



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**AUTOMATICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ TERMOVIZNÍCH  
SNÍMKŮ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ**

THERMOVISION OF PHOTOVOLTAIC MODULES AUTOMATIC ANALYSIS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ilia Repko**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Ilia Repko

**ID:** 162926

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Automatické vyhodnocování termovizních snímků fotovoltaických panelů

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy činnosti solárních článků a s metodami detekce defektů ovlivňujících jejich kvalitu. Seznamte se s detekcí vad pomocí termovizní kamery.

Vytvořte software pro automatické detekování vad fotovoltaických panelů ze snímků pořízených termovizní kamerou. Funkčnost softwaru ověřte ve spolupráci s firmou Eicero s.r.o. a výsledky vyhodnoťte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 2.6.2016

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

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D., předseda oborové rady**

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá automatickým vyhodnocováním termovizních snímků fotovoltaických panelů. V teoretické části jsou popsány hlavní principy činnosti solárních článků a metody detekce defektů ovlivňujících jejich kvalitu, včetně metody termovize, která je založena na principu bezkontaktního měření povrchové teploty sledovaného objektu. Praktická část se věnuje tvorbě algoritmů pro detekci defektů a výsledkem práce je zdrojový kód pro program MATLAB.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Solární panel, termografie, detekce defektů, zpracování obrazu.

## **ABSTRACT**

This work deals with the automatic evaluation of thermographic images of photovoltaic modules. In theoretical part of work described main principles of sun's battery work and methods for detection defects, that affecting the quality work, including method thermography, which is based on principle of contactless measuring the surface temperature the observed object. Practical part dedicated to creation of algorithms for detection defects, result is a source code for the program MATLAB.

## **KEYWORDS**

Solar module, thermography, detection of defects, image processing.

REPKO, I. *Automatické vyhodnocování termovizních snímků fotovoltaických panelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2016. 46 s.. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Automatické vyhodnocování termovizních snímků fotovoltaických panelů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych také chtěl poděkovat PhDr. Jarmile Jurášové za korekturu práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

Úvod.....	8
1. Fotovoltaika.....	9
1.1. Solární článek .....	9
1.2. Princip solárního článku .....	9
1.3. Náhradní schéma solárního článku.....	10
1.4. Materiály pro výrobu solárních článků.....	11
1.5. Parametry solárních článků .....	12
1.6. Fotovoltaický panel .....	13
1.7. Kontrola kvality solárních článků.....	14
2. Termografie .....	18
2.1 Tepelné záření.....	18
2.2 Konstrukce termovizní kamery .....	18
2.3 Okrajové podmínky při měření.....	20
2.4 Typy defektů.....	20
3. Zpracování obrazu.....	23
3.1. Snímání a digitalizace obrazu.....	23
3.2. Předzpracování obrazu .....	24
3.3. Segmentace.....	25
3.4. Popis obrazu .....	25
3.5. Klasifikace .....	25
4. Praktická část.....	27
4.1. Volba programovacího prostředí .....	27
4.2. Návrh GUI .....	27
4.3. Popis funkce aplikace .....	28
4.4. Načtení obrazu.....	29
4.5. Předzpracování obrazu .....	29
4.6. Vyhodnocení obrázku.....	31
4.7. Výchozí nastavení.....	38
4.8. Vyhodnocení termovizních snímků.....	39
Závěr.....	41
Literatura .....	42
Seznam obrázků .....	43
Seznam symbolů .....	44

Seznam zkratek .....	45
Seznam příloh.....	46

# Úvod

V dnešní době tradiční zdroje energie, jako uhlí, ropa a plyn, se pomalu vyčerpávají, což vede ke hledání alternativních zdrojů energie. Solární články jsou obnovitelným zdrojem energie, který využívá fotovoltaické přeměny energie slunečního záření na elektrickou energii. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků je křemík, který dosahuje poměrně vysoké účinnosti přeměny energie záření.

Pro maximální účinnost provozu solárních panelů je třeba provádět jejich pravidelnou diagnostiku. Různé druhy materiálových a výrobních defektů mohou ovlivňovat kvalitu solárních panelů, a proto je důležité mít kvalitní diagnostické nástroje, které dovedou detekovat různé typy defektů, analyzovat je a v případě negativního vlivu minimalizovat jejich dopady. Termovizní měření je nejpoužívanější a nejrychlejší diagnostická metoda bezkontaktního měření. Pomocí termovizní kamery lze provádět diagnostiku solárních panelů bez nutnosti odpojovat je od sítě. Termovizní měření umožňuje získávat ihned informaci o rozložení povrchových teplot na zkoumaném objektu. Během termovizního měření se získává velké množství dat. Vyhodnocování získaných dat zabírá hodně lidského času, proto je nutné vyhodnocovací proces automatizovat.

V teoretické části bakalářské práce jsou rozebrány principy činnosti solárních článků, metody detekce defektů ovlivňujících jejich kvalitu, principy termografie a zpracování obrazu. V praktické části bakalářské práce je popsána vytvořená aplikace pro automatické detekování vad fotovoltaických panelů ze snímků pořízených termovizní kamerou.



# 1. Fotovoltaika

## 1.1. Solární článek

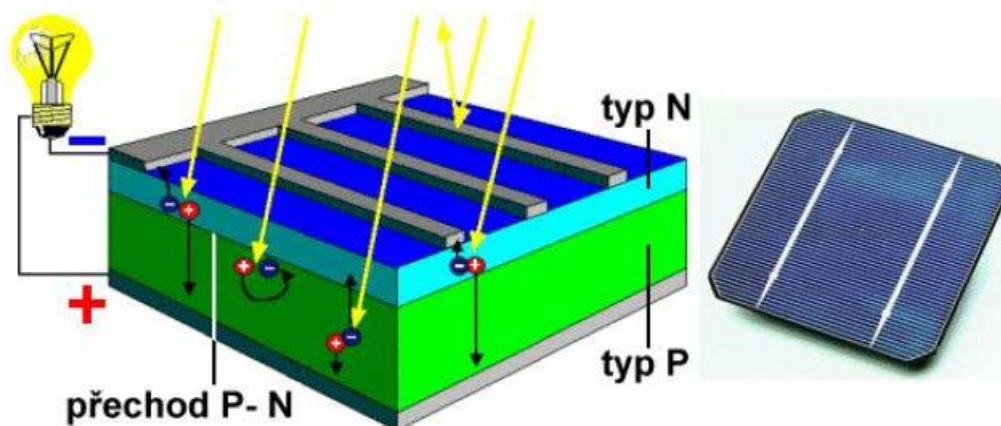
Solární zařízení představují způsob, jak získat elektrickou energii ze slunečního záření. Pro svou činnost využívají tzv. fotovoltaický jev, kdy při dopadu slunečního záření na povrch světlocitlivého fotovoltaického článku dochází k emisi elektronů v důsledku absorpce elektromagnetického záření.

## 1.2. Princip solárního článku

Solární články jsou polovodičové diody. Základem článku je tenká křemíková destička s vodivostí typu P, na ní se při výrobě vytvoří tenká vrstva polovodiče typu N. Obě tyto vrstvy jsou od sebe odděleny přechodem PN, který je orientován kolmo k čelní ploše mezi přední a zadní elektrodou. [10]

Pokud dopadá na křemík foton, který má energii menší než je velikost zakázaného pásu (pro křemík  $W_{\text{gsi}} = 1,11 \text{ eV}$ ), projde foton křemíkem a není absorbován. Pokud foton má energii větší než velikost zakázaného pásu, dojde k pohlcení fotonu v polovodiči. Vznikne tak jeden volný elektron a jedna volná díra. Vzájemný rozdíl energií mezi energií dopadajícího fotonu a šířkou zakázaného pásu je přeměňován na teplo [11].

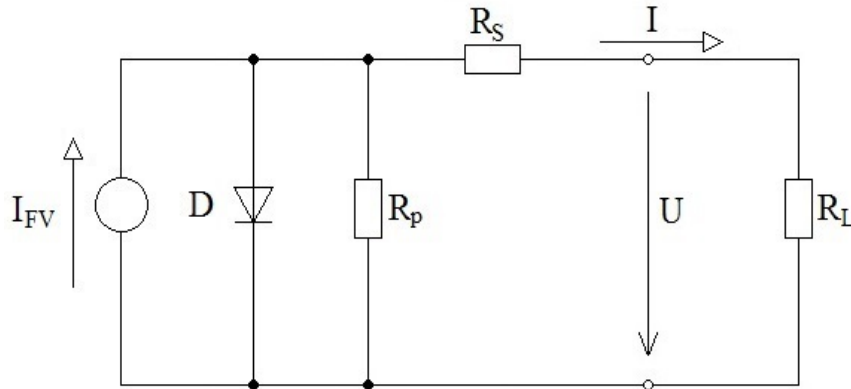
Pokud chceme, aby solární článek pracoval jako zdroj proudu, je třeba, aby v něm nastalo rozdělení elektronů a děr. Toto rozdělení vznikne na přechodu PN a na přírodních kontaktech se vytvoří napětí. Po připojení ke kontaktům zařízení (spotřebič), bude jím protékat elektrický proud. [10]



Obr. 1.1: Princip solárního článku [10]

### 1.3. Náhradní schéma solárního článku

Vlastnosti solárního článku je možno popsat a vysvětlit pomocí vlastností klasického PN přechodu a náhradního obvodu, znázorněného na obr. 1.2. Při vyšší intenzitě dopadajícího záření, bude vyšší generace proudu  $I_{FV}$ , který zajišťuje co největší možnou rekombinaci. Pro maximální výkon článku je třeba minimalizovat hodnotou sériového odporu  $R_S$  a dosáhnout co největší hodnotu paralelního odporu  $R_P$ . Odpor  $R_L$  představuje zátěž solárního článku.



Obr. 1.2: Náhradní schéma solárního článku

Solární článek lze popsat pomocí vztahu pro výpočet proudové hustoty  $J$  (1). Tento vztah označujeme jako jednodiodový model solárního článku. [8]

$$J = J_n + J_p = q \cdot \left( \frac{D_n}{L_n} \cdot n_{po} + \frac{D_p}{L_p} \cdot p_{no} \right) \cdot \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

kde  $J_n$  a  $J_p$  – jsou proudové hustoty elektronů a děr,

$D_n$  a  $D_p$  – jsou difúzní koeficienty elektronů a děr,

$L_n$  a  $L_p$  – jsou difúzní délky elektronů a děr,

$n_{po}$  a  $p_{po}$  – jsou koncentrace elektronů a děr v polovodiči v rovnovážném stavu,

$k$  – je Boltzmanova konstanta,

$T$  – je teplota.

V tomto vztahu se zanedbává tepelná generace páru elektron – díra a šířka depletiční vrstvy PN přechodu. Z tohoto důvodu je nutné vztah modifikovat na dvoudiodový model [8]:

$$J = \left( \frac{D_n}{L_n \cdot p_{po}} + \frac{D_p}{L_p \cdot n_{po}} \right) \cdot n_i^2 \cdot e^{\frac{qU}{kT}} + \frac{qd}{2\tau_{sc}} \cdot e^{\frac{qU}{2kT}} \quad (2)$$

kde  $n_i$  – je koncentrace nosičů v rovnovážném stavu,

$\tau_{sc}$  – je efektivní doba života.

## **1.4. Materiály pro výrobu solárních článků**

### **1.4.1. Krystalický křemík**

Je nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků. Neexistuje problém s dostupností materiálu, jelikož oxid křemičitý je zastoupen v zemské kůře přibližně ze 30%. Výchozím materiálem je čistý křemičitý písek. V praxi se však pro výrobu fotovoltaických článků využívá odpadového křemíku z polovodičového průmyslu.[2]

### **1.4.2. Monokrystalický křemík**

Vyrábí se z ingotů polykrystalického křemíku, zpravidla Czochralského metodou, tj. pomalým tažením zárodku krystalu z taveniny velmi čistého křemíku. Na konci procesu je získán monokrystalický křemíkový válec – ingot o průměru 125 až 300 mm. Válec se ořezává do tvaru hranolu. Křemíkové destičky o tloušťce 200 až 360  $\mu\text{m}$  jsou získány rozřezáváním kvádru pomocí speciální drátové pily. Hlavní nevýhodou je velká ztráta materiálu v procesu dělení ingotu na jednotlivé destičky. V laboratorních postupech je na monokrystalickém křemíku dosahováno účinnosti až 24%. Účinnost sériově vyráběných solárních článků je typicky do 14% a v současnost i 15%. [2]

### **1.4.3. Polykrystalický křemík**

Je více využíván jako vstupní materiál, díky své nižší výrobní ceně. Neprovádí se proces tažení materiálu, přestože dosahovaná účinnost je nižší, než je tomu v případě monokrystalického křemíku. Laboratorní fotovoltaické články dosahují účinnosti 18% a v podmínkách hromadné výroby nepřesahuje 14%. [2]

### **1.4.4. Amorfni křemík**

Jedná se o nekystalickou formu křemíku. Používá se většinou v aplikacích spotřební elektroniky a v systémech zabudovaných do budov místo prosklených ploch. Na rozdíl od krystalických materiálů se vyrábí celé moduly najednou. Malé experimentální moduly dosahují účinnosti 10% a v případě sériově vyráběných modulů je účinnost 5 až 7%. Velikým problémem je degradace materiálu po expozici na slunečním záření. [2]

### **1.4.5. Galium arsenid (GaAs)**

GaAs je slitinový materiál, ze kterého se vyrábí solární články s vysokou účinností. Tyto články se používají pro kosmické aplikace. Důvodem je vysoká cena a vysoká kvalita článků. Účinnost článků z výzkumných laboratoří je vyšší, než 25% při intenzitě 1-Slunce. GaAs články v podmínkách koncentrovaného slunečního záření dosahují účinnosti 28%. [2]

### **1.4.6. Měď-indium-diselen**

Je polykrystalický polovodičový materiál s přímým přechodem a s velmi vysokou hodnotou absorpčního koeficientu. V podmínkách výzkumu dosahovaná účinnost je 17,7%. [3]

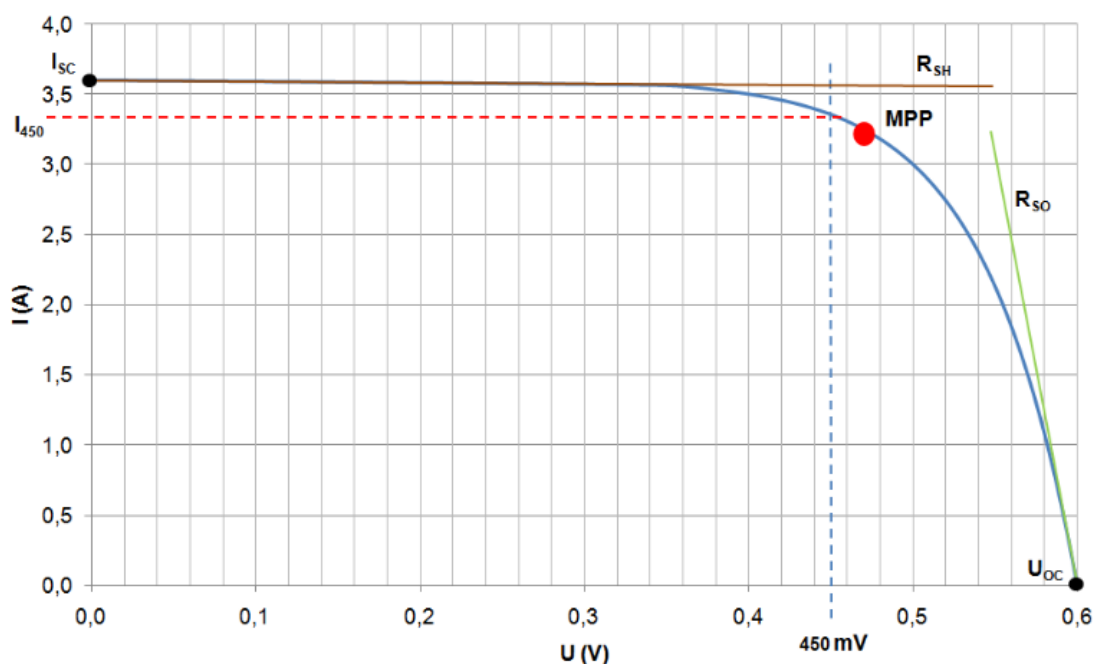
### **1.4.7. Telurid kademnatý (CdTe)**

Tenkvrstvý film polykrystalického materiálu se nanáší elektrodepozicí, sprejováním a vysokorychlostním napařováním. Jedná se o levnou technologii. Malé laboratorní

vzorky dosahují účinnosti 16% a komerční moduly s plochou  $7200 \text{ cm}^2$  mají účinnost 8,4%. [2]

## 1.5. Parametry solárních článků

Parametry solárních článků se popisují voltampérovou charakteristikou, která udává závislost proudu na napětí. Z této charakteristiky se dá odečíst většina parametrů solárních článků.



Obr. 1.3: Voltampérová charakteristika s vyznačenými parametry. [7]

**Proud nakrátko  $I_{sc}$  [A]** – proud, při kterém je napětí rovno nule ( $U = 0 \text{ V}$ ). Proud nakrátko je ve své fyzikální podstatě maximální proud, který může solární článek při daném slunečním osvětlení dodávat. Velikost  $I_{sc}$  je závislá na intenzitě osvětlení, spektrální činnosti solárního článku, ploše solárního článku a teplotě.

Velikost proudu nakrátko se pohybuje řádově v desítkách mA až v jednotkách A. Největší běžně dostupné články mají při plném ozáření proud nakrátko nad hranicí 3,5 A. [7]

**Napětí naprázdno  $U_{oc}$  [V]** – napětí, které je získáno pro  $I = 0 \text{ A}$ . Toto napětí je maximálním napětím fotočlánku při dané teplotě a intenzitě osvětlení. U monokrystalických článků se toto napětí pohybuje kolem hranice 0,6 V. [7]

**Pracovní bod** je bod na voltampérové charakteristice, ve kterém solární článek momentálně pracuje. Poloha pracovního bodu je závislá na vlastnostech spotřebiče. Zpravidla se snažíme, aby byla poloha pracovního bodu totožná s polohou MPP. Leží-li pracovní bod v režimu nakrátko nebo naprázdno nedodává článek žádný výkon.

Na polohu pracovního bodu má výrazný vliv teplota. Při déle trvající sluneční intenzitě nebo zhoršených podmínkách chlazení článku (bezvětrí), kdy teplota vzduchu dosahuje  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , dochází ke zvýšení povrchové teploty článku až na  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při takto vysokých

teplotách dochází ke změně elektrických vlastností článku, která vede ke snížení svorkového napětí na zatěžovací charakteristice. Pokles svorkového napětí způsobí snížení dodávaného výkonu do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě při největší sluneční intenzitě, může dojít až ke ztrátám 75 % z dosažitelné denní výroby článku. Ke kompenzaci tohoto jevu může sloužit optimalizační zařízení, které pracuje na principu řízení optimálního odporu zátěže. [7]

**Maximum Power Point – MPP** je bod na voltampérové charakteristice s maximálním výkonem. Tento bod se udává napěťové a proudové souřadnice s indexem *m*. [7]

**Proud při napětí 450 mV –  $I_{450}$**  je proud protékající článkem při napětí 450 mV. Parametr je důležitý pro první třídění výkonnostních skupin. [7]

**Sériový a paralelní odpor –  $R_{SO}$  a  $R_{SH}$** . Znalost velikosti sériového a paralelního odporu solárního článku nám dává poznatek o jeho kvalitě. Příliš vysoká hodnota sériového odporu způsobuje, že svorkové napětí článku bude tím menší, čím bude větší úbytek napětí na sériovém odporu. Je určen součtem odporu substrátu, vrstev, přechodů a kontaktů. Na druhou stranu příliš nízká hodnota paralelního odporu nás informuje o vadném článku; článek se chová, jako by byl zevnitř zkratován.

Sklon charakteristiky (tečny v bodech  $I_{SC}$  a  $U_{OC}$ ) odpovídá parametrům  $R_{SO}$  a  $R_{SH}$ . [7]

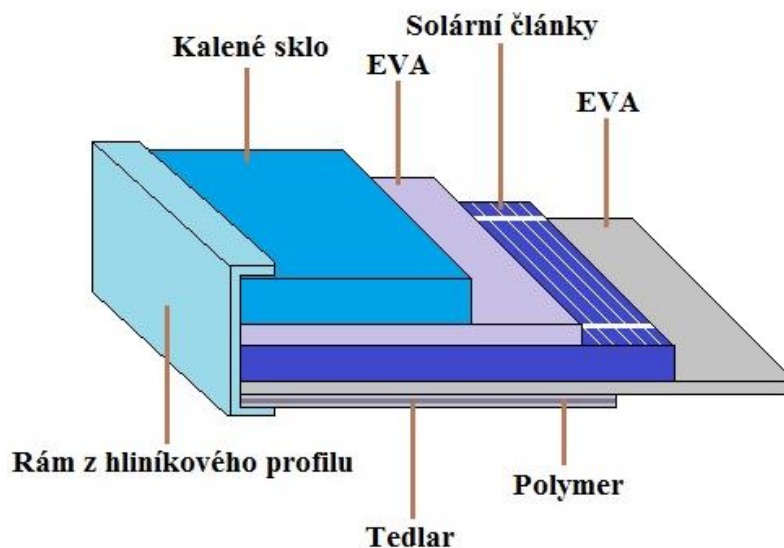
**Faktor plnění (FF – Fill Factor)** udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Tento poměr se uvádí jako tzv. činitel naplnění a je definován následujícím vztahem:

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \eta_{el} \quad (3)$$

## 1.6. Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel vzniká po zapouzdření solárních článků, které jsou propojeny sériově nebo i paralelně. Panel musí zajistit hermetické zapouzdření solárních článků, musí zajišťovat dostatečnou mechanickou a klimatickou odolnost (např. vůči silnému větru, krupobití, mrazu apod.). Konstrukce solárních panelů jsou značně rozmanité podle druhu použití. Obvykle jsou po obvodu fotovoltaické panely opatřeny duralovými rámy pro zpevnění celé konstrukce fotovoltaického panelu a zároveň k usnadnění realizace uchycení panelů ke konstrukci fotovoltaických systémů. Přední krycí materiál je speciální kalené sklo, které odolává i silnému krupobití.

Schéma fotovoltaického článku a částí jeho konstrukce je znázorněno na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Struktura fotovoltaického panelu

Z aplikačního hlediska jsou nejdůležitější části konstrukce nacházející se nad povrchem přední strany fotovoltaických článků, tedy tzv. EVA fólie (etylen vinyl acetát) a kalené sklo (popř. teflon, litá pryskyřice). EVA fólie je organický materiál, který vykazuje při silném UV záření efekt "žloutnutí", a tedy snížení optické transparentnosti panelu s nepříznivým vlivem na množství generovaného elektrického výkonu slunečními články. Krycí kalené sklo je z hlediska degradace optických vlastností velmi stabilním materiálem a ke snížení optické propustnosti může dojít jedině znečištěním povrchu vlivem okolního prostředí. [5]

## 1.7. Kontrola kvality solárních článků

### 1.7.1. Typy defektů solárních článků

Defekty, které ovlivňují elektrické vlastnosti krystalických křemíkových solárních článků, mají charakter poruchy krystalické mřížky. Poruchy podle jejich typů lze rozdělit do následujících skupin:

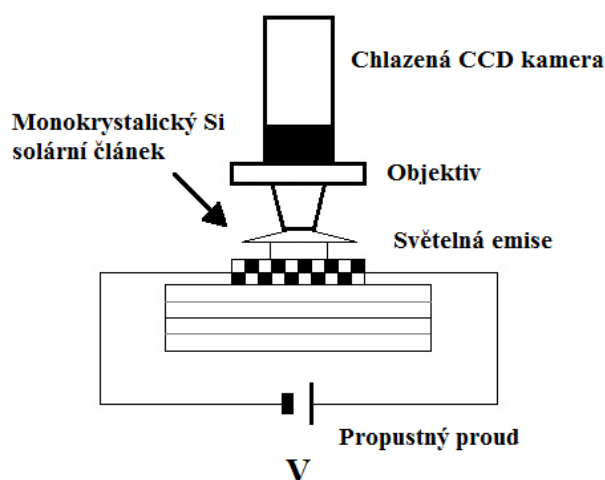
- Bodové poruchy (vakance – chybějící atom, intersticiální částice – částice mimo pravidelný bod mřížky, příměsi – cizí atomy v krystalu)
- Čárové poruchy (dislokační čáry – chybějící celé souvislé skupiny částic)
- Plošné a objemové poruchy (precipitáty – ostrůvky jiné krystalické struktury)

Většina těchto poruch ovlivňuje elektrické parametry. Ne všechny jsou samozřejmě nežádoucí. Díky různým příměsím lze měnit typ polovodiče z intrinsického na n nebo p typ. Bohužel některé defekty zvyšují rekombinaci, zkracují dobu životnosti a jinak brání využití světelné energie pro vykonání elektrické práce. Tyto defekty je potřeba lokalizovat a v technologickém procesu zabránit jejich vzniku. Podle původu defektů je lze rozdělit na materiálové defekty, které vznikají při výrobě substrátu a polovodičových struktur průnikem nečistot a procesní, způsobené mechanickým nebo jiným poškozením v průběhu technologického procesu. [12]

## 1.7.2. Diagnostické metody solárních článků

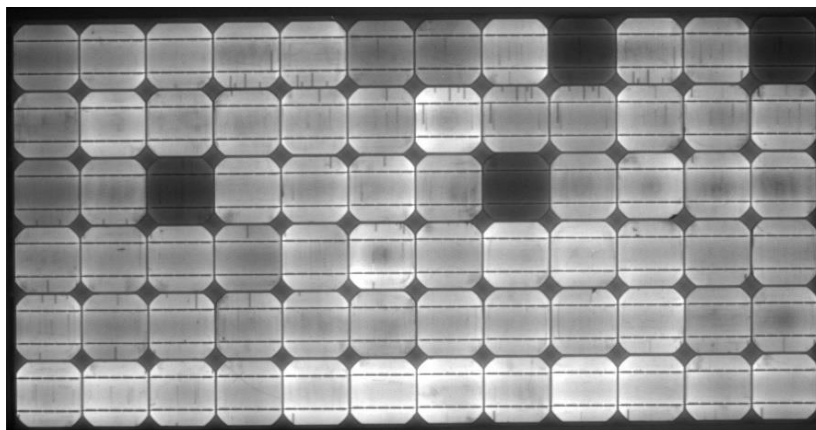
### 1.7.2.1 Elektroluminiscence

Elektroluminiscence je jev, při kterém dochází k emisi světla ze substrátu solárního článku. Podle optických vlastností polovodiče můžeme rozdělit polovodiče na polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem a s nepřímým mezipásmovým přechodem. Polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem, jako je GaAs, mají při rekombinaci páru elektron – díra vysokou pravděpodobnost vyzáření fotonu o energii rovnající se šířce zakázaného pásu v místě přímého přechodu. Těto vlastnosti se využívá u LED diod a polovodičových laserů. U polovodičů s nepřímým mezipásmovým přechodem se při generačně-rekombinačních dějích, kromě energie fotonů, účastní i fonony (tepelné kmity krystalografické mřížky). Tato metoda umožňuje detekci materiálových a procesních defektů solárního článku. Ve výsledcích měření lze také pozorovat rozložení proudové hustoty v článku. Během měření je článek připojen ke zdroji napětí v propustném směru. [6]



Obr. 1.5: Schéma měření metodou elektroluminiscence

Detekce defektů a rozložení proudu ze snímku spočívá v rozlišení tmavých a světlých míst. Ideální solární článek by měl vykazovat konstantní proudovou hustotu v celé ploše přechodu, a tím i jeho vyzáření světla by mělo mít na celé ploše stejnou intenzitu. Místa s nižší intenzitou světla (malé tmavší body) indikují poruchu ve struktuře materiálu (nehomogenita difuzní vrstvy přechodu P-N). Porucha může být dána nepravidelností ve struktuře monokrystalu. Naopak výrazně světlejší místa znázorňují oblasti s vyšší proudovou hustotou. Jak je vidět na obr. 1.6, jde většinou o místa blízko kontaktů solárního článku. [6]

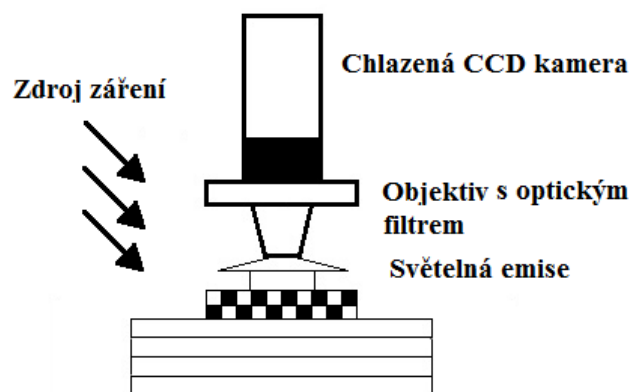


Obr. 1.6: Poruchy článků zjištěné pomocí elektroluminiscenční metody [6]

### 1.7.2.2 Fotoluminiscence

Využití fotoluminiscence jako metody analýzy povrchů má mnoho výhod. Pomocí ní se dá zjišťovat struktura tenkých vrstev, neboť nerovnosti či příměsi se projeví ve spektru. V závislosti na vlnové délce a intenzitě použitého laserového svazku se dají pozorovat různé vrstvy vzorku. Výpočet hloubky měřené vrstvy je složitější. Závisí jak na vlnové délce a intenzitě použitého laseru, tak na dielektrické funkci materiálu, propustnosti a odrazivosti materiálu. Při měření je lepší vzorek chladit na co nejnižší teploty, aby píky ve spektru byly snadněji rozpoznatelné, ale mnohdy postačí měření při pokojové teplotě. Tato metoda je nedestruktivní a nevyžaduje vakuové prostředí. V současnosti jsou k dispozici lasery, umožňující tvořit velice krátké pulzy (až 1 ps), pomocí nichž se dají podrobně zkoumat mechanismy absorpce a rekombinace. Jelikož spektrum fotoluminiscence není ovlivněno tlakem, lze ji používat při pozorování růstu polovodičových monokrystalů, což se děje právě za vysokých tlaků. Na rozdíl od ostatních optických analytických metod využívajících jevů reflexe a absorpce, fotoluminiscence neklade nároky na polohu zdroje, křivost povrchu a tloušťku vzorku. Největší nevýhoda této metody spočívá v podmínce, aby pozorovaný materiál byl opticky aktivní (schopen emitovat fotony). Navíc, pokud je na povrchu velké množství chemických nečistot, nebo nerovností, stane se, že se energie dodaná laserem rozptýlí při nezářivých procesech. Metoda fotoluminiscence je podobná metodě elektroluminiscence. Pro tuto metodu můžeme použít stejné zařízení, jako pro metodu elektroluminiscence (obr. 1.7). Při fotoluminiscenci je nutné pro zářivou rekombinaci energii dodávat vnějším světelným zdrojem. Článek je ozařován světelným zařízením o určité vlnové délce a tato složka musí být poté odfiltrována pomocí příslušného filtru, který je umístěn před CCD kamerou. [6]



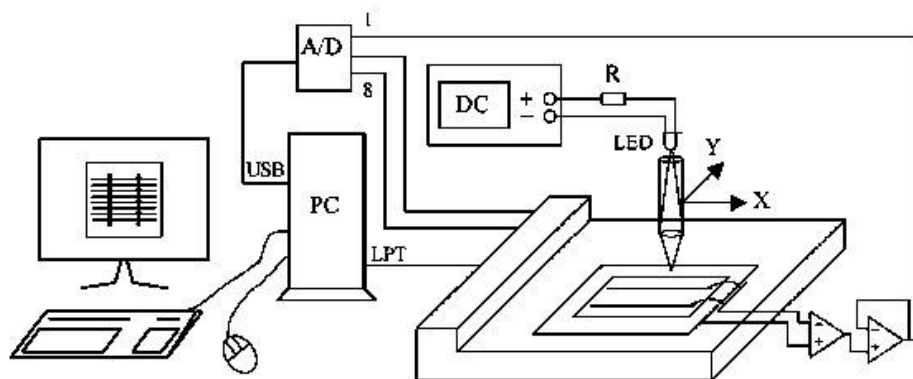


Obr. 1.7: Schéma měření metodou fotoluminiscence

### 1.7.2.3 LBIC (Light Beam Induced Current)

Optická metoda měření LBIC se využívá hlavně kvůli vizuálnímu určování lokálních vad a jejich rozložení na ploše. Tato metoda umožňuje vizuálně určit prostorové rozložení fotoproudu v solárním článku. Nad měřeným vzorkem projíždí zdroj světla (laser nebo LED) zaostřený do úzkého paprsku a díky lokální proudové odezvě z článku získáme XY charakteristiku rozložení proudu. Zaostřený svazek světla se pohybuje bod po bodu v ose X a na konci se posune o přesně definovaný krok v ose Y. Změřená data se uspořádají do proudové mapy a v podstatě modelují chování celého článku po jeho jednotlivých částech. Z takto vzniklých proudových map lze potom určit většinu lokálních defektů. Po měření je nutné (automaticky nebo ručně) nastavit stupeň šedi zobrazované oblasti pro dobré zobrazení jednotlivých defektů a to podle nalezených odchylek.

Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého zdroje světla (hloubka vniknutí) a na velikosti kroku a zaostření (míra přesnosti), s jakým je daný vzorek analyzován. Tato metoda je zdoluhavá a měření může trvat i několik hodin v závislosti na přesnosti a použitém kroku. [8]



Obr. 1.8: Měřicí pracoviště LBIC [8]

## 2. Termografie

Termografie je vědní obor, který se zabývá měřením, zobrazováním, analýzou a vyhodnocováním rozložení teplotního pole na povrchu snímaných těles.

### 2.1 Tepelné záření

Všechny předměty, které mají teplotu větší, než je absolutní nula, vyzařují energii ve formě elektromagnetického záření. Protože intenzita elektromagnetického záření je závislá na povrchové teplotě objektu, který toto záření vydává, lze změřením intenzity stanovit povrchovou teplotu objektu.

Pro popis zákonitostí vyzařované energie z povrchu těles existují dva klíčové zákony. Pro teplo vyzařované z povrchu těles platí Stephanův-Boltzmannův zákon:

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4)$$

kde  $W$  – je radiační tok jednotkou plochy,

$\varepsilon$  – je emisivita,

$\sigma$  – je Stephanova-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,673 \cdot 10^{-12}$ )

$T$  – je absolutní teplota tělesa.

Se změnou povrchové teploty objektu se nemění jen intenzita vyzařování, jak říká výše zmíněný Stefanův-Boltzmannův zákon, ale také spektrální rozložení vyzařovaného výkonu.

S rostoucí teplotou se maximální intenzita vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám podle tzv. Wienova posunovacího zákona:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (5)$$

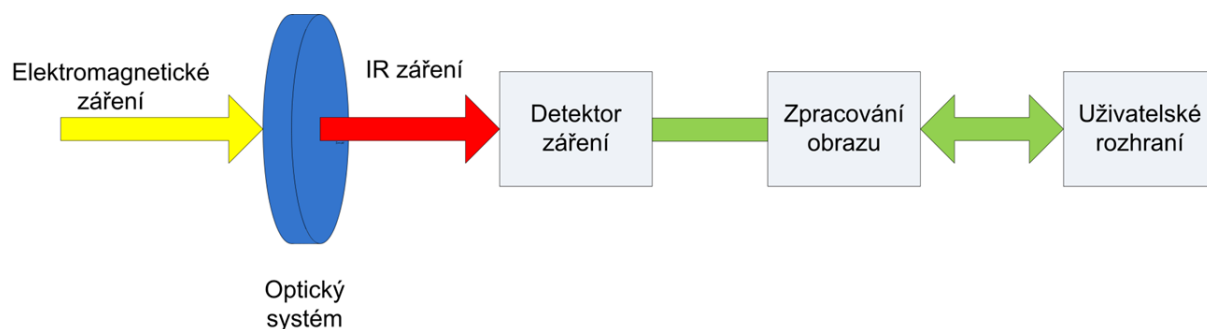
kde  $\lambda_{max}$  – je vlnová délka maxima spektrální hustoty vyzařování,

$T$  – je teplota tělesa,

$b$  – je Wienova konstanta ( $b = 2,898 \text{ mm K}$ ).

### 2.2 Konstrukce termovizní kamery

Konstrukce termovizní kamery je velmi podobná konstrukci klasické kamery, či fotoaparátu. Objektiv promítá dopadající tepelné záření na tzv. detektor záření, kde dochází ke změření jeho intenzity. Tato informace je následně digitalizována a převedena ve výsledný snímek, který se odborně nazývá termogram, který je složen z tzv. pixelů. Jednotlivé pixely odpovídají povrchové teplotě měřeného objektu v daném bodě. Rozlišení termogramu je dáno rozlišením detektoru termovizní kamery a je jedním ze základních parametrů. [1]



Obr. 2.1: Blokové schéma termovizní kamery

Blokové schéma termovizní kamery lze rozdělit na tyto tři části:

### 2.2.1. Optika

Optikou termovizních kamer je téměř výhradně v současné době spojka z germania bez možnosti optického zoomu. Zákony optiky jsou stejné jako třeba u skleněné čočky, liší se pouze použitý materiál. Na povrch čočky je navíc nanесena antireflexivní vrstva, která zabráňuje odrazu infračerveného záření na povrchu čočky. Dochází tak ke zvýšení její propustnosti až na 90% a více.

Na blokovém schématu kamery (obr 2.1) je vidět, že funguje zároveň jako filtr. Tj. jak je znázorněno na obrázku, na povrch čočky dopadá elektromagnetické záření všech vlnových délek a optika propustí jen záření požadovaných vlnových délek. [1]

### 2.2.2. Detektor

Detektor infračerveného záření převádí dopadající infračervené záření na elektrický signál, který je další elektronikou převeden ve výsledný termogram, který je prezentován uživateli termovizní kamery jako výsledek měření.

Z hlediska principu funkce rozlišujeme dva základní typy detektorů: tepelné a fotonové.

Tepelné detektory fungují na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího infračerveného záření. Příkladem je tzv. mikrobolometr, který mění elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Tzv. mikrobolometrické pole, což je velké množství mikrobolometrů rozmístěných do 2D pole (o délce hrany nejobvykleji 1 až 2 cm), je dnes nejčastějším typem detektoru u termovizních kamer a setkáme se s ním minimálně v 95% případů. Výjimkou jsou především nejdražší termovizní kamery, které se používají pro výzkumné účely, kde může být osazen fotonový detektor za účelem zvýšení jeho citlivosti.

Fotonové detektory pracují, zjednodušeně řečeno, na principu počítání fotonů, tj. kvant elektronového záření. Jsou výrazně citlivější, než tepelné detektory, ale vyžadují chlazení. Termovizní kamera s fotonovým detektorem je tedy mnohem těžší, než s tepelným detektorem, právě z důvodu nutnosti chlazení detektoru. [1]

### 2.2.3. Elektronika pro zpracování a prezentaci obrazu

Dopadající infračervené záření vyvolává na detektoru záření elektrický signál. Například tak, že dojde vlivem oteplení ke změně elektrického odporu, jako v případě již zmiňovaného mikrobolometru. Změna elektrického odporu je dalšími obvody převedena na elektrický signál. [1]

## 2.3 Okrajové podmínky při měření

V současné době se v IČ kamerách používají maticové snímací prvky CCD, které zobrazí teplotní pole v šedé nebo barevné škále. Jak již bylo uvedeno IČ kamery neměří přímo povrchovou teplotu, ale povrchová teplota je dopočítávána na základě změřeného IČ záření a okrajových podmínek zadaných přímo do kamery, popřípadě později do vyhodnocovacího programu. Tyto hodnoty se používají pro kompenzaci různých zdrojů záření a patří mezi ně:

- emisivita povrchu
- odražené teplo
- vzdálenost mezi objektem a kamerou
- relativní vlhkost a teplota vnějšího i vnitřního vzduchu

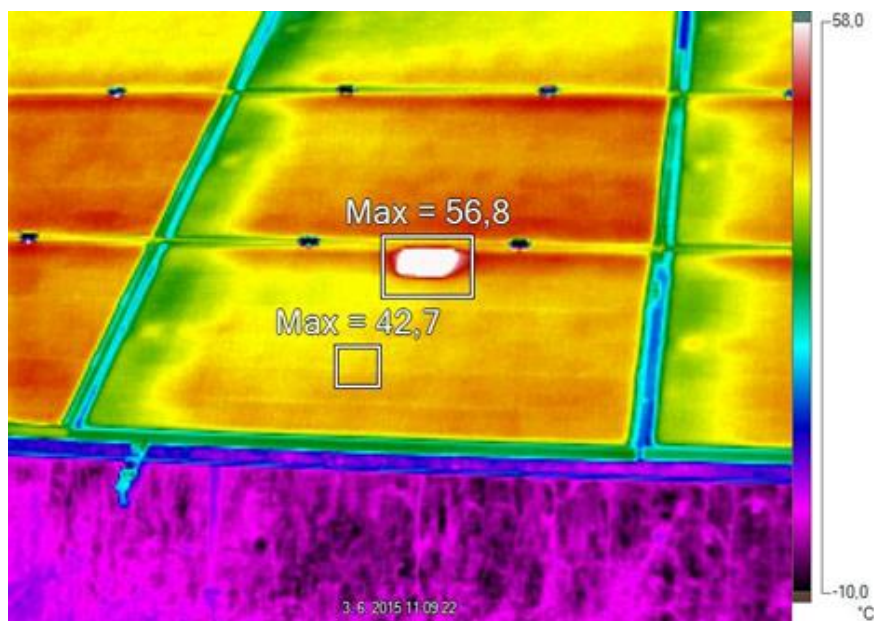
Pokud se chybně zadá emisivita povrchu nebo odražená teplota, může činit chyba měření až několik set procent. Emisivita a odražená teplota jsou dvě veličiny, které spolu úzce souvisí, čím je emisivita povrchu větší, tím se snižuje vliv odražené teploty a naopak. U povrchů s emisivitou 1 (absolutně černé těleso) se záření všech vlnových délek, které na těleso dopadnou, pohltí.

Ze vzdálenosti mezi objektem a kamerou a relativní vlhkosti se dopočítávají parametry atmosféry (tato hodnota se někdy uvádí jako propustnost atmosféry v %). Při dobré viditelnosti (bez mlhy), a pokud neprší, obdržíme při chybném zadání relativní vlhkosti nebo vzdálenosti mezi objektem a kamerou chyby v řádech procent, při mlze a dešti se chyba zvětšuje na desítky až stovky procent a měření prakticky nelze provádět, což je způsobeno tím, že voda není pro IČ záření transparentní. [13]

## 2.4 Typy defektů

### 2.4.1. Horká místa

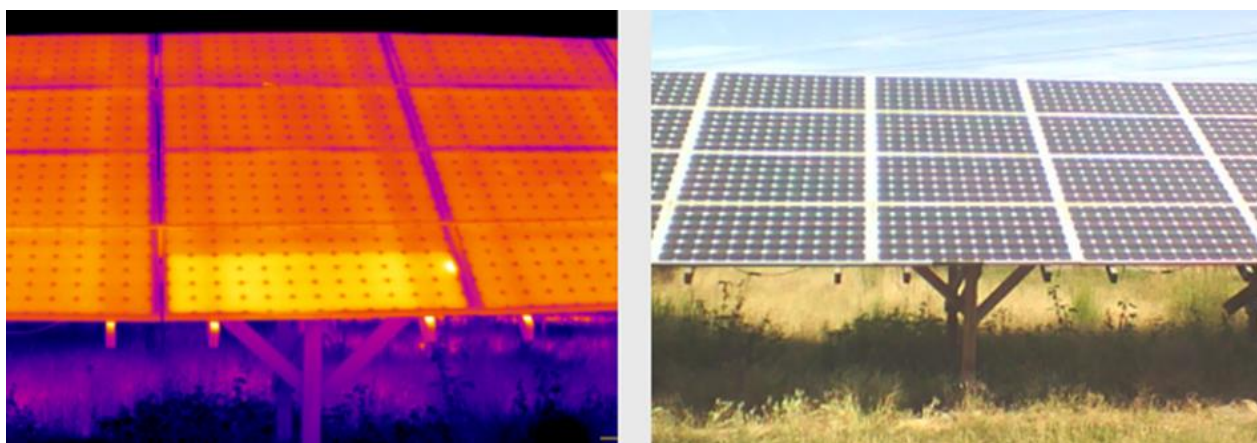
Velmi častým defektem fotovoltaických panelů je vznik horkých míst, tzv. hot spots. Horká místa vznikají v místech defektů krystalické mřížky fotovoltaických článků. V důsledku toho, se pak takto poškozená místa mohou velmi intenzivně zahřívat. Pokud dosahuje teplotní rozdíl mezi různými místy 60°C a více, jedná se již o závažný problém, který může přivést k destrukci solárního článku, a tím i celého panelu. Vznik horkých míst lze v terénu pozorovat pomocí termovizní kamery, ale pouze u krystalických panelů. Přesnější výsledky je možné získat v laboratoři s využitím elektroluminiscence. Na obr 2.2 je zobrazena ukázka horkého místa na fotovoltaickém panelu. [4]



Obr. 2.2: Vizualizace horkého místa termovizní kamerou

#### 2.4.2. Panely s odpojenými řetězci

Tento typ vady je jednoznačně prokazatelný termovizním snímkem (viz. Obr. 2.3) a vždy znamená snížení výkonu panelu o 1/3, 2/3 nebo 3/3 původního výkonu modulu. V případě nízkého osvětlení řetězce panelu dochází k situaci, kdy se zastíněný řetězec přestává chovat jako zdroj elektrické energie a energii vyprodukovanou ostatními články v panelu začíná spotřebovávat, čímž dochází k jeho přehřívání a může dojít k nevratnému poškození. Proto tento řetězec je odpojen od systému pomocí překlenovací diody. Zvýšená teplota na odpojeném řetězci je způsobena zbytkovým teplem generovaným slunečním zářením, které je vyšší než zbytkové teplo u funkčních řetězců, ze kterých je energie odváděna generovanou elektrickou prací.

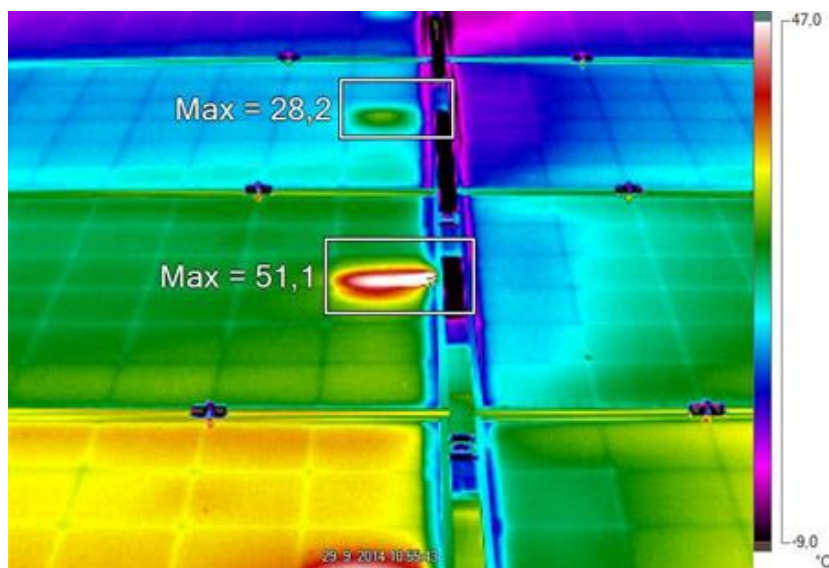


Obr. 2.3: Termovizní snímek panelu s nevyrábějící 2/3 panelu

#### 2.4.3. Panely s vysokými přechodovými odpory v ploše fotovoltaického modulu

Následující panely vykazují vysoké přechodové odpory v místě pájení kontaktů. Termický projev nedostatečného spoje ovlivňuje více faktorů, a proto bývají i projevy

v různém čase rozdílné. S časem dochází k úplnému přerušení pájeného styku a proud bude přes tento článek procházet pouze jedním kontaktem a povede to ke vzniku 1/3 vady.

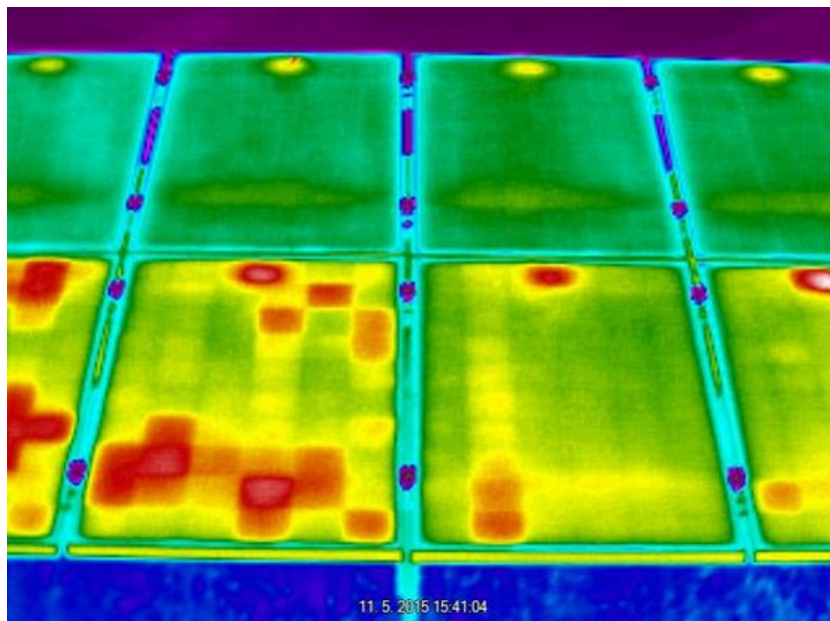


Obr. 2.4: Termovizní snímek panelů s vysokými přechodovými odpory

#### 2.4.4. PID (Potential Induced Degradation)

Jedná se o poruchu vznikající vysokým rozdílem potenciálů v systému solárních panelů, a to zejména u panelů umístěných na konci řetězce. Jejím důsledkem je vznik tzv. hot spotů na solárním panelu, které mají šachovnicové rozprostření a jsou především na hranici s rámem a mohou způsobit až 70% úbytek na výkonu poškozených panelů. Dále je tato porucha závislá na počtu panelů v řetězci (čím více panelů v řetězci, tím je větší pravděpodobnost, že se PID projeví). Neopomenutelné jsou i environmentální podmínky, a jsou to zejména vysoká vlhkost a nízká teplota, které rovněž přispívají ke vzniku PID. U většiny solárních panelů (výjimkou jsou tenkovrstvé) je PID reverzibilní. Opětovné zvýšení výkonu solárních panelů, jež byly zasaženy PIDem lze provést více způsoby, např. uzemněním záporného pólu řetězce (jestliže to střídač dovoluje), použitím různých add-on komponent atd. [9]





Obr. 2.5: Termovizní snímek panelů s detekovanou degradací PID

### 3. Zpracování obrazu

Programové prostředí MATLAB představuje komplexní nástroj pro zpracování různých druhů signálů, díky mnoha zabudovaným nástrojovým sadám (souborům funkcí). Vedle toho umožňuje implementaci vlastních (uživatelských) funkcí a nástrojů, které spolu s využitím předdefinovaných funkčních souborů dovolují snadnou implementaci libovolné úlohy z jakékoliv oblasti zpracování signálů. Jedna ze zmíněných sad slouží k zpracování obrazu (Image Processing Toolbox) a obsahuje velké množství funkcí na modifikaci jak statických obrázků, tak i videosekvencí.

#### 3.1. Snímání a digitalizace obrazu

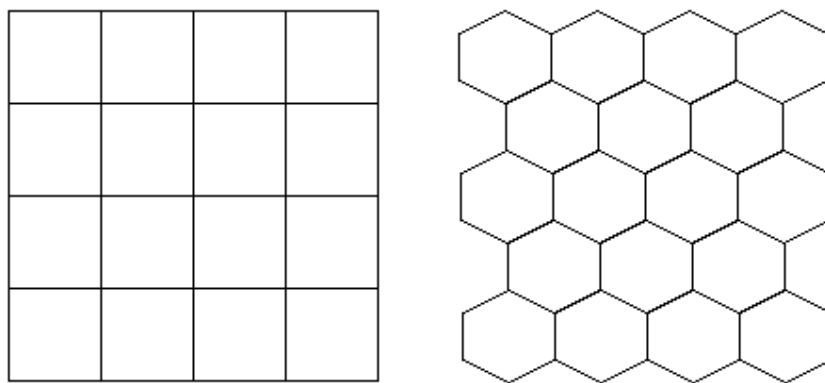
Snímání obrazu je převod optické veličiny na elektrický signál, který je spojen v čase i úrovni. Vlastní proces snímání lze také chápat, jako radiometrické měření. Na výsledný sejmutý obraz má vliv mnoho různých faktorů. Může to být ozáření snímaného objektu a jeho vlastnosti. Vstupní informaci při snímání nemusí být jen jas z kamery či skeneru, ale mohou jí být i jiné veličiny, jako jsou intenzita rentgenového záření, tepelné záření či ultrazvuk.

Digitalizace je převod spojitého analogového signálu na signál digitální. Digitální obraz je ekvivalentem obrazové funkce  $f(x, y)$ , kde  $x$  a  $y$  jsou souřadnice v prostoru. Získává se pomocí vzorkování obrazu do matice  $M \times N$  bodů a kvantováním do  $K$  úrovní.

Vzorkování se řídí Shanonovou větou, ze které plyne, že nejmenší detail v digitálním obraze musí být minimálně dvojnásobkem vzorkovacího intervalu. Volba vhodného rozlišení obrazu je jedním z nejdůležitějších kroků digitalizace. Při nízkém rozlišení se ztrácí informace o detailech v obraze, a naopak při velkém rozlišení stoupá výpočetní

náročnost při dalším zpracovávání obrazu. Velikost obrazu se většinou udává v obrazových bodech – pixelech (picture element). Rozlišení obrazu je uváděno v jednotkách body/palec – DPI (dots per inch). U kvantování úrovní jasu volíme jejich počet tak, aby nedocházelo k falešným obrysům. Ty začínají být člověku patrné, pokud počet úrovní klesne pod 50.

Volba vzorkovací mřížky je důležitou součástí digitalizace. Nejčastěji se používají mřížky čtvercové a hexagonální. Jejich struktura je zobrazena na obr. 3.1. [14]



Obr. 3.1: Čtvercová a hexagonální vzorkovací mřížka

Pro další práci s digitálním obrazem je ještě třeba nadefinovat důležitou vlastnost, a tou je vzdálenost dvou obrazových bodů udanými souřadnicemi  $(x, y)$  a  $(i, j)$ . Obecně je vzdálenost dvou bodů je chápána, jako Euklidovská vzdálenost  $D_E$ , která je definována dle následujícího vztahu:

$$D_E = \sqrt{(x - i)^2 + (y - j)^2}. \quad (6)$$

## 3.2. Předzpracování obrazu

Po úspěšném získání obrazu a jeho digitalizaci je k dispozici digitální obraz pozorované scény. Obraz však může být zkreslen, díky způsobu snímání nebo nevhodných podmínek při jeho průběhu. Pokud je znám charakter zkreslení, je možné tuto chybu opravit pomocí korekcí, které jsou jednou z metod předzpracování obrazu. Existuje velké množství dalších metod, které usnadňují další analýzu obsahu obrazu, identifikaci objektů nebo jen zvýrazňují důležité rysy obrazu pro snazší pozorování člověkem. Základní rozdělení metod předzpracování obrazu:

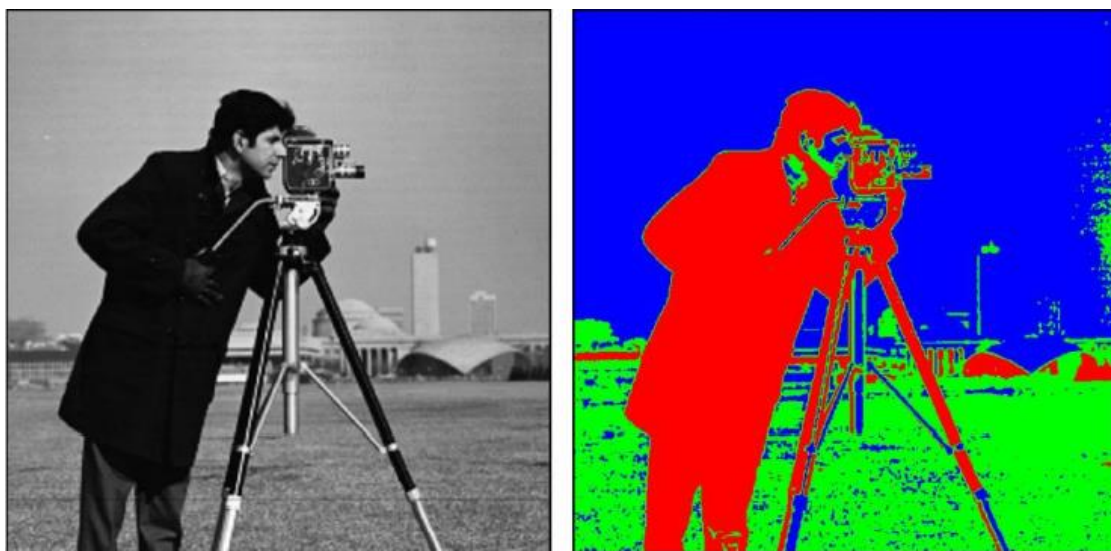
- jasové transformace,
- geometrické transformace,
- filtrace a ostření.

Jsou zde zmíněny jen základní způsoby předzpracování obrazu, které zde budou blíže nastíněny. Samozřejmě lze nalézt mnoho dalších, jako jsou například metody matematické morfologie (dilatace, eroze, otevření atd.). [14]



### 3.3. Segmentace

Jedná se o analýzu obrazu, která vede k nalezení objektů v obraze. Za objekty se zde považují části obrazu, které jsou bodem zájmu v dalším průběhu zpracování. Cílem segmentace je rozdělení obrazu do částí odpovídající předmětům či oblastem reálného světa. Výsledkem segmentace je soubor oblastí, které odpovídají objektům ve vstupním obraze. Jedná se o tzv. kompletní segmentaci. Pokud ale oblasti neodpovídají přesně objektům, tak tuto segmentaci nazýváme částečnou. Kompletní segmentace obecně využívá vyšší úrovně zpracování, která je založena na znalostech řešeného problému. Částečná segmentace je založena na principu homogenity obrazových vlastností (např. jas, barva) uvnitř segmentu. [14]



Obr. 3.2: Příklad segmentace obrazu

### 3.4. Popis obrazu

Čtvrtým krokem je popis obrazu nebo též popis nalezených objektů z předešlé segmentace. Existují dva základní způsoby popisu. Jeden je založen na kvantitativním přístupu, což znamená popis objektů pomocí souboru číselných charakteristik. Mohou jimi být např. velikost objektu, kompaktnost apod. Druhý způsob je kvalitativní přístup, ve kterém jsou popisovány relace mezi objekty a jejich tvarové vlastnosti. Způsob popisu se volí vždy podle toho, k čemu bude dál využit. Ve většině případů je tento popis vstupní informací pro rozpoznávání (klasifikaci) objektů. Výběr popisu je pak závislý na použitém rozpoznávacím algoritmu. [14]

### 3.5. Klasifikace

Finálním krokem při zpracování obrazu je klasifikace (rozpoznání) obrazu. Jedná se o zařazení objektů nalezených v obraze do skupiny předem známých tříd. Metody klasifikace objektů lze rozdělit do dvou základních skupin, které jsou úzce spjaty se způsobem popisu objektů. Jedná se o příznakové rozpoznávání a strukturální

rozpoznávání. Příznakové metody jsou založeny na principu využití příznaků, což je skupina číselných charakteristik objektu. Učení vlastního klasifikátoru zde může být s trénovací množinou i bez ní, na principu shlukové analýzy. Strukturální rozpoznávání využívá jako vstupu kvalitativní popis objektů, kterým jsou přiřazeny základní vlastnosti, jež objekt charakterizují. Na tyto vlastnosti jsou pak aplikovány algoritmy rozboru slova popisujícího objekt a kontroly syntaxe pro definovanou gramatiku, jazyk a abecedu. [14]

## 4. Praktická část

V této kapitole se budeme zabývat popisem aplikace. Hlavní podmínkou aplikace je, aby solární panel byl umístěn uprostřed snímku, který bude načten uživatelem po spuštění aplikace.

### 4.1. Volba programovacího prostředí

Na počátku praktické realizace bylo nutné zvolit programovací prostředí. V dnešní době existuje celá řada různých prostředků, pomocí kterých je možné efektivně zpracovávat obraz. Lze využívat programy od různých firem (např. Borland, Microsoft, ...), které slouží k programování v jazyce C++ a v dnešní době mohou být rozšířeny o další knihovny pro práci s obrazem. Druhou skupinu tvoří univerzální výpočetní programy, mezi kterými jsou ANSYS, MATLAB, LabVIEW a další programy.

Pro vytvoření aplikace bylo zvoleno programovací prostředí MATLAB (verze R2014b).

Výhodou MATLABU je možnost implementace do programovacího jazyku C, který v dnešní době patří k nejznámějším programovacím jazykům. MATLAB je maticově orientovaný a má implementováno mnoho operací pro práci s maticemi, což je při zpracovávání obrazu výhodné. Hlavní předností MATLABU je jeho rozsáhlá knihovna, která je určená pro zpracovávání obrazů a nazývá se Image Processing Toolbox. Image Processing Toolbox obsahuje operace pro editaci, převody formátů, zobrazování, úpravy, předzpracování, segmentaci, popis obrazu, atd. Podporuje hodně grafických formátů (bmp, cur, gif, jpg, pcx, png, tiff, ...), hodně typů datových souborů (binární, indexované, černobílé obrazy, ...), apod. Další výhodou je možnost vzájemného propojení MATLABU s termovizní kamerou výrobce FLIR, kterou byly pořízeny snímky pro praktickou část bakalářské práce. Neposlední výhodou je také dostupná licence MATLABU pro studenty VUT v Brně.

### 4.2. Návrh GUI

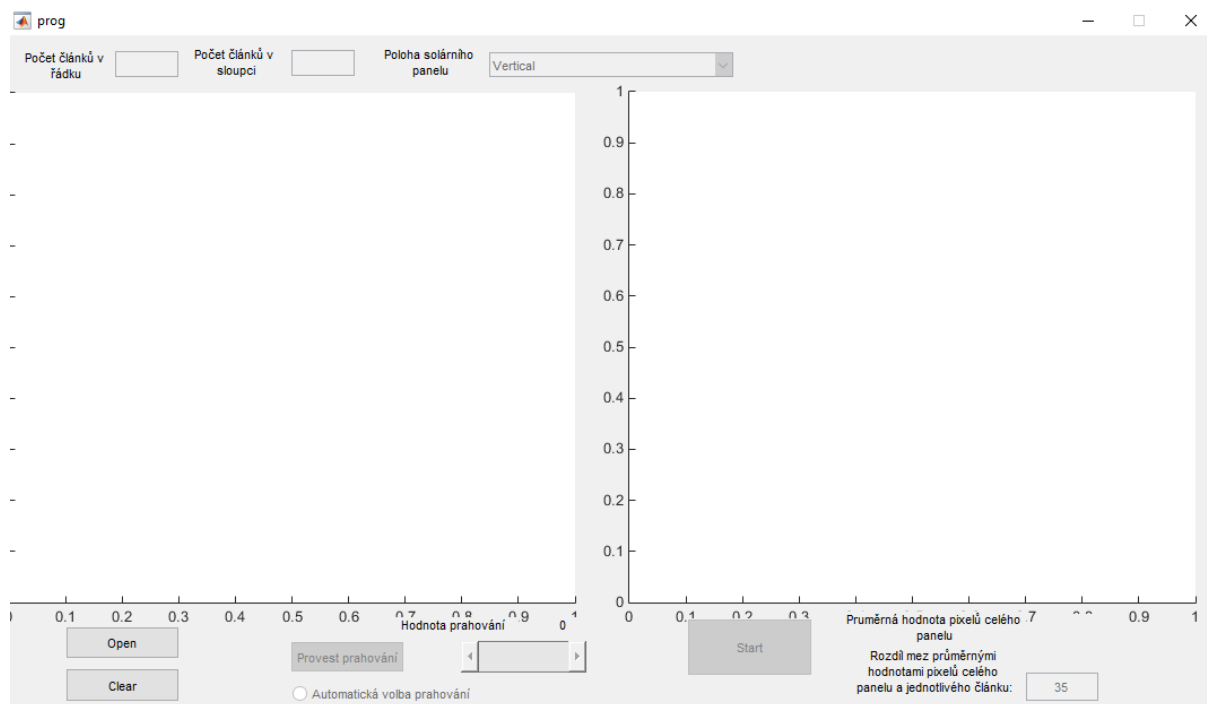
Pro návrh vlastního programu bylo potřeba zvážit, jakým způsobem bude celý program naimplementován. Jednou z možností byla varianta vytvoření skriptů a ovládání programu pomocí příkazového řádku MATLABU, ale vhodnějším a praktičtějším způsobem by bylo vytvoření samostatně spustitelné aplikace s vlastním grafickým uživatelským rozhraním (GUI).

Součástí rozhraní aplikace jsou dvě obrazovky, které slouží obecně k zobrazování různých typů grafů a průběhů. V našem případě první obrazovka slouží pro zobrazování načteného snímku, a druhá slouží pro náhled snímku po jeho prahování a pak pro náhled po vyhodnocení snímku.

Dalšími důležitými prvky jsou zapínač režimu automatického prahování a posuvník hodnoty prahování, který slouží pro nastavení hodnoty prahování načteného snímku. V případě zapnutí zapínače se prahování provádí automaticky, v opačném případě je uživatel schopen samostatně zvolit potřebnou hodnotu, podle níž bude prahování provedeno.

Součástí rozhraní jsou také dvě oblasti, do nichž uživatel musí zapsat počet článků v řádku a v sloupci. Rovněž je tam speciální pole pro zápis hodnoty rozdílu mezi střední hodnotou pixelů celého panelu a střední hodnotou pixelů jednotlivého článku, podle něhož bude probíhat vyhodnocení snímku.

Následuje množství ovládacích tlačítek, které slouží pro načtení snímku, pro návrat k výchozím nastavením, k předzpracování a vyhodnocení snímku. Na vzhled výsledného GUI se můžeme podívat na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Náhled na GUI aplikace

### 4.3. Popis funkce aplikace

V této podkapitole se budeme zabývat popisem jednotlivých funkcí aplikace, které již byly nastíněny v rámci popisu GUI. Každé tlačítko v GUI má v sobě určitou funkci aplikace. Jádrem celé aplikace je soubor `prog.m`, jehož základ byl vygenerován MATLABEM společně s vytvořením GUI aplikace. Z hlavního souboru jsou pak případně volány další `m`-soubory, které obsahují skripty vykonávající určité funkcionality. Spouštěním souboru `prog.m` dojde také k zahájení celé aplikace.

Nejprve bylo potřeba provést inicializaci programu. Pro tento účel je v souboru `prog.m` funkce `prog_OpeningFcn`, která je vygenerována MATLABEM, je zavolána a provedena dříve, než se aplikace objeví uživateli. Do této funkce vypíšeme inicializační příkazy, které slouží pro zneprístupnění vybraných prvků a jejich funkcí, které na začátku nemají smysl pro použití. Jedná se o oblasti pro editaci počtu článků, volby polohy panelu, zapínač režimu automatického prahování, posuvník hodnoty prahování, tlačítka předzpracování a vyhodnocení obrazu. Tyto oblasti nemá smysl použít, dokud nebude načten snímek, kterým budou tyto funkce zpracovávány. Pro tento účel použijeme příkaz „set“ pro nastavení parametru „enable“ na hodnotu „off“,

čímž dojde k vypnutí objektu prvků. Celkový náhled na výše popsané inicializační příkazy můžeme vidět v tomto kódu:

```
set(handles.slider_prah, 'enable', 'off');
set(handles.Prah, 'enable', 'off');
set(handles.Start, 'enable', 'off');
set(handles.pocet_rad, 'enable', 'off');
set(handles.pocet_sloup, 'enable', 'off');
set(handles.prah_button, 'enable', 'off');
set(handles.rozdil, 'enable', 'off');
set(handles.rozmisteni, 'enable', 'off');
set(handles.message, 'Visible', 'off');
```

## 4.4. Načtení obrazu

Po spuštění GUI aplikace by uživatel měl provést jako první úkol: načtení snímku solárního panelu pro detekování defektů.

Načtení snímku do aplikace provedeme kliknutím na tlačítko Open. Po kliknutí na toto tlačítko dojde k zavolání funkce Open\_Callback. Tato funkce je zavolána jakmile nastane událost stisknutí tlačítka a má následující podobu:

```
function Open_Callback(hObject, eventdata, handles)
[filename, pathname] = uigetfile('*.jpg', 'Open file');
img = imread([pathname, filename]);
if isequal(img, 0)
    return
end;
axes(handles.axes1);
imshow(img);
set(handles.Open, 'UserData', img);
set(handles.Prah, 'enable', 'on');
set(handles.slider_prah, 'enable', 'on');
set(handles.prah_button, 'enable', 'on');
set(handles.prah_text1, 'String', '0');
```

Po provedení této funkce budou zpřístupněné následující prvky: tlačítko předzpracování obrazu, zapínač režimu automatického prahování a posuvník hodnoty prahování.

## 4.5. Předzpracování obrazu

Další funkcí je předzpracování obrazu důležité pro doladění snímku. Následně je snímek upraven pomocí projekční transformace a vyhodnocen z pohledu sledovaných defektů.

Po stisku tlačítka Prahování dojde k zavolání funkce Prah\_Callback. Tato funkce nejdříve provede načtení snímku z předchozího kroku a pak celý snímek převede z barevného modelu RGB do stupně šedi. Dojde k odstranění informace o barevném tónu a sytosti při zachování jasu snímku. Tento přechod (barva - šed') dostaneme pomocí příkazu „rgb2gray“, který na vstupu dostane snímek z minulého kroku.

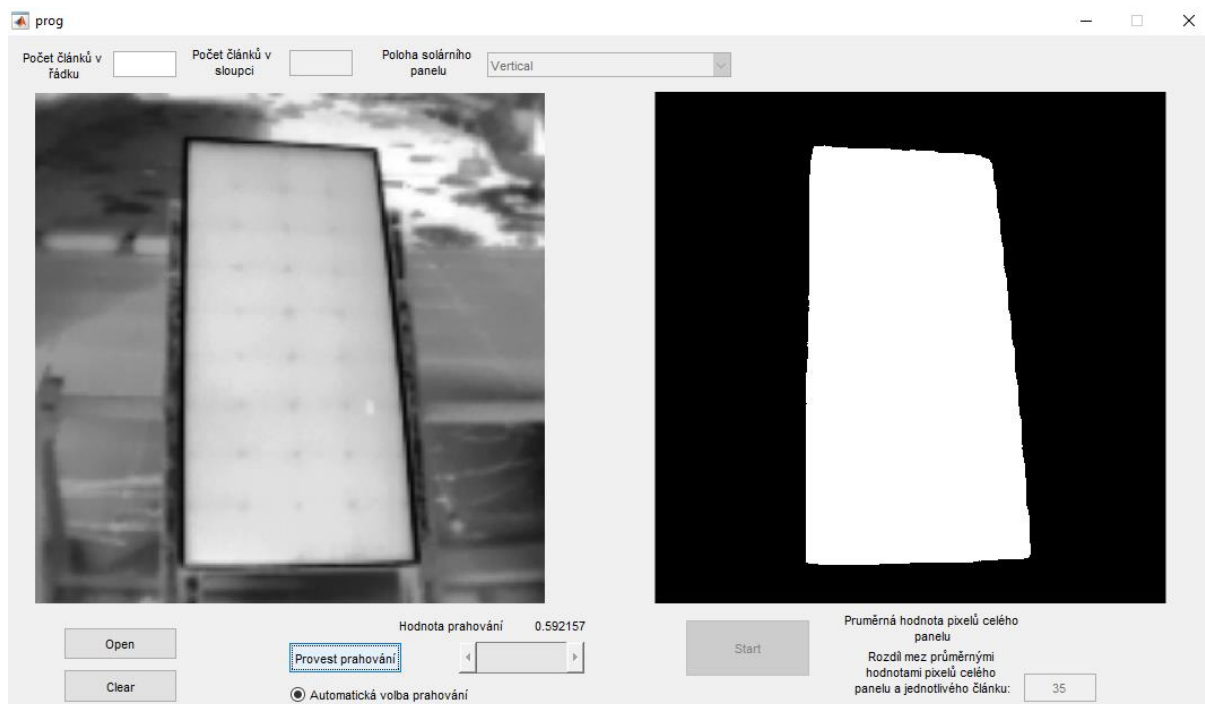
Následuje další krok, který snímek zjednoduší. Tento krok je prahování. Prahování nebo také anglicky tresholding, můžeme definovat jako nejjednodušší metodu segmentace

obrazu, která je založena na hodnocení jasu každého pixelu. Principem prahování je nalezení tzv. prahu v histogramu, kde prahem rozumíme takovou hodnotu, pro kterou platí, že všechny hodnoty jasu, nižší jak práh, odpovídají pozadí obrazu a všechny hodnoty, vyšší jak práh, odpovídají popředí obrazu. Použitím prahování dostaneme obrázek, který obsahuje jen černou a bílou barvu, tedy takový obrázek, který bude reprezentován body, nabývajícími pouze dvou hodnot 0 a 1.

Před stisknutím tlačítka Prahování uživatel musí rozhodnout, jestli globální prahová hodnota bude vypočítána automaticky (musí zapnout položku automatické hodnoty prahování) nebo tuto hodnotu zvolí sám (musí ručně nastavit tuto hodnotu pomocí posuvníku hodnoty prahování). V případě, pokud uživatel nebude spokojený s výsledkem automatického prahování, může vypnout položku automatické hodnoty prahování a nastavit tuto hodnotu pomocí posuvníku hodnoty prahování. Prahem se nazývá normalizovaná hodnota intenzity, která se nachází v rozsahu od 0 do 1. V prvním případě budeme potřebovat funkci s názvem graytrash, která slouží pro výpočet globální prahové hodnoty. Funkce „graythresh“ využívá k nalezení prahové hodnoty Otsuho metodu a dostává na vstup načtený obrázek. Tato vypočítaná hodnota, pomocí funkce graytrash, bude uložena do proměnné. Ve druhém případě hodnota z posuvníku bude také uložena do proměnné. Poté přichází na řadu další funkce s názvem „im2bw“, která provede vlastní prahování obrázku podle vypočítané či zvolené globální prahové hodnoty. Získáme tedy binární obrázek, který je reprezentován pouze hodnotami 0 a 1, tedy obrázek obsahující pouze černou a bílou barvu. Takto upravený obrázek je uložen a bude dále zpracováván.

```
function Prah_Callback(hObject, eventdata, handles)
    img = get(handles.Open, 'UserData');
    I1 = rgb2gray(img);
    [ymax, xmax] = size(I1);
    n = fix(xmax*ymax*0.2);
    if (get(handles.prah_button, 'Value')==1
        level = graythresh(I1);
        bwn = im2bw(I1, level);
        set(handles.prah_text1, 'String', level)
        set(handles.slider_prah, 'Value', level);
    else
        level = get(handles.slider_prah, 'Value');
        bwn = im2bw(I1, level);
    end;
```

Výsledek správného provedení této funkce je znázorněn na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Ukázka prahování snímku

Po provedení této funkce bude zpřístupněna oblast pro zápis hodnoty počtu článků v řádku.

## 4.6. Vyhodnocení obrázku

Následuje další funkce s názvem Start. Do této funkce patří následující kroky: hledání přímek omezující tvar solárního panelu na obrazu, výpočet rohových bodů pro geometrickou transformaci obrazu a vyhodnocení z pohledu sledovaných defektů. Před spuštěním této funkce uživatel musí provést volbu polohy solárního panelu.

### 4.6.1. Hledání přímek omezující tvar solárního panelu

Pro hledání přímek, které omezují tvar solárního panelu na obrazu a výpočet potřebných bodů pro geometrickou transformaci, byla vytvořena funkce  $[x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4] = MNC(bwn)$ . Vstupním parametrem tohoto skriptu je náš zpracovávaný snímek. Na začátku skriptu nejprve provedeme zjištění a uložení rozměrů obrázku a také inicializaci potřebných proměnných:

```
function [x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4] = MNC(bwn)
%metoda nejmenších čtverců
[ymax, xmax] = size(bwn);
istartx = fix(xmax/2);
istarty = fix(ymax/2);
x1 = istartx; x2 = istartx; x3 = istartx; x4 = istartx; x5 = istartx;
y1 = istarty; y2 = istarty; y3 = istarty; y4 = istarty; y5 = istarty;
```

Pak následuje první cyklus, který slouží ke zjištění černého prostoru na pravé straně obrázku. Cyklus prochází maticí obrázku po řádku ze středového bodu na ose X a ze

středového bodu s posunem nahoru o 10% velikosti osy Y a pracuje následujícím způsobem – zatímco se bude hodnota pixelu rovnat hodnotě předchozího pixelu, hodnota x se bude zvyšovat o 1 pixel. Teprve až hodnoty pixelů budou odlišné, cyklus skončí:

```
%hledani rovnice prave primky
y1 = fix(ymax*0.4);
for i = istartx:xmax
    if bwn(y1,i)~=bwn(y1,i-1)
        x1 = i-1;
        break;
    end;
end;
```

Až získáme první souřadnice hledaného bodu, změní se počáteční bod hledání na ose Y. Každý středový bod bude posunut o 5% velikosti osy Y dolů na rozdíl od předchozí hodnoty, což to platí pro všechny následující body.

Takto získáme 5 bodů, abychom mohli proložit přímkou omezující pravou stranu solárního panelu (viz obr. 4.3). Pro získání rovnice této přímky použijeme příkaz „polyfit“, který slouží k získání rovnice přímky metodou nejmenších čtverců:

```
X = [x1 x2 x3 x4 x5];
Y = [y1 y2 y3 y4 y5];
primkaR = polyfit (X, Y, 1); %výpočet rovnice pravé přímky
```

Stejným způsobem získáme rovnice levé přímky. Na rozdíl od předchozích cyklů pro získání rovnice pravé přímky, hodnota x se bude zmenšovat o 1 pixel.

Pro získání bodů pro rovnice horní přímky použijeme rovnice pravé a levé přímky. Nejprve vypočítáme střed mezi těmito přímkami. Pak cyklus prochází maticí obrázku nejdřív po rovnici levé přímky s posunutím o 20% od počáteční hodnoty středu mezi přímkami ze středového bodu na ose X.

```
b = fix((primkaR(2)/primkaR(1)+primkaL(2)/primkaL(1))/2); %výpočet
středu mezi přímkami
%hledani rovnice horní přímky
for i = istarty:-1:1
    if bwn(i,x1)~= bwn(i+1,x1)
        x1 = round((i/primkaL(1))-b*0.8);
        y1 = i;
        break;
    end;
end;
```

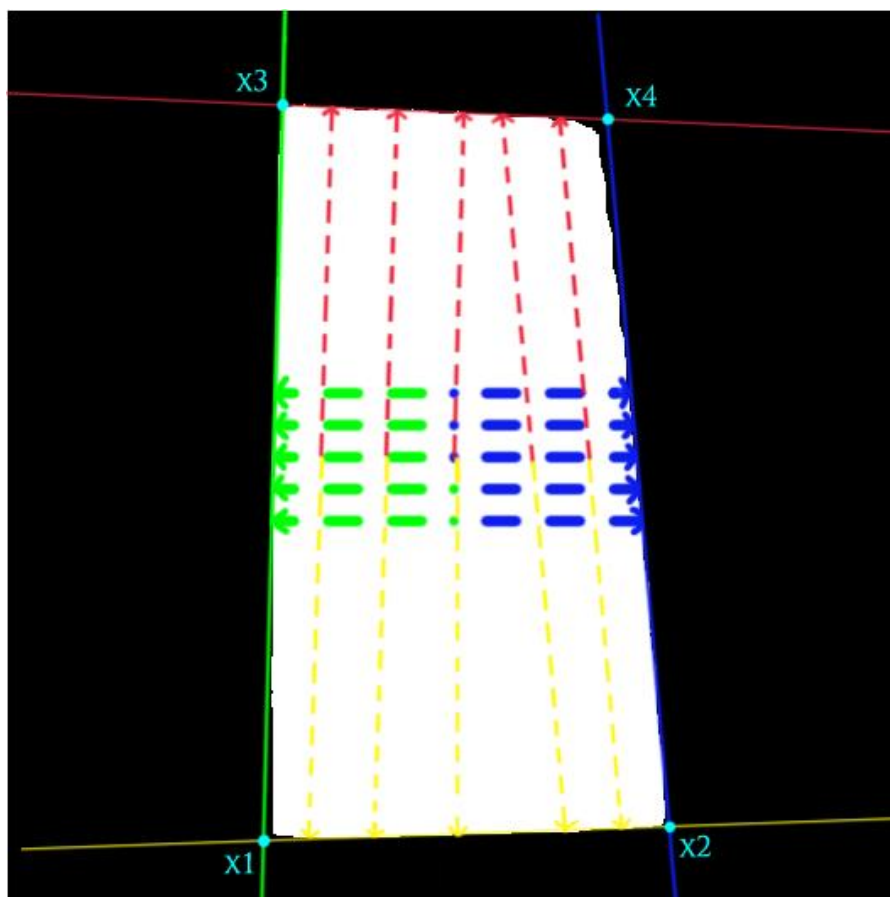
Pro následující body platí, že vyhledávací rovnice přímky bude mít na rozdíl od předchozí hodnoty posunutí o 10% víc od počáteční hodnoty středu mezi přímkami.

```
X = [x1 x2 x3 x4 x5];
Y = [y1 y2 y3 y4 y5];
primkaU = polyfit (X, Y, 1); %výpočet rovnice horní přímky
```

Stejným způsobem získáme rovnice dolní přímky. Na rozdíl od předchozích cyklů pro získání rovnice horní přímky, hodnota x v tomto cyklu se zmenšuje o 1 pixel.

Grafické znázornění tohoto výpočtu je vidět na obrázku 4.3.





Obr. 4.3: Grafické znázornění hledání přímek omezující tvar solárního panelu

Dále následuje výpočet rohových bodů solárního panelu pomocí získaných rovnic přímek:

```
%výpočet rohových bodů
x1 = (primkaD(2)-primkaL(2))/(primkaL(1)-primkaD(1));
y1 = x1*primkaL(1)+primkaL(2);
x2 = (primkaD(2)-primkaR(2))/(primkaR(1)-primkaD(1));
y2 = x2*primkaD(1)+primkaD(2);
x3 = (primkaU(2)-primkaL(2))/(primkaL(1)-primkaU(1));
y3 = x3*primkaL(1)+primkaL(2);
x4 = (primkaU(2)-primkaR(2))/(primkaR(1)-primkaU(1));
y4 = x4*primkaR(1)+primkaR(2);
```

#### 4.6.2. Geometrická transformace snímku

V dalším kroku probíhá výpočet transformační matice pro geometrickou transformaci.

Jak je známo, perspektivní transformace na rovině je definována maticí transformace homogenních souřadnic.

$$P = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & d_x \\ a_{21} & a_{22} & d_y \\ p_1 & p_2 & s \end{bmatrix} \quad (7)$$

Tato matice se skládá z osmi prvků (měřítka-otočení  $(a_{ij})$ , posunu  $(d_x, d_y)$ , perspektivy  $(p_1, p_2)$  a jednoho měřítkového koeficientu). Aby bylo možné jednoznačně definovat tuto transformaci, musíme mít osm rovnic spojující tyto hodnoty. Čtyři body, z nichž každý má dvě souřadnice, určují právě tyto rovnice, za předpokladu, že jakékoliv tři z nich se nenachází na jedné přímce.

Máme čtyři body  $(x_1, y_1), \dots, (x_4, y_4)$  v souřadnicích výchozího snímku. Čtvrtý bod vyjádříme jako lineární kombinaci prvních třech bodů:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Řešíme tento systém a zapíšeme do transformační matice, která převede  $(1,0,0)$  do  $(x_1, y_1, 1)$ ,  $(0,1,0)$  do  $(x_2, y_2, 1)$ ,  $(0,0,1)$  do  $(x_3, y_3, 1)$  a  $(1,1,1)$  do  $(x_4, y_4, 1)$ .

$$A = \begin{bmatrix} \lambda x_1 & \mu x_2 & \tau x_3 \\ \lambda y_1 & \mu y_2 & \tau y_3 \\ \lambda & \mu & \tau \end{bmatrix} \quad (9)$$

Nyní zopakujeme tyto kroky pro souřadnice bodů v konečném prostoru a získáme matici  $B$  v nových souřadnicích.

$$B = \begin{bmatrix} \lambda' x_1 & \mu' x_2 & \tau' x_3 \\ \lambda' y_1 & \mu' y_2 & \tau' y_3 \\ \lambda' & \mu' & \tau' \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pak požadovaná transformační matice bude vypadat:

$$T = A^{-1} \cdot B \quad (11)$$

Matice  $A^{-1}$  převede počáteční souřadnice bodů do dílčích fiktivních bodů  $(1,0,0)$ ,  $(0,1,0)$ ,  $(0,0,1)$  a  $(1,1,1)$ , matice  $B$  převede je do požadovaných hodnot.

Programový kód pro výše popsany výpočet:

```
A = [ x1 x2 x3
      y1 y2 y3
      1 1 1];
ans1 = [x4; y4; 1];
a = A\ans1;
for i = 1:3
    for j = 1:3
        A(j,i) = A(j,i)*a(i);
    end;
end;
B = [x1n x2n x3n
      y1n y2n y3n
      1 1 1];
ans2 = [x4n; y4n; 1];
for i = 1:3
    for j = 1:3
        B(j,i) = B(j,i)*b(i);
    end;
end;
T = B*(inv(A));
```

Pro transformaci obrazu nejdřív musíme použít příkaz „maketform“ pro vytvoření struktury prostorové transformace. Dalším krokem je použití prostorové transformace obrazu pomocí příkazu „imtransform“:

```
t_proj=maketform('projective', T);
I_projective=imtransform(img, t_proj,'UData', [1 size(img, 2)],
'VData', [1 size(img, 1)], 'XData', [1 x_del], 'YData', [1
y_del], 'Size', [y_del*2 x_del*2]);
```

Výsledek provedené geometrické transformace je znázorněn na obrázku 4.4.



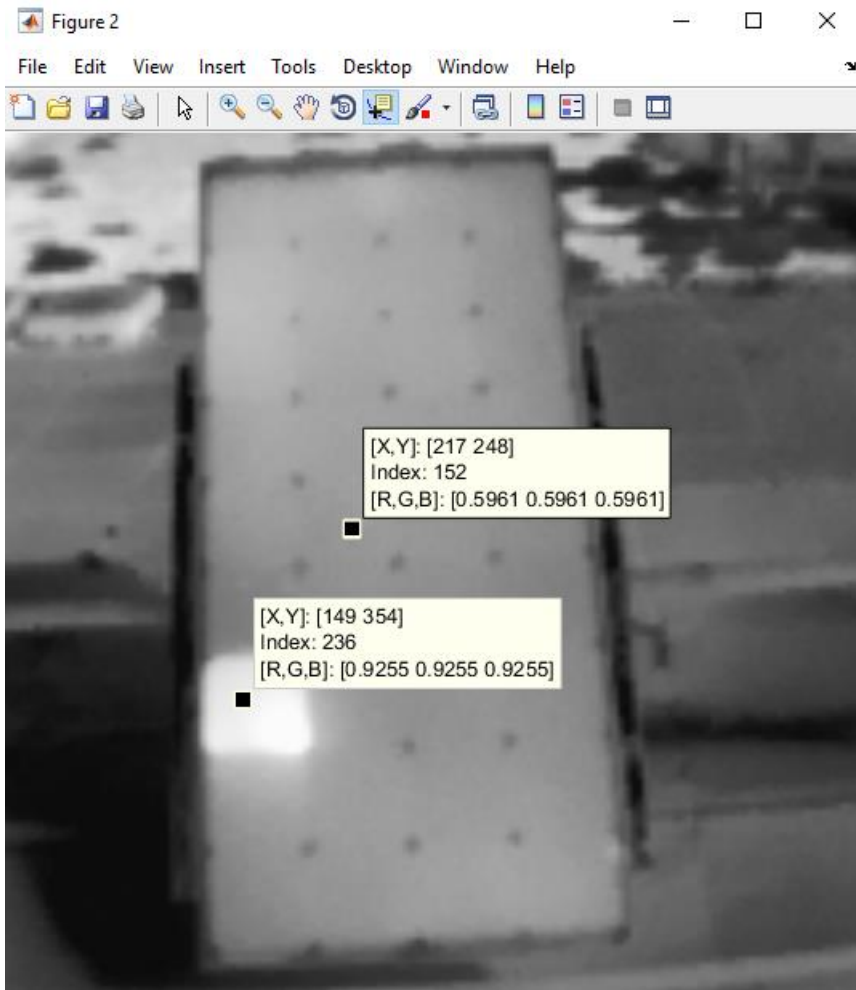
Obr. 4.4: Výsledek geometrické transformace

### 4.6.3. Detekování defektů

Získaný snímek po transformaci převedeme z barevného modelu RGB do stupně šedi již známým příkazem „rgb2gray“. Potom převedeme matici snímku z typu „unit8“ do typu „double“ a vypočítáme střední hodnotu pixelů celého snímku pomocí příkazu „mean“:

```
Igray=rgb2gray(I_projective);
Igray1 = double(Igray);
stred=mean2(Igray);
```

Převod do stupně šedi potřebujeme pro snadnou detekci defektů. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, v případě, kdy solární panel obsahuje vadný článek, lze ho pozorovat termovizní kamerou. Tento vadný článek bude mít vyšší teplotu na rozdíl od ostatních funkčních článků. Po převodu termovizního snímku do stupně šedi lze jasně vidět, že barva vadného článku, na rozdíl od ostatních funkčních článků, je skoro bílá a tak tedy hodnota pixelu vadného článku je větší než hodnota pixelu funkčního článku. Bohužel, nelze jednoznačně převést hodnotu pixelu do hodnoty, která by odpovídala skutečné teplotě, jelikož se škála teplot nastavuje automaticky při vytvoření snímku termovizní kamerou.



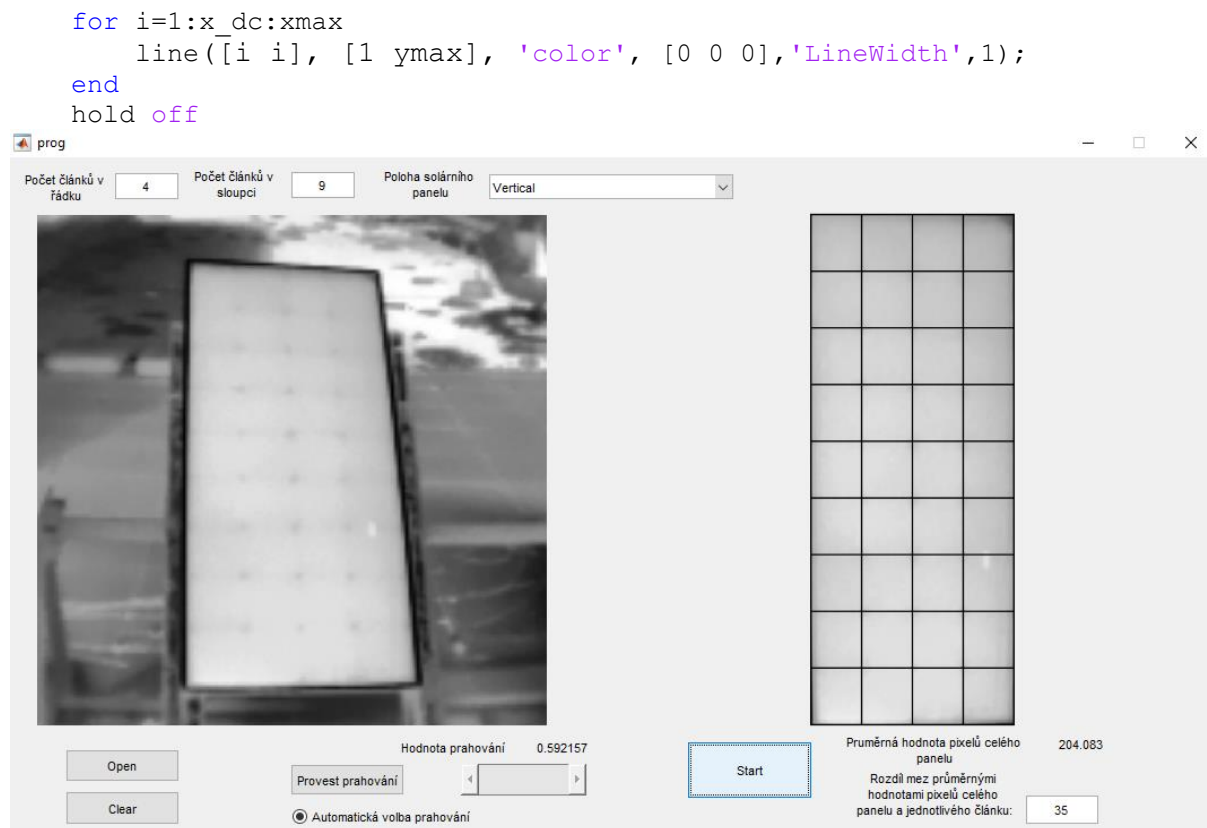
Obr. 4.5: Ukázka rozdílných hodnot pixelů vadného a funkčního článku, kde Index je hodnota jednotlivého pixelu

Načteme hodnoty počtu článků v řádku a sloupci a do proměnných Nradek a Nsloup z oblasti, do které je zadá uživatel, a provedeme jejich převod do typu double:

```
Nradek = get(handles.pocet_rad, 'String');
Nradek = str2num(Nradek);
Nsloup = get(handles.pocet_sloup, 'String');
Nsloup = str2num(Nsloup);
```

Dále provedeme výpočet délky a šířky jednotlivého solárního článku fotovoltaického panelu a nakreslíme mřížku, která bude odpovídat rozmístění jednotlivých článků na snímku solárního panelu, který byl získán po transformaci:

```
x_dc = (xmax-1)/Nradek; %zjištění délky solárního
článku na ose X
y_sc = (ymax-1)/Nsloup; %zjištění šířky solárního
článku na ose Y
p = x_dc*y_sc;
axes(handles.axes2);
imshow(Igray);
hold on
for i=1:y_sc:ymax
    line([1 xmax], [i i], 'color', [0 0 0], 'LineWidth', 1);
end
```



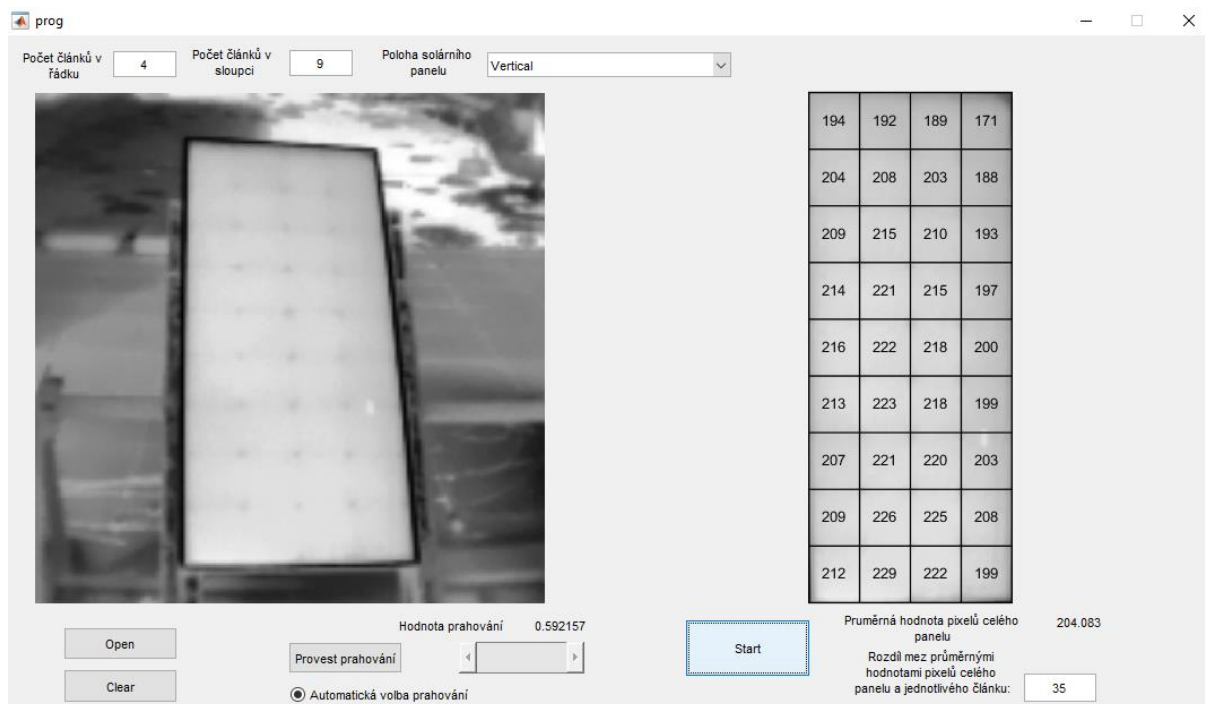
Obr. 4.6: Naložení mřížky na získaný snímek

Pak následuje cyklus, který slouží ke zjištění střední hodnoty pixelů jednotlivého solárního článku. Cyklus prochází maticí obrázku po člancích a vypočítává jejich střední hodnotu pixelů. Pro lepší znázornění je střední hodnota pixelů uvedena uprostřed jednotlivého článku. Pak se provede porovnání střední hodnoty pixelů jednotlivého článku se střední hodnotou pixelů celého panelu. Bude-li zjištěno, že rozdíl těchto hodnot přesahuje hodnotu, kterou uvedl uživatel, bude jednotlivý článek přebarven do červené barvy a nad snímkem se objeví nadpis „Byl detekován defekt!“:

```

for i = 1:x_dc:(xmax-x_dc)
    for j = 1:y_sc:(ymax-y_sc)
        str = 0;
        for k = i:(i+x_dc)
            for l = j:(j+y_sc)
                str = (Igray1(fix(l), fix(k)))+str;
            end;
        end;
        if ((str/p)-stred)>rozdil
            set(handles.message, 'Visible', 'on')
            hold on
            rectangle('position',[i j x_dc y_sc], ...
                'facecolor','r')
            hold off
        end;
        str_text = num2str(fix(str/p));
        text(i+x_dc/4,j+y_sc/2,str_text, 'FontSize', 10)
    end;
end;

```



Obr. 4.7: Ukázka finálního výsledku aplikace

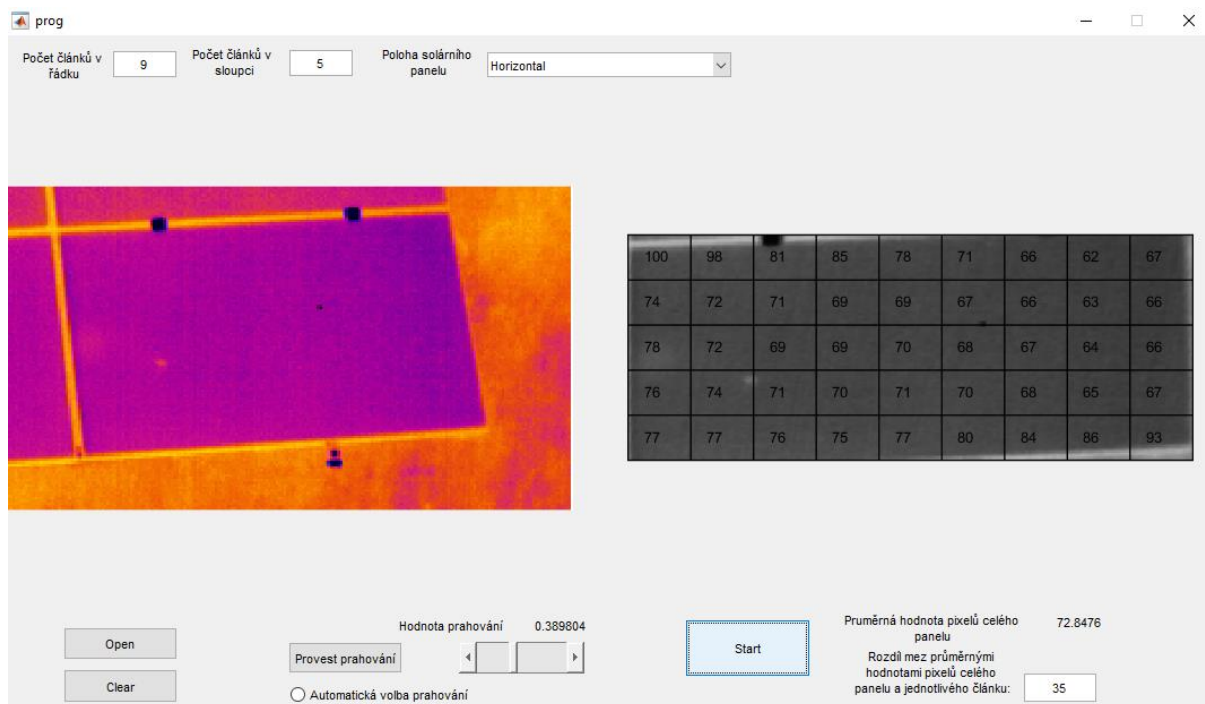
## 4.7. Výchozí nastavení

Rozhodne-li se uživatel provést novou analýzu snímku nebo bude chtít vrátit původní stav aplikace, musí kliknout na tlačítko Clear. Tehdy dojde k zavolání funkce `Clear_Callback`.

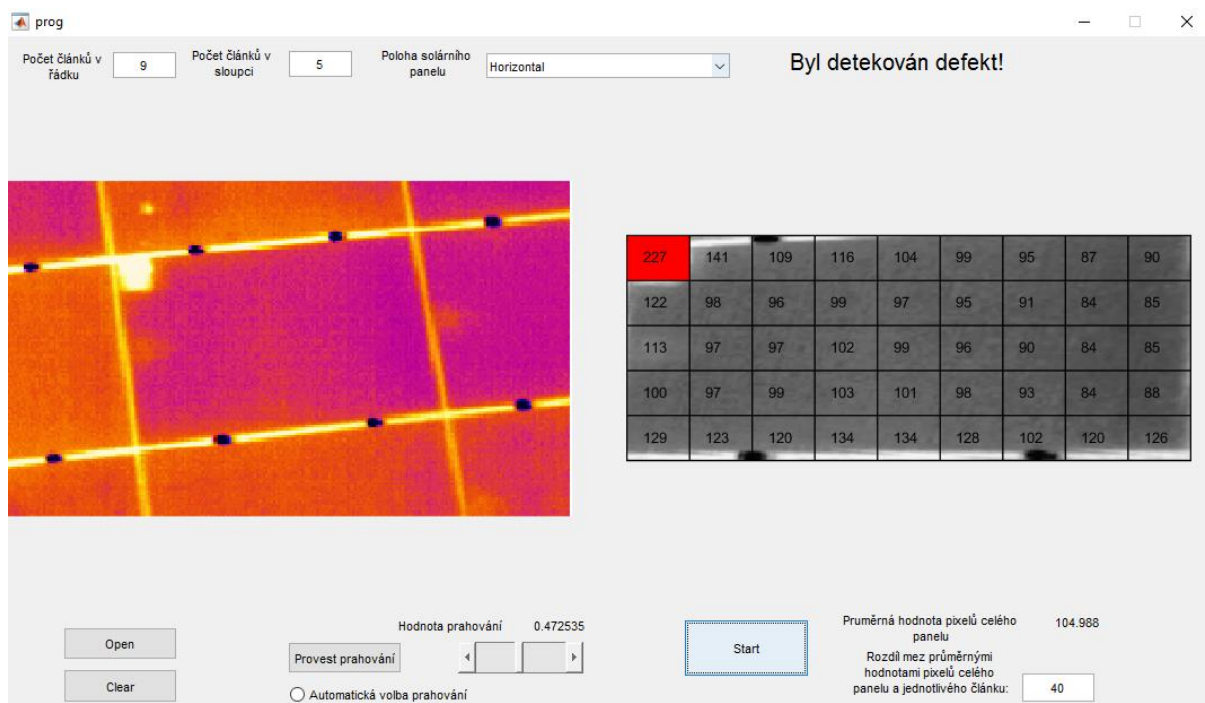
Tato funkce je zavolána jakmile nastane událost stisknutí tlačítka a má následující podobu:

```
cla(handles.axes1, 'reset');
cla(handles.axes2, 'reset');
set(handles.slider_prah, 'Value', 0);
set(handles.slider_prah, 'enable', 'off');
set(handles.Prah, 'enable', 'off');
set(handles.Start, 'enable', 'off');
set(handles.pocet_rad, 'enable', 'off');
set(handles.rozdil, 'enable', 'off');
set(handles.rozdil, 'String', '35');
set(handles.pocet_rad, 'String', '');
set(handles.pocet_sloup, 'enable', 'off');
set(handles.pocet_sloup, 'String', '');
set(handles.prah_button, 'Value', 0);
set(handles.prah_button, 'enable', 'off');
set(handles.prah_text1, 'String', '0');
set(handles.message, 'Visible', 'off');
set(handles.str_hodnota, 'String', '');
set(handles.pocet_rad, 'String', '');
set(handles.pocet_sloup, 'String', '');
set(handles.rozmisteni, 'Value', 1);
set(handles.rozmisteni, 'enable', 'off');
```

## 4.8. Vyhodnocení termovizních snímků

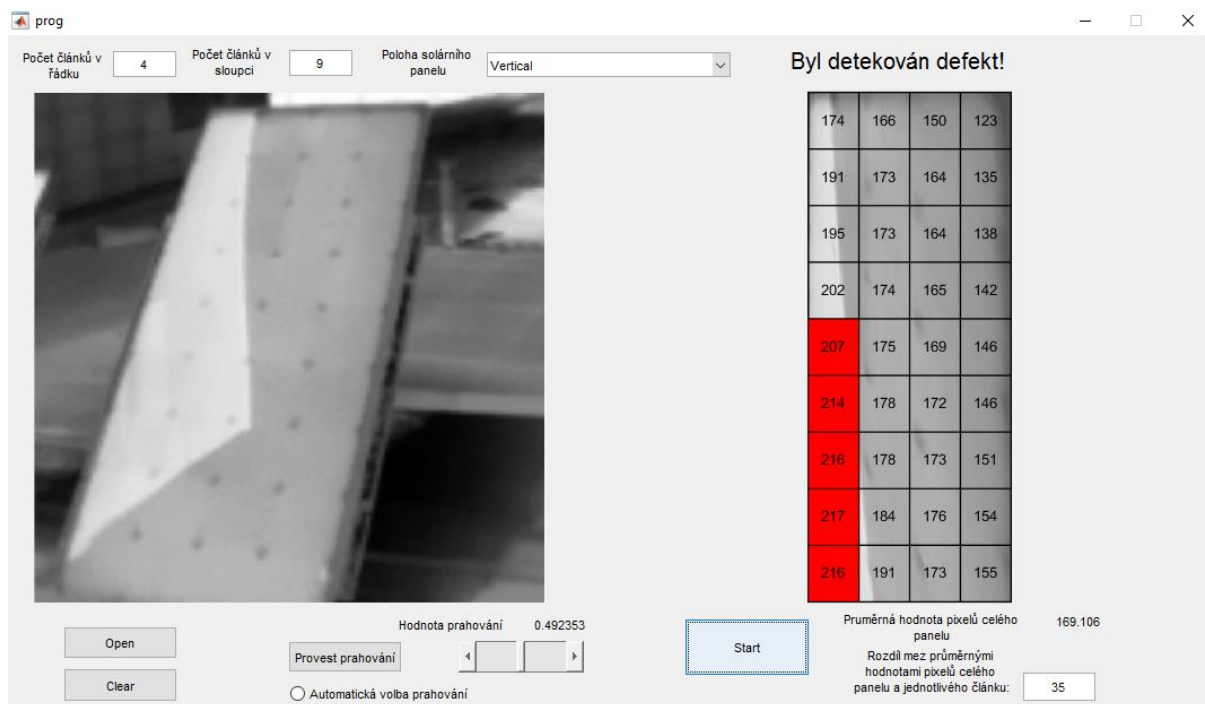


Obr. 4.8: Vyhodnocení snímku solárního panelu neobsahující žádné defekty

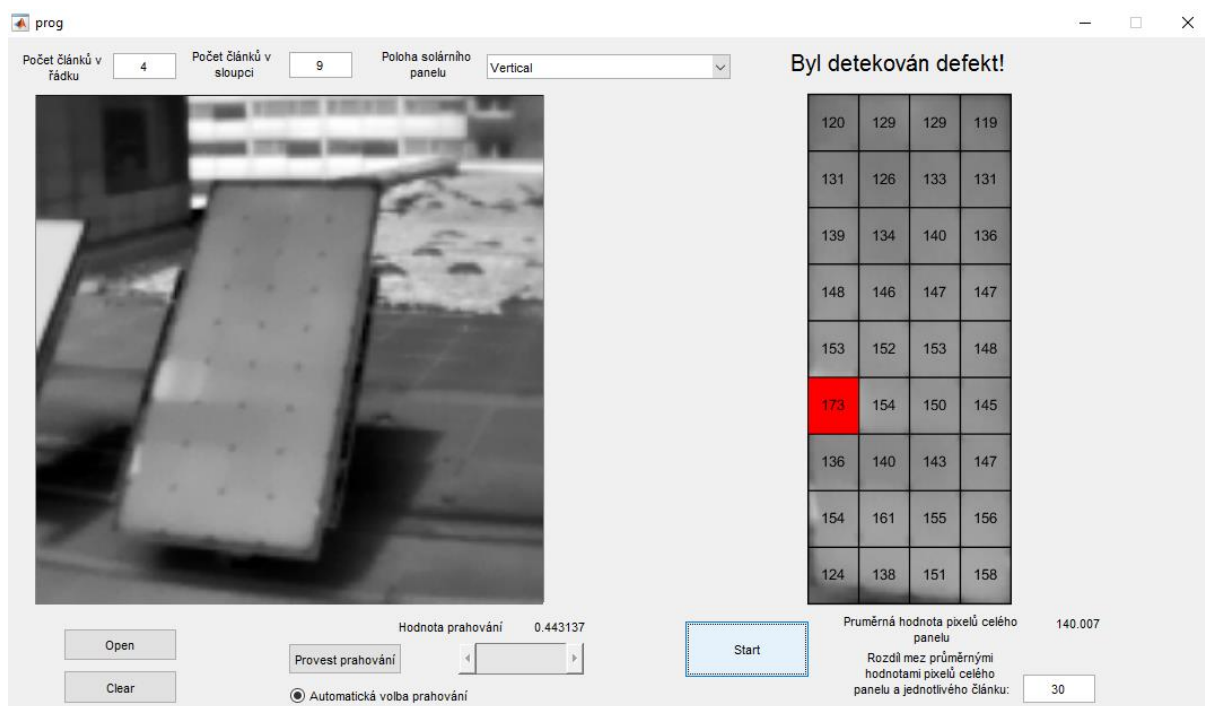


Obr. 4.9: Vyhodnocení snímku solárního panelu obsahující defekt (Horké místo)





Obr. 4.10: Vyhodnocení snímku solárního panelu obsahující odraz slunce



Obr. 4.11: Vyhodnocení snímku solárního panelu obsahující defekt (Horké místo)



## Závěr

V teoretické části práce jsou rozebrány principy činnosti solárních článků, metody detekce defektů ovlivňujících jejich kvalitu, včetně metody termovize, která je nejpoužívanější a nejrychlejší diagnostickou metodou bezkontaktního měření. Také byl proveden základní rozbor zpracování obrazu.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvoření softwaru, s jehož pomocí je umožněno vyhodnocení termovizních snímků fotovoltaických panelů. Tento software se podařilo vytvořit a kompletně zprovoznit s využitím programu MATLAB (verze R2014b). Bylo k němu vytvořeno také uživatelské rozhraní (GUI), pomocí kterého může uživatel pohodlně provádět analýzu termovizních snímků.

Hlavní princip algoritmu spočívá ve správně nastavené hodnotě prahování pro získání potřebného kontury fotovoltaického panelu. Dále následuje výpočet rohových bodů, které získáváme pomocí metody nejmenších čtverců. Díky těmto bodům, jsme schopni provést geometrickou transformaci snímku, abychom získali obraz jednotlivého panelu. Potom nakreslíme mřížku, která nám ukáže panel po jednotlivých článcích. Dále se provede porovnání mezi střední hodnotou pixelů celého panelu a střední hodnotou pixelů jednotlivého solárního článku. Jakmile rozdíl těchto hodnot bude překročen hodnotou uvedenou uživatelem, bude tento solární článek označen za vadný.

Funkčnost aplikace byla otestována řádově na 30 snímcích s různými defekty. Pokud je dodržen postup při spuštění aplikace a správně zvolena hodnota prahování, dá se říct, že aplikace funguje velice dobře. Jestliže se objeví odraz na solárním panelu, budou články na tomto snímku také detekovány jako vadné, jelikož se jedná o nerovnoměrné rozložení teplot na solárním panelu. Proto doporučujeme, aby uživatel provedl po analýze také vizuální kontrolu snímku na výskyt defektů. Proto, aby funkčnost aplikace byla co nejlepší, je třeba mít k dispozici snímky ve vysoké kvalitě a dostatečném rozlišení.

V budoucnu tuto aplikaci lze rozšířit o možnost propojení s videem, které by mohlo být nasnímáno z dronu. Takovým způsobem by proces vyhodnocování fotovoltaických panelů pomocí termovize byl mnohem rychlejším.

# Literatura

- [1] Termokamera.cz. Princip a funkce termovizní kamery. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>>
- [2] ING. RADIM BAŘINKA. Solární články, panely a fotovoltaické systémy. Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování. Česká energetická agentura, Praha
- [3] VANĚK, J.; KŘIVÍK, P.; NOVÁK, V. Alternativní zdroje energie. Brno, 2006. VUT v Brně FEKT.
- [4] TOMEŠ. M. Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011. Ostrava, 2012. Unie soudních znalců.
- [5] MGR. JIŘÍ PETERA, MGR. JAN HEŘMAN. Fotovoltaika [online]. [cit. 2015-10-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.rescompass.org/IMG/pdf/Fotovoltaika.pdf>>
- [6] VANĚK, J. Aktuální trendy diagnostických metod FV článků pro maximalizaci délky životnosti panelů [online]. 2011 [cit. 2015-10-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.cemc.cz/OZE2011/116.pdf>>
- [7] BANNERT. P. Praktika z fotovoltaiky [online]. VOŠ a SPŠ Varnsdorf. 2008 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z WWW: <[http://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP\\_EkO/um/praktika\\_z\\_fotovoltaiky.pdf](http://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP_EkO/um/praktika_z_fotovoltaiky.pdf)>
- [8] JANDOVIČ, K.: Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků. Brno, 2008. 91 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008.
- [9] Sunfin Praha. Poruchy solárních panelů [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.sunfin.cz/cs/page/poruchy-solarnich-panelu/>>
- [10] ELEKTRINA.CZ. Princip fotovoltaického článku [online]. 2009 [cit. 2015-10-18]. Dostupné z WWW: <<http://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltaickehoclanku/view?searchterm=P-N%20p%C5%99echod>>.
- [11] MURTINGER, K.; BERANOVSKÝ, J.; TOMEŠ, M. Fotovoltaika elektřina ze slunce. Brno: ERA, 2007. 81 s. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [12] VANĚK, J. Diagnostické metody fotovoltaických článků [online]. 2010 [cit. 2015-24-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku>>
- [13] HŮLKA, C., MARTIŠ, L., ZWIENER, V. Termovize jako prostředek pro odhalování a posuzování tepelných mostů [online]. 2006 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z WWW: <<http://atelier-dek.cz/termovize-jako-prostredok-pro-odhalovani-posuzovani-tepelnych-mostu-227>>
- [14] FÍRT, J., HOLOTA, R. Digitalizace a zpracování obrazu [online]. [cit. 2015-12-12]. Dostupné z WWW: <<http://home.zcu.cz/~holota5/publ/DigZprO.pdf>>

## Seznam obrázků

Obr. 1.1: Princip solárního článku [10] .....	9
Obr. 1.2: Náhradní schéma solárního článku.....	10
Obr. 1.3: Voltampérová charakteristika s vyznačenými parametry. [7] .....	12
Obr. 1.4: Struktura fotovoltaického panelu .....	14
Obr. 1.5: Schéma měření metodou elektroluminiscence .....	15
Obr. 1.6: Poruchy článků zjištěné pomocí elektroluminiscenční metody [6].....	16
Obr. 1.7: Schéma měření metodou fotoluminiscence .....	17
Obr. 1.8: Měřicí pracoviště LBIC [8] .....	17
Obr. 2.1: Blokové schéma termovizní kamery .....	19
Obr. 2.2: Vizualizace horkého místa termovizní kamerou .....	21
Obr. 2.3: Termovizní snímek panelu s nevyrábějící 2/3 panelu .....	21
Obr. 2.4: Termovizní snímek panelů s vysokými přechodovými odpory .....	22
Obr. 2.5: Termovizní snímek panelů s detekovanou degradací PID .....	23
Obr. 3.1: Čtvercová a hexagonální vzorkovací mřížka .....	24
Obr. 3.2: Příklad segmentace obrazu .....	25
Obr. 4.1: Náhled na GUI aplikace .....	28
Obr. 4.2: Ukázka prahování snímku .....	31
Obr. 4.3: Grafické znázornění hledání přímek omezující tvar solárního panelu.....	33
Obr. 4.4: Výsledek geometrické transformace .....	35
Obr. 4.5: Ukázka rozdílných hodnot pixelů vadného a funkčního článku, kde Index je hodnota jednotlivého pixelu.....	36
Obr. 4.6: Naložení mřížky na získaný snímek.....	37
Obr. 4.7: Ukázka finálního výsledku aplikace.....	38
Obr. 4.8: Vyhodnocení snímku solárního panelu neobsahující žádné defekty.....	39
Obr. 4.9: Vyhodnocení snímku solárního panelu obsahující defekt (Horké místo) .....	39
Obr. 4.10: Vyhodnocení snímku solárního panelu obsahující odraz slunce.....	40
Obr. 4.11: Vyhodnocení snímku solárního panelu obsahující defekt (Horké místo) .....	40

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Název veličiny
$R_p$	$\Omega$	Paralelní odpor
$R_L$	$\Omega$	Zátěž solárního článku
$R_s$	$\Omega$	Sériový odpor
$J$	$A \cdot mm^{-2}$	Proudová hustota
$J_p$	$A \cdot mm^{-2}$	Proudová hustota děr
$J_n$	$A \cdot mm^{-2}$	Proudová hustota elektronů
$D_p$	$m^2 s^{-1}$	Difúzní koeficient děr
$D_n$	$m^2 s^{-1}$	Difúzní koeficient elektronů
$n_{po}$	$m^{-3}$	Koncentrace elektronů v polovodiči v rovnovážném stavu
$p_{po}$	$m^{-3}$	Koncentrace děr v polovodiči v rovnovážném stavu
$k$	$J \cdot K^{-1}$	Boltzmanova konstanta
$T$	$^{\circ}K$	Teplota
$n_i$	$m^{-3}$	Koncentrace nosičů v rovnovážném stavu
$\tau_{sc}$	$\mu s$	Efektivní doba života nosičů
$I_{sc}$	$A$	Proud nakrátko
$U_{0C}$	$V$	Napětí naprázdno
$I_{450}$	$A$	Proud při napětí 450 mV
$FF$	$[-]$	Činitel naplnění
$W$	$W \cdot m^{-2}$	Radiační tok jednotkou plochy
$\varepsilon$	$[-]$	Emisivita
$\sigma$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	Stephanova-Boltzmannova konstanta
$\lambda_{max}$	$nm$	Vlnová délka maxima spektrální hustoty vyzařování
$b$	$K \cdot mm$	Wienova konstanta
$D_E$	$m$	Euklidovská vzdálenost
$W_{gSi}$	$eV$	Šířka zakázaného pásu (křemík)

## Seznam zkratek

Zkratka	Popis
MPP	Maximum Power Point
LBIC	Light Beam Induced Current
PID	Potential Induced Degradation

## Seznam příloh

Přílohou práce je CD s elektronickou verzí bakalářské práce. Na přiloženém CD dále naleznete:

- Aplikace
- Vybrané testovací termovizní snímky