

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO
PROSTŘEDÍ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

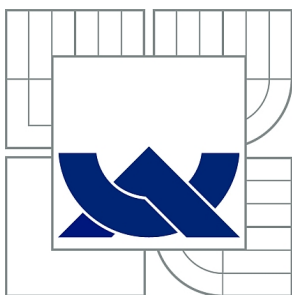
STUDIUM DEGRADAČNÍCH VLIVŮ NA VLASTNOSTI
FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

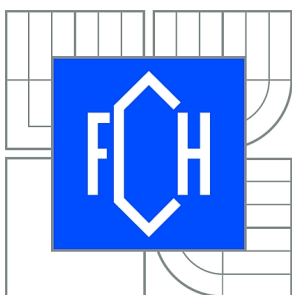
TEREZA ŠVESTKOVÁ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY
ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

FACULTY OF CHEMISTRY

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF
ENVIRONMENTAL PROTECTION

STUDIUM DEGRADAČNÍCH VLIVŮ NA VLASTNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

STUDY OF INFLUENCE DEGRADATION TO FOTOVOLTAIC CELLS PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TEREZA ŠVESTKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH ZMEŠKAL, CSc.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce: **FCH-BAK0588/2010** Akademický rok: **2010/2011**
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí
Student(ka): **Tereza Švestková**
Studijní program: Chemie a chemické technologie (B2801)
Studijní obor: Chemie a technologie ochrany životního prostředí (2805R002)
Vedoucí práce **prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.**
Konzultanti:

Název bakalářské práce:

Studium degradačních vlivů na vlastnosti fotovoltaických článků

Zadání bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši na téma vliv degradačních procesů na vlastnosti fotovoltaických článků a fotovoltaických panelů
2. Prostudujte vliv teploty, záření a vlhkosti na funkčnost fotovoltaických článků
3. Porovnejte a diskutujte výsledky použitých metod
3. Výsledky zpracujte do bakalářské práce

Termín odevzdání bakalářské práce: 6.5.2011

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Tereza Švestková
Student(ka)

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
Vedoucí práce

doc. Ing. Josef Čáslavský, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2011

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje problematice degradace fotovoltaických článků a modulů. K posouzení degradace v průběhu provozu byla využita data z fotovoltaického systému realizovanému na Pedagogické fakultě Masarykovy univerzity v Brně, Poříčí 31. Cílem práce bylo zjistit vliv vnějších vlivů na množství energie dodávané do rozvodné energetické sítě.

V teoretické části jsou shrnuty základní poznatky o fotovoltaické přeměně a zařízeních, které ji realizují. V první části je popsána výroba a využití fotovoltaických článků a jejich vliv na životní prostředí. V druhé části je popsán samotný princip fotovoltaické přeměny energie. V další části jsou pak shrnuty použité materiály používané při výrobě fotovoltaických článků a jejich pouzdření. V poslední části jsou shrnuty degradace fotovoltaických panelů.

V experimentální části jsou uvedeny výsledky statistického zpracování experimentálních dat získaných z monitorovacího systému na výše uvedené elektrárně. Byl zkoumán především vliv degradačních faktorů (teploty fotovoltaického panelu, teploty vzduchu, rychlosti větru a intenzity ozáření) na účinnost konverze sluneční energie na energii elektrickou. Uvedené výsledky mohou dát užitečnou informaci při zavádění nových zařízení, resp. k modifikaci technologických procesů.

ABSTRACT

The thesis examines degradation of photovoltaic cells and modules. Degradation assessment was based on the data gathered from the photovoltaic system installed at the Pedagogical Faculty of Masaryk University in Brno, Poříčí 31. The research focuses on influence of external factors on the amount of power supplied to the grid by the system.

Theoretical part of the thesis summarizes state-of-the-art knowledge about photovoltaic conversion and devices taking the advantage of the principle. The first part of the thesis describes production and application of photovoltaic cells and their impact on the environment. Second part of the thesis deals with the principle of photovoltaic conversion. Next part lists materials used for the production of photovoltaic cells and the process of encapsulation. The fourth part summarizes knowledge about degradation of photovoltaic panels.

Experimental part of the thesis statistically analysis the data gathered from the above mentioned power plant. Influence of degradation factors (surface temperature of PV panel, air temperature, and wind velocity and radiation intensity) on effectiveness of energy conversion was examined in particular. The published results can be applied on analysis of new projects and/or used for modification of production technological processes.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaická přeměna, fotovoltaický článek, fotovoltaický modul, degradace fotovoltaických článků, degradace fotovoltaických modulů.

KEYWORDS

Photovoltaic conversion, photovoltaic cell, photovoltaic modules, degradation of photovoltaic cells, degradation of photovoltaic modules.

ŠVESTKOVÁ, T. *Studium degradačních vlivů na vlastnosti fotovoltaických článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. za vedení při psaní a zpracovávání práce, za cenné rady a velkou trpělivost. Dále bych poděkovala rodině a přátelům za pomoc při usměrňování myšlenek a psychickou podporu.

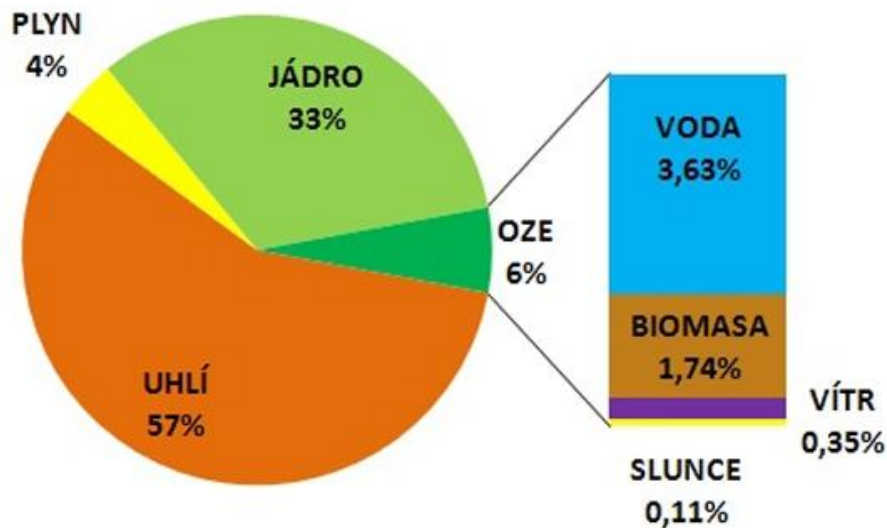
Obsah:

1. ÚVOD	7
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	8
2.1 Úvod do problematiky.....	8
2.1.1 Historie fotovoltaiky.....	8
2.1.2 Vývoj a současný stav v ČR.....	9
2.2 Solární energie	10
2.2.1 Fotovoltaický článek.....	10
2.2.2 Materiály pro fotovoltaické články.....	10
2.2.2.1. Monokrystalické články	11
2.2.2.2. Polykrystalické články.....	11
2.2.2.3. Amorfni články.....	12
2.2.2.4. Tenkovrstvé články.....	12
2.2.2.5. Organické články	13
2.2.3 Výroba fotovoltaických článků.....	13
2.2.4 Využití fotovoltaických článků.....	14
2.2.5 Pozitivní stránky	15
2.2.6 Negativní stránky.....	15
2.2.7 Fotovoltaické panely a elektrárny.....	16
2.3 Teorie P-N přechodu	19
2.3.1 Vlastní polovodič.....	19
2.3.2 Polovodič typu N	19
2.3.3 Polovodič typu P.....	19
2.3.4 PN přechod	20
2.3.5 Jednoduchý model fotovoltaického článku	20
2.4 Materiály fotovoltaických modulů.....	22
2.4.1 Přední strana	22
2.4.2 Pouzdřicí materiál.....	22
2.4.2.1. EVA (Ethylenvinylacetát)	22
2.4.2.2. PVB (polyvinylbutyral)	22
2.4.2.3. TPU (Termoplastický polyuretan).....	23
2.4.2.4. Tedlar (Polyvinylfluorid).....	23
2.4.2.5. Pertex	23
2.4.2.6. PMMA (Polymethylmetakrylát).....	23
2.4.2.7. Epoxidové pryskyřice	23
2.4.3 Zadní strana	24
2.5 Degradace fotovoltaických článků.....	25
2.5.1 Zkoušky urychleného stárnutí.....	25
2.5.2 Degradace FV modulu.....	25
2.5.3 Vliv zvýšené teploty (tepelná degradace).....	26
2.5.4 Vliv při kombinovaném efektu zvýšené teploty a vlhkosti	27
2.5.5 Vliv elektrického pole.....	27
2.5.6 Vliv prachu	27
2.5.7 Vliv mechanického namáhání.....	27
2.5.8 Vliv slunečního záření	27

3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
3.1	Popis FV elektrárny	28
3.2	Popis struktury dat ze systému	29
3.3	Převod dat do struktury pro zpracování	30
3.4	Struktura výstupních dat	30
3.5	Metody zpracování.....	31
3.6	Statistické vyhodnocení experimentálních dat.....	35
3.7	Aplikace na reálná data	36
3.7.1	Závislost teploty fotovoltaického panelu na teplotě vzduchu.....	36
3.7.2	Závislost teploty fotovoltaického panelu na intenzitě ozáření	39
3.7.3	Závislost teploty fotovoltaického panelu na rychlosti větru.....	40
3.7.4	Závislost stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu	41
3.7.5	Závislost stejnosměrného proudu a výkonu na teplotě fotovoltaického panelu	42
3.8	Souhrnné výsledky	44
3.8.1	Souhrnné výsledky pro rok 2010.....	44
3.8.2	Srovnání výsledků pro rok 2005 – 2010.....	45
3.8.2.1.	Závislost teploty fotovoltaického panelu na teplotě vzduchu.....	45
3.8.2.2.	Závislost stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu.....	46
3.8.2.3.	Závislost stejnosměrného proudu a výkonu na teplotě fotovoltaického panelu	47
4.	VÝSLEDKY A DISKUZE	49
5.	ZÁVĚR.....	50
6.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	51

1. ÚVOD

S postupným vývojem techniky, vědy a průmyslu jsou kladeny stále větší nároky na množství spotřebované energie. Česká republika v současné době nejvíce využívá na výrobu elektrické energie tepelných, nebo jaderných elektráren. Oba způsoby jsou však velmi náročné pro životní prostředí. U tepelných elektráren je výroba vázaná na těžbu uhlí, kterého jsou omezené zásoby a výrazným způsobem jejich zplodiny ohrožují životní prostředí. U jaderných elektráren je zdrojem uran a jeho štěpení, což představuje riziko termonukleární havárie a hlavně uskladňování vyhořelého paliva je nejen ekonomicky velmi náročné, ale díky velmi dlouhé době rozkladu, je problematická jeho likvidace. Proto se začíná stále více uvažovat nad obnovitelnými zdroji energie, jako je možnost získání elektrické energie ze vzduchu, vody, biomasy, slunce, geotermálními ohřevy, či se využívá energie příbojů a mnoho dalších. [1]



Obr. 1: Podíly jednotlivých zdrojů energie v České republice (převzaté z [1])

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Úvod do problematiky

2.1.1 Historie fotovoltaiky

Za prvního objevitele fotovoltaiky se považuje francouzský fyzik Alexandre Edmund Becquerel (1820 – 1981), který při svých pokusech s elektrodami ponořenými v elektrolytu zjistil, že jimi začal procházet malý proud, pokud je osvětil.

Roku 1879 byl profesorem William Gryll Adamsem a jeho studentem Richard Evans Dayem popsán přechod tvořený selenem a platinou, který při osvětlení produkuje elektrický proud, aniž by došlo ke změně samotného materiálu. K této přeměně docházelo bez použití tepla a pohyblivých částí. Tato pozorování patří mezi základní objevy v oblasti fotovoltaiky.

17. března 1905 popsal Albert Einstein fotoelektrický jev na základě kvantové fyziky pevných látek. Tento objev uvedl ve své 17-ti stránkové práci *"Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt"*. Za tento objev dostal roku 1921 Nobelovu cenu za fyziku.

V dnešní době je nejpoužívanějším materiálem na výrobu fotovoltaických článků monokrystalický křemík. K tomuto rozvoji přispěl Polák Jan Czochralski, kdy roku 1918 vyvinul metodu výroby monokrystalického křemíku.

První fotovoltaický článek byl vyvinut až v roce 1954 v Bellových laboratořích v USA. [2]

Tabulka 1: Významné mezníky v historii fotovoltaiky [3]

1839	Edmund Becquerel, francouzský fyzik, objevil fotovoltaické jev
1873	Willoughby Smith objevil fotokonduktivitu Selenu
1877	W.G. Adams a R.E. Day pozorovali fotovoltaické jev v pevném selenu, sestrojili první FV článek
1883	Charles Fritts, americký vynálezce, popsal první článek vyrobený ze selenových desek (wafers)
1904	Hallwachs objevil fotocitlivost mědi v kombinaci s oxidy mědi
1916	Millikan uskutečnil experimentální důkaz fotoelektrického jevu
1918	Polský vědec Czochralski vyvinul metodu na výrobu monokrystalického křemíku
1921	Albert Einstein získal Nobelovu cenu za teorii popisující fotoelektrický jev
1932	Audobert a Stora objevilo fotovoltaický jev v CdS
1951	Objevena metoda výroby monokrystalu germania
1957	Hoffman Electronics dosáhl 8% účinnost článku
1960	Hoffman Electronics dosáhl 14% účinnost článku
1970	založena Solar Power Corporation
1977	Celková roční výroba přesáhla 500 kW
1980	ARCO Solar je první společností s produkcí více než 1MW článků ročně
1982	Celosvětová produkce přesáhla 9,3 MW.
1983	Celosvětová produkce přesáhla 21,3 MW, a prodej 250 mil. dolarů
1989	BP Solar podala přihlášku patentu na thin film process.
1999	Celosvětově instalovaná kapacita přesáhla 1000 MW
2002	Celosvětově instalovaná kapacita přesáhla 2000 MW

2.1.2 Vývoj a současný stav v ČR

Fotovoltaické články prodělaly více jak 50 let vývoje a prošly mnoha typy konstrukcí s využitím nejrůznějších materiálů. Pro přehlednost se rozdělují do 3 generací vývoje:

1. generace (*wafer based*)

Do této generace se řadí fotovoltaické články využívající jako základ destičky z křemíku. Články tohoto typu rozlišujeme na monokrystalické a polykrystalické. Monokrystalické články jsou tvořeny z jednoho křemíkového krystalu, vyráběné lisováním a dosahují max. účinnosti až 19 %. Články polykrystalické jsou tvořeny krystalickou mřížkou a jsou vyráběny litím krystalových bloků. Polykrystalické články jsou o něco levnější než monokrystalické, avšak dokáží lépe využívat pouze difúzní světlo. Přesto, že tyto technologie jsou velmi drahé a náročné na čistotu samotného krystalického křemíku, dominují na trhu (cca 90 %).

2. generace (*thin film*)

Tato generace navazuje na první generaci ve snaze zlevnit výrobní náklady. Proto se články druhé generace vyznačují 100× až 1000× tenčí vrstvou. Nejběžnější články této generace jsou články z mikrokystalického nebo amorfního křemíku. Hlavní výhodou, v porovnání s články první generace, je úspora materiálu, avšak účinnost se značně snížila (cca 13 %).

Zatímco články 1. generace jsou výhradně na bázi křemíku, používá se pro výrobu tenkovrstvých solárních článků celá řada materiálů a mnohdy se tyto materiály i kombinují.

3. generace (*organic dye*)

Hlavním cílem této generace je snížení výrobních nákladů a maximalizace účinnosti fotovoltaických článků. Třetí generace zahrnuje řadu směrů:

- vícevrstvé solární články (z tenkých vrstev)
- články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů)

Prozatím jediným, komerčně prodávaným, příkladem jsou vícevrstvé struktury (dvojvrstvé – tzv. tandemy a trojvrstvé články). Každá sub-struktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tak energetická využitelnost fotonů. Příkladem je struktura skládající se z amorfního křemíku, který lépe absorbuje v oblasti modré, zelené a žluté oblasti spektra, a mikrokystalického, který naopak lépe absorbuje v oblasti červené a infračervené. Další možností je i nahradit křemík slitinou křemíku s germaniem dle určitých poměrů. Tohoto se využívá hojně pro trojvrstvé fotovoltaické články.

V současnosti se hodně mluví a rozvíjí hlavně články založené na organických sloučeninách, hlavně díky jejich nákladům na výrobu i škodlivosti k životnímu prostředí. [4], [5]

2.2 Solární energie

Naše planeta – Země patří do planetární soustavy, jejímž středem je Slunce. Slunce má tvar koule o průměru $1,39 \cdot 10^9$ m, tj. 109krát více než má poloměr Země, a skládá se převážně z atomárního vodíku (70 %) a helia (28 %).

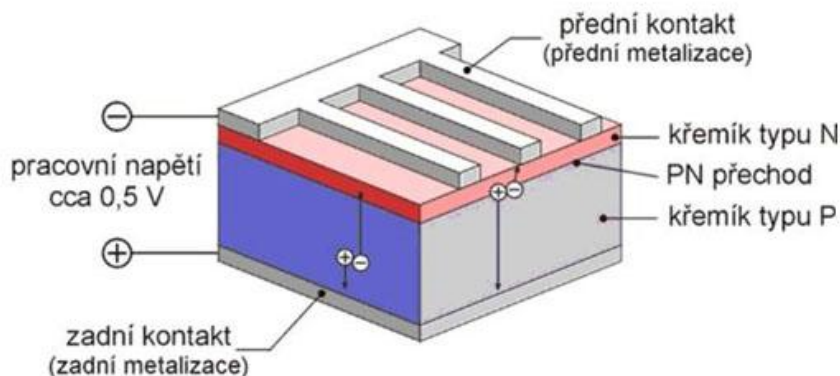
Zdrojem sluneční energie je termonukleární reakce, probíhající při teplotě $13 \cdot 10^6$ K a tlaku $2 \cdot 10^{10}$ MPa, při které dochází k přeměně vodíku na helium. Do reakce vždy vstupují 2 protony vodíku, které se spojují a vytváří 1 jádro helia a rozdíl hmoty se přemění na energii.

Sluneční záření lze rozdělit na ultrafialové záření (vlnová délka pod 400nm), viditelné záření (vlnová délka 400 – 750 nm) a infračervené záření (vlnová délka nad 750 nm). Na cestě k Zemi není pohlcováno, tudíž dorazí k zemské atmosféře ve stavu, ve kterém bylo vyzářeno. Zemská atmosféra se skládá ze 78 % dusíku a 21 % kyslíku, které přibližně 60 km nad zemí pohlcují ultrafialové a rentgenové záření a ionizují se (ionosféra). Zbývající část ultrafialového záření, které je pro nás nebezpečné, je dále pohlcováno ozonem v ozonoféře (25 – 35 km nad zemí). [6]

2.2.1 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek je polovodičová součástka schopna přeměňovat sluneční záření na elektrickou energii na principu fotovoltaického jevu.

Fotovoltaický článek se skládá z tenké destičky monokrystalu či polykrystalu křemíku. Destička je z jedné strany pokryta atomy trojmocného prvku, jako je například bór či indium (polovodič typu P) a z druhé strany atomy pětímocného prvku, jako je například Arsen (polovodič typu N). Na obou stranách destičky jsou přiloženy elektrody, které odvádějí vznikající stejnosměrný elektrický proud. [7]

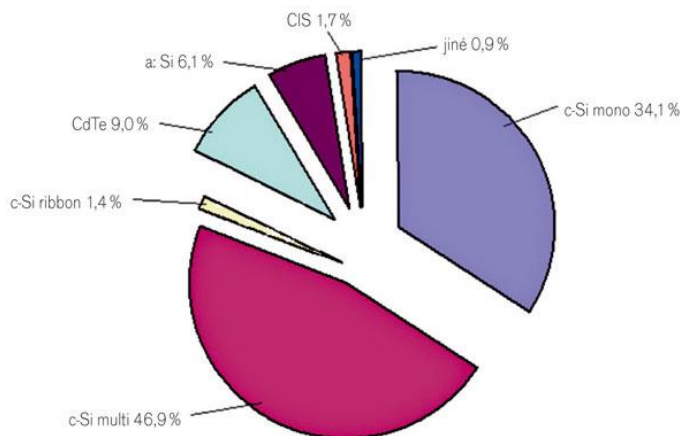


Obr. 2: Princip činnosti fotovoltaického článku [8]

2.2.2 Materiály pro fotovoltaické články

Jak již bylo uvedeno dříve, nejběžnějším polovodičovým materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík. Křemík je po kyslíku druhým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře (26 – 28 %). V přírodě se křemík v čisté podobě nevyskytuje, setkáváme se pouze s jeho sloučeninami. Nejvýznamnějším zástupcem je oxid křemičitý – SiO_2 . Díky jeho vlastnostem a vzhledu je považován za polodrahokam a existuje v mnoha barevných variantách. Jako téměř čistý ho známe pod názvem křišťál, nebo s barevnými příměsmi jsou to např. ametyst (fialová), citrín (žlutá), růženín (růžová), záhněda (hnědá), nebo opál, který existuje ve více barevných variacích. [9]

Účinnost fotovoltaického článku závisí hlavně na tom, jakou část spektra je schopno využít, jaké množství energie fotonu je přeměněno na elektrický proud a jaké množství odejde ve formě tepla. Účinnost se určuje podle tzv. zakázaného pásu. Když je zakázaný pás velký, existuje méně fotonů, které jsou schopny přenosu elektrické energie, tudíž je možné využít menší šířku spektra záření, avšak dojde ke vzniku vyššího napětí a tudíž k vyšší hodnotě účinnosti. Klasické krystalické články pohlcují viditelnou část spektra a začátek intervalu vlnových délek infračerveného spektra. [10], [11][14]



Obr. 3: Procentuální zastoupení fotovoltaických modulů ve světě [13]

2.2.2.1. Monokrystalické články

Monokrystalické články jsou základním a nejstarším typem fotovoltaických článků. Vyrábí se z destiček vysoce čistého monokrystalického křemíku, který má pravidelnou krystalickou mřížku (pravidelný geometrický tvar), viz Obr. 4. Křemíkové monokrystalické destičky se vyrábí tzv. Czochralského metodou popsanou v kap. 2.2.3. Tato metoda je nejpoužívanější, avšak velmi energeticky i technicky náročná technologie, a proto se hledaly cesty, jak ji zlevnit. Účinnost těchto článků se pohybuje v rozmezí 13 % až 17 %. [11], [12]

2.2.2.2. Polykrystalické články

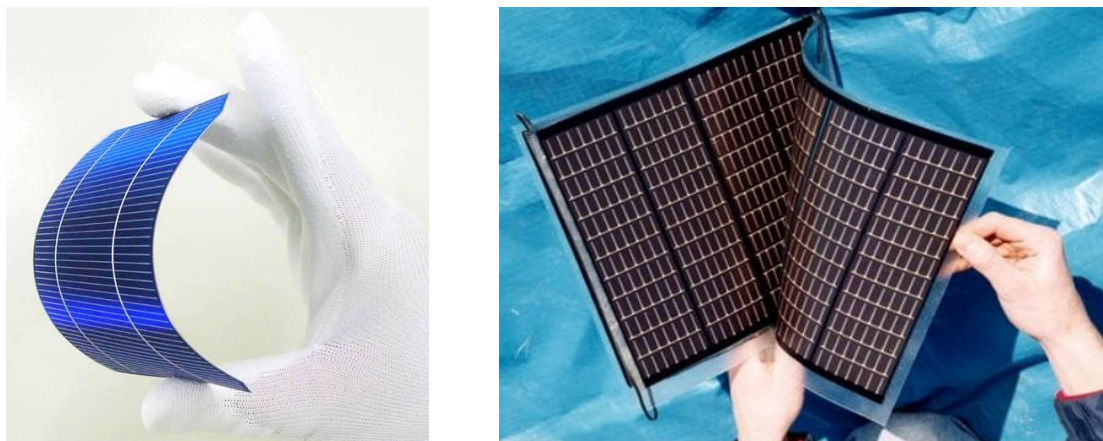
Polykrystalické články se vyrábí odléváním čistého křemíku do vhodných forem a následného řezání vzniklých ingotů na tenké destičky, viz Obr. 4. Touto metodou jdou vyrobit jak čtvercové, tak obdélníkové destičky, avšak tyto vyrobené články mají horší elektrické vlastnosti než u článků z monokrystalického křemíku, jelikož na styku jednotlivých krystalických zrn je větší odpor. Nespornou výhodou je jejich výrobní cena. Účinnost těchto článků se pohybuje od 12 % do 14 %. [11], [12]



Obr. 4: Monokrystalický (vlevo) a polykrystalický článek (vpravo) [15]

2.2.2.3. Amorfni články

Základem těchto tenkovrstvých amorfních článků je napařování tenké křemíkové vrstvy na sklo, plast nebo fólii. Proces je založen na rozkladu vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Takto nanosená vrstva je amorfni, tj. nemá pravidelnou krystalickou strukturu a obsahuje určité množství vodíku. Účinnost těchto článků je nižší (okolo 7 – 9 %), díky právě nepravidelné struktuře. Některé atomy křemíku kolem sebe nemusí mít kolem sebe potřebné „sousedy“, se kterými by mohli tvořit vazbu. Tím vznikají nenasyčené vazby, které snižují účinnost. Velkou výhodou těchto článků je jejich vysoký výkon při zastínění a zhoršeném osvětlení, a že jsou ohebné. [11], [12]



Obr. 5: Amorfni článek (nalevo) [16], Organický článek (napravo) [17]

2.2.2.4. Tenkovrstvé články

Tyto tenkovrstvé články nejčastěji tvoří amorfni křemík, ale také fotovoltaické články z PN sloučenin. Nanáší se velmi tenká vrstva materiálu (do 0,001 mm), tudíž se zlevňuje výroba díky malému množství spotřebovaného materiálu. Tyto články jsou ohebné a pružné.

Fotovoltaické články z PN sloučenin:

1. Galiumarseid (GaAs)

Nespornou výhodou těchto článků je jejich vysoká účinnost (20 – 30 %), ale zase jsou dražší než krystalické články. Dá se u nich měnit poměr Ga/As a dají se použít i doplňující prvky – Al, P, Sb, In.

2. Diselenid mědi a india (CIS)

Tento typ tenkovrstvých článků dosahuje účinnosti až 18 % a označení CIS je zkratkou jeho chemického složení – CuInSe₂.

3. Sulfid kademnatý (CdS)

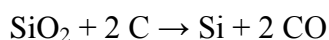
Tyto články dosahují účinnosti 10 % a jejich hlavní výhodou je jejich nízká hmotnost. Využívají se hlavně při kosmických aplikacích. Nevýhodou je však jejich malá stabilita a dnes se díky tomu už nepoužívají.

2.2.2.5. Organické články

Organické fotovoltaické články si získávají popularitu hlavně v poslední době díky jejich velmi nízkým výrobním nákladům a pružnosti základních materiálů. Hlavním parametrem pro jejich výrobu je volba vhodného základního organického polovodičového materiálu a struktura a tloušťka nanášeného materiálu. Jejich nevýhodou je však doposud velmi malá účinnost. Nejvýkonnější články dosáhly účinnosti 6,5 %. [17]

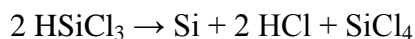
2.2.3 Výroba fotovoltaických článků

Výroba křemíkových fotovoltaických článků začíná metalurgickými operacemi. Surový křemík se získává z křemenného písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, kam je přidáván promíchaný s koksem.



V dolní části obloukové pece, kde pec dosahuje teploty až 2000 °C, je získáván roztavený křemík, který dosahuje až 99 % čistoty. Na výrobu křemíkových polovodičů je zapotřebí čistota křemíku min. 10⁻⁶ ppm. Této čistoty se dosahuje zkapalněním získaného křemíku a následnou destilací.

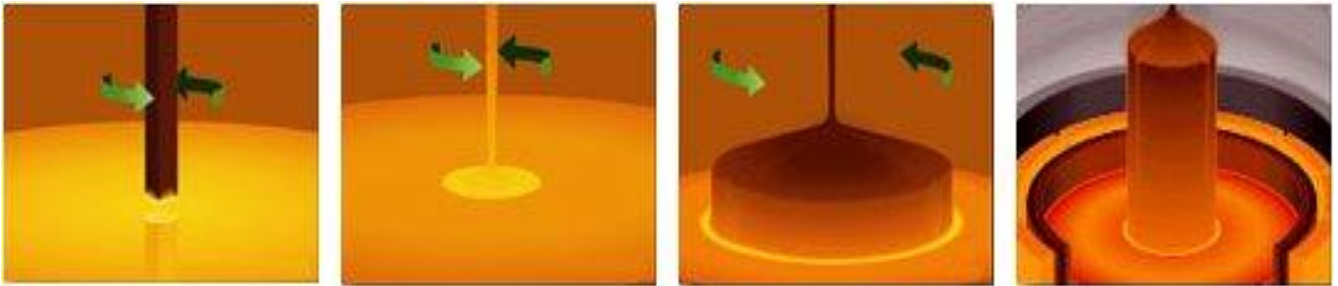
Polykrystalické články se vyrábí tzv. Siemensovou metodou, kdy je z křemíku nejprve vyrobena těkavá sloučenina (obvykle trichlorsilan – HSiCl₃). Tato plynná sloučenina se vede přes vrstvu vysoce čistého křemíku o teplotě asi 1 100 ° C, přičemž dochází k rozkladu a vysoce čistý křemík se ukládá v krystalické podobě na původní křemíkovou podložku. [9]



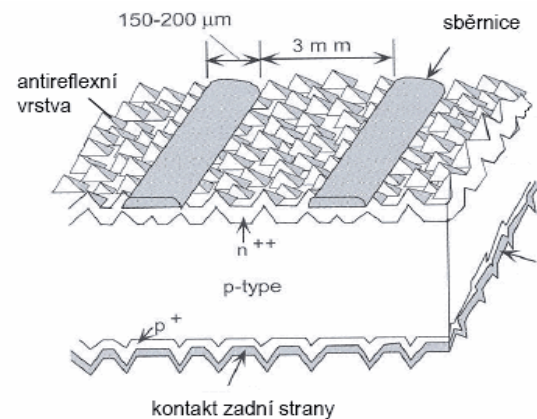
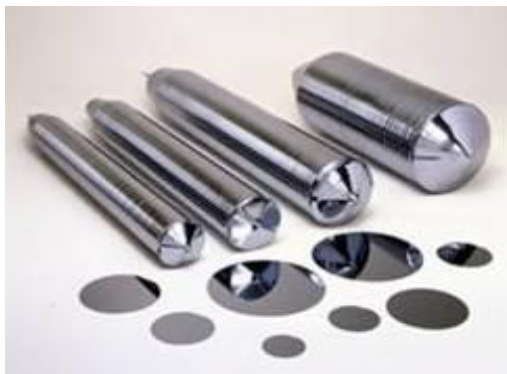
Na výrobu monokrystalického článku se využívá tzv. Czochralskeho metoda. Tato metoda využívá pomalého protisměrného tažení zárodku krystalu z taveniny velmi čistého křemíku za vzniku tzv. ingotu, který může mít až 400 mm v průměru a délku 2 m. Celý proces probíhá v inertní atmosféře, především v argonu.

Cyklus výroby [18]:

1. Sražení hran kulatého ingotu za vzniku pseudočtvercového tvaru.
2. Rozřezání ingotu speciální pilou na tzv. wafery tloušťky 0,23 – 0,35 mm a rozměru nejčastěji 156 x 156 mm.
3. Leptání desek v alkalickém roztoku KOH pro odstranění poškozeného povrchu vzniklého při řezání. Leptáním se na povrchu vytvoří mikroskopické křemíkové pyramidy o vrcholovém úhlu 70,5 ° a výšky 5 – 15 μm, které snižují celkovou reflexi povrchu, a tím se zvyšuje účinnost.
4. Difundování fosforu a vytvoření vrstvy polovodiče typu N. Jako zdroj fosforu se používá POCl₃. Při této operaci vznikne těsně pod povrchem křemíkové desky PN přechod. Tloušťka této nedifundované vrstvy je přibližně 500 nm.
5. Vytvoření pasivační vrstvy pomocí technologií LPCVD – nízkotlaké napařování, PECVD - Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition.
LPCVD: $3 \text{SiH}_2\text{Cl}_2 (\text{g}) + 4 \text{NH}_3 (\text{g}) \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 (\text{s}) + 6 \text{HCl} (\text{g}) + 6 \text{H}_2 (\text{g})$
6. Vytvoření antireflexní vrstvy a tudíž zvýšení intenzity průchodu pro jednu vlnovou délku.
7. Tisk kontaktů.
8. Měření a třídění.



Obr. 6: Tažení monokrystalu z taveniny [19]



Obr. 7: Křemíkové ingoty (vlevo) [20] , struktura článků z krystalického křemíku (vpravo) [21]

2.2.4 Využití fotovoltaických článků

Díky velkému množství typů fotovoltaických článků jsou dnes používány denně a ve všech možných odvětvích jak průmyslu, tak i samotnými domácnostmi. V domácnosti jsou nejčastěji využívány pro samotnou elektrickou potřebu domácnosti. Hojně už jsou i jako aplikace na napájení kalkulaček, hodinek či světel. Dnes se dají i zakoupit cestovní solární články, které jsou velmi ohebné. Ve velkém množství se využívají na napájení satelitů a vesmírných sond. V dnešní době se rozvíjí trend fotovoltaických elektráren velkoplošně stavěných na polích.

2.2.5 Pozitivní stránky

Velkou výhodou těchto článků je, že mohou fungovat a zásobovat i na těžko dostupná místa, jako jsou např. hory, ostrovy, pouště či vesmírné stanice.

Zdrojem elektrické energie je přeměna sluneční energie ze Slunce, která bude lidstvu ještě po dlouhá staletí k dispozici. „Palivo“ na výrobu energie je tedy zdarma.

Křemík, jakožto základní materiál pro výrobu fotovoltaických článků, je hojně zastoupen v zemské kůře, dobře dostupný a netoxický.

Při výrobě fotovoltaické energie nedochází k tvorbě škodlivin a aktivně přispívá k nepříznivým aspektům globálního oteplování.

Fotovoltaické moduly jsou bezpečné a vysoce spolehlivé. Životnost těchto panelů je výrobcem zaručena přibližně na 30 let při velmi vysoké účinnosti.

Fotovoltaické panely lze recyklovat a znovu využít na další výrobu. Tím se snižuje množství materiálu, které se musí vyrobit na zhotovení nového panelu.

Energetická návratnost solárních panelů stále klesá, tudíž se snižuje doba, za kterou se pořizovací náklady vrátí.

Nepotřebují téměř žádnou údržbu.

Snadno se instalují.

Díky zvyšující se poptávce po těchto panelech roste i výroba, tudíž i zaměstnanost. [22], [23]

2.2.6 Negativní stránky

Jejich hlavní nevýhodou je vysoká pořizovací cena a závislost těchto panelů na ročním období a průměrnému denním svitu.

Účinnost fotovoltaických modulů je vždy nižší než účinnost jednotlivých článků. Je to z důvodu prázdných míst mezi články a ztrátami ve spojích.

Velkým problémem je i nedostatek vhodných pozemků na výstavbu. Tento pozemek musí být vymezen územním plánem, kdy se fotovoltaická elektrárna posuzuje jako výrobní zařízení a představuje změnu charakteru nezastavěného území a změnu jeho využívání.

Pro výstavbu fotovoltaické elektrárny je potřeba získat mnoho souhlasů majitelů pozemků, obce, stavebního úřadu, ale i souhlas energetiků s připojením.

Velká výstavba bohužel kazí ráz krajiny a je hodně často stavěna na orných půdách, které by se daly využít pro zemědělství.

Díky velké ploše, kterou zakryjí, se musí tamější živočichové a rostliny adaptovat na snížený přísun sluneční energie. [22],[23][24]

2.2.7 Fotovoltaické panely a elektrárny

Spojením několika fotovoltaických článků o stejném výkonu, vznikne fotovoltaický panel, který se instaluje od střech domácností až po fotovoltaické elektrárny o velkých rozlohách.

Pro instalaci fotovoltaických panelů je několik pravidel:

Orientace:

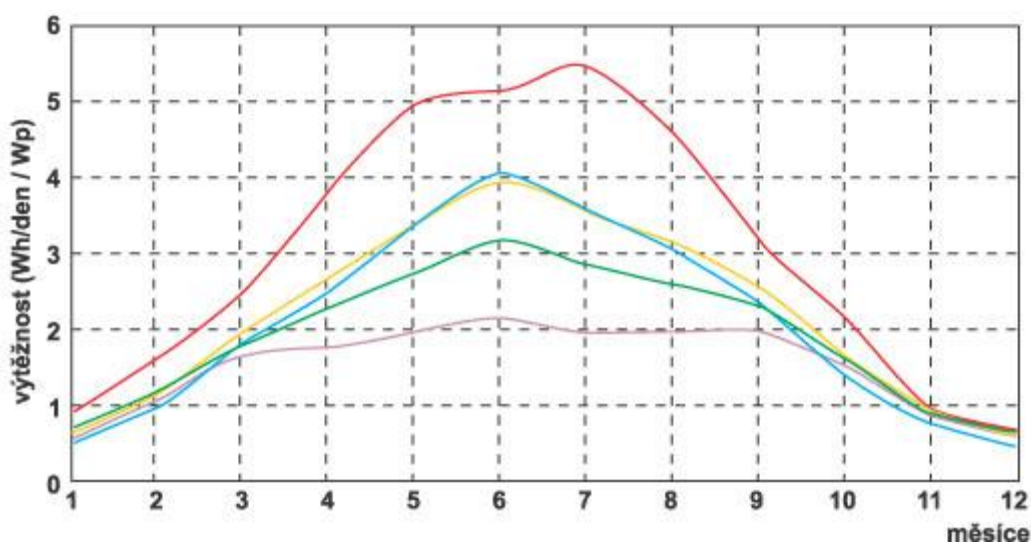
Orientace má velký vliv na samotnou účinnost panelu. Existují panely instalované napevno, tak i takové, které se přizpůsobují pohybu slunce po obloze, avšak jsou velmi drahé. Nejvhodnější stacionární orientace je jižní s mírným odklonem na jiho-západ o 15° . Případně je možné instalovat panel bez znatelných snížení účinnosti o 10° na východ. [27]

Sklon:

Sklon je dalším důležitým atributem pro zvýšení účinnosti. Slunce v zimě se pohybuje blíže k horizontu, tudíž sklon je ideálně vyšší – $60 - 80^\circ$. V létě naopak slunce svítí více shora, a nejlepší sklon je okolo 20° . Proto se volí kompromis, a panely se nejčastěji instalují se sklonem $35 - 45^\circ$. [27]

Tabulka 2: Doporučené úhly sklonu panelu k jihu [27]

roční období	úhel sklonu
jaro	40 až 60°
léto	20 až 50°
podzim	40 až 60°
zima	40 až 70°



| sledování pohybu slunce | 90° - svisle | 68° | 30° | 0° - vodorovně |

Obr. 8: Výtěžnost v závislosti na náklonu fotovoltaických panelů [27]

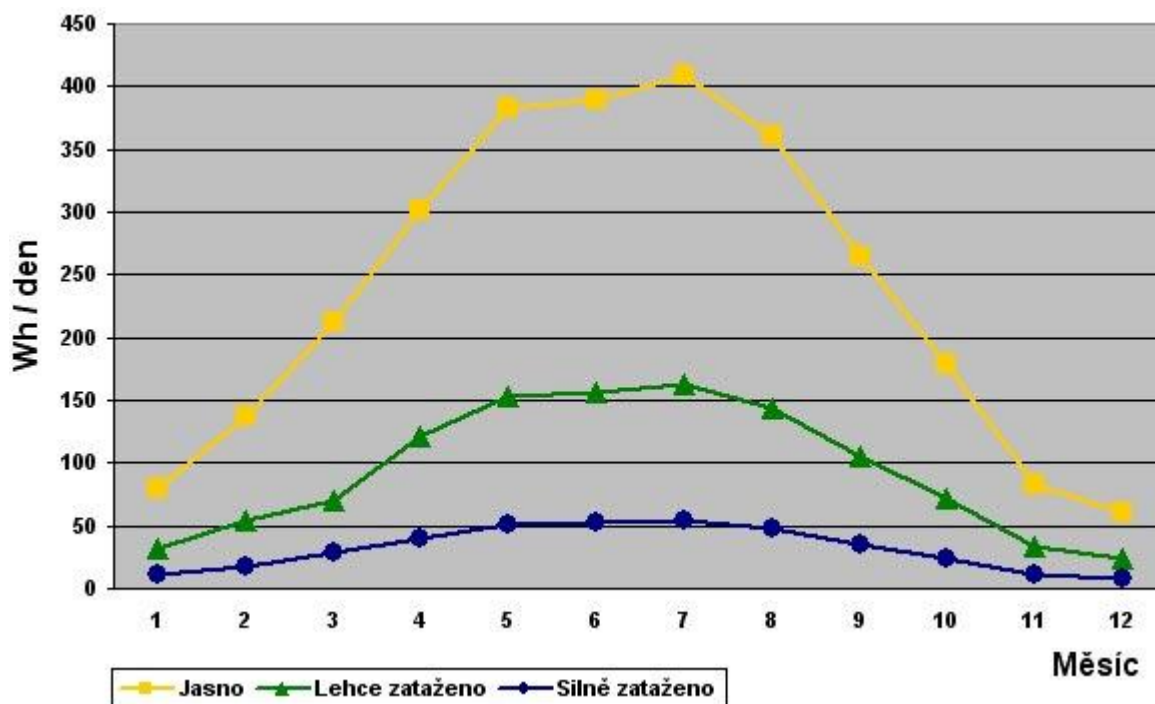
Sluneční svit:

Slunce má různou intenzitu svitu během dne, ale i vzhledem k ročnímu období. V létě je intenzita svitu vysoká, na rozdíl od podzimu či zimy. Tento aspekt hraje velkou roli při počítání návratnosti a musí se s ním i uvažovat při pořizování panelů, aby domácnost měla elektřinu i v době, kdy není taková intenzita záření. Dá se to vyřešit několika způsoby:

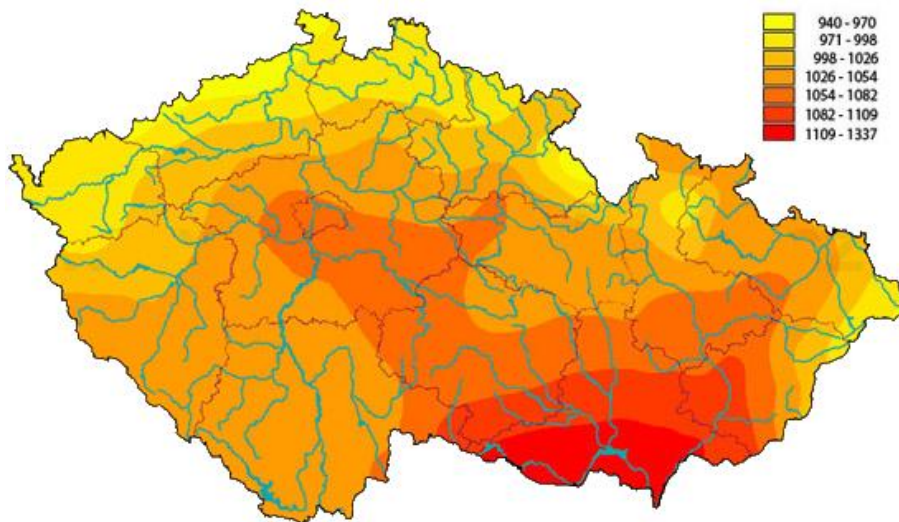
1. Domácnost si zřídí přípojku na elektřinu dodávanou z rozvodné sítě
2. Domácnost zainventuje do počáteční koupi panelů, kdy si vytvoří svoji vlastní elektrárnu, která v letním období bude mít fotovoltaické elektrické energie přebytek. Tuto energii může následně prodat do rozvodné sítě za podpory formou zeleného bonusu (dodávají do rozvodné sítě přebytek vyrobené energie – výkupní cena roku 2010: 11,18 Kč/kWh), nebo za podpory formou výkupní ceny (dodávají do rozvodné sítě veškerou vyrobenou energii – výkupní cena roku 2010: 12,25 Kč/kWh). [27]

Tabulka 3: Průměrné hodnoty získané za den z 1m^2 [27]

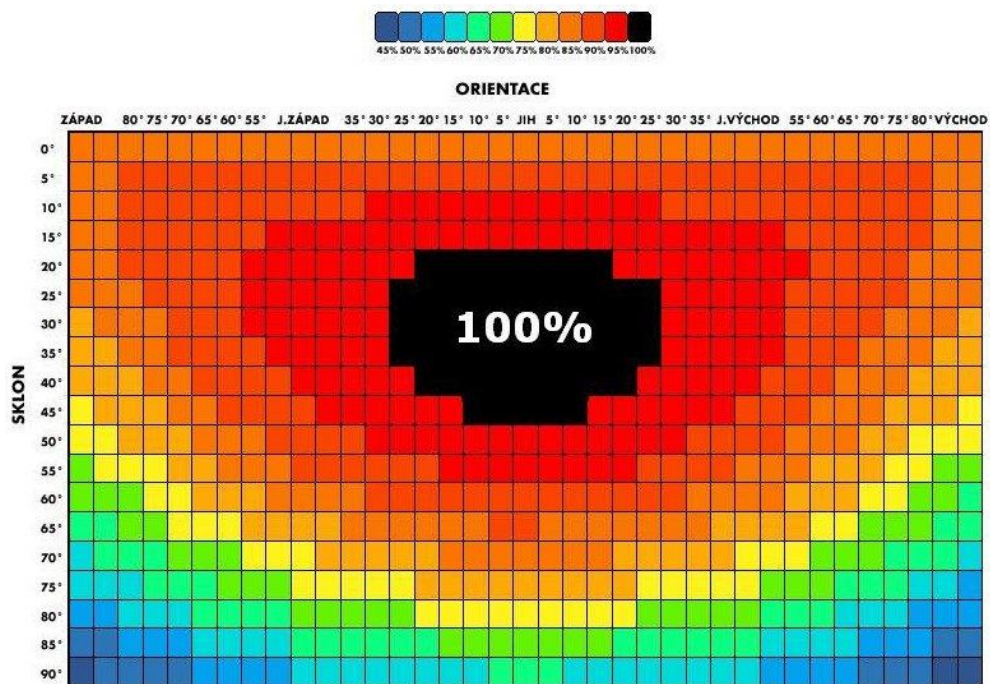
jaro	350 Wh/den
léto	400 Wh/den
podzim – zima	100 Wh/den
celý rok	60 – 80 kWh



Obr. 9: Závislost el. výkonu na měsíci [27]



Obr. 10: Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR (W/m^2) [25]

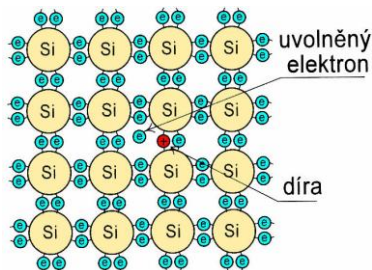


Obr. 11: Vliv orientace a sklonu na výkon fotovoltaického panelu [26]

2.3 Teorie P-N přechodu

2.3.1 Vlastní polovodič

Ve vlastním polovodiči znamená uvolnění jednoho elektronu vznik jedné díry. Počet elektronů a děr je tedy shodný a krystal zůstává vůči svému okolí elektricky neutrální. Vznik páru elektron-díra nazýváme generací. Je-li generace páru elektron-díra vyvolaná fotonem, musí být jeho energie větší než energie zakázaného pásu (pro křemík je cca $\Delta E_G = 1,1$ eV, což odpovídá vlnové délce $\lambda = 1100$ nm). Fotony s menší energií by polovodičem pouze prošly. Při setkání volného elektronu s dírou, obsadí volný elektron prázdné místo v chemické vazbě, čímž nastane zánik volného elektronu a díry. Z volného elektronu se stane opět valenční elektron. Tento zánik páru volný elektron díra nazýváme rekombinace. [28]



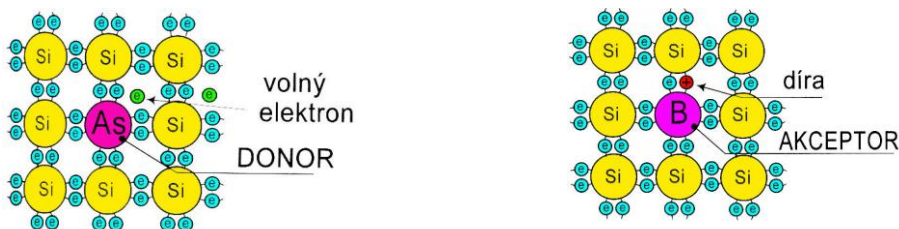
Obr. 12: Vlastní polovodiče [30]

2.3.2 Polovodič typu N

Polovodič typu N lze získat nahrazením některých atomů křemíku atomy prvku z V. skupiny periodické soustavy prvků (arsen, antimon, nebo fosfor - donory), které mají pět valenčních elektronů. Čtyři elektrony tak budou vázány kovalentními vazbami s nejbližšími atomy křemíku, pátý elektron bude vázán slabě k atomu příměsi. Dodáním energie se tento slabě vázaný elektron uvolní a stane se uvnitř krystalu volně pohyblivým. [29]

2.3.3 Polovodič typu P

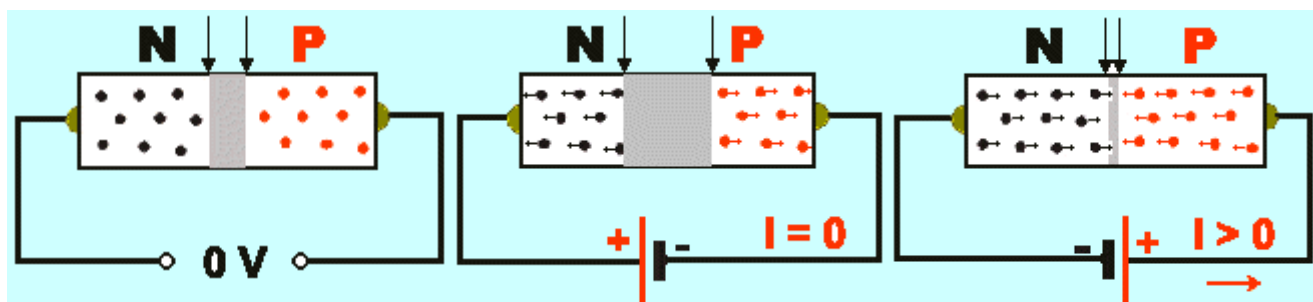
Polovodič typu P získáme, pokud budeme křemík dotovat prvkem s třemi valenčními elektrony (bór, hliník, galium, nebo indium - akceptory). Tři elektrony trojmocného prvku se kovalentně naváží na křemík, kterému zbude jedno volné místo. V místě nenasyčené vazby vznikne „díra“ (defektní elektron) s kladným nábojem. Tyto díry způsobují děrovou vodivost polovodiče, jelikož volnou „díru“ může zaplnit elektron z některé jiné vazby a „díra“ se přesune na jeho místo. [29]



Obr. 13: Polovodič typu N (nalevo), polovodič typu P (napravo) [30]

2.3.4 PN přechod

P-N přechod je oblast na rozhraní příměsového polovodiče typu N a polovodiče typu P. Tento přechod má tu vlastnost, že propouští elektrický proud pouze v jednom směru (propustný směr) a v opačném nikoliv (závěrný směr).



Obr. 14: Zapojení P-N přechodu. A) P-N přechod není zapojen ke zdroji napětí (vlevo), B) zdroj napětí je zapojen v závěrném směru (veprostřed) a C) zdroj napětí je zapojen v propustném směru (vpravo). [29]

A) Bez zdroje napětí

V oblasti styku obou polovodičů se část elektronů z oblasti N dostane do oblasti P a část „děr“ z oblasti P, přejde do oblasti N. Volné elektrony rekombinují s „děrami“, takže kolem přechodu PN se vytvoří nevodivá (ochuzená) oblast bez volných nábojů (na obrázku vyznačena šedou barvou).

B) Závěrný směr

Jestliže bude ke kladné elektrodě zdroje elektromotorického napětí připojen polovodič typu N a k záporné elektrodě připojen polovodič typu P, vzdalují se působením elektrických sil volné náboje od přechodu PN a oblast bez volných nábojů se rozšíří, její elektrický odpor vzroste a elektrický proud přechodem PN nemůže procházet. Této nevodivé oblasti, bez volných nábojů, říkáme hradlová vrstva.

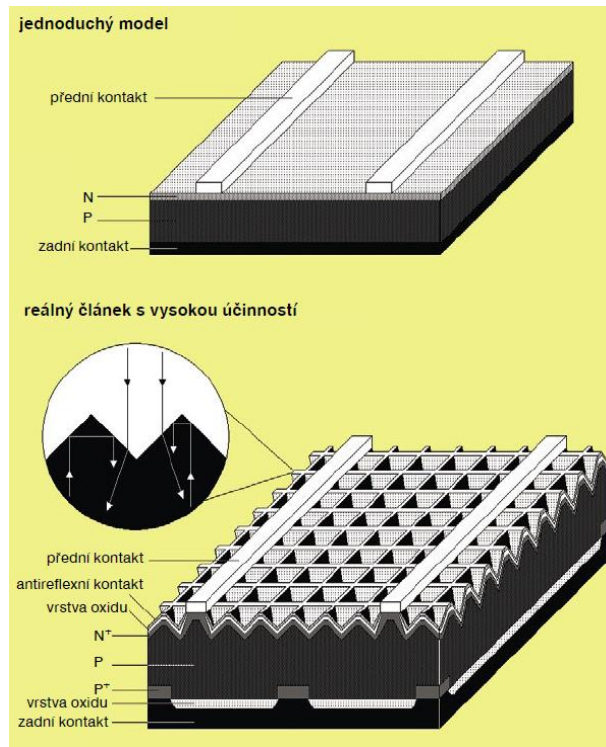
C) Propustný směr

Jestliže změním polaritu připojeného zdroje, dojde k zeslabení, nebo úplnému zrušení, elektrického pole na přechodu P-N. Nosiče nábojů tedy mohou přes rozhraní volně procházet. Takto zapojeným přechodem PN proud prochází. [29]

2.3.5 Jednoduchý model fotovoltaického článku

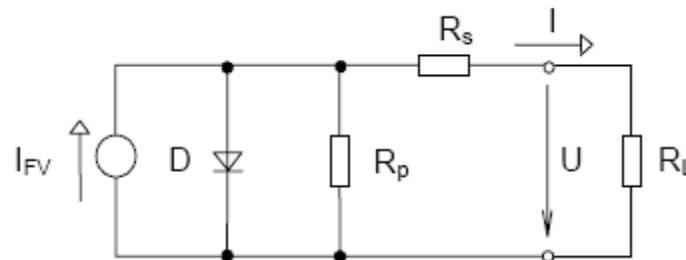
Obecný fotovoltaický článek je schematicky znázorněn na Obr. 16.

Světelné záření dopadá na horní vrstvu fotovoltaického článku, kde proniká mezerami v mřížce, která panel chrání před mechanickým poškozením, a kontakty a dopadá na polovodič. Dopad fotonu do této oblasti způsobí „vyrazení“ elektronu, tím zrušení kovalentní vazby, za vzniku volného záporného elektronu a kladné „díry“. Následná separace elektronů (do oblasti typu N) a „děr“ (do oblasti typu P) elektrickým polem PN přechodu má za následek napěťový rozdíl mezi předním (-) a zadním (+) kontaktem článku. Díky tomu protéká spotřebičem připojeným mezi oba kontakty stejnosměrný elektrický proud. Tento proud je přímo úměrný velikosti plochy fotovoltaického článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření. [28]

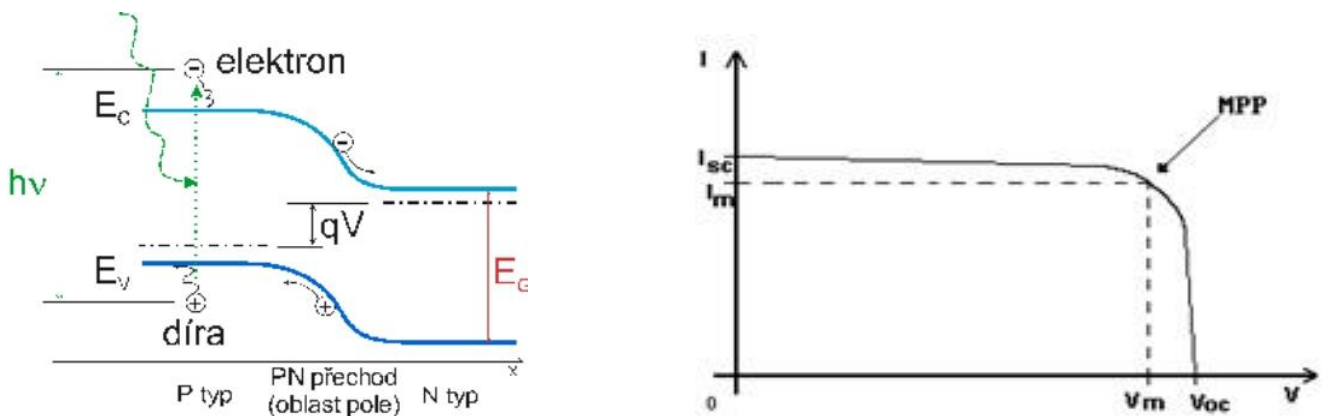


Obr. 15: Schéma fotovoltaického článku [28]

Schéma zapojení fotovoltaického článku je znázorněno na Obr. 15, kde I_{FD} je generovaný proud, R_S je sériový odpor, R_P je svodový odpor, R_L je odporový měřič, I je napětí a U proud.



Obr. 16: Náhradní schéma fotovoltaického článku (nalevo) [21]



Obr. 17: Princip činnosti fotovoltaického článku (nalevo), volt-ampérová charakteristika článku za světla (napravo) [31]

2.4 Materiály fotovoltaických modulů

Od fotovoltaických panelů se vyžaduje několik funkcí:

- vytvoření konstrukčně stabilního celku po celou dobu manipulace s panelem
- zabezpečit maximální možnou propustnost slunečního záření
- zajistit dostatečné elektrické vlastnosti fotovoltaického modulu
- chránit řetězec článků před degračními vlivy prostředí. [41]

2.4.1 Přední strana

Přední strana článku je uzpůsobena k pohlcování slunečního záření. Musí být průhledný (min. 90 %), mít zvýšenou mechanickou pevnost a odolnost vůči nárazům. Jeho další úlohou je i ochrana pouzdrícího materiálu před degračním vlivem krátkovlnného UV záření. [41]

2.4.2 Pouzdrící materiál

Zapouzdření fotovoltaických článků do panelů se provádí z mnoha důvodů. Jeden z hlavních důvodů je zvýšení dodávaného výkonu (sériové, nebo paralelní zapojení článků v panelu) a ochrana při manipulaci a montáži. [41]

2.4.2.1. EVA (*Ethylenvinylacetát*)

Tento typ materiálu se velmi často používá pro zapouzdřování přední strany panelu. Jeho hlavním účelem je ochrana křemíkového článku před navlháním, díky jeho elasticitě před mechanickými otřesy a slouží k elektrické izolaci. Další jeho výhodou je jeho průhlednost, vysoký vnitřní a povrchový odpor a manipulace s ním je jednoduchá.

Materiál se nanáší ve formě folie, která se za teploty 80°C a tlaku 100 kPa po dobu asi 1 hod laminuje. Při tomto procesu dochází k zeditování struktur a k vytvrzení.

Naopak jeho velkou nevýhodou je jeho malá UV stabilita. Folie, po dlouhodobém vystavení slunečnímu záření, se zbarví dohněda a to má za následek snížení propustnosti slunečního záření a tím snižování efektivnosti článku. Jeden z důvodů proč se tento materiál používá, je jeho odolnost proti vlhku. Je to jeho výhoda, ale zároveň i nevýhoda, kdy materiál není schopen absorbovat vzdušnou vlhkost a tím dochází ke snížení požadovaných vlastností. Zároveň nemá ani dobrou přilnavost ke sklu, tudíž mohou vznikat vzduchové bubliny, které mohou způsobit až zničení článku. [32]

2.4.2.2. PVB (*polyvinylbutyral*)

Tento materiál je známý a hojně se využíval jako bezpečnostní sklo u předních skel automobilů. Jeho výhodou je vyšší stabilita na UV záření. Nevýhodou je vyšší citlivost na vodu, kdy dříve dochází k zatečení pod materiál. [33]

2.4.2.3. *TPU (Termoplastický polyuretan)*

Tento materiál je velmi podobný výše popsanému materiálu EVA. Jde opět o folii, která se laminuje na sklo, nebo křemík. Obecně má však mnohem lepší vlastnosti než zmíněná EVA. Má lepší přilnavost ke sklu, tudíž i tvorba vzduchových bublin je malá. Také má mnohem větší optickou stabilitu a nedochází u něj k ztmavnutí. Při laminaci TPU nedochází k chemickému zesíťování, tudíž může být materiál následně teplem měkčen a případně snáze odstraňován z ploch. Díky tomu se zlevňuje i výroba, jelikož při špatném nanesení na křemíkový článek se může vrstva tepelně odstranit a nanést znova.

2.4.2.4. *Tedlar (Polyvinylfluorid)*

Tento materiál je používán jen na zadní stranu fotovoltaického panelu. Je složen ze tří vrstev, z nichž jedna může být potisknuta. Mezi jeho hlavní výhody patří ideální odolnost vůči povětrnostním podmínkám, minimální navlhání a odolnost vůči velkému rozsahu teplot. Před samotnou laminací se pokrývá vrstvou tepelně aktivovaného lepidla. [34]

2.4.2.5. *Pertex*

Pertex je transparentní fólie, která je složená z polyesteru (PES) a ethylvinylacetátu (EVA). Vlastnosti jsou podobné materiálu EVA, avšak jeho odolnost proti navlhání je vyšší.

2.4.2.6. *PMMA (Polymethylmetakrylát)*

Jedná se o klasické plexisklo, které je používáno jako nejsvrchnější krycí vrstva. Jeho výhodou je malá hmotnost, pružnost a s tím související vysoká odolnost proti nárazům a klimatickým podmínkám a vysoká propustnost světla.

Jeho velkou nevýhodou je tepelná roztažnost, která se musí řešit vhodným upevněním, a měkkost materiálu, kdy při otírání dochází k poškrábání vrchní vrstvy a tudíž snížení průhlednosti. [32]

2.4.2.7. *Epoxidové pryskyřice*

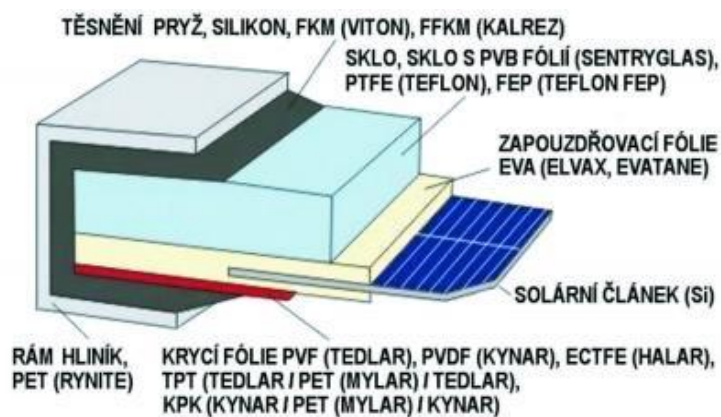
Též zvané polyepoxid. Z chemického hlediska je to polymer z tříčlenných cyklů s dvěma atomy uhlíku a jedním atomem kyslíku. Solární článek se pryskyřicí zalije a následně vytvrdí, což probíhá za přidání tvrdidla. Používá se kvůli jejím vlastnostem. Je mechanicky pevná, nerozpustná a netavitelná, chemicky odolná, průhledná, má minimální navlhavost a hlavně má dobré elektroizolační vlastnosti.

Kvůli zvýšení odolnosti vůči UV záření se do pryskyřic přidávají různá plniva, nebo jiné látky, které jsou schopny záření absorbovat. Bez přidání těchto látek dochází k fotochemické degradaci, kdy pryskyřice pórovatí a mění barvu. [35], [36]

2.4.3 Zadní strana

Materiál na zadní stranu fotovoltaických článků se neliší od materiálu přední strany. Výjimkou je ochrana před UV zářením. Tradičním materiálem jsou polymery na bázi fluoru. Dnešní standardní polymerní fólie se skládají obvykle ze tří lisovaných vrstev:

- externí ochranná vrstva - zabezpečuje odolnost vůči degradačním vlivům prostředí – Tedlar
- střední vrstva – pro zvýšení elektrické izolace a mechanické stability – poethylentereftalát (PET)
- vnitřní vrstva – pro dobrou adhezi k EVA – PVF. [41]



Obr. 18: Konstrukce fotovoltaických panelů [37]

2.5 Degradace fotovoltaických článků

Degradace obecně znamená znehodnocení, zhoršení či pokles kvality materiálu. Každé fotovoltaické zařízení je vystavené degradačním vlivům okolního prostředí, jako je velmi se měnící teplota, atmosferické plyny, prach, vítr, kondenzace vody a v neposlední řadě i samotný vliv záření.

Výrobci proto zaručují výkon fotovoltaického panelu pouze na určitou dobu. Většinou zaručují, že po 12 let užívání se účinnost panelu sníží na 90 % a za 25 let na 80 %. [38], [39][40]

2.5.1 Zkoušky urychleného stárnutí

Sledování a vyhodnocování vlastností a spolehlivosti fotovoltaického zařízení je časově velmi náročné. Proto se používají zkoušky urychleného stárnutí. Tyto zkoušky se v případě fotovoltaiky dají rozdělit na dvě části:

- kvalifikační testy
- zkoušky spolehlivosti

Izolační vlastnosti FV modulů jsou ověřeny měřením izolačního odporu mezi zkratovanými výstupními svorkami a neizolovanou kovovou částí při jednosměrném napětí 500 V. testovaný modul musí splňovat následující kritéria:

- pokles maximálního výstupního výkonu nepřekročí hranici 5 % po každém testě a 8 % po posloupnosti testů
- není objevena žádná významná optická porucha (nejsou popraskané, ohnuté nebo zkroucené vnější plochy, nejsou přítomny bubliny, nebo není chybné propojení, spoje, chybné vývody či obnažené elektrické části pod napětím a dále se články nesmí dotýkat okraje modulu, nebo sebe navzájem)
- jsou splněny požadavky kladené na izolační vlastnosti FV modulu.

Zkouškami urychleného stárnutí nelze iniciovat proces delaminace. [41]

2.5.2 Degradace FV modulu

Díky tomu, že se FV modul skládá z více vrstev, je potřeba počítat se všemi možnostmi, které mohou negativně ovlivnit životnost modulu. Při testování se nemusí projevit pouze celková degradace, ale i degradace jednotlivých komponent FV modulu, jako je degradace spojů mezi články, rozdílné degradace samotných článků a jiné.

Na FV modulu se mohou projevit následující degradační mechanismy:

- zvětrávání / znečištění předního skla
- degradace pouzdríciho materiálu (v důsledku oxidace, teplotních změn, světelného záření, vlhkosti či dalšími okolními vlivy)
- difúze iontů do objemu pouzdríciho materiálu
- oxidace a koroze kovových kontaktů článku
- iontová migrace nebo degradace způsobená el. Polem
- reakce na styku polymer-povrch FV článku
- delaminace (rozpad laminovaných vrstev). (převzaté z [41])

Velikost degradace závisí na vstupní koncentraci nežádoucích příměsí, plynů, okolního prostředí od začátku výrobního procesu až po samotnou instalaci a následné využívání.

Jako nejčastější pouzdrící materiál se používá EVA, která je díky tomu i předmětem zkoumání mnoha dalších prací. Jejich výsledky lze shrnout do několika bodů:

- v důsledku působení zvýšení teploty, nebo UV záření vede ke vzniku kyseliny octové a následné tvorby řetězců typu $-(C=C)_m-$, které vedou ke žlutnutí či tmavnutí materiálu EVA, což vede ke zhoršené propustnosti záření
- žlutnutí, resp. Tmavnutí materiálu snižuje účinnost, výkon ale i celkovou životnost FV modulu
- zvýšená koncentrace kyseliny octové katalyticky urychluje degradaci materiálu EVA při zvýšené teplotě nebo UV záření což může vést ke korozi metalizace, nebo kovových sběrnic
- při degradaci UV zářením a zvýšenou teplotou může dojít v materiálu k zesnování, ale též štěpení polymerního řetězce
- katalyticky řízená degradace a urychlení tmavnutí materiálu se projevuje v přítomnosti kovových iontů Cu, Ti, Ag, Al, Sn a Pb při vysokých teplotách a v přítomnosti vodních par
- delaminace materiálu se projeví snížením pružnosti v tahu, kdy se materiál nejčastěji rozpadne na mezi pouzdrícím materiálem a povrchem FV článku. Bylo dokázáno, že delaminace materiálu přímo souvisí se zvýšenou koncentrací migrujících prvků ze skla (např. Na^+ , Ca^{2+} , přidané koncentrace P, O_2 a aditiv pouzdrícího materiálu) [42].

2.5.3 Vliv zvýšené teploty (tepelná degradace)

Většina degradačních procesů probíhá rychleji při vyšší teplotě. Často využívaným pravidlem pro stanovení životnosti je Montsingerovo pravidlo stárnutí. Montsinger zkoumal úbytek mechanické pevnosti v závislosti na konstantní teplotě v rozmezí 90 – 110 °C na papírové izolaci. Dospěl k exponenciální funkci, která po dosažení experimentálních výsledků udává dobu života.

$$t = k \cdot E^{-n} \quad (1)$$

Z tohoto pokusu pan Monsinger odvodil pravidlo osmi stupňů Celsia. Vychází z toho, že při zvýšení teploty o $\Delta T = 8$ °C, se doba života t zkrátí na polovinu. Naopak při poklesu teploty o $\Delta T = 8$ °C se doba života t zvýší o dvojnásobek.

Toto pravidlo není obecně platné, avšak položilo základy pro formulaci obecnějších pravidel stárnutí a to vyvrátili Pern a Czanderna. Byl proto vytvořen vztah mezi dobou života FV modulu v reálném prostředí t_p a dobou života FV modulu v urychleném testě t_a pro konkrétní geografickou lokalitu.

$$t_p = \frac{t_a}{\sum_i \varphi_i \exp \left[\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right) \right]}, \quad (2)$$

kde φ představuje podíl časového úseku roku při teplotě T_i k období jednoho roku, E_A představuje aktivační energii ($J \cdot mol^{-1}$) a R je molová plynová konstanta.

Krátkodobé působení teploty vyvolávají změny rozměrů materiálu, což má za následek mechanické pnutí materiálu. V materiálu tak mohou vznikat praskliny či trhliny. Působením vyšších teplot může mít za následek vylučování některých druhů tmelů, impregnantů či nějakých složek polymerů.

Dlouhodobé působení vysokých teplot způsobuje nevratné změny ve struktuře i vlastnostech izolantů. Aby došlo v materiálu k chemickým změnám, musí být splněny dva základní předpoklady:

- molekuly musí mít dostatečnou energii
- velká statistická pravděpodobnost střetu molekul v materiálu. [41], [43]

2.5.4 Vliv při kombinovaném efektu zvýšené teploty a vlhkosti

Většina FV modulů na trhu jsou volně stojící moduly a jejich pracovní teplota nepřesahuje obvykle 55 °C. V reálných podmínkách dochází v průběhu dne ke změně teploty a vlhkosti. S rostoucí teplotou klesá relativní vlhkost (den) naopak s klesající teplotou roste relativní vlhkost (noc).

$$t_p = \frac{t_a}{\sum_i \frac{r.v_i}{r.v_a} \exp \left[\frac{E_A + B_a}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right) \right]}, \quad (3)$$

kde $r.v_i$ je hodnota relativní vlhkosti, $B_a = 5150 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ a T_i je teplota v i -té hodině roku pro zvolenou geografickou oblast. [41]

2.5.5 Vliv elektrického pole

Po celou dobu co je zařízení v provozu, je izolace vystavena elektrickému namáhání.

Elektrony dopadající na povrch izolantu způsobují jeho erozi, tzn. zmenšuje se tloušťka izolační vrstvy. Úbytek materiálu v místě eroze je způsoben chemickou přeměnou makromolekulární látky na nízkomolekulární plynné, nebo kapalné produkty při spolupůsobení oxidačních reakcí.

Díky tomu, že u FV panelů není příliš vysoké napětí, k degradaci vlivem elektrického pole dochází minimálně. [44]

2.5.6 Vliv prachu

Prach se v ovzduší vyskytuje všude a lze ho rozdělit podle původu na anorganický přírodní prach (písek, vulkanický prach či solné částice), anorganický průmyslový prach (vzniká při spalování) a organický prach (pyl, zárodky plísní, či textilní prach). V průměrném prostředí jsou tyto prachy v poměru 20 : 60 : 10. Díky mikroskopickému rozměru prachu (pod 500 μm) může pronikat velmi malými štěrbinami do uzavřených prostor.

Prach je pro funkci modulu velmi nebezpečný. Může vyvolat znehodnocení mechanického charakteru hlavně za zvýšené vlhkosti vzduchu. Za snížené vlhkosti může suchá prach způsobit vznik nebezpečných elektrostatických výbojů. [44]

2.5.7 Vliv mechanického namáhání

K mechanickému namáhání může docházet od počátku výroby samotného FV článku, přes výrobu FV modulu, dopravu, montáž až po samotný provoz.

Při mechanickém opotřebení může dojít k těmto jevům:

- únavovou poruchu komponent – způsobeno velkým množstvím cyklů namáhání
- termomechanické vlivy – způsobeno tepelnou dilatací nebo smrštěním
- zlomení izolace – způsobeno velkým mechanickým namáháním z vnějšího okolí
- abrazivní opotřebení – způsobeno pohybem mezi součástmi zařízení
- tečení izolace – způsobeno elektrickým, tepelným nebo mechanickým namáháním. [44]

2.5.8 Vliv slunečního záření

Vlivem infračervené části slunečního spektra jsou povrchy předmětů ohřívány vysoko nad teplotu okolního vzduchu. V důsledku toho dochází k oxidaci, k vytváření nasycených vazeb v polymerech nebo k rozpadu řetězců makromolekul. Toto má dále vliv na mechanické a elektrické vlastnosti a může odcházet až k popraskání a křehnutí. [44]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část popisuje statistické vyhodnocení dat získaných z fotovoltaické elektrárny na PdF MU.



Obr. 19: Fotovoltaická elektrárna umístěna na PdF MU [45]

3.1 Popis FV elektrárny

V rámci projektu Státního fondu Ministerstva životního prostředí, které poskytlo dotaci ve výši 90 %, byla postavena na střeše Pedagogické fakulty Masarykovy Univerzity fotovoltaická elektrárna o špičkovém výkonu 40 kW_p. PdF MU sídlí v Brně na Poříčí 31.

Na střechu PdF MU dodala fotovoltaický systém na bázi krystalického křemíku Firma Solartec s.r.o. z Rožnova pod Radhoštěm. Před samotnou instalací bylo potřeba, díky lokalitě fakulty, která stojí na okraji památkové zóny, žádat památkáře o souhlas. Ti požádali snížit sklon panelů na 25 %, čímž dochází k poklesu účinnosti. Střešní fotovoltaické panely jsou upevněny na speciálně vytvořené ocelové střešní konstrukci o celkové hmotnosti 13 000 kg. Tato masivní pozinkovaná konstrukce dává jistotu stability celého systému a zároveň zajišťuje vysokou odolnost vůči větrným vlivům. Její vystavění a instalace, spolu s důkladnou hromosvodnou sítí, spotřebovaly kolem třetiny celkových nákladů na FV elektrárnu.

Jak již bylo řečeno výše, celkový výkon fotovoltaické elektrárny je 40 kW_p. FV panely na elektrárně jsou rozděleny do tří částí. V první části, která je umístěna na fasádě, je 48 panelů řady RADIX 72-106 o celkovém výkonu 5 kW_p. Druhá část je tvořena 288 panely stejné řady o celkovém výkonu 30 kW_p a je umístěna na střeše. Poslední, třetí, část je obsazena nově vyvinutými, tzv. „fotovoltaickými dvojskly“ SBI2G 72-90BR, které se od klasických liší nahnědlou barvou a její celkový výkon je 5 kW_p. Každé z 56 těchto „fotovoltaických dvojskel“ o výkonu 90 W_p je tvořeno 72 kusy primárních solárních článků. Pro převod stejnosměrného napětí na střídavé síťové napětí (230 V) slouží 8 měničů napětí FRONIUS IG60. Celková plocha panelů je 337,2 m², takže na jeden střídač připadá 40,56 m². Střídač č. 1 je napojen na část s fotovoltaickými dvojskly, střídač č. 8 je napojen na vertikálně umístěné panely na fasádě budovy. Ostatní střídače jsou napojeny na standardní panely v druhé části.

Celý fotovoltaický systém je napojen na hlavní silnoproudou rozvodnou síť, která zásobuje tři budovy elektrinou. V současné době by měly být umístěny dvě velké informační tabule ve vstupních prostorách fakulty. Na internetových stránkách fakulty je přímo i odkaz na tuto fotovoltaickou elektrárnu, kde se dají online sledovat výstupy jednotlivých snímačů. Data v internetové podobě jsou rovnou převáděna do srozumitelných grafů, ze kterých je patrný vývoj. [45],[46]

3.2 Popis struktury dat ze systému

Již od počátku instalace (od roku 2005) jsou kontinuálně monitorovány (v pětiminutových intervalech) jednak vnější parametry (působící na fotovoltaický systém, ale především výstupní elektrické parametry ze všech osmi subsystémů (1 vertikálně umístěný na fasádě, 1 střešní opatřený dvojskly a 6 subsystémů umístěných na střeše).

Na střeše jsou umístěna čtyři čidla na monitorování vnějších podmínek. Dále byla elektrárna opatřena osmi snímači na FV panelech, které monitorují výstupní parametry (stejnosměrný proud a napětí). Data jsou monitorována pomocí počítače, dále zpracována a archivována na pevném disku.

Díky tomu, že elektrárna byla postavena i za výzkumným účelem, je tomu uzpůsoben i samotný provoz elektrárny. Provoz je celoroční, bez ohledu na roční období a funguje 24 hodin denně. Stejně tak i měření a sběr dat probíhá 24 hod denně vždy s intervalem 5 min.

Čidla, která jsou přítomna na elektrárně, měří každých 5 min teplotu FV panelu, teplotu okolního vzduchu, intenzitu ozáření FV panelu a rychlost větru.

Po dopadu slunečního záření na FV panel mi začne díky PN přechodu procházet stejnosměrný el. proud, který se mi ve střídači změní na střídavý a který následně jde do rozvodné sítě ve škole. Každý z osmi přítomných snímačů mi každých 5 min snímá hodnoty velikosti stejnosměrného napětí a proudu při výstupu z FV panelu, poté po výstupu ze střídače snímá hodnoty velikosti střídavého proudu a po přivedení do rozvodné sítě i výkon a napětí v síti. Posledním hodnotou je dodaná energie

3.3 Převod dat do struktury pro zpracování

Data, která byla sbírána monitorovacím systémem výše uvedeným způsobem, byla exportována ve formátu *.csv pro zpracování pomocí MS Excelu. Data byla doplněna sloupcem, který obsahoval hodnoty, které odpovídaly minutě, v jaké byla data v průběhu jednoho roku odebrána (0, 5, 10, ... , 525595). Poté byla data exportována do textového souboru s oddělovači (tabulátor) tak, aby mohla být zpracována pomocí programu HarFA (Harmonic and Fractal Image Analyser) vyvinutého na FCH VUT v Brně, umožňujícího statistické zpracování s využitím fraktální teorie. Díky velkému objemu dat odebraného v průběhu jednoho roku ze systému bylo zpracování provedeno po jednotlivých letech. V následující kapitole jsou uvedeny jako příklad výsledky z roku 2010. V závěru potom srovnání výsledků dvou let (2005, 2010) vypovídajících o degradaci fotovoltaického systému v průběhu pětiletého provozu.

3.4 Struktura výstupních dat

Data jsou v datovém souboru uspořádána v následující struktuře. V prvním sloupci bylo zařazeno datum a čas pořízených hodnot. V druhém sloupci byla zaznamenávána energie (Wh), která byla snímána osmi snímači označenými jako IG 1 – IG 8. Dalšími parametry, které tyto snímače snímaly, byl střídavý (AC) proud (A), napětí sítě (V), střídavé (AC) napětí (V), stejnosměrné (DC) napětí (V) a stejnosměrný (DC) proud (A). Opět s označením IG 1 – IG 8. Za tyto sloupce byly zařazeny sloupce s hodnotami z instalovaných čidel. Je to teplota fotovoltaického panelu (°C), teplota vzduchu (°C), intenzita ozáření (W/m^2), rychlost větru (km/h), globální osvit (W/m^2) a od roku 2008 i tlak vzduchu (hPa).

Tabulka 4: Příklad zápisu výstupních dat pro 1. 7. 2010 5:55

Datum/čas	Energie (Wh)							
	IG 1	IG 2	IG 3	IG 4	IG 5	IG 6	IG 7	IG 8
1.7.2010 5:55	31,48	11,25	21,22	18,8	11,74	14,88	27,75	2,03

.....

Teplota FV panelu (°C)	Teplota vzduchu (°C)	Intenzita ozáření (W/m^2)	Rychlost větru (km/h)	Globální osvit (W/m^2)	Tlak vzduchu (hPa)
SC 1					SC 2
19	22	28	2	343	70848

3.5 Metody zpracování

Všechna archivovaná data byla statisticky zpracována, především byly zjišťovány korelace mezi výstupními parametry elektrických veličin a parametry monitorujícími vnější vlivy. K statistickému zpracování byl využit program HarFA, který umožňuje z vypočtených hodnot fraktálních parametrů obrazových struktur, signálů, resp. numerických řad určit další statistické parametry (střední hodnoty, směrodatné odchylky, resp. další momenty chyb), ale také entropie studovaných struktur.

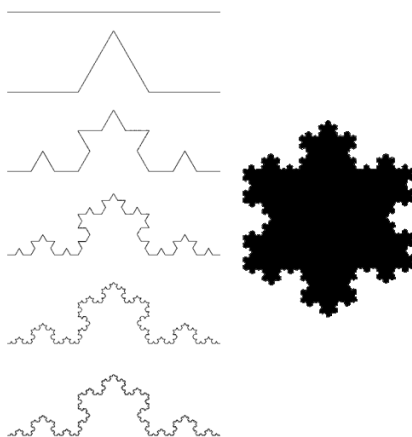
Vyhodnocení vychází z definice fraktální struktury – „Fraktál je množina, jejíž Hausdorffova dimenze je (ostře) větší než dimenze topologická“ [47]. Lze jej také definovat jiným zjednodušujícím způsobem jako geometrický objekt, který má následující vlastnosti:

- je soběpodobný – při pozorování fraktálního objektu v různých rozlišeních pozorujeme opakující se motivy (similarity, selfsimilarity)
- má velmi složitý tvar, ale je generován pomocí jednoduchých pravidel, která jsou opakovaně aplikována na základní útvar.

Trend změny fraktální struktury definuje parametr fraktální dimenze, který je definován pro soběpodobné struktury (similarity) následujícím vztahem

$$D = \frac{\ln m}{\ln r}, \quad (4)$$

kde m je počet opakování základního útvaru ve struktuře, r je změna velikosti měřítka mezi oběma útvary. Např. pro Kochovu křivku je $m = 4$, $r = 3$ a fraktální dimenze $D = \ln 4 / \ln 3$



Obr. 20: Kochova křivka

Pro struktury, které jsou pouze přibližně soběpodobné (selfsimilarity) lze vztah (4) zobecnit do tvaru

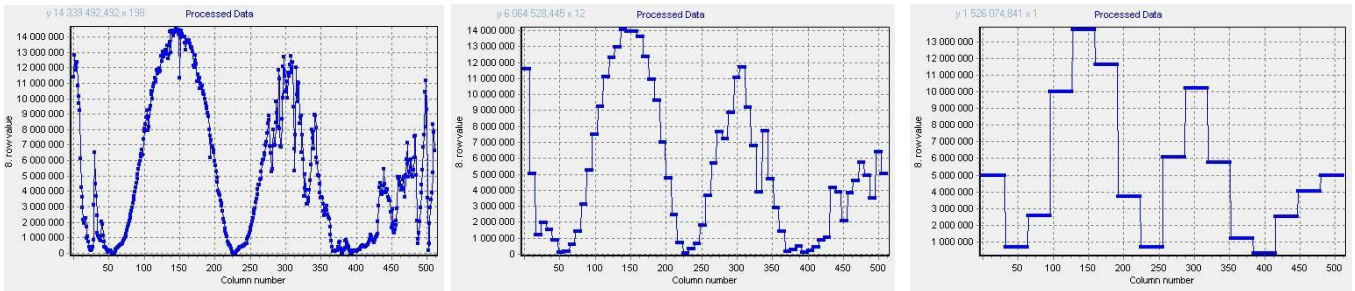
$$N = K \cdot r^D, \quad (5)$$

kde

$$m = \frac{N}{K}, \quad (6)$$

kde N je počet základních útvarů ve vytvořené struktuře a K je počet útvarů v základní struktuře (tzv. fraktální míra).

Na Obr. 21 je vidět vliv velikosti fraktálního měřítka r na počet změřených dat N křivky. Délka změřené křivky je $L = N \cdot r$. Čím větší je velikost měřítka, tím je křivka méně plynulá a je tedy kratší. Kdybychom N stále zvyšovali, křivka se změní na lineární.



Obr. 21: Příklady počtu křivek N na tvar křivky z programu HarFA (vlevo $r=1$ pixelů, uprostřed $r=8$ pixelů, vpravo $r=32$ pixelů)

Uvedený vztah lze využít pro určování fraktálních parametrů (fraktální dimenze a fraktální míry) neznámých struktur. Využívá se k tomu regresní analýza závislosti

$$\ln N = \ln K + D \cdot \ln r, \quad (7)$$

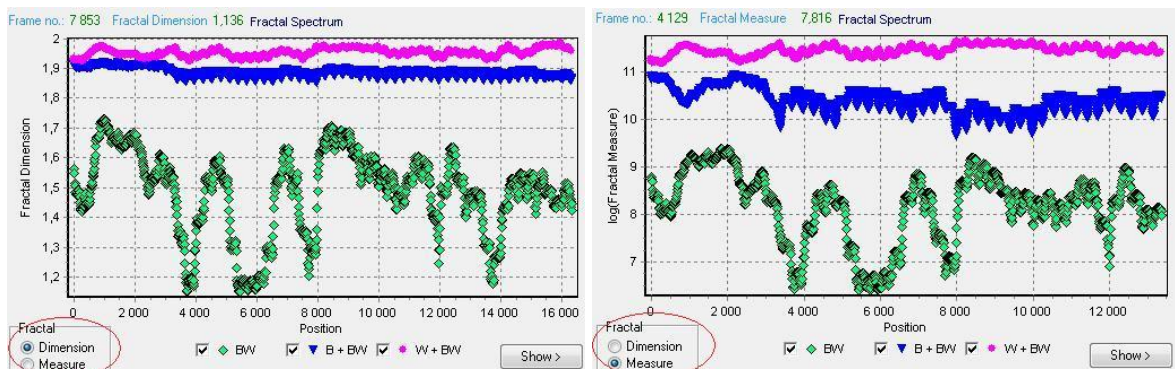
kde

$$S = -D \cdot \ln r. \quad (8)$$

S je entropie studované struktury (Hausdorffova, informační, korelační, šikmosti, špičatosti, obecně q -tého řádu). Termodynamická entropie je vlastně informační entropie vynásobená Boltzmannovou konstantou.

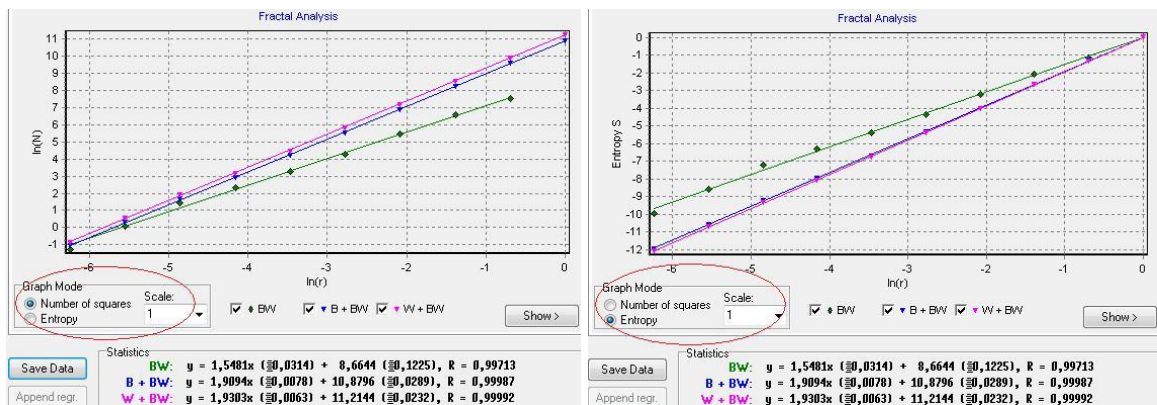
Pomocí fraktální analýzy jsou v programu HarFA určovány tři druhy fraktálních parametrů. Pro numerické řady je to fraktální dimenze a fraktální míra křivky (D_{BW}, K_{BW}), fraktální dimenze a fraktální míra plochy pod křivkou včetně plochy křivky (D_{BBW}, K_{BBW}) a fraktální dimenze a fraktální míra plochy nad křivkou včetně plochy křivky (D_{WBW}, K_{WBW}).

Zpracování dat bylo provedeno pomocí metody „Box Counting“ vycházející z 1D vlnkové (waveletové) transformace.



Obr. 22: Graf závislosti fraktální dimenze na času odběru (vlevo), graf závislosti fraktální míry na času odběru (vpravo)

Na Obr. 23 jsou zobrazeny grafy počtu změřených dat na velikosti měřítka $N(r)$ a entropie na velikosti měřítka $S(r)$. Ve spodní části jsou uvedeny rovnice regresních přímek s nastavenou hodnotou velikosti měřítka (Scale).



Obr. 23: Rovnice regresních přímek (vlevo), rovnice entropií (vpravo).

Ze stanovených parametrů (fraktální míry) lze určit délku křivky a velikosti ploch v předem definovaných jednotkách (Scale – viz Obr. 23). V následujících vztazích jsou hodnoty přepočteny na poměrné jednotky

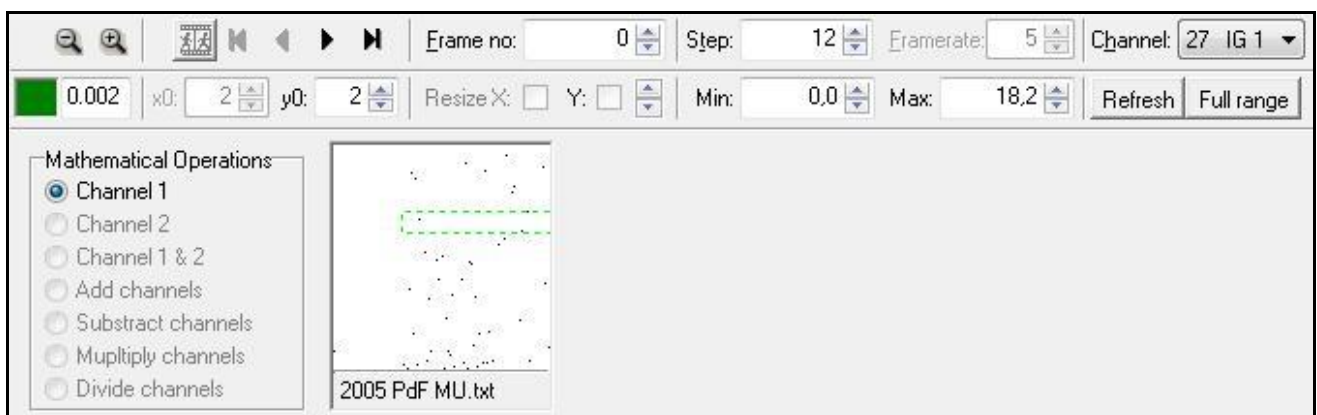
$$K_B = \frac{K_{BBW} - K_{BW}}{K_{BBW} + K_{WBW} - K_{BW}}, \quad (9)$$

$$K_W = \frac{K_{WBW} - K_{BW}}{K_{BBW} + K_{WBW} - K_{BW}}, \quad (10)$$

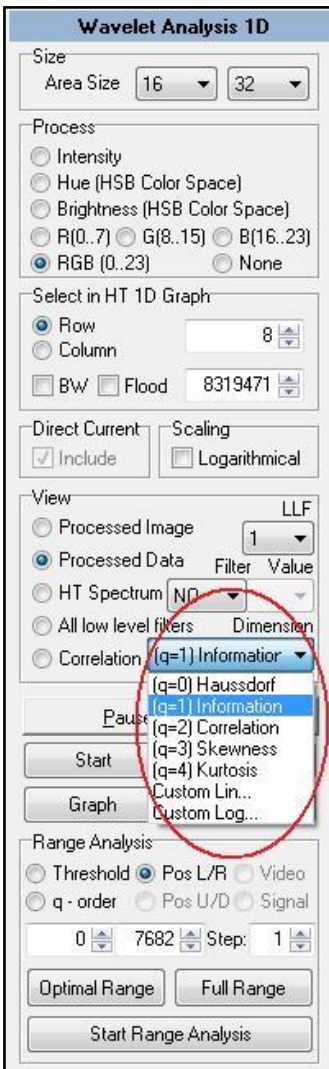
$$K_{BW} = \frac{K_{BW}}{K_{BBW} + K_{WBW} - K_{BW}}, \quad (11)$$

kde

$$K_B + K_W + K_{WB} = 1. \quad (12)$$



Obr. 24: Panel na nastavení dat pro zpracování



Obr. 25: Postranní panel pro nastavení analýzy

Po načtení dat programem HarFA se zobrazil panel pro nastavení vstupních dat pro zpracování, viz. Obr. 24. V prvním řádku uprostřed je zobrazen krok, po kterém se data zpracovávala. Vlevo nahoře je vidět oblast dat (Channel) odpovídající zpracovávanému sloupci. V druhém řádku je zobrazena minimální a maximální hodnota souboru. Jejich rozdíl udává velikost měřítka, ve kterém jsou data zpracovávána a hodnota se vepisuje do Obr. 23 jako Scale. Malé okno ve spodní části tabulky nám ukazuje náhled právě zpracovávaných dat v určitém souboru.

Z takto stanovených veličin (při znalosti minimální t_{min} a maximální hodnoty t_{max} v reálném měřítku, viz obr. lze pak určit střední hodnotu (13) a chybu (14) analyzovaných dat.

$$AVG = \left(K_B + \frac{K_{WB}}{2} \right) \cdot (t_{max} - t_{min}) + t_{min} , \quad (13)$$

$$DEV = \frac{K_{WB}}{2} \cdot (t_{max} - t_{min}) . \quad (14)$$

Obdobným způsobem lze určit střední hodnoty a chyby dalších momentů q -tého řádu analyzovaných dat (směrodatná odchylka, šikmost, špičatost).

3.6 Statistické vyhodnocení experimentálních dat

Ke statistickému vyhodnocení experimentálních dat je možné využít komerční programy, např. Statistika, Matlab, MS Excel. V práci jsou standardní statistické metody využity k hodnocení korelací závislosti monitorovaných fyzikálních veličin. K hodnocení závislostí byla využita regresní analýza, konkrétně lineární regrese, která je speciálním případem polynomiální regrese

$$y = a_0 + a_1 x. \quad (15)$$

Odhady koeficientů a_0, a_1 lze určit z experimentálních dat řešením soustavy algebraických rovnic

$$\hat{a}_0 n + \hat{a}_1 \sum x_i = \sum y_i, \quad (16)$$

$$\hat{a}_0 \sum x_i + \hat{a}_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i, \quad (17)$$

odkud lze určit průsečík s osou y

$$\hat{a}_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \sum y_i - \hat{a}_1 \cdot \sum x_i, \quad (18)$$

strmost závislosti (regresní koeficient)

$$\hat{a}_1 = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (19)$$

a odhad rozptylu

$$s_r^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} = \frac{\sum y_i^2 - \hat{a}_0 \sum y_i - \hat{a}_1 \sum x_i y_i}{n-2}. \quad (20)$$

Odhadnuté koeficienty a_0, a_1 mají t – Studentovo rozdělení $t[\nu]$ kde $\nu = n - 2$ stupni volnosti. Na zvolené hladině významnosti α lze tedy odhadnout interval spolehlivosti (oboustranný) chyby regresního koeficientu

$$\Delta \hat{a}_1 = \frac{s_r \cdot t_{n-2}}{\sqrt{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}}, \quad (21)$$

chyby průsečíku s osou y

$$\Delta \hat{a}_0 = s_r \cdot t_{n-2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2}}, \quad (22)$$

a intervaly spolehlivosti pro jednotlivé body závislosti

$$\Delta \hat{y}_i = s_r \cdot t_{n-2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2}}. \quad (23)$$

V grafu lze potom s pomocí těchto hodnot zkonstruovat tzv. pás spolehlivosti, který dostaneme spojením bodů ohraničujících interval spolehlivosti, který s pravděpodobností $1 - \alpha/2$ pokryje odhadovanou regresní přímku.

3.7 Aplikace na reálná data

Všechna data byla zpracována programem HarFA, který spočítal statistické parametry (AVG, DEV) pro moment prvního řádu (střední hodnoty veličin a jejich chyby). Každý rok se analyzoval zvláště vždy s délkou analyzované řady 512 dat (tj. 43 hodin) s krokem analýzy 12 dat (tj. 1 hodina).

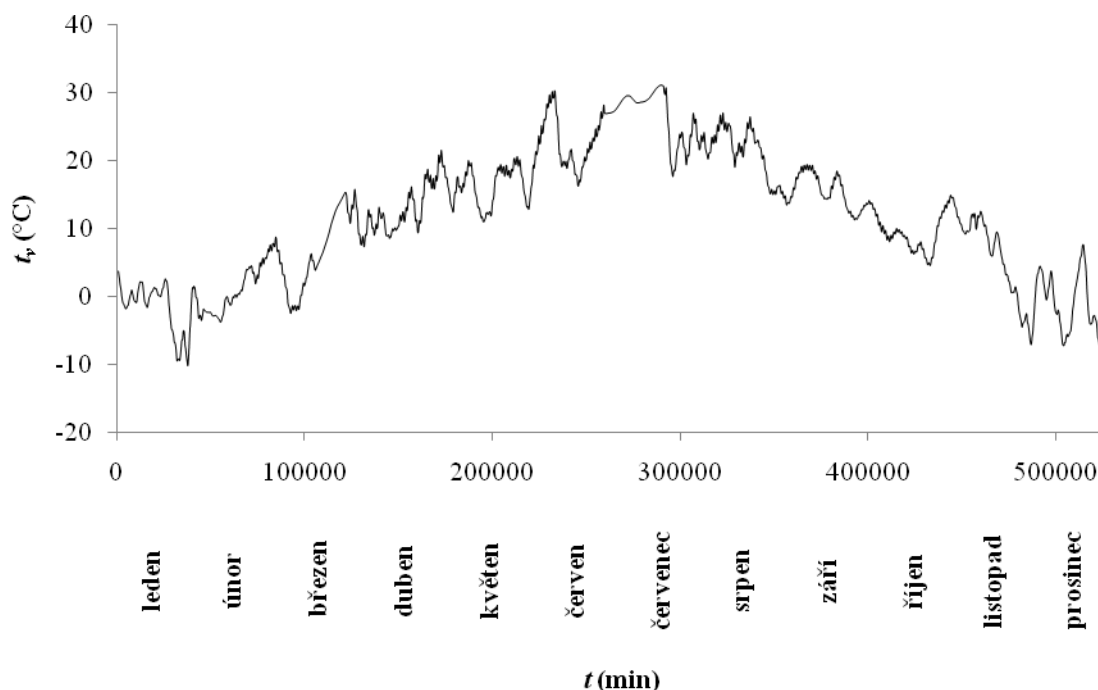
Pro detailní zpracování byl vybrán rok 2010, na kterém jsou demonstrovány všechny následující obrázky.

Data byla vždy nezávisle na sobě zpracována a následně mezi sebou porovnávána. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny v následujících kapitolách.

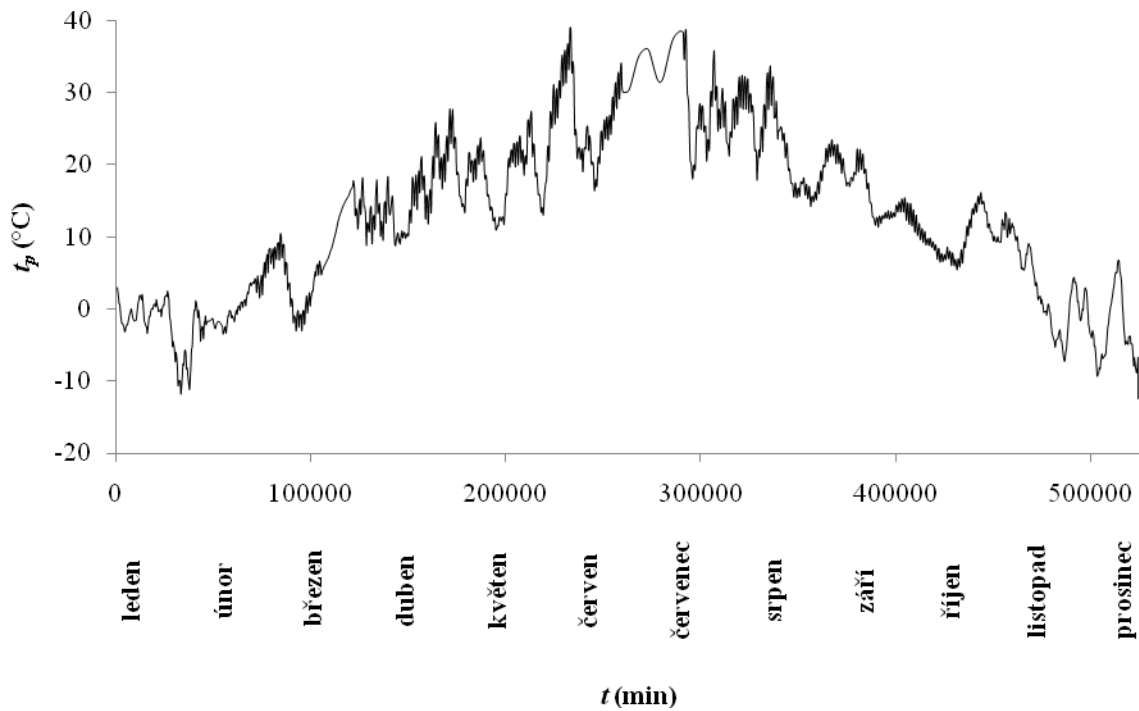
3.7.1 Závislost teploty fotovoltaického panelu na teplotě vzduchu

Programem HarFA bylo nezávisle na sobě statisticky zpracováno datum a čas sběru dat, resp. hodnota odpovídající minutě odběru, teplota fotovoltaického panelu a teplota vzduchu.

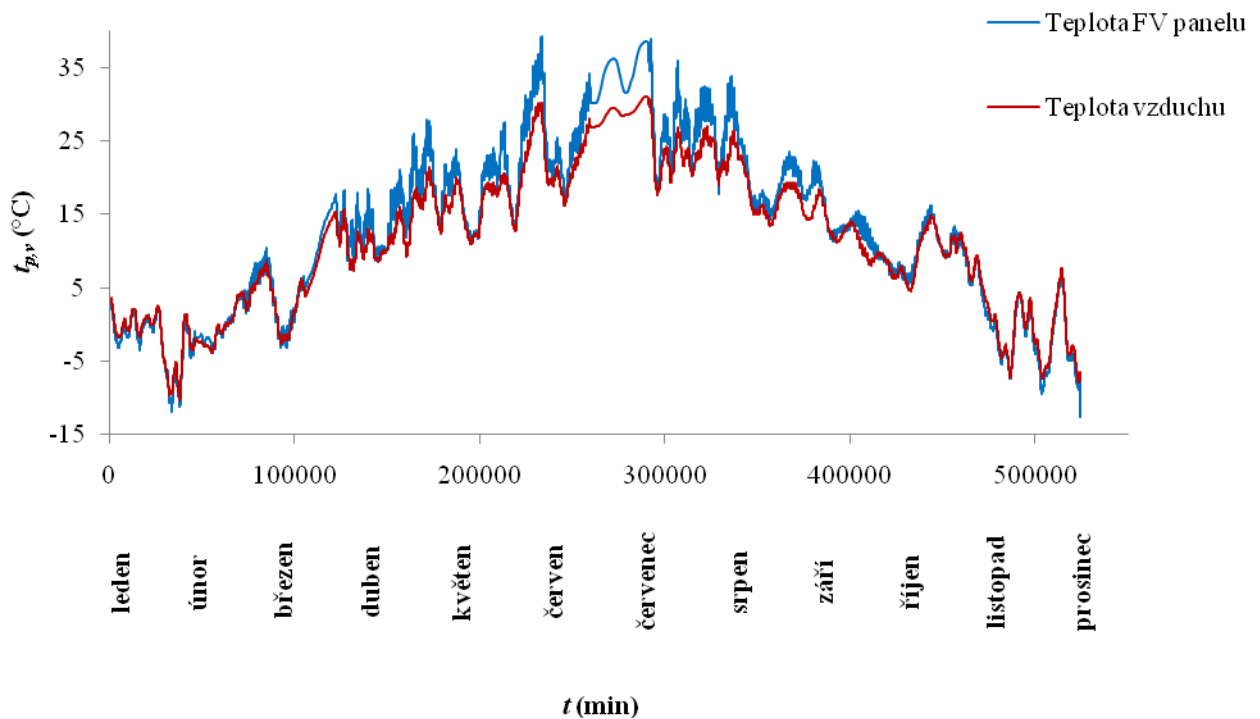
Na Obr. 26 a Obr. 27 je vidět vývoj teploty vzhledem k času odběru. Z obrázku je patrné, že nejtepleji v průběhu roku (leden – prosinec) je v létě a naopak nejmenší teplo bylo v zimě. Porovnání obrázků je znázorněno v Obr. 28, na kterém je vidět, že teplota vzduchu velmi ovlivňuje teplotu fotovoltaického panelu (křivka teploty vzduchu je kopírovaná křivkou teploty fotovoltaického panelu). Ta je ovšem, hlavně v letních měsících, vyšší než příslušná teplota vzduchu. Je to dané především tepelnou akumulací materiálu fotovoltaického systému.



Obr. 26: Graf závislosti teploty vzduchu na čase odběru (sloupec 52 vs. sloupec 1)



Obr. 27: Graf závislosti teploty fotovoltaického panelu na čase odběru (sloupec 51 vs. sloupec 1)

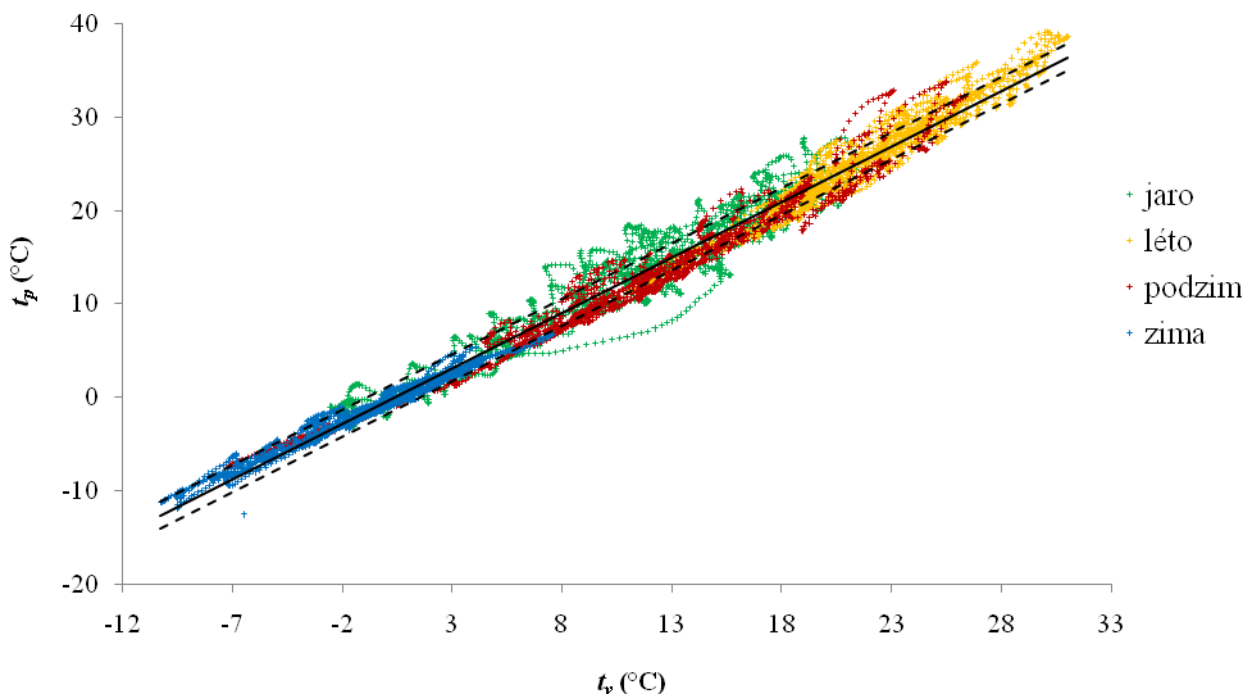


Obr. 28: Graf porovnání teploty vzduchu a teploty fotovoltaického panelu na čase odběru (sloupec 51, 52 vs. sloupec 1)

Na Obr. 29 je vidět závislost teploty fotovoltaického panelu na teplotě vzduchu s rozlišením čtyř ročních období. Závislost lze popsat regresní rovnicí

$$t_p = 1,1862 t_v - 0,435.$$

Je zde viditelná stoupající lineární tendence (plná čára). Tudiž se stoupající okolní teplotou poroste i teplota samotného fotovoltaického panelu. Nejnížší teploty jsou v zimě, postupně se zvyšující na jaře a na podzim a nejvyšší teploty byly naměřeny v létě (viz barevné rozlišení). Jak již bylo řečeno výše, teplota fotovoltaického panelu je o něco vyšší než teplota okolního vzduchu (hlavně v letním období, kdy jsou teploty vzduchu vysoké a je vysoká intenzita ozáření fotovoltaického systému), zejména kvůli akumulaci tepla materiálem fotovoltaického systému. K detailnějšímu posouzení závislostí je graf doplněn křivkami vymezení interval spolehlivosti (čárkovaně).



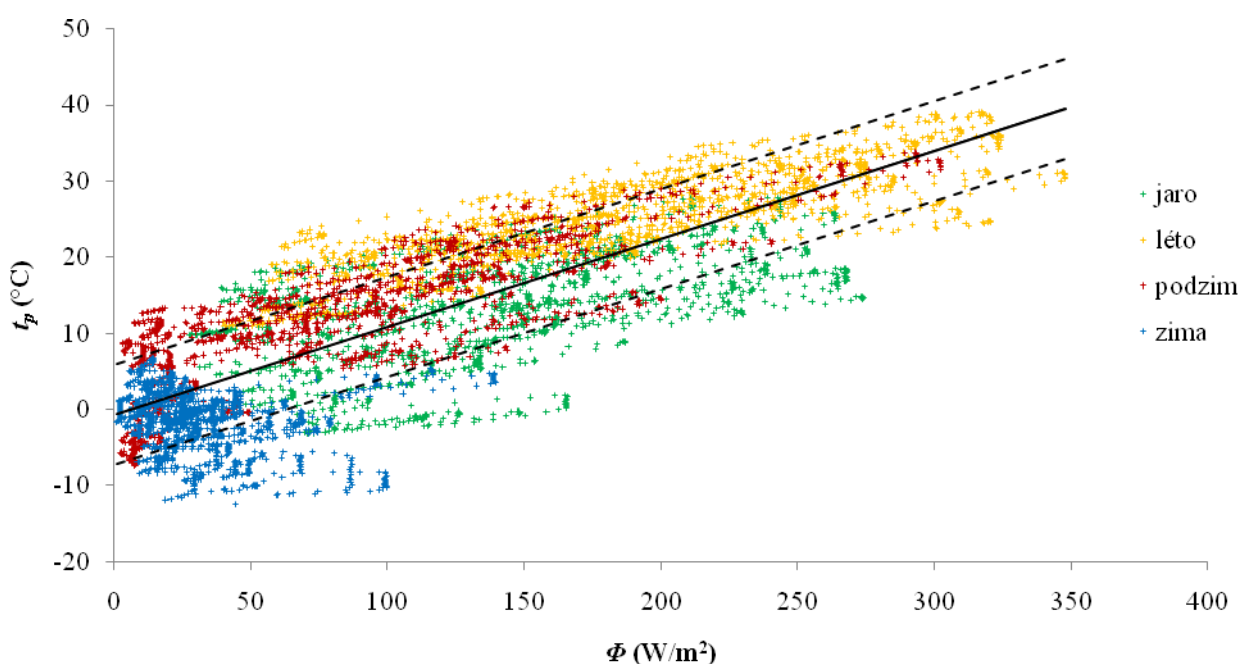
Obr. 29: Graf závislosti teploty fotovoltaického panelu na teplotě vzduchu (sloupec 51 vs. sloupec 52)

3.7.2 Závislost teploty fotovoltaického panelu na intenzitě ozáření

Na Obr. 30 je vidět závislost teploty fotovoltaického panelu na intenzitě ozáření s rozlišením čtyř ročních období. Závislost lze popsat regresní rovnicí

$$t_p = 0,1156 \Phi - 0,719.$$

Stejně jak u předešlé závislosti je zde vidět stoupající lineární tendence vzrůstající teploty fotovoltaického panelu na intenzitě ozáření, závislá na ročním období. Intenzita ozáření velmi ovlivňuje teplotu fotovoltaického panelu. Nejnižší intenzita ozáření, tudíž i nejnižší teplota fotovoltaického panelu, byla v zimě. Naopak nejvyšší intenzita ozáření a zároveň teplota fotovoltaického panelu byla v létě. K detailnějšímu posouzení závislostí je opět graf doplněn křivkami vymezujícími interval spolehlivosti (čárkovaně).



Obr. 30: Graf závislosti teploty fotovoltaického panelu na intenzitě ozáření (sloupec 51 vs. sloupec 53)

3.7.3 Závislost teploty fotovoltaického panelu na rychlosti větru

Na Obr. 31 je vidět graf závislosti teploty fotovoltaického panelu na rychlosti větru pro čtyři roční období. Závislost lze popsat regresní rovnicí

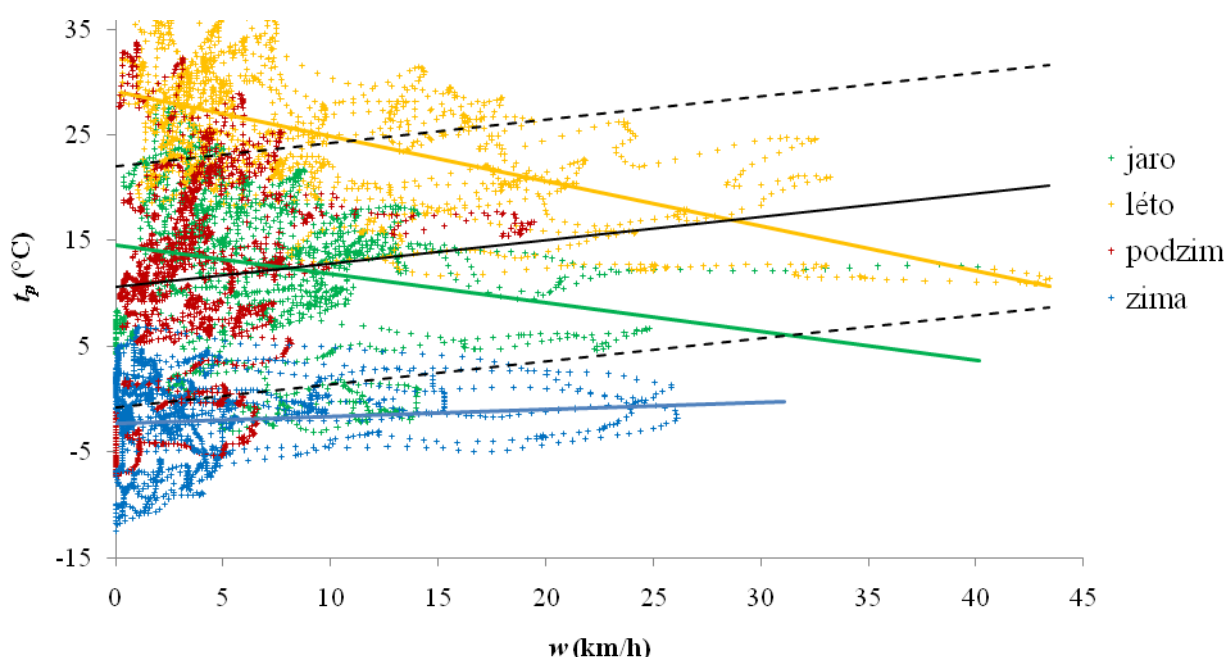
$$t_p = 0,2194 w + 10,624.$$

Jak je z obrázku patrné, vliv intenzity větru na teplotu fotovoltaického panelu je jen malý. Kdyby byl vliv větru větší, byla by teplota fotovoltaického panelu pro dané období více rozprostřena podél osy y . Nejvyšší teploty fotovoltaického panelu byly naměřeny v letním období, kdy i nejvíce foukal vítr. Naopak nejméně foukal vítr v zimě, kdy byly i nejnižší teploty fotovoltaického panelu. Jedinou výjimkou, jak je z grafu vidět, je podzim, kdy byla síla větru slabá, ale byly naměřeny velké rozdíly teplot fotovoltaického panelu.

Pokud se ale zaměříme pouze na závislosti jednotlivých ročních období, které jsou v grafu znázorněny barevnými regresními přímkami, odpovídající danému období, je zde u některých vidět postupná klesající tendence s nárůstem rychlosti větru. Tento rozdíl je patrný v letním, případně jarním, období. V těchto dvou obdobích, byly ale naměřeny nejvyšší hodnoty teploty fotovoltaického panelu s vysokými hodnotami rychlosti větru. Z toho můžeme usoudit, že vliv rychlosti větru na teplotu fotovoltaického panelu má vliv pouze v okamžiku, kdy je teplota fotovoltaického panelu vysoká a rychlost větru natolik velká, že může panel ochladit.

Naopak v zimním období, kdy teplota fotovoltaického panelu nebyla příliš vysoká, tak ani velká rychlost větru neovlivnila tuto teplotu.

I zde byl k detailnějšímu posouzení závislostí graf doplněn křivkami vymežujícími interval spolehlivosti (čárkovaně). Jak je z obrázku vidět, intervalu spolehlivosti odpovídají data spadající především do období podzimu a jara. Do tohoto intervalu naopak nespádají hodnoty vysokých teplot v létě a naopak velmi nízkých teplot v zimě.



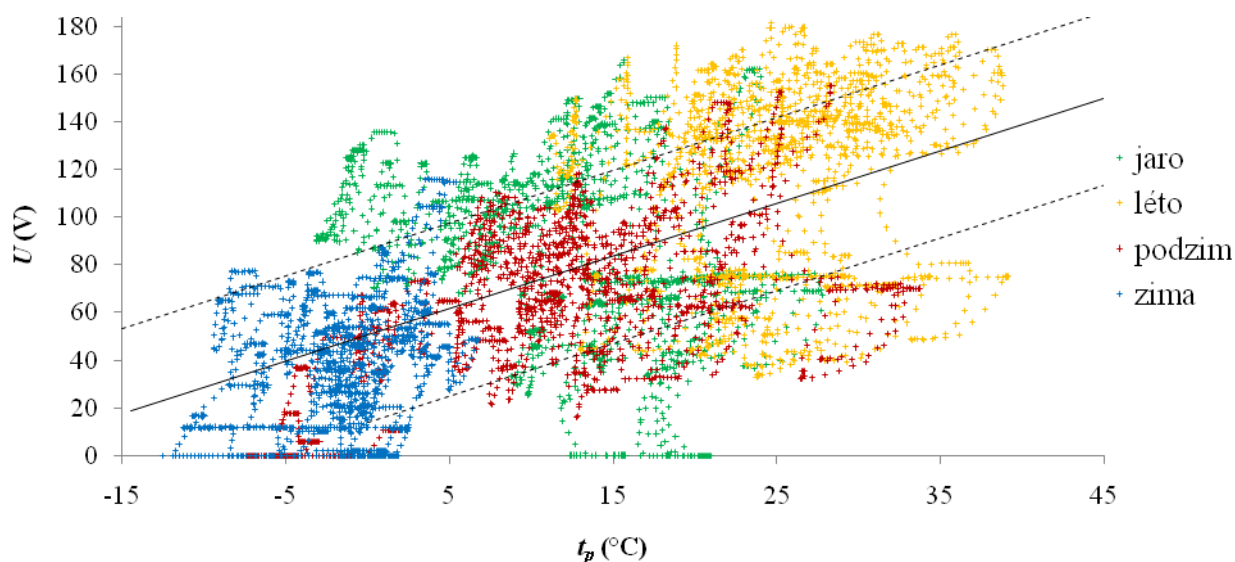
Obr. 31: Graf závislosti teploty fotovoltaického panelu na rychlosti větru (sloupec 51 vs. sloupec 54)

3.7.4 Závislost stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu

Na Obr. 32 je vidět graf závislosti velikosti stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu s rozlišením čtyř ročních období. Závislost lze popsat regresní rovnicí

$$U = 2,2017 t_p + 50,524.$$

V grafu je opět vidět stoupající tendence. S rostoucí teplotou fotovoltaického panelu roste i odebírané stejnosměrné napětí z fotovoltaického systému. Největší hodnoty stejnosměrného napětí byly v létě, aby byla nejvyšší teplota fotovoltaického panelu a nejvyšší intenzita ozáření. Nejnižší naopak v zimě, kdy byla teplota fotovoltaického panelu nejnižší i intenzita ozáření nebyla tak velká.



Obr. 32: Graf závislosti stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu (sloupec 35 vs. sloupec 51)

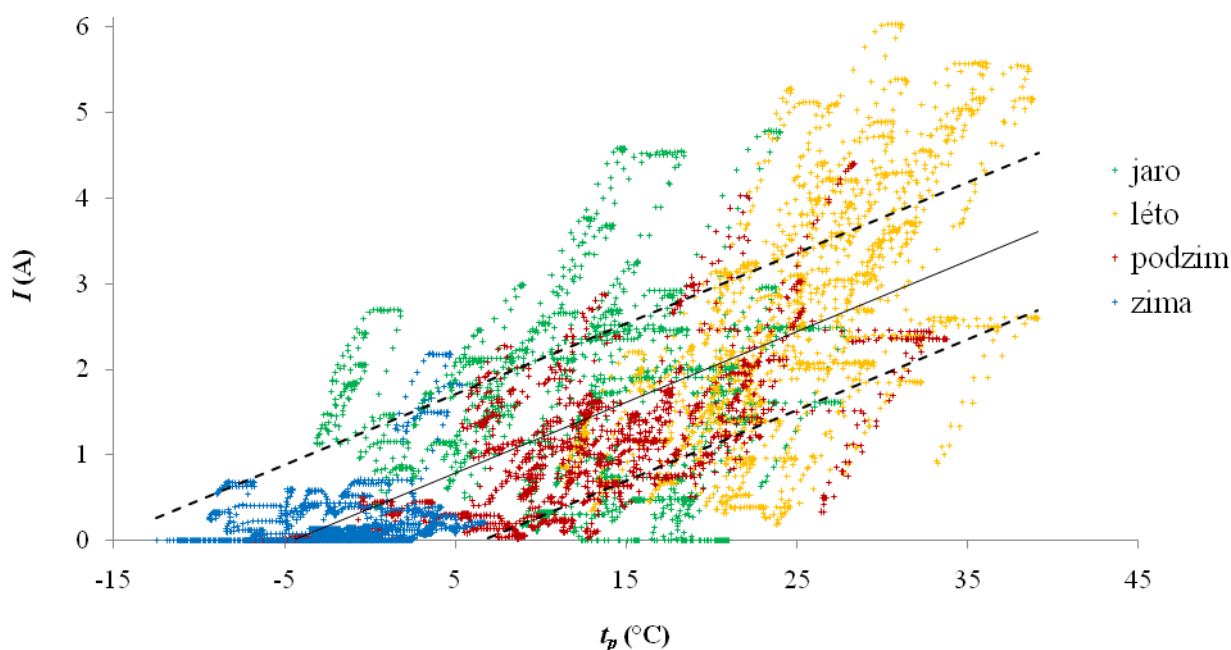
3.7.5 Závislost stejnosměrného proudu a výkonu na teplotě fotovoltaického panelu

Na Obr. 34 je vidět graf závislosti stejnosměrného proudu na teplotě fotovoltaického panelu s rozlišením čtyř ročních období. Závislost lze popsat regresní rovnicí

$$I = 0,0827 t_p + 0,382.$$

Z předchozích obrázků s grafy vyplývá, že se stoupající intenzitou ozáření a teplotou okolního vzduchu roste i teplota fotovoltaického panelu, a ve spojení s tímto obrázkem, je vidět, že roste i stejnosměrný proud odváděný z fotovoltaického systému. Platí tedy trend, čím vyšší teplota fotovoltaického panelu, tím vyšší jsou hodnoty stejnosměrného proudu odváděného z fotovoltaického systému. Nejvíce dodaného stejnosměrného proudu je tedy v létě, kdy jsou i nejvyšší teploty.

I tento graf byl opatřen úsečkami vymezující interval spolehlivosti, do kterého opět spadá většina naměřených dat. Na grafu jsou patrné výkyvy. Ty jsou dané větší intenzitou slunečního záření, než je průměr daného období. Naopak výkyvy pod intervalem spolehlivosti jsou dané menší intenzitou záření, pravděpodobně způsobené průchodem slunečního záření přes mraky, které část záření pohltí.



Obr. 33: Graf závislosti velikosti stejnosměrného proudu na teplotě fotovoltaického panelu (sloupec 43 vs. sloupec 51)

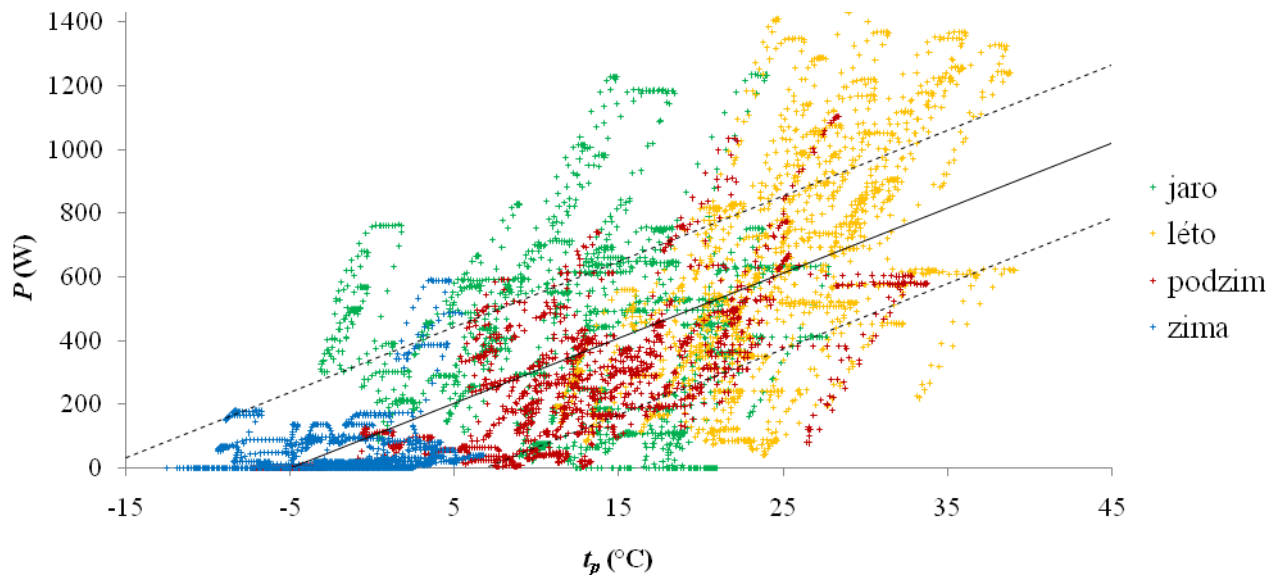
Na Obr. 34 je vidět graf závislosti velikosti výkonu fotovoltaického panelu na jeho teplotě. Graf má stejnou tendenci jako graf na Obr. 33, jelikož platí vztah

$$P = U \cdot I, \quad (24)$$

kde P je výkon, U je napětí a I proud.

Závislost grafu na Obr. 34 lze popsat regresní rovnicí

$$P = 20,413 t_p + 103,01.$$



Obr. 34: Graf závislosti velikosti výkonu na teplotě fotovoltaického panelu (sloupec 43 vs. sloupec 51)

3.8 Souhrnné výsledky

3.8.1 Souhrnné výsledky pro rok 2010

V tabulce 5 jsou uvedeny souhrnné výsledky analyzovaných parametrů popisujících statistická data fotovoltaického systému v roce 2010. Jsou zde uvedeny jednak vzájemné závislosti parametrů vnějších vlivů (teploty vzduchu, rychlosti větru a ozáření) na teplotu fotovoltaického panelu, ale také závislosti výstupních elektrických veličin (napětí, proudu a výkonu fotovoltaického panelu) na jeho pracovní teplotě. Jsou zde uvedeny parametry regresních závislostí experimentálních dat pro všechny diskutované závislosti včetně relativních chyb parametrů lineární regrese, koeficientu determinace a standardní chyby odhadu závisle proměnné. Z tabulky je zcela zřejmá korelace mezi teplotou panelu a teplotou okolního vzduchu, naopak korelace mezi teplotou panelu a rychlostí větru nebyla prokázána (i když v jednotlivých ročních obdobích byla zřejmá). Z tabulky je také zřejmá korelace mezi výkonem a teplotou fotovoltaického panelu.

Tabulka 5: Souhrnná data lineárních regresí jednotlivých závislostí.

závislost	směrnice	relativní chyba	úsek na ose y	relativní chyba	koeficient determinace	standardní chyba odhadu y
	a	$\Delta a/a$	b	$\Delta b/b$	R^2	se_y
$t_p = f(t_v)$	1,1862±0,0018	$1,5175 \cdot 10^{-3}$	-0,4350±0,0257	0,0591	0,9843	1,4447
$t_p = f(\Phi)$	0,1156±0,0010	$8,6505 \cdot 10^{-3}$	-0,7190±0,1323	0,1840	0,6760	6,5711
$t_p = f(w)$	0,2194±0,0214	$9,7539 \cdot 10^{-2}$	10,6242±0,1941	0,0183	0,0150	11,4574

závislost	směrnice	relativní chyba	úsek na ose y	relativní chyba	koeficient determinace	standardní chyba odhadu y
	a	$\Delta a/a$	b	$\Delta b/b$	R^2	se_y
$I = f(t_p)$	0,0827±0,0010	0,0121	0,3820±0,0159	0,0416	0,5195	0,9178
$U = f(t_p)$	2,2127±0,0378	0,0171	50,2043±0,6298	0,0125	0,3317	0,6298
$P = f(t_p)$	20,5563±0,2498	0,0122	99,8637±4,1648	0,0417	0,4948	239,7745

3.8.2 Srovnání výsledků pro rok 2005 – 2010

3.8.2.1. Závislost teploty fotovoltaického panelu na teplotě vzduchu

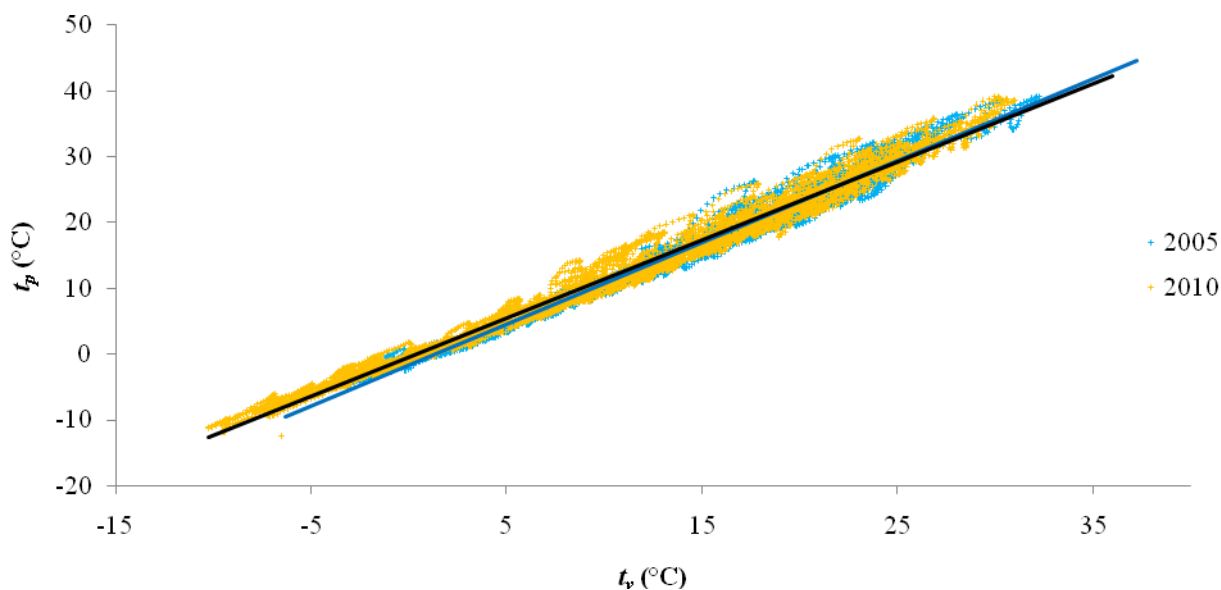
Na Obr. 35 je vidět srovnání závislosti teploty fotovoltaického panelu na teplotě okolního vzduchu pro rok 2005 a 2010. Modře je v obrázku znázorněna lineární regrese pro rok 2005, černě pro rok 2010. Závislost lze popsat regresní rovnicí pro rok 2005

$$t_p = 1,2459 t_v - 1,7138$$

a pro rok 2010

$$t_p = 1,1862 t_v - 0,435.$$

Jak je z grafu vidět, oblasti grafu se téměř překrývají. Z grafu je také patrné, fotovoltaický panel má relativně velkou tepelnou akumulaci. Při nízkých teplotách, kdy teplota vzduchu např. dosahovala okolo 5 °C, tak i teplota fotovoltaického panelu se pohybovala okolo 5 °C. Na rozdíl od toho, když teplota okolního vzduchu dosahovala např. 30 °C, teplota fotovoltaického panelu se pohybovala až okolo 40 °C.



Obr. 35: Graf závislosti teploty fotovoltaického panelu na teplotě vzduchu pro rok 2005 a 2010

3.8.2.2. *Závislost stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu*

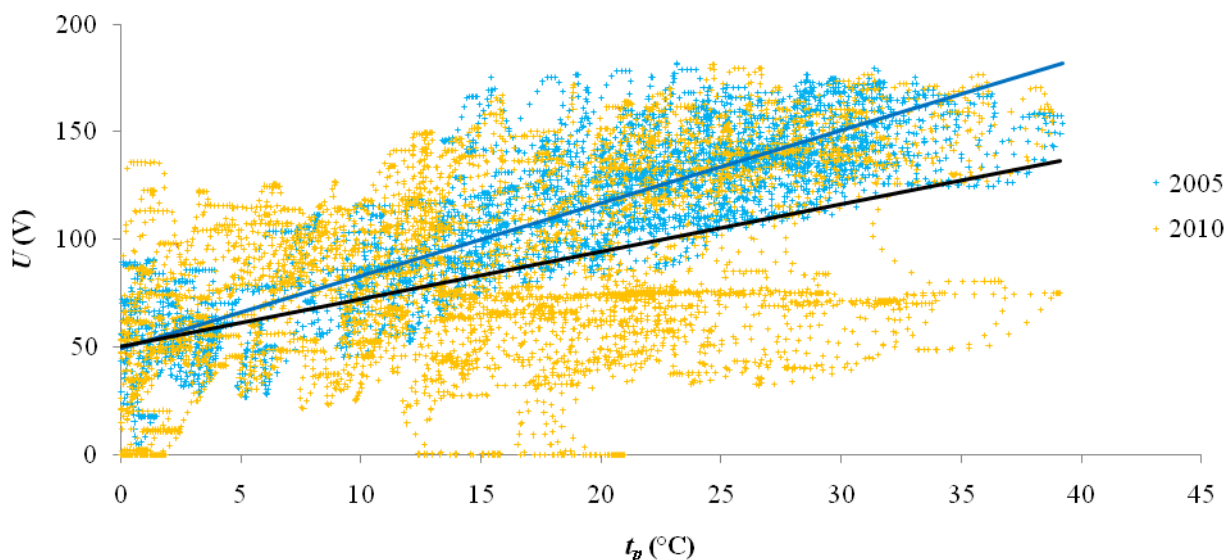
Na Obr. 36 je vidět srovnání závislosti velikosti stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu pro srovnání roku 2005 a roku 2010. Modrou regresní přímkou je v grafu znázorněná závislost roku 2005 a černou regresní přímkou závislost roku 2010. Závislost lze popsat regresní rovnicí pro rok 2005

$$U = 3,3887 t_p + 49,187$$

a pro rok 2010

$$U = 2,2017 t_p + 50,524.$$

Jak je z grafu vidět, stoupající lineární tendence roku 2005 je přibližně stejná jako v roce 2010, ale v roce 2010 se začala tvořit ještě jedna tendence. Tato anomálie je pravděpodobně způsobena degradací fotovoltaických článků na fotovoltaických panelech elektrárny. Bližší studie těchto anomálií doposud nebyly prováděny. Další možností je, že některé fotovoltaické články degradují více, nebo rychleji, což vede k snížení výkonu celého fotovoltaického panelu. Tudíž při stejné teplotě fotovoltaického panelu jsou nižší výstupní hodnoty stejnosměrného napětí, proudu, resp. výkonu.



Obr. 36: *Graf závislosti stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu pro rok 2005 a 2010*

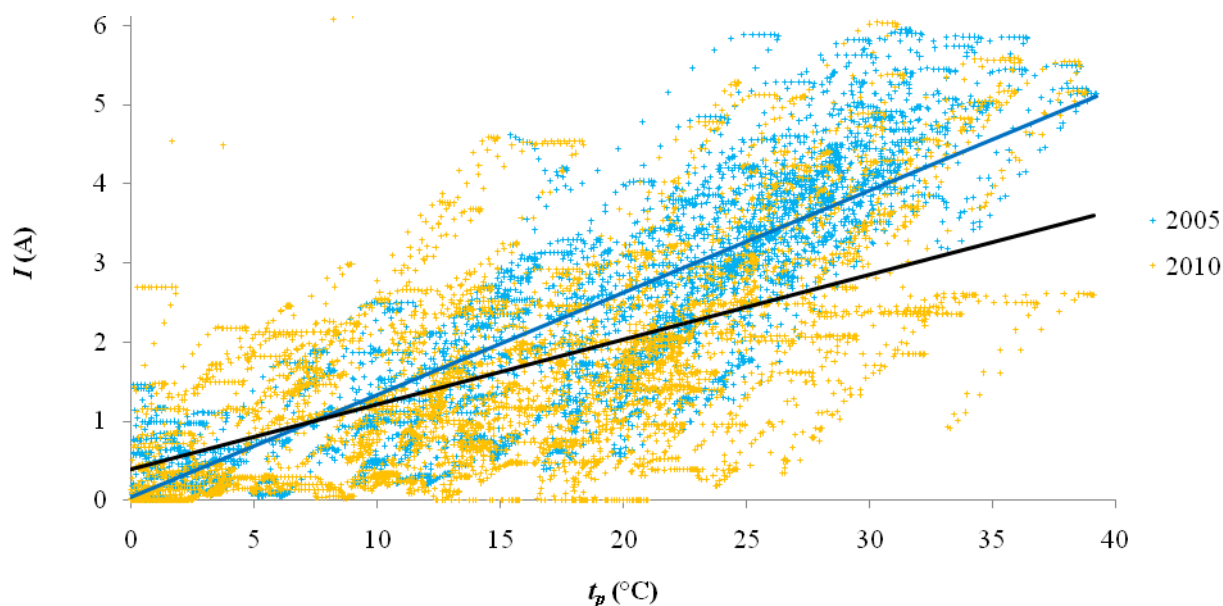
3.8.2.3. Závinnost stejnosměrného proudu a výkonu na teplotě fotovoltaického panelu

Na Obr. 37 je vidět srovnání závislosti velikosti stejnosměrného proudu na teplotě fotovoltaického panelu pro rok 2005 a 2010. Modrou regresní přímkou je v grafu znázorněná závislost roku 2005 a černou regresní přímkou závislost roku 2010. Závislost lze popsat regresní rovnicí pro rok 2005

$$U = 0,1288 t_p + 0,0497$$

a pro rok 2010

$$U = 0,0821 t_p + 0,3948.$$



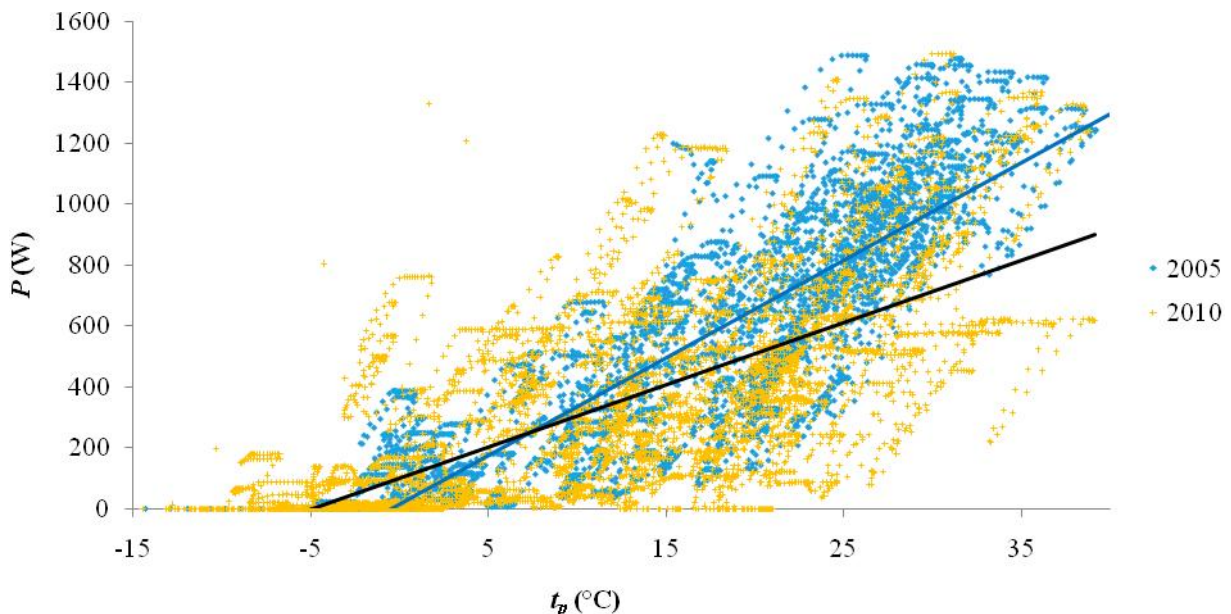
Obr. 37: Graf závislosti stejnosměrného proudu na teplotě fotovoltaického panelu pro rok 2005 a 2010

Na Obr. 38 je vidět srovnání závislosti velikosti stejnosměrného proudu na teplotě fotovoltaického panelu pro rok 2005 a 2010. Modrou regresní přímkou je v grafu znázorněná závislost roku 2005 a černou regresní přímkou závislost roku 2010. Závislost lze popsat regresní rovnicí pro rok 2005

$$P = 32,022 t_p + 17,104$$

a pro rok 2010

$$P = 20,413 t_p + 103,01.$$



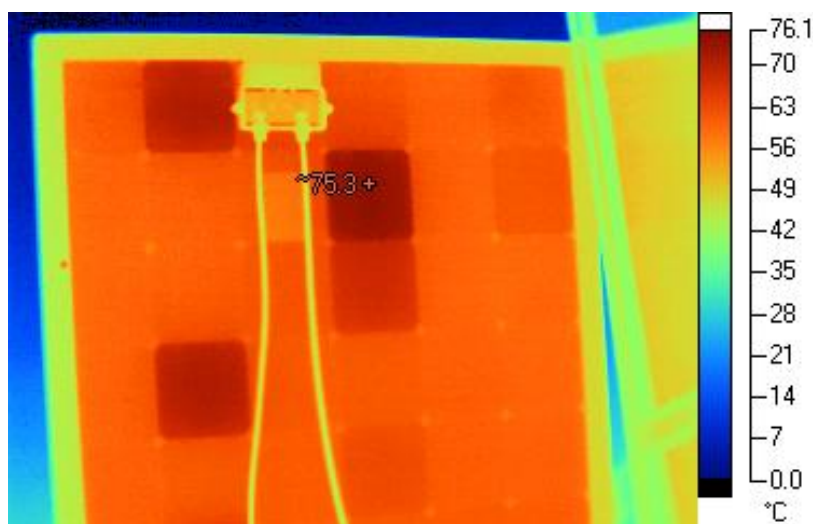
Obr. 38: Graf závislosti výkonu na teplotě fotovoltaického panelu pro rok 2005 a 2010

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.7.5, stejnosměrný proud a výkon spolu souvisí podle vztahu (24), tudíž se tyto dva grafy dají popsat podle stejného pravidla. V grafech jsou vidět stoupající lineární tendence. Jak je z grafů vidět, rok 2010 je opět zatížen anomálií, která ovlivňuje výstupní data z fotovoltaického systému. Pokud si ale tuto anomálii odmyslíme, je stoupající trend obou let skoro stejný.

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

Od roku 2005, kdy byla fotovoltaická elektrárna na Pedagogické fakultě Masarykovy university sídlící na Poříčí 31 v Brně umístěna, byl prováděn sběr dat monitorujících vnější vlivy a výstupní parametry elektrárny. V této práci jsou archivovaná data statisticky hodnocena. Díky velkému počtu zpracovaných a vyhodnocených dat byl do práce jako příklad vložen detailně zpracovaný rok 2010, na kterém se začala objevovat anomálie, jak je zřejmé z uvedených grafů. V druhé polovině experimentální části byla statisticky vyhodnocená data z roku 2010 srovnána se statisticky vyhodnocenými daty z roku 2005. Ostatní roky měly stejnou tendenci jako v roce 2005, či v roce 2010 bez anomálie.

Z porovnání výsledků z let 2005 a 2010 můžeme vidět výkonnostní rozdíly, které mohly být způsobené vlivem degradace v průběhu provozu fotovoltaické elektrárny. Z grafů je patrné, že hlavní trend obou let je stejný a bez větších zjevných rozdílů. V roce 2010 se však začal projevovat nový trend, který výrazně ovlivnil celkový výkon elektrárny. Jak již bylo popsáno výše, domníváme se, že tento trend byl způsoben lokálními degradacemi na jednotlivých článcích fotovoltaického panelu. Tato místa měla jiné, horší, vlastnosti než původní články. Proto při vysoké teplotě fotovoltaického článku, která souvisí s teplotou okolního vzduchu a intenzitou ozáření, byly výstupní parametry (elektrické napětí, proud, výkon) nižší, než se jevil průměrný stoupající trend. Další možností je zvýšení vnitřního odporu některých článků na fotovoltaickém panelu. To je způsobeno přehříváním jednotlivých článků (viz Obr. 39) a tím snížení účinnosti celého fotovoltaického panelu.



Obr. 39: Vliv článků s různým vnitřním odporem na teplotu fotovoltaického článku

Tyto možné problémy jsou známé a firmy zprostředkovávající výrobu fotovoltaických panelů se jim snaží předcházet. Proto se věnuje velká pozornost výběru jednotlivých fotovoltaických článků tak, aby měly alespoň přibližně stejný vnitřní odpor, a tím nedocházelo k přehřívání a degradaci celého fotovoltaického panelu. Bohužel firma není schopna v průběhu provozu zajistit, aby nedocházelo k degradaci různých článků v průběhu provozu různou rychlostí. Výběrem článků o přibližně stejném vnitřním odporu se těmto jevům snaží předcházet a snížit tak případnou možnost degradace článku a tím snížení účinnosti. Snížení účinnosti se dá předcházet také odvodem tepla z fotovoltaického panelu a tedy snížením pracovní teploty.

5. ZÁVĚR

Účinnost fotovoltaického systému je ovlivňována mnoha faktory. Mnohé z faktorů se dají ovlivnit, jiné ne. Mezi faktory, které se dají ovlivnit, patří již od začátku výroby volba základního materiálu fotovoltaického článku, samotná výroba fotovoltaického panelu či celé elektrárny. Můžeme se snažit co nejlépe ošetřit možné problémy, které by mohly při provozu panelu či elektrárny vzniknout. Naopak k faktorům, které se ovlivnit nedají, nebo jen velmi málo, patří okolní vlivy působící na fotovoltaický panel či elektrárnu. K takovýmto faktorům patří teplota okolního vzduchu, intenzita záření, tlak vzduchu, ale i vlhkost či intenzita větru. Hlavně díky těmto faktorům klesá při provozu panelu či elektrárny účinnost.

Většina výsledků samotného měření a následného zpracování nebyly velmi překvapující. S větší intenzitou ozáření vzrostla i teplota vzduchu, a to ovlivnilo i teplotu samotného fotovoltaického panelu. Při vyšším ozáření byl i vyšší celkový výkon panelu. Naopak je překvapující, že se neobjevil již prokázaný jev, kdy při vysokých teplotách fotovoltaického panelu klesá celkový výkon, jelikož fotovoltaický panel se přehřívá.

Jediným překvapivým výsledkem je vzniklá druhá lineární tendence, která je nejlépe patrná na grafu závislosti stejnosměrného napětí na teplotě fotovoltaického panelu. Domníváme se, že tato anomálie je způsobena částečnou degradací celého systému, nebo degradací jednoho nebo několika článků, která následně ovlivní celkový výkon celého fotovoltaického systému.

Výsledkem práce je studium vlivu okolních podmínek na účinnost fotovoltaického panelu. Na tyto podmínky by se měl brát ohled při výrobě i instalaci samotného fotovoltaického systému. Dále je pravděpodobně prokázána částečná degradace fotovoltaického systému v průběhu provozu. Výsledky budou předány provozovateli fotovoltaické elektrárny a v dalších letech proběhne kontrolní vyhodnocení a ověření správnosti výstupu práce. V letním období připravujeme kontrolní měření teploty fotovoltaických panelů pomocí termokamery k ověření či vyvrácení naší domněnky o degradaci fotovoltaických článků (viz Obr. 39).

Vliv vlhkosti nebyl monitorován, proto nemohlo být provedeno hodnocení jeho vlivu.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Nazeleno: Chytrá řešení pro každého* [online]. 2008 [cit. 2011-04-24]. Výroba elektřiny v ČR. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/vyroba-elektriny-v-cra-uhli-konci-nahradi-jej-jadro.aspx>>.
- [2] *CZECHSOLAR : fotovoltaické panely a elektrárny* [online]. [cit. 2011-04-24]. Z historie fotovoltaiky. Dostupné z WWW: <<http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/z-historie-fotovoltaiky/>>.
- [3] *Sunnytech* [online]. 2010 [cit. 2011-04-24]. Historie fotovoltaiky. Dostupné z WWW: <http://www.sunnytech.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=54>.
- [4] *Czech RE Agency : Fotovoltaika pro každého* [online]. 2009 [cit. 2011-04-24]. Fotovoltaika. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#treti>>.
- [5] *Czech Solar s.r.o. : Solární panely - čistá energie ze slunce* [online]. 1 [cit. 2011-04-24]. Technologie a vývoj FV panelu. Dostupné z WWW: <<http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/technologie-a-vyvoj-panelu/>>.
- [6] KŘENEK, V. *Člověk a energie*. Západočeská univerzita v Plzni, 2006. 132 s. ISBN 80-7043-489-9.
- [7] *EkoWATT : centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie* [online]. 2008 [cit. 2011-04-24]. Fotovoltaický článek. Dostupné z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-slunce---vyroba-elektriny>>.
- [8] *U pramene* [online]. 12. 4. 2010 [cit. 2011-04-24]. Výroba fotovoltaického článku. Dostupné z WWW: <<http://www.upramene.cz/forum/viewtopic.php?t=1582>>.
- [9] *Wikipedie* [online]. 18. 4. 2011 [cit. 2011-04-24]. Křemík. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Křemík>>.
- [10] ŘEHÁK, J., BÁRTEK, J., BAŘINKA, R.: *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování*. [online]. Praha : Česká energetická agentura, 2000 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf>.
- [11] Vaněk, J.; Křivík, P.; Novák, V. *Alternativní zdroje energie*. Brno: FEKT, 2007.
- [12] MURTINGER, K., BERANOVSKÝ, J., TOMEŠ, M.: *Fotovoltaika elektřina ze slunce*. ERA, Brno, 2007.
- [13] *ABS portál* [online]. 2011 [cit. 2011-04-24]. Fotovoltaické články. Dostupné z WWW: <<http://www.asb-portal.cz/tzb/energie/fotovoltaicke-clanky-historie-a-soucasne-trendy-vyvoje-2262.html>>.
- [14] BERREDJEM, Y.; KARST, N.; CATTIN, L., *The open circuit voltage of encapsulated plastic photovoltaic cells*. [online]. Srpen 2008 [cit. 2011-04-24]. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TFY-4R7J63Y-1&_user=10&_coverDate=08/31/2008&_alid=1729094549&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5239&_sort=r&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=1&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=07bb3f6b2f49ec40b78b067bf6dbfe99&searchtype=a>.

- [15] ZEMÁNEK, R. *Fotovoltaika aneb získávání elektřiny ze Slunce* [online]. 2009 [cit. 2011-04-24]. Fotovoltaický článek. Dostupné z WWW: <<http://fotovoltaika.falconis.cz/fotovoltaika/fotovoltaicky-clanek.php>>.
- [16] *Český rozhlas Leonardo* [online]. 24. 6. 2010 [cit. 2011-04-24]. Účinné solární články. Dostupné z WWW: <http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/749383>.
- [17] HAVRÁNEK, M. *Aldebaran* [online]. 3. 8. 2007 [cit. 2011-04-24]. Organické polymery jako zdroj energie. Dostupné z WWW: <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php>. ISSN 1214-1674.
- [18] *Czech RE Agency* [online]. 2009 [cit. 2011-04-24]. Analýza životního cyklu fotovoltaických systémů. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/ziv-cyklus>>.
- [19] ČEZ [online]. [cit. 2011-04-24]. Křemík. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/zaj4.htm>>.
- [20] *DDwordl* [online]. 27. 3. 2007 [cit. 2011-04-24]. Křemíkové ingoty. Dostupné z WWW: <<http://www.ddworld.cz/blogy/hardware-a-it/pocitacove-x86-procesory-3-2.html>>.
- [21] *TZB info* [online]. 25. 9. 2006 [cit. 2011-04-24]. Solární články z krystalického křemíku. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>>.
- [22] *Info solární panely* [online]. [cit. 2011-04-24]. Výhody a nevýhody solárních panelů. Dostupné z WWW: <<http://www.info-solarni-panely.cz/vyhody-a-nevyhody.html>>.
- [23] ČEZ [online]. [cit. 2011-04-24]. Solární články. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>>.
- [24] KLIMEK, P. *Problémy a perspektivy fotovoltaiky. Energie 21*. 2008, 1, 4, s. 36-37. ISSN 1803-0394.
- [25] *Isofen energy* [online]. [cit. 2011-04-24]. Fotovoltaika v podmínkách České republiky. Dostupné z WWW: <<http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>>.
- [26] *ABCD energy* [online]. 2011 [cit. 2011-04-24]. Orientace fotovoltaického panelu. Dostupné z WWW: <<http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>>.
- [27] *Fotovoltaické články* [online]. 1998 [cit. 2008-11-05]. Dostupny z WWW: <knihovna.tul.cz/download/R00002-Fotovoltaicke%20clanky.doc>.
- [28] *Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie* [online]. 2009 [cit. 2008-11-27]. Dostupny z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>>.
- [29] ČEZ [online]. [cit. 2011-04-24]. Polovodiče. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>>.
- [30] *ZŠ Cheb* [online]. 2011 [cit. 2011-04-24]. Polovodiče. Dostupné z WWW: <<http://www.3zscheb.cz/oldweb/e-learning/fyzika%20web/polovodice/polovodice.htm>>.

- [31] *Czech RE Agency* [online]. 2009 [cit. 2011-04-24]. Fotovoltaika. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>
- [32] MCEVOY, R. L.; KRAUSE, S.; WU, P. In *Surface characterization of ethylene-vinyl acetate (EVA) and ethylene-acrylic acid (EAA) co-polymers using XPS and AFM* [online]. 3. 12. 1998 [cit. 2011-04-24]. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TXW-3V7HXYC-12&_user=10&_coverDate=10/31/1998&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1729092629&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=98830d73279d657003a8844928ffd675&searchtype=a>.
- [33] *Wikipedia* [online]. 20. 4. 2011 [cit. 2011-04-24]. Polyvinyl butyral. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_butyral>.
- [34] *DuPont* [online]. [cit. 2011-04-24]. Tedlar. Dostupné z WWW: <http://www2.dupont.com/Tedlar_PVF_Film/en_US/assets/downloads/pdf/h49725.pdf>.
- [35] KOCMAN, V. *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně 1971, s. 526.
- [36] KAZELLE, J., *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 273.
- [37] *Czech Nature Energy* [online]. 20. 4. 2011 [cit. 2011-04-24]. Konstrukce fotovoltaického panelu. Dostupné z WWW: <<http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>>.
- [38] *Svaz podnikatelů : pro využití energetických zdrojů* [online]. [cit. 2011-04-24]. Fotovoltaické elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://www.spvez.cz/pages/fotovoltaika.htm>>.
- [39] PRŮŽA, J. *Degradační testy funkčních vrstev solárních panelů s krystalickými Solárními články*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [40] ŠEVČÍK, R. *Degradační testy funkčních vrstev solárních panelů s krystalickými solárními články*, 2005.
- [41] ĎURIŠ, T. *Jednosměrné a striedavé elektrické meraia fotovoltaických článkov a modulov*. Bratislava, 2009. 173 s. Dizertační práce. Slovenská technická univerzita v Bratislavě.
- [42] DHERE, N. G.: *PV module durability in hot and dry climate, Proceedings of 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2000, str. 1-4.
- [43] KUDLÁČEK, I. *Degradační procesy I*. Praha: České vysoké učení technické v Praze 1994. 171 s.
- [44] POLSTEROVÁ H., *Spolehlivost v elektrotechnice*, Brno: Vysoké učení technické, 2003 s. 1-105. ISBN: ETE108.

- [45] SLÁDEK, P. *TZB - info* [online]. 31. 10. 2005 [cit. 2011-04-24]. 40 kWp fotovoltaický systém na Pedagogické fakultě Masarykovy univerzity v Brně. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/2815-40-kwp-fotovoltaicky-system-na-pedagogicke-fakulte-masarykovy-univerzity-v-brne>>.
- [46] GRÓFOVÁ, J. *Studium vybraných aspektů fotovoltaického systému*. Brno, 2009. 77 s. Diplomová práce. Masarykova univerzita.
- [47] MANDELBROT, B. B.: „*The Fractal Geometry of Nature*“, W. H. Freeman, New York; San Francisco, 1982, ISBN 0–7167–1186–9.