) a v důsledku odlišných pracovních podmínek dojde k nesouladu, naměřené hodnoty jsou zkreslené. Předmětem zájmu je navrhnout takový algoritmus, který určí správnou rekonfiguraci na základě měření parametrů při vzájemném propojení panelů. Zde je vhodné podotknout, že se jedná o velice nelineární chování, kdy máme k dispozici měřené veličiny, které jsou ovlivněné vzájemným propojením panelů a dále funkcí ByPass diod, u kterých nevíme, kdy jsou či nejsou aktivní. Z tohoto důvodu se práce věnuje především tvorbě propracovaného simulačního modelu (kombinace PV panelů a přepínací matice), pomocí něhož je možné pochopit toto nelineární chování a dále ho efektivně využít při návrhu nového řídicího algoritmu pro rekonfigurátor.

V teoretické části práce jsou vysvětleny obecně principy fotovoltaiky s popisem funkce fotodiody. V dalším bloku jsou uvedeny základní informace o fotovoltaickém (PV) článku a jsou zde popsány postupy výpočtu parametrů jeho náhradního matematického modelu. Dále práce uvádí informace o spojování jednotlivých PV komponent a nejčastější příčiny vzniku nesouladu při jejich vzájemném propojení vlivem rozdílných I-V charakteristik. Navazuje popis funkce ochranných blokovacích a ByPass diod. Následně jsou popsány rozdíly mezi sérioparalelním (SP) a úplným (TCT) propojením PV panelů a vysvětlena je strategie a možnost jejich rekonfigurace.

Další část této práce popisuje hardwarové řešení rekonfigurátoru. Blokově je popsána řídicí jednotka rekonfigurátoru s mikroprocesorem (PVEqualizer), dále reléová deska přepínací matice a obvody pro měření napětí, proudu a teploty PV panelů.

Praktická část této práce popisuje návrh a tvorbu komplexního simulačního modelu. Uveden je detailní postup tvorby elektrické části modelu v prostředí SPICE pomocí programu OrCad Capture. Následuje popis propojení s ovládacími funkcemi vytvořenými v prostředí Matlab pomocí SLPS interface, který umožňuje kosimulaci pomocí těchto dvou výkonných simulačních programů. Dále jsou uvedeny výsledky a poznatky z reálného provozu rekonfigurátoru. Popsána je funkce aktuálně navrženého algoritmu a pomocí simulací je objasněn a vysvětlen nelineární problém měření vstupních parametrů algoritmu. Demonstrováno je také praktické použití simulátoru ve funkci MPPT a MEASURE při modelování náhodného zastínění a následné rekonfigurace.

V závěru práce jsou diskutovány možnosti tvorby nového rekonfiguračního algoritmu s využitím genetických algoritmů s pamětí. Uveden je také předpokládaný upgrade hardware rekonfigurátoru a případný návrh pomocných měřících jednotek.

## 2 Teorie Fotovoltaiky

Fotovoltaika (Photovoltaics, PV) je novodobý vědní obor, jenž zkoumá proces přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Pojem fotovoltaika vznikl spojením dvou slov - řeckého slova  $\phi\acute{\omega}\varsigma$  [phos], tedy světlo a jméno italského fyzika Alessandra Volty. Množství sluneční energie, která dopadne na naši planetu ze slunce, dosahuje 180000TW, což je cca jedna dvoumiliardtina celkového výkonu slunce. Tolik energie v jednom okamžiku není lidstvo schopno ani spotřebovat. Sluneční záření nám neposkytuje pouze teplo, ale lze jej využít i na výrobu elektrické energie. Musíme se však spokojit s faktem, že takto není možné získávat energii 24 hodin denně a 365 dní v roce. Sluneční paprsky nedopadají na určité místo země celý den (s výjimkou pólů země, kde tomu tak v určitých případech je) a rovněž nejsou celý rok stejné slunečné dny, ale buď je hezky, nebo je troposféra plná oblak a srážek, což má významný vliv na útlum dopadajících slunečních paprsků na určité místo. Z hlediska ochrany životního prostředí se jedná o mimořádně čistý způsob výroby energie, přičemž nevznikají žádné škodlivé emise ani hluk a vstupní energie je prakticky nevyčerpatelná. Téměř lavinovitě se PV systémy rozvíjejí v posledních letech, a to díky dotačním programům, které způsobily nebývalý zájem investorů o tuto oblast výroby elektrické energie. Vše napovídá tomu, že pro udržení stávajícího rozvoje lidské civilizace budou obnovitelné zdroje energie (a tedy i PV systémy) v budoucnosti zásadní a společně s jadernou energií zcela nahradí dnes stále hojně využívaná fosilní paliva.

Počátky objevení fotovoltaického jevu sahají do roku 1839, kdy francouzský experimentální fyzik Edmund Becquerel zjistil při pokusech s 2 kovovými elektrodami umístěnými v elektrovedivém roztoku, že při osvětlení zařízení vzrostlo na elektrodách napětí. Podstatou fotovoltaického jevu ve fotovoltaických článcích je vznik volných elektronů a "děr" osvětlením přechodu PN. Tímto způsobem se světelná energie přímo přeměňuje na elektrickou energii. Becquerel tedy dokázal využít světlo, respektive částic světla (fotonů) k přeměně na elektrickou energii. Na další vývoj PV technologie mělo zásadní vliv teoretické objasnění fotoelektrického jevu Albertem Einsteinem, za což byl oceněn Nobelovou cenou v roce 1921. Pro technologii moderních křemíkových článků byl významným zlomem objev metody výroby čistého monokrystalu křemíku, kterou vyvinul Jan Czochralski. Základním principem PV článku je fotoelektrický jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry). [1] [2] [3]

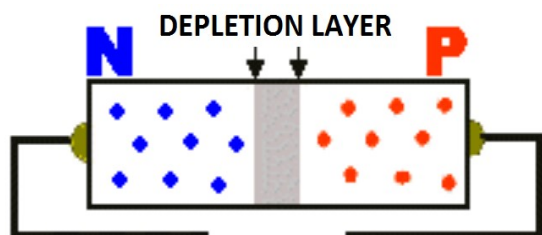
**Fotovoltaický jev = fyzikální proces, který umožňuje přeměnu slunečního záření na elektrickou energii.**

**Fotovoltaický článek (PV, photovoltaic cell) = zařízení na výrobu elektrické energie, využívající fotovoltaický jev.**

## 2.1 Polovodičový přechod P-N

Základem většiny polovodičových součástek (diod, tranzistorů, svítivých diod, mikroprocesorů, fotočlánků aj.) je tzv. PN přechod. Jedná se o oblast styku dvou polovodičů s opačným typem vodivosti (positive, negative). Typickou vlastností PN přechodu je jeho usměrňovací účinek. Mohou nastat tři případy:

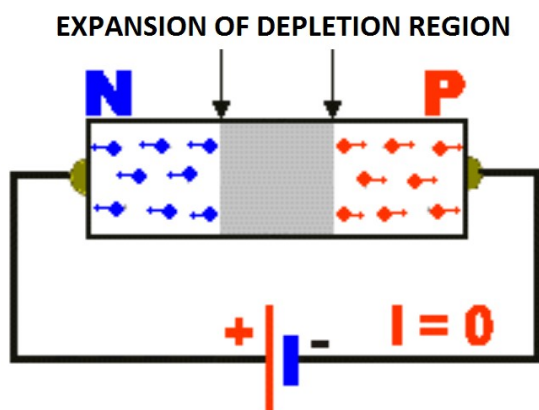
### 1) PN přechod není připojen ke zdroji napětí:



V oblasti přechodu PN přechází část volných elektronů z oblasti N do oblasti P, kde rekombinují s "děrami". V tomto prostoru se vytvoří oblast bez volných nábojů o šířce několika tisíců milimetrů.

Obrázek 1 - Polovodičový přechod PN bez přiloženého napětí [2]

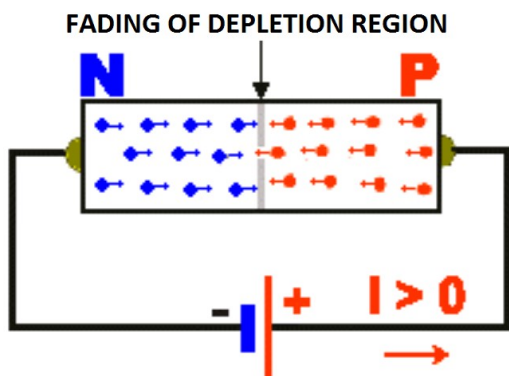
### 2) PN přechod v závěrném směru:



K polovodiči P se připojí záporný pól a k polovodiči N kladný pól zdroje, volné náboje se vzdalují působením elektrických sil. Oblast bez volných nábojů se rozšíří, její odpor vzroste a elektrický proud takovýmto PN přechodem nemůže procházet. Hradlová vrstva je nevodivá oblast bez volných nábojů.

Obrázek 2 – Polovodičový přechod PN v závěrném směru [2]

### 3) PN přechod v propustném směru:

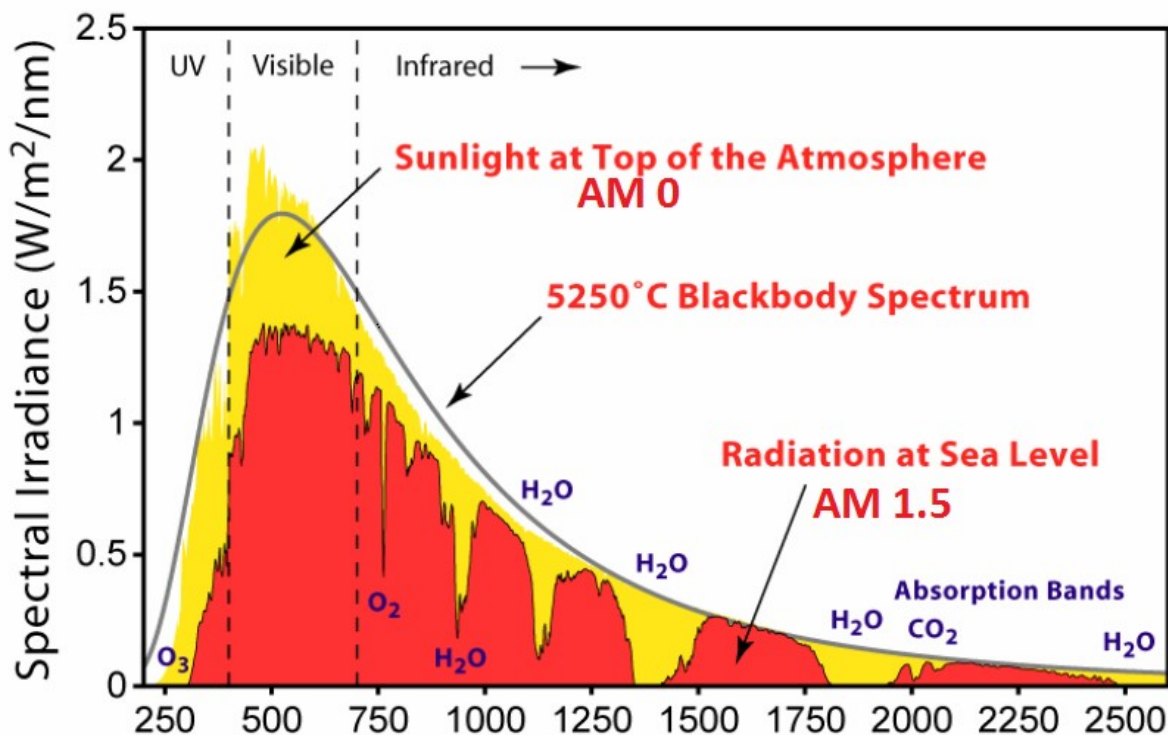


K polovodiči P se připojí kladný pól a k polovodiči N záporný pól zdroje. Tímto začnou přecházet působením elektrických sil volné elektrony přes přechod PN ke kladnému pólu a "díry" jsou přitahovány k zápornému pólu. Hradlová vrstva prakticky zanikne a její odpor se výrazně zmenší. Takto zapojeným PN přechodem prochází proud. [2]

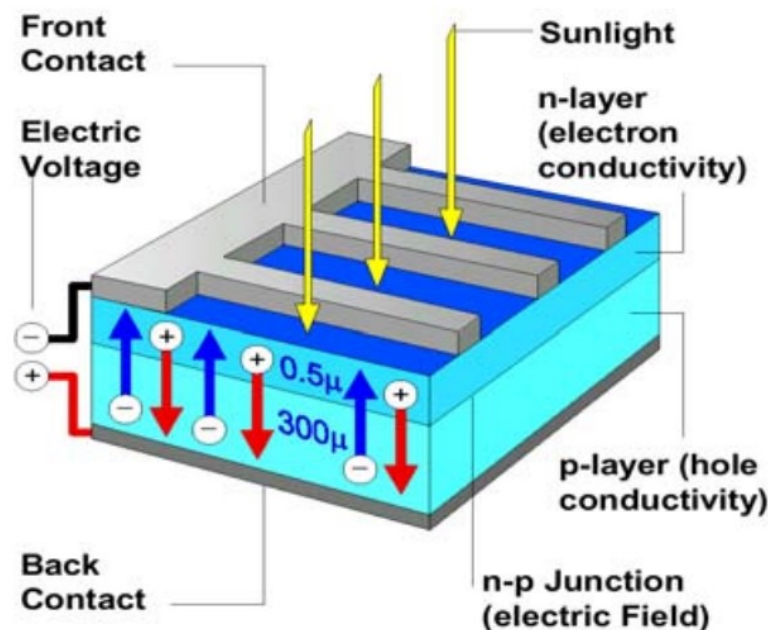
Obrázek 3 - Polovodičový přechod PN v propustném směru [2]

## 2.2 Princip fotovoltaického jevu

Podstatou fotovoltaického jevu ve fotovoltaických článcích je vznik volných elektronů a "děr" při dodávání fotonů na tento přechod pomocí osvětlení. Takto se světelná energie přímo přeměňuje na elektrickou energii. V kovech ovšem dochází k okamžité rekombinaci elektronů a děr, čemuž je potřeba zabránit a vzniklý náboj odvést z článku do spotřebiče. Z tohoto důvodu, se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Tím vzniká rozdíl potenciálů mezi vrstvou P a N a tedy i elektrické napětí, které lze pomocí vhodných elektrod připojit na vnější obvod – spotřebič. Z mnoha důvodů je nejvhodnější prvek pro použití na P-N přechodu křemík. Fotony jsou částice elektromagnetického záření, jejichž energie je nepřímo úměrná vlnové délce záření. Energie fotonů se obvykle udává v elektronvoltech ( $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ ). Aby vznikl fotovoltaický jev, musí mít fotony energii minimálně 1,12eV. Této energii odpovídá tzv. mezní vlnová délka - asi 1105 nm, což je infračervené záření. Fotony záření s kratší vlnovou délkou (např. fotony viditelného světla) mají dostatek energie a elektrony mohou z mřížky uvolnit. Záření s větší vlnovou délkou (např. mikrovlny) fotovoltaický jev nevyvolají. Pakliže má foton energii právě 1,12 eV, je křemíkem absorbován a v krystalu vznikne jeden volný elektron a jedna kladná díra. Pokud mají fotony větší energii než 1,12eV, způsobí vznik volného elektronu a díry a zbytek jejich energie se přemění na teplo. Tím se polovodičový přechod zahřívá, což představuje ztráty a snižuje se účinnost přeměny energie. [1] [2] [3]



Obrázek 4 - Spektrum slunečního záření při průchodu zemskou atmosférou [web]



Obrázek 5 - Princip fotovoltaického jevu [web]

Dopadající světelné částice (fotony), dopadají na článek a svou energií z krystalů křemíku uvolňují z N-vrstvy polovodičového materiálu volné elektrony, které se přesouvají k P-vrstvě. N-vrstva je materiál s přebytkem volných elektronů a naopak P-vrstva je materiál s jejich nedostatkem. Kdyby mezi oběma vrstvami nebyla bariéra přechodu PN, přecházely by v krystalu elektrony volně z místa přebytku do místa nedostatku a fotočlánek by se nemohl stát zdrojem napětí. Elektrony uvolněné světlem ve vrstvě P naopak mohou přes přechod PN přecházet do vrstvy N a počet elektronů se v ní dále zvyšuje. Nahromaděním volných elektronů vznikne mezi horní a spodní vrstvou elektrické napětí o velikosti kolem 0,6V. Přesun volných elektronů v materiálu se nazývá průtok proudu a probíhá vždy od záporného ke kladnému pólu.[2]

### 2.3 Sluneční spektrum AM 1.5 Global

Na obrázku 4 je znázorněno spektrum slunečního záření, při průchodu zemskou atmosférou. **AM0** (tzv. AirMass) je spektrum slunečního záření v kosmickém prostoru (vakuum) ve vzdálenosti 150 milionů kilometrů od slunce bez ovlivnění zemskou atmosférou. Energie záření je zde rozložena do elektromagnetického spektra přibližně odpovídajícího záření absolutně černého tělesa o teplotě 5250°C. Při průchodu atmosférou se část sluneční energie ztratí. Přibližně 300 W/m<sup>2</sup> se v atmosféře absorbuje a kolem 100 W/m<sup>2</sup> se rozptýlí. Část rozptýlené energie přispívá k celkovému osvětlení jako difúzní záření oblohy (nebeská modř). Ve fotovoltaice používáme termín spektrální složení světla **AM1.5**, což odpovídá slunečnímu záření na povrchu země, při výšce slunce přibližně 45° nad obzorem. Sluneční záření v tomto případě prochází jeden a půl násobně mohutnější vrstvou vzduchu. Energetická hustota tohoto spektra je 1000 W/m<sup>2</sup> a v reálných podmínkách primárně závisí na průchodnosti atmosféry. [1] [2]

## 2.4 Fotodioda

Fotodioda je běžná polovodičová dioda s takovou úpravou, že do její oblasti PN přechodu může pronikat světlo. Na obrázku 6 je uvedena I-V charakteristika fotodiody, z které je patrné, že takováto dioda může pracovat ve více režimech. Pokud na PN přechod fotodiody nedopadá žádné záření, nemůže dojít k fotovoltaickému jevu a ani ke generování fotoproudu  $I_{PV}$ . Fotodioda se pak chová jako normální dioda, jejíž statické vlastnosti lze vystihnout I-V charakteristikou, která se nalézá v prvním kvadrantu uvedeného grafu a popisuje ji známá Shockleyho rovnice pro polovodičovou diodu (vztah 2.4.1).

$$I_{DARK} = I_{0(T_J)} \left[ e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T_J}} - 1 \right], \quad (2.4.1)$$

kde:

$I_{DARK}$  - elektrický proud diodou při neozářeném PN přechodu [A]

V - napětí na diodě [V]

$I_0$  - saturační (nasycený) proud diodou v závěrném směru při dané teplotě  $T_J$  [A]

V - napětí na diodě [V]

k - Boltzmannova konstanta =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]

q - elementární náboj elektronu =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  [C]

$T_J$  - absolutní teplota polovodičového PN přechodu [K]

Navíc můžeme vyjádřit konstanty k, q a teplotu přechodu  $T_J$  v exponentu rovnice jako takzvané termální napětí (vztah 2.4.1). Při pokojové teplotě  $T_J = 300\text{K}$  ( $27^\circ\text{C}$ ) je termální napětí rovné přibližně  $V_T = 26\text{mV}$ . Saturační proud je závislý na teplotě tak, že při vzrůstu teploty o každých  $10^\circ\text{C}$  se jeho hodnota zvětší přibližně na dvojnásobek.

$$V_T = \frac{k \cdot T_J}{q} \quad (2.4.2)$$

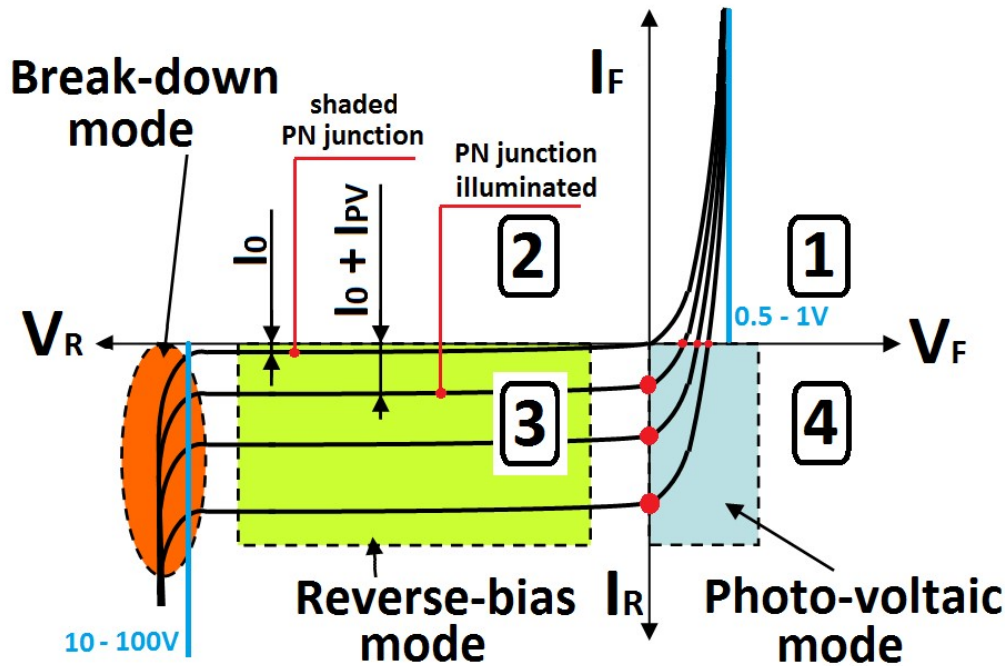
Pakliže na PN přechod fotodiody začne dopadat potřebné záření, v polovodiči se začnou generovat páry elektron-díra a ty, které jsou v dosahu vyčerpané oblasti přechodu disociují - driftují pod vlivem pole na opačné strany, čímž vzniká fotoproud  $I_{PV}$ . Pokud je fotodioda zapojená v závěrném směru, začne se chovat jako rezistor závislý na intenzitě osvětlení, což popisuje I-V charakteristika ve třetím kvadrantu uvedeného grafu. Pokud se fotodioda zapojí do propustného směru, hovoříme o takzvaném hradlovém, neboli fotovoltaickém režimu diody. Tento režim, popsáný I-V charakteristikou ve čtvrtém kvadrantu, je pro nás z hlediska zdroje proudu nejzajímavější, neboť zde se fotodioda chová jako zdroj elektrické energie a generuje fotoproud  $I_{PV}$ , přičemž na PN přechodu vzniká napětí, jehož velikost je přibližně 0.6V. Rovnice (2.4.2) popisuje výstupní proud fotodiody  $I_{LIGHT}$  při ozářeném PN přechodu.

$$I_{LIGHT} = I_{0(T_J)} \left[ e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right] + I_{PV}, \quad (2.4.3)$$

kde:

$I_{LIGHT}$  - elektrický proud diodou při ozáření PN přechodu [A]

$I_{PV}$  - generovaný fotonproud [A] - proporcionální k intenzitě ozáření  $G$  [ $W/m^2$ ].



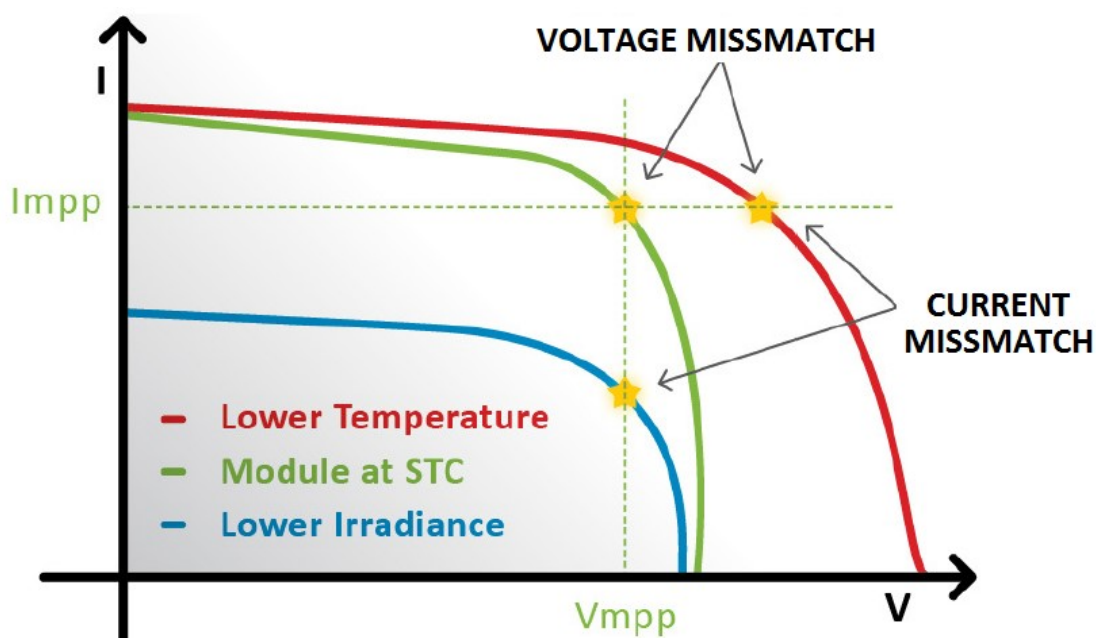
Obrázek 6 - I-V charakteristika PV diody a její operační režimy

Bodům, ve kterých anodové charakteristiky protínají svislou osu, odpovídá proud diody nakrátko  $I_{SC}$  a průsečíky charakteristik s vodorovnou osou značí napětí naprázdno  $V_{OC}$ .

### 3 PV článek - základní komponent fotovoltaiky

Jak již bylo uvedeno výše, fotovoltaický článek je zařízení, jenž využívá ke své funkci fotovoltaický jev. Je to v podstatě polovodičová dioda s přechodem PN. Základní struktura PV článku (znázorněna na obrázku 5) obsahuje na povrchu síť kontaktů nebo transparentní vodivou vrstvu, pomocí které je generovaný proud odváděn a využíván. Na zadní stranu článku lze nanést celoplošně vodivou kovovou vrstvu. Osvětlením článku vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev a v polovodiči se z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony. Minimální energie potřebná k uvolnění elektronu z kovalentní vazby atomu se nazývá šířka zakázaného pásu  $W_g$  a pro křemík při pokojové teplotě činí 1,12 eV. Na přechodu P-N se vytvoří elektrické napětí, které dosahuje u křemíkových článků velikosti zhruba 0,6V. Energie dopadajícího světla se v článku mění

na elektrickou energii. Důležité je podotknout, že energie fotonu vyšší než  $W_g$ , zůstane nevyužita a dochází k předání do mřížky ve formě tepla - tzv. termalizace. Připojením spotřebiče na článek se začnou kladné a záporné náboje vyrovnávat, čímž vznikne tok elektronů a tím i elektrický proud. Výsledná I-V charakteristika PV článku, jenž může být jednoduše odvozená z obrázku 6, je součtem proudu generovaného dopadajícím zářením  $I_{FW}$  a I-V charakteristiky neozářeného PN přechodu. Charakteristika článku závisí především na teplotě PN přechodu a dále na úrovni ozáření. Jednoduše lze říci, že teplota polovodičového přechodu  $T_j$  má zásadní vliv na dosažené napětí článku a generovaný proud je přímo úměrný intenzitě ozáření. Na obrázku 7 je jednoduše znázorněná I-V charakteristika PV článku (panelu) při standardních podmínkách (zelená křivka), při snížené teplotě (červená křivka) a při sníženém osvětlení (modrá křivka). Dále jsou v grafu znázorněny body maximálního výkonu MPP. [4]



Obrázek 7 - I-V charakteristika PV článku (panelu) při změně podmínek [5]

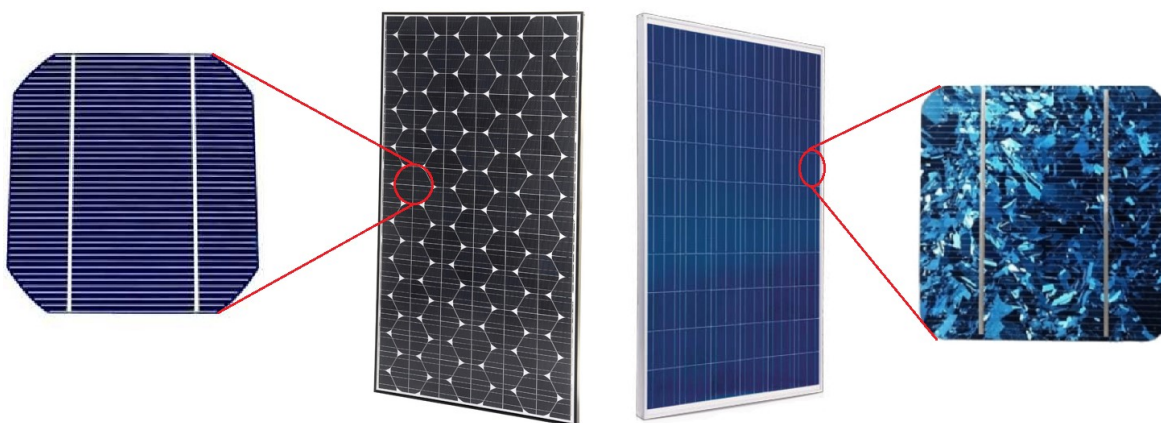
### 3.1 Typy PV článků

V současnosti jsou dostupné různé typy PV článků z hlediska použitého polovodičového materiálu a způsobu jejich zpracování. Každý typ má své výhody a nevýhody. Hlavním kritériem je minimalizace výrobních nákladů, použití cenově dostupných materiálů a zvládnutelných výrobních technologií, dále docílení vysoké účinnosti, životnosti a ekologické nezávadnosti výroby. V současné době zaujímají dominantní místo, co do množství výroby, křemíkové články a to hlavně z důvodu že křemík je snadno dostupný, má vhodné fyzikální vlastnosti a technologie čištění a zpracování je dobře zvládnutá. Články na bázi CIS, CIGS technologie a CdTe články nejsou komerčně tolik rozšířené, neboť použité materiály jsou hůře dostupné. Tenkovrstvé GaAs články se vyznačují velkou absorpcí slunečního záření, odolností vůči kosmickému

záření a minimálním poklesem účinnosti při vysokých provozních teplotách. Pro uvedené přednosti jsou používány pro kosmické účely a různá experimentální zařízení. Problémem je však silná toxicita arsenu. Využití organických materiálů pro PV články přináší zcela nové možnosti. Výhodou se zdá možnost budoucí minimalizace výrobních nákladů, využití levných podkladových materiálů a velká výrobní kapacita. [4]

### 3.1.1 Monokrystalické křemíkové články

Monokrystalické články se vyrábějí z vysoce čistého křemíku. Všechny krystaly křemíku mají stejnou orientaci - podobně jako v diamantu. Jsou vyráběny tažením monokrystalu z taveniny, do které se ponoří zárodečný krystal. Takto vzniknou válcové monokrystaly tzv. ingoty, které se upraví tak, aby měly v řezu „semikvadratický“ tvar a výsledné PV články lépe vyplnily plochu PV panelu. Dále jsou řezáním ingotu zhotoveny tenké destičky. Při tomto procesu se za poslední desetiletí podařilo výrazně redukovat jejich tloušťku, která nyní dosahuje 150  $\mu\text{m}$ . Obecně platí, že čím jsou tyto destičky tenčí, tím je dosažena větší úspora materiálu. Nejlepší, komerčně dostupné, monokrystalické PV články na trhu dnes dosahují účinnosti kolem 20%. Pro dosažení stejného výkonu stačí monokrystalickému článku menší plocha než polykrystalickému. [4]



Obrázek 8 - Monokrystalický (vlevo) a polykrystalický (vpravo) PV článek v detailu [web]

### 3.1.2 Polykrystalické křemíkové články

Polykrystalické články jsou označovány jako „multi-like-mono“ PV články. Vyrábějí se z méně kvalitního a méně čistého polykrystalického křemíku. V takovém PV článku jsou pak viditelné různě orientované krystaly křemíku. Polykrystalické články mají menší účinnost než monokrystalické články, běžně kolem 12 až 14%. Polykrystalické křemíkové články jsou v současnosti nejběžnějším typem článků z důvodu jejich nízké ceny a nenáročných výrobních metod. Protože je však výsledná účinnost PV článku závislá i na dalších výrobních procesech (texturace povrchu leptáním, tvorba PN přechodu difúzí, příprava antireflexní vrstvy na povrchu a sítě sběrných kontaktů), nelze obecně říci, že každý polykrystalický článek má nižší účinnost nežli monokrystalický. [4]

### 3.1.3 Tandemové články

Článek konstruovaný s jedním PN přechodem je schopen využít pouze část spektra slunečního záření. Dosažení vyšší účinnosti PV článku je možné v případě využití více PN přechodů. Vstupující záření nejdříve prostupuje materiálem s vyšší hodnotou  $W_g$ , část záření s delší vlnovou délkou je následně absorbována s materiálem s menší hodnotou  $W_g$ . Tandemový článek dosahuje tudíž vyššího napětí, ovšem využitelný proud je omezen na nejnižší hodnotu proudu generovaného jednotlivými PN přechody. Tandemové články jsou vyráběny jako tenkovrstvé nebo monokrystalické. Tenkovrstvé články jsou konstruovány vytvářením amorfni a tzv. mikromorfni vrstvy křemíku na substrátu a dosahují účinnosti kolem 10%. Tandemové monokrystalické články jsou určené pro speciální koncentrátorové systémy či aplikace v kosmickém prostoru. Obvykle obsahují 2 nebo 3 heteropřechody a nejvyšší dosažené účinnosti se pohybují okolo 40 %. Jsou vyrobeny na monokrystalickém germaniovém substrátu, na kterém jsou epitaxi vytvořeny další vrstvy. [4]

### 3.2 Elektrické parametry PV článku

Základní I-V charakteristika ozářeného PV článku je znázorněna na obrázku 7. Pokud není článek zatížen spotřebičem, tak lze na kontaktech naměřit napětí naprázdno  $V_{OC}$ . Při zkratování, kdy je článek ve stavu nakrátko, protéká obvodem maximální možný proud  $I_{SC}$ . Mezi těmito extrémními body leží tzv. bod maximálního výkonu MPP, kdy je součin napětí a proudu maximální. V tomto bodě je hodnota napětí a proudu označena jako  $V_{MPP}$  a  $I_{MPP}$ . Jak již bylo uvedeno dříve, parametry článku závisí na intenzitě ozáření a teplotě. Každý vyrobený článek prochází podrobným měřením při STC ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ , AM 1.5). Norma ČSN EN 50461 předepisuje pro články z krystalického křemíku nezbytně nutné uváděné parametry. Měření je prováděno dle EN 60904-1, všechny uvedené hodnoty musí být udány včetně tolerancí. Dále musí být uvedeny teplotní koeficienty pro proud nakrátko  $\mu_{ISC}$  (mA/K), napětí naprázdno  $\mu_{VOC}$  (mV/K) a pro výkon v bodě MPP  $\mu_{PMPP}$  (W/K). Díky těmto koeficientům je pak možné dopočítávat I-V charakteristiku článku.[4]

#### Požadované elektrické parametry PV článku dle normy ČSN EN 50461:

- napětí naprázdno,  $V_{OC}$  [V]
- teplotní koeficient napětí naprázdno  $\mu_{VOC}$  [mV/K]
- proud nakrátko,  $I_{SC}$  [A]
- teplotní koeficient proudu nakrátko  $\mu_{ISC}$  [mA/K]
- napětí v bodě maximálního výkonu,  $V_{MPP}$  [V]
- proud v bodě maximálního výkonu,  $I_{MPP}$  [A]
- teplotní koeficient výkonu v bodě MPP  $\mu_{PMPP}$  [W/K]
- výkon v bodě maximálního výkonu,  $P_{MPP}$  [W]
- činitel plnění - fill factor, FF [%]
- účinnost v bodě maximálního výkonu,  $\eta$  [%]

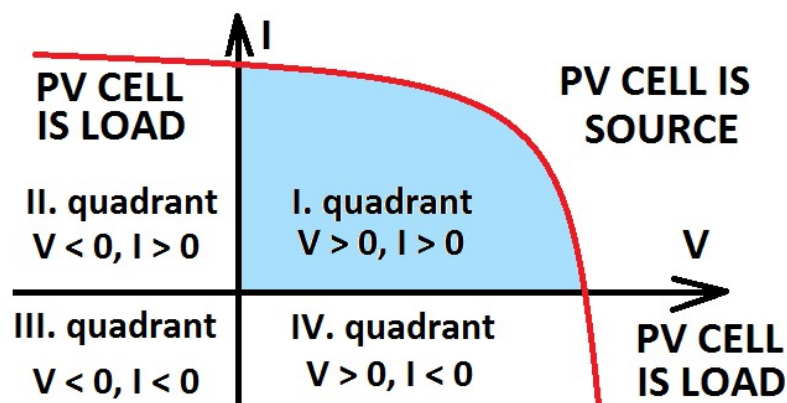
Mezi výše uvedenými parametry PV článku platí následující vztahy:

$$P_{MPP} = I_{MPP} * V_{MPP} \quad (3.2.1)$$

$$FF = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{I_{SC} * V_{OC}} * 100 \quad (3.2.2)$$

$$\eta = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{P_{IN}} * 100 \quad (3.2.3)$$

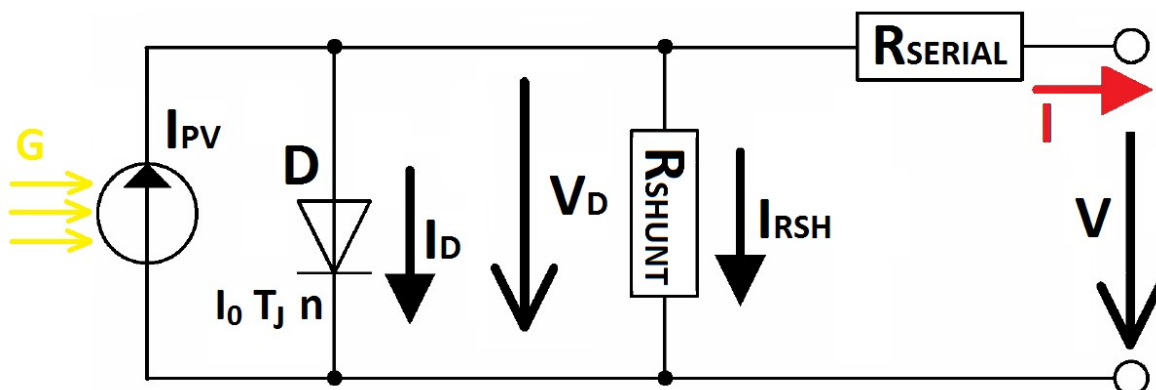
Pokud využíváme PV článek primárně jako zdroj energie (proudu), je vhodné rozdělit jeho pracovní oblast dle kvadrantů, tak jak je uvedeno na obrázku 8. V prvním kvadrantu článek funguje jako zdroj energie, ve druhém a čtvrtém kvadrantu se chová jako spotřebič, kdy je energie dodávána externě. Pro optimální využití se tedy snažíme navodit takové podmínky, aby článek pracoval pouze v prvním kvadrantu.



Obrázek 9 - Pracovní oblasti PV článku (panelu)

### 3.3 Náhradní matematický model PV článku

Chování PV článku a tím pádem i jeho I-V a P-V charakteristika, lze dobře odvodit z náhradního elektrického zapojení článku, kde zdroj proudu  $I_{PV}$  představuje proud generovaný fotony a dioda D představuje PN přechod polarizovaný v propustném směru. Dále je nutné zavést zpřesnění modelu, jenž znázorňuje ztráty vlivem difúze nosičů náboje spolu s rekombinací v oblasti prostorového náboje. Toto je reprezentováno zavedením emisního koeficientu  $n$  (ideality factor) u diody D, běžně v rozsahu 1 až 2. V reálném článku teče vygenerovaný proud přes kovové kontakty do vnějšího obvodu. Odpor těchto kontaktů reprezentuje začlenění sériového rezistor  $R_{SERIAL}$ . Dále je často uvažován i vnitřní paralelní odpor  $R_{SHUNT}$ , který představuje svod proudu, jenž má ohmický charakter. Vysoká hodnota sériového odporu způsobuje úbytek napětí článku a malá hodnota paralelního odporu způsobuje ztráty výstupního proudu článku. Příliš nízká hodnota paralelního odporu napovídá o vadě článku. Kvalitní článek je pak reprezentován malým sériovým odporem a dostatečně velkým paralelním odporem. [4]



Obrázek 10 - Náhradní matematický model PV článku

$I$  = výstupní proud PV článku [A]

$V$  = výstupní napětí naměřené na svorkách PV článku [V]

$R_{SERIAL}$  = sériový odpor [ $\Omega$ ]

$R_{SHUNT}$  = paralelní odpor [ $\Omega$ ]

$I_{PV}$  = generovaný fotoproud [A], proporcionální k ozáření  $G$  [ $W/m^2$ ] a teplotě  $T_J$  [K]

$I_D$  = proud tekoucí diodou [A], popsán pomocí Shockleyho rovnice

$I_0$  = saturační proud diody [A]

$n$  = emisní koeficient diody [-], hodnota v rozmezí od 1 do 2

$T_J$  = teplota článku [K], teplota PN přechodu diody

$q$  = náboj elektronu =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  [C]

$k$  = Boltzmanova konstanta =  $1,381 \cdot 10^{-23}$  [J/K]

STC = Standard test conditions, ozáření  $G = 1000$  [ $W/m^2$ ], teplota  $T_J = 298,15$  [K]

Výstupní proud  $I$  PV článku můžeme vypočítat dle vztahu:

$$I = I_{PV} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{(V + I \cdot R_{SERIAL})}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_{SERIAL}}{R_{SHUNT}} \quad (3.3.1)$$

Saturační proud diody  $I_0$  můžeme vyjádřit dle vztahu:

$$I_0 = I_{0_{STC}} \left( \frac{T_J}{T_{J_{STC}}} \right)^3 \exp\left[ \frac{qE_G}{nk} \left( \frac{1}{T_{J_{STC}}} - \frac{1}{T_J} \right) \right]; E_G = 1.12 \text{ [eV]} \quad (3.3.2)$$

Generovaný fotoproud  $I_{PV}$  vyjádříme pomocí rovnice:

$$I_{PV} = \frac{G}{G_{STC}} \left[ I_{PV_{STC}} + \mu_{ISC} (T_J - T_{J_{STC}}) \right] \quad (3.3.3)$$

Nakonec vyjádříme výslednou rovnici pro výpočet ozáření článku  $G$  [ $W/m^2$ ]:

$$G = \frac{G_{STC}}{I_{PV_{STC}} + \mu_{ISC} (T_J - T_{J_{STC}})} \left[ I + I_0 \left( \exp \left( \frac{V + I \cdot R_{SERIAL}}{n \cdot k \cdot \frac{T_J}{q}} \right) - 1 \right) + \frac{V + I \cdot R_{SERIAL}}{R_{SHUNT}} \right] \quad (3.3.4)$$

Výše uvedená rovnice nám poskytuje poměrný přesný výpočet pro odhad ozáření článku na základě naměřených hodnot jeho svorkového napětí, výstupního proudu a teploty. Výsledné ozáření lze vypočítat i jednodušeji jednou z níže uvedených rovnic. Poté nám stačí pouze dva naměřené parametry PV článku, z nichž jeden je teplota  $T_J$  a druhý je aktuální naměřené napětí  $V_{OC}$  nebo aktuální naměřený proud  $I_{SC}$ . Předpoklad pro správný výpočet ozáření je znalost parametrů článku z katalogového listu od výrobce. [6]

Výpočet aktuálního ozáření článku  $G$  [ $W/m^2$ ] na základě naměřené teploty  $T_J$  a napětí  $V_{OC}$ :

$$G = G_{STC} \cdot \exp \left( \frac{V_{OC} - V_{OC_{STC}} - \mu_{VOC} \cdot (T_J - T_{J_{STC}})}{n \cdot k \cdot \frac{T_J}{q}} \right) \quad (3.3.5)$$

Výpočet aktuálního ozáření článku  $G$  [ $W/m^2$ ] na základě naměřené teploty  $T_J$  a proudu  $I_{SC}$ :

$$G = \frac{G_{STC}}{I_{SC_{STC}}} \cdot \left( I_{SC} - \mu_{ISC} \cdot (T_J - T_{J_{STC}}) \right) \quad (3.3.6)$$

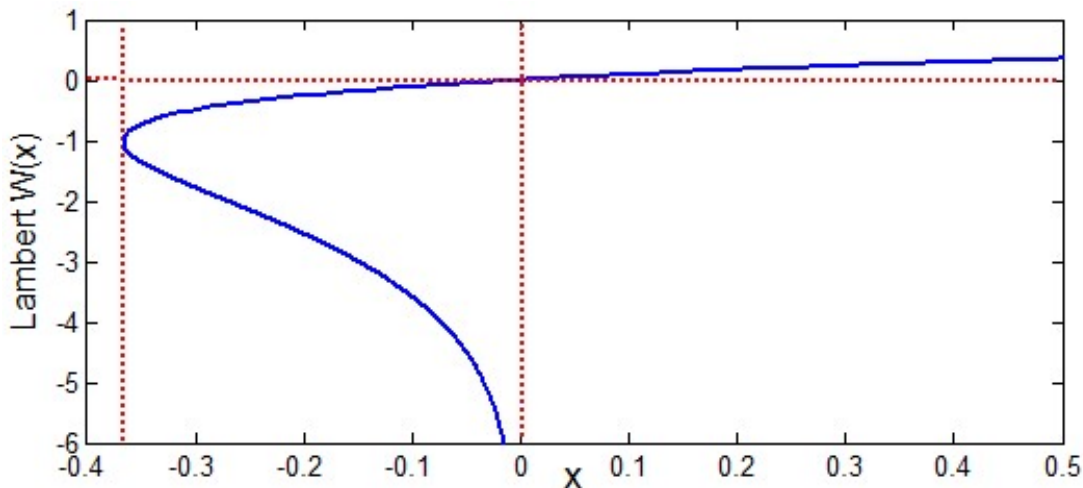
Pokud chceme modelovat spojení více článků dohromady, lze rovnice upravit pomocí přidání modře zvýrazněných konstant  $N_S$  (počet sériově spojených článků) a  $N_P$  (počet paralelně spojených článků). Takové spojení je poté značeno novým indexem  $A$ . Jednotlivé PV články však nikdy nemají shodné parametry, ovšem i tak se můžeme pokusit nalézt parametry modelu daného spojení. Tyto nalezené parametry však nepředstavují reálné fyzikální parametry jednoho „průměrného“, PV článku v daném spojení. Jedná se spíše o odhad parametrů na uvažovaný, v tomto případě empiricky zvolený model. [4]

$$I_A = I_{PVA} \cdot N_P - I_0 \cdot N_P \left[ \exp \left( \frac{\left( V_A + I_A \cdot R_{SERIAL} \cdot \frac{N_S}{N_P} \right)}{N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{V_A + I_A \cdot R_{SERIAL} \cdot \frac{N_S}{N_P}}{R_{SHUNT} \cdot \frac{N_S}{N_P}} \quad (3.3.7)$$

$$G = \frac{G_{STC}}{I_{PVA_{STC}} \cdot N_P + \mu_{ISC} (T_J - T_{J_{STC}})} \left[ I_A + I_0 \cdot N_P \left( \exp \left( \frac{V_A + I_A \cdot R_{SERIAL} \cdot \frac{N_S}{N_P}}{N_S \cdot n \cdot k \cdot \frac{T_J}{q}} \right) - 1 \right) + \frac{V_A + I_A \cdot R_{SERIAL} \cdot \frac{N_S}{N_P}}{R_{SHUNT} \cdot \frac{N_S}{N_P}} \right] \quad (3.3.8)$$

### 3.4 Určení parametrů náhradního matematického modelu PV článku

Hlavním cílem, při hledání náhradních parametrů matematického modelu PV článku, je možnost přesné simulace a reálného modelování nelineárního chování PV článku. Modelování předpokládá dva hlavní kroky. První je odhad a nalezení neznámých parametrů modelu a druhý je použití takto vytvořeného modelu při simulaci. Určení parametrů náhradního modelu článku  $R_{SERIAL}$ ,  $R_{SHUNT}$ ,  $I_{PV}$ ,  $I_0$ ,  $n$ , je obtížnějším úkolem, pro což existuje řada analytických a iteračních metod, publikovaných v mnoha odborných člancích. Jednoduché metody vystačí se znalostí základních, výrobcem poskytnutých, parametrů článku. Je zde však jistá chyba určení parametrů v důsledku zanedbání tvaru celé I-V charakteristiky a předpokladu neměnných hledaných parametrů modelu při změně provozních podmínek. Metody založené na výpočtu parametrů z naměřených I-V charakteristik jsou celkově časově náročné. Poslední dobou jsou často publikovány metody založené na transformaci pomocí Lambertovy W-funkce. Hlavní výhody této metody jsou přesné výsledky a možnost diferencovat výrazy. S explicitním tvarem, který vyjadřuje závislost I-V PV článku se navíc velmi snadno pracuje.



Obrázek 11 – Průběh Lambertovy W-funkce [Matlab]

Lambertova W-funkce, jenž je znázorněná na obrázku 11, je funkce inverzní k funkci  $f(W) = W \cdot \exp(W)$ . Tuto funkci nelze vyjádřit pomocí elementárních funkcí, při omezení se na obor reálných hodnot je definována v rozsahu  $\langle -1/\exp(1); 0 \rangle$ , přičemž v rozsahu  $\langle -1/\exp(0); 0 \rangle$  má dvě hodnoty. Vztahy 3.4.1 a 3.4.2 popisují explicitní tvar napětí  $V$  a proudu  $I$  pomocí Lambertovy  $f(W)$  funkce, pro uváděný matematický model PV článku na obrázku 10. [4]

$$I = -\frac{V}{R_S + R_{SH}} - \frac{f(W) \left[ \frac{R_S \cdot I_0 \cdot R_{SH} \cdot \exp\left(\frac{R_{SH}(R_S I_{PV} + R_S I_0 + V)}{n V_T (R_S + R_{SH})}\right)}{n V_T (R_S + R_{SH})} \right] \cdot n V_T}{R_S} + \frac{R_{SH}(I_0 + I_{PV})}{R_S + R_{SH}} \quad (3.4.1)$$

$$V = -I R_S - I R_{SH} + I_{PV} R_{SH} - n V_T f(W) \left[ \frac{I_0 R_{SH} \cdot \exp\left(\frac{R_{SH}(-I + I_{PV} + I_0)}{n V_T}\right)}{n V_T} \right] + I_0 R_{SH} \quad V_T = \frac{k T_J}{q} \quad (3.4.2)$$

Jednoduchým výpočtem lze nejprve vyjádřit saturační proud diody  $I_0$  – vztah 3.4.3, generovaný fotoproud  $I_{PV}$  – vztah 3.4.4 a emisní koeficient diody  $n$  – vztah 3.4.5. Proměnné, označené červeně, jsou získány z katalogového listu PV článku. Hodnoty  $q$ ,  $k$ ,  $E_G$  jsou známé, již dříve uvedené konstanty.

$$I_0 = I_{PV_{STC}} \cdot \exp\left(\frac{-V_{OC_{STC}} \cdot q}{N_S \cdot k \cdot T_{J_{STC}}}\right) \quad (3.4.3)$$

$$I_{PV} = I_{SC_{STC}} \quad (3.4.4)$$

$$n = \frac{\mu_{VOC} - \frac{V_{OC_{STC}}}{T_{J_{STC}}}}{N_S \cdot k \cdot T_{J_{STC}} \cdot \left( \frac{\mu_{ISC}}{I_{PV_{STC}}} - \frac{3}{T_{J_{STC}}} - \frac{E_G}{k \cdot T_{J_{STC}}^2} \right)} \quad (3.4.5)$$

V bodě maximálního výkonu  $P_{MPP}$  ( $I_{MPP} \cdot V_{MPP}$ ), můžeme vyjádřit proud  $I_{MPP}$  vztahem:

$$I_{MPP} = I_{PV} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_S}{N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_S}{R_{SH}} \quad (3.4.6)$$

Na základě rovnice 3.4.6 lze vyjádřit  $R_{SHUNT}$  ( $R_{SH}$ ) jako funkci  $R_{SERIAL}$  ( $R_S$ ):

$$R_{SH} = \frac{V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_S}{I_{PV} - I_{MPP} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_S}{N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}}\right) - 1 \right]} \quad \text{substituce: } x = \frac{V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_S}{N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}} \quad (3.4.7)$$

Použijeme Lambertovu funkci pro řešení:  $f(x) = x \cdot e^x$ , kde  $x$  je dáno následujícím vztahem:

$$x = f(W) \left[ \frac{V_{MPP} \cdot (2 \cdot I_{MPP} - I_{PV} - I_0) \cdot \exp\left(\frac{V_{MPP} \left(V_{MPP} - 2 \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}\right)}{\left(N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}\right)^2}\right)}{N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q} \cdot I_0} + 2 \cdot \frac{V_{MPP}}{N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}} - \frac{V_{MPP}^2}{\left(N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}\right)^2} \right] \quad (3.4.8)$$

Nakonec můžeme vyjádřit konečný vztah pro výpočet  $R_{SHUNT}$  (3.4.9) a  $R_{SERIAL}$  (3.4.10).

$$R_{SH} = \frac{x \cdot N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q}}{I_{PV} - I_{MPP} - I_0 \cdot (\exp(x) - 1)} \quad (3.4.9)$$

$$R_S = \frac{x \cdot N_S \cdot n \cdot \frac{k \cdot T_J}{q} - V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (3.4.10)$$

Teorie výpočtů a veškeré matematické vztahy z tohoto bloku jsou do hloubky popsány v literatuře [7]. Pro výpočet požadovaných hodnot náhradního matematického modelu pomocí Lambertovy funkce, byla v prostředí MATLAB naprogramovaná funkce **CalculateAndWriteModelsParameters.m**. Tato funkce rovněž využívá dále popsany efektivní model (kapitola 3.5) pro rychlé vykreslení I-V charakteristik článku. Použití této funkce je popsáno v praktické části této práce.

### 3.5 Efektivní model PV článku

Literatura [4] uvádí, že především pro úlohy hledání bodu MPP je často požíván tzv. efektivní model PV článku, kde místo odporů  $R_{SERIAL}$  a  $R_{SHUNT}$  je zaveden tzv. fiktivní odpor  $R_{PV}$ . Jedná se o prvek bez fyzikálního významu, který nelze modelovat pomocí elektrického zapojení, ovšem splňuje vztah  $I = V / R_{PV}$ , přičemž hodnota  $R_{PV}$  může nabývat kladné i záporné hodnoty. Tento fiktivní odpor může do jisté míry nahrazovat i paralelní odpor  $R_{SHUNT}$ . Fiktivní model PV článku splňuje požadavky na vysokou přesnost a zároveň jednoduchost nalezení parametrů modelu. Dále umožňuje explicitní vyjádření napětí  $V$  jako funkce proudu  $I$  a tím i přímý výpočet I-V charakteristiky článku.

$$V = \frac{q}{n \cdot k \cdot T_J} \ln \left( \frac{I_{PV} + I_0 - I}{I_0} \right) - I \cdot R_{PV} \quad (3.5.1)$$

Parametry tohoto efektivního modelu lze jednoduše vypočítat při pouhé znalosti hodnot  $V_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  a  $T_J$ . Literatura [4] uvádí zjištěné polynomicke koeficienty  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , které jsou nezávislé na materiálu článku:  $k_1 = -5,411$ ,  $k_2 = 6,450$ ,  $k_3 = 3,417$ ,  $k_4 = -4,422$ . Pro výpočty hodnot tohoto modelu se nejprve určí hlavní koeficient  $M$ , který se dále používá do následujících rovnic.

$$M = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} + k_1 \cdot \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} + k_2 \cdot \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} + k_3 \cdot \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} + k_4 \quad (3.5.2)$$

$$R_{PV} = -M \frac{I_{SC}}{I_{MPP}} + \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \cdot \left( 1 - \frac{I_{SC}}{I_{MPP}} \right) \quad I_{PV} = I_{SC} \quad (3.5.3)$$

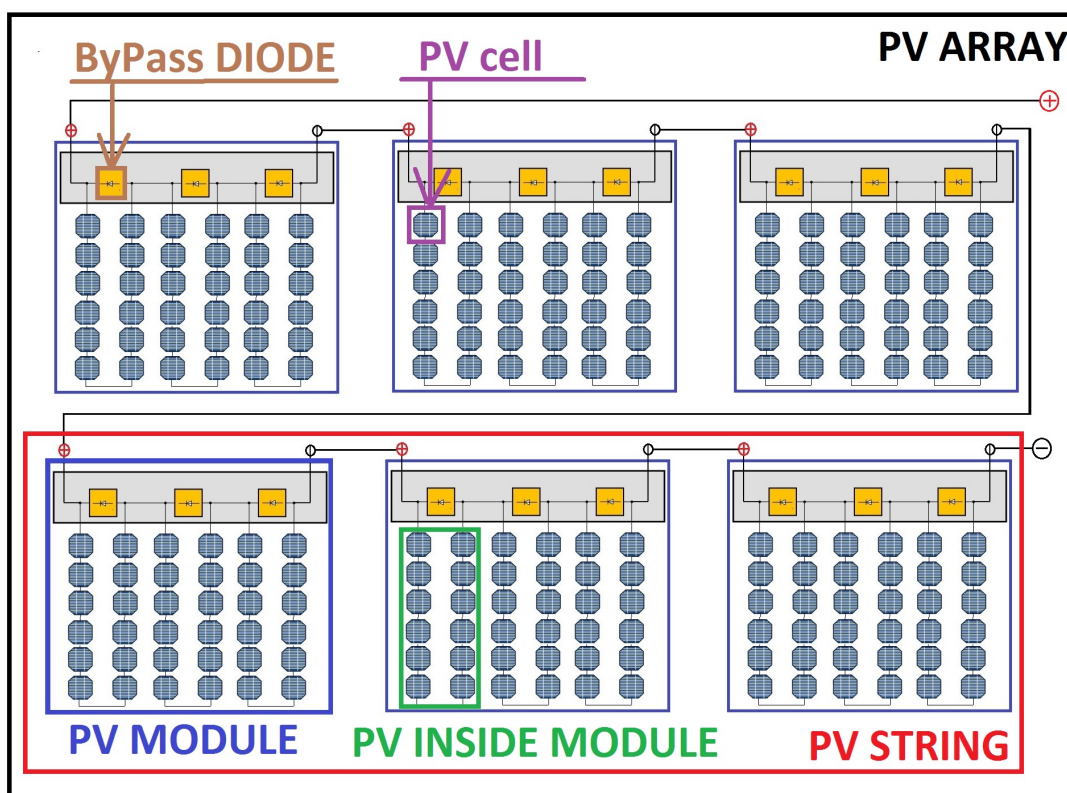
$$I_0 = I_{SC} \cdot \exp \left( \frac{V_{OC}}{(M + R_{PV}) \cdot I_{SC}} \right) \quad n = \frac{-M \cdot I_{SC} \cdot q - R_{PV} \cdot I_{SC} \cdot q}{k \cdot T_J} \quad (3.5.4)$$

Na základě vypočítaných a známých parametrů, které jsou ve vztahu 3.5.5 znázorněny červeně, lze navzájem vypočítávat napětí nebo proud článku. Pro přímé vykreslení I-V charakteristiky pak stačí jednoduše zvolit například hodnoty napětí a dopočítat odpovídající hodnoty proudu. Takto vypočítávaná I-V charakteristika článku je s danými vstupními polynomickými koeficienty v bodě  $P_{MPP}$  přesná na  $\pm 1\%$ .

$$V = \frac{q}{n \cdot k \cdot T_J} \ln \left( \frac{I_{PV} + I_0 - I}{I_0} \right) - I \cdot R_{PV} \quad (3.5.5)$$

## 4 Propojení PV komponent - články-modul-panel-řetězec-pole

Jelikož je PV panel z elektrického pohledu složen ze vzájemně propojených PV článků, lze většinu uvedených vztahů a metod pro propojování PV článků aplikovat analogicky i na propojování PV panelů. Používaná terminologie je v českém a anglickém jazyce mírně nepřehledná, proto může někdo zpočátku chápat níže popisované termíny jako nesprávné vysvětlení. Ve fotovoltaických systémech se ve většině případů PV články samostatně nepoužívají z důvodu jejich malého výstupního výkonu. Samostatný PV článek generuje velice malé napětí, proto se ve většině případů, v rámci jednoho PV panelu volí sériové spojení více PV článků dohromady – označováno jako řetězec (string). Pouze u některých typech panelů s tenkovrstvými články se lze setkat se sério-paralelním propojením z důvodu minimalizace sériového odporu. Pokud PV panel obsahuje ochranné překlenovací ByPass diody, které překlenují například 20 sériově spojených PV článků, lze o takovém spojení hovořit jako o PV modulu. PV panel je poté tvořen sériovým spojením tří PV modulů, kdy každý je překlenut ByPass diodou. V anglické literatuře se PV panel označuje jako modul. PV panely mohou být poté spojovány sériově nebo paralelně. Sériové spojení několika PV panelů se rovněž nazývá řetězec – STRING. Pro dosažení vyššího napětí a proudu zároveň se volí sério-paralelní spojení. Propojené PV panely tvoří fotovoltaické pole (PV array) s jedním centrálním výstupem. Způsob propojení PV panelů (topologie) závisí na požadovaných výstupních parametrech PV pole a také na provozních podmínkách. Tato práce se dále zabývá vhodným propojením PV panelů za účelem dosažení maximálního zisku při nesterjnorodých provozních podmínkách.



Obrázek 12 – Znázornění jednotlivých PV komponent

#### 4.1 Nesoulad a výkonový pokles při vzájemném propojení PV komponentů

U fotovoltaických systému, které slouží jako zdroje elektrické energie, se převážně setkáváme s požadavkem sériového spojení jednotlivých PV článků (PV panelů). Sériové propojení totiž zvyšuje napětí, což je vhodné pro následnou účinnou konverzi či přímé využití ve spotřebiči. Vyšší napětí je požadováno rovněž z důvodu ekonomického, kdy se snažíme snížit ztráty při rozvodu elektrické energie a snížit investiční náklady na propojení PV komponent. Z důvodu nutného navýšení proudu jsou sériově spojené PV komponenty dále spojovány ještě paralelně. Proto se u fotovoltaických systémů setkáváme s kombinací paralelně-sériově spojených PV komponent. Je všeobecně známo, že každý panel poskytuje maximální výkon ( $P_{MPP}$ ) při různé kombinaci proudu ( $I_{MPP}$ ) a napětí ( $V_{MPP}$ ). Při sériovém či paralelním spojení PV článku (analogicky i PV panelů), které nevykazují stejné elektrické vlastnosti anebo jsou vystaveny různým pracovním podmínkám má výsledná výstupní I-V charakteristika spojení nový bod MPP, kde ani jeden z PV komponent nepracuje ideálně jako v jeho bodě MPP. Tím dochází ke snížení výsledného maximálního výstupního výkonu spojení (ztráta elektrické energie) nebo problémům se vzájemnými vyrovnávacími proudy. Nesoulad komponentů může být prohlouben prakticky čímkoli, co vyvolá rozdíl mezi některými PV komponenty v systému. V reálných podmínkách se nejvíce jedná o situace rozdílné pracovní teploty a intenzity ozáření. V praxi dochází také často k nesouladu v důsledku opomíjení rozdílů I-V charakteristik mezi „štitkově“, shodnými PV panely, jenž mají již z výroby  $\pm 3\%$  toleranci..

Pro účely výroby elektrické energie z fotovoltaických článků se využívá oblast prvního kvadrantu I-V charakteristiky. Při rozdílných pracovních podmínkách jednotlivých PV článků, kdy nejběžnější jev je zastínění, s čímž dále souvisí změna pracovní teploty, se PV článek začne chovat jako zátěž a musí být k němu připojeno externí napětí. V této oblasti je napětí PV článku negativní, a proto je potřeba vnějšího zdroje nebo jiného solárního článku, který generuje potřebné elektrické napětí. V tomto stavu se PV článek zahřívá vlivem vysoké energetické spotřeby. Průrazné napětí článku má obvykle hodnotu 10 až 100V (obrázek 6) a pokud se teplota při tomto napětí zvýší nadměrně, dojde k protavení pouzdra PV článku nenávratnému zničení. Zastíněním více PV článků v rámci sériového spojení, může vzrůst značně ztrátový výkon zapojení, což způsobuje ještě vyšší zahřívání. Veškerý výkon z ozářených PV článků se začne spotřebovávat v zastíněném článku a pokud není výchozí materiál homogenní, dochází k průrazu lokálně. Takový jev se v literatuře označuje jako „hot-spot“, fenomén (jev horkého místa).

Pro snížení energetických ztrát je důležité předejít situacím, kdy by rozdílné elektrické parametry měly výrazný vliv na celkový výstupní výkon PV panelů a dále i PV pole. Jako nejběžnější ochrana se používají takzvané blokové a překlenující By-Pass diody, které však významně a nepředvídatelně ovlivňují celkové I-V charakteristiky zapojení. V rámci PV pole je možné předejít nesouladu buď použitím jednotlivých střídačů na úrovni každého panelu, nebo vhodnou rekonfigurací panelů, v případě odlišných pracovních podmínek.

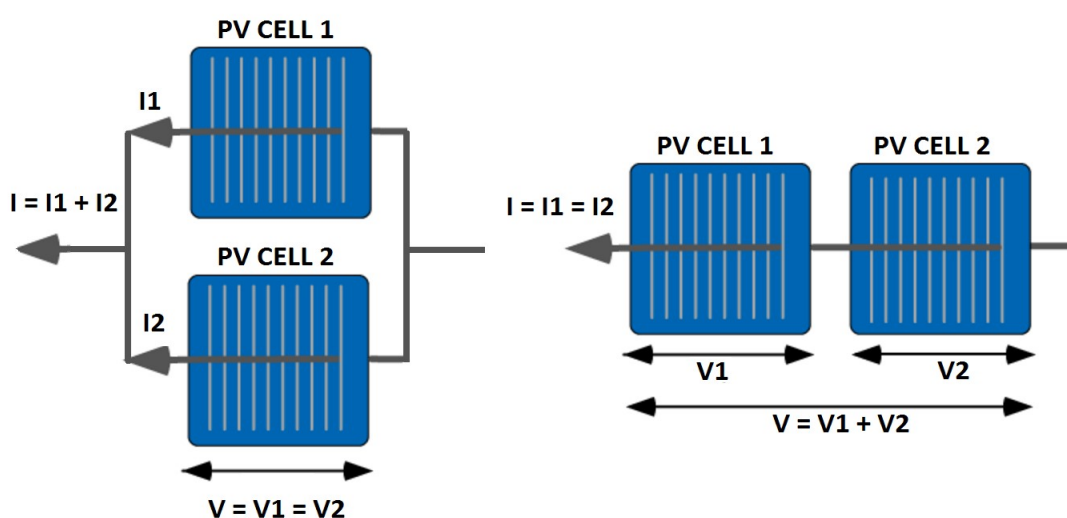
## 4.2 Sériové a paralelní propojení.

### Sériové spojení PV komponentů:

Sériové spojení PV komponent je nejčastější spojení a může zde docházet ke dvěma hlavním typům nesouladu – nesoulad zkratového proudu jednotlivých komponent a nesoulad napětí naprázdno. Neshoda zkratového proudu  $I_{SC}$  je častější, neboť k omezení proudu dochází již při malém snížení ozáření, zatímco napětí naprázdno  $V_{OC}$  se změní až při naprostém zastínění článku. Při sériovém spojení se napětí komponentů sčítají a výstupní proud je dán komponentem, který generuje nejmenší proud. To znamená, že jeden neozářený komponent ve stringu nám omezí procházející proud všemi komponenty. Jako ochrana před takovým omezením se používají překlenovací By-Pass diody, které v případě částečného zastínění vedou proud z ostatních PV komponent v daném stringu.

### Paralelní spojení PV komponentů:

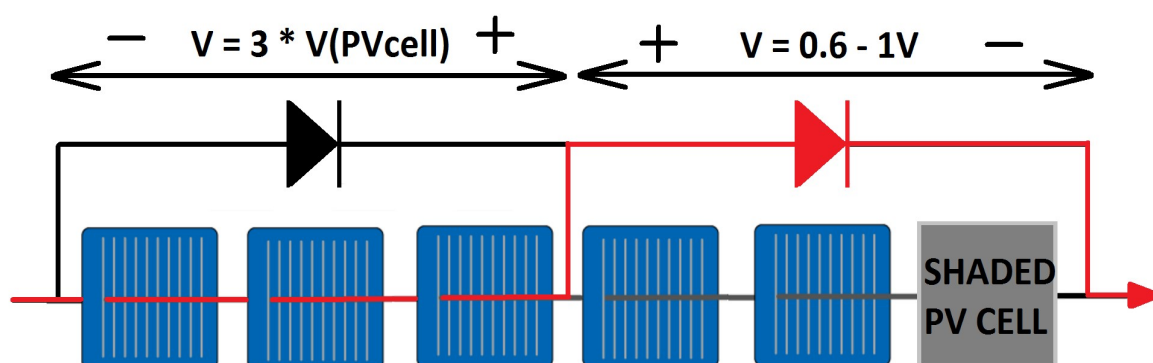
Paralelní propojení se u PV článků používá velmi zřídka. Proto je problém s nesouladem řešen spíše na úrovni PV panelů jejich propojení v polích. Při vzniku nesouladu u paralelního propojení PV komponent je celkové napětí  $V_{OC}$  sníženo afektovaným komponentem. Při pouhém snížení ozáření je výstupní proud  $I_{SC}$  dán součtem jednotlivých proudů z komponent. Problém však nastane, když jeden komponent bude zcela zastíněn. Poté dochází jak ke snížení napětí  $V_{OC}$  tak i vlivem přechodu PV komponentu do stavu zátěže také k odčítání proudů. Jako ochrana před tímto jevem se mohou použít blokující diody, které jsou v případě paralelního spojení řazené sériově s každým PV panelem nebo stringem. Problémem je však trvalá ztráta výkonu na těchto diodách i při stavu, kdy nedochází k nesouladu.



Obrázek 13 – Sériové a paralelní spojení PV komponentů

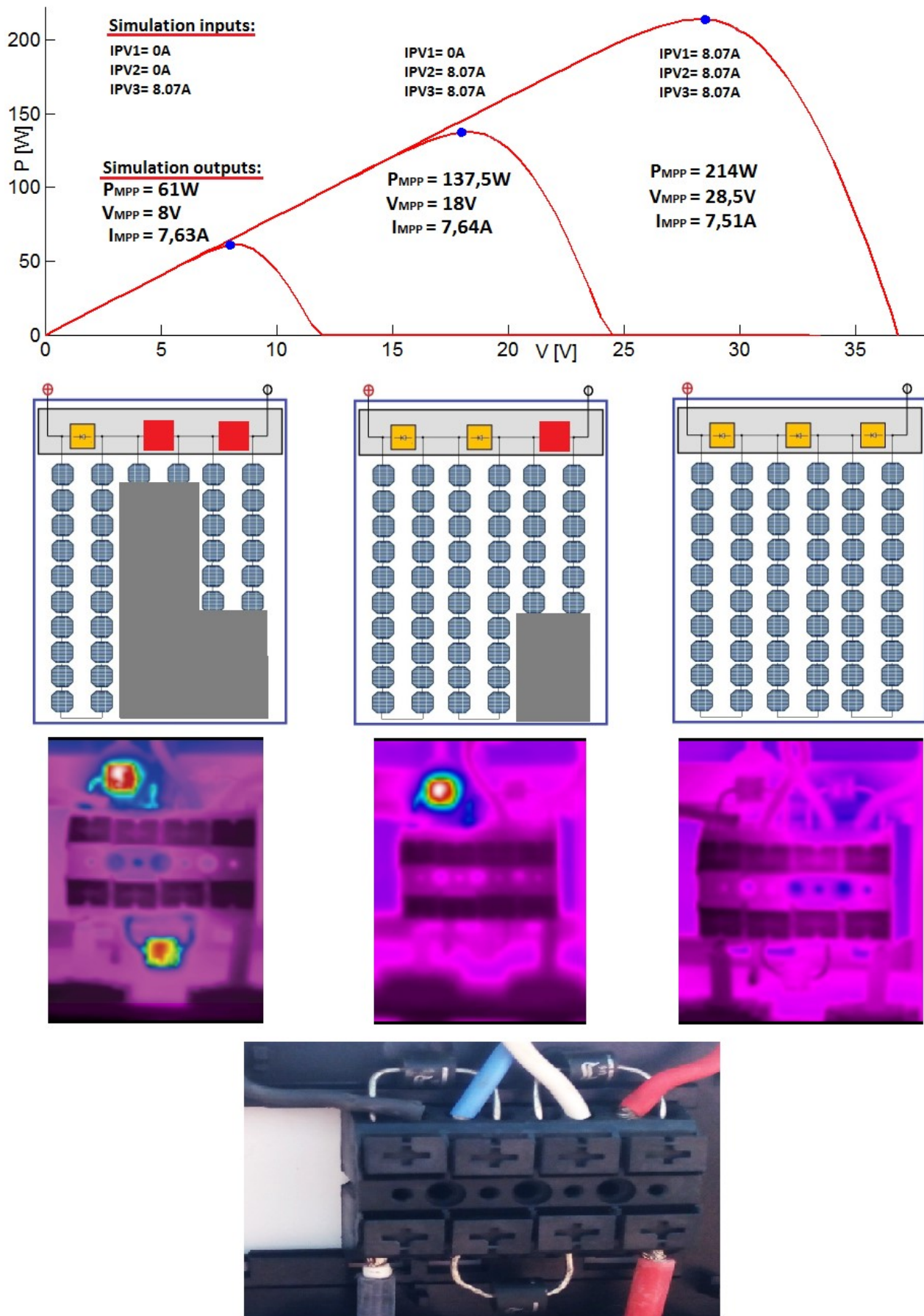
### 4.3 Ochranné blokovací a ByPass diody

V rámci PV panelů a PV pole se pro snížení ztrát vlivem nesouladu I-V charakteristik používají ochranné diody. Blokovací diody se používají k zabránění toku vyrovnávacích proudů do PV panelů, které jsou díky zastínění v módu spotřebičů. Při použití blokovacích diod, by měla být každá taková dioda dimenzována na maximální proud PV pole. Ovšem s ohledem na ztráty v důsledku úbytku napětí (0,5 až 1V) a dále s ohledem na jejich značnou poruchovost se v současné době téměř nevyužívají. Překlenovací ByPassové diody (BP diody) se používají k ochraně sériově spojených PV článků v momentu jejich zastínění. Umožňují eliminovat pokles výkonu PV panelu na základě převedení toku proudu, který by jinak procházel zastíněnými články. Zároveň chrání PV články před tepelným zničením v důsledku vzniku hot-spotu. Při normálních podmínkách, kdy jsou všechny PV články stejnoměrně ozářeny, je na BP diodě záporné napětí a v tom důsledku tedy nevede proud. Diody přecházejí do propustného směru při kladném napětí kolem 0,6V – 1V (v závislosti na typu), které se objeví ve chvíli, kdy je součet napětí zastíněného PV článku a napětí nezastíněných PV článků rovno hodnotě napětí BP diody. Nejvhodnější je použití Schottkyho diod, neboť dosahují polovičního úbytku napětí a tím pádem i menší ztrátě výkonu.



Obrázek 14 – Znáornění funkce ByPass diody

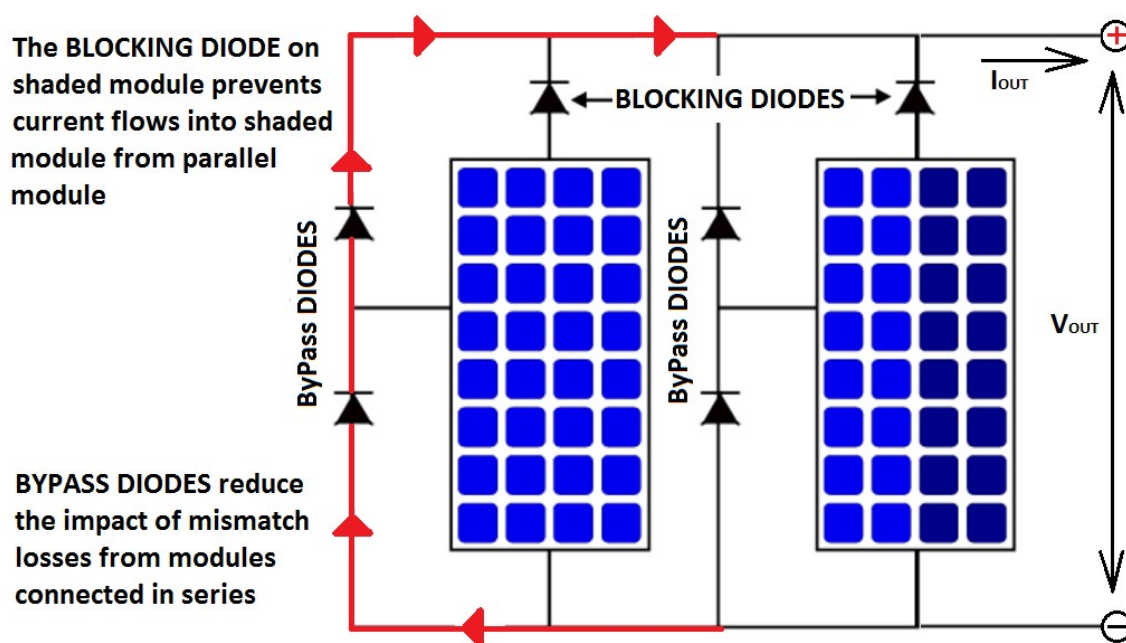
Pro dokonalou ochranu všech PV článků ve stringu, by měly být BP diody použity pro každý PV článek zvlášť. Při zastínění by se přemostil jen daný konkrétní PV článek, nikoli celý string, který BP dioda přemostňuje. Důvody, proč se BP diody nezapojují ke každému PV článku jsou především ekonomické, ale i fakt, že způsobují určitý ztrátový proud, který se projeví snížením výsledného proudu dodávaného PV článku. Využitím polovodičové technologie mohou být BP diody také integrovány přímo do PV článků. PV panely s takto integrovanými diodami vykazují menší ztráty vlivem nesouměrného ozáření, ale jejich cena je stále značně vysoká. V dnešní době se BP diody zapojují obvykle tak, aby překlenovaly 18-24 PV článků. V panelu jsou poté použity celkem 3 diody, kde každá přemostňuje třetinu PV článků. BP diody bývají většinou integrovány do rámu panelu nebo zapojeny v přípojovací skříňce (junction box), která je obvykle umístěna na zadní straně PV panelu. [4]



Obrázek 15 - Funkce ByPass diod při zastínění části PV panelu a vliv na celkový výkon

Na obrázku 15 je možné vidět výslednou P-V charakteristiku PV panelu při různých případech zastínění. Rovněž je zde podrobně znázorněna funkce BP diody. Provedená simulace a měření průchodu proudu bylo provedeno s používanými panely v celém projektu a zařízení – PV panel Conergy PowerPlus 215P a používanými BP diodami P1000M. Prostřední část obrázku zobrazuje schématické znázornění zastínění, které bylo v reálu navozeno pomocí přímého zakrytí této části PV panelu papírovým kartonem. Nejprve byl měřen kompletní ozářený panel, poté se zakryl první string panelu (pouhých 8 PV článků) a nakonec se přidal stín i na druhý (prostřední) string v panelu. Spodní část obrázku ukazuje sledování BP diod pomocí termokamery. Je zde názorně dokázáno, že při zastínění daného stringu začne odpovídající BP diodou procházet proud a ta se začne zahřívat. Horní část obrázku zobrazuje simulovaný P-V průběh s body MPP. Při zastínění jednoho stringu dojde k poklesu výstupního výkonu na 64% a při zastínění dvou stringů zároveň na 28%. Tento pokles je dán především snížením napětí, proud v rámci tohoto experimentu je prakticky neměnný.

Kombinace sério-paraletního propojení může vést k několika problémům. Uvažujme například paraletní spojení jednoho částečně zastíněného panelu a druhého celkově méně ozářeného panelu. Řekněme, že překlenovací ByPass diody, připojené k celkově méně ozářenému panelu mají nižší sériový odpor. Poté v případě zastínění PV panelu v tomto paraletním spojení, dojde k toku proudu jinými diodami, než těmi, které jsou přiřazené afektovanému panelu (obrázek 16) a s procházejícím proudem se zvyšuje jejich operační teplota. Pokud by tyto ByPass diody nebyly dostatečně dimenzované na maximální proud celého PV pole, může dojít k jejich poškození a dále v důsledku nepřeklenutého PV panelu (stringu) také k nevratnému poškození celého PV panelu. Proto je třeba věnovat dostatečnou pozornost ochranným prvkům při návrhu celého PV pole.



Obrázek 16 - Zapojení ochranných blokovacích a ByPass diod

#### 4.4 MPPT - sledovač maximálního výkonu

MPPT, neboli maximum power point tracker je zařízení, které se připojuje mezi centrální výstup PV pole a měnič, aby bylo zajištěno optimální využití energie z PV pole, neboť je všeobecně známo, že maximální výkon ( $P_{MPP}$ ) je dosažen při různé kombinaci proudu ( $I_{MPP}$ ) a napětí ( $V_{MPP}$ ). MPP tracker sleduje bod v koleně P-V charakteristiky PV pole, tak aby odebíraná energie dosahovala neustále maximálního výkonu. Základním předpokladem, pro maximalizaci výkonu u centrálních MPP trackerů je, že PV systém (PV pole) je rovnoměrně ozářen. Poté se už jen v závislosti na výstupním výkonu PV pole řídí měnič. Pro sledování MPP bodu existují různé metody. Základní metoda spočívá ve změně střídy měniče v závislosti na měření výstupního výkonu. Střída měniče se snižuje, pokud výstupní výkon z PV pole klesá a naopak. Kolem bodu MPP poměr střídy kolísá mezi kladnými a zápornými přírůstky. Některé metody odhadují MPP na základě měření přírůstků vodivosti, v závislosti na měření napětí  $V_{OC}$  a proudu  $I_{SC}$ . Tato metoda je však použitelná pouze na určité topologii PV pole. Nejnovější MPPT střídače obsahují vestavěný vysokofrekvenční DC / DC měnič, který transformuje vstupní stejnosměrné napětí na vysokofrekvenční střídavé napětí a dále toto napětí transformuje zpět na stejnosměrné napětí s jinou výstupní hodnotou. S jistou nadsázkou se dá říci, že jde o „speciální transformátor“, pro stejnosměrné napětí a proud.

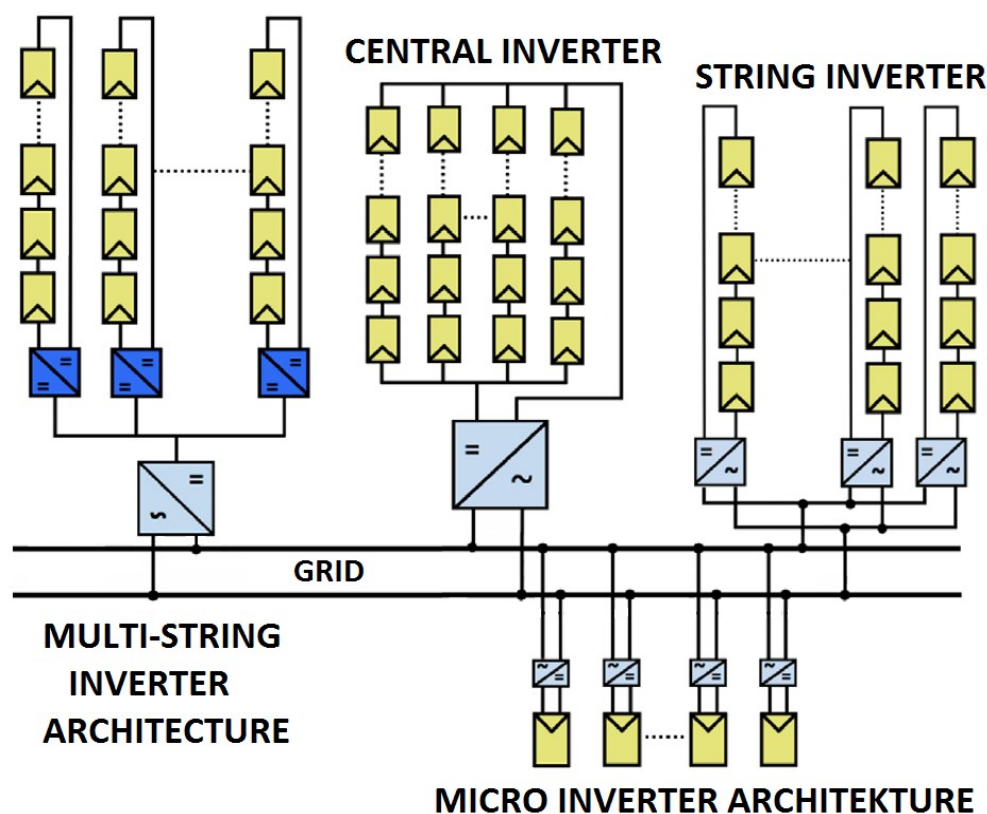
Hlavním problémem těchto zařízení je fakt, že se používají jako centrální trackery celého PV pole (obrázek 17), sledují MPP bod kolektivně za celou sestavu a nejsou schopny přizpůsobit napětí a proud u jednotlivých PV panelů. Díky tomu získávají z PV pole pouze průměrný výnos, přičemž slabší panely výrazně omezují výkon ostatních, výkonově silnějších panelů. Výsledkem je ztracená energie, kterou můžeme pojmenovat ztrátou z nesouladu, případně ztrátou špatné konfigurace PV panelů.

V poslední době jsou dostupné MPP trackery, které sledují bod MPP na úrovni panelů a přizpůsobují proud a napětí individuálním pracovním podmínkám jednotlivých PV panelů (Micro-Inverter architecture, obrázek 17). Takové zařízení garantuje maximální výkon každého panelu nezávisle na ostatních v celkovém zapojení. Vzájemná závislost PV panelů je tímto odstraněna. Výsledkem je vyšší energetický zisk, než jen pouhý průměr, který poskytují centrální MPP trackery. Nevýhodou systému je o něco vyšší cena, která je ale více než kompenzována vyšším energetickým výnosem a také dlouhodobými zárukami zařízení (střídače standardně 12 let, optimizéry 25 let). Výkonovými optimizéry a monitoringem na úrovni panelů budou časem moci být vybaveny stávající systémy s centrálními střídači.

Za účelem vyššího energetického výnosu jsou dnes také vyvíjeny zařízení, které se snaží řešit nesoulad PV panelů v zapojení pomocí jejich rekonfigurace. Takové řešení však vyžaduje podrobnější znalost nelineárního chování PV panelů, které obsahují překlenovací BP diody, jenž významně ovlivňují výstupní I-V charakteristiky celého PV panelu. Touto problematikou se zabývá tato diplomová práce. [5]

## 5 Strategie propojení PV panelů a možnosti rekonfigurace

Jak již bylo popsáno výše, vlivem rozdílných provozních parametrů a elektrických charakteristik jednotlivých PV panelů zapojených ve fotovoltaickém poli dochází k nesouladu mezi výstupními I-V charakteristikami a dochází k vážnému snížení celkového výkonu PV pole. Například při zastínění jednoho nebo více PV panelů, zapojených ve stringu je maximální odebíraný výkon limitován afektovaným PV panelem, kde navíc dochází ke zvyšování teploty, což může vést až k nezvratnému poškození. Bypass diody sice chrání PV panel před zničením, ovšem představují vznik velkých ztrát a tvoří lokální maxima v I-V charakteristice PV panelu, což může vést ke špatné funkci MPP trackeru. V dnešní době je problém snížení výkonu velice diskutovaným tématem, proto jsou navrhovány stále nové řešení, které nesoulad mezi jednotlivými PV panely eliminují.



Obrázek 17 – Používané architektury zapojení měničů u PV polí [6]

Dnes je nejefektivnějším řešením použití tzv. micro inverter architektury, kde má každý jednotlivý panel vlastní MPP tracker. Takové řešení je sice velmi efektivní, neboť každý PV panel pracuje na svůj maximální možný výkon a odpadají tím veškeré problémy s nesouladem, ovšem pořízení a instalace takového systému je stále finančně značně náročné řešení. Proto jsou stále vyvíjeny další zařízení, které se snaží řešit nesoulad PV panelů pomocí jejich rekonfigurace. Díky rekonfiguraci PV panelů (přepojení, přezapojení) jsme schopni z PV pole odebrat maximální možný výkon, tak jako při použití jednotlivých MPP trackerů pro každý PV panel. Problémem je však správné zmapování chování PV pole a určení pravidel, na základě kterých dojde k rekonfiguraci. [6]

## 5.1 Příčiny vzniku nesouladu vlivem rozdílných I-V charakteristik

Tato kapitola popisuje a ilustruje nejběžnější případy, kdy dochází k poklesu výkonu vlivem rozdílných I-V charakteristik jednotlivých PV komponentů. Toto chování je možné pozorovat na úrovni jednotlivých PV článků. Při spojování platí analogicky stejné chování pro PV panel a dále i pro celé PV pole. Nejvíce problematické jsou z pohledu spojování a následného vzniku nesouladu PV systému, kde dochází k nerovnoměrnému rozložení pracovní teploty, nebo k nerovnoměrnému rozložení ozáření. Jako příklad pro nerovnoměrně rozloženou teplotu můžeme uvést fasádní a stavebně integrované PV systémy (Building integrated PV, BIPV) kde je příčinou rozdílné proudění vzduchu a následné chlazení s čímž přímo souvisí operační teplota. Nerovnoměrné ozáření může vzniknout externími objekty, jako například okolní budovy, komín na střeše nebo krajinným rázem. V praxi, v rámci rozsáhlých PV systémů, dochází ke stínění i při přechodu mraků. Jedná se o všeobecně známé a dostupné informace, proto není třeba již popisované chování více rozebírat. [4] [5] [9]

### 5.1.1 Technologické příčiny a stárnutí

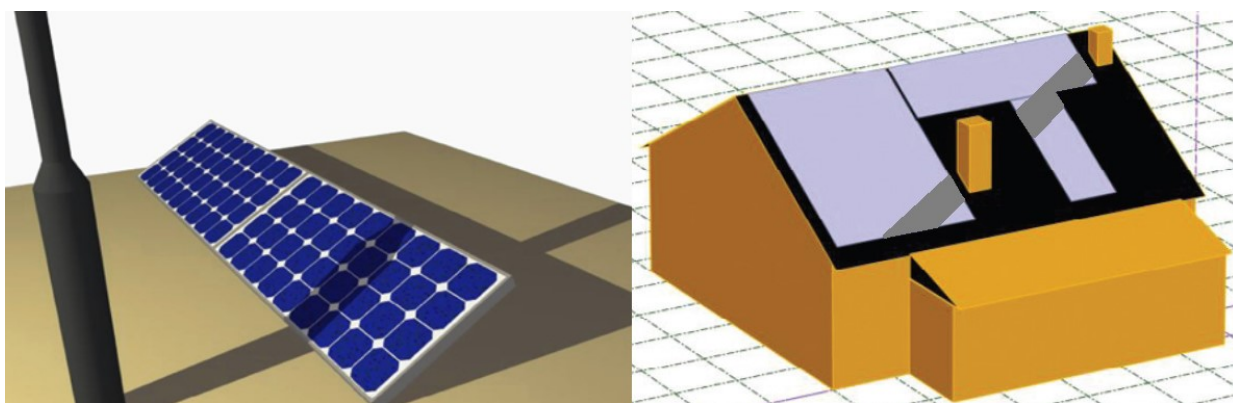
Vlivem rozdílné technologie výroby a variabilitou výrobního procesu může dojít při propojení PV komponent ke vzniku nesouladu. Propojení PV komponent s rozdílnou technologií výroby je spíše vyjímečným případem a jedná se většinou o nesprávný návrh systému. Z důvodu variability výrobních procesů se PV články třídí do skupin na základě naměřených údajů při takzvaném zábleskovém flash testu. Protože jsou PV články v PV panelu řazeny sériově, tak je hlavním kritériem flash testů rozdělení do skupin se shodným proudem  $I_{MPP}$ . Takové třídění je možné pouze v případě výroby krystalických PV článků, neboť u tenkovrstvých technologií jsou PV články nanášeny na substrát a současně vzájemně propojovány.

Průběh stárnutí a degradace PV komponent je určen vlastní výrobou, provozními parametry a zapojením v rámci celého systému. Je obecně známo, že panely časem ztrácejí výkon a po 20 letech jsou asi na 80 % štítkového výkonu. Největším problémem je, že jednotlivé panely stárnou různým tempem a tímto dochází ke změně elektrických parametrů, které se začínají navzájem velmi lišit. Dalším problémem je vznik přepětí na PV panelech a působení vyšších harmonických složek v rámci celého PV systému. Při výrazném snížení proudu  $I_{SC}$  (v rámci jednotlivých PV článků) a zachování hodnot  $V_{OC}$  dojde k nepřizpůsobení bodu MPP. Nárůst odporu  $R_{SERIAL}$  způsobí při jeho relativně nízkých hodnotách převážně změnu napětí  $V_{MPP}$  a až při vysokých hodnotách výraznou změnu  $I_{MPP}$ . Proto je při použití kvalitních PV komponent (nízká hodnota  $R_{SERIAL}$ ) problém vlivem nepřizpůsobení bodu MPP převážně v případě paralelního propojení. [4]

## 5.1.2 Rozdílné provozní podmínky

Vlivem nerovnoměrně rozložené teploty nebo intenzity ozáření jednotlivých PV komponent dochází ke změně elektrických parametrů a tím při vzájemném propojování ke ztrátě energie a odchýlení od bodu MPP. Intenzita ozáření  $G$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] a teplota  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] PV komponentů mají zásadní vliv na jejich výstupní elektrické parametry. Generovaný fotoproud  $I_{\text{PV}}$  je přímo úměrný intenzitě ozáření  $G$  a tudíž i u proudu nakrátko  $I_{\text{SC}}$  je možné hovořit o lineární závislosti na ozáření. Napětí naprázdno  $V_{\text{OC}}$  vzrůstá logaritmicky s rostoucí intenzitou ozáření. Teplota PV článku má výrazný vliv na napětí  $V_{\text{OC}}$ . Obecně lze napsat, že se vrůstající intenzitou ozáření  $G$  vzrůstá výstupní výkon a se vrůstající provozní teplotou  $T$  klesá výstupní výkon. Vliv intenzity záření a teploty je často ve vzájemné korelaci a vzhledem ke ztrátám energie úzce souvisí s typem elektrického propojení a mírou nerovnoměrnosti. Dále jsou uvedené typické příklady z praxe. [5]

### Částečné zastínění fixní překážkou – nesoulad díky rozdílnému ozáření



Obrázek 18 – Vznik částečného zastínění PV panelů vlivem fixní překážky [5]

Zdroje, které způsobují částečné zastínění jsou nekonečné – komíny, satelitní paraboly, kabely elektrického vedení nad PV polem a v rámci větších systémů i postupující mraky. V případě nevhodně provedené instalace si mohou panely dokonce stínit navzájem. Ztráty jsou navíc znásobeny BP diodami v panelech, které mohou snížit výkon panelu o 30 % až 100 %. Pokud jsou panely navíc zapojeny v řetězci, tak částečně zastíněný panel ovlivní všechny propojené panely a značně se tím sníží dodávaný výkon.

### Znečištění – nesoulad díky rozdílnému ozáření

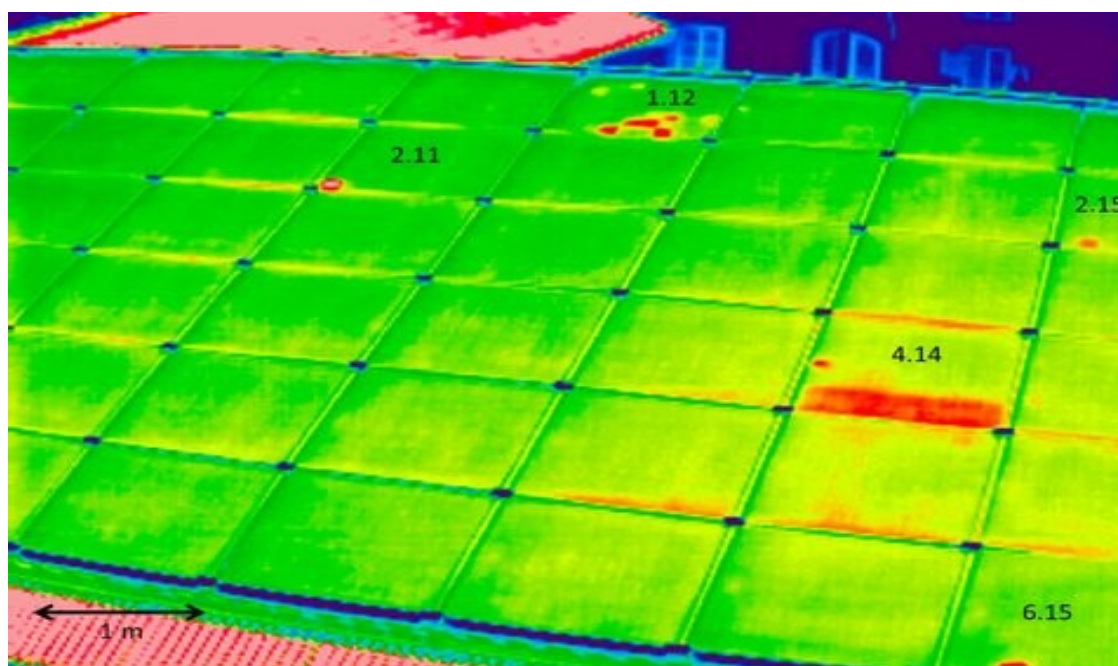
Jakékoliv znečištění znamená menší osvětlenou plochu PV panelů. Znečištění může nastat úplné, například když jsou všechny PV panely pokryty vrstvou sněhu nebo prachu. K částečnému znečištění dojde například od padajících listů nebo od výkalů ptáků. Tyto faktory nepůsobí nikdy na všechny panely stejně, přičemž jejich vliv je v čase proměnlivý. Mytím panelů lze vliv znečištění omezit, nelze jej však odstranit úplně.



Obrázek 19 – Znečištění PV panelů – sníh a prach [web]

### Nesoulad díky rozdílným teplotám

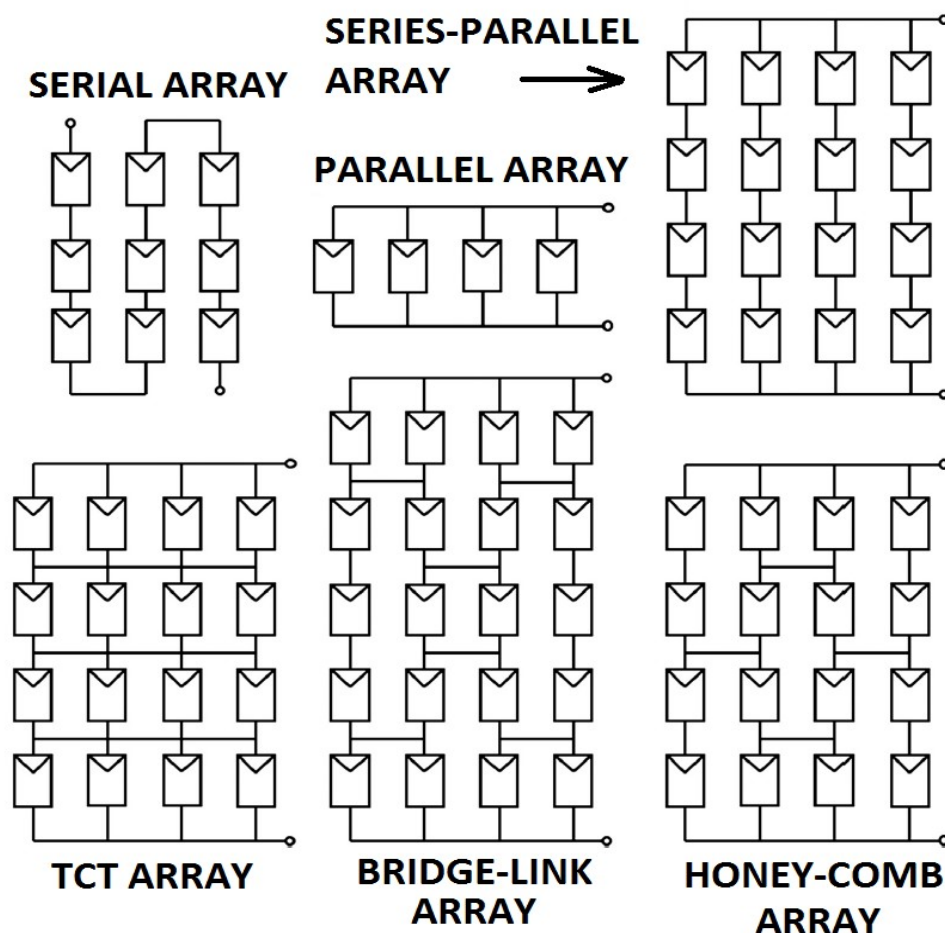
Rozdílná teplota na různých místech PV instalace má za následek rovněž nesoulad mezi panely. Protože existuje přímá souvislost mezi teplotou a výkonem panelů, tak panely vystavené rozdílným teplotám vykazují odlišné I-V charakteristiky. Takové případy nastávají například pokud je elektrárna postavená na svahu a nebo za větrných dnů, kdy vítr odebírá teplo z panelů na jednom konci elektrárny a distribuuje ho skrz elektrárnu. Velké teplotní rozdíly mohou být u takzvaných fasádních systémů, kde na provětrávané fotovoltaické fasádě je teplota horních panelů vyšší, než u panelů v dolních řadách. Obrázek 20 ukazuje infračervený snímek provedený pomocí termokamery, kde jsou vidět horká místa (hot spots). Tyto místa indikují defekty v panelu a jsou zdrojem dalšího nesouladu. Rovněž je zde pozorovatelný vadný (zastíněný) string PV panelu a přehřívající se BP dioda. Za povšimnutí stojí také fakt, že teploty panelů v levé části, jsou nižší, než v pravé části PV systému. [5] [9]



Obrázek 20 - Teplotní snímek fotovoltaické elektrárny na střeše domu [9]

## 5.2 Nejčastější způsoby zapojení PV panelů

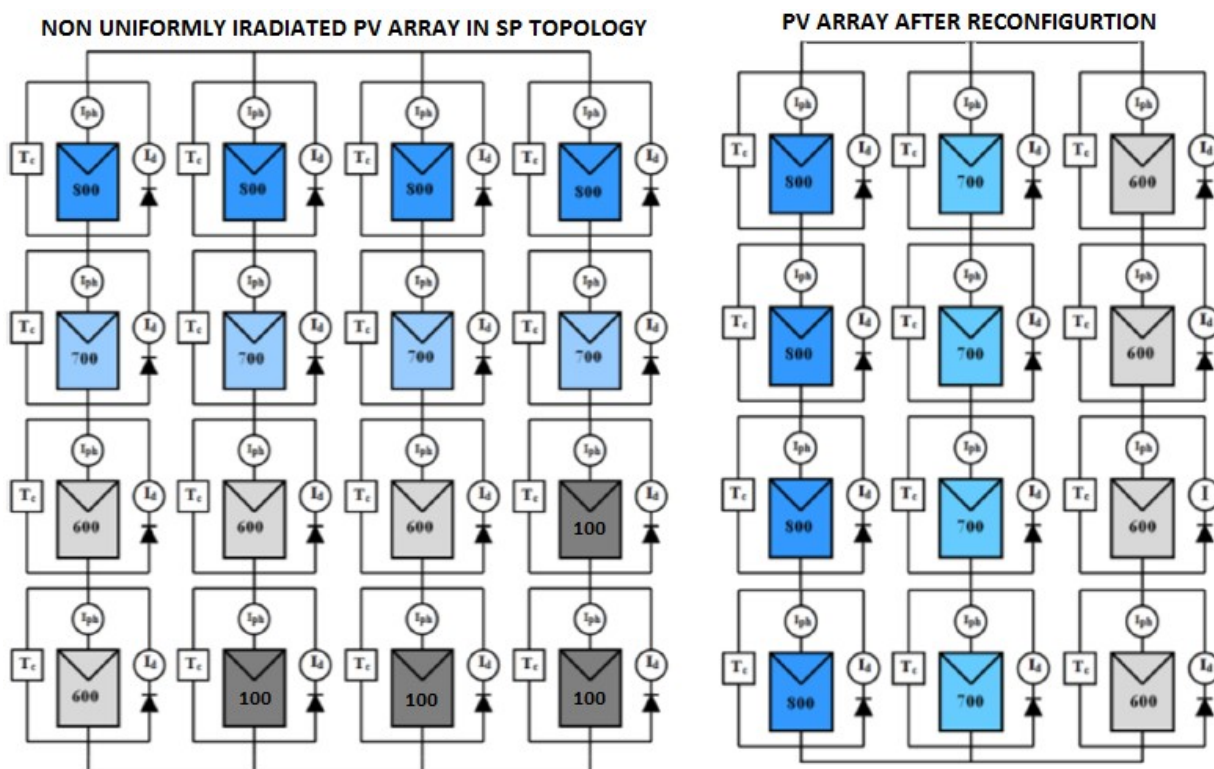
V odborné literatuře je popsáno mnoho různých alternativ propojení jednotlivých PV panelů za účelem snížení ztrát. Pouhé sériové nebo paralelní propojení PV panelů v celém PV poli je velmi nevhodné řešení. V paralelním propojení, při částečném zastínění, PV pole produkuje vyšší výkon než při sériovém propojení, neboť celkový proud je dán součtem všech proudů z jednotlivých (i méně ozářených) panelů a napětí se mění minimálně. Nevýhodou jsou vyšší výkonové ztráty na vodičích a nutnost použití více propojovacích vodičů, které navíc musí být dostatečně dimenzovány. Nejčastěji se proto používá kombinace sériového a paralelního propojení (SP), kdy sériovým spojením PV panelů do stringu dosáhneme vyššího napětí a paralelním spojením stringů dosáhneme vyššího proudu při stále ekonomickém použití kabeláže. V kompletně propojené (Total-cross-tied, TCT) topologii se proudy jednotlivých PV panelů sčítají v řadách a dále jsou tyto řady spojovány sériově pro dosažení vyššího napětí. Při ideálních podmínkách SP a TCT topologie poskytuje shodný výkon, ovšem při odlišných provozních podmínkách TCT dosahuje lepších výsledků a nesnižuje tolik celkový výkon panelů, neboť málo afektovaný panel dále významně neovlivňuje panely ve stringu či v řadě a je zde snazší možnost rekonfigurace. Bridge-Link (BL) a Honey-Comb (HC) topologie kombinují zapojení SP a TCT za účelem snížení nákladů na propojení vodiči. [6]



Obrázek 21 – Způsoby propojení PV panelů [6]

Ačkoli doposud bylo vyzkoušeno mnoho různých topologií propojení PV panelů, nejekonomičtější výsledky dosahují PV pole zapojené do SP nebo TCT topologie. Tyto topologie kombinují získání vyššího napětí a zároveň i proudu, čímž získáváme vhodnější elektrické parametry pro následnou konverzi elektrické energie ze stejnosměrné DC na střídavou AC.

### 5.2.1 Sério-paralelní spojení PV panelů (SP)

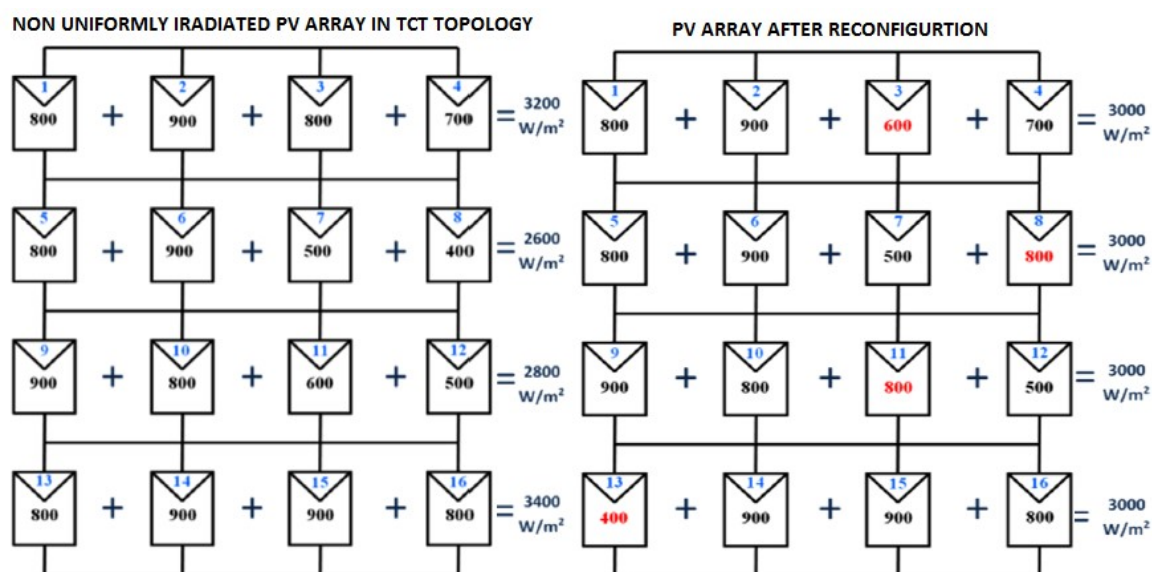


Obrázek 22 – Rekonfigurační strategie v SP propojení [6]

SP propojení je vhodné u PV systémů, kde se vyskytuje rozdílná teplota u jednotlivých PV panelů. Rozdílná teplota ovlivní napětí, ovšem při stejném ozáření bude proud generovaný panely stále stejný, čímž nebude omezen tok celkového proudu ve stringu. SP topologie umožňují seřazení PV panelů se stejnými pracovními parametry do jednotlivých stringů, ale vzhledem k tomu, že takto seřazené stringy budou mít odlišné výstupní napětí, tak při jejich paralelním spojení dojde k nesouladu zapojení vlivem nepřizpůsobení napětí na výstupu. Minimálně ozářené panely, které by mohly také tvořit string, se do celkového zapojení z důvodu jejich významného ovlivnění dalších panelů a následného velkého poklesu celkového výkonu nezapojí. Takové řešení je sice stále lepší než použití pouhého klasického střídače pro každý string, ovšem stále není možné z pole odebrat maximální výkon, který PV panely aktuálně dodávají. U této topologie je navíc složitější navrhnout rekonfigurační matici, která by přepojovala jakýkoliv panel do jakéhokoliv stringu. Pro 12 PV panelů je oproti TCT rekonfigurační matici potřeba 3x více spínacích prvků. Zjednodušený popis této strategie rekonfigurace je popsán v literatuře [6].

## 5.2.2 Kompletně propojené spojení PV panelů (TCT)

V tomto propojení PV panelů se PV panely formují paralelním spojením do řad (rows) kde se proudy jednotlivých PV panelů sčítají. Tyto řady jsou dále spojovány sériově pro dosažení vyššího napětí. Hlavní myšlenkou tohoto propojení je vytvoření shodných řad, které generují shodný proud. Při dosažení takových podmínek můžeme z pole odebírat maximální možný aktuální výkon při využití všech panelů. Pro každou konfiguraci můžeme určit index EI, který představuje procentuální výkon vůči maximálně ozářenému poli. Takovéto propojení je vhodné u PV panelů, kde dochází k nerovnoměrnému rozložení intenzity záření. Algoritmy, které slouží pro správné rozřazení a rekonfiguraci PV panelů jsou založené především na určení ozáření G pomocí měření proudu, napětí a teploty. Při rovnoměrném ozáření a shodných teplotních podmínkách PV panely zapojené do SP nebo TCT topologie generují shodný výkon. Při různých intenzitách ozáření je dosaženo vyššího výkonu při použití TCT topologie, neboť umožňuje zapojení všech PV panelů najednou a vytvoření vyvážených řad stringů a stringů, což bohužel v SP topologii není v rámci nerovnoměrných pracovních podmínek vždy možné (zajistit vytvoření vyvážených řad při použití všech panelů). V praktických zapojeních je však třeba počítat se zvýšenými náklady na kabeláž. Při použití rekonfiguratoru je u tohoto propojení značná výhoda při návrhu rekonfigurační matice, neboť počet spínacích prvků je vzhledem k variabilitě konfigurace daleko menší než u SP propojení. Z těchto důvodů se pro rekonfigurační zařízení volí spíše TCT topologie, kde je možné jakýkoliv panel zapojit na jakoukoliv řadu, čímž se dají vytvořit plně vyvážené řady, které následně zapojíme do stringu. Pro správné určení parametrů je však převážně nutné většinu panelů odpojit ze zapojení a měřit samostatně, aby nedocházelo k ovlivnění hodnot v důsledku propojení s dalšími panely. To ovšem znamená delší čas a vyšší opotřebení spínacích prvků. Určení hodnot ozáření jednotlivých PV panelů (s výrazně odlišnými provozními parametry) při fixním zapojení do PV pole je předmětem velkého zájmu. Tato práce dále obsahuje výkonný simulační program pro zapojení 3x4 TCT, s kterým je možné chování lépe zmapovat. [6]



Obrázek 23 – Rekonfigurační strategie v TCT propojení [6]

### 5.3 Moderní řešení nesouladu panelů – výkonové optimizéry se střídačem

Jak již bylo popsáno na úvodní straně této kapitoly, dnes nejefektivnějším řešením je použití takzvané micro-inverter architektury, kdy sledujeme každý jednotlivý PV panel. Tato architektura představuje spolu s rekonfigurační strategií moderní řešení nesouladu ve fotovoltaických elektrárnách. Zařízení, které implementuje takovou architekturu je jakési hybridní spojení výkonových optimizéru (MPPT) spolu s klasickým střídačem. V dnešní době prodej takových zařízení prudce stoupá a mají navíc značný technický náskok oproti rekonfiguračním strategiím, které řeší nesoulad pouhým přepojováním nebo odpojováním panelů. Výkonový optimizér je malé zařízení, které se připevňuje buď na panel (add-on) anebo může být do panelu již přímo integrováno místo klasického připojovacího boxu. Výkonové optimizéry SolarEdge integruje do svých PV panelů například německý výrobce Solon a další světoví výrobci jsou ve fázi certifikace. Takový optimizér se potom stará o svůj panel (případně několik panelů) a střídač plní jen funkci konverze stejnosměrného proudu na střídavý (DC/AC). Protože střídač pracuje stále za optimálních podmínek, dosahuje maximální účinnosti i při nízkých úrovních ozáření, kdy účinnost klasických centrálních střídačů značně klesá.

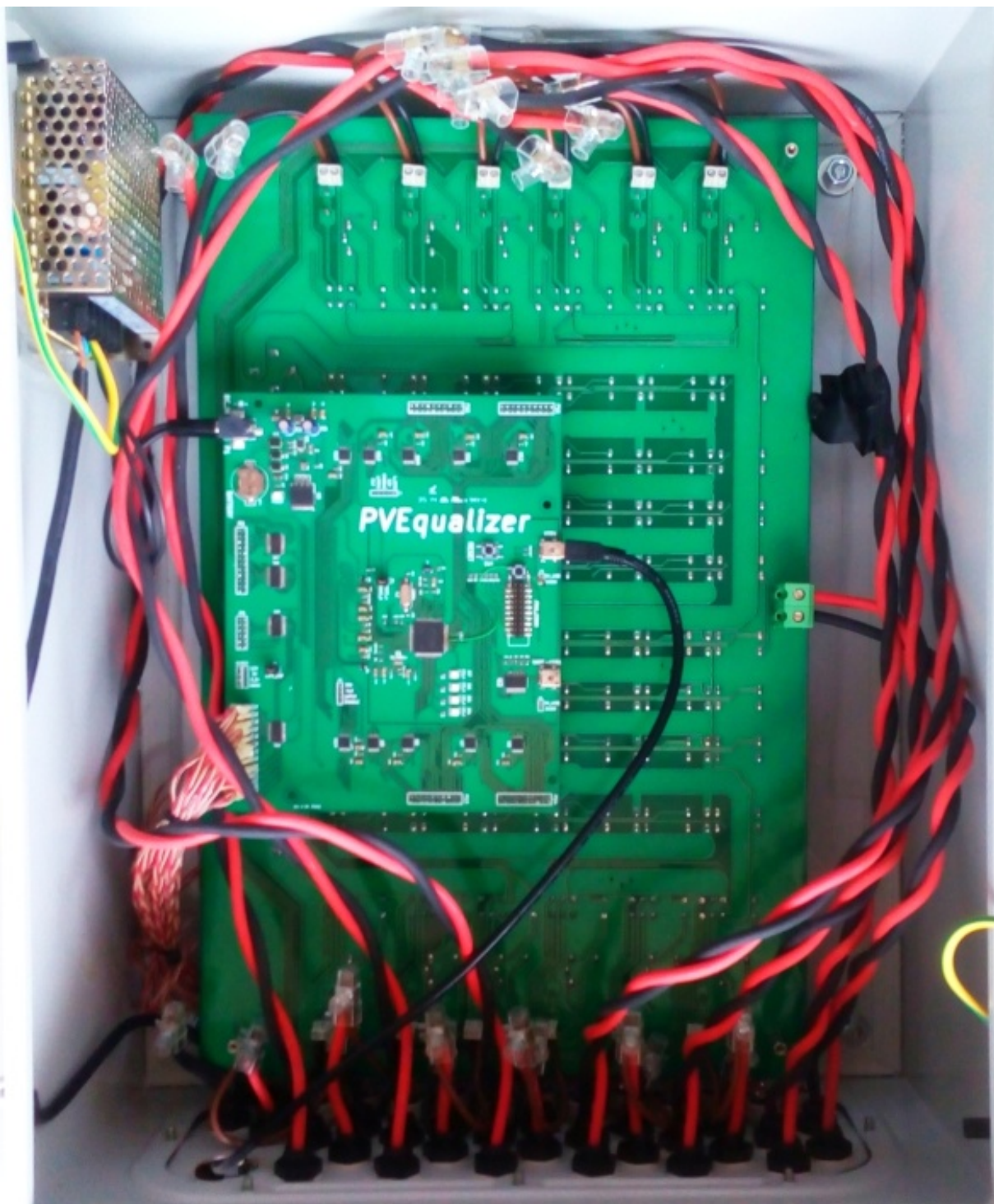
Výhody použití těchto optimizérů jsou jasné. Mají především vyšší výnos energie, neboť každý panel pracuje při optimálním proudu a napětí nezávisle (MPP je sledován u každého panelu zvlášť). Dále je možné monitorování na úrovni PV panelů, kde je možné sledovat výkon jednotlivých panelů a v případě poruchy ihned odhalit vadný, zastíněný nebo jinak ovlivněný panel. Plné využití zastavěného prostoru - napětí ve stringu je stále a projektant může využít delší stringy, v nichž mohou být dokonce zapojeny různé typy panelů. Stringy nemusí být stejně dlouhé a panely mohou mít různý sklon a orientaci. Komín nebo sloup elektrického vedení už ovlivní pouze výkon zastíněného panelu, nikoli výkon celého řetězce. Velká výhoda je rovněž v bezpečnosti, kdy hlídací funkce umožňuje vypnout panely při nečinnosti střídače, výpadku sítě nebo při zvýšené teplotě. [9]



Obrázek 24 - Výkonový optimizér SolarEdge [9]

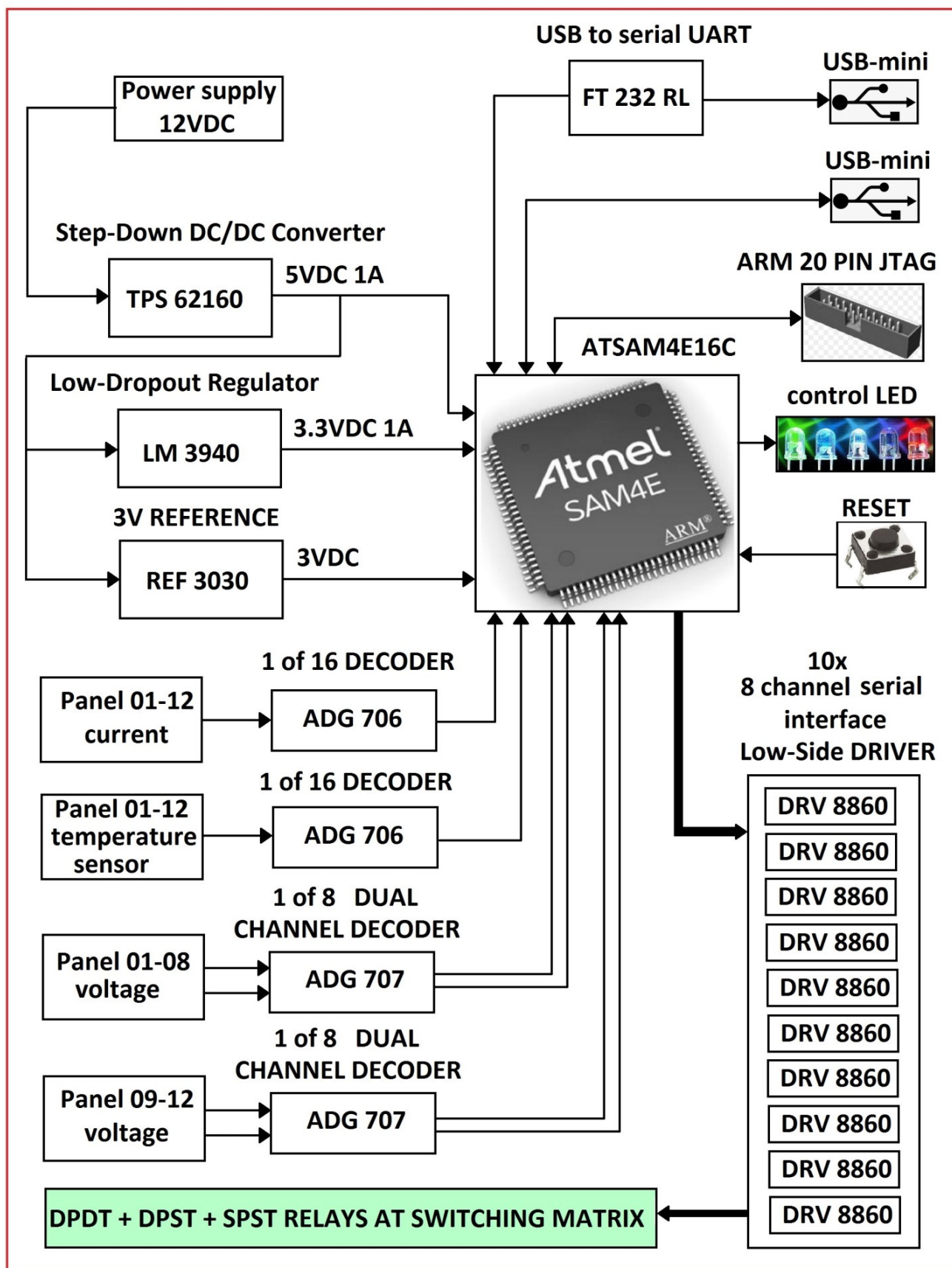
## 6 Rekonfigurátor – hardware

Zkonstruované zařízení můžeme rozdělit na 3 hlavní části: spínaný napájecí zdroj 230VAC / 12VDC.20A, řídicí desku (PVEqualizer) a výkonovou desku s přepínacími relé a měřicími obvody napětí a proudu. Celé zařízení je umístěné v průmyslovém boxu o rozměrech 40 x 80 x 30 cm s krytím IP55.



Obrázek 25 - Rekonfigurátor PV pole: pohled na kompletní zařízení umístěné v boxu.

## 6.1 Řídící část rekonfigurátoru - PVEqualizer



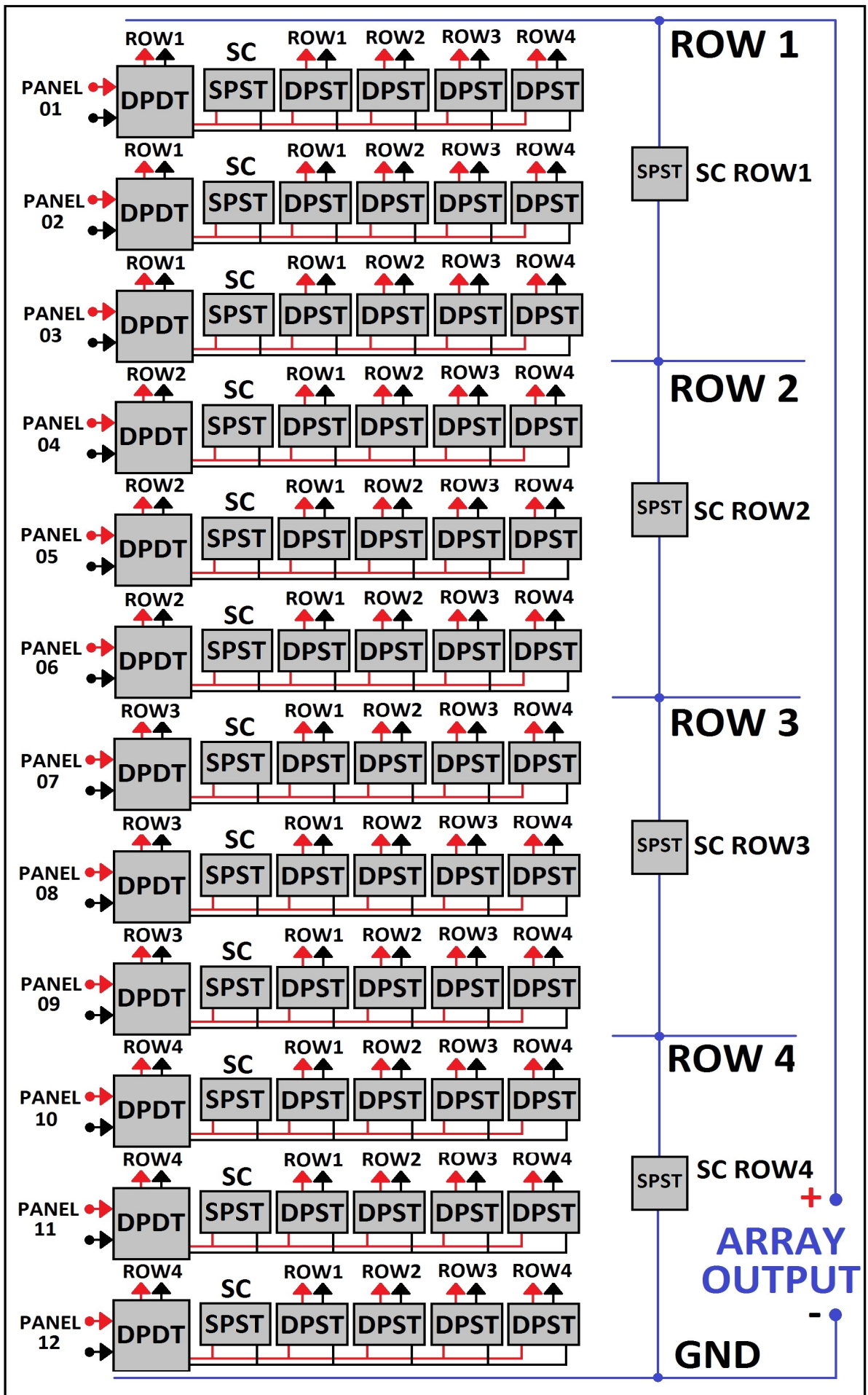
Obrázek 26 - Blokové schéma řídicí části rekonfigurátoru

Řídící deska rekonfigurátoru (PVEqualizer) se dá popsat čtyřmi hlavními bloky. V prvním bloku jsou umístěny obvody, které slouží pro zajištění filtrovaného napájení a referenčního napětí pro všechny logické obvody celého zařízení. Druhý blok představuje zapojení komunikačních interface, kontrolní diody a reset spínače. Ve třetím bloku jsou obsaženy kanálové dekodéry, které slouží pro výběr vstupních dat jednotlivých panelů. Analogové hodnoty napětí z diferenčních operačních zesilovačů převádíme pomocí duálních A/D převodníků. Poslední čtvrtý blok obsahuje deset osmikanálových driverů (80 výstupů), které se používají pro přímé spínání jednotlivých relé přepínací matice.

Srdcem řídicí desky rekonfigurátoru je MCU Atmel z řady SAM4E ARM Cortex-M4, konkrétně ATSAM4E16C. Tento MCU je založen na vysoce výkonné 32-bitové ARM Cortex-M4 RISC architektuře, pracuje na maximální frekvenci 120 MHz a má 1024KB Flash, 2 kB vyrovnávací paměti a až 128 Kb SRAM. Výhodou tohoto MCU jsou komunikační rozhraní jako FS USB, sériové rozhraní USART, SPI, TWI, duální 16-ti bitové ADC s rychlostí 1Msps a dostatečný počet I/O portů. Veškeré podrobné informace jsou dostupné v katalogovém listu výrobce.

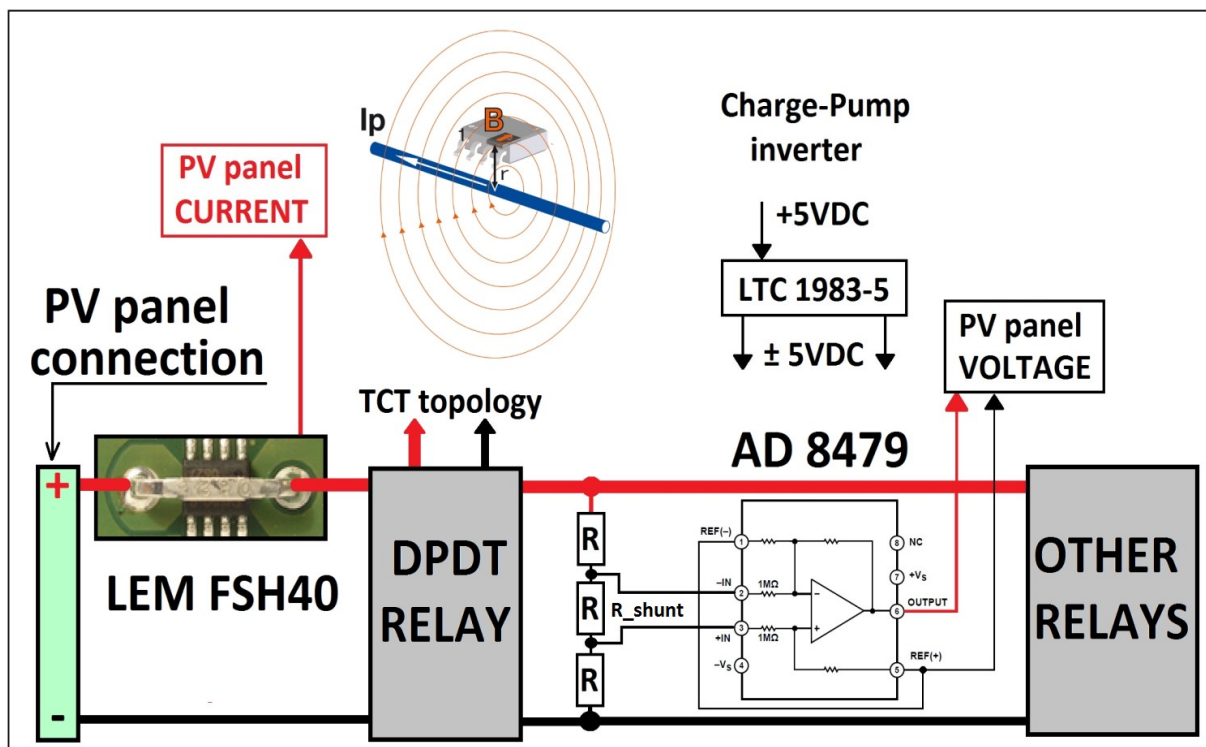
## 6.2 Přepínací matice rekonfigurátoru

Přepínací matice (switching matrix) je podstatná část zařízení pro možnost rekonfigurace (přepojování) PV panelů. Jedná o soustavu relé, které jsou zapojeny takovým způsobem, aby bylo možné jakýkoliv panel napojit na jakoukoliv řadu a různě kombinovat zapojení a měřit proudy a napětí. Tato přepínací matice byla navržena pro univerzální použití, ovšem možnosti přepojování jsou omezeny životností použitých relé. Proto je třeba navrhnout rekonfigurační algoritmus tak, aby bylo přepínání relé minimalizováno. Přepínací matice je tvořena celkem 48 DPST relé, které mohou jakýkoliv panel napojit na jakoukoliv řadu (row). Pro možnost napojovat panel na jakoukoliv řadu je třeba, aby před příslušným panelem bylo sepnuté DPDT relé. Toto relé přepíná mezi dvěma základními možnostmi. V počátečním nesepnutém stavu napojuje panel do základní 3x4 TCT topologie. Panely 01,02,03 jsou zapojeny na první řadu (row1), panely 04,05,06 zapojeny na druhou řadu (row2), panely 07,08,09 zapojeny na třetí řadu (row3) a panely 10,11,12 jsou zapojeny na čtvrtou řadu (row4). Pokud chceme panel napojit na jinou řadu, nebo jen odpojit ze zapojení, je třeba sepnout DPDT relé, čímž napojíme panel na větev (BRANCH), ke které jsou připojeny DPST relé. Pokud není panel pomocí DPST relé napojen na nějakou řadu, tak na této větvi naměříme napětí na prázdko  $V_{OC}$  daného panelu. Pokud chceme měřit proud nakrátko  $I_{SC}$  daného panelu, je zde připravené SPST relé, pomocí kterého zkratujeme větev. Rekonfigurační matice dále obsahuje ještě 4 SPST relé, které slouží ke zkratování jakékoliv řady, v případě, kdy k ní nejsou zapojeny žádné panely, tak aby mohl do zátěže procházet proud. Všechny použité relé mají životnost přibližně 100 tisíc přepínacích cyklů.



Obrázek 27 – Blokové schéma přepínací matice

### 6.3 Obvody pro měření napětí a proudu PV panelu



Obrázek 28 - Blokové schéma měřících obvodů umístěných na desce s přepínacími relé

Všechny panely jsou připojeny k výkonové desce s přepínacími relé samostatnými konektory, za kterými jsou umístěny měřící obvody proudu. Dále je vřazeno DPDT relé, které panely přepojuje buď do základní 3x4 TCT konfigurace nebo do větve, na kterou jsou napojeny další spínací relé. Na této větvi můžeme měřit napětí panelu. Pokud chceme měřit napětí  $V_{OC}$ , je třeba sepnout DPDT relé a zároveň vypnout veškeré DPST relé dané větve, které panel napojují na řady. Pokud je DPDT relé vypnuté, tedy v počátečním stavu tak na větvi naměříme nulové napětí. Dále pokud je DPDT relé sepnuté a zároveň některé DPST relé napojuje panel na určitou řadu, tak logicky naměříme napětí na dané řadě.

Napětí je měřeno pomocí diferenčního operačního zesilovače AD8479, který je přímo zkonstruovaný jako obvod pro přesné měření napětí. Tento IO je vhodné napájet symetrickým napětím, k čemuž slouží obvod LTC 1983-5. Před vstupem IO je ještě zařazen dělič napětí z důvodu snížení odporu mezi diferenciálními vstupy IO ( $R_{shunt}$ ). Pokud by byl vstupní odpor příliš vysoký, značně se tím naruší rovnováha napěťového děliče uvnitř IO, čímž dojde ke snížení přesnosti měření. Při hodnotě  $R_{shunt} = 1k\Omega$  je přesnost měření kolem 0.6V, proto je třeba vstupní dělič navrhnout tak, aby byl tento odpor co nejmenší a zároveň neovlivňoval výstupní hodnoty PV panelu. Výstupní analogové napětí IO je dáno rozdílem vstupních napětí:  $V_{OUT} = V(+IN) - V(-IN)$ . Zapojení externího napěťového děliče a IO je navrženo pro přesnost měření napětí na 0.1V.

Výstupní proud tekoucí z PV panelu je měřen pomocí senzoru magnetické indukce, který je umístěn ve speciálním IO LEM FHS-40P. Tento obvod je galvanicky oddělen od měřeného proudu a pracuje na principu Hallova efektu. Měří magnetické pole, které je generováno procházejícím proudem ve vodiči. Výstupní napětí obvodu je přímo úměrné velikosti snímaného magnetického pole. Měřicí rozsah obvodu je z výroby kalibrován na 3.3mT se vstupní citlivostí 600 mV/mT. Napájecí napětí je v našem případě 5V, a rozlišení výstupního napětí obvodu je  $\pm 10\text{mV}$ . Maximální výstupní napětí je 4V a je dáno velikostí indukovaného magnetického pole. Rozlišovací schopnost snímání magnetického pole a tím pádem i citlivost na snímaný proud je dána vzdáleností součástky od vodiče. Na desce s přepínacími relé je obvod umístěn tak, že nám dovoluje měřit procházející proud s citlivostí 50mA a ta je dodržena v rozsahu měření od 0A do 10A. Při překročení hranice 10A měříme proud s citlivostí pod 100mA. Správné usazení obvodu pro dosažení potřebného indukovaného pole a žádané citlivosti v celém rozsahu měření vyžaduje jisté experimentování. Teorii pro správné nastavení a použití tohoto čidla je možné čerpat z katalogového listu výrobce a dále z uvedeného odborného článku. [10]

#### 6.4 Měření teploty PV panelu

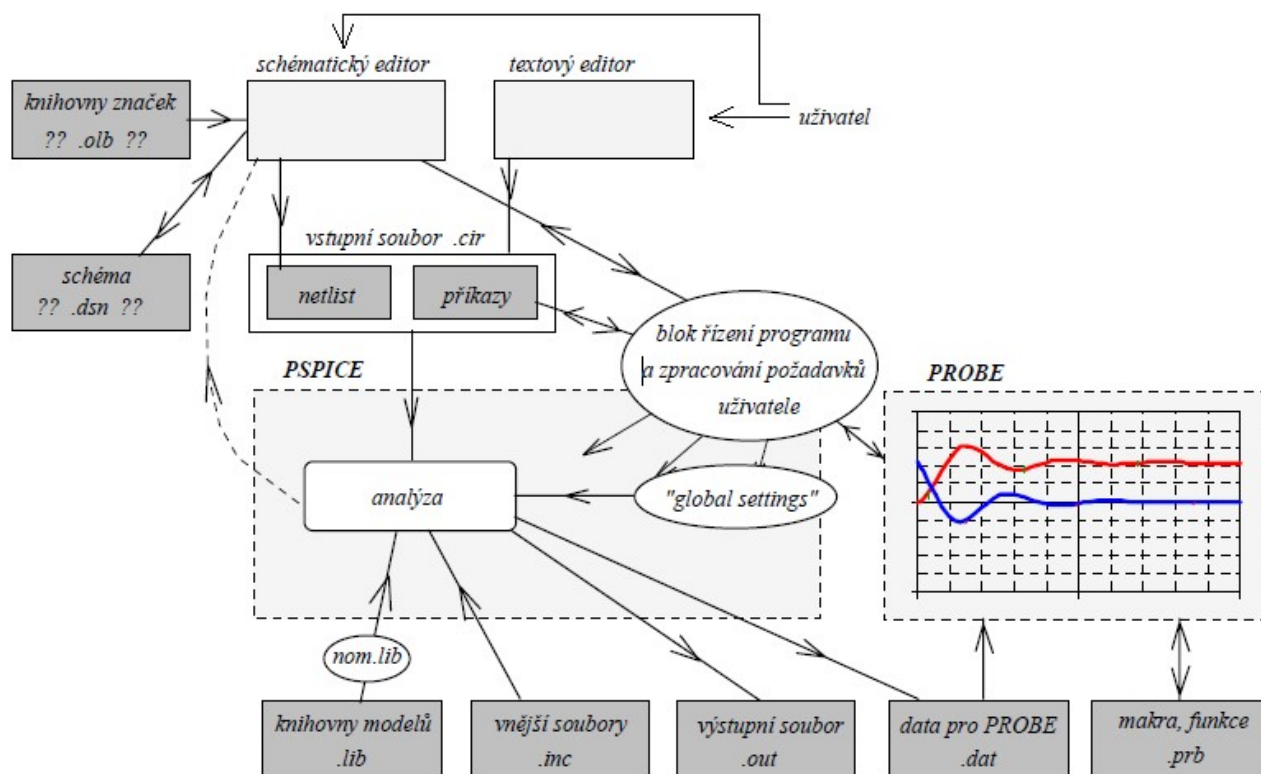
Měřením teploty PV panelu se obvykle rozumí stanovení teploty PN přechodu PV diody T junction. Měření může probíhat přímo kontaktní či bezkontaktní metodou nebo nepřímo pomocí výpočtu naměřeného napětí PV článku. Nepřímá metoda výpočtu teploty je rozumně použitelná pouze v případě, že máme možnost současně měření ozáření panelu a jeho napětí na prázdko  $V_{OC}$ . V případě částečného zastínění jednoho či více modulů panelu je tato metoda nepoužitelná. Zásadním problémem přímých metod je zajištění co nejmenšího tepelného odporu mezi senzorem teploty a PV článkem. Pro měření teploty PV panelů pole používáme teplotní senzor LM35DT integrovaný v kovovém pouzdře TO-220, který je nalepen pomocí teplo vodivé pasty do středu zadní části každého PV panelu. Tento teplotní senzor pracuje s přesností kolem  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ . Mnoho literárních zdrojů uvádí, že typický PV panel má při STC o 2 až 3  $^\circ\text{C}$  vyšší teplotu PV článku, než naměřená teplota na spodní straně panelu, proto je naměřená teplota při následném softwarovém zpracování o 2.5  $^\circ\text{C}$  navýšena. Praktická a poměrně přesná metoda stanovení teploty PV panelu spočívá ve zprůměrování teplot spodní a horní části panelu, od čehož bylo z důvodu vyšší náročnosti upuštěno.



Obrázek 29 - Umístění teplotních senzorů na středu zadní části PV panelů

## 7 Praktická část - tvorba simulačního modelu

V roce 1971 vytvořil student „University of California“, Berkeley, USA Larry Nagel program SPICE1 (SPICE = Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Program umožňoval analýzu dějů v obvodech, obsahujících zejména bipolární a unipolární tranzistory. S růstem výkonnosti počítačů PC došlo k přepisování programů na programy spustitelné na „PCčkách“ a tak vznikl standard PSpice. Dnes existuje více simulačních programů, které využívají v podstatě tři ne zcela kompatibilní standardy: SPICE2, SPICE3, PSPICE. Všechny lze rozdělit na tzv. „Spice-like“ a „Spice-compatible“ simulátory. Termínem „Spice-compatible“ se označují simulační programy, které dokáží číst standardní vstupní soubory SPICE, provádět klasické SPICE analýzy, a generovat výsledky v standardním SPICE2G.6 tvaru. Ze současných programů jsou to například PSpice, HSpice(standard SPICE3), WINSpice (standard SPICE3), MicroCap od verze IV, Multisim, LTspice, OrCAD-PSpice a další. Od roku 1997 je standard PSpice integrován v návrhářském software OrCAD. Uživatel má dvojí možnost zadávání modelu obvodu: buď prostřednictvím textového editoru (většinou zabudovaného přímo v simulačním programu), nebo prostřednictvím schematického editoru. Hlavní výhodou používání schematického editoru je větší přehlednost modelu, zejména pokud jde o složitější obvody. Výpočetní jádro PSpice je již léta v podstatě neměnné a stejně snadno použitelné pro starší i novější verze PSpice, ovšem ovládání současné verze programu OrCAD-PSpice Capture je poměrně komplikované hlavně díky schematickému editoru Capture. [11]



Obrázek 30 - Typická struktura simulačního programu založeného na jádru PSpice [11]

## 7.1 Modelování diody pomocí SPICE stejnosměrného modelu

Tabulka 1 - Defaultní hodnoty modelu diody D ve SPICE [web]

Variable	Parameter	SPICE Default Value	Units
IS	Saturation Current	1 E-14	A
RS	Resistance	0	Ω
BV	Reverse Breakdown Voltage	∞	V
IBV	Current at Reverse Breakdown Voltage	1 E-3	A
N	Emission Coefficient (η)	1	-
XT1	Saturation Current Temp. Coefficient	3	-
TT	Transit Time	0	nS
CJO	Zero Bias Junction Capacitance	0	pF
VJ	Junction Potential	1	V
M	Grading Coefficient	0.5	-
EG	Activation Energy	1.11	eV
KF	Flicker Noise Coefficient	0	-
AF	Flicker Noise Exponent	1	-
FC	Depletion Capacitance Forward Bias Coefficient	0.5	-
TNOM	Nominal Temperature	27	°C

Pomocí modelů ve SPICE se snažíme namodelovat chování panelů v celém poli. Protože se jedná o stejnosměrné zapojení, tak si v celém projektu vystačíme pouze s DC náhradními parametry modelu diody a nemusíme uvažovat další možné dostupné nastavení pro náhradní model diody. Jednoduchá rovnice, popisující DC charakteristiky diody je dobře známá jako Shockleyho rovnice:

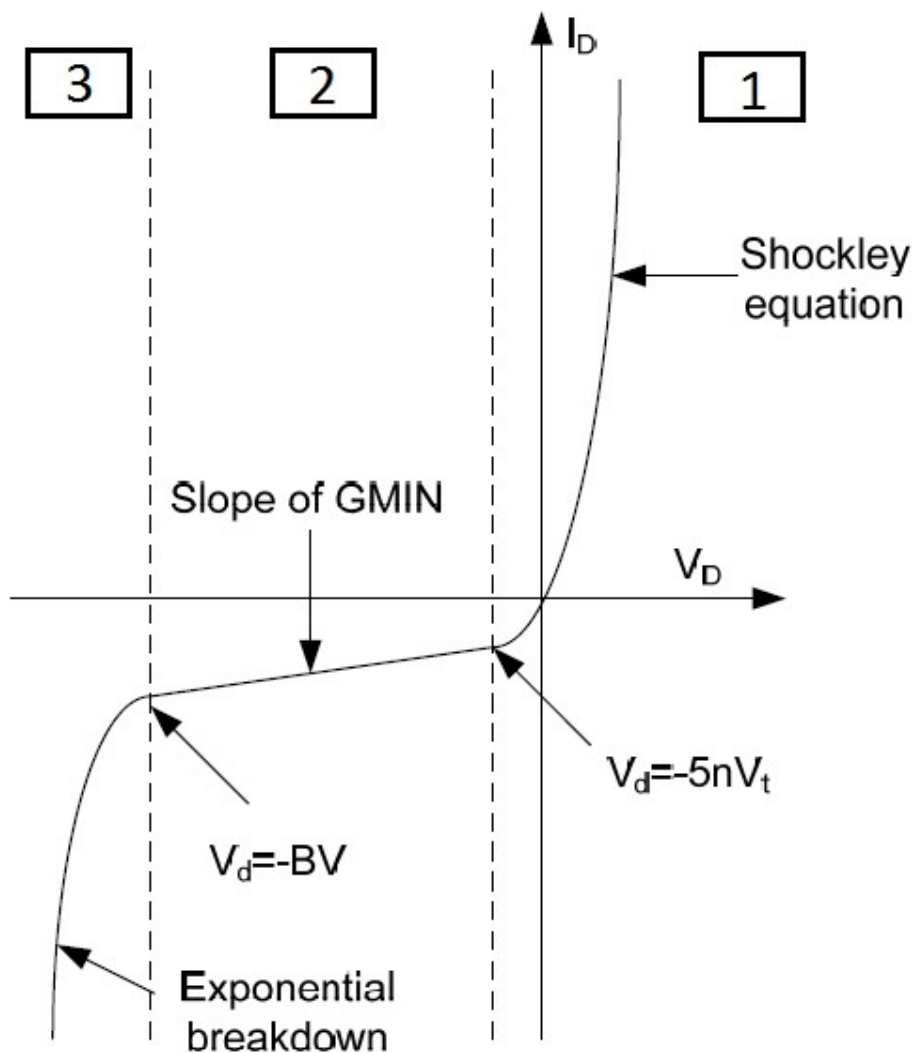
$$I_D = I_S \left[ \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (7.1.1)$$

Rovnice ve SPICE, popisující DC charakteristiky diody, je dána základním vztahem, který vychází z Shockleyho rovnice. K tomu se navíc přidávají parametry  $n$  - diode ideality factor, neboli emisní koeficient a dále paralelní vodivost  $G_{MIN}$ .

$$I_D = I_S \left[ \exp\left(\frac{V_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] + V_D \cdot G_{MIN} \quad (7.1.2)$$

SPICE má implementovanou I-V charakteristiku, která se dá rozdělit na 3 hlavní části. První část je popsána výše uvedenou SPICE rovnicí pro diodu. Z důvodu zrychlení simulace, za podmínek kdy je napětí diody  $V_D < -5.n.V_T$ , SPICE používá předpoklad, že proud procházející přes P-N přechod je rovný saturačnímu proudu  $I_S$ . Proto je do náhradního modelu zakomponovaná složka  $G_{MIN}$ , která umožňuje výpočetním algoritmům SPICE v této druhé části konvergovat k řešení. Ve třetí části, po proražení diody je proud procházející diodou vypočítáván z rovnice, která obsahuje údaj **BV**, což značí hodnotu průrazného napětí (break down voltage).

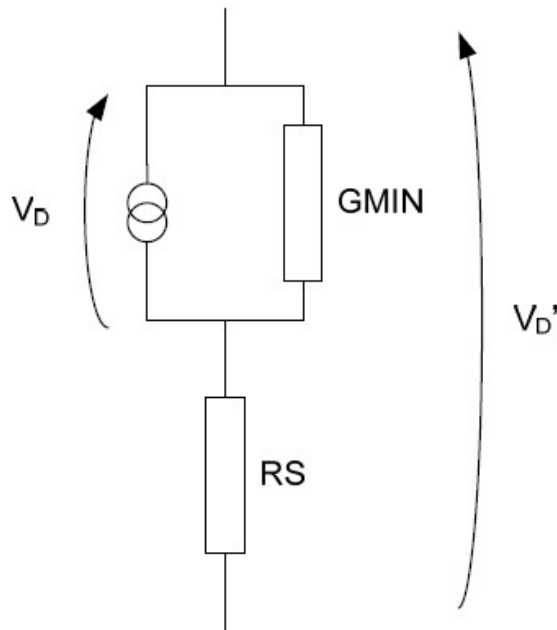
$$I_D = -I_S \left[ \exp\left(\frac{BV + V_D}{V_T}\right) - 1 + \frac{BV}{V_T} \right] \quad (7.1.3)$$



Obrázek 31 - Stejnoseměrná I-V charakteristika modelu diody ve SPICE [12]

U náhradního SPICE DC modelu diody je ještě přidán sériový rezistor  $R_S$  pro možnost simulace odporu přívodních vodičů a odporu kontaktů diody. Kompletní náhradní stejnosměrný model diody je zobrazen níže a napětí na diodě  $V_D'$  je dáno rovnicí:

$$V_D' = V_D + I_D * R_S \quad (7.1.4)$$



Obrázek 32 - Stejnosměrný náhradní DC SPICE model diody [12]

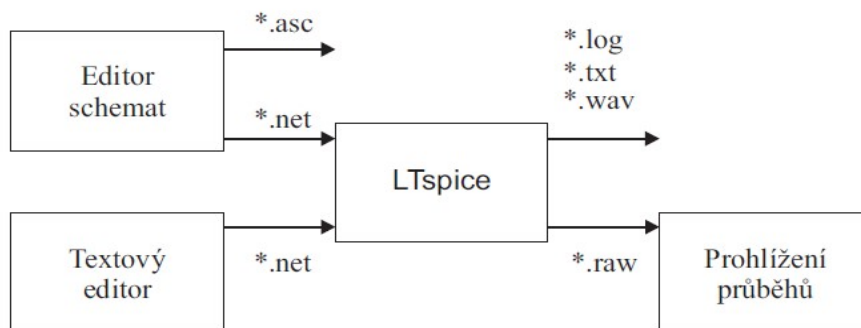
Souhrnně lze tedy napsat, že nejdůležitější parametry pro modelování stejnosměrné charakteristiky diody v simulátoru SPICE jsou:

- $I_S$  ( $I_S$ ) – saturační proud [A]
- $R_S$  ( $R_S$ ) – ohmický odpor vodičů a kontaktů diody [ $\Omega$ ]
- $N$  ( $n$ ) – emisní koeficient diody (ideality diode factor) [-]
- $BV$  – Průrazné napětí diody [V]
- $IBV$  – Proud při záporném průrazném napětí diody [A]

Pomocí těchto parametrů lze ve SPICE kompletně popsat stejnosměrnou statickou charakteristiku polovodičové diody. [12]

## 7.2 Simulace v programu LTspiceIV

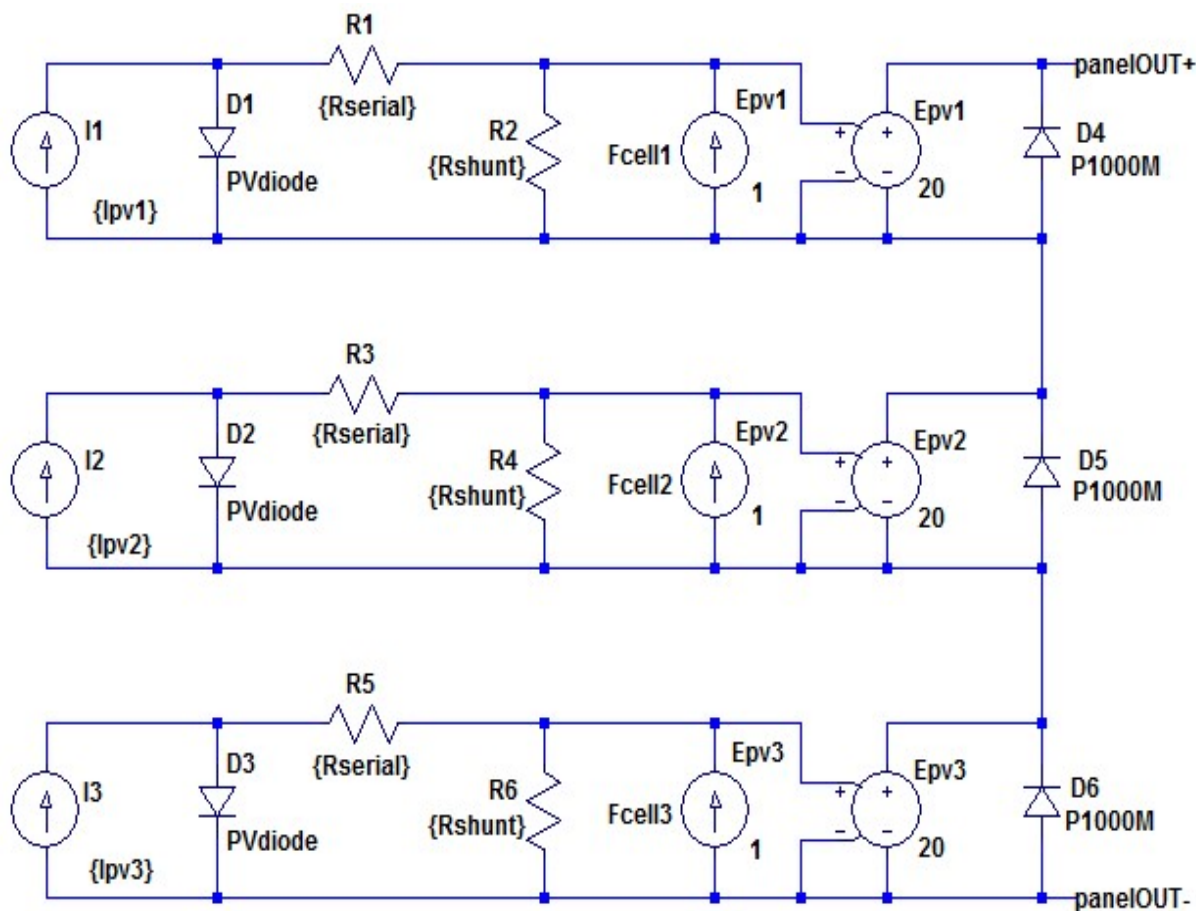
LTspice je „spice-compatible“ freewarový program založený na standardu SPICE3. Program je volně stažitelný na stránkách firmy Linear Technology. Program se skládá ze tří hlavních částí: grafického editoru schémat, vysoce výkonného spice simulátoru nazvaného LTspice a postprocesoru pro vizualizaci výsledných průběhů v simulovaných obvodech. Procesor jazyka LTspice zpracovává vstupní soubor (netlist), který obsahuje popis obvodu a příkazy pro řízení simulace. Vstupní soubor je textový soubor s příponou .net. Výhodou LT spice je to, že vstupní soubor pro simulaci je možné vytvořit v libovolném textovém editoru. Komerční PSpice editory obsahují editor schémat, který je pro uživatele, v případě tvorby rozsáhlejšího modelu, více přehlednější. Vždy je však možné na základě grafických podkladů vygenerovat podklad pro simulační preprocesor Spicu (LTspicu). Procesor PSpicu vytváří textový soubor (.log), který obsahuje kopii vstupního souboru (netlistu), dále informace o chybách ke kterým došlo během výpočtů a v omezeném rozsahu i výsledky simulací. Dále procesor LT spicu vytváří binární soubor (s příponou .raw), který obsahuje všechny požadované výsledky. Tento soubor může být zpracován vhodným programem pro prohlížení výsledků. Přestože všechny tři moduly jsou v programu LTspice zahrnuté do jediného spustitelného souboru, lze s nimi do jisté míry pracovat nezávisle. Podklady pro procesor jazyka LTspice lze připravit ve formě textového souboru, bez nutnosti využití grafického editoru schémat. Potom je možné program LTspice spustit v dávkovém režimu, kdy vstupem i výstupem jsou textové soubory. [13]



Obrázek 33 - Struktura simulačního programu LTspiceIV [13]

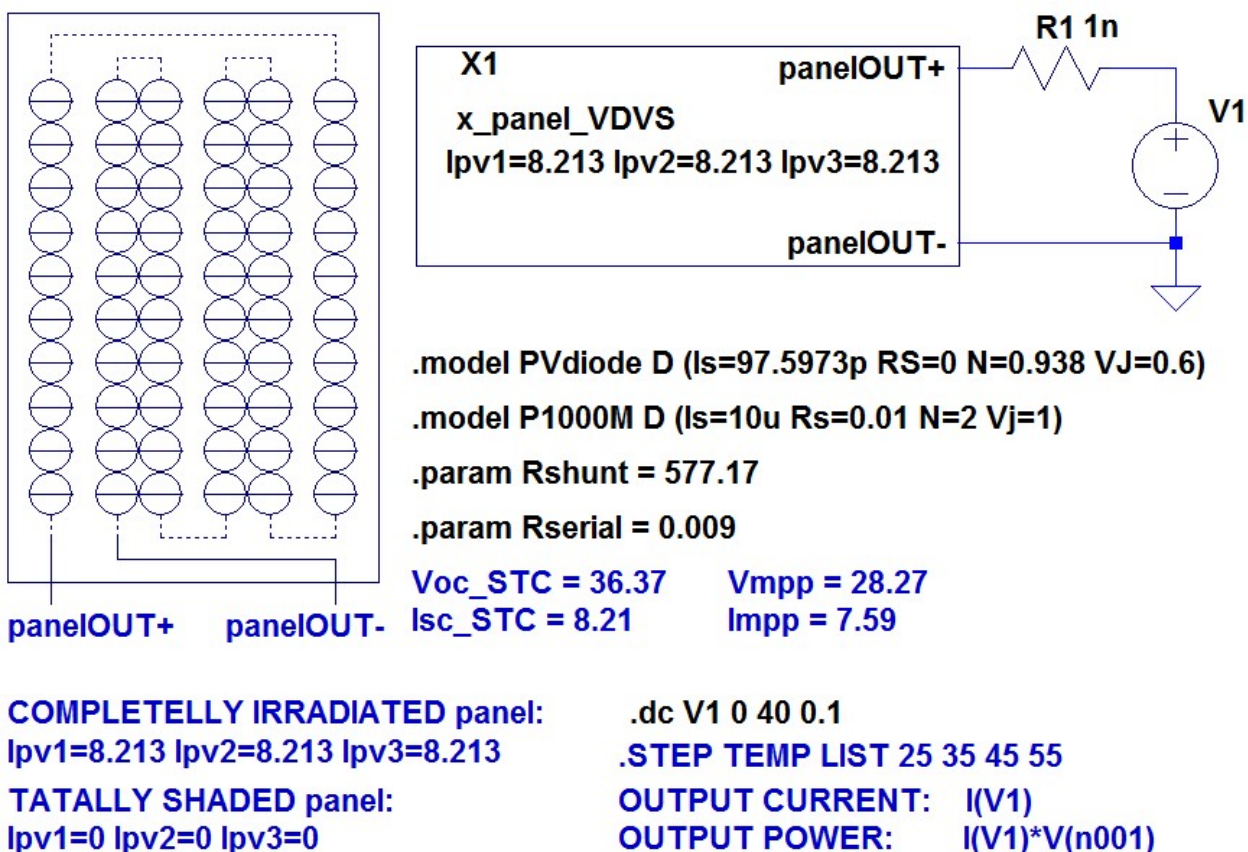
V projektu rekonfigurátor 1.0 se zpočátku pracovalo s programem LTspice a to hlavně z toho důvodu, že se jedná o freewarovou volně šířitelnou verzi. Návrh náhradního obvodu pro PV panel byl vytvořen velice jednoduše a funkčně jako podobvod s parametry, který byl následně 12x umístěn do schématu a dosáhlo se tak možnosti simulace celého fotovoltaického pole. Jediná nevýhoda, proč se od použití tohoto software upustilo, byla ta,

že v následné simulaci nebylo možné nastavit vstupní simulační parametry tak, abychom mohli měnit parametry (hlavně teploty) PV diod jednotlivých panelů. Znamenalo to tedy simulaci celého pole při jedné stejné teplotě TEMP, což je však v reálné situaci nemožné, neboť při zastínění panelu dochází k poklesu teploty a tím pádem i k významným změnám jeho charakteristik a dále ke změnám výstupních charakteristik celého pole. Z důvodu tohoto omezení by nebylo dále možné dosáhnout reálných výsledků, které se ve skutečnosti na PV poli naměří a přešlo se tedy k použití jiného software, který nastavení parametrů jednotlivých diod umožňuje simulovat. Nefunkčnost simulace v LTspice je však stále otevřená téma, neboť LTspice pracuje se simulačním jádrem na bázi SPICE, které by se mělo chovat ve všech programech stejně. Odlišnost je však v tom, že LTspice používá vlastnoručně vyvinuté vysoce výkonné simulační jádro nazvané LTspice a je tedy možné, že z důvodu zvýšení rychlosti a nabízení tohoto software jako freeware jsou některé funkce, především definice odlišných teplot různých součástek ve výpočetních algoritmech eliminovány. Po vypracování modelu v Orcad Capture a propojení s Matlab Simulinkem pomocí SLPS interface je celá problematika simulace pomocí SPICE simulátorů lépe zmapovaná. Do budoucna se počítá s vyřešením tohoto problému, vytvořením nových uživatelských knihoven, případně tvorbou nových modelů PV diod tak, aby bylo možné použít tento freeware software pro simulaci celého pole.

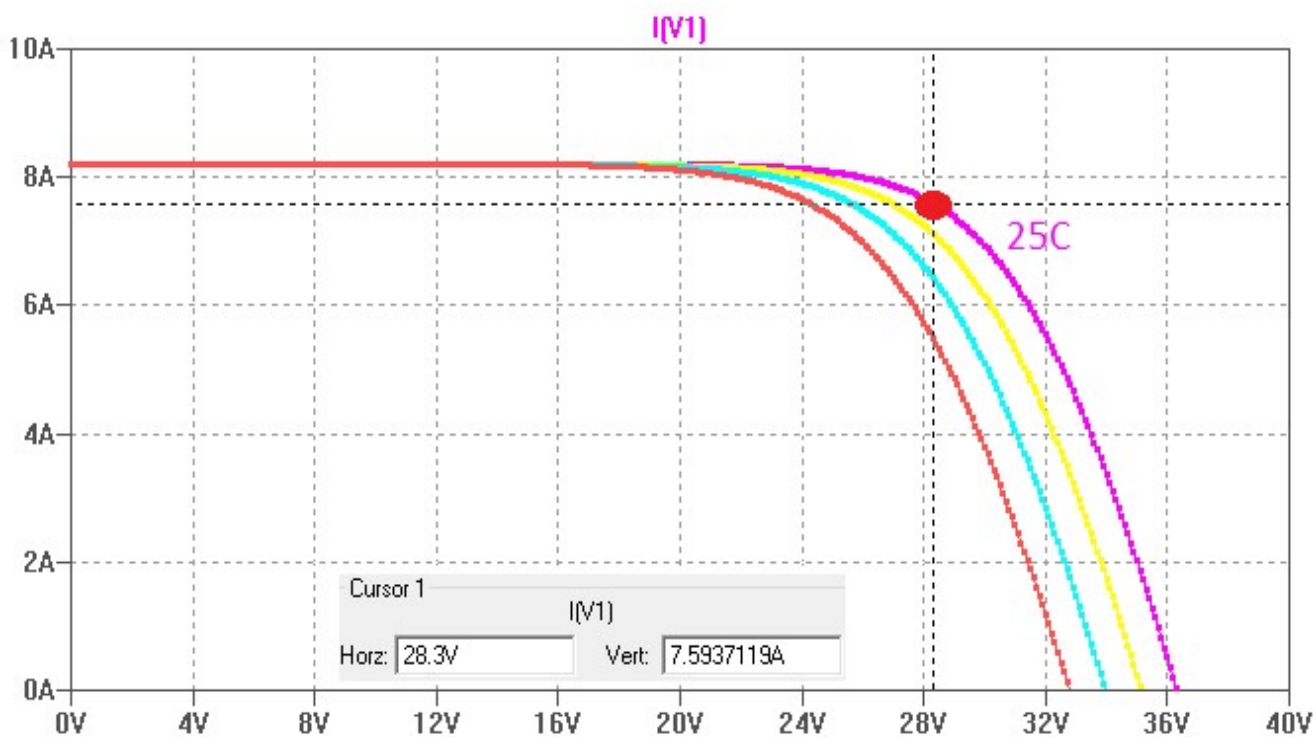


Obrázek 34 - Simulační schéma PV panelu v editoru schémat LTspiceIV

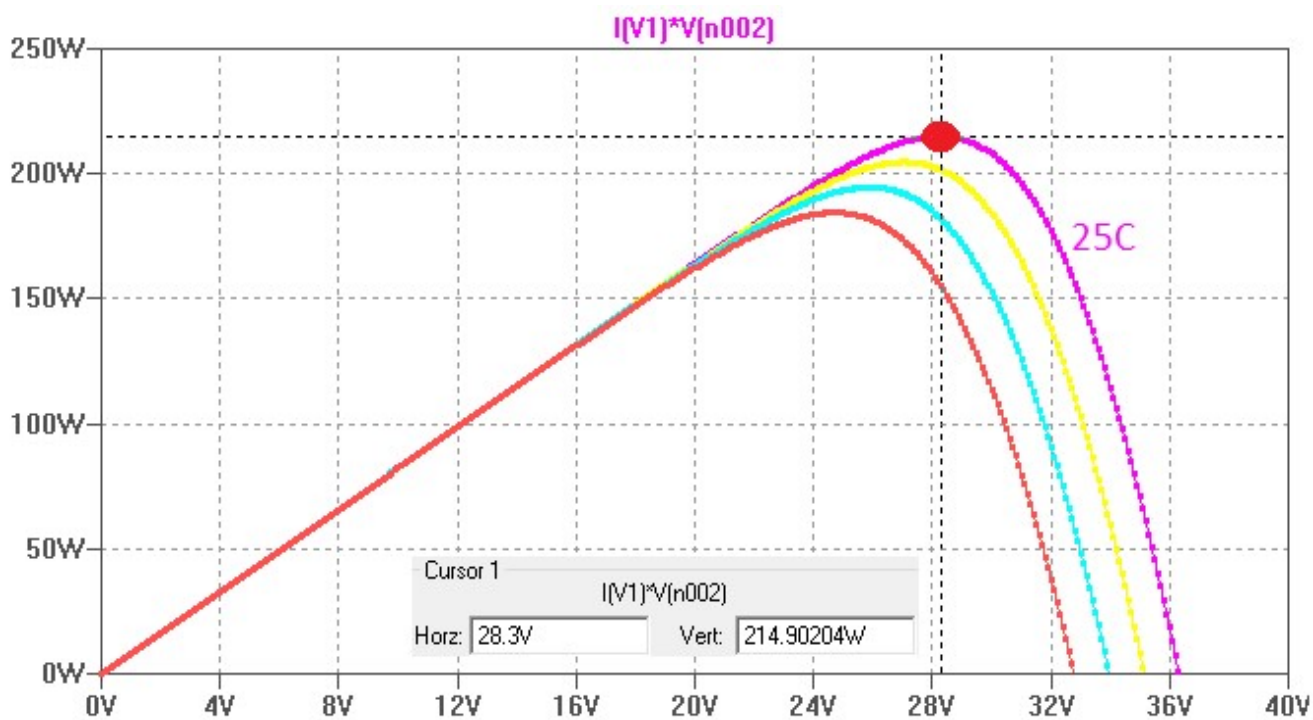
Jak je vidět ze simulačního schéma zapojení výše, každý PV panel je tvořen třemi bloky, které představují jednotlivé moduly panelu. V našem případě se panel skládá ze 3 modulů, jenž obsahují 20 sériově zapojených PV článků (PV cell). Sériovým spojením těchto třech modulů je pak tvořen celý panel, který dohromady čítá 60 sériově spojených PV článků. Každý modul je navíc překlenut ByPass diodou, pro možnost průchodu proudu v případě zastínění daného modulu. Základní myšlenka tohoto modelu je použití 5-ti parametrového modelu PV článku, který je 20x seriově zapojen v každém modulu. Průchod proudu všemi PV články v modulu je vždy stejný, sériovým zapojením se násobí napětí, proto je v simulačním modelu použit napěťový zdroj řízený napětím se zesílením 20x ( $E_{pv}$ ) a pro možnost simulace průchodu proudu je zde zapojen jako proudové zrcadlo (zesílení 1x) lineárně závislý zdroj proudu ( $F_{cell}$ ). Takto vytvořený model nám značně zjednodušuje celé zapojení v simulátoru SPICE a snižuje množství použitých součástek. Hodnoty součástek simulačního modelu byly nastaveny na základě vypočítaných hodnot pěti parametrového modelu popsaného v teorii této práce. Paralelní odpor  $r_{shunt} = 570.2\Omega$ , sériový odpor  $r_{serial} = 0.009\Omega$ , saturační proud  $I_s = 100pA$ , ideální diodový faktor  $N = 0.938$  a napětí PN přechodu  $V_j = 0.6V$ . Ostatní SPICE parametry jsou ponechány v základním nastavení dle standardního modelu diody. Parametry ByPass diody P1000M byly nastaveny podle hodnot získaných z katalogového listu výrobce.



Obrázek 35 - Nastavení simulace PV panelu v programu LTspiceIV



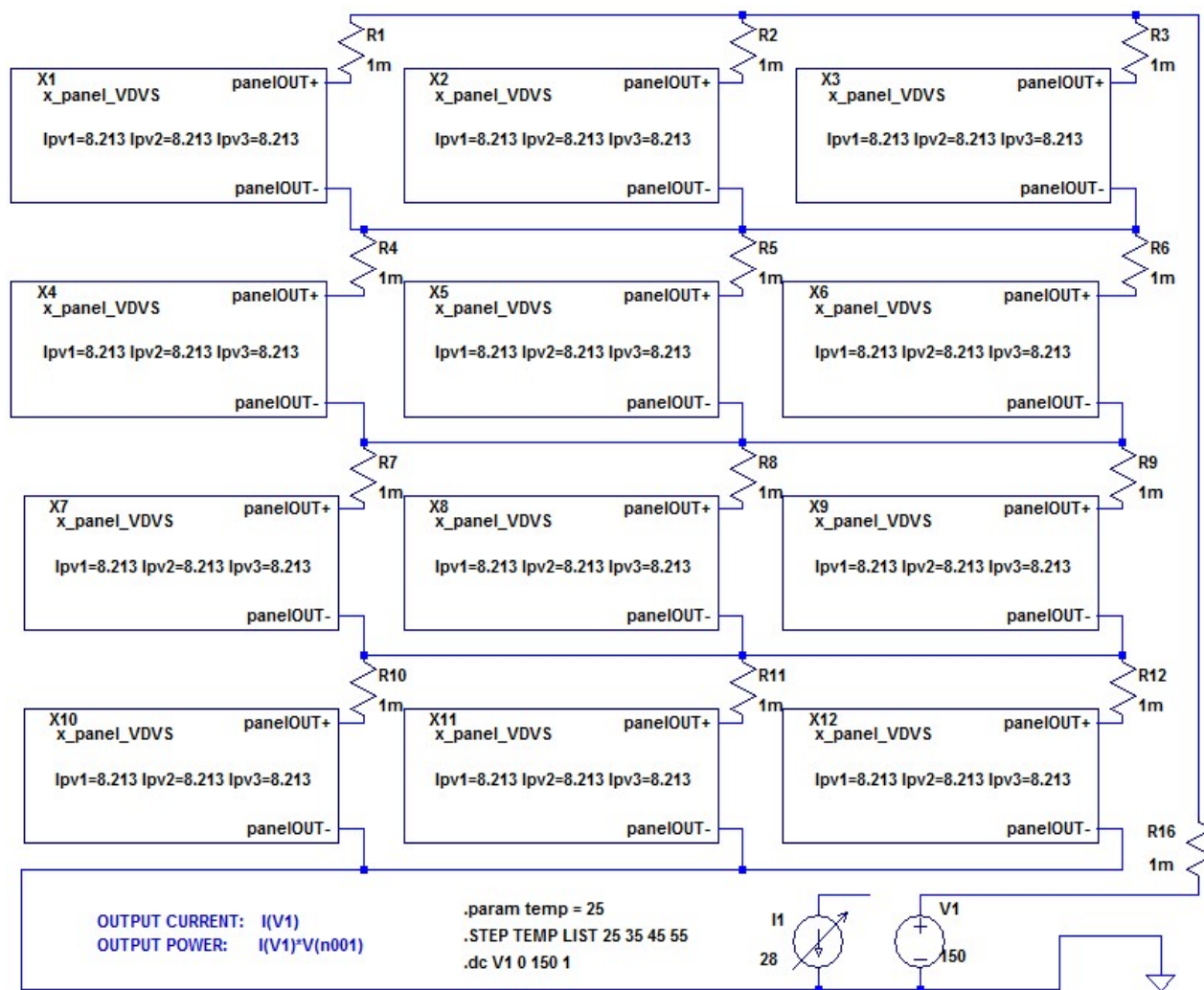
Obrázek 36 - I-V charakteristika PV panelu při STC - simulace v programu LTspiceIV



Obrázek 37 - P-V charakteristika PV panelu při STC - simulace v programu LTspiceIV

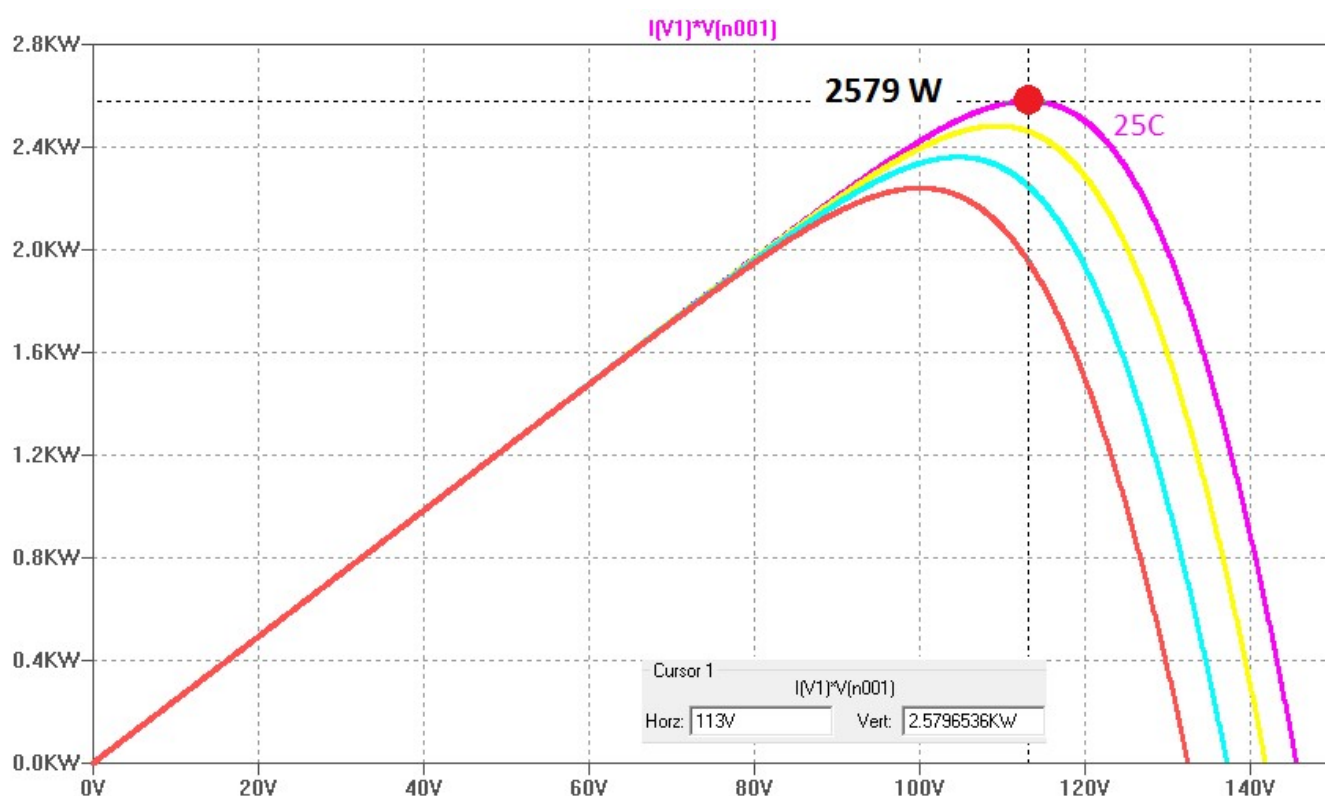
I-V a P-V charakteristiky nasimulované pomocí programu LTspice jsou shodné s technickými údaji na panelu, které udává výrobce. Při teplotě 25 °C dosahuje panel maximálního výkonu 215W při hodnotách  $V_{mpp}$  a  $I_{mpp}$ , které plně korespondují s parametry udávané výrobcem panelu. Takto vytvořený model tedy můžeme při ideálních podmínkách považovat za věrohodný. Z grafů je rovněž vidět pokles výkonu na základě snížení napětí P-N přechodu PV diod při zvýšení operační teploty.

Níže je zobrazené schéma zapojení celého PV pole, které potřebuje simulovat. Celkem 12 solárních PV panelů je zde zapojeno v základní TCT konfiguraci 3x4. Do zapojení bylo potřeba přidat pomocné rezistory, aby se nepřekrývaly výstupní uzly z panelů a dále také aby bylo možné pomocí sondy měřit výstupní hodnoty z každého panelu. Pro nalezení MPP se zvolí DC analýza, kdy se rozmítá napěťový zdroj V1 od 0V do 150V. Takto vytvořený model celého pole nám poskytuje základní přehled o tom, jaké jsou napěťové a proudové podmínky celého pole při definovaném zastínění, které můžeme simulovat pomocí nastavení hodnot  $I_{pv}$  proudů, jednotlivých modulů v panelech.



Obrázek 38 - Simulační zapojení PV pole (12 panelů 3x4 TCT) v editoru schémat LTspiceIV

Uvedené schéma zapojení PV pole s definovanými hodnotami  $I_{pv}$  proudů a dále níže zobrazený výstupní graf je pro případ nejlepších možných podmínek, kdy nám je schopné pole produkovat maximální výstupní výkon 2580W (12x 215W). V grafu je MPP PV pole označen červeným zvýrazněním. Takto dosažené hodnoty jsou nasimulované při teplotě 25 °C a  $I_{pv}$  proudu 8.213A, což odpovídá ozáření 1000 W/m<sup>2</sup>. V reálné situaci však může dojít i k vyššímu ozáření (na úkor zvýšené teploty) nebo pravděpodobněji k nižšímu ozáření. Obecně lze říci, že tyto simulované podmínky jsou nereálné a PV pole nikdy nedosahuje takového výstupního výkonu.



Obrázek 39 - P-V charakteristika PV pole 3x4 TCT - simulace v programu LTspiceIV

Z již dříve popsaných důvodů, hlavně kvůli nemožnosti simulace celého pole s odlišnými definicemi teplot jednotlivých panelů, bylo od simulačního programu LTspice upuštěno a dále byl vyvíjen propracovanější simulační model v programu OrCAD-Capture / OrCAD-PSpice. Z tohoto důvodu zde nejsou zobrazeny ani další dokončené materiály a výsledky simulací různých zastínění dosažené pomocí LTspiceIV. Veškeré zdrojové soubory a výsledné grafy jsou obsaženy v elektronické příloze této práce.

### 7.3 SPICE simulační model v programu OrCAD-Capture / OrCAD-PSpice

Na začátku tohoto bloku je třeba podotknout, že rozhodnutí simulovat celé PV pole a přepínací matici rekonfigurátoru pomocí programu OrCAD-PSpice padlo hlavně na základě možnosti propojení s Matlabem díky „third-part,, interface SLPS. Pomocí tohoto modulu je možné provádět kosimulaci mezi OrCAD-PSpice a programem Matlab, konkrétně rozhraním Simulink. Takováto sestava software nám umožňuje simulovat elektronické obvody pomocí jádra SPICE, při možnosti nastavování parametrů a zpracovávání výsledků v Matlabu. I přes nespočet nepředvídatelných a nikde nezmíněných komplikací s nastavením SLPS interface byl simulátor nakonec úspěšně dokončen a díky velké univerzálnosti a možnostem nastavení představuje výkonný simulační nástroj pro daný nelineární problém chování celého PV pole a použití při návrhu nového algoritmu rekonfigurátoru. Použití OrCAD-PSpice simulačního programu je dáno také tím, že od verze 9 je tento program dodáván s novým editorem Capture, který umožňuje vytvořit jak samostatně použitelné schéma, tak zejména připravit popis obvodu v jazyku SPICE, tzv. netlist, pro následnou analýzu v programu OrCAD-PSpice. Nejedná se sice o jednoduchý nástroj, takový jaký je LTspiceIV, ovšem díky tomuto propracovanému editoru a dalším navazujícím programům je možné detailně nastavovat parametry simulace. Následující části práce obsahují popis vytvoření projektu a veškerých přidružených souborů včetně kompletního návrhu simulátoru. Celý projekt simulačního modelu je vytvořen v programu Cadence OrCAD-Capture, verze 16.6.00.

Pomocí SPICE modelu je zapotřebí simulovat výstupní výkon celého PV pole složeného z 12-ti panelů a dále také chování jednotlivých panelů při různém zapojení. Z důvodu snížení celkového výstupního výkonu, při náhodném zastínění panelů, je třeba provést rekonfiguraci panelů za účelem optimalizace výkonu. Abychom mohli ve SPICE modelu simulovat různé konfigurace panelů, tak je součástí schéma také rekonfigurační přepínací matice (switching matrix), která je navržena pomocí napěťově řízených spínačů, jejichž parametry je možné definovat ve vstupním includovaném souboru „*relaystatesconfig.inc,,*“. Pro možnost simulace odlišných teplot jednotlivých panelů byla vytvořena knihovna „*RECONFIGURATOR.lib,,*“ s dvanácti nadefinovanými modely PVdiod. Tyto modely jsou parametricky naprosto shodné, až na měnící se parametry  $T_{ABS}$ , pomocí kterých můžeme nastavit ve SPICE modelu diody přesnou hodnotu teploty polovodičového přechodu P-N. V každém panelu je pak použit jiný model diody, přičemž pomocí vytvořeného skriptu v Matlabu je možné provádět změny hodnot parametrů  $T_{ABS}$  před začátkem každé simulace. Pro možnost simulace různého ozáření jsou jednotlivé moduly panelů řízeny zdroji, jejichž hodnota je definovaná v includovaném souboru „*ipvconfig.inc,,*“ který je možné před začátkem každé simulace pomocí skriptu v Matlabu modifikovat. Simulátor rovněž includeje soubor „*parameters.inc,,*“ ve kterém jsou definované parametry náhradního modelu PV článku a další potřebné parametry simulace. Celý simulační model je tedy navržen tak, aby bylo možné definovat vstupní proměnné hodnoty simulace pomocí parametrů, které jsou definovány v includovaných souborech, jež mohou být modifikovány pomocí skriptů v Matlabu.

### 7.3.1 OrCAD-Capture: Práce s projekty a organizace simulačních souborů

Základem práce s editorem Capture je projekt, který v sobě zahrnuje všechny soubory vztahující se k analyzovanému obvodu (schéma, simulační profily, lokální knihovny, includované soubory, netlist, výstupní simulační soubory). Každému projektu by měl odpovídat samostatný adresář na disku. V tomto případě je projektový adresář umístěn v *D:\PHOTOVOLTAICS\RECONFIGURATOR\*. Pokud se bude spouštět simulační nástroj na jiném PC, je třeba respektovat toto defaultní umístění projektového adresáře, neboť vytvořené podobvody, knihovny a includované soubory jsou v projektu a ve všech dalších navazujících funkcích definovány s pevnou absolutní adresou a v případě přesunutí projektového adresáře simulátor PSpice nenajde definice parametrů součástek.

This PC > DATA (D:) > PHOTOVOLTAICS > RECONFIGURATOR			
Name	Date modified	Type	Size
reconfigurator-PSpiceFiles	06.05.2016 16:05	File folder	
RECONFIGURATOR.DSN	26.04.2016 11:06	Data Source Name	3 652 KB
reconfigurator.opj	26.04.2016 15:49	OPJ File	8 KB

This PC > DATA (D:) > PHOTOVOLTAICS > RECONFIGURATOR > reconfigurator-PSpiceFiles			
Name	Date modified	Type	Size
MAINBOARD	30.04.2016 15:51	File folder	
DPDT.OLB	21.04.2016 16:43	OLB File	7 KB
DPST.OLB	21.04.2016 16:43	OLB File	7 KB
reconfigurator.ind	05.05.2016 0:44	IND File	4 KB
RECONFIGURATOR.lib	05.05.2016 0:44	PSpice Model Libr...	2 KB

This PC > DATA (D:) > PHOTOVOLTAICS > RECONFIGURATOR > reconfigurator-PSpiceFiles > MAINBOARD			
Name	Date modified	Type	Size
tran	30.04.2016 18:41	File folder	
MAINBOARD.ALS	26.04.2016 11:11	ALS File	648 KB
MAINBOARD.net	26.04.2016 11:11	PSpice Netlist File	259 KB
MAINBOARD_sch.prp	26.04.2016 11:11	wrfile	1 532 KB
tran.sim	25.04.2016 14:07	PSpice Simulation...	2 KB

This PC > DATA (D:) > PHOTOVOLTAICS > RECONFIGURATOR > reconfigurator-PSpiceFiles > MAINBOARD > tran			
Name	Date modified	Type	Size
ipvconfig.inc	28.04.2016 2:05	INC File	1 KB
parameters.inc	27.04.2016 17:00	INC File	1 KB
relaystatesconfig.inc	28.04.2016 2:05	INC File	2 KB
tran.1OP	26.04.2016 11:12	1OP File	185 KB
tran.cir	26.04.2016 11:12	PSpice Circuit File	1 KB
tran.dat	26.04.2016 11:12	DAT File	31 091 KB
tran.mif	26.04.2016 11:12	MIF File	2 KB
tran.mrk	27.04.2016 0:07	MRK File	1 KB
tran.out	26.04.2016 11:12	PSpice Simulati...	361 KB
tran.prb	26.04.2016 11:13	PRB File	1 KB

Obrázek 40 - Struktura projektového adresáře v OrCAD-Capture – projekt reconfigurator

Po spuštění editoru Capture byl vytvořen nový čistý projekt ze šablony Analog or Mixed A/D s názvem „*reconfigurator.opj*„. Lokace projektu byla nastavena do již dříve zmíněného defaultního adresáře. Popis kreslení schéma a vytvoření veškerých přidružených souborů by vydalo na další obsáhlou kapitolu, což ovšem není cílem této práce. Dále se omezíme pouze na popis v tom smyslu, jak je model hierarchicky navrhnutý a jak funguje. Zmíněny jsou také veškeré nutné zásady pro návrh obvodu v editoru OrCAD-Capture pro následnou kompatibilitu s interfacem SLPS. [14]

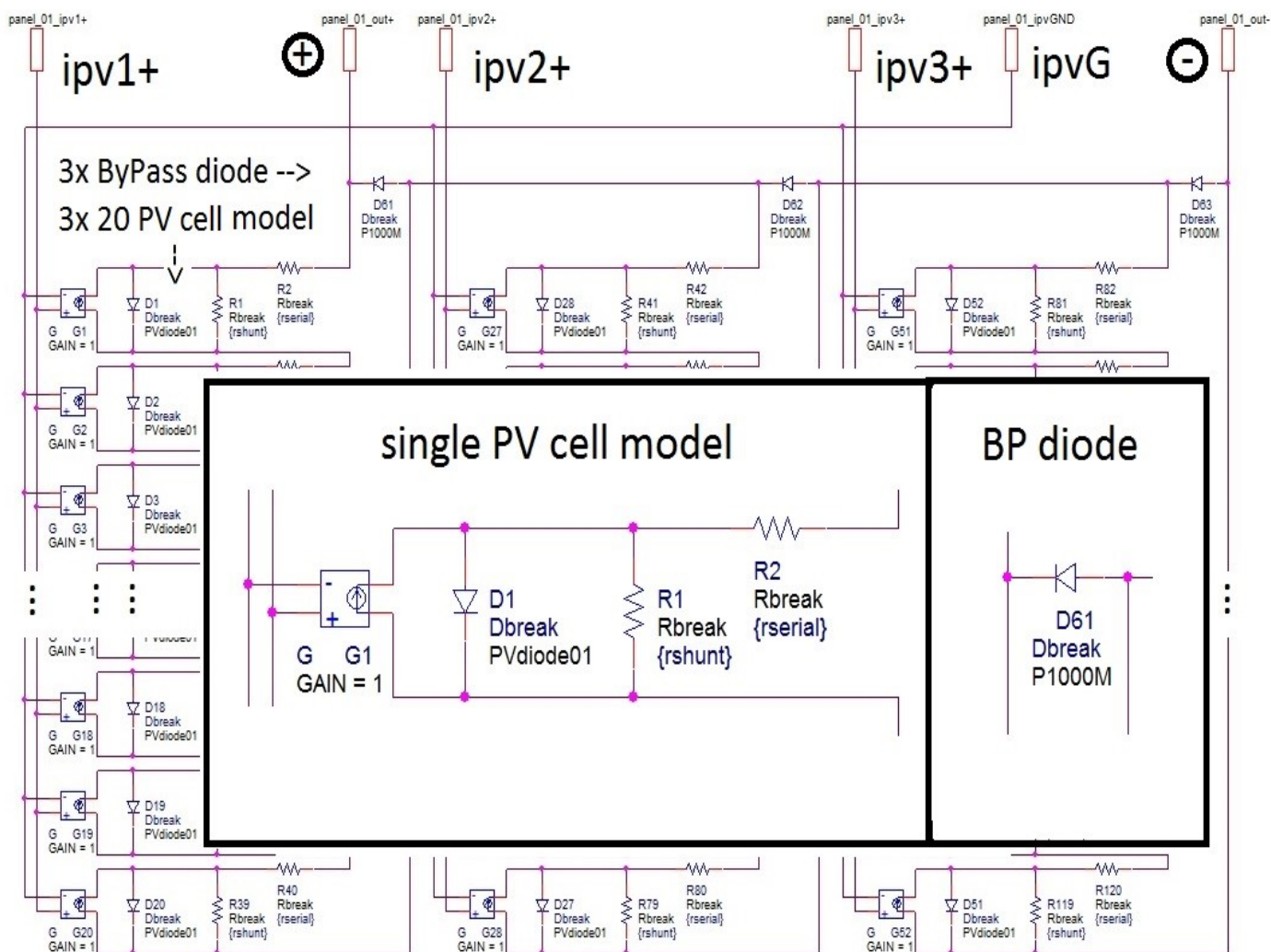
V projektu je pomocí editoru zakresleno celkem patnáct různých schémat. Dvanáct z nich je pro PV panely, přičemž v každém tomto schématu je použitý jiný model PV diody. Pro panel 01 je použit model PVdiode01, pro panel 02 model PVdiode02 atd. Schémata panelů jsou navržena jako hierarchické bloky a jsou pomocí hierarchických portů propojeny s hlavním schématem. Dále zde jsou schémata DPDT a DPST relé, z nichž jsou vytvořeny podobvody. Hlavní schéma celého modelu (root schéma) má název „*MAINBOARD*„ a je zde zakresleno všech 12 panelů jako bloky řízené napětovými zdroji, kompletní rekonfigurační přepínací matice, kde jsou relé řízeny rovněž pomocí napětových zdrojů a dále řídicí napětové zdroje pro simulaci a nastavení zátěže.

Návrh simulačního modelu v editoru OrCAD-Capture by měl být co nejjednodušší z důvodu vzájemné kompatibility s interfacem SLPS. Níže jsou uvedeny některé důležité poznatky, které byly při návrhu objeveny. Veškeré součástky, které chceme jakýmkoliv způsobem upravovat (nové modely diod, jiné teplotní koeficienty u rezistorů atd.) je nutné použít z knihovny „*BREAKOUT*„, která obsahuje součástky s prázdnými modely, které jsou určeny k uživatelské úpravě. Do schématu umístíme novou diodu z knihovny „*BREAKOUT*„, u které zvolíme možnost „*Edit PSpice Model*„. Ve spuštěném model editoru zvolíme nový model vytvořený ze křivek a nadefinujeme nový model pro By Pass diodu (.model P1000M D Vj=1 Is=10e-6 N=1 Rs=0.01 TT=0 Cjo=10e-12) a dvanáct nových modelů pro PV diody (.model PVdiode01 D Vj=0.6 Is=9.75973e-11 N=0.938 Rs=0.00 Eg=1.124 T\_ABS=25) a modely uložíme. Model editor automaticky vytvoří novou knihovnu „*RECONFIGURATOR.lib*„, kterou uloží do projektového adresáře. Při vytváření nových modelů NESMÍME tvořit model ze šablony „*TEMPLATE*„, neboť takto vytvořený model dále nelze editovat v jednoduchém textovém formátu. Dále je třeba použít pouze stejnosměrné zdroje VDC z knihovny „*SOURCE*„. V případě tranzientní analýzy se řídicí kontrolní zdroj nakonfiguruje na požadovaný časový průběh. Z důvodu překrývání uzlů je třeba mezi hierarchickými bloky použít offset rezistory. Tyto rezistory fungují ve schématu jako pomocné oddělovací offset rezistory a také mají vhodné využití, neboť se pomocí nich simuluje odpor vodičů od panelů. Také se musí dbát na to, aby ve schématu nebyl ponechaný žádný volný vývod součástky. PSpice požaduje, aby každý uzel měl definovanou stejnosměrnou cestu k referenčnímu uzlu 0. Z toho vyplývá, že alespoň jeden uzel obvodu musí být referenční, definovaný značkou 0 (důležité je jméno “0“).

### 7.3.2 OrCAD-Capture: Simulační schéma PV panelu

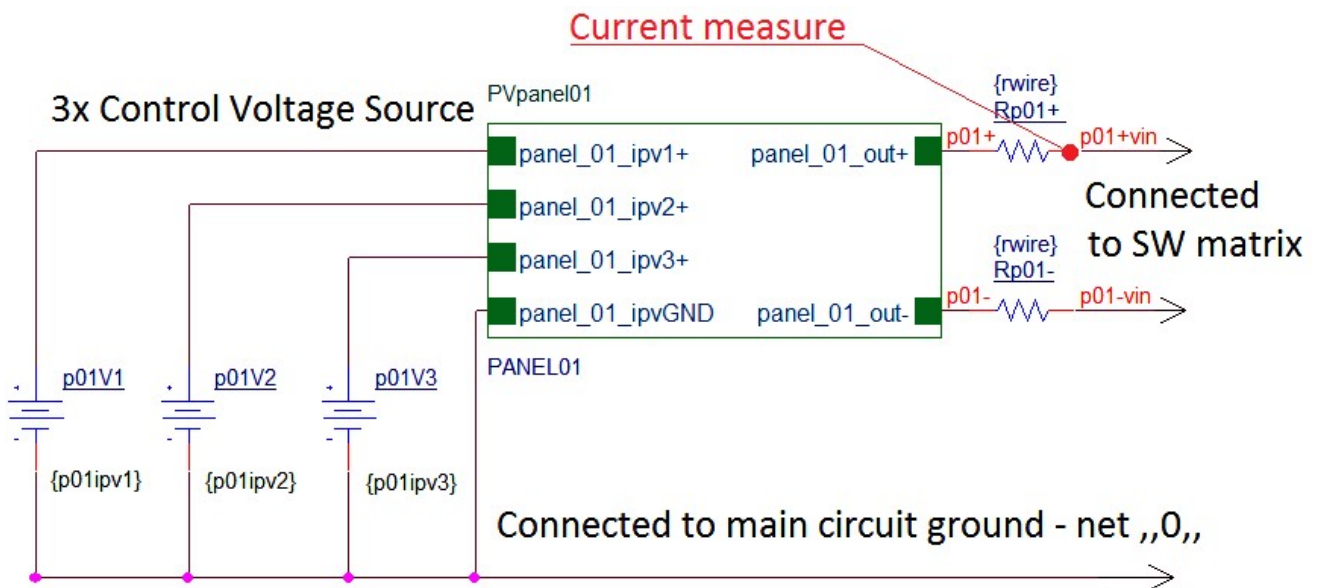
PV panel je tvořen sériovým spojením třech modulů s 20-ti monokrystalickými PV články, přičemž každý modul je překlenut ByPass diodou. Pro simulování zastínění stačí měnit proud  $I_{pv}$  každého modulu, čímž simulujeme zastínění. Pokud je daný modul zastíněný, případně ozářený menším světelným výkonem, tak proud procházející všemi dvaceti články je menší než u modulu, který je plně ozářen. Protože PV panel obsahuje tři moduly, je model navrhnutý tak, abychom mohli nastavit generovaný proud u každého modulu, neboť všemi články modulu prochází vždy stejný proud. Pro simulování proudu  $I_{pv}$  je v tomto případě použit behaviorální lineárně řízený zdroj G. Jedná se o napětím řízený zdroj proudu, jehož průběh výstupní veličiny závisí na průběhu vstupní veličiny. To znamená, že tento zdroj nám dodává do obvodu proud v [A] o stejné velikosti jako je hodnota napětí na vstupu ve [V]. Jeden modul je tedy tvořen dvaceti sériově spojenými náhradními modely PV článku, které jsou všechny řízeny behaviorálními zdroji G, jenž jsou napojeny na stejný napěťový řídicí zdroj. Panel má 4 vstupy pro možnost nastavení proudů v jednotlivých modulech. První vstup je společná zem pro všechny behaviorální zdroje G a další 3 vstupy jsou pro napojení řídicích napěťových zdrojů. Záporný pól všech závislých behaviorálních zdrojů G všech panelů musí být v simulačním modelu napojen z důvodu správné funkce na společnou zem modelu, tedy hlavní zemnicí uzel 0. Pokud chceme simulovat plně ozářený panel, je třeba nastavit řídicí napěťové zdroje v hlavním schématu na hodnoty 8.213, což simuluje plně ozářený panel při podmínkách STC při teplotě 25 °C a  $I_{pv}$  proudu 8.213A, což odpovídá ozáření 1000 W/m<sup>2</sup>. Pokud chceme simulovat zastínění panelu, tak nastavíme řídicí zdroje na hodnoty 0, což simuluje nulový  $I_{pv}$  proud. Pro simulaci částečného zastínění při snížených podmínkách ozáření může nastavení vypadat následovně  $I_{pv1} = 6$ ,  $I_{pv2} = 6$ ,  $I_{pv3} = 0$ . Takováto kombinace simuluje podmínky k večeru, kdy je intenzita dopadajícího záření menší, než při plném ozáření a navíc je jeden modul panelu zakryt stínem od fixní překážky.

Parametry řídicích napěťových zdrojů jsou načítány z includovaného souboru „*ipvconfig.inc*„. Použití behaviorálních zdrojů G namísto proudových zdrojů s parametrem je dáno pouze tím, že schéma se zdroji proudů, které mělo definované globální parametry, bylo nefunkční při simulaci pomocí SLPS interface. Dále je v každém jednotlivém PV panelu v náhradním modelu PV článku použita dioda *PVdiodeXX* z knihovny „*RECONFIGURATOR.lib*„. Sériový a paralelní rezistor náhradního modelu článku mají definovanou hodnotu odporu pomocí parametru {*rserial*} a {*rshunt*}. Tyto parametry jsou načítány z includovaného souboru „*parameters.inc*„. V každém panelu je pro překlenutí modulu použita 3x ByPass dioda, jejíž model je definovaný rovněž v knihovně „*RECONFIGURATOR.lib*„, a obsahuje hodnoty zjištěné z katalogového listu výrobce a je nadefinovaný pomocí model editoru.



Obrázek 41 - Simulační schéma modelu PV panelu v programu OrCAD-Capture

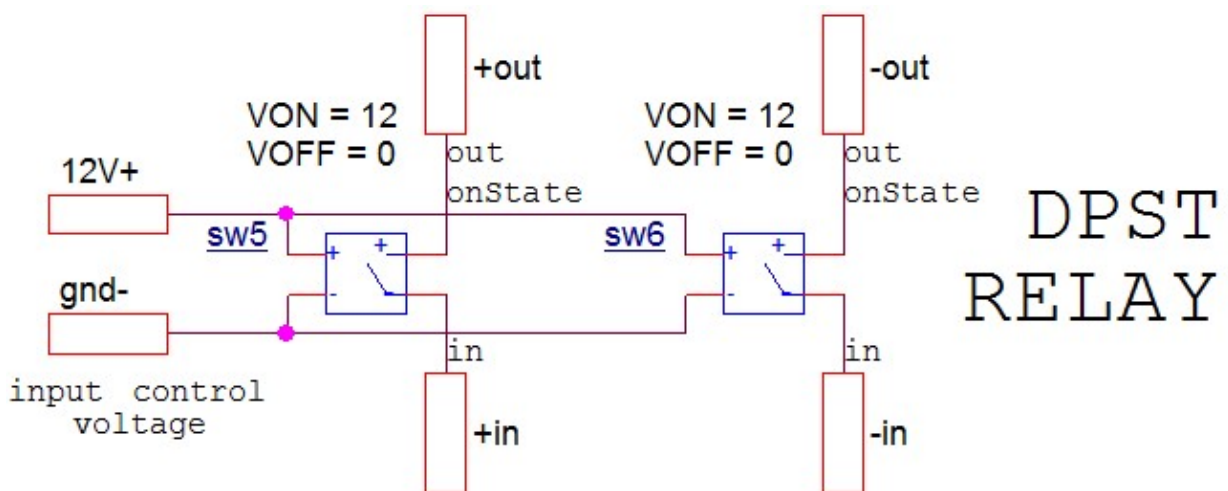
Každý PV panel má v projektu vlastní schéma s vlastním modelem PVdiody. Výstupy a řídicí vstupy panelů jsou zakončeny hierarchickými porty. V hlavním schématu „MAINBOARD„ je pak panel vytvořen jako hierarchický blok s odkazem na příslušné schéma. Ipv proudy panelu (proudy jednotlivých modulů) jsou nastavovány vnějšími napěťovými zdroji umístěnými v hlavním schématu a napojeny na vstupy panelu. Tyto zdroje musí být všechny napojeny na hlavní společnou zem, tedy na net „0„. Výstupy panelu jsou zapojeny přes rezistory rwire, které simulují odpor přívodních vodičů od panelu do rekonfiguratoru, přímo na vstup rekonfigurační matice, konkrétně na DPDT relé. V rekonfiguratoru je snímací obvod pro měření výstupního proudu z panelů umístěn přímo na vstupu zařízení. V simulačním modelu je hodnota proudu tekoucího z daného panelu snímána na výstupním rezistoru RpXX+, viz schéma níže.



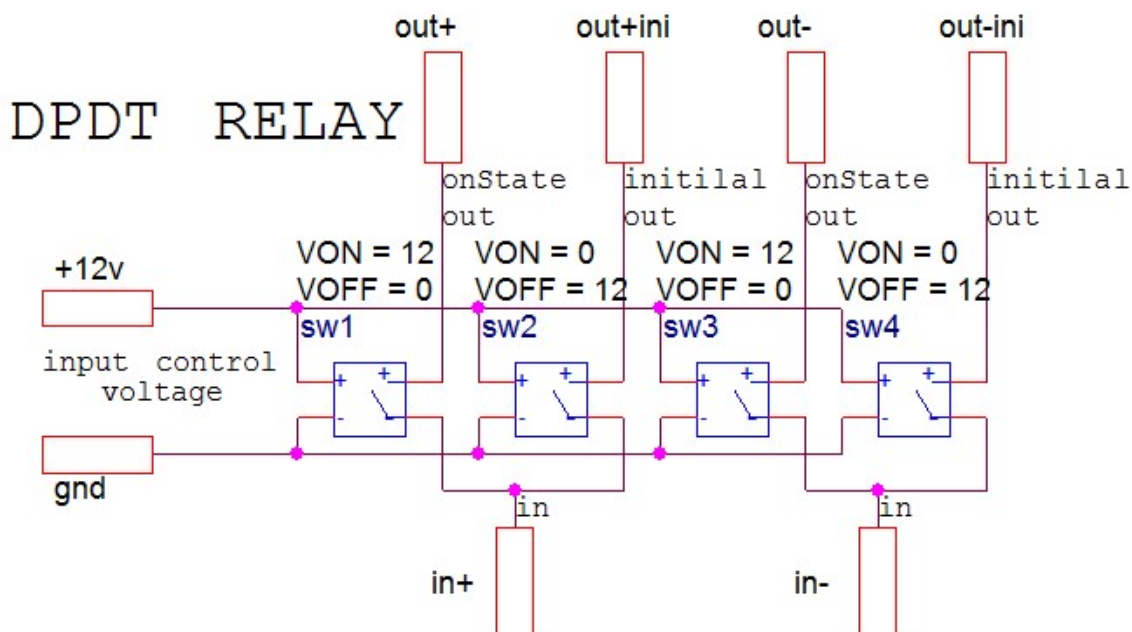
Obrázek 42 - Zapojení PV panelu v hlavním simulačním schématu MAINBOARD

### 7.3.3 OrCAD-Capture: Simulační schéma rekonfigurační matice

Pro možnost simulace rekonfigurace (přezapojování) panelů je v simulačním modelu zakreslena také přepínací matice (switching matrix). V reálu se jedná o soustavu relé, které jsou zapojeny takovým způsobem, aby bylo možné panely připojit na jakoukoliv řadu, dále měřit proudy na krátko a také zkratovat (propojit) řadu. V simulátoru jsou místo relé použity spínače, jejichž sepnutí je řízeno napětovými zdroji. Důležité nastavení u těchto spínačů je jejich odpor při sepnutém ( $R_{ON} = 1e-6 \Omega$ ) a rozepnutém stavu ( $R_{OFF} = 1e6 \Omega$ ). Při vyšších hodnotách nedokáže simulátor konvergovat k řešení a simulace je neproveditelná. Všechny tyto spínače jsou definované na sepnutí při napětí 12V a výchozí pozice spínačů, při kterých jsou nesepnuty, je 0V. SPST relé jsou modelovány pouze pomocí spínačů. DPDT a DPST relé jsou modelovány pomocí vytvořených podobvodů, ve kterých je kombinace spínačů.

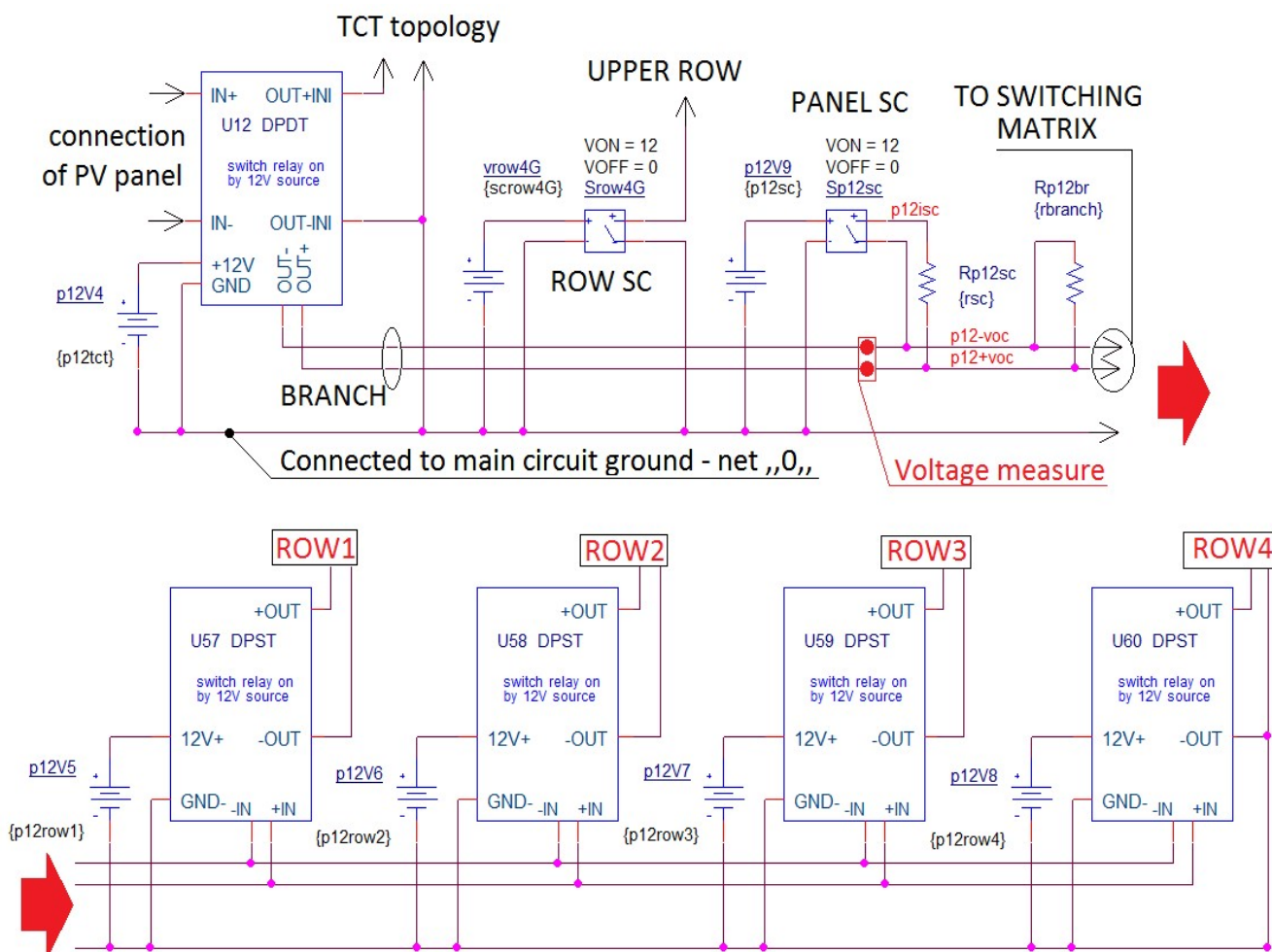


Obrázek 43 - Simulační schéma podobvodu DPST relé v programu OrCAD-Capture



Obrázek 44 - Simulační schema podobvodu DPDT relé v programu OrCAD-Capture

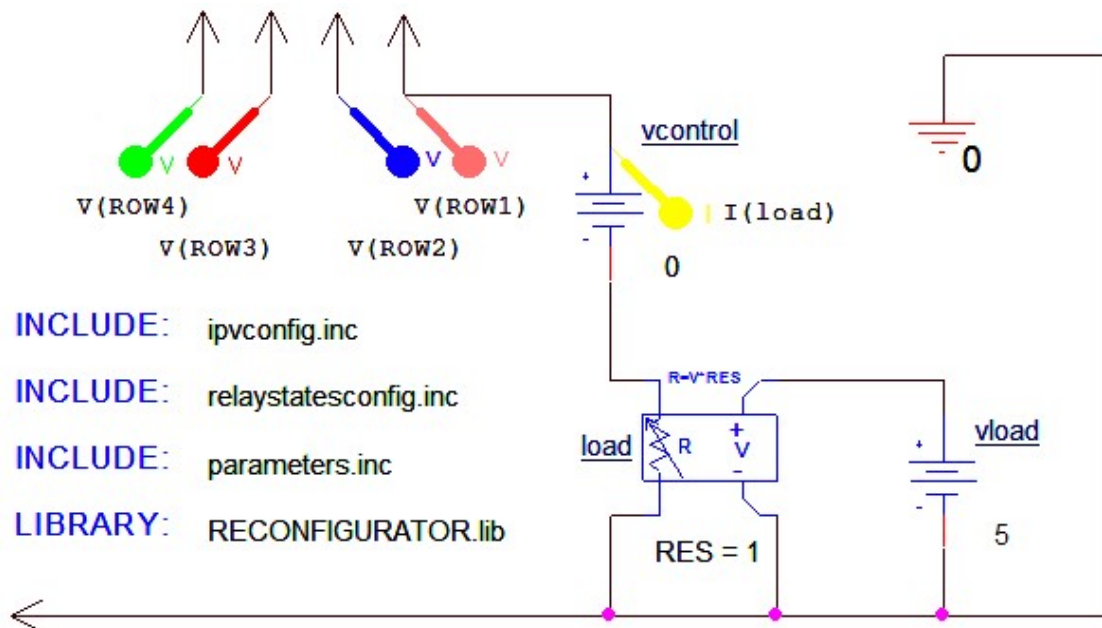
Přepínací matice (switching matrix) rekonfigurátoru je tvořena celkem 48 DPST relé, které mohou jakýkoliv panel napojit na jakoukoliv řadu (row). Pro možnost napojovat panel na jakoukoliv řadu je třeba, aby u příslušného panelu bylo seplé DPDT relé. Toto relé přepíná mezi dvěma základními možnostmi. V počátečním stavu je toto relé neseptnuté a napojuje tak panel na základní 3x4 TCT topologii. Panely 01,02,03 jsou zapojeny na první řadu (row1), panely 04,05,06 zapojeny na druhou řadu (row2), panely 07,08,09 zapojeny na třetí řadu (row4) a panely 10,11,12 jsou zapojeny na čtvrtou řadu (row4). Pokud chceme panel napojit na jinou řadu, nebo jen odpojit ze zapojení, je třeba sepnout DPDT relé, čímž napojíme panel na větev (BRANCH), ke které jsou připojeny další relé. Na této větvi měříme v reálném zapojení napětí. Pokud není panel pomocí přepínací matice (4 DPST relé) napojen na nějakou řadu, tak na této větvi naměříme napětí na prázdko  $V_{oc}$  daného panelu. Pokud chceme měřit proud nakrátko  $I_{sc}$ , je zde připravené SPST relé, pomocí kterého zkratujeme větev a pokud je panel pomocí DPDT relé na tuto větev napojen, ocitne se ve zkratu. Pro měřicí účely  $V_{oc}$  nebo  $I_{sc}$  musí být vždy seplé DPDT relé. Výstupní proud z panelu ovšem můžeme měřit neustále při jakémkoliv zapojení. Rekonfigurační matice dále obsahuje ještě 4 SPST relé, které slouží ke zkratování řady, v případě, kdy k ní nejsou zapojeny žádné panely, tak aby mohl do zátěže procházet proud. Na větev je ještě z pomocných důvodů simulace napojen paralelní rezistor s hodnotou  $r_{branch} = 5 \text{ K}\Omega$ . Dále jsou na větev zapojeny 4x DPST relé, pomocí nichž je možné panel napojit na jakoukoliv větev. Všechny tyto spínače a relé jsou řízeny pomocí napěťových zdrojů. Pokud je na tomto řídicím napěťovém zdroji napětí 12V, tak se spínač aktivuje a sepne. Hodnoty napětí jsou u zdrojů uvedeny jako parametry, které jsou načítány z includovaného souboru „*relaystatesconfig.inc.*“. V tomto souboru je tedy kompletně nadefinováno zapojení panelů před každou simulací. Výstupy relé jsou napojeny na odpovídající řady a níže uvedené zapojení je v hlavním schématu celkem 12x a je shodné pro všechny panely. Kompletní schéma je v elektronické příloze této práce.



Obrázek 45 - Simulační schéma přepínací matice (jeden panel) v programu OrCAD-Capture

### 7.3.4 OrCAD-Capture: Schéma řídicích prvků simulačního modelu

V tomto SPICE simulačním modelu je k výstupu PV pole zapojený v sérii kontrolní stejnosměrný zdroj „*vcontrol*„ a lineárně závislý rezistor „*load*„, pro možnost simulovat různě zatížené i nezatížené pole. Kladný pól výstupu PV pole je na kladné části první řady (row1). Odpor proměnného rezistoru load je přímo úměrný napětí na stejnosměrném kontrolním zdroji „*vload*„. Hodnoty kontrolních zdrojů jsou ve SPICE simulačním modelu nastaveny pevně, avšak při použití SLPS interface při kosimulaci s Matlabem jsou tyto dva kontrolní zdroje použity v simulinkovém modelu jako řídicí input zdroje, jejichž hodnoty jsou nastavovány ve skriptu před každou simulací. Díky tomuto sériovému zapojení zdrojů můžeme simulátor použít ve dvou základních módech. Za prvé je to simulace MPPT, pomocí níž je možné vykreslit I-V a P-V charakteristiky pole a najít MPP při zadaných simulačních podmínkách. Za druhé je to simulace MEASUREMENT, pomocí níž dostaneme reálné výstupní veličiny PV panelů při definované zátěži load a nastavených simulačních podmínkách.

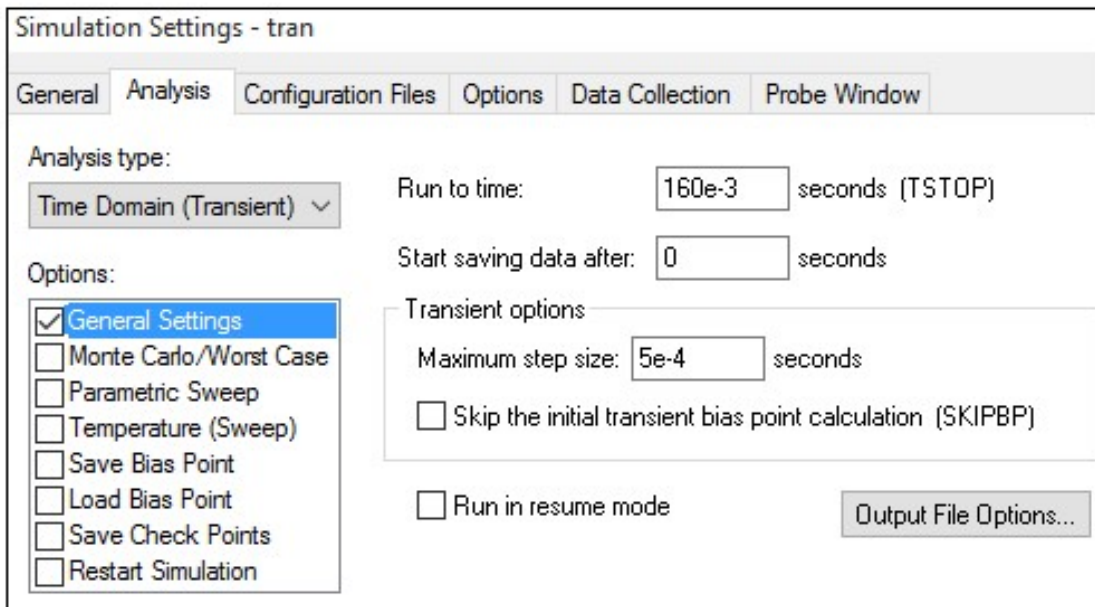


Obrázek 46 - Schéma řídicích prvků simulačního modelu v programu OrCAD-Capture

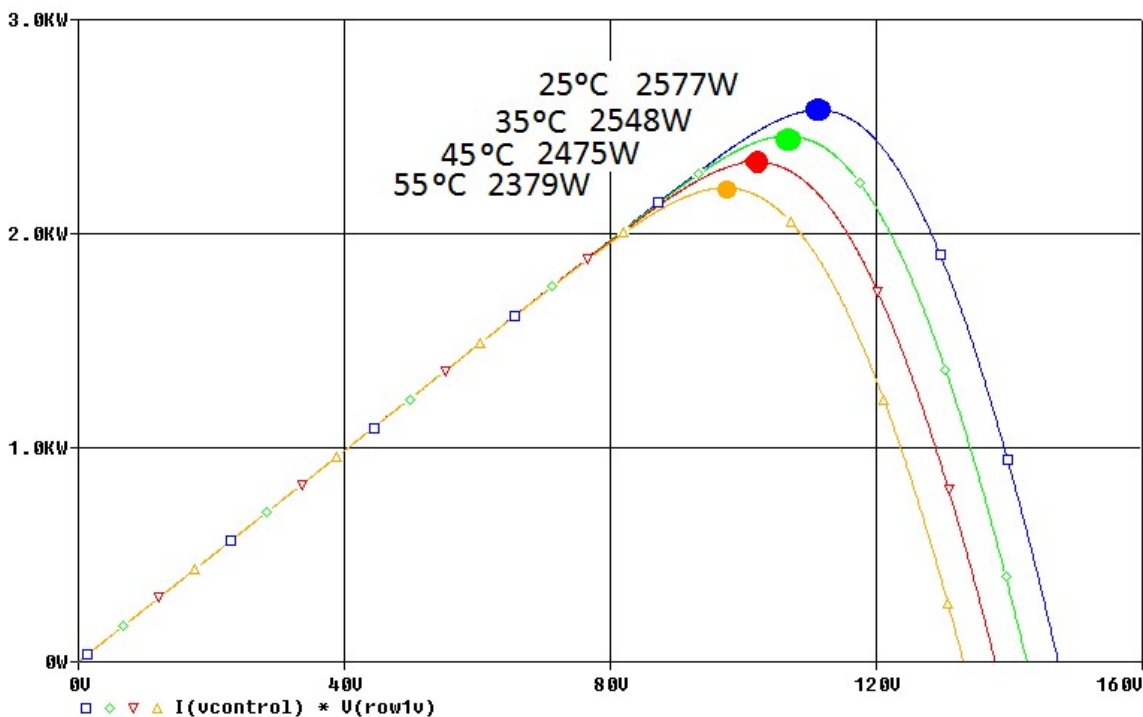
### 7.3.5 OrCAD-PSpice: Nastavení řídicích parametrů a simulace modelu

Jak již bylo napsáno výše, první mód MPPT slouží pro nalezení maximálního výkonu PV pole (MPP) a vykreslení P-V a I-V výstupních charakteristik. V Matlabu jsou pro tuto funkci naprogramovány skripty MPPT. Zátěž load v tomto případě nastavíme na hodnotu 0, tedy tak aby mohl beze změny procházet proud. Z důvodu kompatibility SPICE modelu se hodnota musí nastavit na 0.001, aby simulátor dokázal konvergovat k řešení. Při nastavení lineárně závislého rezistoru load na hodnotu 0 je SPICE simulační model nefunkční. Dále nastavíme rozmítání kontrolního zdroje vcontrol. Pokud provádíme simulaci pomocí programu OrCAD-PSpice, je třeba nastavit stejnosměrnou DC analýzu, při které nastavíme lineární rozmítání zdroje vcontrol od 0V do 160V s krokem 0.1V. Veškeré další možnosti simulace je možné ponechat v defaultním nastavení. Z důvodu použití SLPS interface, pomocí něhož se provádí kosimulace se Simulinkem, je nutné simulační model přetransponovat na časovou - tranzientní analýzu. Protože Simulink pracuje pouze v časové oblasti, je potřeba přetransformovat výsledky DC analýzy do časového spektra. Toho dosáhneme jednoduchou úpravou. Namísto provádění DC analýzy vytvoříme novou časovou - tranzientní analýzu, při které budeme v čase rozmítat kontrolní zdroj vcontrol. Analýzu nastavíme na dobu od 0 do 160ms s krokem 0.5ms, čímž je určena časová osa s 320 jednotlivými výpočty. Každý časový krok potom zvýšíme hodnotu napětí kontrolního zdroje, čímž dosáhneme stejných výsledků jako při DC analýze. Kontrolní zdroj má pak ve SPICE modelu definici pwl(0 0 0.16 160), což způsobí rozmítání zdroje od 0V do 160V s přesností 0.5V. Pomocí editoru OrCAD-Capture nastavíme nové simulační prostředí s názvem „tran,“ a zvolíme tranzientní analýzu s dobou trvání od 0 do TSTOP 160ms s časovým krokem 0.5ms. Veškeré další možnosti simulace v záložce

Options je možné ponechat v defaultním nastavení. Z důvodu urychlení simulace nastavíme v záložce Data Collection sběr a zaznamenávání dat pouze na uzlech, kde máme markery – možnost At Markers Only.

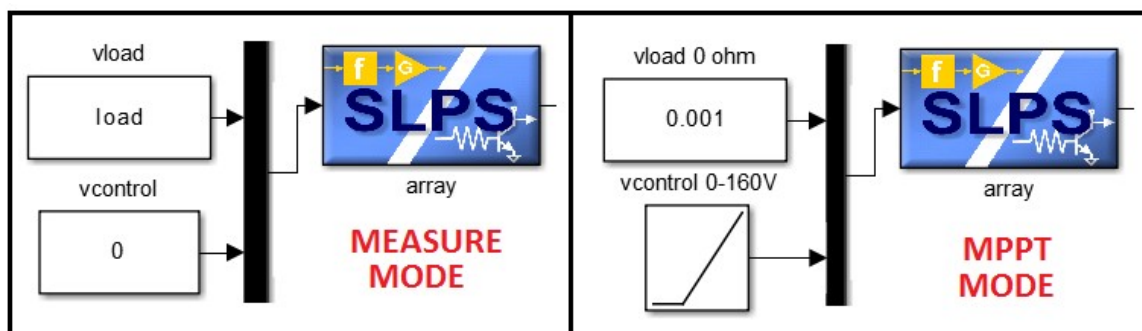


Obrázek 47 - Nastavení parametrů simulace pomocí editoru OrCAD-Capture



Obrázek 48 - P-V charakteristika PV pole 3x4 TCT - simulace v programu OrCAD-PSpice

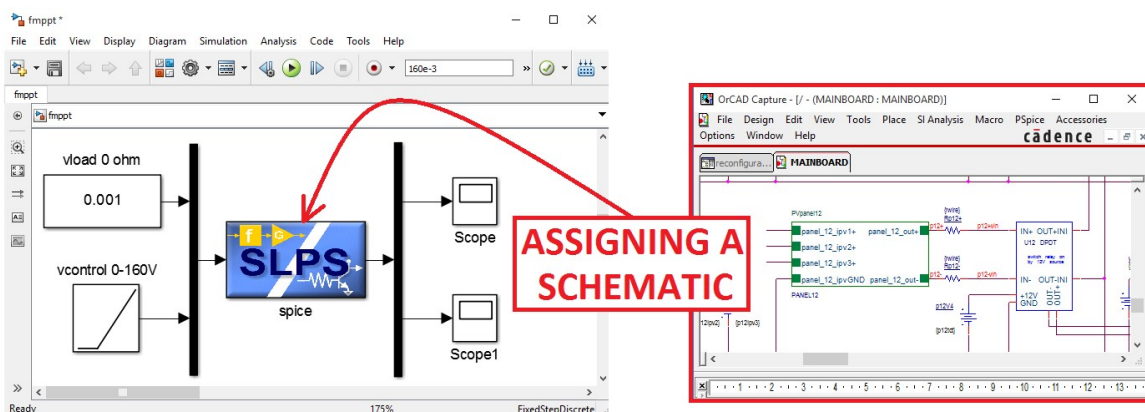
Druhý možný simulační mód MEASURE slouží pro simulované naměření aktuálních výstupních hodnot napětí a proudů z PV panelů při definované zátěži load a nastavených simulačních podmínkách. Pro tuto možnost jsou v Matlabu naprogramované skripty GetValuesSim. V případě měření je třeba nastavit kontrolní zdroj vcontrol na stálou konstantní hodnotu 0, tak aby mohl výstupní proud protékat beze změny do zátěže load. Pokud chceme simulovat zatížení PV pole například při  $\text{load} = 5\Omega$ , nastavíme kontrolní zdroj na hodnotu  $\text{vload} = 5\text{V}$ . V simulinkových modelech, které jsou určeny pro měření, je zdroj vcontrol definován pomocí konstanty 0 a zdroj vload pomocí konstanty load, která musí být vždy před spuštěním skriptu definována v simulačním prostředí Matlabu – ve workspace.



Obrázek 49 - Nastavení řídicích zdrojů v prostředí Matlab – Simulink

#### 7.4 OrCAD-PSpice a Simulink: Kosimulace pomocí SLPS interface.

Tato část je věnována stěžejnímu rozšiřujícímu modulu – interface SLPS, který umožňuje propojení OrCAD-PSpice s programem Matlab-Simulink a provádění vzájemné kosimulace a zpracovávání dat. Umístěním SLPS bloku do Simulinkového modelu umožníme Simulinku provádět simulace PSpice projektů (elektrických obvodů), vytvořené v programu OrCAD-Capture. Takto propojený simulační nástroj nám poskytuje výkonné modelovací prostředí, které kombinuje výhody obou simulátorů. [15]



Obrázek 50 - Princip SLPS interface – přiřazení schéma z OrCAD-Capture editoru

### 7.4.1 Požadavky na softwarové vybavení a instalace SLPS

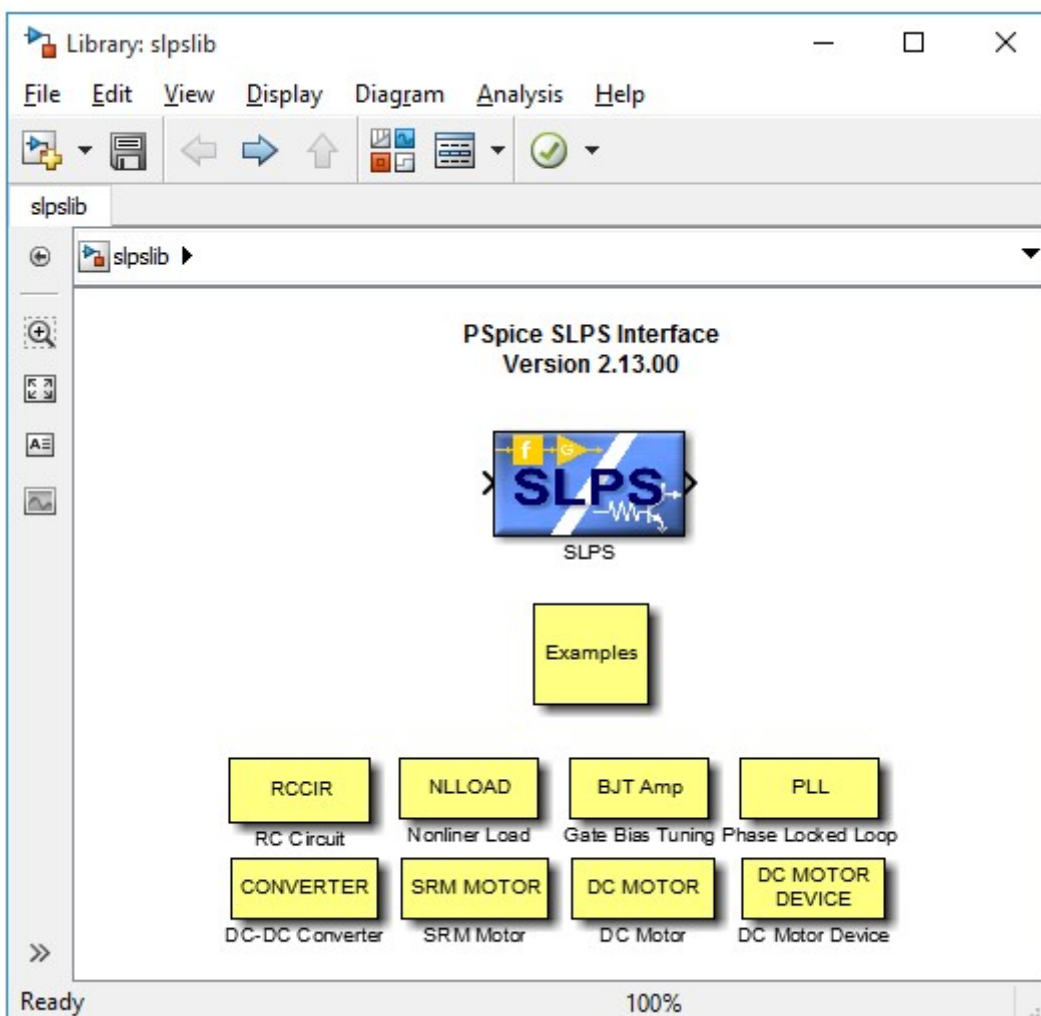
Pro možnost používat SLPS interface je nutné mít nainstalovaný jeden z následujících SPICE editorů: Capture, Capture CIS, Allegro Design Entry CIS nebo Allegro Design Entry HDL a dále PSpice A/D nebo AMS simulátor. SLPS interface totiž není možné nainstalovat jako samostatný program, vždy je součástí návrhářských editorů z programového balíku od společnosti Cadence. V této práci je použita verze PSpice SLPS Interface 2.13.00 z programového balíku Cadence OrCAD products R16.6.0. Dále je třeba mít nainstalovanou správnou verzi Mathworks programů. SLPS nepodporuje 64 bit Matlab, proto pro práci s tímto interfacem je nutností mít nainstalovanou 32 bit verzi programu Matlab a dále rozšiřující Simulink toolbox. V této práci je použit Matlab Simulink verze R2014a 32bit.

Pokud máme nainstalované výše uvedené programy a chceme začít používat SLPS interface, je třeba provést prvotní nastavení a inicializaci knihovny. Před vytvořením nového modelu je nezbytné přidat do programu Matlab cestu do složky, kde je interface SLPS nainstalovaný. Nejjednodušší je pomocí Matlabu spustit instalační funkci SLPS interface s názvem „*slpssetup.p.*“, kterou je možné najít v programovém adresáři SLPS interface, standardně C:\Cadence\SPB\_16.6\tools\pspice\slps\slpssetup.p. Tato funkce inicializuje SLPS knihovnu a nastaví cestu k interfacu do MatlabPath automaticky. Tím dostane program Matlab a i Simulink přístup k modulu SLPS. V navrženém simulačním modelu jsou příkazy pro spuštění instalační funkce obsaženy ve startup.m souboru, který se automaticky spouští s hlavním souborem a automaticky se provedou obsažené příkazy, pakliže by se simulační model a k němu přidružené soubory používaly na jiném PC.

### 7.4.2 Způsob použití SLPS interface v Simulinku

Simulink, jenž je součástí Matlabu, je nástroj pro modelování a analyzování dynamických systémů. Použití Simulinku v této práci je dáno především tím, že pro převod dat mezi vytvořeným elektrickým SPICE modelem v programu OrCAD-Capture a MATLABem používáme tento speciální SLPS interface, který je navržený jako funkční blok simulinkového prostředí a umožňuje propojení těchto dvou výkonných simulačních programů. Pomocí spolupráce těchto dvou programů je možné simulovat elektrické obvody a dále také mechanické systémy. Protože je Simulink dynamický systém, byl SPICE model přizpůsoben k modelování v časové oblasti. Použití SLPS interface bloku je hlavní důvod, proč využíváme namísto DC analýzy tranzientní analýzu. Blok SLPS je možné v Simulinku propojovat se všemi funkčními prvky pro řízení a úpravu signálu z obsáhlé Simulinkové knihovny a dále tak účinně zpracovávat simulační data.

Pro použití SLPS bloku v programu Simulink stačí do příkazového okna Matlabu (command window) napsat příkaz `slpslib`, který otevře knihovnu s interfacem a dále demo projekty. Dvojitým poklikem vyvoláme okno s nastavením interface. Pro správnou funkci, možnost ukládání nastavení a nezobrazování chybových hlášek je třeba nejprve vytvořit nový Simulinkový model a ten uložit do adresáře, který je v `MatlabPath`, poté je možné s interfacem bezproblémově pracovat. Nejjednodušší způsob je všechny soubory ukládat do stejného kořenového projektového adresáře. Pokud máme v Matlabu zadanou nějakou proměnnou, můžeme ji využít také v různých blocích v Simulinku. To samé platí i opačně, data získané simulací v Simulinku můžeme převádět pomocí bloku „To workspace“, do pracovního prostředí Matlabu, což je velká výhoda pro následné dávkové zpracování dat. Pro správnou funkci přenosu dat je zapotřebí vhodně nakonfigurovat jednotlivé bloky. Ve vytvořených modelech jsou použity jednoduché základní prvky Constant, Ramp, Gain, Round, Add, Product, Mux, Demux, ToWorkspace a samotný blok SLPS interface. Zde se předpokládá základní znalost práce s Matlabem a Simulinkem, neboť popis veškerého nastavení by vydal na další obsáhlou kapitolu. Zapojení jednotlivých Simulinkových modelů je zobrazeno v příloze této práce.



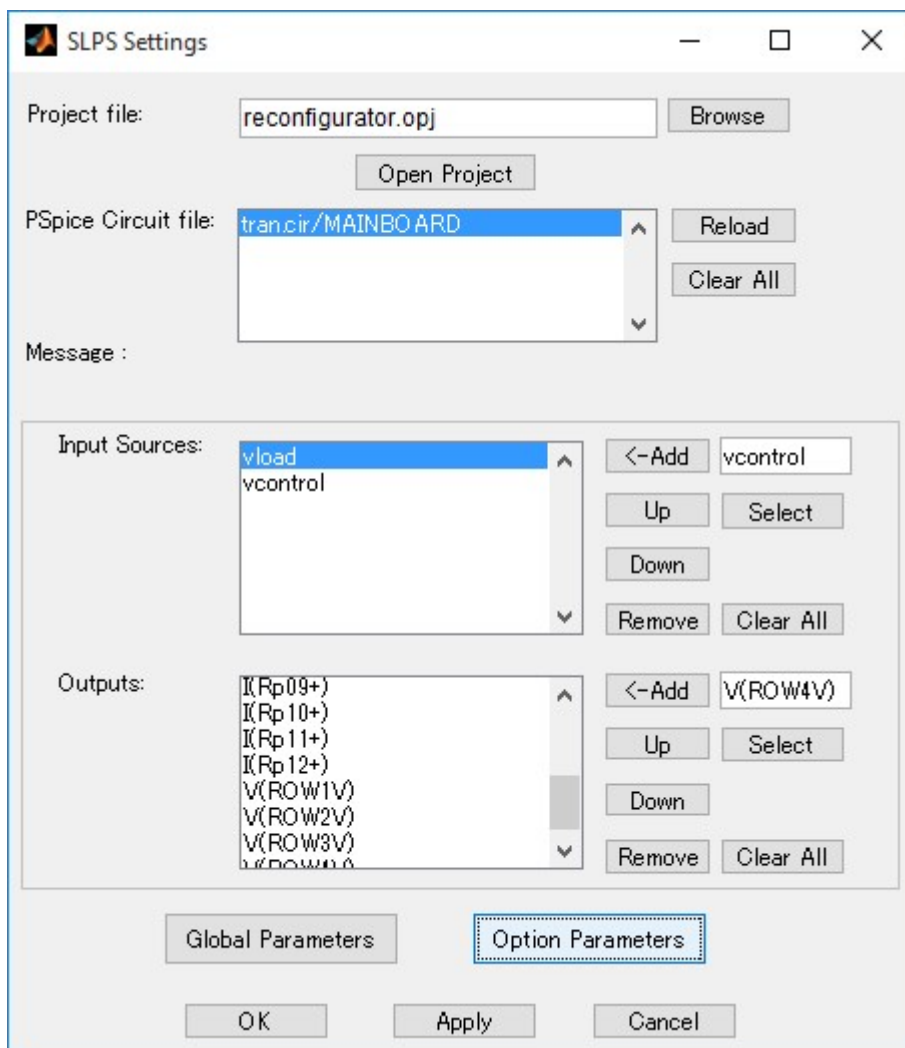
Obrázek 51 – Simulink: knihovna SLPS interface po zadání příkazu `slpslib`

### 7.4.3 Praktické zkušenosti se správným použitím SLPS interface

SLPS interface je takzvaný „Third-party software component“, a ne vždy funguje tak, jak by uživatel očekával. Během vývoje simulačního modelu se vyskytlo mnoho nepředvídatelných, v manuálu nespecifikovaných, nepopsaných problémů a bylo objeveno několik zásadních nedostatků, kvůli kterým byla celá kosimulace dále nefunkční. V této kapitole jsou uvedeny především praktické zkušenosti, kterou mohou být pro čtenáře této práce cenné při návrhu nového systému s tímto interfacem. Pracovalo se zde s obsáhlejší SPICE modelem, jehož netlist čítá více než sedm tisíc řádků. Rychlost načtení dat do SLPS interface je přímo úměrná velikosti netlistu, rozumějme počtu řádků. Při každé změně netlistu (například při úpravě schéma) je nutné znovu načíst data do SLPS bloku. Pakliže upravíme schéma a odsimulujeme ho pomocí PSpice A/D simulátoru, změní se nám i data v netlistu. Pokud tento nový netlist, pomocí vstupního souboru znovu nenačteme do SLPS bloku, nebude nám interface správně fungovat. Základem úspěchu a funkčnosti SLPS interface je mít vždy aktuálně načtený (vzhledem k projektu v OrCAD-Capture) a co nejjednodušeji navržený netlist, který je součástí vstupního souboru pro simulátor (xxx.cir). Interface pracuje správně a bez chyb s maximálně šestnácti výstupy, s více je funkčnost nahodilá. Z tohoto důvodu je simulace a sběr dat rozdělena do více simulinkových souborů a pomocí každého simulinkového modelu se získává pouze 16 výstupních parametrů. Například při simulaci slowMPPT se postupně spustí tři simulinkové modely. To ovšem značně prodlužuje čas simulace a proto byly navrženy i rychlejší algoritmy, které se pro simulační účely spokojí s maximálně šestnácti výstupy (fastMPPT). Další problémy byly způsobeny kvůli nesprávnému použití globálních parametrů. Pokud v editoru OrCAD-Capture definujeme globální parametr nějaké součástky pomocí standardně používané pomocné součástky PARAM, kosimulace se stane nefunkční. Pokud chceme používat globální parametry, tak je nutné je načítat z includovaného souboru, poté je vše funkční. Dále je důležité vyvarovat se definování globálních parametrů, které jsou více vnořené do simulačních souborů. Pokud chceme například v modelu diody (který je díky programové struktuře editoru Capture definován v nově vytvořené knihovně) měnit parametry, kosimulace se stane nefunkční. Jedná se například o definici parametru v modelu diody:  $T\_ABS=\{temp\}$ . Kvůli tomuto omezení musel být navržen skript v Matlabu, který přímo přistupuje do textového formátu vytvořené knihovny, hledá pozice s definicí  $T\_ABS$  a přepisuje původní hodnoty, teplotami obsaženými v matici ve workspace Matlabu. Další problémy s nefunkčností se mohou vyskytnout v případě, kdy jsou v Netlistu definované příliš složité názvy součástek. Například název zdroje „V\_load-sw“, namísto jednoduššího „vloadsw“, způsobí náhodné zasekávání interface při kosimulaci. Názvy všech součástek by tedy měly být co nejjednodušší, bez speciálních znaků a ne příliš dlouhé. Dále pokud používáme PC s procesorem Intel, který podporuje Hyper-threading technology, tak je třeba, z důvodu funkčnosti SLPS bloku, tuto funkci zakázat. Výše popsané nedostatky se projevují i v aktuální verzi Cadence SPB OrCAD 16.60.047 (release 16.6-2015-S069).

#### 7.4.4 Konfigurace SLPS a nastavení parametrů simulace.

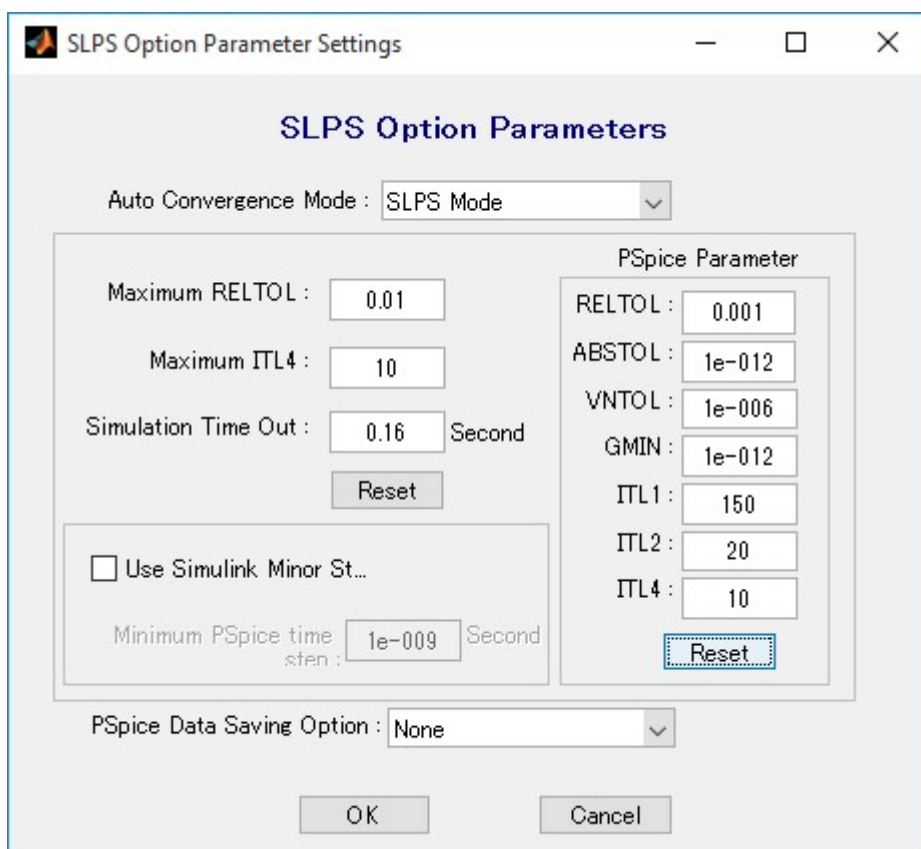
SLPS interface je navržen tak, že jako vstupní signály používá přiřazené zdroje ze schématu a vždy musíme definovat alespoň jeden vstupní zdroj. Stejně jako ve SPICE modelu, jsou i Simulinkové modely řízeny dvěma hlavními vstupními řídicími signály ze zdrojů vcontrol a vload. V celém simulátoru PV pole je použito celkem šest různých Simulinkových modelů, které využíváme pro simulaci a získání dat z PV pole při předem definovaných parametrech SPICE modelu. Modely „vout1t6sim.mdl, „vout7t12sim.mdl, „ioutsim.mdl, a „fmppt.mdl, používáme pro simulační mód MPPT a pracují tedy v plně tranzientním režimu. Protože pomocí tohoto módu získáváme I-V a P-V charakteristiky a hledáme MPP, tak je řídicí zdroj vload nastaven na nulovou hodnotu a kontrolní zdroj vcontrol pomocí bloku ramp nastaven na generování napětí 0 až 160V. Tyto dva řídicí signály jsou nastaveny přímo v Simulinkovém modelu a není nutné před spuštěním tohoto modelu nic nastavovat.



Obrázek 52 - SLPS interface: přiřazení projektu a základní nastavení vstupů a výstupů

Modely „measure.mdl„ a „shortcircuit.mdl„ slouží pro simulované měření hodnot při konstantních definovaných podmínkách a v Simulinku by stačilo použít pouze jeden krok, ovšem z důvodu kompatibility Simulinkových modelů se SPICE elektronickým modelem (který byl navržen jako univerzální pro oba módy simulace) musíme provádět tranzientní analýzu. V praxi to znamená, že provedeme 160 stejných měření s naprosto shodnými výsledky a jako výstup vybereme například hodnotu z druhého kroku. Pro tyto dva modely je kontrolní zdroj vcontrol nastaven na hodnotu 0 a zdroj vload nastaven na hodnotu load, kterou musíme před spuštěním měření, rozumějme před spuštěním těchto simulačních modelů definovat ve workspace a nastavit na reálnou hodnotu zatížení celého pole. Pakliže bychom ve workspace neměli definovanou hodnotu load, nebude nám tento simulační model správně fungovat, protože vstupní zdroj vload nebude mít v Simulinkovém modelu nastavenou žádnou hodnotu.

Výstupy SLPS interface mohou být definovány jako hodnoty napětí na uzlech nebo jako hodnoty protékajícího proudu na součástce (zdroj, rezistor, dioda, atd.). Vždy jsme však omezeni maximálně šestnácti výstupy z SLPS bloku, proto bylo navrženo více Simulinkových modelů, kdy každý slouží k získání jiných dat. V jednom Simulinkovém modelu lze totiž použít pouze jeden SLPS blok. Pro potřeby simulace měření (model measure.mdl) nám stačí právě šestnáct výstupů a to dvanáct údajů o výstupních proudech z dvanácti PV panelů a čtyři údaje o napětí na řadách row1 až row4.



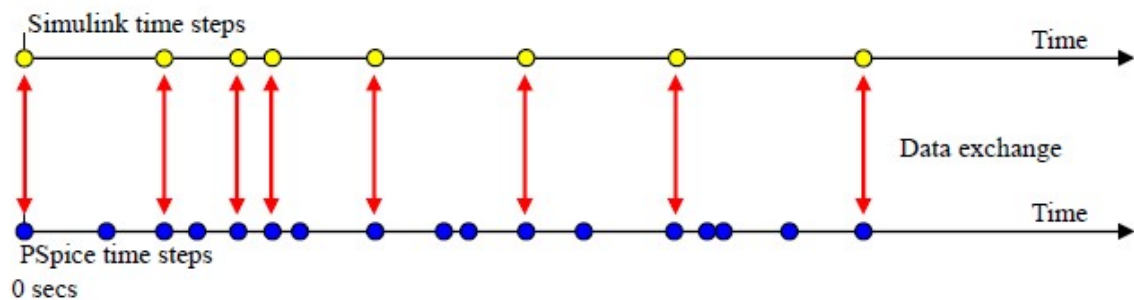
Obrázek 53 - SLPS interface: nastavení parametrů simulace

V dialogovém okně s nastavením parametrů simulace je možné zvolit celkem 3 základní módy kosimulace. SLPS interface použije pro kosimulaci buď 1) PSpice parametry (PSpice mode), 2) Vlastní parametry (SLPS mode) nebo 3) Parametry definované v simulačním prostředí modelu pomocí Capture editoru (Not Use). Ve všech Simulinkových modelech je zvoleno nastavení SLPS mode. Pokud dojde během simulace v Simulinku u PSpice simulátoru k nemožnosti konvergence, je třeba zvýšit parametr ITL4 až do hodnoty ITL4 Max = 1000 a opakovat simulaci. Význam jednotlivých parametrů simulace je uvedený níže. Pomocí parametru RELTOL nastavíme přesnost výstupních hodnot na 0.01. Pro urychlení kosimulace je třeba vypnout ukládání výstupních hodnot: PSpice internal data saving option = None.

Tabulka 2 - Význam parametrů simulace pro SPICE modely [15]

Parameter	Meaning
ITL1	Maximum number of iterations of convergence calculation during bias point analysis
ITL2	Maximum number of iterations of convergence calculation during DC analysis
ITL4	Maximum number of iterations of convergence calculation at each time step during transient analysis
VNTOL	Absolute precision of current
ABSTOL	Absolute precision of voltage
RELTOL	Relative precision of voltage and current

Obecně platí, že časové kroky PSpice Simulátoru jsou mnohem kratší, než časové kroky Simulinkového modelu. Pokud PSpice A/D simulátor používá časové kroky určené na základě Simulinkových hodnot, je zde pravděpodobnější výskyt chyby při konvergenci k řešení. V našem případě jsou však pro správnou a bezchybnou spolupráci (rozumějme výměnu dat mezi Simulinkem a OrCAD-PSpice A/D simulátorem) simulační parametry obou simulátorů nastaveny na stejné hodnoty. Pakliže pomocí PSpice A/D simulátoru provádíme diskretní tranzientní analýzu od 0s do 160ms s krokem 0.5ms, musíme nastavit shodné parametry konfigurace Simulinkového modelu. S tímto nastavením pracují všechny Simulinkové modely použité v simulátoru celého PV pole a rekonfigurátoru. [15]



Obrázek 54 - Výměna dat mezi Simulinkem a PSpice A/D simulátorem [15]

Simulation time

Start time: 0.0 Stop time: 160e-3

Solver options

Type: Fixed-step Solver: discrete (no continuous states)

Fixed-step size (fundamental sample time): 5e-4

Tasking and sample time options

Periodic sample time constraint: Unconstrained

Tasking mode for periodic sample times: Auto

Automatically handle rate transition for data transfer

Higher priority value indicates higher task priority

---

Load from workspace

Input: [t; u] Edit Input

Initial state: xInitial

Save to workspace

Time, State, Output

Time: sim\_time Format: Array

States: xout  Limit data points to last: 1601

Output: yout Decimation: 1

Final states: xFinal  Save complete SimState in final state

Obrázek 55 – Nastavení simulačních parametrů simulinkových modelů

Dále je důležité uvést poznámku ohledně nastavování řídicích zdrojů přepínací matice. Ve SPICE modelu definujeme všechny tyto ovládací zdroje pomocí includovaných parametrů, které ovšem SLPS interface nedokáže měnit. Z tohoto důvodu byly navrženy skripty v Matlabu, které přímo přepisují parametry v includovaném textovém souboru. Při simulaci nejrůznějších zapojení PV panelů však musíme dbát na to, aby vždy mohl plem procházet proud do zátěže. Pakliže hodnoty ovládacích zdrojů přepínací matice nastavíme nelogicky (například tak, že by k jedné řadě nebyl připojen žádný PV panel a zároveň by tato řada nebyla zkratovaná pomocí SPST SC relé), tak proud nebude moci procházet plem, PSpice simulátor nedokáže úspěšně konvergovat k řešení a tím pádem ani SLPS interface nepředá Simulinku požadované simulační výstupní hodnoty napětí a proudů. Při této situaci SLPS interface vytvoří nepoužitelné vstupní simulační soubory pro PSpice simulátor a následně kvůli nemožnosti konvergence k řešení dojde k pádu celého simulačního modelu v Simulinku, neboť SLPS interface nepředá požadované data. Řešení tohoto problému spočívá v ručním smazání všech souborů, které byly vytvořeny SLPS interfacem pro daný Simulinkový model. Soubory se nacházejí v adresáři tranzientní analýzy: rootdirectory\reconfiguratorSpiceFiles\MAINBOARD\tran. Znamená to i opětovné nastavení vstupů a výstupů SLPS, což je v případě obsáhlého Netlistu časově náročná operace. Proto je třeba při simulaci dbát na správné a logické nastavení. Nejrychlejší řešení tohoto problému je obnovení simulačních souborů ze zálohy.

## 7.5 Řídicí algoritmus simulačního modelu v programu MATLAB

Použití programu Matlab pro řízení tohoto simulačního modelu je dáno hlavně tím, že integruje numerickou analýzu, maticové výpočty a grafiku do uživatelsky příjemného prostředí, ve kterém se problémy a řešení zapisují stejně jako v matematice, tedy bez obtíží tradičního programování. Matlab umožňuje na základě kombinace programovacích technik (odvozených od základních programovacích jazyků) a široké nabídky funkcí, rychlé řešení rozsáhlých technických výpočtů, počítačové modelování, simulaci a vizualizaci dat. Díky dostupnosti nejrůznějších toolboxů, je Matlab velice výkonný univerzální simulační nástroj. Základním datovým typem Matlabu je matice ( $n$  – rozměrné pole čísel). Zkratka „MATrix LABoratory“ tedy výstižně charakterizuje způsob práce s programem.

### 7.5.1 Definice parametrů simulace - popis vstupních matic

Tabulka 3 - Počáteční konfigurace vstupních matic pro simulaci

Panel	Ipv1	Ipv2	Ipv3	Panel	Temperature	Panel	Row
Panel 01	8,213	8,213	8,213	Panel 01	25	Panel 01	1
Panel 02	8,213	8,213	8,213	Panel 02	25	Panel 02	1
Panel 03	8,213	8,213	8,213	Panel 03	25	Panel 03	1
Panel 04	8,213	8,213	8,213	Panel 04	25	Panel 04	2
Panel 05	8,213	8,213	8,213	Panel 05	25	Panel 05	2
Panel 06	8,213	8,213	8,213	Panel 06	25	Panel 06	2
Panel 07	8,213	8,213	8,213	Panel 07	25	Panel 07	3
Panel 08	8,213	8,213	8,213	Panel 08	25	Panel 08	3
Panel 09	8,213	8,213	8,213	Panel 09	25	Panel 09	3
Panel 10	8,213	8,213	8,213	Panel 10	25	Panel 10	4
Panel 11	8,213	8,213	8,213	Panel 11	25	Panel 11	4
Panel 12	8,213	8,213	8,213	Panel 12	25	Panel 12	4

Matice **PanelsIpv** má rozměry 12x3, přičemž řádky představují panel 01 až panel 12 a ve 3 sloupcích je nastavení Ipv proudů v [A] pro každý ze třech modulů solárního panelu. V počáteční konfiguraci jsou všechny hodnoty nastaveny na 8.213A, což v simulaci představuje maximální ozáření panelů – maximální možný výstupní výkon z každého panelu. Při simulaci částečného ozáření ( zastínění, zakrytí panelů ) se tyto proudy nastavují na menší hodnoty. Pro plně zastíněný neozářený panel jsou hodnoty Ipv nastaveny na Ipv1=0 Ipv2=0 Ipv3=0. Pakliže chceme simulovat částečné zastínění panelu – zastínění jen některých modulů, nastavíme hodnoty například na Ipv1=8.213 Ipv2=4 Ipv3=1. Hodnoty z této matice jsou před každou novou simulací pomocí funkce „WriteIpvToIncludeFile,“ zapisovány do includovaného souboru „*ipvconfig.inc*,“ jako parametry zdrojů, které představují fotovoltaický proud z jednotlivých buněk solárních fotovoltaických panelů.

Matice **PanelsTemperature** má rozměry 12x1, jednotlivé řádky představují teploty solárních panelů ve [°C]. V počáteční konfiguraci jsou všechny hodnoty teplot nastaveny na 25 °C což v simulaci představuje ideální teplotní podmínky solárního panelu. Veškeré parametry modelu jsou odvozeny při standardních testovacích podmínkách STC: teplota panelu 25°C; ozáření panelu 1000 W/m<sup>2</sup> a AM 1.5. Na začátku běhu programu a následné simulace jsou načteny reálné hodnoty teplot jednotlivých solárních panelů. Pomocí funkce „*WriteTemperaturesToLibrary*„ jsou hodnoty z této matice zapsány jako absolutní teploty (T\_ABS) do includované knihovny „*RECONFIGURATOR.lib*„ která obsahuje 12 jednotlivých modelů PV diod.

Matice **PanelsConnectToRow** o rozměrech 12x1 obsahuje informaci o tom, k jaké řadě (ROW) je panel připojen. Každý řádek může nabývat hodnoty 0, 1, 2, 3, 4, přičemž 0 znamená odpojení panelu z pole. Čísla 1 až 4 představují připojení panelu k daným řadám. Při počátečním nastavení jsou panely zapojeny v konfiguraci 3x4 TCT, tedy 4 řady po 3 panelech. Panel 01,02,03 napojen na řadu číslo 1, panel 04,05,06 napojen na řadu 2, panel 07,08,09 napojen na řadu 3 a panel 10,11,12 napojen na řadu 4. Data z této matice jsou před každou simulací pomocí transpoziční funkce „*PanelsConfiguration*„ zapisovány do matice RelaysState, která obsahuje přímé údaje o sepnutí/rozepnutí jednotlivých relé.

Tabulka 4 - Počáteční konfigurace matice RelaysState

Panel	TCT	SC_ROW	SC_PANEL	ROW1	ROW2	ROW3	ROW4
Panel 01	12	0	0	12	0	0	0
Panel 02	12	0	0	12	0	0	0
Panel 03	12	0	0	12	0	0	0
Panel 04	12	0	0	0	12	0	0
Panel 05	12		0	0	12	0	0
Panel 06	12		0	0	12	0	0
Panel 07	12		0	0	0	12	0
Panel 08	12		0	0	0	12	0
Panel 09	12		0	0	0	12	0
Panel 10	12		0	0	0	0	12
Panel 11	12		0	0	0	0	12
Panel 12	12		0	0	0	0	12

Matice **RelaysState** má rozměry 12x7, přičemž řádky představují panel 01 až panel 12 a sloupce představují jednotlivé relé, které slouží k různému nastavení rekonfiguratoru, ať již pro účely měření výstupních dat panelů nebo pro samotnou rekonfiguraci - přepojení panelů. Data v buňkách musí nabývat hodnot 0 nebo 12, což představuje napětí ve [V] pro spínací zdroj relé ve SPICE simulačním modelu. Pokud by se vyskytla jiná hodnota než 0 nebo 12, dojde ve SPICE modelu ke špatnému sepnutí/rozepnutí relé a simulator by nám předal zkreslené výsledky. Proto je nutné dbát na správné nastavení dat v této matici. Hodnota 0 znamená 0 [V] na spínacím zdroji pro relé a relé je tedy v počátečním

nastavení neseplé. Hodnota 12 znamená 12 [V] pro spínací zdroj a relé je tedy v sepnutém stavu. V prvním sloupci je možné nakonfigurovat sepnutí DPDT relé, které sepnutím přepojuje panel ze základní konfigurace 3x4 TCT do rekonfiguračního módu. Sepnutím tohoto relé přepojíme panel do větve, na kterou jsou napojeny další 4 DPST relé, které mohou panel připojit k jakékoliv řadě (row1 až row4). Pro účely měření napětí na panelu, případně proudu nakrátko je nutné panel přepojit do této větve. Při počátečním nastavení jsou tyto relé aktivovány. V druhém sloupci je možné aktivovat sepnutí relé pro zkratování řady. Protože v poli jsou pouze 4 řady, tak máme 4 zkratovací relé a v druhém sloupci tedy používáme jen 4 první řádky, přičemž první řádek je pro zkratování 1 řady, druhý řádek pro zkratování 2 řady, 3 řádek pro zkratování 3 řady a 4 řádek pro zkratování 4 řady - tedy propojení na zem. Pokud k nějaké řadě nejsou připojeny žádné panely, je nutné z důvodu umožnění průchodu proudu z pole do zátěže použít tyto zkratovací relé. Ve třetím sloupci je možné nakonfigurovat sepnutí SPST relé pro zkratování větve a měřit proud na krátko. Toto sepnutí by mělo být pouze provedeno na velmi krátký okamžik. Měření proudu na krátko SC - short circuit je ale možné provést pouze pokud je přepínací relé DPDT aktivováno a panel připojen na větev. Sloupce 4,5,6,7 představují přepínací matici rekonfiguratoru – switching matrix. Celkově 48 buněk představuje 48 DPST relé, pomocí kterých je možné jakýkoliv panel napojit na jakoukoliv řadu. Při počátečním nastavení jsou panely zapojeny v konfiguraci 3x4 TCT. Panel 01,02,03 napojen na řadu číslo 1, panel 04,05,06 napojen na řadu 2, panel 07,08,09 napojen na řadu 3 a panel 10,11,12 napojen na řadu 4. Pokud chceme například panel08 zapojit na první řadu, tak ho musíme odpojit ze třetí řady - pozice: 8.řádek, 6.sloupec = 0 a napojit na první řadu – pozice: 8.řádek,4.sloupec = 12. Data z této tabulky jsou před simulací přímo zapisovány pomocí funkce „*WriteRelaysStateToIncludeFile*„ jako parametry jednotlivých napěťových zdrojů do includovaného souboru „*relaysstatesconfig.inc*„.

## 7.5.2 M-funkce pro zápis simulačních parametrů do includovaných souborů

**function**[] = WriteTemperaturesToLibrary(PanelsTemperature)

Funkce **WriteTemperaturesToLibrary** slouží pro zápis teplot panelů do includované knihovny *RECONFIGURATOR.lib*. Vstupem této funkce jsou hodnoty teplot, které jsou zapsány v matici (vektoru) *PanelsTemperature*. Na začátku si funkce otevře soubor s knihovnou a vloží do matice *matrix* veškeré znaky ze souboru *RECONFIGURATOR.lib*. Cesta k tomuto souboru je vždy relativní a nalézá se v projektovém adresáři v podsložce *reconfigurator-PSpiceFiles*. Funkce funguje tak, že v celém tomto textovém souboru vyhledá místa mezi řetězcem „T\_ABS=„ a znakem „\*„, a zapíše na tyto místa postupně teploty panelů z matice *PanelsTemperature*. Pro správný, korektní a nezaměnitelný zápis hodnot teplot je nutné, aby byly modely diod v knihovně seřazeny vzestupně od *PVdiode01* až k *PVdiode12* a zároveň aby v tomto souboru nebyly zapsány údaje o jakékoliv jiné teplotě *T\_ABS* než té, která odpovídá modelům PV diod.

Rovněž musí být teploty T\_ABS definované u modelů diod na posledním místě, neboť je za hodnotou teploty znak „\*“, který znamená konec definice modulu a funkce vyhledávání znaků s ním pracuje a určuje podle toho zápis další teploty. Pakliže by se v této knihovně objevil jakýkoliv jiný model se specifikací absolutní teploty T\_ABS, tak nám funkce správně nezapíše teploty k odpovídajícím PV diodám.

**function**[RelaysState] = WriteRelaysStateToIncludeFile(RelaysState,PanelsConnectToRow)

Funkce **WriteRelaysStateToIncludeFile** slouží pro zápis hodnot parametrů pro napěťové zdroje do includovaného textového souboru *relaysstatesconfig.inc*, který se nachází ve složce s údaji pro tranzientní analýzu. V tomto souboru jsou definované hodnoty parametrů zdrojů, které v pspice simulátoru řídí sepnutí všech konfiguračních relé. Hodnota 0 znamená v pspice simulátoru 0 voltů a relé je v počátečním, tedy neseplém stavu. Hodnota 12 znamená 12V čímž je relé aktivováno a seplé. Lokace souboru je v tomto případě nezaměnitelná, je dána nastavením spice simulátoru a nachází se ve třetí podložce projektového adresáře: `\reconfigurator-PSpiceFiles\MAINBOARD\tran`. Vstupem této funkce jsou jednak údaje o tom, k jaké řadě je panel připojen (vektor PanelsConnectToRow) ale hlavně matice RelaysState, ve které jsou před každou simulací definovány parametry sepnutí či rozepnutí relé. Výstupem této funkce je rovněž ta samá matice RelaysState, neboť ve funkci dochází k jejímu částečnému pozměnění na základě informací z vektoru PanelsConnectToRow. V první fázi se vevnitř v samotné funkci, na základě údajů z vektoru PanelsConnectToRow o tom, k jaké řadě je panel připojen, vytvoří nová konfigurační matice SwitchingMatrix o rozměrech 12x4 (12 panelů, 4 relé pro připojení k řadě 1 až 4 pro každý panel), která obsahuje pouze údaje o sepnutí DPST relátek. Tato nově vytvořená matice se zapíše na 4, 5, 6, 7 sloupec matice RelaysState. Hodnoty matice RelaysState v 1,2,3 sloupci zůstanou nezměněny. Výstupem funkce je tedy částečně pozměněná matice RelaysState a je to čistě z důvodu přehlednosti, nezáleží na tom další fungování simulátoru. Dále se postupuje již k samotnému zápisu hodnot parametrů do textového souboru. Pro to, aby se po každém dalším zápisu data v textovém souboru nepřipisovaly, ale přepisovaly, je nutné v matlabu při otevření zvolit parametr `wt` – write text. Tato funkce tedy po každém provedení přepíše parametry sepnutí relátek. Jediné na co je potřeba dávat pozor je to, abychom před spuštěním této funkce nedefinovaly sepnutí DPST relátek, pomocí konfigurace samotné matice RelaysState, neboť hodnoty v posledních 4 sloupcích budou nastaveny dle vektoru PanelsConnectToRow.

**function** [] = WriteIpvToIncludeFile(PanelIpv)

Funkce **WriteIpvToIncludeFile** slouží pro zápis hodnot proudů Ipv do includovaného textového souboru *ipvconfig.inc*, který se nachází ve složce s údaji pro tranzientní analýzu. V tomto souboru jsou definované parametry 36 napěťových zdrojů (12 panelů, pro každý 3 zdroje), které v pspice simulátoru řídí závislé proudové zdroje jednotlivých modulů PV panelů. Jedná se o parametry p01ipv1 až p12ipv3. Lokace souboru je v tomto případě nezaměnitelná, je dána nastavením spice simulátoru a nachází se ve třetí podložce projektového adresáře : \reconfigurator-PSpiceFiles\MAINBOARD\tran. Vstupem této funkce jsou hodnoty Ipv proudů, které jsou definovány v matici PanelsIpv. Pro to, aby se po každém dalším zápisu data v tomto textovém souboru nepřipisovaly, ale přepisovaly, je nutné v Matlabu při otevření zvolit parametr wt – write text. Tato funkce tedy po každém provedení přepíše celkem 36 definovaných parametrů (.param pXXipvX=XXX) a přiřadí jim nastavené hodnoty z matice.

### 7.5.3 M-skripty pro přímé řízení simulace



MAIN.m

**MAIN.m** je hlavní skript celého programu, odkud spouštíme další jednotlivé skripty a řídíme běh celého procesu simulace a následné rekonfigurace PV panelů.



startup.m

**startup.m** Zde je nadefinováno základní nezbytné nastavení , pro správnou funkci celého programu. Tento skript, který je obsažený v rootu projektového adresáře, se automaticky spustí po zapnutí Matlabu a provede předdefinované příkazy. Obecně je vhodné vymazat vše z workspace a pozavírat a vyčistit vše nepotřebné. Dále tento skript nastaví cestu (path) do složky kde je nainstalováno SLPS interface a nastaví sem pracovní adresář pro možnost spuštění konfigurační funkce. Standardně je tento interface nainstalovaný v adresáři

C:\Cadence\SPB\_16.6\tools\pspice\slps. Pakliže máme složku s interfacem umístěnou v jiné lokaci, je nutné zadat správnou cestu. **TOTO JE NEZBYTNÝ KROK PRO FUNKCI SLPS INTERFACE A FUNKCI CELÉHO PROGRAMU.** Dále se provede změna složky do hlavního projektového adresáře RECONFIGURATOR, kde jsou obsaženy veškeré projektové soubory a nastaví se systémová proměnná matfilepath. Z důvodu compatibility je nutné pracovní adresář se všemi soubory umístit do této lokace na disku D: D:\PHOTOVOLTAICS\RECONFIGURATOR . Důležité je dodržet i písmeno disku!

Pokud hlavní adresář umístíte jinam, nebude nám fungovat simulace v OrCAD-Capture a další navazující funkce, neboť v simulačním modelu jsou některé knihovny, includované soubory a modely součástek definované s absolutní pevnou adresou právě do tohoto hlavního pracovního adresáře. Přepisovat veškeré adresování by bylo časově náročné, proto je na jiném PC nezbytné umístit projektový adresář do stejného umístění, kde byl celý projekt vytvářen.



data\_PVpanelParameters.m



CalculateAndWriteModelParameters.m

Soubor **data\_PVpanelParameters.m** obsahuje základní charakteristické parametry panelu získané z katalogového listu od výrobce. Pokud bychom k rekonfiguratoru připojovaly jiné panely, je třeba před simulací v tomto souboru nadefinovat nové parametry PV panelu a pomocí funkce **CalculateAndWriteModelParameters.m**,

provést přepočítání hodnot náhradního modelu. Tato funkce vypočítá potřebné parametry pro náhradní jednodiodový model, který se používá v simulátoru spice a zapíše výsledné hodnoty do includované knihovny RECONFIGURATOR.lib a dále do includovaného souboru parameters.inc. Do souboru parameters.inc se také zapisují hodnoty pomocných rezistorů pro simulaci. Na začátku této funkce je třeba tyto hodnoty nadefinovat. Jedná se o odpor vedení z panelů rwire, pomocný odpor simulace na větvi rbranch a pomocný odpor simulace rsc při proudu na krátko při zkratování panelu. Rovněž pomocí této funkce můžeme vykreslit I-V a P-V charakteristiky panelu při nadefinovaných podmínkách. Použitá teorie a vzorce pro výpočet hodnot náhradního modelu se nalézají v mnoha literárních zdrojích a vše je více popsáno v teoretické části této práce.



BasicConfig.m

**BasicConfig.m** - v tomto souboru jsou nadefinované hodnoty základních konstant a matic, které představují nezbytné nastavení pro běh simulačního programu v základních ideálních podmínkách. Ozáření všech panelů je nastaveno na maximum, tedy maximální výstupní proud panelů  $I_{pv} = 8.213[A]$ , teploty všech panelů na teplotu  $25 [^{\circ}C]$  při STC, tedy  $T_{ABS} PV diod = 25$ . Rekonfigurator je nastaven do výchozí standardní pozice zapojení pole 3x4 TCT. Všechny DPDT relé jsou seplé a napojují panely na jejich odpovídající větve. Dále pomocí DPST relé jsou na každou řadu připojeny 3 panely tak, aby zapojení pole bylo 3x4 TCT, proto je vektor pro konfiguraci panelů nastaven takto:  $PanelsConnectToRow(:,1) = [1;1;1;2;2;2;3;3;3;4;4;4]$ . Dále tento skript zapíše tuto základní konfiguraci do includovaných souborů a knihovny pomocí výše popsaných funkcí.



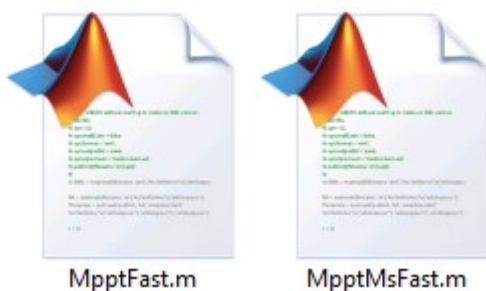
MpptSlow.m

**MpptSlow.m** skript slouží ke kompletní DC analýze celého pole při předem definovaných podmínkách zastínění, teploty a konfigurace (propojení) panelů. Pomocí tohoto skriptu můžeme rovněž vykreslit P-V a I-V charakteristiky pole. Řídící konstanty v simulinku jsou v tomto případě nastaveny na simulační čas 160ms, což znamená, že bude provedena simulace s rozmítáním kontrolního zdroje od 0 do 160V. Konstanta ramp slouží pro nastavení strmosti kontrolního zdroje. Aby nám kontrolní zdroj generoval při každém časovém okamžiku vyšší napětí, je třeba nastavit ramp na hodnotu 1000. Při nastavení ramp na hodnotu 0 nám kontrolní zdroj nebude generovat žádné napětí. Dále pro dosažení správných výstupních hodnot je třeba nastavit hodnotu zátěže na 0 ohms, aby proud procházel beze změny, což rovněž vyplývá ze sériového zapojení zátěže a kontrolního zdroje v schematu zapojení. Pomocí simulinkových modelů *vout1t6sim.mdl*, *vout7t12sim.mdl*, *ioutsim.mdl* se provede simulace, jejíž výstupy jsou časové vektory s údaji o napětí a proudech, které získáme rozmítáním kontrolního zdroje při tranzientní analýze. Pomocí tranzientní analýzy tedy dostáváme hodnoty pro DC analýzu. Pokud chceme získat více hodnot za účelem dosažení přesnějších výsledků, stačí zvýšit krok v simulinkovém modelu a dostaneme delší časový vektor. S takto získanými údaji probíhá jednoduché zpracování. Z vektoru *sim\_pload* určíme maximální výkon a poznamenejme si pozici - údaj v jakém čase, neboli při jakém napětí ve vektoru *sim\_pload* pole dosahuje nejvyššího výkonu MPP. Z napětí a výkonu vypočítáme proud do zátěže při maximálním možném výkonu pole a určíme ideální hodnotu zátěže *ArrayLoadMPP*. Díky pozici MPP můžeme vyříznout z výstupních napěťových, proudových a výkonových vektorů pro každý panel údaje o napětí, proudu a výkonu při MPP pole. Výstupem tohoto skriptu je matice **MPPT\_slow**, kde jsou zapsány definované podmínky před simulací a dále údaje o  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $P_{mpp}$  všech panelů a kompletního pole.



MpptMsSlow.m

**MpptMsSlow.m** Skript slouží k nalezení MPP a vykreslení grafů při ideálních podmínkách, tedy při maximálním možném ozáření všech panelů. Vykonávané funkce jsou obdobné jako ve skriptu *MpptSlow.m* s tím rozdílem, že před simulací uloží aktuální hodnoty proudů  $I_{pv}$ , simulační hodnoty  $I_{pv}$  přepíše novými hodnotami  $I_{pv} = 8.213$ , tedy hodnotami při maximálním možném ozáření panelu. Nastavení teplot a konfigurace panelů se nemění. Na konci simulace se aktuální hodnoty  $I_{pv}$  přepíše hodnotami uloženými před spuštěním tohoto skriptu a pomocí funkce se zapíše znovu do includovaného souboru pro potřeby další simulace. Výstupem je pak matice **MPPT\_MS\_slow**, která má naprosto stejný format jako matice **MPPT\_slow** s tím rozdílem, že hodnoty  $I_{pv}$  a pak také vypočítané hodnoty odpovídají maximálnímu možnému ozáření panelů.



**MpptFast.m** je skript, který byl navržen tak, aby simulace nalezení maximálního výkonu pole MPP trvala kratší dobu, hlavně tedy tak, aby se kvůli dosažení výsledků nemuseli spouštět všechny 3 simulační simulinkové modely. SLPS interface pracuje správně s maximálně 16-ti výstupy, proto se simulinkový model upravil a tomu se přizpůsobilo i zpracování výsledků v Matlabu. Ve výsledcích se

sice u odpojedného panelu z pole neobjevuje reálné napětí naprázdno Voc (napětí na větvi) ale hodnota 0, ovšem tato nepřesnost je v dalším zpracování přehlédnutelná, neboť s napětím Voc při nezapojeném panelu není třeba v rekonfiguračním programu počítat. Řídící konstanty jsou naprosto shodné jako u *MpptSlow.m*. Výstupem z SLPS interface jsou proudy z jednotlivých panelů (12x iout z každého panelu), dále proud procházející přes kontrolní zdroj, který představuje proud do zátěže (iload) a napětí na řadě row2,row3,row4 (3x vrow). Napětí na řadě row1 je při DC (tranzientní) analýze pro vykreslování charakteristik identické s napětím kontrolního zdroje vcontrol (taktéž tedy s napětím na zátěži vload) a není ho tedy třeba sledovat jako výstup z SLPS interface ale postačí ho kopírovat z výstupu kontrolního zdroje vcontrol. Simulace se provede pomocí simulinkového modelu *fmppt.mdl*. Výstupem jsou časové vektory s údaji o proudech ze všech panelů, výkon,proud a napětí na zátěži a čtyři napětí v řadách row1,row2,row3,row4. Pokud jsou panely napojeny na jakoukoliv řadu, tak tyto napětí naměřené na jednotlivých řadách logicky reprezentují hodnoty napětí na panelech. Výkon, napětí a proud do zátěže při MPP se určí stejně jako ve skriptu *MpptSlow.m*. Dále díky pozici MPP můžeme vyříznout z výstupních proudových vektorů pro každý panel údaje o proudu (PanelsCurrentMPP) a z napěťových vektorů řad napětí (RowsVoltageMPP) při MPP pole. Na základě údajů z vektoru PanelsConnectToRow přiřadíme vektoru PanelsVoltageMPP hodnoty napětí na řadě při MPP, ke které je panel připojen. Pokud je panel odpojen z pole tak se panelu přiřadí nulové napětí. To ovšem v reálu není správně, neboť na odpojeném panelu naměříme ve většině případů kladné napětí Voc, které se může blížit až k 34V. Toto však není žádné omezení, neboť tento údaj není třeba v dalším zpracování používat. Vynásobením vektorů PanelsVoltageMPP a PanelsCurrentMPP už jen vypočítáme výkon jednotlivých panelů při MPP. Výstupem tohoto skriptu je matice **MPPT\_fast**, kde jsou zapsány definované podmínky před simulací a dále údaje o Vmpp, Impp, Pmpp všech panelů a kompletního pole. Skript **MpptMsFast.m** pracuje opět velice podobně jako skrip *MpptFast.m* s tím rozdílem, že před simulací uloží aktuální hodnoty proudů Ipv, simulační hodnoty Ipv přepíše novými hodnotama Ipv = 8.213, tedy hodnotami při maximálním možném ozáření panelu. Nastavení teplot a konfigurace panelů se nemění. Na konci simulace se aktuální hodnoty Ipv přepíše hodnotami uloženými před spuštěním tohoto skriptu a pomocí funkce se zapíše znovu do includovaného souboru pro potřeby další simulace. Výstupem je pak matice **MPPT\_MS\_fast**, která má naprosto stejný format jako matice *MPPT\_fast* s tím rozdílem, že hodnoty Ipv a pak také vypočítané hodnoty odpovídají maximálnímu možnému ozáření panelů.



GetPanelsActualValues  
SIM.m

Skript **GetPanelsActualValuesSIM.m** slouží k získání, rozumějme k simulovanému naměření reálných hodnot napětí a proudů všech panelů napojených na pole při předem definované zátěži load a nastavených simulačních hodnotách I<sub>pv</sub> proudů a teplot. Řídící konstanty v simulinkovém modelu jsou v tomto případě nastaveny tak, aby v čase neprobíhala rozmítaná DC analýza. Kontrolní zdroj je stále nastaven na napětí 0 a řídicí zdroj vload je stále nastaven na hodnotu proměnné load. Jedná se vlastně o provedení analýzy

výpočtu pracovních bodů, ovšem z důvodu použití slps interface, který provádí v pspice modelu tranzientní analýzu, tak jako výstup ze simulinkového modelu dostáváme stejné hodnoty ve více časových krocích. Pomocí simulinkového modelu „*measure.mdl*“, se provede simulace a jako výstupní hodnoty získáme časové vektory proudů z panelů *sim\_ipanels* a dále napětí na řadách *sim\_vrows*. Pro úspěšnou simulaci je důležité nadefinovat rekonfiguraci tak, aby ke každé řadě byl připojen alespoň jeden panel, případně byla tato řada pomocí SPST relé zkratována. Na základě informace o tom, k jaké řadě je panel aktuálně připojen, přiřadíme panelům napětí naměřené na dané řadě. Pokud je panel odpojen z pole, přiřadíme mu hodnotu 0 Volt. Z odpojeného panelu rovněž nemůžeme odebrat žádný proud a proto panel, který je odpojený z pole, nám dodává nulový výkon. Výkony ostatních panelů vypočítáme jako součin naměřených proudů a přiřazených napětí. Dále na základě zapojení panelů (definováno ve vektoru PanelConnectToRow) a znalosti základních Kirhoffových zákonů vypočítáme výstupní napětí pole (napětí na zátěži) a výstupní proud pole (proud do zátěže). Protože celé modelování je navrhnuté tak, že vždy máme takovou konfiguraci panelů, aby nám mohl procházet proud, tak napětí pole *ArrayVoltageACTUAL* určíme jako součet napětí na jednotlivých větvích a proud do zátěže *ArrayCurrentACTUAL* vypočítáme jako součet proudů panelů, které jsou připojené do jedné větve. Výkon pole *ArrayPowerACTUAL* je dopočítán jako součin *ArrayVoltageACTUAL* a *ArrayCurrentACTUAL*. Rozdíl tohoto skriptu oproti MPPT\_fast a dalším je ten, že zde je před simulací jako vstupní hodnota nastavena pevná zátěž load a veškeré výstupy jsou tedy vypočítané vzhledem k definovanému zatížení pole. Před každým spuštěním tohoto skriptu musí být pro správnou funkci spouštěného simulinkového modelu *measure.mdl* definována hodnota zátěže load. Výstupem tohoto skriptu jsou matice *MEASURE\_panels* (12x3) a *MEASURE\_array* (1x4).



GetPanelsOpenCircuit  
VoltagesSIM.m



GetPanelsShortCircuit  
CurrentsSIM.m

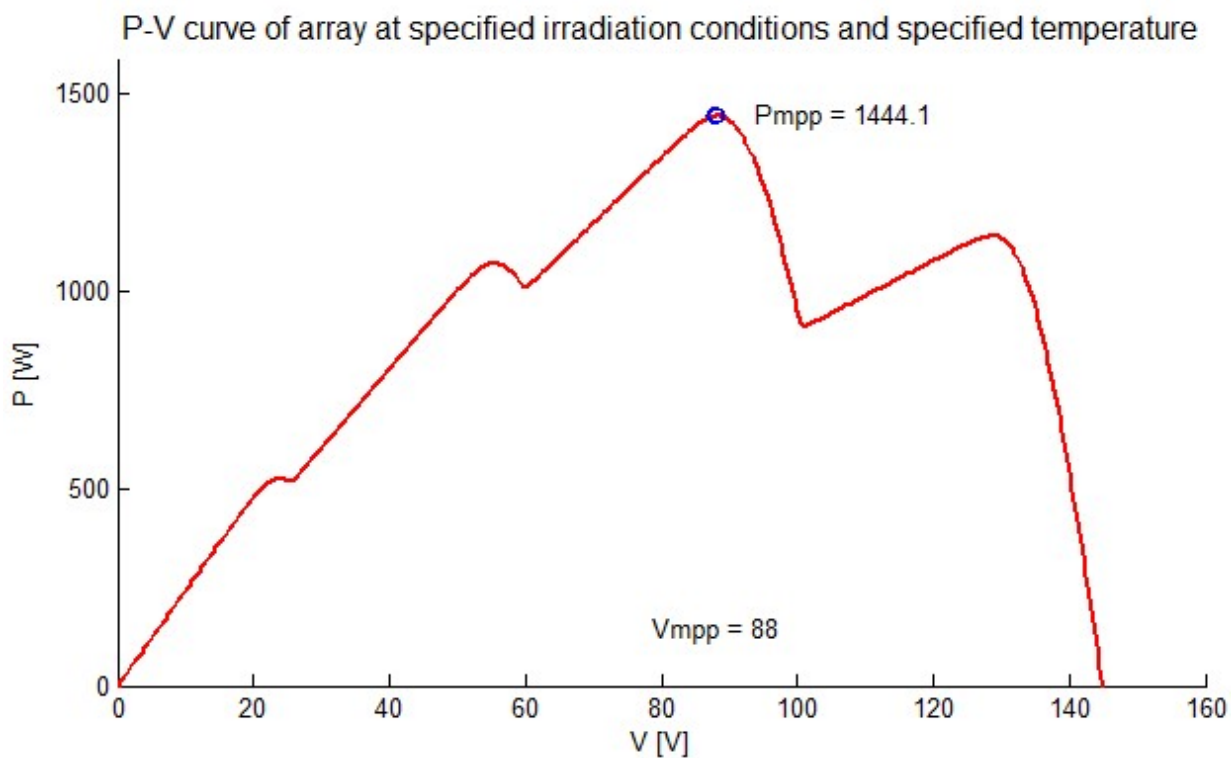
Skripty **GetPanelsShortCircuitCurrentsSIM.m** a **GetPanelsOpenCircuitVoltagesSIM.m** slouží k simulovanému naměření hodnot proudů na krátko I<sub>SC</sub> a hodnot napětí naprádno V<sub>OC</sub>. Pro simulaci spouštíme ve skriptech simulinkové modely *shortcircuit.mdl*, *openvoltage7t12.mdl*, *openvoltage1t6.mdl* a výstupem jsou matice *MEASURE\_ISC* (12x1) a *MEASURE\_VOC* (12x1).

## 7.6 MPPT simulace I-V a P-V charakteristik, výstupní hodnoty v matici

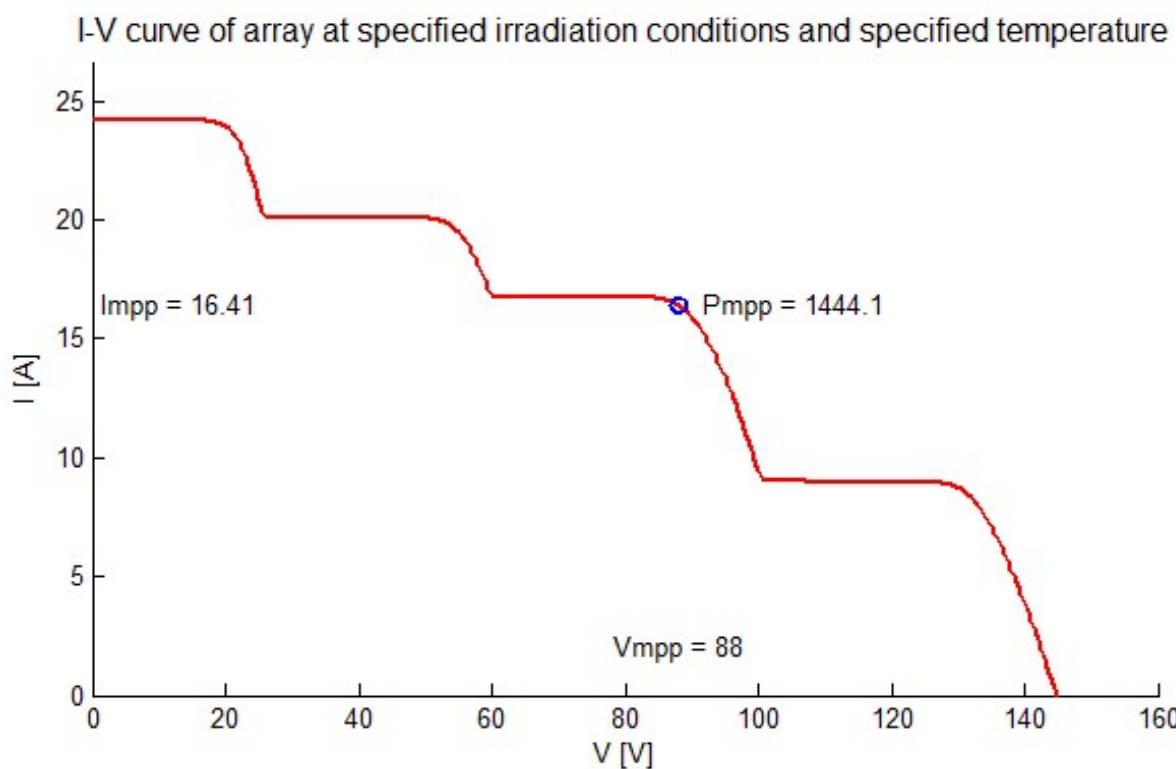
Matice **MPPT\_slow** je výstupem skriptu „*MpptSlow.m*“, a slouží jako celkový pohled na vstup a výstup simulace pro nalezení maximálního výkonového bodu MPP při zadaných teplotních podmínkách, zapojení panelů a nastavených hodnotách ozáření. Rozměry jsou 13x8, přičemž řádky 1 až 12 představují panel 01 až panel 12 a poslední třináctý řádek je vymezen pro informace o celém poli při maximálním výkonu MPP – rozumějme ideální hodnota zátěže load [ $\Omega$ ], napětí na výstupu pole [V] (identické s napětím na zátěži load), celkový proud z pole do zátěže [A] a maximální dodávaný výkon z pole do zátěže [W]. První tři sloupce obsahují hodnoty proudů  $I_{pv}$  [A], což jsou informace o nastaveném simulovaném zastínění panelů, čtvrtý sloupec informací o nastavených teplotách na panelech [ $^{\circ}\text{C}$ ], v pátém sloupci jsou informace o konfiguraci panelů, tedy k jaké řadě je panel aktuálně připojen, šestý sloupec ukazuje napětí  $V_{mpp}$  [V] - napětí na panelech při maximálním výkonu MPP, sedmý sloupec značí proud [A], který teče z panelů při maximálním výkonu a poslední osmý sloupec již znázorňuje vypočítaný maximální výkon [W], který nám panel při dané konfiguraci je schopný dodávat. Tato matice je naprosto shodná s maticí **MPPT\_fast** až na to, že v případě odpojení panelu z pole obsahuje reálné údaje o napětí  $V_{mpp}$  – tedy údaj o napětí  $V_{oc}$ , které reálně naměříme na panelu. Více o této problematice je popsáno v části, která popisuje skript „*MpptFast.m*“, a rozdíly vůči skriptu „*MpptSlow.m*“.

Tabulka 5 - Matice MPPT\_slow: vstupní a výstupní hodnoty skriptu MpptSlow.m

	Ipv1	Ipv2	Ipv3	Temp.	Row	V mpp	I mpp	P mpp
Panel 01	8,07	8,07	8,07	25	1	32	5,48	175,4
Panel 02	8,07	8,07	8,07	25	1	32	5,48	175,4
Panel 03	8,07	8,07	8,07	25	1	32	5,48	175,4
Panel 04	6,7	6,7	6,7	25	2	30,9	5,48	169,3
Panel 05	6,7	6,7	6,7	25	2	30,9	5,48	169,3
Panel 06	6,7	6,7	6,7	25	2	30,9	5,48	169,3
Panel 07	8,07	8,07	8,07	25	3	26,7	7,87	210,1
Panel 08	6,7	6,7	6,7	25	3	26,7	6,58	175,7
Panel 09	2	2	2	25	3	26,7	1,98	52,9
Panel 10	2	2	2	25	4	-1,6	5,09	-8,1
Panel 11	3	3	3	25	4	-1,6	5,46	-8,7
Panel 12	4	4	4	25	4	-1,6	5,86	-9,4
ARRAY					5,4	88	16,41	1444,1



Obrázek 56 - P-V charakteristika pole při určených podmínkách ozáření a teplot

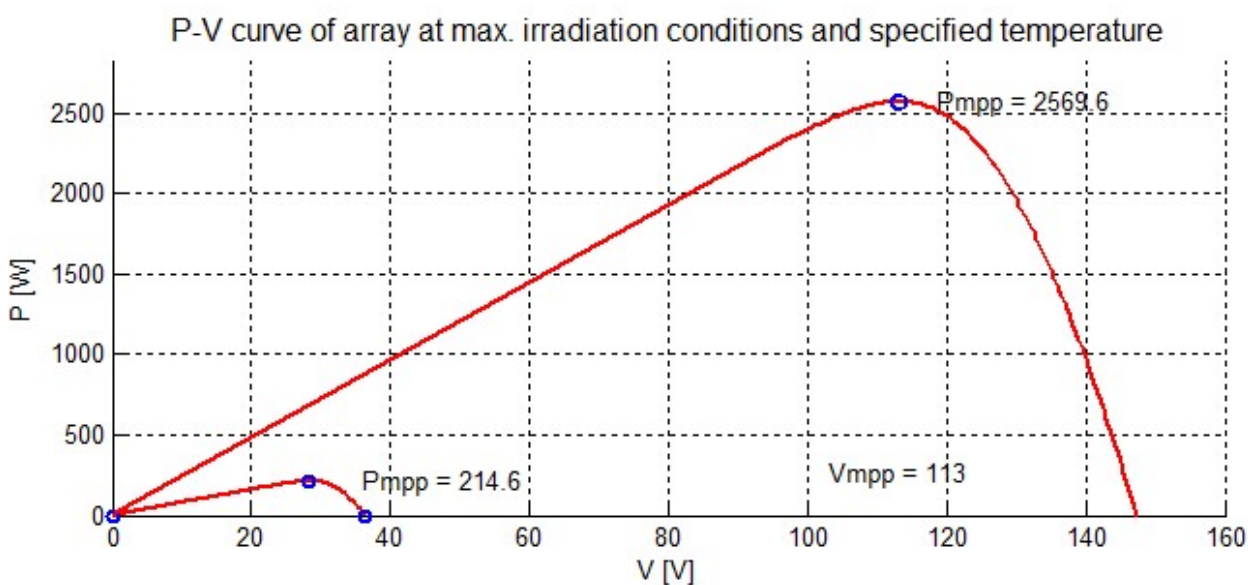


Obrázek 57 - I-V charakteristika pole při určených podmínkách ozáření a teplot

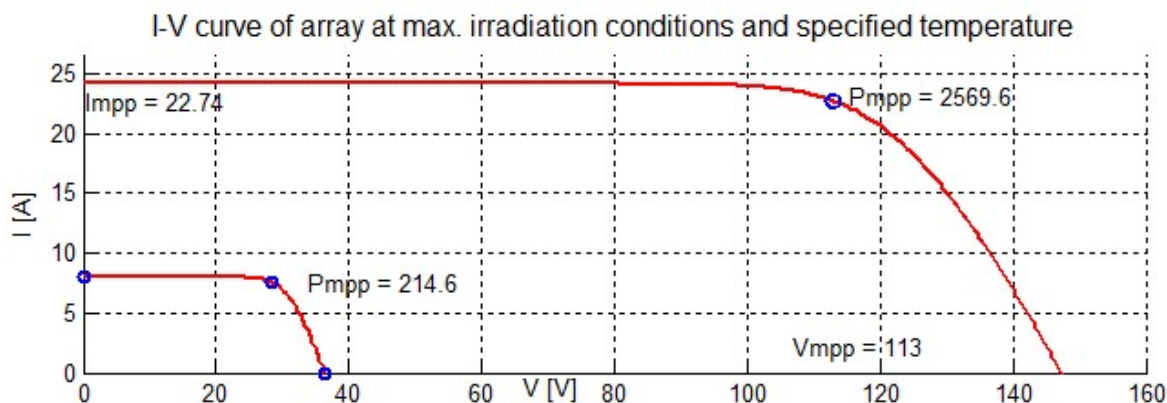
Tabulka 6 - Matice MPPT\_MS\_slow: vstupní a výstupní hodnoty skriptu MpptMsSlow.m

	Ipv1	Ipv2	Ipv3	Temp.	Row	V mpp	I mpp	P mpp
Panel 01	8,07	8,07	8,07	25	1	28,3	7,59	214,8
Panel 02	8,07	8,07	8,07	25	1	28,3	7,59	214,8
Panel 03	8,07	8,07	8,07	25	1	28,3	7,59	214,8
Panel 04	8,07	8,07	8,07	25	2	28,3	7,59	214,8
Panel 05	8,07	8,07	8,07	25	2	28,3	7,59	214,8
Panel 06	8,07	8,07	8,07	25	2	28,3	7,59	214,8
Panel 07	8,07	8,07	8,07	25	3	28,3	7,59	214,8
Panel 08	8,07	8,07	8,07	25	3	28,3	7,59	214,8
Panel 09	8,07	8,07	8,07	25	3	28,3	7,59	214,8
Panel 10	8,07	8,07	8,07	25	4	28,3	7,59	214,8
Panel 11	8,07	8,07	8,07	25	4	28,3	7,59	214,8
Panel 12	8,07	8,07	8,07	25	4	28,3	7,59	214,8
ARRAY					5	113	22,74	2569,6

Matice **MPPT\_MS\_fast** a **MPPT\_MS\_slow** jsou výstupem skriptů „MpptMsFast.m“, a „MpptMsSlow.m“, a slouží jako celkový pohled na vstup a výstup simulace pro nalezení maximálního výkonového bodu při zadaných teplotních podmínkách a zadané konfiguraci panelů při maximálním možném ozáření všech panelů, tedy při nastaveném Ipv proudu 8.07A každého modulu u všech panelů. Formát těchto matic je naprosto stejný jako u předchozí matice. Vstupní data jsou vždy maximální hodnoty proudů Ipv a výstupní hodnoty odpovídají nejlepším možným výsledkům, kterých lze při dané konfiguraci panelů a daných teplotách dosáhnout.



Obrázek 58 - P-V charakteristika pole a panelu při max. ozáření a určených teplotách



Obrázek 59 - I-V charakteristika pole a panelu při max. ozáření a určených teplotách

Matice **MPPT\_fast** je výstupem skriptu „*MpptFast.m.*“, a slouží jako celkový pohled na vstup a výstup rychlejší simulace pro nalezení maximálního výkonového bodu při zadaných teplotních podmínkách, zapojení panelů a nastavených hodnotách ozáření. Matice je rozměrově a významově naprosto shodná s maticí **MPPT\_slow** až na to, že se zde z důvodu urychlení simulace vyskytují nesprávné hodnoty napětí  $V_{mpp}$ . Pokud je jakýkoliv panel odpojen z pole, rozumějme v matici `PanelsConnectToRow` je nakonfigurovaný jako 0, údaj o napětí je nulový. Tato hodnota je však nesprávná. Ve skutečnosti, pokud je v rekonfiguratoru seplé DPDT relé a panel je připojen volně na větev (bez dalšího napojení na řadu), tak v této větvi naměříme napětí  $V_{OC}$ , voltage open circuit – napětí na prázdko, které může dosahovat hodnot až 36V. V této matici je toto napětí nulové, neboť skript „*MpptFast.m.*“ přiřazuje hodnoty napětí na panelech podle napětí na řadě, které získá ze simulace. Pokud je panel odpojen, přiřadí se mu nulová hodnota napětí. Více o této problematice je popsáno v části, která popisuje jednotlivé skripty.

Tabulka 7 - Matice **MPPT\_fast**: vstupní a výstupní hodnoty skriptu *MpptFast.m*

	Ipv1	Ipv2	Ipv3	Temp.	Row	V mpp	I mpp	P mpp
Panel 01	8,07	8,07	8,07	25	1	30,6	6,51	199,2
Panel 02	8,07	8,07	8,07	25	1	30,6	6,51	199,2
Panel 03	8,07	8,07	8,07	25	0	0	0	0
Panel 04	6,7	6,7	6,7	25	2	27,4	6,51	178,4
Panel 05	6,7	6,7	6,7	25	2	27,4	6,51	178,4
Panel 06	6,7	6,7	6,7	25	0	0	0	0
Panel 07	8,07	8,07	8,07	25	3	29,7	7,04	209,1
Panel 08	6,7	6,7	6,7	25	3	29,7	5,99	177,9
Panel 09	2	2	2	25	0	0	0	0
Panel 10	2	2	2	25	4	-1,8	6,34	-11,4
Panel 11	3	3	3	25	4	-1,8	6,67	-12,0
Panel 12	4	4	4	25	0	0	0	0
ARRAY					6,6	86	13,02	1119,7

## 7.7 MEASURE simulace - popis výstupních hodnot v matici

Tabulka 8 - Matice MEASURE\_ALL: vstupní a výstupní hodnoty měřících skriptů

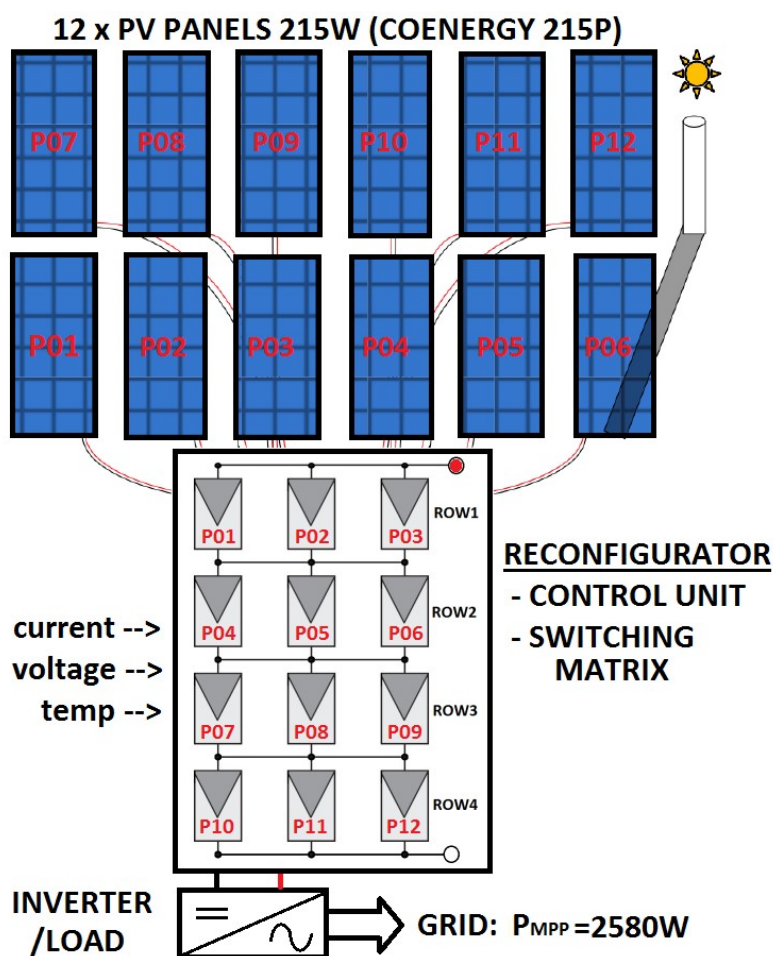
	I <sub>pv1</sub>	I <sub>pv2</sub>	I <sub>pv3</sub>	Temp.	Row	V actual	I actual	P actual	V <sub>oc</sub>	I <sub>sc</sub>
Panel 01	8,07	8,07	8,07	25	1	30,6	6,52	199,5	36,8	8,07
Panel 02	8,07	8,07	8,07	25	1	30,6	6,52	199,5	36,8	8,07
Panel 03	8,07	8,07	8,07	25	0	0	0,01	0,0	36,8	8,07
Panel 04	6,7	6,7	6,7	25	2	27,4	6,52	178,6	36,5	6,7
Panel 05	6,7	6,7	6,7	25	2	27,4	6,52	178,6	36,5	6,7
Panel 06	6,7	6,7	6,7	25	0	0	0,01	0,0	36,5	6,7
Panel 07	8,07	8,07	8,07	25	3	29,7	7,04	209,1	36,7	8,07
Panel 08	6,7	6,7	6,7	25	3	29,7	6	178,2	36,7	6,7
Panel 09	2	2	2	25	0	0	0,01	0,0	34,7	2
Panel 10	2	2	2	25	4	-1,8	6,35	-11,4	35	2
Panel 11	3	3	3	25	4	-1,8	6,68	-12,0	35	3
Panel 12	4	4	4	25	0	0	0,01	0,0	35,8	4
ARRAY					6,6	85,9	13,04	1120,1		

Matice **MEASURE\_ALL** slouží jako celkový pohled na vstupní nastavené simulační podmínky (ozáření a teploty) a výstupní naměřené hodnoty při definované zátěži load. V této matici jsou obsaženy simulační výstupy skriptů „*GetPanelsActualValuesSIM*„ „*GetPanelsOpenCircuitVoltagesSIM*„ a „*GetPanelsShortCircuitCurrentsSIM*„. Rozměry matice jsou 13x10, přičemž řádky 1 až 12 představují panel 01 až panel 12 a poslední třináctý řádek je vymezen pro informace o celém poli. První tři sloupce obsahují hodnoty proudů I<sub>pv</sub> [A], což jsou informace o nastaveném simulovaném zastínění panelů, čtvrtý sloupec informaci o nastavených teplotách na panelech [°C] a v pátém sloupci je informace o tom, k jaké řadě je panel aktuálně připojen. V šestém až osmém sloupci jsou uvedeny naměřené hodnoty napětí a proudů a dopočítané výkony jednotlivých PV panelů. V devátém a desátém sloupci jsou pak obsaženy hodnoty naměřených napětí nakrátko (V<sub>OC</sub>) a hodnoty naměřených proudů na krátko (I<sub>SC</sub>). Ve spodním třináctém řádku (ARRAY) jsou znázorněny celkové údaje PV pole. Na pozici (13,5) je uvedena nastavená aktuální hodnota připojené zátěže load [Ω], dále je uvedeno napětí na výstupu pole [V] (identické s napětím na zátěži load), celkový proud do zátěže [A] a nakonec dopočítaný celkový výkon z pole do zátěže [W].

**Tato matice je celkovým výstupem měřících funkcí simulátoru a poskytuje nám úhledně seřazené vstupní a výstupní parametry simulace, z čehož je možné snadno pochopit nelineární chování celého pole při různých provozních podmínkách, rozumějme při různých teplotách a ozáření PV panelů.**

## 8 PV pole – měření a aktuální rekonfigurační strategie

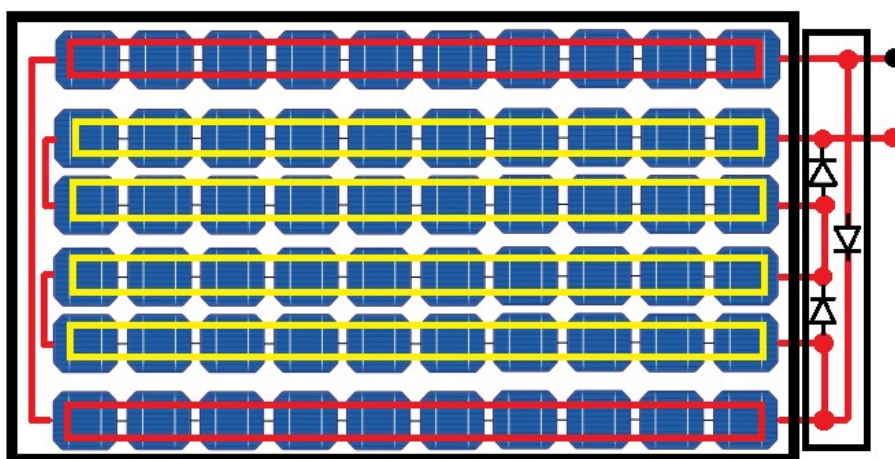
Za účelem testování a vývoje byl zpočátku navrhnout a zkonstruován rekonfigurátor, jehož funkce je detailně popsána v šesté kapitole této práce. Rekonfigurátor obsahuje přepínací matici, která umožňuje PV panely řadit do TCT topologie. Základní konfigurace PV pole je 3 x 4 TCT, což znamená, že řadu tvoří 3 paralelně spojené PV panely a dále jsou tyto čtyři řady zapojené do pomyslného stringu. V tomto zapojení produkuje PV pole při standardních podmínkách maximální výkon  $P_{MPP} = 2580W$  ( $U_{MPP} = 113V$ ,  $I_{MPP} = 22,8A$ ). Závažné omezení představují zkratovací relé jednotlivých větví, které jsou disignované pouze na proud 8A. V době hardwarového návrhu zařízení byly k dispozici jiné zkušební PV panely s proudem nakrátko 5.8A. Tyto panely byly bohužel při bouři zničeny a proto musely být nahrazeny novými, které mají vyšší výkon a vyšší proud nakrátko - COENERGY 215P,  $I_{SC} = 8.1A$ . Při vývoji software tedy byly k dispozici nové PV panely, které v případě dosažení maximálního výkonu a jejich zkratování pomocí SC relé mohou zničit relé přepínací matice. Toto bylo řešeno dočasným natažením děrované sítě přes všechny PV panely, za účelem omezení jejich výkonu (obrázek 64 PV pole). Takto „upravené,, panely dodávají při běžných podmínkách proud nakrátko kolem 6.5A, ovšem i tak došlo několikrát k poškození SC relé vlivem vysokých proudů.



Obrázek 60 – Blokové schéma zapojení PV elektrárny s rekonfigurátorem

## 8.1 Použité PV panely

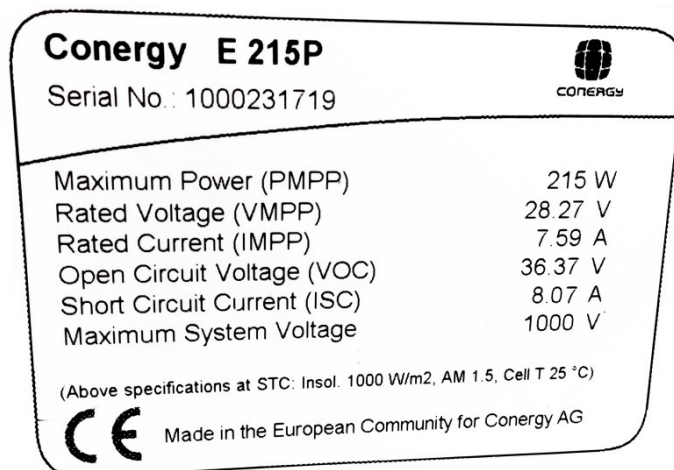
Jak již bylo uvedeno dříve, v zapojení používáme PV panely Conergy PowerPlus 215P. Použití těchto panelů je dáno především tím, že byly dodány zdarma od sponzora. V dnešní době se jedná o panely s průměrnými parametry - mají výkon 215W, obsahují polykrystalické články a váží 20 Kg. Jedná se o sériové zapojení šedesáti jednotlivých PV článků, kdy je toto rozděleno na 3 vnitřní moduly, jejichž výstupy jsou vyvedeny do přípojovacího boxu. V tomto boxu jsou pro ochranu jednotlivých modulů zapojeny 3x BP diody P100M. Za povšimnutí stojí také způsob zapojení. Krajní řady PV článků (levá a pravá řada u rámu) jsou zapojeny ve společném modulu. Prostřední čtyři řady pak tvoří další dva moduly. Toto je provedeno z důvodu případného zastínění obou krajních řad, kdy dojde k překlenutí pouze jednoho modulu.



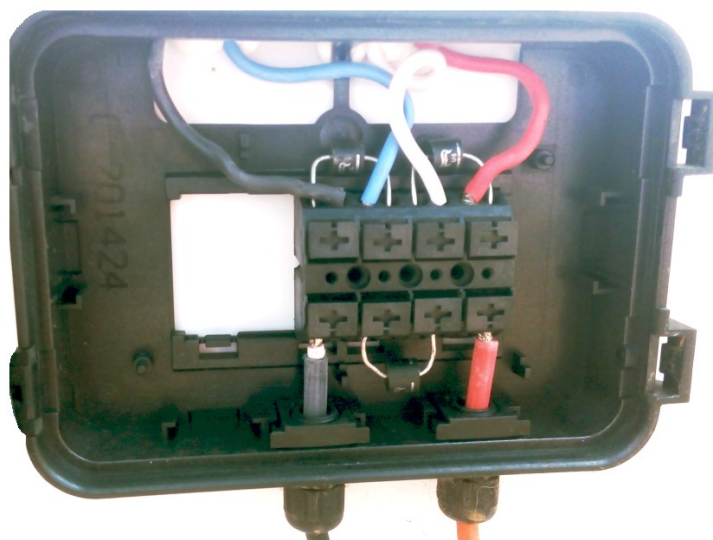
Obrázek 61 – PV Panel Conergy E215P – vnitřní elektrické zapojení

Tabulka 9 - PV Panel Conergy E215P – elektrické parametry při STC [datasheet]

Nominal output (P <sub>nom</sub> )	215 W
Performance tolerance	-0/+2.5 %
Module efficiency (P <sub>nom</sub> )	13.21 %
Voltage at maximum performance (U <sub>mpp</sub> )	28.55 V
Current at maximum performance (I <sub>mpp</sub> )	7.63 A
Off-load voltage (U <sub>oc</sub> )	35.54 V
Short-circuit current (I <sub>sc</sub> )	8.11 A
Temperature coefficient (P <sub>mpp</sub> )	-0.44 %/°C
Temperature coefficient absolute (U <sub>oc</sub> )	-0.117 V/°C
Temperature coefficient in percent (U <sub>oc</sub> )	-0.33 %/°C
Temperature coefficient absolute (I <sub>sc</sub> )	4.73 mA/°C
Temperature coefficient as a percentage (I <sub>sc</sub> )	0.059 %/°C



Obrázek 62 - PV Panel Conergy E215P – elektrické parametry [štítek panelu]



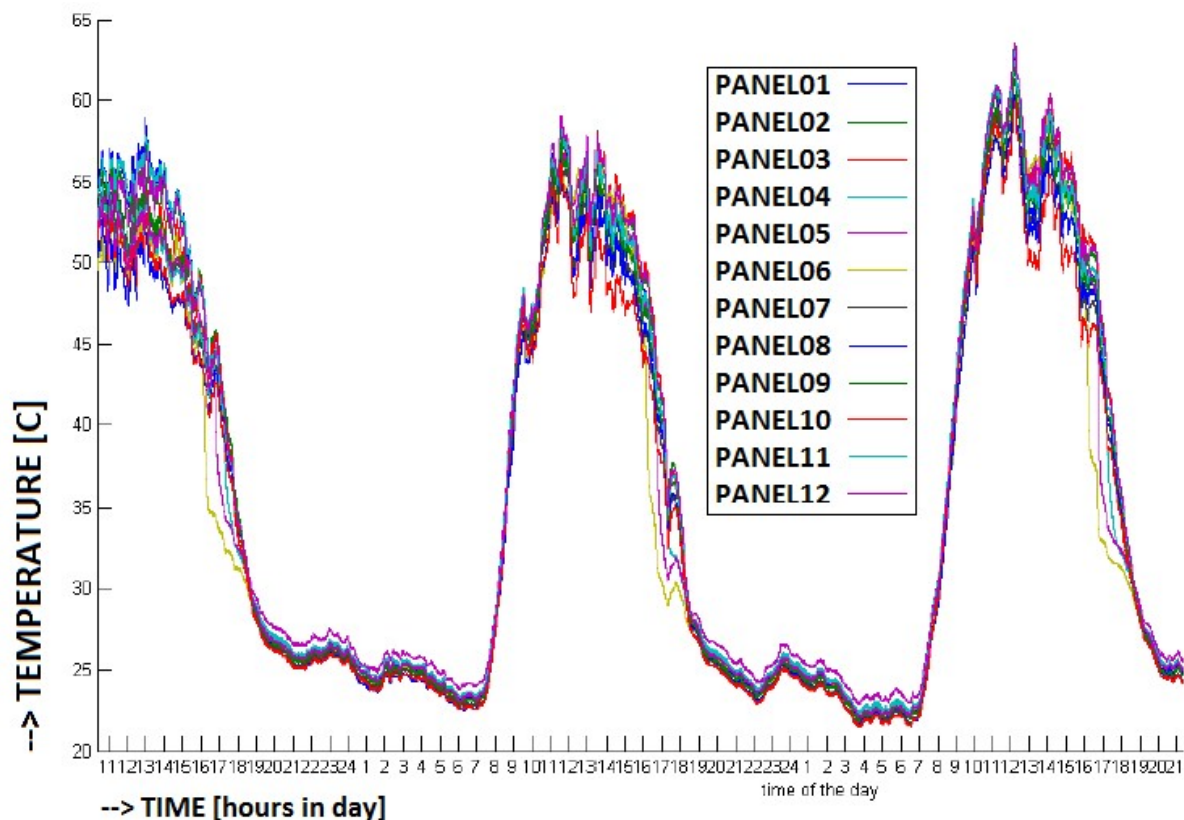
Obrázek 63 - PV Panel Conergy E215P – Zapojení BP diod v přípojovacím boxu

## 8.2 Měření parametrů PV pole v základní 3x4 TCT konfiguraci

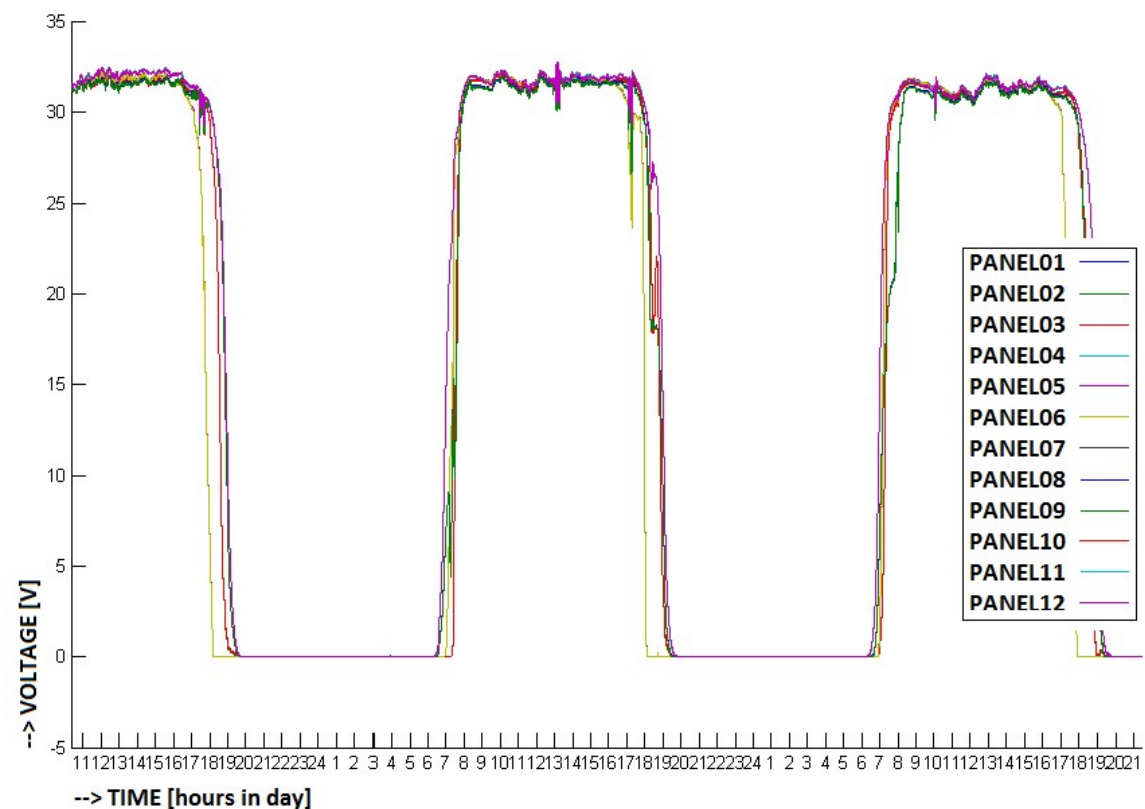
Konfigurace pole 3x4 TCT je v tomto případě výchozí propojení PV panelů, kdy PV pole poskytuje optimální hodnoty napětí a proudu pro střídač. Na obrázku 60 je zapojení PV elektrárny, kdy jsou všechny DPDT relé seplé a DPST relé přepínací matice připojují panely dle TCT konfigurace. Na obrázku 64 je vyfoceno reálné zapojení PV panelů, které jsou umístěny na střeše univerzitní budovy. Je zde možné vidět zakrytí PV panelů děrovanou sítí, za účelem snížení jejich proudu nakrátko. Od každého PV panelu vede kabeláž do malého přístřešku, kde je umístěn rekonfigurátor, střídač a spotřebič. Umístění panelů je zvoleno naschvál na tomto místě. Od 16h dochází vlivem stínu od přístřešku k postupnému zakrývání panelů 06, 05, 04. Prvně je zastíněn částečně panel 06, stín se dále zvětšuje, až zakrývá celý panel 06 a částečně i panel 05. V poslední fázi, cca po 17h, jsou panely 06 a 05 zcela zastíněné a stín postupně zakrývá panel 04, kdy kolem 18h dojde k úplnému zakrytí tohoto panelu. Ostatní panely přestávají produkovat energii kolem 19h. Následující grafy ukazují denní přehled naměřených hodnot.



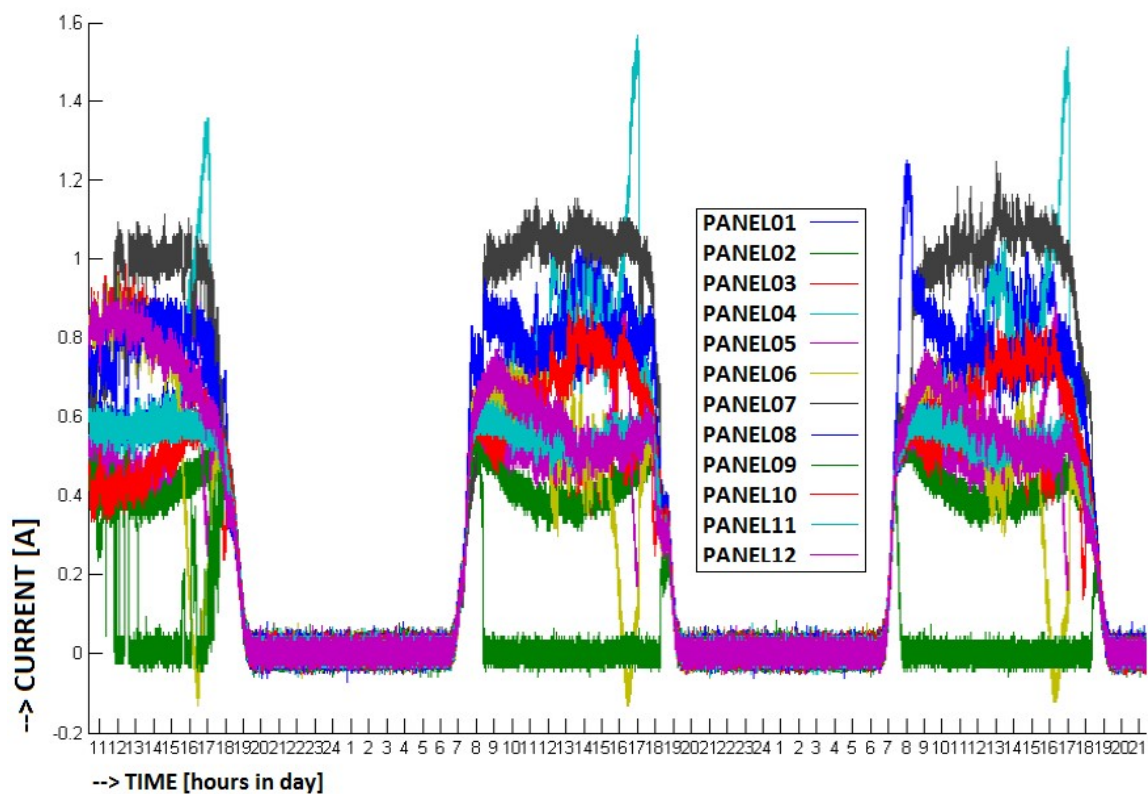
Obrázek 64 - PV pole umístěné na střeše budovy DEIM, univerzita PALERMO, ITALIE



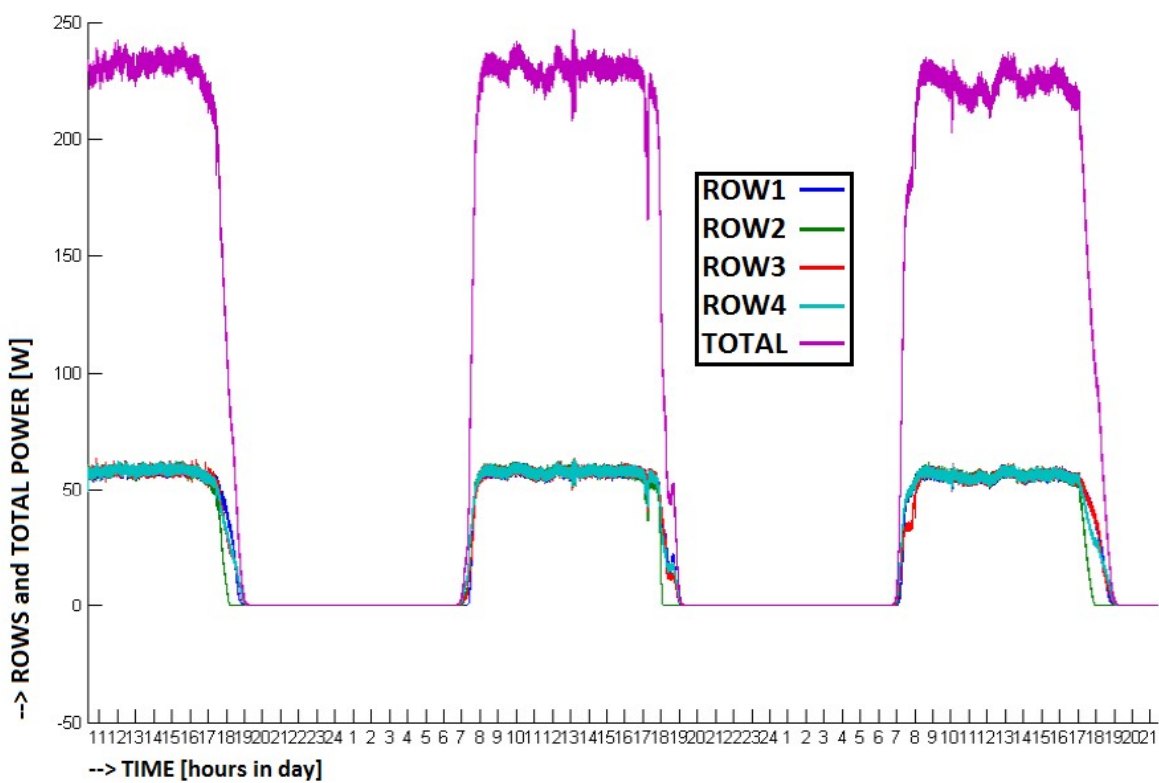
Obrázek 65 – Naměřené teploty PV panelů při základním zapojení 3x4 TCT s zátěží 230W



Obrázek 66 – Naměřené napětí PV panelů při základním zapojení 3x4 TCT s zátěží 230W



Obrázek 67 – Naměřené proudy PV panelů při základním zapojení 3x4 TCT s zátěží 230W



Obrázek 68 – Výkony řad a celkový příkon do zátěže 230W při zapojení 3x4 TCT

Pro účely měření a následné zkušební rekonfigurace byla na výstup střídače připojena malá zátěž 230W. Při rovnoměrném ozáření všech panelů a základní konfiguraci 3x4 TCT, dodávají do zátěže všechny PV panely stejný výkon. Jednoduchým výpočtem lze určit, že každý panel dodává přibližně 19W (230:12) a každá řada poté přibližně 57W. Při tomto zatížení je napětí všech panelů přibližně 32V a výstupní proud 0.6A. Celkové napětí PV pole je 128V (4x32; 4 řady v serii) a celkový proud z PV pole do zátěže 1.8A (3x0.6; 3panely zapojené paralelně). Tyto hodnoty jsou pozorovatelné v grafech přibližně do 16h, poté dochází vlivem stínu od přístřešku k postupnému zakrývání panelů 06, 05, 04, které jsou v základním TCT zapojení napojeny do stejné řady (row2).

Přehled: rovnoměrně ozářené PV pole při konfiguraci 3x4 TCT se zátěží 230W:

- Panel: 19W,32V,0.6A
- Řada: 57W,32V,1.8A
- Pole: 230W,128V,1.8A

Obrázek 65 ukazuje graf, který znázorňuje měřené teploty všech PV panelů během dne. Pokud panely nejsou osvětleny, naměříme teplotu okolního vzduchu. Se vzrůstající intenzitou ozáření se rovněž zvyšuje i pracovní teplota PV článků. Při maximálním ozáření pracují všechny PV panely při průměrné teplotě 55 °C. V grafu je dobře vidět, že při zastínění PV panelů 06,05 a dále i 04 dochází po 16h ke snižování jejich teploty.

Na obrázku 66 je znázorněn graf napětí PV panelů. Protože jsou panely napojeny paralelně, jsou pozorovatelné pouze čtyři křivky, které odpovídají napětí na jednotlivých řadách. Nejzajímavější je v tomto případě řada 2 (row2), na kterou jsou napojeny panely 06, 05 a 04 u kterých dochází k postupnému zastínění. Od 16h do 17h je pozorovatelná pouze malá změna napětí z průměrných 32V na 30V, neboť do 17h je v této řadě panel 04 stále ozářen a „dopuje“, další dva afektované panely. Po 17h dojde k zastínění i tohoto panelu a poté je dobře pozorovatelný strmý pokles napětí až na hodnotu 0V.

Obrázek 67 představuje graf výstupních proudů jednotlivých panelů. Je zde velice hezky vidět, že při zastínění panelů 06 a dále i 05 dochází k poklesu jejich výstupního proudu a zároveň vzrůstá výstupní proud panelu 04, který jako jediný v řadě produkuje po 17h energii. Kolem 18h dochází k plnému zastínění i posledního panelu v řadě (panel 04) a v tom důsledku také k celkovému poklesu všech proudů. Je zde důležité podotknout, že i při zastíněných panelech (nyní se bavíme o časovém horizontu 18h-19h) dochází vlivem nízké intenzity ozáření stále k malé produkci proudu - přibližně 500mA. Napětí na panelech je tedy stále nad 30V. Z tohoto důvodu a také z důvodu, že máme připojenou nízkou zátěž nedochází k aktivaci BP diod. Dále je na tomto grafu pozorovatelný proud panelu 09. Při tomto měření byl celý tento panel ručně zakrýván kartonem, za účelem experimentálního zkoumání chování pole. Při zastínění panelu 09 dojde ke zvýšení proudů panelů 08 a 07, což je správně, neboť jsou tyto panely zapojeny ve společné řadě.

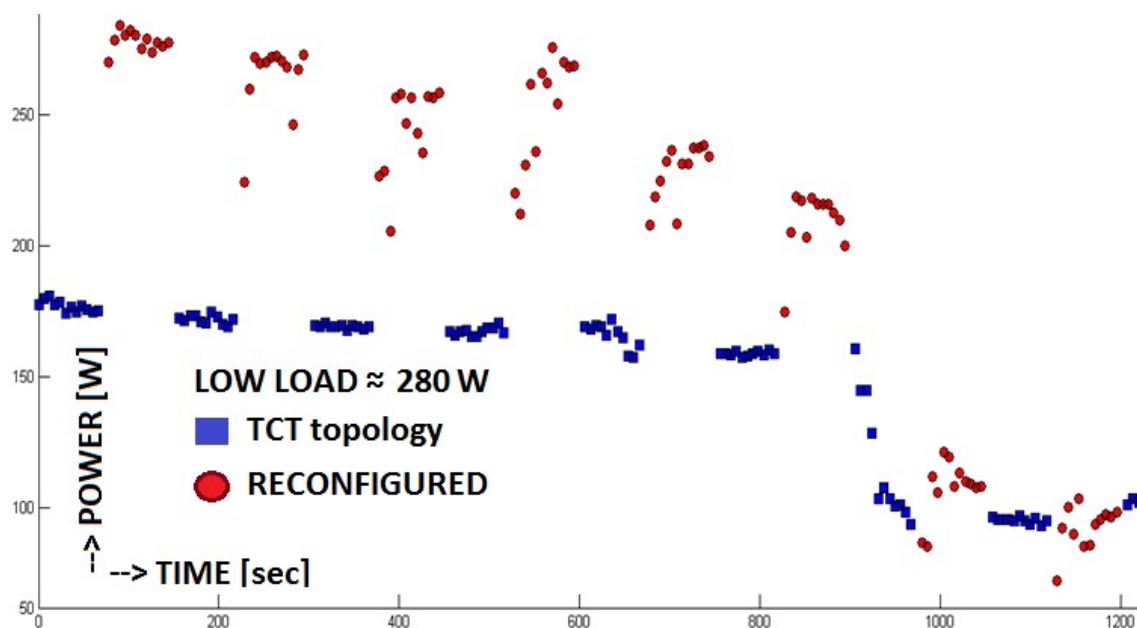
Obrázek 68 ukazuje graf s jednotlivými výkony řad a s celkovým výkonem pole, rozumějme příkonem do zátěže. Od 18h je zde pozorovatelný značný pokles výkonu druhé řady (ROW2) a v tom důsledku i následný pokles celkového výkonu (TOTAL).

Shrnutí poznatků z měření 3x4 TCT PV pole se zátěží 230W při částečném zastínění:

Při běžném slunečném dni, při plném ozáření PV panelů které jsou zakryty sítí, naměříme proud nakrátko  $I_{SC}$  průměrně 6.3A a napětí naprázdno  $V_{OC}$  průměrně 34V. Při zatažené obloze a rovněž při nízké intenzitě ozáření (v raních a večerních hodinách), naměříme hodnoty  $I_{SC}$  průměrně 0.4 až 0.6A a napětí naprázdno  $V_{OC}$  průměrně 30 až 32V. Z toho plyne, že proud  $I_{SC}$  je téměř lineárně závislý na ozáření, zatímco napětí  $V_{OC}$  se v tomto případě mění se snižujícím se ozářením minimálně. I při velmi nízkém ozáření naměříme téměř vždy napětí  $V_{OC}$  přes 30V. To platí i v případě částečně zastíněného PV panelu, kdy bez připojené zátěže, nebo s velmi malou zátěží (viz toto měření) nebudou BP diody aktivní a stále bude možné měřit napětí  $V_{OC}$  přes 30V, tedy jako by všechny moduly byly stejně ozářené. Naměřené teploty PV panelů závisí primárně na intenzitě jejich ozáření. Při rovnoměrném ozáření pole jsou přibližně shodné a k pozorovatelné změně dochází při poklesu či zvýšení ozáření, ovšem s určitou časovou hysterézí.

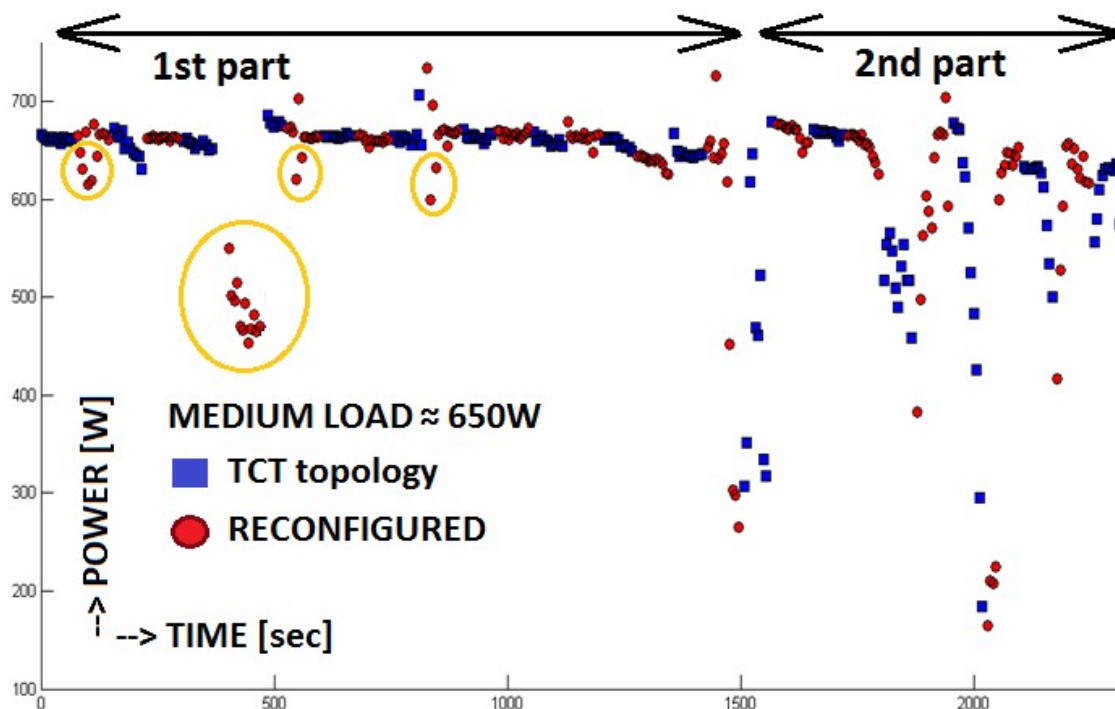
### 8.3 Aktuálně používaný rekonfigurační algoritmus

Ve zkušebním reálném provozu měří rekonfigurátor každou sekundu teplotu, napětí a výstupní proud jednotlivých PV panelů, které jsou stále zapojeny v aktuální konfiguraci. Ozáření jednotlivých panelů je pak vypočítáváno dle odvozené rovnice pro výpočet ozáření  $G$ , uvedené v kapitole 3.3 této práce. Na základě vypočítaných hodnot  $G$  je provedena každých 8 sekund rekonfigurace panelů, která je založena na TCT rekonfigurační strategii, jejíž základní myšlenka je znázorněna na obrázku 23 v kapitole 5.2.2 této práce. Rekonfigurace je prováděna z vývojových důvodů každých 8 sekund proto, aby bylo možné pomocí uměle vytvořeného zastínění v reálném čase sledovat průběh rekonfigurace a funkci zařízení. Do běžného provozu by se rekonfigurační interval prodloužil například na 10-30 minut.



Obrázek 69 – Výstupní výkon pole při rekonfiguraci PV panelů. Zátěž 280W

Na obrázku 69 je zobrazena funkce rekonfigurátoru při použití malé 280W zátěže. Při tomto experimentálním zkoušení rekonfigurátoru bylo zapojeno do pole všech 12 PV panelů. Následně byly PV panely náhodně zakryty sítěmi a papírovými kartony tak, aby dodávaný výkon byl menší než 200W. Tento stav je v grafu označen modrými body a jedná se výchozí TCT zapojení. Dále byly náhodně odkrývány sítě a kartony a sledovala se funkce zařízení. Rekonfigurátor téměř vždy přepojil panely tak, že došlo k nárůstu výkonu. V grafu je rovněž vidět pokles výstupního výkonu pole na 120W, což bylo způsobeno úmyslným snížením příkonu spotřebiče na výstupu měniče.



Obrázek 70 - Výstupní výkon při rekonfiguraci PV panelů. Zátěž 650W

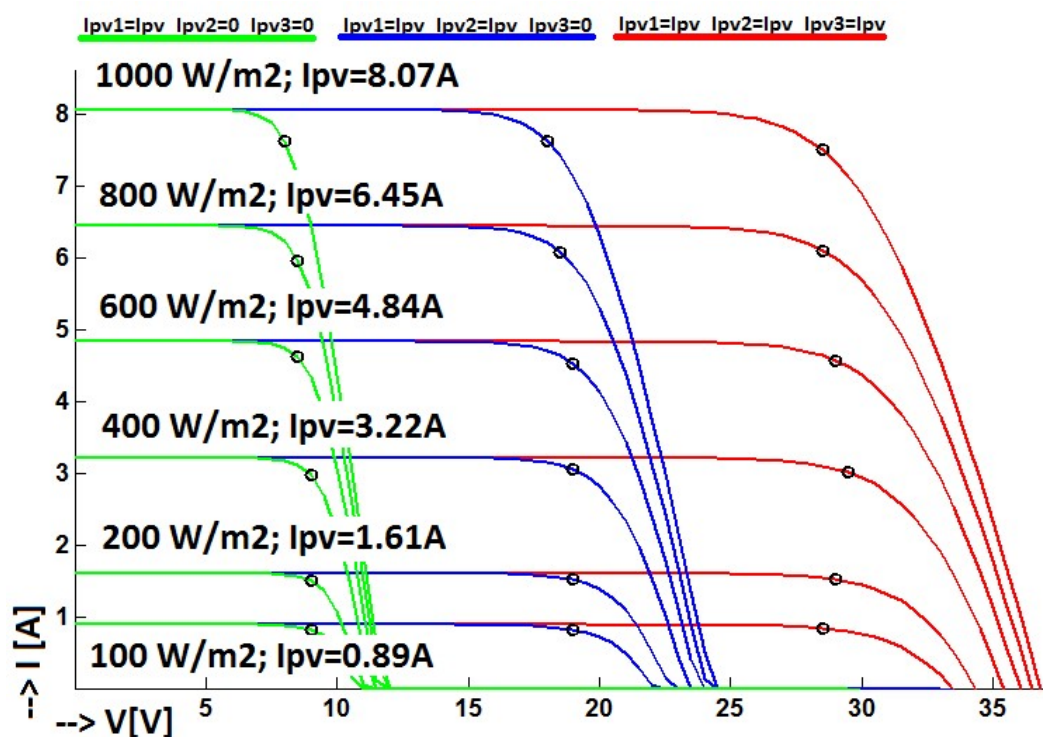
Obrázek 70 představuje výstup druhého experimentálního zkoušení zařízení, kdy byla připojena zátěž 650W. Tento experiment byl prováděn při plné intenzitě ozáření při jasném počasí. Program v zařízení se upravil tak, aby se každých 80 sekund přepnul mód. První mód je konfigurace panelů v TCT topologii a druhý mód je konfigurace panelů podle rekonfigurační strategie. Při TCT konfiguraci je do zařízení dodáváno právě 650W. V první části experimentu byl zakryt v každé řadě pouze jeden panel. Graf ukazuje nefunkčnost rekonfiguračního algoritmu, neboť po rekonfiguraci dochází k poklesu výkonu a k horším výsledkům než při TCT zapojení. V druhé části experimentu se zakrývaly panely ve společné řadě, přičemž toto způsobovalo značný výkonový pokles, neboť se omezoval celkový výstupní proud z pole. Z grafu je vidět, že díky rekonfiguraci docházelo k navýšení výkonu. **Celkově lze shrnout, že navržený rekonfigurační algoritmus je v běžném provozu nepoužitelný, neboť mnohdy nedochází k optimalizaci celkového výkonu. Naměřené hodnoty jsou sice správné, ale z důvodu použití BP diod a propojení panelů při měření je nelze použít pro výpočet ozáření podle uvažované rovnice.**

## 8.4 Měření parametrů PV pole v reálném provozu - specifikace problému

Předmětem zájmu bylo navrhnout takový algoritmus, který na základě měření parametrů celého pole při vzájemném propojení panelů určí správnou rekonfiguraci.

Jak je vidět z grafu na obrázku 70 v předchozí kapitole, v reálném provozu je navržený rekonfigurační algoritmus, pracující na bázi výpočtu ozáření G z naměřených hodnot nepoužitelný. Je to dáno především tím, že data jsou měřena při vzájemném propojení panelů a tím pádem se měřené parametry výrazně ovlivňují a jsou vůči parametrům naměřených u odpojených jednotlivých panelů zkreslené.

Jedná se především o napětí na řadě, které je u všech paralelně spojených panelů stejné i přesto, že některý z panelů dodává značně menší výstupní výkon. Dále je problémem to, že každý modul PV panelu je překlenut BP diodou. Výpočetní vztah ozáření G však nijak nezahrnuje popis chování PV panelu opatřeného BP diodami, neboť nejsou k dispozici data, pomocí kterých by bylo možné v modelu toto chování popsat (napětí jednotlivých modulů, případně proud jednotlivými BP diodami).



Obrázek 71 – Simulace PV panelu při nerovnoměrném ozáření při různých úrovních

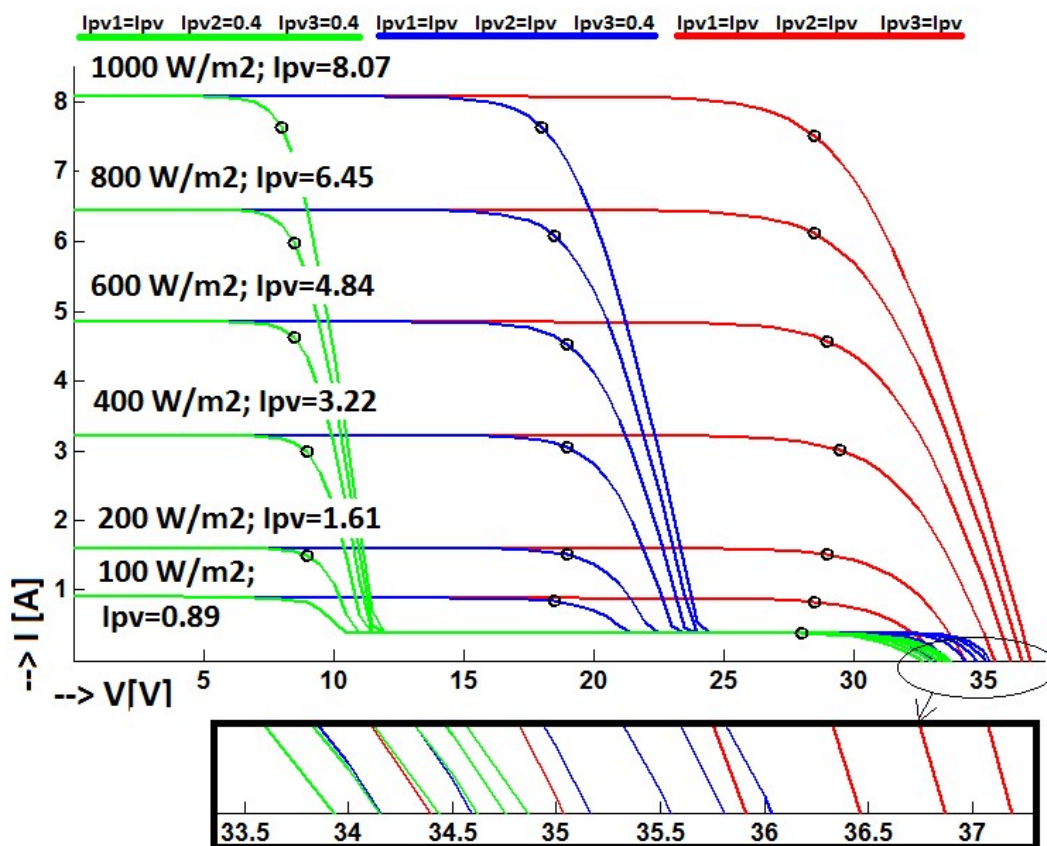
Na obrázku 71 a dále i na obrázku 72 je zobrazen simulační graf jednoho samotného PV panelu. Z těchto grafů je možné odečíst na horizontální ose napětí  $V_{OC}$  a na vertikální ose proud  $I_{SC}$ . První graf znázorňuje situaci, kdy při částečném zastínění jednotlivých modulů dojde k zřetelnému poklesu napětí  $V_{OC}$ . To se stane v tom případě, pokud nám daný string (modul v PV panelu) produkuje nulový proud. K tomu však v reálném provozu nedochází pokaždé. Například při běžném slunném dni, při zastínění všech modulů, stále dochází ke generování proudu v řádu stovek mA. Takovou situaci

znázorňuje druhý graf na obrázku 72. Při měření  $I_{SC}$  a  $V_{OC}$  v reálném provozu může dojít až ke krajní situaci, že pro plně ozářený panel naměříme naprosto shodné hodnoty jako pro panel částečně zastíněný. Pakliže dojde při vyšším proudovém odběru k aktivaci BP diod, nebo je více panelů napojeno do paralelní kombinace, naměřené hodnoty jsou pro správné určení ozáření podle zmiňované rovnice nepoužitelné. Hodnota  $V_{OC}$  se i při velkém snížení ozáření mění velmi málo. Hodnota  $I_{SC}$  se vlivem BP diod při částečném zastínění panelu nemění.

Pokud bychom se omezili na použití redukované rovnice (3.3.5) pro výpočet ozáření  $G$ , pouze pomocí napětí  $V_{OC}$  a teploty  $T$ , tak bychom museli každý panel měřit odpojený a samostatně. Navíc takto naměřená hodnota  $V_{OC}$  bude použitelná pouze v případě rovnoměrného snížení úrovně ozáření, při částečném nerovnoměrném zastínění panelu je značně zkreslena. Důležitá je i velká přesnost naměřené teploty  $T$ .

Pokud bychom se omezili na použití redukované rovnice (3.3.6) pro výpočet ozáření  $G$ , pouze pomocí proudu  $I_{SC}$  a teploty  $T$ , tak tato rovnice bude použitelná pouze v případě, kdy nejsou aktivní BP diody, tedy pouze při snížené úrovni ozáření, né při částečném nerovnoměrném zastínění panelu.

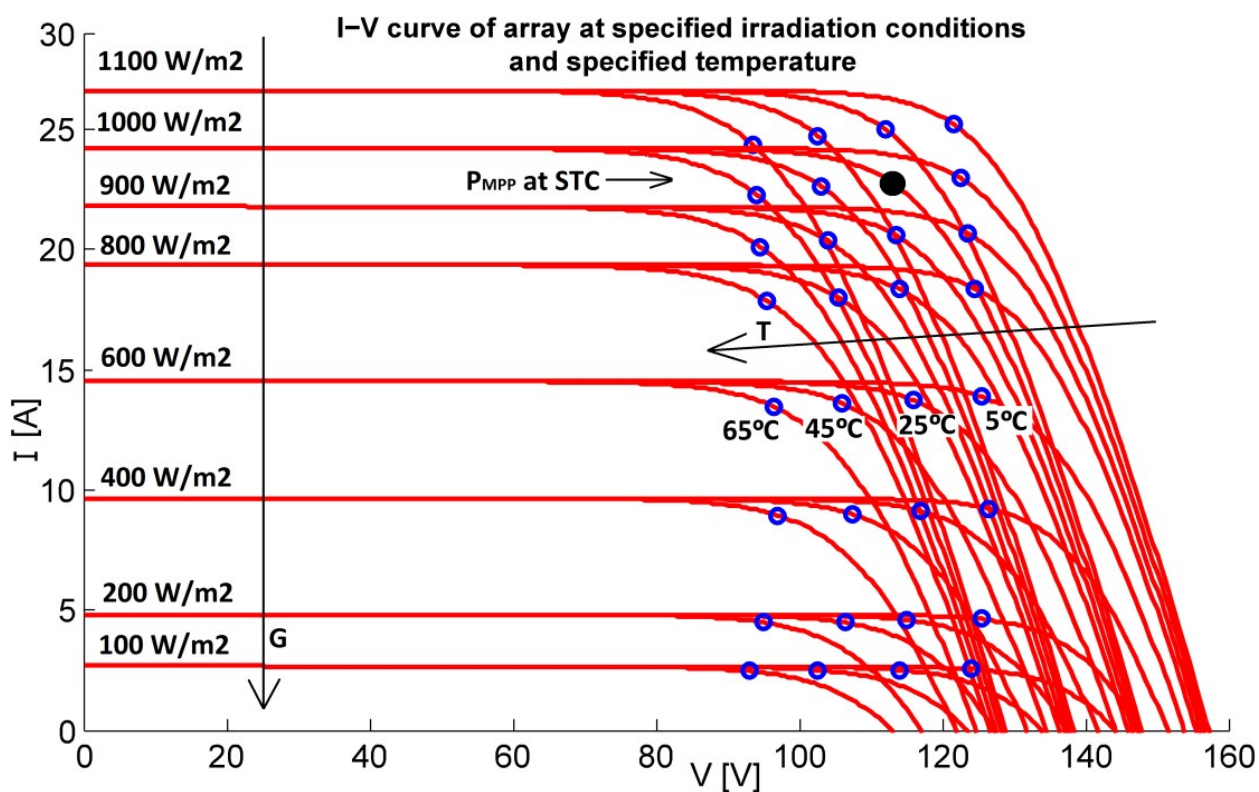
Použití rekonfiguračního algoritmu pro dané PV pole je na základě rovnice pro výpočet ozáření  $G$  z naměřených hodnot  $I$ ,  $U$ ,  $T$  případně  $V_{OC}$  a  $T$  nebo  $I_{SC}$  a  $T$  nemožné. Algoritmus proto bude muset pracovat na jiných principech.



Obrázek 72 - Simulace PV panelu při nerovnoměrném ozáření při různých úrovních

## 9 Simulátor – praktické použití, výstupy, simulace zastínění

Dokumentace ohledně ovládání simulátoru a podrobný popis výstupních hodnot je uveden v kapitole 7.5 této práce. V této kapitole je uveden ilustračně pouze jeden ukázkový příklad použití simulátoru při náhodně zvoleném zastínění PV pole. V reálném provozu se však vyskytují daleko různorodější pracovní parametry jednotlivých PV panelů. Simulátor je navržený s ohledem na to, aby bylo možné různé provozní parametry simulovat dávkově s použitím programového prostředí Matlab. Tento simulační nástroj dokáže najít pro jakékoliv zapojení bod MPP pomocí MPPT algoritmů. Jedná se tedy o simulování funkce MPP trackérů v reálném zapojení. Další funkce simulátoru je možnost změření napětí a proudů jednotlivých panelů při daných provozních podmínkách a definované zátěži load. Pomocí této funkce dostáváme reálné hodnoty napětí a proudů tak, jako bychom je měřili pomocí hardware rekonfigurátoru. Díky těmto hlavním dvou funkcím – MPPT a MEASURE jsme schopni efektivně najít optimální konfiguraci panelů. Na obrázku 73 je přehledně znázorněno, jak se mění celkový výkon PV pole při změně ozáření a teploty. Jedná se o výchozí zapojení PV pole v 3x4 TCT konfiguraci a parametry ozáření a teplot jsou měněny rovnoměrně a stejně u všech PV panelů.

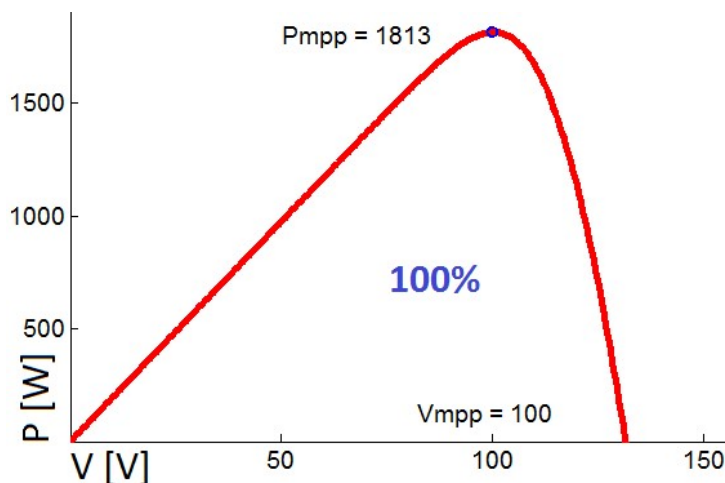


Obrázek 73 - Simulace výstupního výkonu PV pole v standardním 3x4 TCT zapojení

Simulace je ve výchozím stavu provedena pro plně ozářené PV pole. Hodnoty  $I_{pv}$  proudů kolem 6.5A odpovídají reálným hodnotám plně ozářených používaných panelů Conergy E215P, které jsou v našem případě zakryté sítí pro snížení generovaného proudu. Hodnoty teplot jednotlivých panelů jsou reálné naměřené teploty kolem poledne, kdy jsou nejlepší podmínky intenzity ozáření a panely jsou namířeny kolmo ke slunci. Teploty všech panelů v tuto dobu fluktuují kolem hodnoty 55°C. Prvně byl spuštěn skript **MpptSlow.m**, který našel ideální hodnotu zátěže  $load = 5.5 \Omega$ , při které můžeme z PV pole odebírat maximální výkon až 1815W. Tento skript také vykresluje P-V charakteristiku celého PV pole. Dále byla nastavena zátěž  $load$  na výše uvedenou hodnotu a spuštěn skript **GetPanelsActualValuesSIM.m**, pomocí kterého byly simulačně změřeny aktuální hodnoty napětí  $V_{actual}$  a proudů  $I_{actual}$  u jednotlivých PV panelů. Poté byly spuštěny skripty **GetPanelsShortCircuitCurrentsSIM.m** a **GetPanelsOpenCircuitVoltagesSIM.m** a pomocí nich naměřeny hodnoty napětí naprázdno  $V_{OC}$  a proudy nakrátko  $I_{SC}$  každého panelu v zapojení. Všechny nasimulované hodnoty jsou zobrazeny v matici MEASURE\_ALL, která je zobrazena v tabulce 10 níže.

Tabulka 10 - Simulace PV pole při rovnoměrných provozních podmínkách

	$I_{pv1}$	$I_{pv2}$	$I_{pv3}$	Temp	Row	$V_{actual}$	$I_{actual}$	$P_{actual}$	$V_{oc}$	$I_{sc}$
Panel 01	6,5	6,5	6,5	55,2	1	24,9	6,08	151,4	32,9	6,5
Panel 02	6,5	6,5	6,5	56,7	1	24,9	6,03	150,1	32,7	6,5
Panel 03	6,5	6,5	6,5	55,4	1	24,9	6,07	151,1	32,8	6,5
Panel 04	6,5	6,5	6,5	53,9	2	25,1	6,06	152,1	33	6,5
Panel 05	6,5	6,5	6,5	52,2	2	25,1	6,11	153,4	33,2	6,5
Panel 06	6,5	6,5	6,5	55,2	2	25,1	6,01	150,9	32,9	6,5
Panel 07	6,5	6,5	6,5	55,9	3	24,9	6,04	150,4	32,8	6,5
Panel 08	6,5	6,5	6,5	55,6	3	24,9	6,05	150,6	32,8	6,5
Panel 09	6,5	6,5	6,5	54,8	3	24,9	6,08	151,4	32,9	6,5
Panel 10	6,5	6,5	6,5	54,3	4	25	6,08	152,0	33	6,5
Panel 11	6,5	6,5	6,5	55,6	4	25	6,04	151,0	32,8	6,5
Panel 12	6,5	6,5	6,5	55,2	4	25	6,05	151,3	32,9	6,5
ARRAY					5,5	99,9	18,18	1816,2	0	0

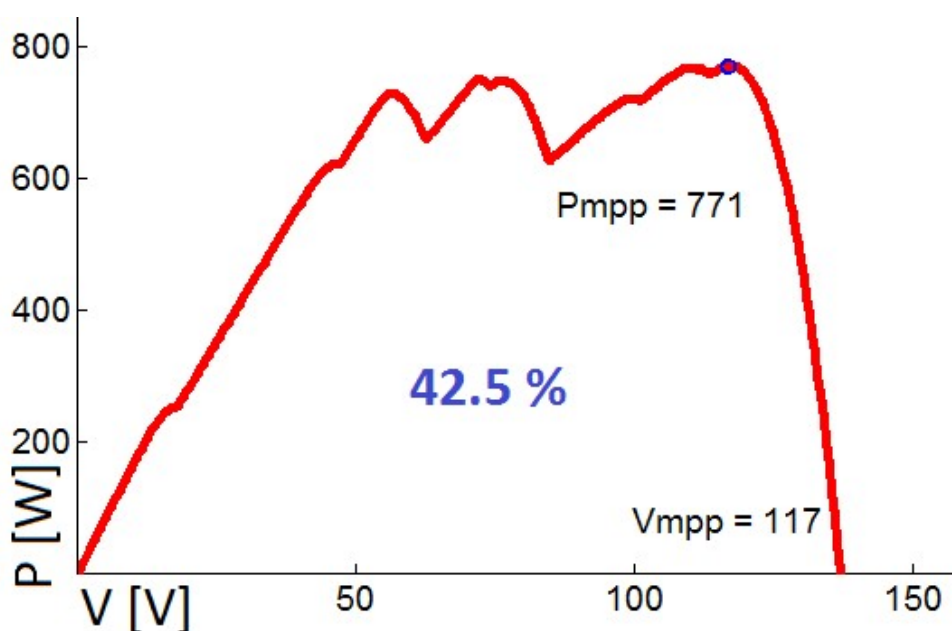


Obrázek 74 - P-V charakteristika PV pole při rovnoměrných provozních podmínkách

Z tabulky 10 je vidět, že pokud jsou panely rovnoměrně ozářeny (s čímž souvisí i jejich podobná provozní teplota), tak nevzniká v zapojení nesoulad. Všechny PV panely mají naměřeny velice podobné provozní hodnoty V actual a I actual. Takto PV pole produkuje maximální možný výkon MPP, který je bezproblému sledován pomocí centrálního MPP trackeru, připojeného na výstupu PV pole.

Tabulka 11 - Simulace PV pole při nerovnoměrných provozních podmínkách

	Ipv1	Ipv2	Ipv3	Temp	Row	V actual	I actual	P actual	Voc	Isc
Panel 01	1,1	1,1	1,1	36,5	1	32,1	0,1	3,2	32,3	1,1
Panel 02	6,5	6,5	6,5	37,5	1	32,1	3,23	103,7	35	6,5
Panel 03	6,5	6,5	6,5	37,2	1	32,1	3,27	105,0	35	6,5
Panel 04	6,5	6,5	6,5	36,6	2	24,9	6,4	159,4	35,1	6,5
Panel 05	6,5	0,4	0,2	31	2	24,9	0,2	5,0	32,5	6,5
Panel 06	0	0,2	0,2	27,7	2	24,9	0	0,0	20,4	0,2
Panel 07	3,5	3,5	3,5	36,3	3	31,2	2,29	71,4	34,2	3,5
Panel 08	6,5	6,5	6,5	35,8	3	31,2	4,21	131,4	35,2	6,5
Panel 09	0,1	6,5	6,5	23,9	3	31,2	0,1	3,1	34,5	6,5
Panel 10	3,5	3,5	3,5	35,4	4	28,9	3,14	90,7	34,3	3,5
Panel 11	3,5	3,5	3,5	37,6	4	28,9	3,07	88,7	34	3,5
Panel 12	3,5	0,4	0,4	25,5	4	28,9	0,39	11,3	33,3	3,5
ARRAY					17,8	117,1	6,6	772,9		



Obrázek 75 - P-V charakteristika PV pole při nerovnoměrných provozních podmínkách

Z tabulky 11 je možné vidět, jak se mění naměřené veličiny  $V_{actual}$ ,  $I_{actual}$ ,  $V_{OC}$  a  $I_{SC}$  při změně provozních podmínek, rozumějme při náhodném rovnoměrném či nerovnoměrném zastínění některých PV panelů. V tomto simulovaném případě klesl maximální výstupní výkon PV pole z původních 1816W na 773W, což je snížení na 42.5% maximálního možného výkonu. Graf výkonové P-V charakteristiky pole na obrázku 75 ukazuje nalezený MPP pomocí skriptu MpptSlow.m.

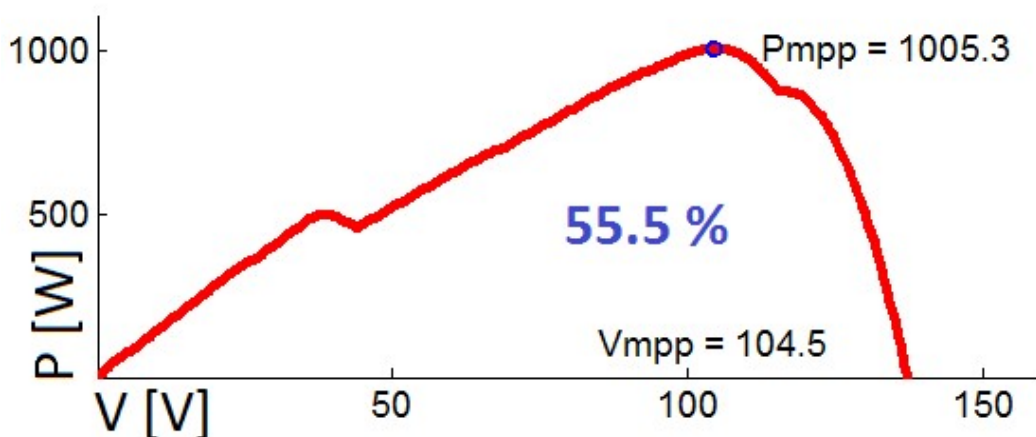
V tabulce je vidět, jaký neúplný a nepřesný význam mají hodnoty  $V_{OC}$  a  $I_{SC}$ . Například panely 04 a 09 jsou odlišně ozářené a i přesto u nich naměříme shodný proud  $I_{SC}$ . Je to dáno tím, že u těchto panelů je vždy alespoň jeden modul v panelu plně ozářen a díky BP diodám, které při zkratu překlenou neozářené moduly, naměříme vždy stejný proud nakrátko. Napětí  $V_{OC}$  je při částečném zastínění panelu minimálně odlišné od plně ozářeného panelu. Tato malá diference je navíc ještě závislá na teplotě panelu. Z důvodu, že měříme teplotu celého panelu průměrně (namísto měření teplot jednotlivých modulů), nemůžeme napětí  $V_{OC}$  při změnách přibližně  $\pm 3V$  považovat za dostatečně vypovídající hodnotu o stavu zastínění. Pouze při naprostém zastínění modulu, kdy modul generuje nulový fotoproud  $I_{PV}$  je hodnota napětí  $V_{OC}$  dostatečně vypovídající údaj. K tomu však v reálné situaci pokaždé nedochází.

**V této fázi je třeba rekonfigurovat panely tak, aby byl navýšen celkový výstupní výkon PV pole. Způsob, jakým se panely přepojí, je předmětem návrhu nového rekonfiguračního algoritmu. Cílem je navrhnout takový algoritmus, který by dokázal efektivně rekonfigurovat panely pouze na základě měření hodnot  $V_{actual}$  a  $I_{actual}$ . Pomocí tohoto simulátoru je možné vypočítat a určit základní logická pravidla pro takovou rekonfiguraci.**

**RECONFIGURATION: PanelsConnectToRow(:,1) = [1; 1; 4; 2; 2; 3; 3; 3; 1; 2; 4; 4]**

Tabulka 12 - Simulace PV pole po provedené rekonfiguraci panelů

	Ipv1	Ipv2	Ipv3	Temp	Row	V actual	I actual	P actual	Voc	Isc
Panel 01	1,1	1,1	1,1	36,5	1	22,9	1,09	25,0	32,3	1,1
Panel 02	6,5	6,5	6,5	37,5	1	22,9	6,47	148,2	35	6,5
Panel 03	6,5	6,5	6,5	37,2	4	27,8	5,95	165,4	35	6,5
Panel 04	6,5	6,5	6,5	36,6	2	27,4	6,07	166,3	35,1	6,5
Panel 05	6,5	0,4	0,2	31	2	27,4	0,2	5,5	32,5	6,5
Panel 06	0	0,2	0,2	27,7	3	26,7	0	0,0	20,4	0,2
Panel 07	3,5	3,5	3,5	36,3	3	26,7	3,4	90,8	34,2	3,5
Panel 08	6,5	6,5	6,5	35,8	3	26,7	6,23	166,3	35,2	6,5
Panel 09	0,1	6,5	6,5	23,9	1	22,9	2,06	47,2	34,5	6,5
Panel 10	3,5	3,5	3,5	35,4	2	27,4	3,35	91,8	34,3	3,5
Panel 11	3,5	3,5	3,5	37,6	4	27,8	3,28	91,2	34	3,5
Panel 12	3,5	0,4	0,4	25,5	4	27,8	0,4	11,1	33,3	3,5
ARRAY					10,9	104,8	9,62	1008,2		



Obrázek 76 - P-V charakteristika PV pole po provedené rekonfiguraci panelů

Tabulka 12 zobrazuje výsledky simulace a graf na obrázku 76 znázorňuje výkonovou P-V charakteristiku PV pole s vyznačeným bodem MPP po provedené rekonfiguraci panelů. Rekonfigurované (přepojené) panely 03, 06, 09, 10 jsou červeně zvýrazněny. Díky této rekonfiguraci bylo dosaženo možnosti odběru vyššího maximálního výstupního výkonu z PV pole až 1008W, což je oproti původnímu zapojení PV panelů v základní 3x4 TCT konfiguraci navýšení o 235W, tedy 13% nárůst výkonu. Tabulka 13 demonstruje parametry PV pole před a po provedení rekonfigurace.

Tabulka 13 - Výstupní parametry PV pole před a po provedené rekonfiguraci

	Pmpp [W]	Pmpp [%]	Load [ $\Omega$ ]	Vmpp [V]	Impp [A]
Fully irradiated PV array: 3x4 TCT	1816,2	100,0	5,5	99,9	18,2
Partially nonuniformly shaded PV array: 3x4 TCT	772,9	42,6	17,8	117,1	6,6
Partially nonuniformly shaded PV array: RECONFIGURED	1008,2	55,5	10,9	104,8	9,6

#### Simulační výsledky a jejich zatížení chybou.

Parametry používaného náhradního matematického modelu PV článku jsou odvozeny ze štítkových hodnot napětí a proudů na PV panelu a dále z katalogových hodnot teplotních koeficientů pro standardní teplotu 25°C. Pro přesnou simulaci by bylo třeba pro každý modul s odlišnými provozními podmínkami vypočítat parametry náhradního modelu nově. Dále je třeba uvést, že katalogový list výrobce PV panelů udává jedny parametry, druhé parametry jsou pak na štítku každého panelu a při měření I-V charakteristiky bychom získali ještě další jiné odlišné hodnoty. Výsledné hodnoty simulace jsou pak v důsledku uvedených nepřesností oproti reálně naměřeným hodnotám mírně zkreslené a vždy je třeba počítat s přibližně  $\pm 3\%$  zatížení chybou.

## 10 Diskuze – postup v projektu

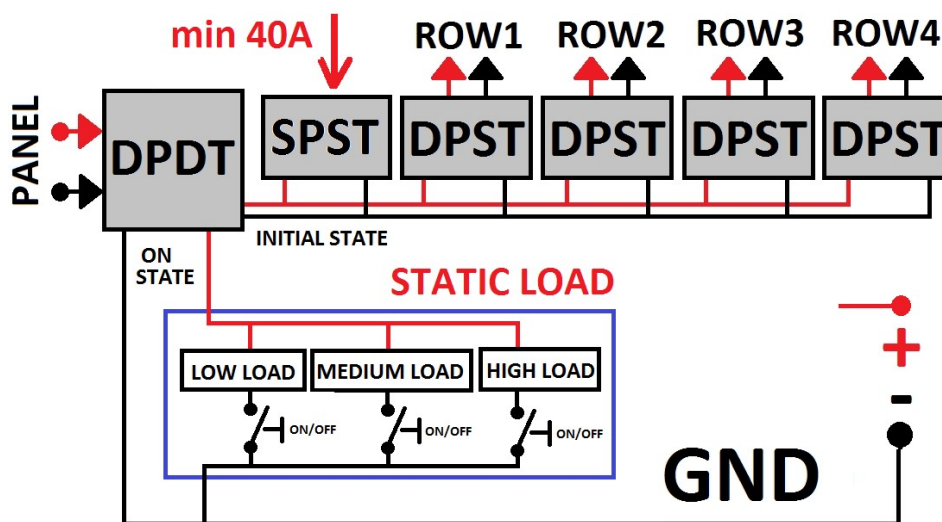
Prvně je třeba uvést, že v dnešní době existují efektivní zařízení, které sledují MPP lokálně u každého PV panelu. Tyto výkonové optimizéry (blíže popsány v kapitole 5.3 této práce) jsou v poslední době čím dál více cenově dostupné a jejich použití je možné i na stávající PV pole. Z tohoto důvodu je v tomto projektu kladen důraz spíše na návrh inteligentních algoritmů pro rekonfigurátor než na možnost vyvíjet pomocné měřící jednotky, které by pracovaly na podobných principech jako již v praxi používané výkonové optimizéry. Při použití těchto pomocných měřících jednotek se celkově zkomplikuje hardwarové řešení a bylo by třeba upravit i řídicí jednotku rekonfigurátoru.

Do budoucna, v rámci pokračování práce v tomto projektu, je zde i myšlenka návrhu zcela nové přepínací matice s jiným typem spínacích prvků – Mosfet tranzistory nebo Solid-state relé. Poté by bylo možné navrhnout algoritmus, který by provedl po hrubém odhadu správné konfigurace několik náhodných rekonfigurací s finálním výběrem té nejlepší. Důvod použití elektromagnetických relé je dán především tím, že oproti uvedeným polovodičovým prvkům nemají úbytek napětí na jejich přechodu a nepředstavují tím ztráty. V rámci PV pole s 12-ti panely, by v případě využití popisovaných spínacích prvků mohl klesnout výkon až o 50W.

### 10.1 Předpokládané vylepšení hardware rekonfigurátoru.

Jak již bylo uvedeno dříve, z důvodu nelineárního chování celého PV pole je velice složité navrhnout rekonfigurační algoritmus, který pracuje pouze na základě měření hodnot vzájemně propojených panelů a dopočítávání ozáření  $G$  pomocí uvedených rovnic. Řešením tohoto problému je využití možnosti měření jednotlivých panelů samostatně. Se stávajícím hardwarem jsme však omezeni možnostmi měření a následně provedení správné rekonfigurace. Špatně dimenzované relé nám neumožňuje měřit proud nakrátko  $I_{SC}$ . Tento problém vyřešíme výměnou relé za silnější. Relé bude dimenzované až na zátěž 40A, z důvodu, že bychom pomocí těchto relé chtěli měřit i proud nakrátko více paralelně spojených panelů (bezpečně by šlo měřit 4 paralelně spojené panely). Dále je třeba vyřešit problém s měřením samostatných panelů. Toto je třeba z toho důvodu, že pokud jsou panely spojené navzájem, dochází k jejich vzájemnému ovlivňování a tím pádem i ke zkreslení naměřených hodnot. Stávající přepínací matice sice umožňuje napojit na zátěž pouze jeden samostatný panel, ovšem taková operace vyžaduje vypnutí všech DPST relé ostatních panelů – rozumějmě jejich odpojení z řad a dále zkratování tří řad pomocí SPST relé. V případě potřeby samostatného měření více panelů by to znamenalo časté přepínání relé, což by rychle vedlo k jejich zničení. Proto je třeba stávající hardware upravit tak, abychom mohli měřit panel samostatně a při tom nemuseli přepínat hodně relé. Nejjednodušší řešení je použít DPDT relé, které jsou obsaženy v přepínací matici. Nyní je jejich výstup v neseplém stavu připojen do standardní konfigurace TCT. To změním a tento výstup zapojíme na větev. Výstup tohoto DPDT relé v seplém stavu poté připojím

ke statické referenční zátěži. Referenční zátěž bude nastavitelná na tři různé hodnoty. Schéma navrhované úpravy je zobrazeno na obrázku 77. Dále je potřeba přepojit vstupy snímání napětí na vstup DPDT relé, tak abychom mohli měřit napětí neustále (tak jako proud) a ne jen v jedné poloze, jak tomu je doposud. Díky této úpravě budeme moci měřit samostatně každý panel, případně budeme moci napojit dva i více panelů na tuto zátěž paralelně a měřit rozdíly jejich výstupních proudů. To vše bude možné přepnutím pouze jednoho relé při jakékoliv konfiguraci panelů namísto dosavadního složitějšího přepínání.



Obrázek 77 - Předpokládaný upgrade přepínací matice

Zpočátku použijeme naměřené kombinace hodnot napětí, proudu a teplot při vzájemném propojení PV panelů pouze k hrubému odhadu míry zastínění a vytypování problémových, rozumějně zastíněných panelů. Na základě odlišných hodnot panelů a určení nesouladu provedeme samostatné oddělené měření jednotlivých problémových panelů pod zátěží a z naměřených hodnot určíme daleko přesněji míru ozáření - aktuální možnost maximálního výstupního výkonu. Rekonfiguraci PV panelů provedeme na základě známé rekonfigurační TCT strategie.

## 10.2 Využití genetických algoritmů s pamětí

Pomocí navrženého simulátoru můžeme na PC vytvořit rozsáhlejší databázi parametrů PV panelu při různých provozních parametrech. Základem bude například 50 odlišných databází pro 50 různých teplot, neboť teplota je parametr, který vždy změříme správně. Každá jednotlivá databáze pak bude obsahovat nasimulované hodnoty napětí a proudu při různých parametrech ozáření (snížené ozáření, nerovnoměrné ozáření) a napojení PV panelu na referenční hodnotu zátěže 215W, 100W nebo 50W. Pakliže se v reálném provozu vyskytne změna provozních podmínek, které budou z měření celého PV pole nejednoznačné, bude se moci PV panel pomocí DPDT relé napojit na referenční zátěž a změřit samostatně jeho hodnoty. Díky využití simulátoru a implementaci nasimulovaných databází s výstupními hodnotami panelu při různých ozářeních, budeme moci naměřené hodnoty porovnat s hodnotami v databázi. Následně se experimentálně určí

ozáření G. Pokud budeme znát alespoň odhadem tuto hodnotu, bude možné poměrně přesně rekonfigurovat PV panely na základě popisované TCT rekonfigurační strategie. Tvorbě popisovaných databází musí předcházet přesná kalibrace výstupů simulátoru s reálně naměřenými výstupními hodnotami při měření PV panelu. Tato popisovaná metoda se poté může kombinovat pouze se samostatným měřením a použít ji pouze při dosažení lepších výsledků.

Před začátkem vývoje níže popisovaného algoritmu je třeba nejprve porozumět nelineárnímu chování celého systému. Proto bylo přistoupeno ke tvorbě simulátoru celého PV pole současně s rekonfigurační maticí. V tomto simulačním modelu jsme schopni nastavit parametry ozáření, teplot a konfigurace panelů a dostatečně přesně simulovat chování celého pole. Navíc je možné provést dávkové simulování při postupných změnách parametrů. To, že je celý model ovládaný pomocí prostředí Matlab, nám značně zjednodušuje pochopení problematiky a budoucí vývoj a ladění algoritmu.

Využití genetických algoritmů představuje vylepšení popisovaných metod. Cílem řídicího algoritmu rekonfiguratoru je nalézt globální maximum výstupního výkonu PV pole. Protože se jedná o nelineární systém, kde nejsme schopni přesně určit nejlepší rekonfiguraci na základě naměřených hodnot a provedení analytických výpočtů, je třeba použít některou z heuristických metod, tedy zkusmé řešení rekonfigurace s postupným vylepšováním pomocí genetických algoritmů s pamětí. Na základě naměřených hodnot teplot, napětí a proudů z panelů, které máme k dispozici, jsme schopni zhruba odhadnout, jaké panely právě způsobují nelinearitu. Takové panely můžeme samostatně změřit a pokusit se je odpojit či rekonfigurovat. Zde je třeba provést více (například 5) rekonfigurací podle nadefinovaných logických pravidel (definovat rekonfigurace, které zaručeně nebudou lepší než aktuální konfigurace panelů) a základní rekonfigurační strategie pro TCT topologii. PV panely poté zůstanou v té nejlepší konfiguraci, která se zároveň uloží do paměti. V tomto případě se nabízí jako vhodné řešení využití hybridního TabuSearch-Genetic algoritmu. Matematický model, na jehož základě se bude provádět rekonfigurace, bude obsahovat seznam zakázaných konfigurací (Tabu konfigurace), které se získají postupným výcvikem z prováděných rekonfigurací na základě měření a zkusmé řešení (zkusmé rekonfigurace). Protože v reálném provozu bude docházet poměrně často ke stejným situacím (například každý den budou vlivem fixní překážky zastíněny stejné panely) můžeme naměřené hodnoty celého PV pole a následnou nejefektivnější rekonfiguraci ukládat do paměti. Pakliže se v budoucnu vyskytnou stejné nebo velice podobné naměřené hodnoty, bude možné na základě paměti provést velice rychle a bez jakéhokoliv dalšího potřebného měření správnou rekonfiguraci.

Popisovaný algoritmus bude nejdříve naprogramovaný v prostředí MATLAB. Pomocí navrženého simulátoru je možné takový algoritmus efektivně vyvíjet a ladit. Rovněž jsme schopni pomocí simulátoru navodit různé situace zastínění pole a generovat tím základní trénovací data. Po úspěšné simulaci funkce algoritmu bude postoupeno k přepsání do jazyka C a implementaci algoritmu do zařízení. [16]

### 10.3 Návrh pomocných měřících jednotek

Na začátku tohoto bloku je třeba napsat, že v dnešní době existují efektivní zařízení, které sledují MPP lokálně u každého PV panelu. Tyto výkonové optimalizéry (blíže popsány v kapitole 5.3 této práce) jsou v poslední době čím dál více cenově dostupné a jejich použití je možné i na stávající PV pole. Z tohoto důvodu je v tomto projektu kladen důraz spíše na návrh inteligentních algoritmů pro rekonfigurátor než na možnost vyvíjet pomocné měřící jednotky, které by pracovaly na podobných principech jako již v praxi používané výkonové optimalizéry. Při použití těchto pomocných měřících jednotek se navíc zkomplikuje celé hardwarové řešení zařízení a bylo by třeba upravit i řídicí jednotku rekonfigurátoru.

Základní myšlenka pomocné řídicí jednotky, která by se implementovala do připojovacího boxu PV panelu tak jako výkonové optimalizéry, je v měření proudů BP diodami a dále proudu nakrátko  $I_{SC}$  každého modulu v panelu. Dále by se měřila teplota každého modulu zvlášť. Pokud by se zaznamenal procházející proud přes BP diodu, znamenalo by to, že daný modul je pravděpodobně zastíněný, nebo že panel není v dané konfiguraci schopný dodávat požadovaný výkon. Každopádně by to znamenalo signál k měření proudu  $I_{SC}$  každého modulu v panelu. Na základě takto naměřeného proudu nakrátko  $I_{SC}$  a rovněž i dostupných hodnot teplot  $T$  by bylo možné naprosto přesně určit hodnotu ozáření  $G$  jednotlivých modulů a tím pádem i maximální možný výkon PV panelu. Jednotka by dále mohla obsahovat i vnitřní rekonfiguraci jednotlivých modulů, což by mohlo ještě více zvýšit maximální výstupní výkon z panelu. Měřící jednotka by byla napájena přímo z PV panelu a musela by být navržena jako nízkopříkonová s dobíjecí baterií, která by sloužila k napájení v případě měření, aby nám jednotka neovlivňovala hodnoty. Data by byly posílány do rekonfigurátoru po sériové lince, přičemž by se mohla využít bezdrátová komunikace pomocí bluetooth nebo wireless modulů. Rekonfigurátor by tedy disponoval přesnými naměřenými hodnotami maximálních výkonů jednotlivých panelů a rekonfigurace by byla provedena pomocí rekonfigurační strategie pro TCT topologii. Návrh popisované jednotky a přizpůsobení hardware rekonfigurátoru, případně návrh kompletně nového hardware rekonfigurátoru je předmětem pokračování v tomto projektu.

## 11 Závěr

Způsob zpracování teoretických podkladů této práce je volen tak, aby čtenáři poskytly základní, avšak celistvou představu o možnostech rekonfigurace při popisovaném nelineárním chování PV pole. Ze začátku jsou vysvětleny základy fotovoltaiky, popsány používané náhradní matematické modely PV článku a uvedeny rovnice pro výpočet úrovně ozáření. Teoretická část práce rovněž popisuje moderní principy využití Lambertovy funkce pro nalezení parametrů náhradního matematického modelu PV článku. Dále jsou popsány příčiny vzniku nesouladu mezi jednotlivými PV komponenty vlivem jejich rozdílných I-V charakteristik a uvedeny jsou též nejběžnější strategie propojení PV panelů s popisem možností jejich rekonfigurace. Další část této práce stručně popisuje hardwarové řešení rekonfigurátoru. Uvedeno je přehledné blokové schéma řídicí jednotky a přepínací reléové matice. V elektronické příloze práce jsou pak obsaženy veškeré detailní podklady návrhu hardware zařízení. Pro případné zájemce může tato práce sloužit jako kvalitní návod pro stavbu nového zařízení.

Je vhodné uvést, že řídicí algoritmus bylo a stále je třeba navrhnout pro již zkonstruovaný rekonfigurátor. Do zařízení byl zpočátku implementován rekonfigurační algoritmus v1.0, který používá pro výpočet úrovně ozáření jednotlivých PV panelů rovnice, jejichž vstupní parametry jsou hodnoty naměřeného výstupního svorkového napětí, výstupního proudu a teploty každého PV panelu. Přepojování panelů je pak prováděno na základě TCT rekonfigurační strategie. V rámci této práce bylo provedeno reálné měření PV pole, jehož výsledky jsou prezentovány v 8 kapitole. Celkově lze shrnout, že navržený rekonfigurační algoritmus je v běžném provozu nepoužitelný, neboť mnohdy nedochází k požadované optimalizaci výkonu a je funkční pouze při malém zatížení pole. Pakliže dojde k nesouladu mezi jednotlivými PV komponenty, například při částečném zastínění panelů, nebo při náhlé změně teploty, tak mohou být měřené hodnoty zatíženy chybou vlivem funkce ByPass diod.

Před začátkem vývoje nového algoritmu v2.0 bylo třeba nejprve detailně porozumět nelineárnímu chování celého PV pole. Proto bylo přistoupeno k tvorbě simulačního modelu celého PV pole společně s rekonfigurační maticí. Nový algoritmus je navíc nutné navrhnout s ohledem na jisté hardwarové omezení. Hardware rekonfigurátoru bohužel není dimenzován na používané PV panely, neboť má omezené možnosti měření proudu nakrátko  $I_{SC}$ . Další omezení představují klasická elektromagnetická relé v přepínací matici, kdy je třeba brát ohled na počet přepnutí z důvodu jejich životnosti.

Hlavní náplní praktické části této práce je tvorba profesionálního simulačního nástroje, díky kterému je možné u jednotlivých panelů nastavit parametry ozáření a teplot a modelovat tím reálné situace při zvolené (nastavitelné) konfiguraci PV pole. Zpočátku byl model navržen v programu LTspiceIV, od něhož však bylo později upuštěno, z důvodu nemožnosti simulovat odlišné teploty jednotlivých panelů. Poté bylo přistoupeno k návrhu elektrického modelu v programu OrCad Capture. Z důvodu rychlé, efektivní a dávkové

možnosti simulace byly navrženy řídicí funkce v prostředí Matlab. Stěžejní část se zabývá propojením SPICE elektrického modelu navrženého v schematicém editoru OrCad Capture s prostředím Matlab Simulink a následnou kosimulací pomocí SLPS interface. Tato část je významným přínosem celé práce z hlediska poskytnutí případným čtenářům ucelený návod s praktickými zkušenostmi na možnost takové kosimulace, kdy je pracováno s obsáhlejším netlistem elektrického SPICE modelu. Díky návrhu v prostředí Matlab je možné provádět rychlé dávkové simulování celého PV pole při postupných změnách provozních parametrů. Toto řešení značně zjednodušuje budoucí vývoj a ladění nového algoritmu, neboť pomocí simulátoru lze generovat tréninková data, implementovat řídicí algoritmus do modelování a efektivně tím sledovat chování celého pole.

V deváté kapitole této práce je uveden praktický příklad využití navrženého simulátoru při zvoleném reálném zastínění. Následná rekonfigurace panelů jasně dokazuje dosažení vyššího výstupního výkonu. Demonstrovány jsou také dvě hlavní funkce simulátoru. První funkce (MPPT) zprostředkovává nalezení maximálního pracovního bodu a vykreslení odpovídajících I-V a P-V charakteristik pole. Druhá funkce (MEASURE) představuje možnost měření parametrů jednotlivých PV panelů při definovaných provozních podmínkách, dané konfiguraci PV panelů a nastaveném zatížení pole.

Vzhledem k uváděné teorii, praktickému měření a celé řadě provedených simulací, které názorně demonstrují popisované nelineární chování PV pole, se došlo k závěru, že navržený hardware rekonfigurátoru je nyní třeba alespoň minimálně upravit, za účelem získání kvalitnějších vstupních dat pro rekonfigurační algoritmus.

V diskuzi je pak popsána úprava hardware rekonfigurátoru a rozebrána možnost využití genetických algoritmů s pamětí. Dále je také zmíněna možná výroba pomocných měřících jednotek. Závěrem lze shrnout, že většina bodů zadání byla splněna, avšak vzhledem k povaze projektu a omezeným časovým možnostem nebyl vytvořen algoritmus, který by byl v reálném provozu plně funkční. Pro čtenáře této práce se jedná o stručnou, avšak celistvě popisující publikaci dané problematiky. Návrhy popisované v závěrečné diskuzi této práce jsou předmětem pokračování autora v projektu.

## Seznam použité literatury

- [1] **Teorie fotovoltaiky.** [online] **2009** [cit. 26. 4 2016] Dostupný z WWW: <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>
- [2] **Jaroslav Kusala** - *Solární Energie – Součást Světu Energie.* [online] **2006** [cit. 26. 4 2016] Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>
- [3] **Jiří Hofman** - *Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaiického panelu.* Vysoké učení technické v Brně. Diplomová práce **2010.**
- [4] **Petr Wolf** - *Modelování fotovoltaiických článků a panelů v podmínkách nerovnoměrného rozložení teploty a intenzity záření.* České vysoké učení technické v Praze. Disertační práce **2013.**
- [5] **SolarEdge** - *Směrem k optimalizaci výkonu panelů.* [online] **2011** [cit. 26. 4 2016] Dostupné z WWW: <http://www.sunfin.cz/www/upload/images/pdf-soubory/optimalizace-vykonu-panelu.pdf>
- [6] **Damiano La Manna, Vincenzo Li Vigni, Eleonora Riva Sanseverino, Vincenzo Di Dio, Pietro Romano** - *Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, **2014**, Pages 412-426, ISSN 1364-0321.
- [7] **I. Nassar-eddine, A. Obbadi, Y. Errami, A. El fajri, M. Agunaou** - *Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the Lambert W function: A comparative study.* Energy Conversion and Management, Volume 119, **2016**, Pages 37-48, ISSN 0196-8904.
- [8] **Koray Şener Parlak** - *PV array reconfiguration method under partial shading conditions.* International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 63, **2014**, Pages 713-721, ISSN 0142-0615.
- [9] **Petr Klimek, Bronislav Bechník** - *Střídač pro fotovoltaiickou elektrárnu. Jakou technologii zvolíte?* [online] **2013** [cit. 26. 4 2016] Dostupné z WWW: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9555-stridac-pro-fotovoltaiickou-elektrarnu-jakou-technologiei-zvolite>
- [10] **N. Galioto, F. Lo Bue, L. Mistretta, and C. G. Giaconia** - *Low cost electrical current sensors with extremely wide measurement range.* Univerzita Palermo, Itálie. **2015.**
- [11] **Dalibor Biolek** - *Modelování a simulace v mikroelektronice.* Vysoké učení technické v Brně. Skripta předmětu **2005.**
- [12] **Paul D. Mitcheson** - *SPICE Diode and BJT models.* Imperial College Londýn. Skripta předmětu Semiconductor Modelling in SPICE. [online] **2010** [cit. 26. 4 2016] Dostupné z WWW: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/7292572.pdf>

[13] **David Pánek, Václav Kotlan, Pavel Karban** – *LTspiceIV*. Uživatelský manuál programu. [online] **2011** [cit. 26. 4 2016] Dostupné z WWW: [http://home.zcu.cz/~lsroubov/TE1/LTspice\\_navod.pdf](http://home.zcu.cz/~lsroubov/TE1/LTspice_navod.pdf)

[14] **OrCAD PSpice. OrCAD Capture** – *User's Guide*. Uživatelský manuál programu. [online] Second edition May **2000** [cit. 26. 4 2016] Dostupné z WWW: [http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSpice\\_CaptureGuideOrCAD.pdf](http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSpice_CaptureGuideOrCAD.pdf)

[15] **Cybernet Systems CO.,LTD** – *PSpice SLPS Interface Version 2.5 User's Guide*. Uživatelský manuál interface. [online] **2005** [cit. 26. 4 2016] Dostupné z WWW: [http://nsa.kpu-m.ac.jp/gijutu/pspice/SLPSV25\\_UsersGuide.pdf](http://nsa.kpu-m.ac.jp/gijutu/pspice/SLPSV25_UsersGuide.pdf)

[16] **Eleonora Riva Sanseverino** – *Heuristics II. Single point optimization*. Industrial/PhD Microgrids Course, Aalborg University. **2015**

## **Seznam příloh práce na datovém nosiči**

- soubor KAPLAN\_DAVID\_DP\_2016.pdf – text práce v elektronické podobě
- složka Hardware – návrh hardware rekonfiguratoru v programu KiCad
- složka LTspiceIV Simulation – simulační soubory a výstupy z programu LTspiceIV
- složka Photos And Picture – obrázková příloha práce, hardware i software
- složka PSIM Simulation - simulační soubory a výstupy z programu PSIM
- složka References And Literature – zálohovaná použitá literatura v práci
- složka Simulator – projektový adresář simulátoru, Matlab a OrCad Capture soubory