



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODEL TEPELNÉHO CHOVÁNÍ FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU

THERMAL BEHAVIOUR MODEL OF THE PHOTOVOLTAIC MODULE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Róbert Ludányi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Róbert Ludányi

ID: 164325

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Model tepelného chování fotovoltaického článku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod do problematiky fotovoltaických zdrojů energie
2. Provedení rešerše dané problematiky - přístupy matematického modelování fotovoltaického článku se zaměřením na parametr - teplota
3. Návrh matematického modelu popisující vývoj teploty fotovoltaického článku v čase
4. Vytvoření matematického modelu popisující teplotní chování fotovoltaického článku v programu PSCAD
5. Ověření platnosti vytvořeného modelu a provedení experimentů demonstrující vývoj teploty v čase během základních provozních stavů fotovoltaického článku
6. Zhodnocení dosažených výsledků

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít odborných článků databází IEEE, Web of Science, SCOPUS a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 5.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

LUDÁNYI, R. *Model tepelného chování fotovoltaického článku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D..

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Ptáčkovi Ph.D. za odbornú pomoc a usmernenie pri písaní tejto práce, za cenné rady a postrehy a v neposlednom rade za ochotu.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Model tepelného chování fotovoltaického článku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

.....

ABSTRAKT

Táto práca je zameraná na pozorovanie zmien chovania fotovoltaiického článku v čase vplyvom zmeny teploty. V úvode práce je popísane slnko ako základný zdroj energie pre fotovoltaiické systémy. Práca ďalej obsahuje vysvetlenia základných pojmov v oblasti fotovoltaiiky ako aj teoretický návrh pre výpočet tepelného chovania fotovoltaiického článku v čase. Výsledkom práce je fungujúci matematický model nasimulovaný v simulačnom programe PSCAD.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: fotovoltaiický článok, fotoelektrický jav, teplota, PSCAD

ABSTRACT

This thesis deals with the observation of changes in behavior of photovoltaic cell due to changes in temperature. In the beginning of the thesis is the description of sun as the primary source of energy for photovoltaic systems. The thesis also includes explanations of basic concepts in photovoltaic area and also a theoretical design for the calculations of thermal behaviour of photovoltaic cell in time. The result is a functional mathematical model, which is simulated in a simulation program PSCAD.

KEY WORDS: photovoltaic cell, photovoltaic effect, temperature, PSCAD

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV	7
ZOZNAM TABULIEK	8
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	9
1 ÚVOD	10
2 FOTOVOLTAIKA	11
2.1 SLNKO AKO ZÁKLADNÝ ZDROJ ENERGIE	11
2.2 HISTÓRIA	11
2.3 FOTOLEKTRICKÝ JAV	11
2.4 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNOK	12
2.5 VÝROBA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKOV	12
2.6 GENERAČNÝ VÝVOJ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKOV	14
2.6.1 FV ČLÁNKY 1. GENERÁCIE	14
2.6.2 FV ČLÁNKY 2. GENERÁCIE	14
2.6.3 FV ČLÁNKY 3. GENERÁCIE	15
2.7 DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE V OBLASTI FOTOVOLTAIKY	15
2.8 VÝHODY A NEVÝHODY FOTOVOLTAIKY	16
2.8.1 VÝHODY	16
2.8.2 NEVÝHODY	17
3 VPLYVY TEPLoty NA FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNOK	18
4 VÝPOČET ZMENY TEPLoty TEPLoty FV ČLÁNKU	20
4.1 VÝPOČET TEPELNEJ KAPACITY FV PANELU	20
4.2 VÝPOČET PRESTUPU TEPLA KRÁTKOVLNÝM ŽIARENÍM	20
4.3 VÝPOČET PRESTUPU TEPLA DLHOVLNNÝM ŽIARENÍM	21
4.4 VÝPOČET PRESTUPU TEPLA PRÚDENÍM	21
4.5 VÝPOČET CELKOVEJ VYROBENEJ ENERGIE	22
4.6 VÝSLEDNÝ TEORETICKÝ TEPELNÝ MODEL	22
5 REALIZÁCIA MODELU	23
5.1 SPRACOVANIE NAMERANÝCH VÝSLEDKOV	23
5.2 SIMULAČNÝ PROGRAM PSCAD	25
5.3 VÝSLEDKY SIMULÁCIE	28
6 ZÁVER	33
7 POUŽITÁ LITERATÚRA	34
ZOZNAM PRÍLOH	36

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obrázok 3-1 Zmena volta-ampérovej charakteristiky vplyvom zmeny teploty [15]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázok 3-2 Zmena výkonu FV článku vplyvom zmeny teploty[15].....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázok 5-1 Teplota FV panela v priebehu dňa.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázok 5-2 Teplota okolia v priebehu dňa.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázok 5-3 Intenzita žiarenia v horizontálnej rovine v priebehu dňa</i>	<i>24</i>
<i>Obrázok 5-4 Matematický tepelný model zostrojený v programe PSCAD</i>	<i>26</i>
<i>Obrázok 5-5 Prestup tepla dlhovlnným žiarením.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázok 5-6 Prestup tepla krátkovlnným žiarením.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázok 5-7 Celková vyrobená energia.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázok 5-8 Prestup tepla prúdením</i>	<i>27</i>
<i>Obrázok 5-9 Použité hodnoty pri simulácii.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázok 5-10 Porovnanie nasimulovaných a nameraných hodnôt teploty panela.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázok 5-11 Porovnanie nasimulovaných a nameraných hodnôt teploty panela pre rýchlosť vetra 5,76 m/s</i>	<i>29</i>
<i>Obrázok 5-12 Zmena priebehu teploty panela pri zmene hodnoty intenzity žiarenia.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázok 5-13 Zmena priebehu teploty panela pri zmene hodnoty teploty okolia.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázok 5-14 Zmena priebehu teploty panela pri zmene absorpcie.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázok 5-15 Zmena priebehu teploty panela pri zmene hrúbky čelného skla</i>	<i>32</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tabuľka 1 Výpočet kapacity FV panelu</i>	<i>23</i>
<i>Tabuľka 2 Vplyv zmeny hrúbky čelného skla na kapacitu FV panela.....</i>	<i>31</i>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

A	plocha panelu	m^2
C_{FF}	konštanta faktoru plnenia	$K.m^2$
C_{panel}	tepelná kapacita panelu	$J.K^{-1}$
C_m	merná tepelná kapacita	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
E	dopadajúce slnečné žiarenie	$W.m^{-2}$
E	energia	J
E_{max}	kinetická energia uvoľneného elektrónu	J
F	view faktor	-
I	prúd FV článku	A
L	dlhovlnné žiarenie emitované z povrchu	$W.m^{-2}$
P	výkon	W
$P_{výstup}$	vyrobený elektrický výkon	W
T	teplota	K
U	napätie FV článku	V
U_0	napätie naprázdno FV článku	V
W	väzbová energia elektrónu	W
c	rýchlosť svetla	$m.s^{-1}$
d_m	šírka vrstvy v panely	m
f	frekvencia	Hz
h	Planckova konštanta	J.s
h_c	súčiniteľ prestupu tepla	$W.m^{-2}.K^{-1}$
k_l	konštanta	$k_l=10^6 m^2.W^{-1}$
m	hmotnosť	kg
q_{dv}	prestup tepla dlhovlnným žiarením	$W.m^{-2}$
q_{kv}	prestup tepla krátkovlnným žiarením	$W.m^{-2}$
$q_{prúdenie}$	prestup tepla prúdením	$W.m^{-2}$
α	pohltivosť	-
ε	emisivita	-
ρ_m	hustota materiálu	$kg.m^{-3}$
λ	vlnová dĺžka	m
σ	Stefan-Blotzmanna konštanta	$W.m^{-2}.K^{-4}$
θ	teplota FV článku	$^{\circ}C$
Φ	dopadajúca energia	$W.m^{-2}$
1,31	konštanta úmery	$W.m^{-2}.K^{-3/2}$
EVA	ethylene-vinyl acetate	
FV	fotovoltaický	
USD	americký dolár	

1 ÚVOD

Fotovoltaické systémy sú pomerne novou technológiou získavania energie z obnoviteľných zdrojov. Energiu vyprodukovanú pomocou týchto systémov môžeme zaradiť medzi tzv. zelenú energiu, keďže v procese premeny energie svetla na elektrickú energiu nedochádza k produkcii žiadnych vedľajších látok. Fotovoltaické články sú prevažne vyrábané z kremíka, jednou z najlacnejších surovín na trhu, čo ich radí medzi veľmi lacné spôsoby výroby energie. Kvôli týmto vlastnostiam prebieha neustále experimentovanie a vyrábanie nových technológií v oblasti fotovoltaiiky, ktorá by mohla v budúcnosti nahradiť ostatné technológie a byť tak primárnym zdrojom elektrickej energie.

Cieľom práce je popísať funkciu fotovoltaiického článku, oboznámenie sa s materiálmi použitými na ich výrobu a dostupnými technológiami na trhu.

Práca ďalej zahŕňa informácie o vplyvoch teploty na fotovoltaiický článok a teoretické výpočty potrebné k výpočtu teploty článku a jej premeny v čase.

Súčasťou tejto práce je aj prehľad spracovaných hodnôt, ako aj výpočty, ktoré sú následne použité k realizácii daného matematického modelu. Matematický model bude realizovaný v simulačnom prostredí PSCAD.

Obsahom práce je aj grafické zdokumentovanie daného matematického modelu, jeho realizácia a následné vyhodnotenie a odôvodnenie získaných hodnôt, ktoré sú súčasťou výstupu simulácie programu PSCAD.

2 FOTOVOLTAIKA

2.1 Slnko ako základný zdroj energie

Jadrová fúzia alebo inak povedané spojovanie jadier vodíku za vzniku hélia a ďalších prvkov patrí medzi primárny zdroj energie v Slnku. Každú sekundu dochádza k premene okolo 600 miliónov ton vodíka na hélium. Keďže nastáva rozdiel hmotnosti pri výstupe hélia oproti hmotnosti vodíku pri vstupe do reakcie, je možné pomocou Einsteinovho vzťahu $E = m \cdot c^2$ prepočítať tento rozdiel na energiu. Priemerne sa teda uvoľní zhruba $3,8 \cdot 10^{26}$ J energie za sekundu. Energie zo slnka je na zemský povrch prenášaná pomocou svetla [1].

Svetlo je v podstate priečne elektromagnetické vlnenie, ktoré na to, aby sa šírilo nepotrebuje žiadne látkové prostredie, takže sa môže šíriť aj vákuom. Svetlo je charakterizované vlnovou dĺžkou, ktorú určíme zo vzťahu:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.1)$$

kde λ je vlnová dĺžka (m), f je frekvencia svetla (Hz) a c je rýchlosť svetla vo vákuu ($c=299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Ľudské oko vníma svetlo s vlnovou dĺžkou v rozmedzí 390 nm až 790 nm, čo je iba časť spektra, ktorá sa v skutočnosti pohybuje od vlnových dĺžok infračerveného až po ultrafialové žiarenie [2].

Medzi najzákladnejšie hľadiská, podľa ktorých môžeme svetlo charakterizovať patria fotometrické charakteristiky (svietivosť, svetelný tok ai.), kalorimetrické charakteristiky (frekvencia, farba), koherencia a polarizácia (uhol vlnenia) [3].

2.2 História

História fotovoltaiky začína objavením fotoelektrického javu a následným objavom javu fotovoltaiického. V roku 1839 odprezentoval Alexandre Edmond Becquerel poznatok prúdu meniaceho sa medzi kovovými elektródami, ktoré sú ponorené v kvapaline, v závislosti na intenzite osvetlenia. Neskôr v roku 1887 Heinrich Rudolf Hertz popísal ďalší vzťah medzi svetlom a elektrinou pomocou elektrického výboja vo vzduchu, ktorý vznikne ľahšie na elektródach pod dopadom ultrafialového žiarenia. Túto teóriu však nedokázal vysvetliť na základe vlnovej teórie svetla, a tak v roku 1905 Albert Einstein popísal teoreticky fyzikálny princíp fotoelektrického javu za pomoci kvantovej teórie, ktorú publikoval Max Karl Ernst Ludwig Planck[4].

Podľa kvantovej teórie nemôže byť energia elektromagnetického žiarenia ľubovoľná, pretože je kvantovaná, ale závisí na frekvencii žiarenia [5].

2.3 Fotoelektrický jav

Fotoelektrický jav alebo fotoefekt môžeme rozdeliť na vnútorný a vonkajší fotoelektrický jav. Jav, pri ktorom svetlo dopadajúce na polovodič generuje v polovodiči diery, pričom dochádza ku zväčšeniu vodivosti polovodiča nazývame vnútorný fotoelektrický jav. Pri tomto jave voľné elektróny vygenerované elektromagnetickým žiarením ostávajú vo vnútri polovodičovej

látky. V prípade, že elektróny vystupujú z polovodiča do okolia hovoríme o vonkajšom fotoelektrickom jave. Kinetickú energiu uvoľnených elektrónov môžeme určiť ako energiu fotónov zníženú o väzbovú energiu elektrónu, ktorý bol pôvodne viazaný v atóme:

$$E_{max} + W = h \cdot f, \quad (2.2)$$

kde E_{max} je maximálna kinetická energia uvoľneného elektrónu (J), W je väzbová energia elektrónu (J), h je Planckova konštanta ($h=6,62606896 \cdot 10^{-34}$ J.s = $4,13566733 \cdot 10^{-15}$ eV.s) a f je frekvencia žiarenia [6].

2.4 Fotovoltaický článok

Základný prvok pri premene svetelnej energie na energiu elektrickú. Jedná sa prakticky o polovodičovú diódu, ktorej základ tvorí krátka kremíková doštička s vodivosťou typu P, na ktorej sa pri procese výroby vytvorí tenká vrstva polovodiča typu N medzi ktorými je tzv. P-N prechod. Pri osvetlení článku dochádza v polovodiči k vzniku vnútorného fotoelektrického javu pričom sa začínajú uvoľňovať záporné elektróny z kryštalickej mriežky v polovodiči. Vzniknuté elektrické napätie na P-N prechode má pre kremíkové články hodnotu okolo 0,5 V. Ďalej v článku nastáva premena elektrickej energie z energie dopadajúceho svetla. Pri pripojení spotrebiča do obvodu sa začnú vyrovnávať kladné a záporne náboje a obvodom začína tiecť elektrický prúd. Pri potrebe väčšieho napätia alebo prúdu je potreba zostaviť fotovoltaické panely, ktoré vznikajú zapojením samostatných článkov paralelne alebo sériovo [7].

2.5 Výroba fotovoltaických článkov

Vlastnosti fotovoltaických článkov ale aj cena závisí na použitom výrobnom materiáli. Vlastnosti sú dané použitým materiálom a cena závisí na dostupnosti tohto materiálu na trhu. Čím vzácnejší je materiál potrebný k výrobe, tým bude aj cena článku drahšia. Preto väčšina fotovoltaických článkov je v dnešnej dobe vyrobená z kremíku, ktorý patrí k najpoužívanejším surovinám na svete. Medzi často používané materiály na výrobu fotovoltaických článkov patrí:

Monokryštalický kremík

Účinnosť fotovoltaických článkov, ktoré su vyrobené z monokryštalického kremíku je zhruba 16-19%. Monokryštalický kremík sa získava z kremíka, ktorý ako je spomenuté vyššie patrí medzi najpoužívanejšie suroviny na výrobu, takzvanou Czochralského metódou [8].

Polykryštalický kremík

Účinnosť týchto článkov nepresahuje hodnotu 11-15%. Nižšia účinnosť ako u monokryštalického kremíku je spôsobená tým, že proces výroby a tým pádom aj cena samotných článkov z polykryštalického kremíku je lacnejšia ako pri monokryštalických článkoch [8].

Multikryštalický kremík

Patrí medzi akúsi odrodu polykryštalického kremíku. Účinnosť článkov vyrobených z tejto suroviny nabera hodnoty 12-14% a ich cena je o dosť menšia ako pri monokryštalických. V dnešnej dobe sa pracuje na možnostiach zníženia strát, ktoré vznikajú pri prechode elektrónov medzi kryštálmi. Jednou takouto možnosťou je výroba multikryštalického kremíku s čo najväčšími kryštálmi. Taktiež je možné zvýšenie účinnosti týchto článkov pomocou chemických úprav [8].

Hydrogenizovaný amorfný kremík

Na rozdiel od ostatných troch kremíkov, ktoré sú spomenuté vyššie, sa jedná o materiál bez kryštalickej štruktúry, nie je príliš čistý a je chemicky upravený vodíkom. Hydrogenizovaný amorfný kremík je lacný a keďže absorbuje väčšinu energie slnečného žiarenia už vo vrstve tenšej ako 1 μm , na jeho výrobu nie je potrebné veľké množstvo materiálu. Ďalšou výhodou je fakt, že sa dokáže ľahko kombinovať s inými materiálmi, z ktorých sa neskôr získavajú zliatiny s rôznymi šírkami zakázaného pásma energií. Jeho nevýhodou však je, že fotovoltaické články vyrobené z tohto materiálu majú nízku účinnosť (4-8%) [9].

Arzenid gália

Druhý najpoužívanejší materiál na výrobu fotovoltaických článkov. Články z tohto materiálu dosahujú v priemere účinnosť 18%, lenže sú cenovo drahšie ako články z predchádzajúcich materiálov. Výhodou tohto materiálu je, že za zvýšenej teploty dochádza len k veľmi malému zníženiu účinnosti oproti kremíku. Ďalšou výhodou je, že nie je potreba použitia veľkých plôch ale stačí pomocou odrazov koncentrovať žiarenie na menšie plochy vďaka spomínanej prvej výhode. Medzi ďalšie výhody s určitosťou patrí jeho hustota, ktorá nám umožňuje výrobu tenších článkov zhruba o 60% bez toho aby sa znížila ich absorpcia. V kombinácii s hliníkom je možné zvýšenie účinnosti článkov na hodnotu až zhruba 41% [9].

Telurid kadmia

Vyrába sa chemickou reakciou kadmia a telúru a články vyrobené z tohto materiálu zaraďujeme do skupiny tenkovrstvých solárnych článkov CdTe. Je vkladaná veľká nádej do tohto materiálu, keďže jeho výskum prebieha krátko. Má vynikajúce absorpčné vlastnosti, čo umožňuje jeho výrobu vo veľmi tenkých vrstvách 1,2 μm až po 1,5 μm . Jeho výskyt v zemskej kôre je však veľmi malý [9].

Sulfid kademnatý

Používa sa predovšetkým v kozmickom inžinierstve vďaka svojej malej hmotnosti. Dosahuje účinnosť okolo 10% lenže do budúca sa kvôli jeho malej stabilite veľmi nepočíta [9].

2.6 Generačný vývoj fotovoltaických článkov

2.6.1 FV články 1. generácie

Táto generácia FV modulov je tvorená z monokryštalických a polykryštalických modulov, ktoré sú vyrábané prevažne z kremíku a majú odlišné vlastnosti, podľa ktorých sa určuje ich použitie. Spoločnou vlastnosťou, ktorou sa vyznačujú je, že sú vstavané do montážnych rámov montovaných pomocou ďalších konštrukčných dielov[10].

Bežná účinnosť monokryštalických článkov dosahuje hodnoty okolo 14- 15%, v špeciálnych podmienkach až 25%. Táto hodnota účinnosti sa odlišuje od hodnoty zo zdroja [8]. FV panely sa skladajú do tzv. „sendviča“, ktorý je poskladaný z bezpečnostného skla, fólie (EVA), sériovo-paralelne prepojených kremíkových článkov, znova fóliou (EVA) a nakoniec podkladového materiálu (TELDAR alebo TEZFEL). Neskôr sa pomocou tepelnej laminácie tento celok zataví do sendviča a zarámuje do vhodného rámu. Vývodné káble sú upevnené vo vhodnej skrinke na zadnej strane panelu alebo vyvedené voľne a ukončené špeciálnymi montážnymi rýchlokonektormi[10].

Účinnosť polykryštalických článkov sa pohybuje okolo 14%. Výrobná technológia je podobná výrobe monokryštalických článkov [10].

2.6.2 FV články 2. generácie

Túto generáciu článkov tvoria tenkovrstvé články na báze amorfného kremíku (a-Si), amorfných zliatin Si-Ge (a-Si-Ge), mikrokryštalického Si (μc-Si) alebo polykryštalického tenkovrstvého Si (poly-Si). Medzi výhodné vlastnosti týchto článkov patrí menšia spotreba materiálu (väčšinou kremíku), pružnosť, ohybnosť, taktiež sú tenšie a ľahšie.. Značnou nevýhodou je však ich stále menšia účinnosť premeny. Metódou tzv. a-Si Triple Junction je možné zlepšiť vlastnosti článku, napr. ako umožnenie vyššieho využitia spektra vlnových dĺžok slnečného žiarenia alebo zlepšenie jeho účinnosti. Článok o rozmeroch 240x340 mm je tvorený tromi nad sebou vákuovo nanesenými bunkami amorfného kremíku v troch P-I-N štruktúrach na podkladovú vrstvu z ušľachtilej ocele. Záporný spodný pól článku tvoriaci základnú fóliu vhodne upravenú plastickými poťahmi. Na tieto poťahy sa kontinuálne nanášajú jednotlivé P-I-N prechody. Kladný horný pól je prevedený z priehľadnej mriežky, vytvorenej z vlákien ušľachtilej ocele. Materiál na prevedenie P-N prechodu sa líši, kvôli docieleniu využitia celého spektra slnečného žiarenia. Jednotlivé prechody sú tvorené najprv zliatinou a-Si, druhý tvorí zliatina a-Si-Ge a tretí taktiež a-Si-Ge lenže s vyšším obsahom Ge. Vďaka tejto technológii sú tieto články schopné využívať rôzne zložky dopadajúceho svetla a dokážu pracovať aj pri difúznom svetle pri zamračenom počasí. Z meraní v oblasti strednej Európy s danou priemernou oblačnosťou je účinnosť týchto článkov vyššia až o 20-35% oproti kryštalickým systémom. Fotovoltaické moduly tohto typu fungujú na rozpälených strechách oveľa lepšie ako kryštalické panely vďaka ich asi polovičnému teplotnému koeficientu fotoelektrického napätia oproti kryštalickým modulom [10].

2.6.3 FV články 3. Generácie

FV články 3. generácie sú pokusom o revolúciu v oblasti fotovoltaiky, ktorej cieľom je zmaximalizovať absorbovanie fotónov s následným generovaním párov elektrón-diera a využívanie energie dopadajúceho žiarenia na maximum. Výskumy tretej generácie sa venujú hlavne:

- viacvrstvom solárnym článkom
- článkom s viacnásobnými pásmi
- článkom, ktoré by využívali „horké“ nosiče náboja pre generáciu viacerých párov elektrón-diera
- termovoltaickej premene, kde absorbér súčasne aj vyžaruje energiu
- termofonickej premene, pri ktorej je absorbér nahradený elektroluminiscenciou
- článkom, ktoré využívajú kvantové javy v kvantových bodoch alebo jamách
- priestorovým štrukturovaným článkom vznikajúcim samoorganizáciou pri raste aktívnej vrstvy
- organickým článkom

Zatiaľ najvhodnejším článkom 3. generácie je článok z viacerých solárnych vrstiev, ktorý pracuje na podobnom princípe ako články 2. generácie, kde každá vrstva absorbuje určitú časť žiarenia [11].

2.7 Dostupné technológie v oblasti fotovoltaiky

Existuje mnoho kritérií, podľa ktorých sa môžu porovnávať najdostupnejšie technológie, ktoré sa vyskytujú na trhu fotovoltaiky. Dôležitým bodom, ktorý je potrebné uviesť je fakt, že fotovoltaické články s najväčšou účinnosťou nie sú vhodné pre naše klimatické pásmo. Na rozdiel od oblasti, pre ktoré je charakteristický malý počet mračien (napríklad púšte), by fotovoltaické články v našej oblasti využívali zhruba polovicu dopadajúceho žiarenia.

Najúčinnejšie panely

Tieto panely sú vyrábané z monokryštalického kremíku od americkej firmy SunPower a sú jediným typom panelov, ktorých účinnosť dosahuje hodnotu 20%. Každý článok, z ktorého je panel zložený dosahuje účinnosť zhruba 22% ale panel, ktorého celková účinnosť by bola 22% zatiaľ nebol vyrobený. Farba článkov a aj celého panelu je čierna s kontaktmi na zadnej strane plochy.

Najlepší pomer účinnosť/cena

Tento pomer dosahujú články vyrábané z multikryštalického kremíku. Momentálne patria medzi najrozšírenejšie na trhu. Ich účinnosť sa pohybuje okolo 15% (v priemyselnej výrobe preskočila účinnosť hodnotu 17%).

Najlacnejšie panely

Najlacnejšími panelmi v súčasnosti sú tenkovrstvé fotovoltaické panely. Ich výrobná cena je menšia ako 1 USD za Watt-peak. Účinnosť týchto panelov je polovičná oproti kryštalickým panelom, niekedy sa pohybuje hlboko pod 10%.

Najpomalšia degenerácia

Patria sem panely vyrobené z monokryštalických článkov. Ich priemerný pokles výkonu za rok bol v praxi potvrdený, že je menší ako garantujú výrobcovia (0,8%/rok). Pri tenkovrstvých paneloch sa udáva tzv. stabilizovaná účinnosť pretože v prvom roku života týchto panelov ich účinnosť prudko klesne a následne sa stáli na hodnotu poklesu účinnosti kryštalických panelov.

Najdlhšia životnosť

Panely s najdlhšou životnosťou zatiaľ nie je možné určiť, keďže najstaršie významnejšie realizácie sú len 25 rokov staré. Do budúcnosti sa však predpokladá s oveľa vyššími hodnotami životností.

Najlepšia energetická návratnosť

Toto kritérium predstavujú tenkovrstvé panely, ktorých energetická návratnosť sa v týchto oblastiach pohybuje okolo 2 rokov. U kryštalických paneloch je to zhruba 3 roky ale tento údaj sa neustále znižuje. V iných oblastiach ako napríklad na juhu Európy je energetická návratnosť menšia ako 1 rok [12].

2.8 Výhody a nevýhody fotovoltaiky

2.8.1 Výhody

Palivo zdarma

Na rozdiel od ostatných spôsobov výroby elektrickej energie fotovoltaika využíva energiu slnka, ktorú premieňa na elektrickú energiu, čo ju radí medzi zdroje energie, ktoré budeme môcť využívať až do konca sveta.

Neprodukuje hluk, zelená energia

Keďže fotovoltaika využíva čisto len energiu slnka na výrobu energie, nedochádza v procese výroby k žiadnemu uvoľňovaniu škodlivých látok do okolia. Navyše sa väčšina článkov vyrába z kremíku, ktorý nemá toxické účinky.

Bezpečnosť a vysoká spoľahlivosť

Životnosť fotovoltaických panelov ako som už spomínal vyššie zatiaľ nedokážeme presne určiť ale predpokladá sa u nich životnosť väčšia ako 30 rokov a výrobcovia garantujú, že pokles výkonu panelov po 25 rokoch neklesne pod 80%. Tieto body definujú fotovoltaiku ako spoľahlivý zdroj elektrickej energie v dlhodobom časovom období.

Recyklovateľnosť, nízka údržba

Väčšina materiálov, využitých pri procese výroby môže byť znova využitá k ďalším účelom. Taktiež môžeme recykláciou znížiť množstvo energie a cenu potrebnú k výrobe. Inštalácia týchto panelov je veľmi jednoduchá a ich údržba je takmer nulová.

Energetická návratnosť

Vďaka veľkej dobe životnosti a pomerne vysokej energetickej návratnosti (1-3 roky) patrí fotovoltaika k ekonomicky výhodným zdrojom energie [13].

2.8.2 Nevýhody

Geologická lokácia

Už vyššie je spomenuté, že intenzita v týchto oblastiach Európy nie je taká veľká ako intenzita žiarenia v oblastiach s minimálnymi hodnotami oblačnosti ako napríklad v púšti. Preto je možné využiť oproti týmto oblastiam iba polovicu dopadajúceho žiarenia a je nutné využívať okrem fotovoltického zdroja aj doplnkový náhradný zdroj.

Obmedzená doba využitia

Fotovoltické panely využívajú slnečnú energiu, čo znamená, že v noci a v dni s neideálnymi poveternostnými podmienkami sú prakticky nevyužiteľné a hodnota energie vyrobenej v noci je zanedbateľná.

Úpravy objektu pri inštalácii

Pri inštalácii fotovoltických panelov je nutné previezť úpravy na objekte, kde je plánované panely inštalovať. Toto spôsobuje veľkú počiatočnú investíciu do solárnej energie.

Degradácia

Aj keď je degradácia spomenutá vo výhodách a že účinnosti neklesnú za 25 rokov pod 80%, nemôže byť úplne ignorovaná. Znižovanie účinnosti fotovoltických článkov spôsobuje znižovanie výkonu fotovoltického panelu, čo znamená menší dodatok energie [14].

3 VPLYVY TEPLoty NA FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNOK

Teplota veľkou časťou ovplyvňuje polohu pracovného bodu FV článku. Pri nedostatočnom chladení FV článku alebo pri dlhšom pôsobení intenzity slnečného žiarenia na článok sa môže teplota povrchu FV článku pri teplote vzduchu 40 °C vyšplhať až na 80 °C. Takýto nárast teploty značne ovplyvňuje elektrické vlastnosti FV článku a nastáva pokles svorkového napätia článku na jeho zaťažovacej charakteristike. Pokles tohto napätia znamená pokles dodávaného výkonu do záťaže. Táto zmena nastáva pri vysokej slnečnej intenzite, čo znamená že výkon FV článku je výrazne vyšší v zime ako v lete. Zmenu výkonu FV článku môžeme vyjadriť vzťahom [15]:

$$\frac{dP}{d\theta} \cong \frac{\Delta P}{\Delta\theta} = -0,4 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}, \quad (3.1)$$

kde ΔP je zmena výkonu na svorkách FV článku (W) a $\Delta\theta$ je zmena teploty FV článku (°C). Z tohto vzťahu vyplýva, že pri zmene teploty o 2,5 °C sa výkon zmení o 1%. Typický rozsah teplôt pre skladovanie prácu s FV článkom býva od -35 °C do +85 °C.

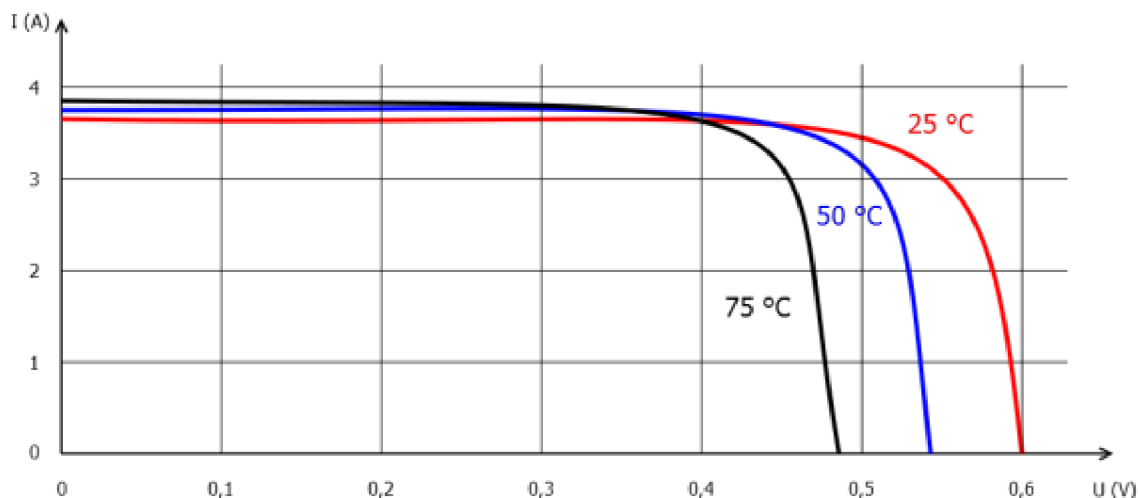
Najväčšiu zmenu pri zmene teploty je možné pozorovať na hodnote napätia naprázdno U_0 . Podľa teoretických predpokladov dochádza k zmene o 0,4 % na každú zmenu teploty o 1 °C.

Zmena výkonu v (3.1) je spôsobená zmenou napätia a prúdu FV článku. Vzťah (3.1) je teda možné vyjadriť po dosadení týchto hodnôt aj ako [15]:

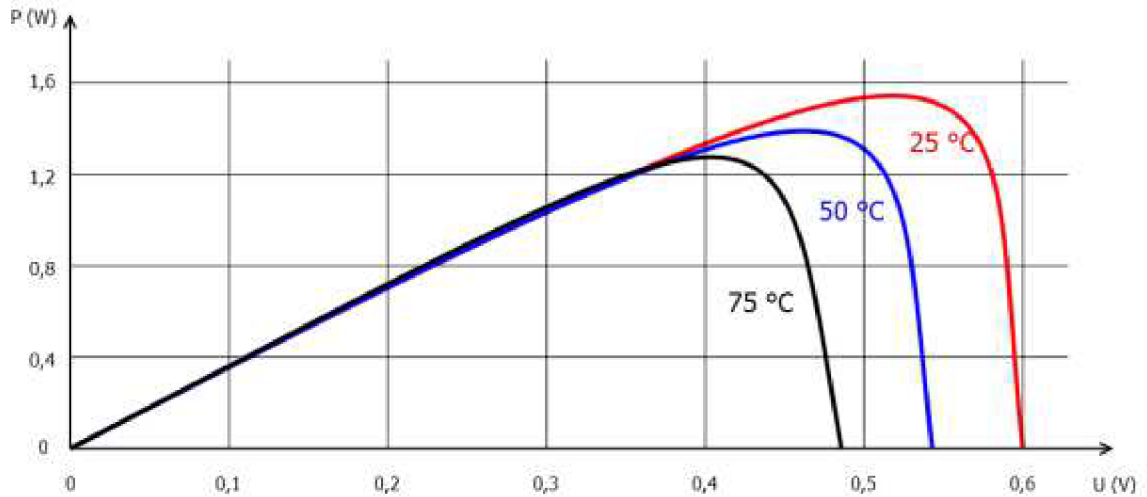
$$\frac{dP}{d\theta} \cong \frac{\Delta P}{\Delta\theta} = \frac{\Delta U \cdot \Delta I}{\Delta\theta}, \quad (3.2)$$

kde ΔU je zmena napätia FV článku (V) a ΔI je zmena prúdu FV článku (A).

Zo vzťahov 3.1 a 3.2 teda vyplýva, že na zmene výkonu FV článku v závislosti na teplote najviac vplyva zmena jeho napätia keďže zmena hodnoty jeho prúdu je zanedbateľná v dôsledku veľmi malých zmien [15].



Obrázok 3-1 Zmena volta-ampérovej charakteristiky vplyvom zmeny teploty [15]



Obrázok 3-2 Zmena výkonu FV článku vplyvom zmeny teploty[15]

Na obrázkoch 3-1 a 3-2 je znázornená zmena V-A charakteristiky a zmena výkonu FV článku v závislosti na teplote.

4 VÝPOČET ZMENY TEPLoty TEPLoty FV ČLÁNKU

Podľa zdroja [16] teplota FV panelu závisí na rôznych fyzikálnych veličinách fotovoltaického panelu, na jeho konfigurácii do modulu, na daných poveternostných podmienkach a takisto aj na okolí prostredia. Je to súčet energetických vstupov a výstupov cez tepelnú radiáciu, vedenie a prúdenie tepla a vyrobenej elektrickej energie. Kvôli zmenám intenzity slnečného žiarenia v čase sa nemôže teplota FV panelu merať v časovom intervale. Preto sa v týchto intervaloch počíta s mernou tepelnou kapacitou C_{FV} FV panelu, ktorá ma veľký význam pri výpočtoch teploty. Činitele prúdenia a radiácie z prednej a zadnej časti panelu sú najvýznamnejšie pri prestupe tepla. Pre malú styčnú plochu panelu a nosnej konštrukcie sa zanedbáva prestup tepla medzi týmito plochami výsledná zmenu teploty v čase môže byť vyjadrená pomocou rovnice:

$$C_{panel} \frac{dT_{panel}}{dT} = q_{dv} + q_{kv} + q_{prúdenie} - P_{výstup}, \quad (4.1)$$

kde C_{panel} je celková tepelná kapacita panelu ($J.K^{-1}$), q_{dv} je prestup tepla v dôsledku dlhovlnného žiarenia ($W.m^{-2}$), q_{kv} je prestup tepla v dôsledku krátko vlnného žiarenia ($W.m^{-2}$), $q_{prúdenie}$ je prestup tepla prúdením ($W.m^{-2}$) a $P_{výstup}$ je vyrobený elektrický výkon (W).

Pre vyriešenie rovnice je potrebné vyjadriť jednotlivé činitele obsiahnuté v rovnici:

4.1 Výpočet tepelnej kapacity FV panelu

Pri výpočte povrchovej teploty FV panelu je potrebné vo výpočtoch zahrnúť 3 vrstvy materiálu: vrstva materiálu, z ktorého je FV článok vyrobený (napr. monokryštalický kremík), vrstva na polyesérovom/teplárovom trilamináte a čelný povrch článku, ktorý tvorí sklo. Uvažuje sa s rovnomernou teplotou pre všetky vrstvy FV panelu. Pri výpočte sa zanedbáva rám panelu kvôli jeho malej ploche. Celková tepelná kapacita je teda výsledkom súčtu všetkých tepelných kapacít jednotlivých vrstiev:

$$C_{panel} = \sum_m A \cdot d_m \cdot \rho_m \cdot C_m, \quad (4.2)$$

kde A je plocha panelu (m^2), d_m je šírka vrstvy v panely (m), ρ_m je hustota materiálu ($kg.m^{-3}$) a C_m je merná tepelná kapacita daného materiálu ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$) [16].

4.2 Výpočet prestupu tepla krátkovlnným žiarením

Žiarenie dopadajúce na povrch FV panelu je funkciou intenzity priameho a rozptýleného krátkovlnného žiarenia takisto aj pohltivosti FV článku. Celková vstupná hodnota krátkovlnného žiarenia je teda vyjadrená ako:

$$q_{kv} = \alpha \cdot \Phi \cdot A, \quad (4.3)$$

kde α je pohltivosť povrchu FV článku a Φ je celková dopadajúca energia na plochu panelu ($W.m^{-2}$) [16].

Pohltivosť α alebo aj absorpcia je predávanie energie fotónov dopadajúcich na povrch časticiam materiálu povrchu. Pri absorpcii dochádza k zvyšovaniu strednej kinetickej energii týchto častíc, čo znamená aj nárast teploty [17].

4.3 Výpočet prestupu tepla dlhovlnným žiarením

Pomocou Stefan-Boltzmannovho zákona môžeme vyjadriť hodnotu dlhovlnného elektromagnetického žiarenia na jednotku plochy:

$$q_{dv} = A \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4, \quad (4.4)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konštanta ($\sigma=5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) a ε je emisivita povrchu.

Celkovú výmenu dlhovlnného žiarenia medzi dvoma povrchmi x a y vyjadríme ako:

$$q_{dv,xy} = A_x \cdot F_{xy} \cdot (L_x - L_y) = A_y \cdot F_{yx} \cdot (L_y - L_x), \quad (4.5)$$

kde F je view faktor a L predstavuje dlhovlnné žiarenie emitované z povrchu na jednotku plochy ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Pre zjednodušenie rovnice sa uvažuje o rovnakej alebo blízkej teplote zadnej časti panelu a povrchu, na ktorom je panel umiestnený, aby sa zanedbala výmena medzi týmito dvoma povrchmi. Pre výpočet prestupu tepla dlhovlnným žiarením je teda potrebné vypočítať iba dlhovlnnú výmenu z predného povrchu panelu.

View faktor predstavuje zlomok žiarenia, ktoré opustí jeden povrch a vstupuje do druhého. Hodnota view faktoru pre naklonenie povrchu panela od vodorovnej roviny pod uhlom β je $F=(1+\cos(\beta))/2$ pre oblohu a $F=(1-\cos(\beta))/2$ pre horizontálny povrch zeme. Dosadením týchto dvoch rovníc a priložením koeficientov pre oblohu, povrch zeme a FV panelu sa celková výmena na povrchu panelu vyjadří ako:

$$q_{dv} = A \cdot \sigma \cdot \left(\frac{(1 + \cos\beta)}{2} \cdot \varepsilon_{obloha} \cdot T_{obloha}^4 + \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \cdot \varepsilon_{zem} \cdot T_{zem}^4 - \varepsilon_{panel} \cdot T_{panel}^4 \right), \quad (4.6)$$

kde podľa zdroja [15] sú hodnoty parametrov v rovnici nasledujúce: $\varepsilon_{obloha}=0,95$ pre jasnú oblohu a 1 pre zatiahnutú oblohu, $\varepsilon_{zem}=0,95$, $\varepsilon_{panel}=0,9$, $T_{obloha}=(T_{okolie}-\delta T)$ pre jasnú oblohu pričom $\delta T=20$ K a $T_{obloha}=T_{okolie}$ pre zaťaženú oblohu [16].

4.4 Výpočet prestupu tepla prúdením

Pre FV panel sa celková výmena energie prúdením vyjadří ako priama úmera teplotnej zmeny medzi povrchom panelu a okolným prostredím:

$$q_{prúdenie} = -h_c \cdot A \cdot (T_{panel} - T_{okolie}), \quad (4.7)$$

kde h_c vyjadruje hodnotu súčiniteľa prestupu tepla prúdením ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Jeho hodnota je závislá na konkrétnej fyzikálnej situácii.

Prúdenie je kombináciou voľných a nútených efektov. Pri pokojných dňoch je prevládajúcou zložkou voľné prúdenie na zadnej strane panelov a ak je predná strana vystavená vetru, tak prevládajúcou zložkou je nútené prúdenie. Pre voľné chladenie (prevažne turbulentné) chladenie sa uvažuje súčiniteľ prestupu tepla úmerný k danej mocnine rozdielu teplôt medzi panelom a vzduchom. Výpočet súčiniteľa voľného prúdenia FV panelu z vertikálnej plochy do vzduchu sa potom vypočíta ako:

$$h_c = 1,31 \cdot (T_{panel} - T_{okolie})^{\frac{1}{3}}, \quad (4.8)$$

kde 1,31 vyjadruje konštantu úmery ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-3/2}$).

Priemerný súčiniteľ prestupu tepla pre typické dni je daný ako súčet núteného prúdenia z prednej strany panelu $h_{c,n1}$ a núteného prúdenia na zadnej strane panela $h_{c,n2}$. Výsledný vzťah pre výpočet prestupu tepla prúdením má tvar [16]:

$$q_{prúdenie} = -(h_{c,n1} + h_{c,n2}) \cdot A \cdot (T_{panel} - T_{okolie}) \quad (4.9)$$

4.5 Výpočet celkovej vyrobenej energie

Vyrobená energia sa môže popísať pomocou tzv. faktoru plnenia FF a vyjadríme ju ako:

$$P_{out} = C_{FF} \cdot \frac{E \cdot \ln(k_1 \cdot E)}{T_{panel}}, \quad (4.10)$$

kde C_{FF} predstavuje konštantu faktoru plnenia ($\text{K} \cdot \text{m}^2$), E je hodnota dopadajúceho slnečného žiarenia ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) a k_1 je konštanta ($k_1 = 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$) [16].

4.6 Výsledný teoretický tepelný model

Po dosadení rovníc (4.2), (4.3), (4.6), (4.9) a (4.10) do rovnice (4.1) je možné vyjadriť vzťah pre zmenu teploty FV panelu v čase:

$$C_{panel} \cdot \frac{dT_{panel}}{dt} = \sigma \cdot A \cdot (\varepsilon_{obloha} \cdot (T_{okolie} - \delta T)^4 - \varepsilon_{panel} T_{panel}^4) + \alpha \cdot \Phi \cdot A - C_{FF} \cdot \frac{E \cdot \ln(k_1 \cdot E)}{T_{panel}} - (h_{c,n1} + h_{c,n2}) \cdot A \cdot (T_{panel} - T_{okolie}) \quad (4.11)$$

5 REALIZÁCIA MODELU

Nasledujúca kapitola obsahuje údaje potrebné k zhotoveniu a prevedeniu tepelného modelu, spracované údaje, ktoré získané z výstupu zostrojeného modelu ako aj grafická ukážka finálneho modelu.

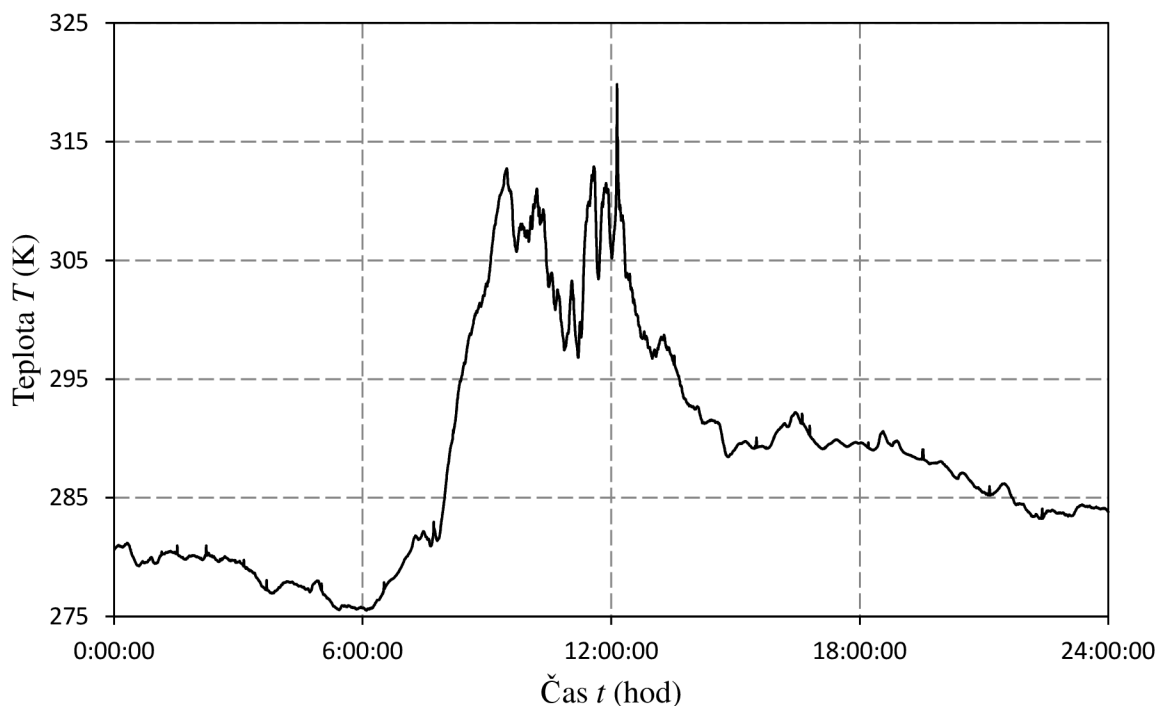
5.1 Spracovanie nameraných výsledkov

V tabuľke 1 je prehľad charakteristických veličín potrebných pre výpočet kapacity C danej vrstvy a celková výsledná kapacita FV panelu podľa (4.2). Pri výpočte sa uvažovalo s plochou FV panelu $1,46016 \text{ m}^2$, pričom plocha rámu bola zanedbaná.

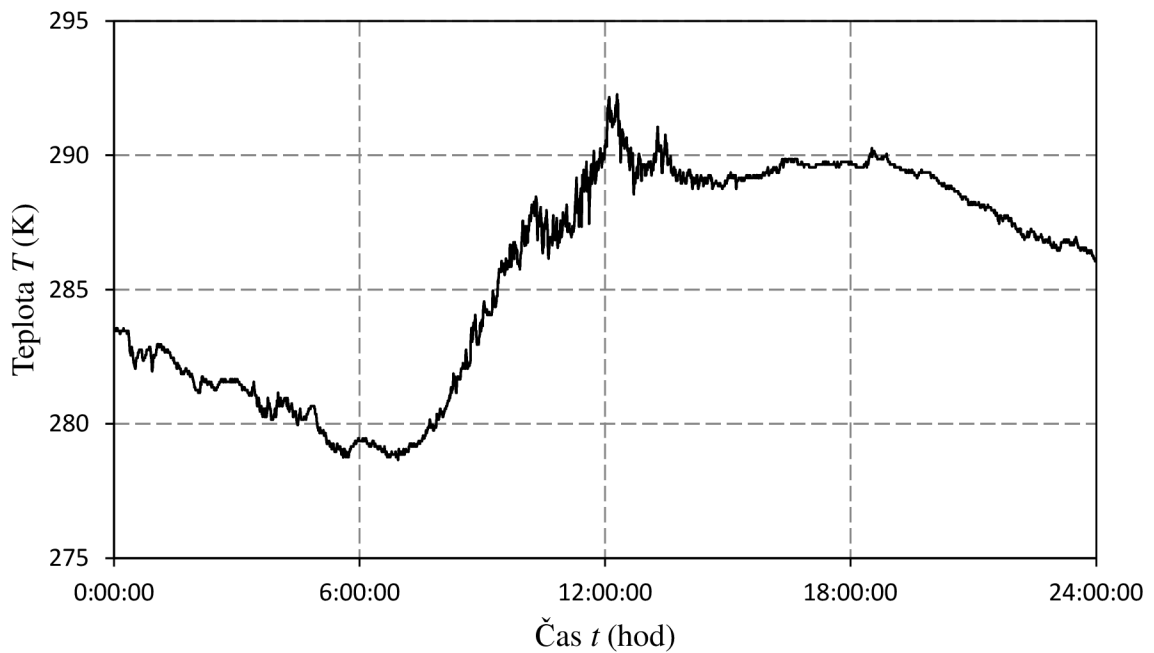
Tabuľka 1 Výpočet kapacity FV panelu

VRSTVA	C_m [J/Kg.K]	ρ [kg/m ³]	d [m]	C [J/K]
Monokryštalický FV panel	2329	677	$0,3 \cdot 10^{-3}$	691
Polyester Tedlar Trilaminát	1200	1250	$0,5 \cdot 10^{-3}$	1095
Čelné sklo	3000	500	$3,2 \cdot 10^{-3}$	7008
Spolu				8794

Na obrázku 5-1 je znázornený priebeh teploty FV panela v priebehu dňa a obrázok 5-2 zobrazuje priebeh teploty okolia v priebehu dňa. Teplota bola meraná tepelným čidlom PT100, ktoré bolo pripevnené na zadnej časti FV panelu. Výsledky merania boli zaznamenávané datalogerom LOGBOX SD od spoločnosti Kipp & Zonen.

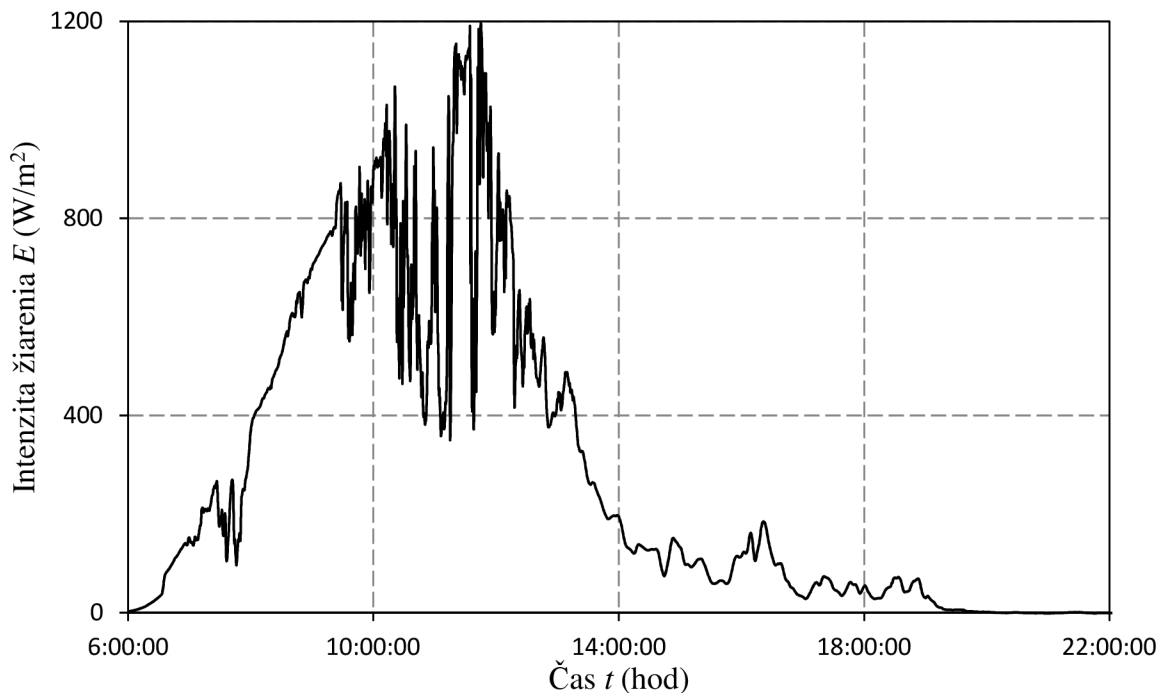


Obrázok 5-1 Teplota FV panela v priebehu dňa



Obrázok 5-2 Teplota okolia v priebehu dňa

Na obrázku 5-3 sú znázornené namerané hodnoty intenzity žiarenia v priebehu dňa. Dokopy boli namerané 2 rôzne hodnoty intenzity žiarenia (v rovine panelu a v horizontálnej rovine). Daný obrázok znázorňuje hodnoty intenzity nameranej v rovine panela, ktoré boli neskôr použité pri simulácii v PSCADe. Na meranie intenzity bol použitý pyranometer CMP21 od spoločnosti Kipp & Zonen.



Obrázok 5-3 Intenzita žiarenia v horizontálnej rovine v priebehu dňa

Všetky hodnoty zobrazené v obrázkoch 5-1, 5-2, 5-3 boli namerané dňa 15.4.2016. Hodnoty boli zaznamenávané dataloggerom v 30 sekundových intervaloch. Meracie prístroje boli umiestnené na streche školy VUT budovy T12 v Brne. Kompletne meracie stanovisko je možné vidieť v prílohách A a B.

5.2 Simulačný program PSCAD

PSCAD (Power System Computer Aided Design) je výkonné a flexibilné grafické užívateľské rozhranie slúžiace k simulácii elektrizačných sústav. Je známe aj pod názvom PSCAD/EMTDC, pretože základ programu tvorí EMTDC (Electromagnetic Transients including DC) – elektromagnetické prechodné javy zahŕňajúce DC prúd [18].

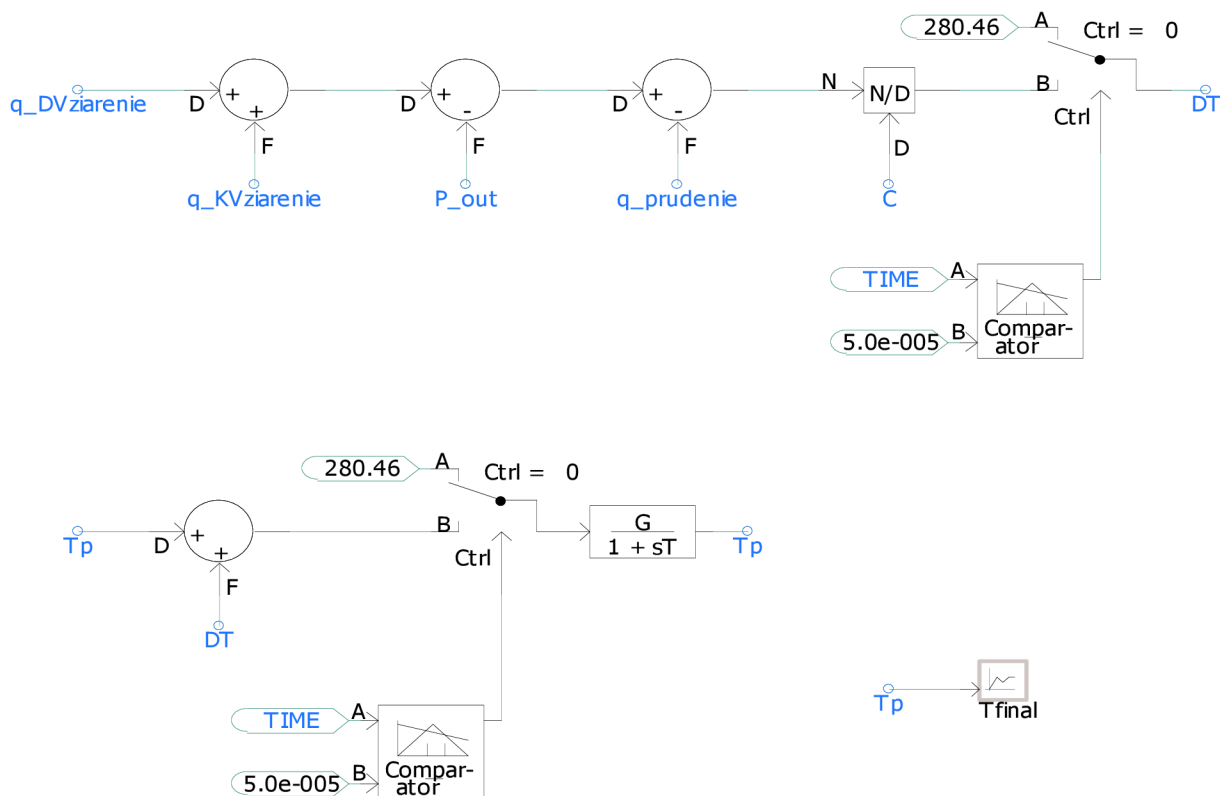
PSCAD umožňuje používateľovi schématicky skonštruovať obvod, spustiť simuláciu, analyzovať a spracovať údaje v plne integrovanom grafickom prostredí. V programe je zahrnuté aj online vykresľovanie funkcií, ovládacie prvky a merače, čo používateľovi umožňuje meniť systémové parametre priamo počas simulácie a tým pádom pozorovať zmeny zároveň s prebiehajúcou simuláciou [18].

Užívateľské spektrum PSCADu zahŕňa inžinierov a vedcov výroby, armády, výskumu a akademických inštitúcií. Používa sa pri plánovaní, projektovaní, uvádzaní do chodu ako aj pri vzdelávaní a výskume. Nasledujúci zoznam obsahuje príklady štúdií, pri ktorých bol použitý program PSCAD:

- Štúdiá striedavých sietí skladajúcich sa z rotačných strojov, budičov, generátorov, turbín, transformátorov, vedenia, káblov a záťaží
- Koordinácia relé
- Účinky transformátorovej saturácie
- Koordinácia izolácie transformátorov, ističov a bleskoistiek
- Impulzné skúšky transformátorov
- Vyhodnocovanie filtrov a harmonickej analýzy
- Návrh riadiaceho systému
- Optimálny návrh parametrov regulátoru
- Výskum nových obvodov a koncepcia riadenia
- Úder blesku, poruchy alebo vypínacie operácie
- Elektrické lodné konštrukcie plavidiel

Program PSCAD prichádza kompletne aj s knihovňou s predprogramovanými a otestovanými simulačnými modelmi od jednoduchých pasívnych elementov až po viac komplexné modely ako napríklad elektrické stroje alebo prenosové vedenia [18].

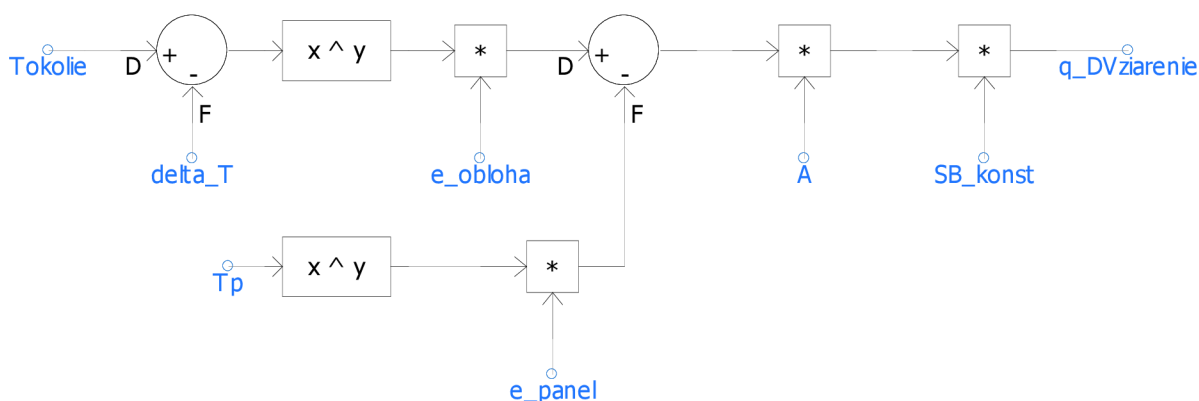
PSCAD a jeho simulačné jadro má za sebou takmer 30 rokov vývoja inšpirovaného nápadmi a návrhmi jeho čoraz sa zväčšujúcou celosvetovou užívateľskou komunitou. Táto filozofia vývoja pomohla vytvoriť PSCAD ako jeden z najsilnejších programovacích balíčkov CAD pre simuláciu v elektrotechnickom a elektroenergetickom obore [18].



Obrázok 5-4 Matematický tepelný model zostrojený v programe PSCAD

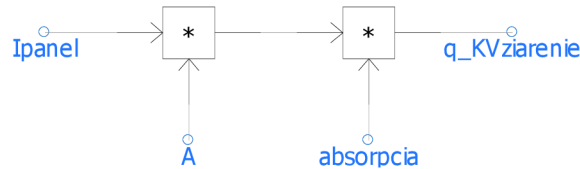
Na obrázku 5-4 je znázornený hotový model zostrojený v simulačnom prostredí PSCAD podľa rovnice 4.1). $q_{DV} \text{žiarenie}$ predstavuje prestup tepla dlhovlnným žiarením, $q_{KV} \text{žiarenie}$ predstavuje prestup tepla krátkovlnným žiarením, P_{out} predstavuje celkovú vyrobenú energiu, $q_{prudenie}$ predstavuje prestup tepla prúdením a C je celková tepelná kapacita panel, ktorá je vypočítaná v tabuľke 1.

Keďže sa jedná o diferenciálnu rovnicu počítanú pomocou Eulerovej metódy je potrebné určiť počiatočnú teplotu, od ktorej sa bude ďalej vyvíjať priebeh tejto simulácie. V našom prípade sme použili prvú nameranú hodnotu v daný deň, čo predstavuje 280,46 K. Pomocou Eulerovej metódy získame hodnotu DT , o ktorú sa teplota panela zmení. Túto hodnotu je ešte potrebné pripočítať k teplote panela T_p . Komponent *Comparator* slúži k prepnutiu nami zadaných počiatkových hodnôt teploty na novo vypočítanú teplotu, aby sa zabránilo tomu, že hodnota DT sa bude pripočítavať k tej jednej a tej istej hodnote.



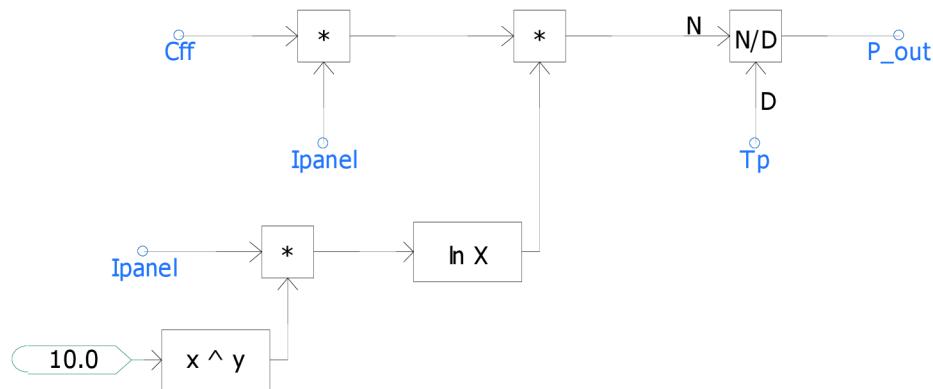
Obrázok 5-5 Prestup tepla dlhovlnným žiarením

Na obrázku 5-5 je graficky znázornená zjednodušená rovnica 4.6. Hodnoty e_{obloha} a e_{panel} predstavujú hodnoty emisivity oblohy, resp. panela. SB_{konst} predstavuje Stefan-Blotzmannovu konštantu. Kvôli obmedzenej knižnici programu PSCAD nie je možné priradiť správne znaky k daným veličinám.



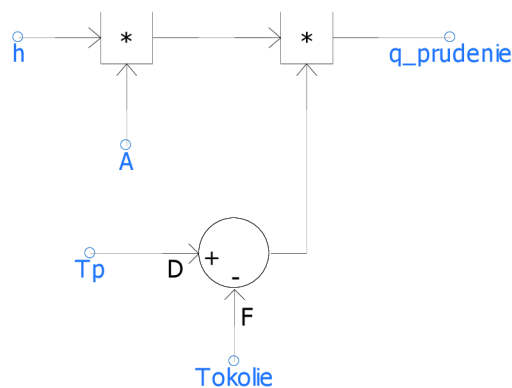
Obrázok 5-6 Prestup tepla krátkovlnným žiarením

Obrázok 5-6 predstavuje vypracovanú rovnicu 4.3. V simulácii bola použitá hodnota absorpcie 0,7 z dôvodu neposkytnutia danej absorpcie panelu výrobcom v data sheete. Použitá hodnota bola použitá so zdroju [16], v ktorom ju autor udáva pre podobný model.



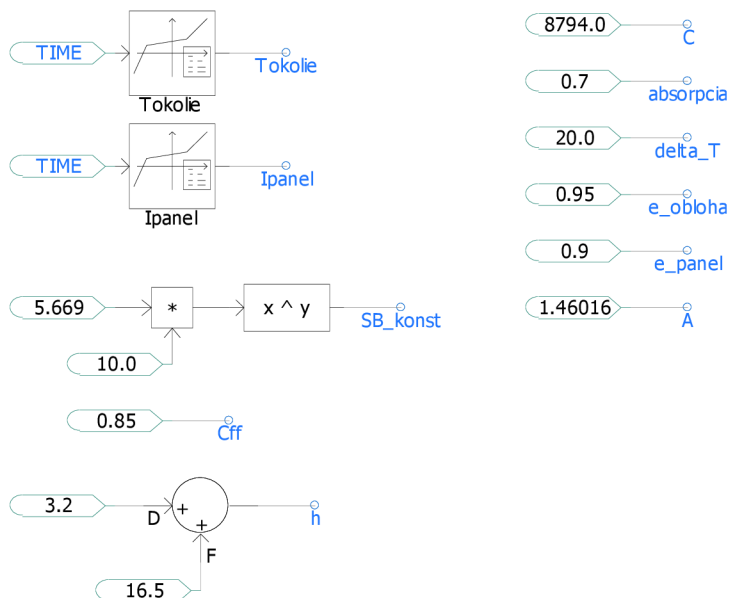
Obrázok 5-7 Celková vyrobená energia

Rovnica 4.10 je zobrazená na obrázku 5-7. Konštanta faktoru plnenia C_{ff} je definovaná ako podiel dostupnej energie z panela pri maximálnom výkone ku súčinu napätia naprázdno a skratového prúdu. Pri simulácii bola použitá hodnota 0,82, ktorú výrobca udáva ako výkonnú záruku.



Obrázok 5-8 Prestup tepla prúdením

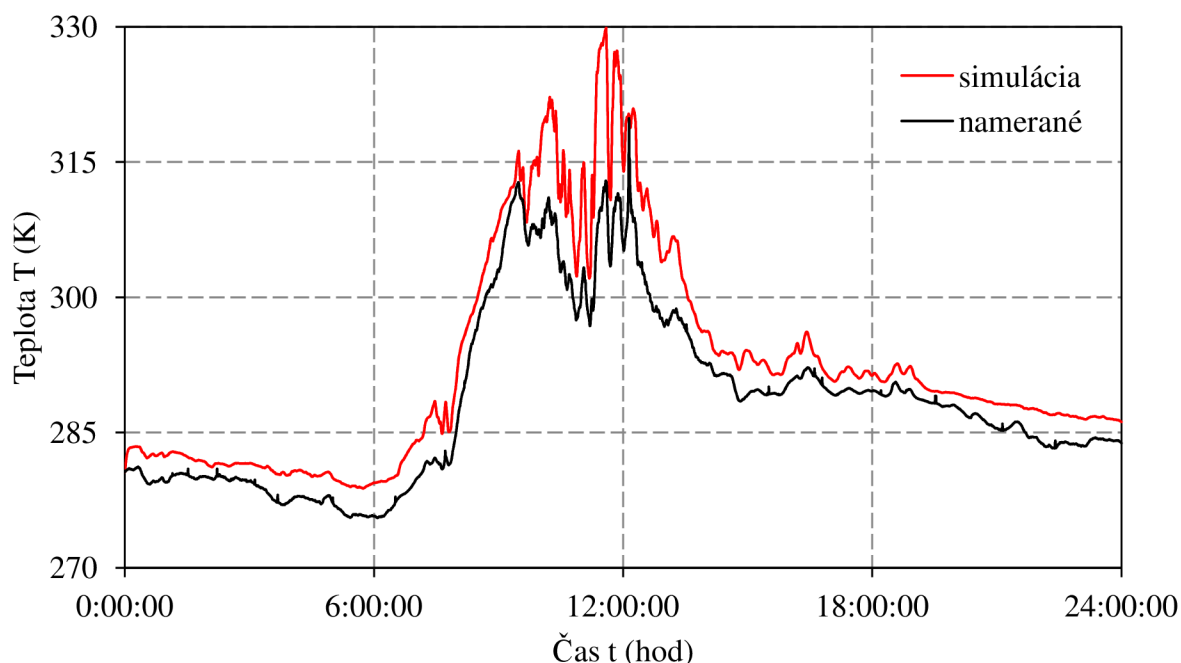
Na obrázku 5-8 je znázornená rovnica 4.9. Hodnota h je súčet núteného a voľného koeficientu prestupu tepla. Táto hodnota je závislá na hodnotách rýchlosti vetra a keďže rýchlosť vetra nebola na pracovisku meraná, budeme predpokladať konštantnú rýchlosť vetra počas celého dňa. Ako referenčné hodnoty koeficientov boli použité hodnoty zo zdroja [19], podľa ktorého použité hodnoty predstavujú hodnoty typické pre mierne až chladné oblasti.



Obrázok 5-9 Použité hodnoty pri simulácii

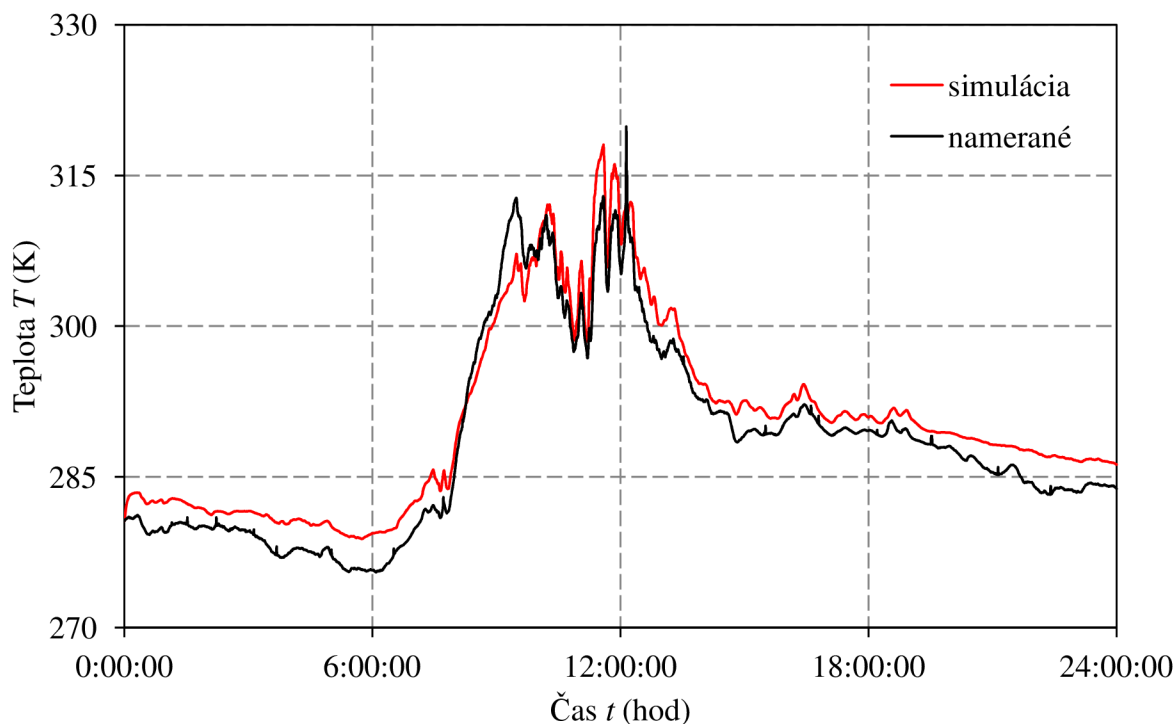
5.3 Výsledky simulácie

Obrázok 5-10 znázorňuje priebeh teploty panela získanej zo simulácie v programe PSCAD a priebeh teploty z hodnôt nameraných na pracovisku. Ako je vidieť teplota získaná zo simulácie je o niekoľko kelvinov vyššia ako nameraná teplota, čo je spôsobené aj tým, že panel je chladený prúdiacim vetrom, ktorého hodnoty neboli merané a model počíta s konštantnou hodnotou vetra, ktorá podľa použitých koeficientov predstavuje rýchlosť vetra zhruba 2 – 2,5 m/s.



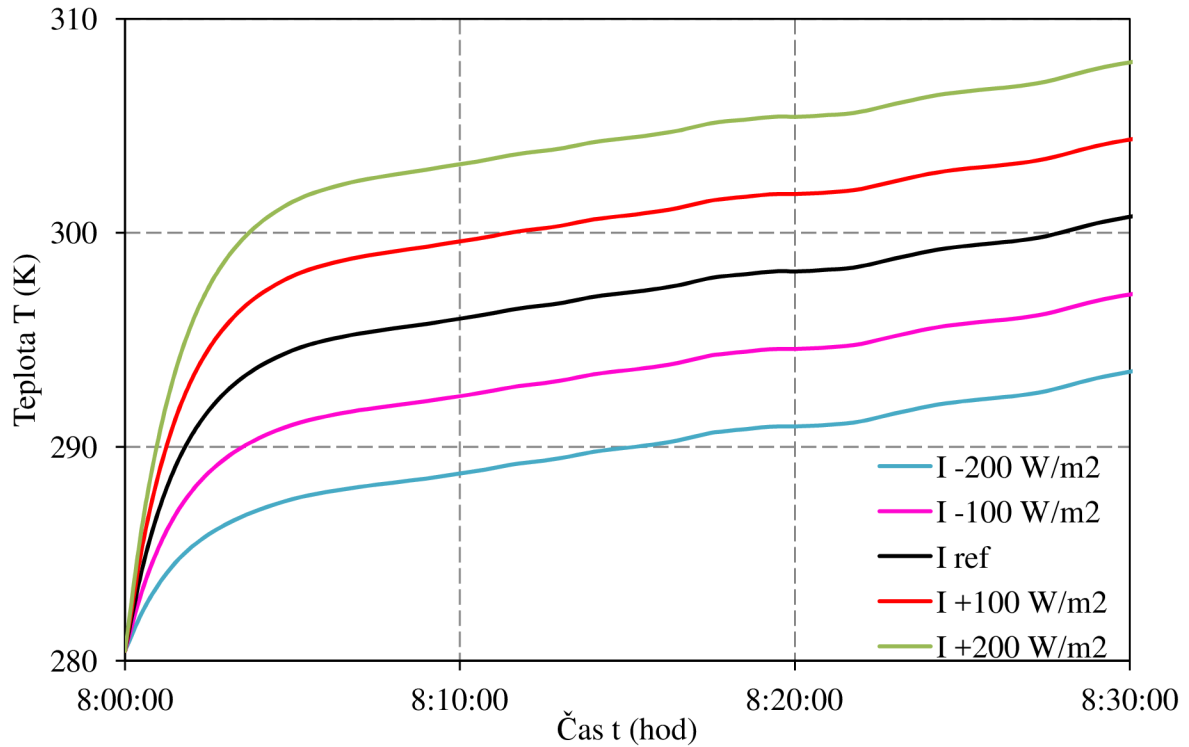
Obrázok 5-10 Porovnanie nasimulovaných a nameraných hodnôt teploty panela

Na obrázku 5-11 je znázornený priebeh teploty s pozmenenými hodnotami koeficientov prestupu tepla. Použité teploty odpovedajú podľa zdroja [20] rýchlosti vetra zhruba 5,76 m/s. Z obrázku 5-11 je vidno, že sa teplota panela medzi nasimulovanými a nameranými hodnotami líši počas väčšiny dňa zhruba okolo 3 K hore dole, čo znamená, že počas dňa fúkal vietor o rýchlosti približne 6 m/s. Výnimkou je obdobie dňa okolo 10. a 12. hodiny kedy boli hodnoty rýchlosti vetra väčšie, respektíve menšie.



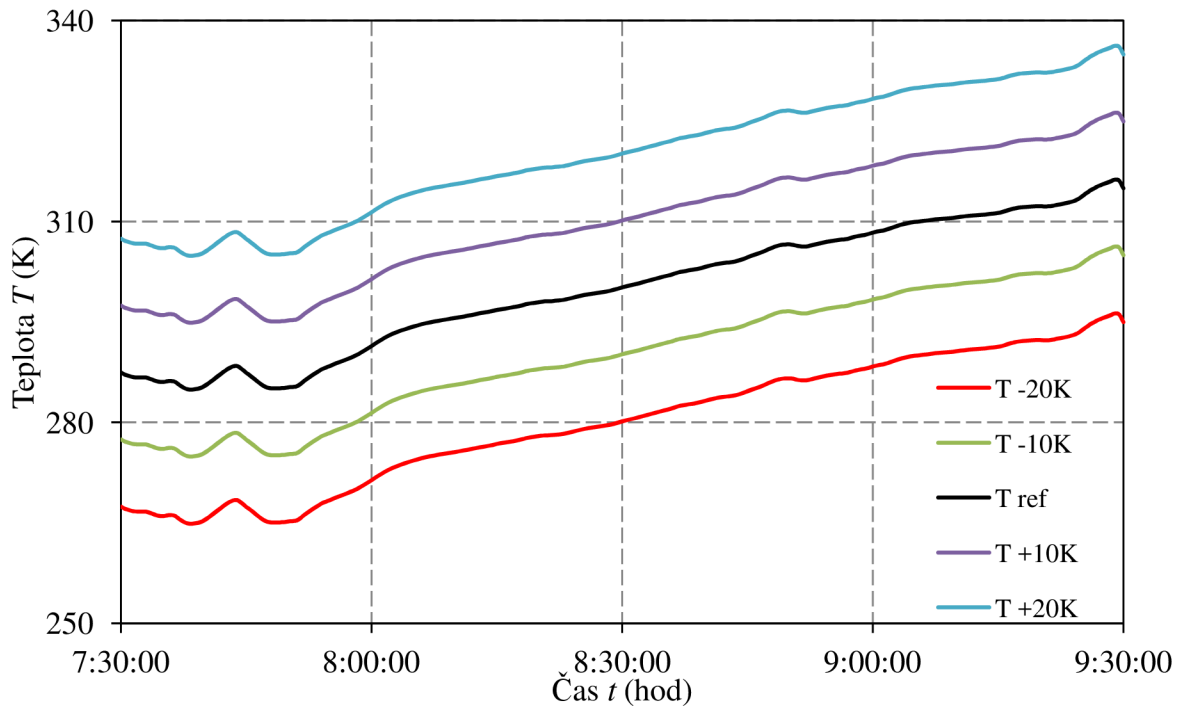
Obrázok 5-11 Porovnanie nasimulovaných a nameraných hodnôt teploty panela pre rýchlosť vetra 5,76 m/s

Obrázok 5-12 ukazuje ako vplýva zmena intenzity žiarenia na výslednú teplotu panela. Zmena intenzity o 100 W/m^2 spôsobí zmenu teploty panela približne o 3 K. Táto zmena je priamo úmerná tzn. pri náraste intenzity narastá aj teplota panela. Pri zmene intenzity o 200 W/m^2 nahor je vidieť, že teplota narastie o veľkú hodnotu za krátky časový úsek oproti referenčnej hodnote. Dôvodom tohto javu je fakt, že teplota panela bola po dobu do 8. hodiny ustálená okolo hodnoty 280 K a intenzita sa taktiež pohybovala v nízkych hodnotách do 200 W/m^2 , tzn. že dôjde ku obrovskému skoku v náraste teploty. Simulácia na obrázku 5-12 začína v 8. hodine, pretože hodnoty intenzity pred touto časovou dobou neboli dostatočne vysoké, resp. boli nulové na to, aby sme overili vplyv pri poklese hodnoty o 200 W/m^2 , keďže by hodnota intenzity poklesla do nereálnych záporných hodnôt. Na obrázku 5-12 je taktiež vidno, že zmena intenzity nemá žiaden vplyv na začiatkovú teplotu panela a potvrdzuje fakt, že bola použitá Eulerova metóda, pri ktorej je potrebné vedieť počiatočnú hodnotu pre ďalšie počítanie.



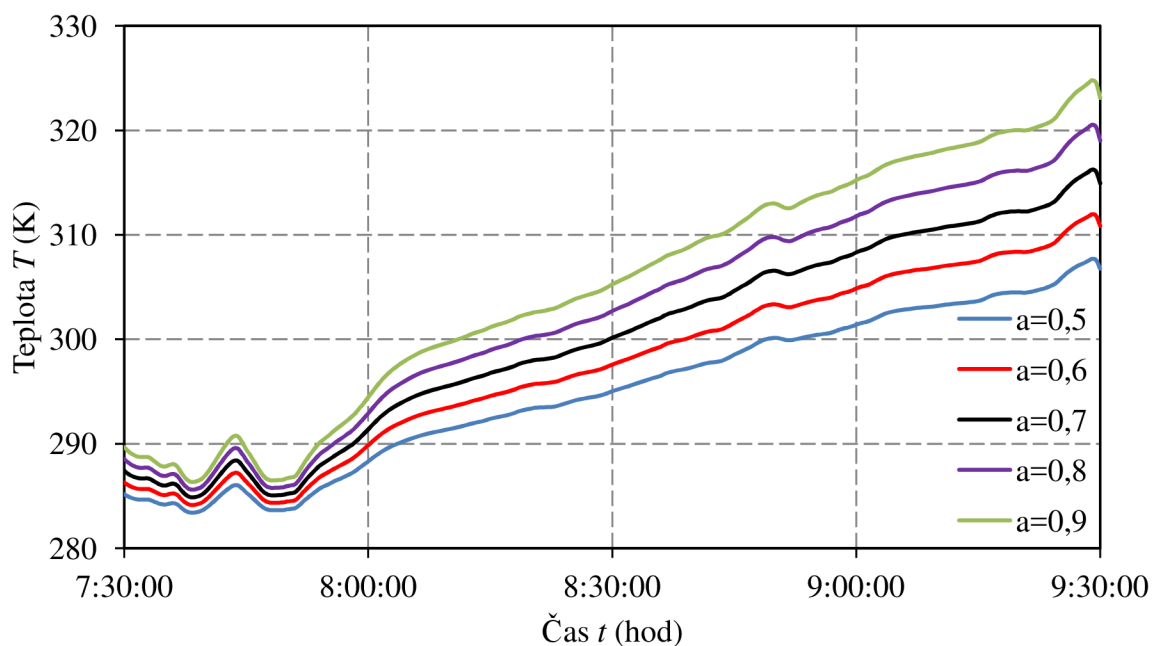
Obrázok 5-12 Zmena priebehu teploty panela pri zmene hodnoty intenzity žiarenia

Na obrázku 5-13 je vidieť podobne ako na obrázku 5-12, že pri zmene teploty okolia dôjde k priamoúmernej zmene teploty panela. Zmena tejto teploty okolia o 10 K spôsobí zmenu zhruba 8-10 K na výslednej teplote panela.



Obrázok 5-13 Zmena priebehu teploty panela pri zmene hodnoty teploty okolia

Na obrázku 5-14 je znázornený priebeh výslednej teploty panela, pri ktorom bola v simulácii menená hodnota absorpcie. Pri absorpcii, alebo pohlcovaní, dochádza k zoslabovaniu a pohlcovaní svetla pri prechode určitým prostredím. Čím väčšia je absorpcia materiálu, tým menej fotónov sa odrazí od povrchu. Pohltaná energia sa následne mení na energiu tepelnú, čiže teplota prostredia narastá. Ako môžeme vidieť na obrázku 5-14, pri zvýšení absorpcie došlo ku nárastu teploty a naopak pri jej znížení teplota klesala. Najmenšie rozdiely teploty pri zmene absorpcie sa vyskytujú v ranných hodinách približne do 8. hodiny, kedy intenzita nie je ešte dostatočne veľká aby nejakovo výrazne ovplyvnila teplotu panela. V ostatných hodinách je vidno, že zmena hodnoty absorpcie o 0,1 vo výsledku zmení teplotu panela približne o 3 K.

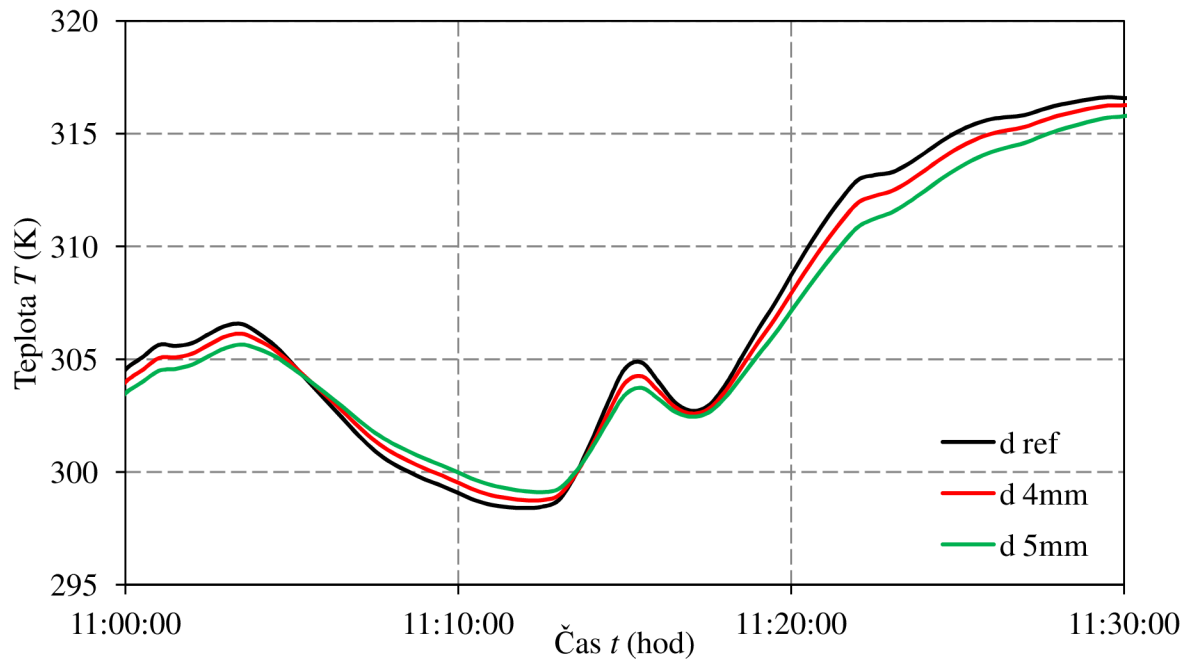


Obrázok 5-14 Zmena priebehu teploty panela pri zmene absorpcie

Na obrázku 5-15 je znázornený vplyv zmeny hrúbky čelného skla panela na výslednú teplotu panela. Pri simulácii bola použitá referenčná hodnota vetra 5,76 m/s. Keďže pri zmene hrúbky vrstvy dochádza ku zmene celkovej kapacity panela, ktorá sa používa pre výpočet rozdielu teploty DT , čo je znázornené na obrázku 5-4. Hodnoty DT sa pohybujú rádovo v stotínach až tisícinách, takže tieto zmeny nejakovo výrazne neovplyvňujú výsledný priebeh.

Tabuľka 2 Vplyv zmeny hrúbky čelného skla na kapacitu FV panela

d [mm]	C [J/K]
3,2	8 794
4	10 547
5	12 737



Obrázok 5-15 Zmena priebehu teploty panela pri zmene hrúbky čelného skla

Platí však, že pri zvýšení hrúbky skla a teda aj kapacity dochádza ku poklesu výslednej teploty panela. Tento fakt potvrdzujú vzťahy 4.1 a 4.2 a graficky to je znázornené na obrázku 5-4, kde je súčet všetkých členov predelený celkovou kapacitou. V tabuľke 2 je vidieť ako vplýva zmena hrúbky čelného skla na kapacitu panela.

6 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo oboznámenie sa s problematikou týkajúcou sa fotovoltaiických článkov, princípmi ich fungovania, zmenou ich vlastností v závislosti na teplote a vypracovanie matematických vzťahov, ktoré budú použité k zostaveniu simulácie fotovoltaiického modelu v simulačnom prostredí PSCAD.

Pre daný tepelný model bola zostrojená matematická simulácia, ktorej úlohou bolo sledovanie zmien teploty fotovoltaiického panelu počas dňa. Ako bolo predpokladané, najväčšie hodnoty teploty panel dosahoval v obedňajších hodinách kedy je slnko najviac priblížené k panelu a tým pádom je aj jeho intenzita najväčšia.

Výstupom simulácie modelu bola krivka, ktorá bola porovnaná s priamo nameranými hodnotami. Hodnoty sa miestami líšili minimálne (rozdiel okolo 3 K) ale miestami dochádzalo k veľkým teplotným rozdielom. Toto bolo spôsobené skutočnosťou, že nie všetky hodnoty, ktoré boli pri simulácii použité sú hodnotami priamo uvedenými od výrobcu. Niektoré hodnoty, ako napríklad absorpcia ale bo kapacita boli dopočítané, respektíve použité z iných odborných prác, pri ktorých sa pracovalo s typovo podobným panelom.

Ďalším faktorom, ktorý ovplyvnil výsledný priebeh teploty bol vietor, ktorý slúži ako chladenie panela. Dataloggerom neboli zaznamenávané rýchlosti vetra v daný deň, čiže bolo potrebné použiť už hodnoty obsiahnuté v iných prácach. Taktiež, rýchlosť vetra nie je konštantná a mení sa počas dňa a závisí na rôznych poveternostných podmienkach. Model však počíta s konštantnou hodnotou a ku nameraným hodnotám bolo možné sa v našom prípade len priblížiť. Zo simulácie bolo zistené, že hodnota rýchlosti vetra, ktorý ochladzoval panel v daný deň sa pohybovala okolo 5,7 m/s.

Práca obsahuje aj rôzne simulácie, pri ktorých boli pozmenené niektoré hodnoty ako napríklad dopadajúca intenzita žiarenia na panel, teplota okolitého prostredia alebo absorpcia a bolo sledované aké to má vplyvy na panel.

Pri zmene intenzity žiarenia bolo zistené, že zmena o 100 W/m^2 spôsobí vo výsledku zhruba zmenu teploty panela o 3 K. Zmena teploty okolia o 10 K predstavovala približne takú istú zmenu na výslednej teplote panelu. Všetky tieto zmeny boli priamo úmerné, čiže pri náraste teploty alebo intenzity narastala aj teplota panela a naopak. S narastajúcou absorpciou narastala aj teplota panela, keďže bolo pohlcované čoraz väčšie množstvo fotónov, ktoré sa neskôr premieňali v teplo. Výsledná teplota sa pri zmene absorpcie o 0,1 zmenila o cca 3 K. Zmena hrúbky čelného skla síce zmení kapacitu panela o výraznú hodnotu, avšak výslednú teplotu panela to skoro neovplyvní.

7 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika: elektrická energie ze slunce*. 1. vyd. Praha: EkoWATT, 2009, 93 s. ISBN 978-80-87333-01-3.
- [2] REICHL J., VŠETIČKA M. Světlo jako elektromagnetické vlnění. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/434-svetlo-jako-elektromagneticke-vlneni>
- [3] Infračervená energia. *Magnumheating* [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: www.magnumheating.sk/Informácie/Technológia
- [4] Fotovoltaika. *Tzb-info* [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: www.oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky
- [5] REICHL J., VŠETIČKA M. Planckova konstanta hypotéza. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/721-planckova-kvantova-hypoteza>
- [6] *Fyzika ťa volá!* [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: http://web.svf.stuba.sk/kat/FYZ/fyzika_ta_vola/skripta/other/opt_javy_polovodice.pdf
- [7] *Solární (fotovoltaické) články* [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [8] KUBINEC, Miroslav. *Návrh funkčného modelu fotovoltaickej elektrárne s fixnou montážou panelov*. Bratislava, 2011. Diplomová práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Vedoucí práce Ing. Marek Pípa, PhD.
- [9] Fotovoltický článok. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Fotovoltický_článok
- [10] *Pružné PV moduly – 2. generace fotovoltaických panelů* [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: www.fdt.cz/wp-content/uploads/2011/12/Pružné-PV-moduly-2-generace.pdf
- [11] Fotovoltaika pro každého. *Czech RE agency* [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#treti>
- [12] Fotovoltaika - jaká je nejlepší dostupná technologie? *Tzb-info* [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6327-fotovoltaika-jaka-je-nejlepsi-dostupna-technologie>
- [13] 10 výhod fotovoltaiky. *Mega-Sunshine* [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://www.mega-sunshine.cz/fotovoltaicke-elektrarny/10-vyhod-fotovoltaiky/>
- [14] Výhody a nevýhody solární energie. *Solarni-energie* [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://www.solarni-energie.info/vyhody.php>
- [15] SLIVKA, J. *Fotovoltaické články pro napájení nízkoodběrových elektronických zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 54 s.

-
- [16] JONES, A. D. a C. P. UNDERWOOD. *A THERMAL MODEL FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS* [online]. School of the Built Environment, University of Northumbria, Newcastle, 2001 [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~fonteb/EP/Other/References/Jones-ThermalModelPVSystem.pdf>
- [17] BENDA, Vítězslav. *Obnovitelné zdroje energie*. 1. vyd. Praha: Profi Press, 2012, 208 s. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [18] MANITOBA HVDC RESEARCH CENTRE, PSCAD - User's Guide Manual (2010), 211 Commerce Drive, Winnipeg, Manitoba, Canada R3P 1A3, 511 s. [cit. 2017-05-19].
- [19] HAYES, William a Lauren NGAN. *A Time-Dependent Model for CdTe PV Module Temperature in Utility-Scale Systems*. 2015 [cit. 2017-05-19].
- [20] ARMSTRONG, S a W.G. HURLEY. *A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions*. 2010 [cit. 2017-05-19].

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – MERACIE PROSTREDIE NA STRECHE BUDOVY T12 VUT BRNO.....	37
PRÍLOHA B – TEPELNÉ ČIDLO PT100.....	38
PRÍLOHA C – DATA SHEET FV PANELA CONERGY POWERPLUS 250M.....	39
PRÍLOHA D – DATA SHEET DATALOGGERA LOGBOX SD	40
PRÍLOHA E – DATA SHEET PRE PYRANOMETER CMP 21	41
PRÍLOHA F.1 – DATA SHEET PRE TEPELNÉ ČIDLO PT100	42
PRÍLOHA F.2 – DATA SHEET PRE TEPELNÉ ČIDLO PT100	43

Príloha A – Meracie prostredie na streche budovy T12 VUT Brno

Príloha B – Tepelné čidlo PT100

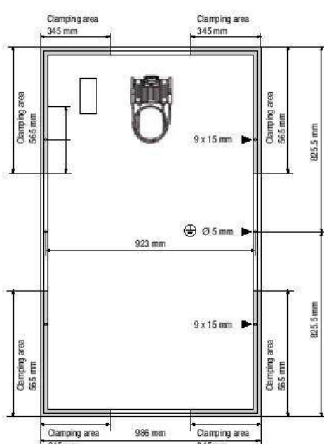
Príloha C – Data sheet FV panela Conergy PowerPlus 250M

Specifications | Photovoltaic modules



CONERGY

Conergy PowerPlus 245M–260M

Module dimensions (L × W × H): ¹

1,651 × 986 × 46 mm

Cell dimensions:

156 × 156 mm

No. of cells:

60

Cell type:

Monocrystalline cell incorporating 3-busbar technology

NOCT: ²

48°C + 2°C

Maximum permissible load:

6,000 Pa ³

Front cover type:

Micro-structured solar glass, 3.2 mm thickness

Junction box:

Huber + Suhner HA3, protection class IP 67,
201 × 141 × 19.7 mm

Cable:

2 × 1,000 mm length, 4 mm² cross-section

Plug type:

Huber + Suhner: plug connector

Frame material:

with integrated twist lock

Module weight: ⁴Anodised aluminium
19.6 kg

Maximum permissible system voltage:

1,000 V

Reverse current loadability (I_{sc}):

20 A

Reduction of efficiency from 1,000 W/m² toAt 200 W/m², 97 % of200 W/m² in accordance with EN 60904-1:

STC efficiency is achieved

Certification:

IEC/EN 61215 Ed. 2, IEC/EN 61730, SK II, MCS

Product warranty: ⁵

12 years

Performance guarantee: ⁵

> 82% of nominal output in year 25

Conergy PowerPlus	245M	250M	255M	260M
Electrical ratings under standard test conditions ⁶				
Nominal output (P _{nom})	245 W	250 W	255 W	260 W
Performance tolerance	-0/+3 %	-0/+3 %	-0/+3 %	-0/+3 %
Module efficiency (P _{nom})	15,05 %	15,36 %	15,66 %	15,97 %
Voltage at maximum performance (U _{mpp}) ⁷	30,76 V	31,06 V	31,43 V	31,79 V
Current at maximum performance (I _{mp}) ⁷	8,09 A	8,14 A	8,20 A	8,26 A
Off-load voltage (U _{oc}) ⁷	37,74 V	37,90 V	38,09 V	38,29 V
Short-circuit current (I _{sc}) ⁷	8,61 A	8,66 A	8,72 A	8,78 A
Temperature coefficient (P _{mp})	-0,44 %/°C	-0,44 %/°C	-0,44 %/°C	-0,44 %/°C
Temperature coefficient (U _{oc}) absolute	-0,120 V/°C	-0,120 V/°C	-0,120 V/°C	-0,120 V/°C
Temperature coefficient (U _{oc}) in percent	-0,33 %/°C	-0,33 %/°C	-0,33 %/°C	-0,33 %/°C
Temperature coefficient (I _{sc}) absolute	5,08 mA/°C	5,11 mA/°C	5,14 mA/°C	5,18 mA/°C
Temperature coefficient (I _{sc}) as a percentage	0,059 %/°C	0,059 %/°C	0,059 %/°C	0,059 %/°C
Electrical rating at 800 W/m², NOCT and AM 1.5				
Power (P _{mp})	183,31 W	186,27 W	189,91 W	193,53 W
Off-load voltage (U _{oc})	34,39 V	34,54 V	34,72 V	34,90 V
Short-circuit current (I _{sc})	6,98 A	7,02 A	7,07 A	7,12 A
Voltage (U _{mp})	27,94 V	28,22 V	28,56 V	28,90 V
Current (I _{mp})	6,56 A	6,60 A	6,65 A	6,70 A

¹ Dimensional tolerance: +/- 1.2 mm² Nominal operating temperature of the cell at 600 W/m² irradiation,

20°C ambient temperature, wind speed of 1 m/s

³ In accordance with IEC 61215 Ed. 2⁴ Weight tolerance: +/- 0.5 kg⁵ Valid for registered modules of the PowerPlus series.

Otherwise, standard warranty conditions apply.

⁶ Standard test conditions defined as follows: 1,000 W/m² radiant power

at a spectral density of AM 1.5 and a cell temperature of 25°C.

⁷ Measuring tolerance STC: +/- 3% (P_{mp}); +/- 10% (I_{sc}, U_{oc}, I_{mp}, U_{mp});measuring tolerance NOCT: +/- 5% (P_{mp}); +/- 10% (I_{sc}, U_{oc}, I_{mp}, U_{mp})

This data sheet complies with the specifications of DIN EN 50380.

Available at:

2012@Conergy

Subject to technical modifications without notice.

Conergy_PowerPlus_245M_250M_TD_ENG_2012_03-23

Príloha D – Data sheet dataloggera LOGBOX SD



4 SPECIFICATIONS

Number of analog differential inputs	3	AIN 1 - AIN 6
Input ranges	8	19,39,78,156,312,625,1250 and 2500mV
Maximum number of instruments without temperature sensor	3	2-wire signal outputs
Maximum number of instrument + Pt-100	1	2-wire signal inputs + 4-wire Pt-100
Maximum number of instrument + 10K thermistor	2	2-wire signal input + 2-wire 10K thermistor
Maximum voltage allowed on each input	+5V	
Resolution	24bits	for 2-wire signal inputs + 4-wire Pt-100
Resolution	12bits	for 10K thermistors
Number of analog single-ended inputs	2	AIN 7 - AIN 8
Input ranges	1	3000mV
Maximum number of instruments without temperature sensor	2	2-wire signal inputs, GND is return line
Maximum number of 10K thermistors	2	2-wire signal inputs, GND is return line
Maximum voltage allowed on each input	+5V	
Resolution	12bits	
Number of digital inputs	4	DIN 1 - DIN 4
Input ranges	3	Time, Frequency, Counter
Maximum number of instruments	4	2-wire signal outputs, GND is return line
Maximum voltage allowed on each input	+15V	
Max. input frequency	1090Hz	
Logical level	3V	CMOS
General specifications		
Input resolution	1 μ V	
Input offset	10 μ V max.	
Inaccuracy	0.05%	for 24 bits resolution
Power supply	4V-20V	ZnMn, alkaline, NiCd, NiMH, lithium, Pb, or wall adapter
Maximum power supply	24V	
Internal batteries for logging	4x AA Alkaline	included, and can be inserted in the battery holder
Internal battery for RTC	CR2032	power for memory and RTC
Power consumption in sleep mode	20 μ A	RTC active
Power consumption in logging mode	5mA	
Power consumption in logging mode	7mA	including RS485
Power consumption in logging mode	1.7mA	without SD card and LED off
Internal memory (non vol)	128kB	for internal data storage
Internal memory accessible through	RS232 / RS485	Using supplied software interface
Communication speed	300 bps-115k2 bps	8N1
SD memory card	SD	included
SD memory card capacity	512MB	Higher capacity is possible but formatted to 512MB
SD memory card accessible through	removal	Need internal or external SD card reader at PC
RTC crystal	20ppm	
RTC drift	1.7s / day	(20x24hx3600sec)
Output voltage level	2,5V Vref	Switched (active during logging interval)
Relay output	1	Switched (closed during logging interval)
Dimensions Logbox SD	115x90x50mm	
protection	IP65	
Mounting plate	45mm	pole/mast mounting
Temperature range	-40 up to +60°C	

Príloha E – Data sheet pre Pyranometer CMP 21

Specifications	CMP 3	CMP 6	CMP10 & CMP 11	CMP 21	CMP 22
Classification to ISO 9060:1990	Second Class	First Class	Secondary Standard	Secondary Standard	Secondary Standard
Spectral range (50% points)	300 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	200 to 3600 nm
Sensitivity	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Impedance	20 to 200 Ω	20 to 200 Ω	10 to 100 Ω	10 to 100 Ω	10 to 100 Ω
Expected output range (0 to 1500 W/m^2)	0 to 30 mV	0 to 30 mV	0 to 20 mV	0 to 20 mV	0 to 20 mV
Maximum operational irradiance	2000 W/m^2	2000 W/m^2	4000 W/m^2	4000 W/m^2	4000 W/m^2
Response time (63%)	< 6 s	< 6 s	< 1.7 s	< 1.7 s	< 1.7 s
Response time (95%)	< 18 s	< 18 s	< 5 s	< 5 s	< 5 s
Zero offsets					
(a) thermal radiation (at 200 W/m^2)	< 15 W/m^2	< 12 W/m^2	< 7 W/m^2	< 7 W/m^2	< 3 W/m^2
(b) temperature change (5 K/h)	< 5 W/m^2	< 4 W/m^2	< 2 W/m^2	< 2 W/m^2	< 1 W/m^2
Non-stability (change/year)	< 1%	< 1%	< 0.5%	< 0.5%	< 0.5%
Non-linearity (100 to 1000 W/m^2)	< 1.5%	< 1%	< 0.2%	< 0.2%	< 0.2%
Directional response (up to 80° with 1000 W/m^2 beam)	< 20 W/m^2	< 20 W/m^2	< 10 W/m^2	< 10 W/m^2	< 5 W/m^2
Spectral selectivity (350 to 1500 nm)	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%
Temperature response	< 5% (-10°C to +40°C)	< 4% (-10°C to +40°C)	< 1% (-10°C to +40°C)	< 1% (-20°C to +50°C)	< 0.5% (-20°C to +50°C)
Tilt response (0° to 90° at 1000 W/m^2)	< 1%	< 1%	< 0.2%	< 0.2%	< 0.2%
Field of view	180°	180°	180°	180°	180°
Accuracy of bubble level	< 0.2°	< 0.1°	< 0.1°	< 0.1°	< 0.1°
Temperature sensor output				10 K Thermistor (optional Pt-100)	10 K Thermistor (optional Pt-100)
Detector type	Thermopile	Thermopile	Thermopile	Thermopile	Thermopile
Operational temperature range	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C
Storage temperature range	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C
Humidity range	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing
Ingress Protection (IP) rating	67	67	67	67	67
Recommended applications	Economical solution for routine measurements in weather stations, field testing	Good quality measurements for hydrology networks, greenhouse climate control	Meteorological networks, PV panel and thermal collector testing, materials testing	Meteorological networks, reference measurements in extreme climates, polar or arid	Scientific research requiring the highest level of measurement accuracy and reliability

Note: The performance specifications quoted are worst-case and/or maximum values

Standard 10K Thermistor or optional Pt-100 temperature sensor with CMP 21 and CMP 22

Individual directional response and temperature dependence test data with CMP 21 and CMP 22

Príloha F.1 – Data sheet pre tepelné čidlo PT100



2 TECHNICAL DATA

Output voltage	1 mV/°C
Power supply voltage	3...9 V dc (Absolute max. value 15 V)
Power consumption	< 40 mW
Max. voltage between power supply and input/output terminals	42 V dc or 30 V ac.
Environmental conditions	Acc. to IEC359
Reference conditions	Ambient temperature +21...25 °C relative humidity 45...75% power supply voltage 6 V
Rated range of use	Ambient temperature +5...40 °C relative humidity 20...80% power supply voltage 3...9 V
Safety	Acc. to IEC348, class 2
Measuring range K	-50...+600 °C
Measuring range J	-50...+1200 °C
Measuring range Pt100	-100...+850 °C
Linearization J and K	According to IPTS 68
Linearization Pt100	Based on DIN 43760
Measurement current Pt100	220 µA
Overall accuracy at reference conditions (thermocouple excluded)	± 1 °C ± 0,25 % of reading
Overall accuracy at reference conditions (Pt100 element excluded)	± 0,3 °C ± 0,1% of reading
Additional error over rated temperature range (cold junction error + temperature drift) J and K	± 0,05 °C ± 0,02 % of reading per °C deviation from T _{ref}
Additional error at an ambient	Reading -100...+400 °C:

Príloha F.2 – Data sheet pre tepelné čidlo PT100



temperature T_{amb} outside the reference temperature T_{ref} ($T_{ref} = 21...25\text{ }^{\circ}\text{C}$, see also figure 1

$$\pm(0.01\text{ }^{\circ}\text{C} + 0.005\% \text{ of reading}) \times (\text{Reading} - T_{ref})$$

+400...850 $^{\circ}\text{C}$:

$$\pm\{0.03\text{ }^{\circ}\text{C} + 0.03\% \text{ of (reading - 400)}\} \times (\text{Reading} - T_{ref})$$

Additional error due to Pt100 lead resistance (only for the current wires, pins 1 and 4)

4-wire measurement:

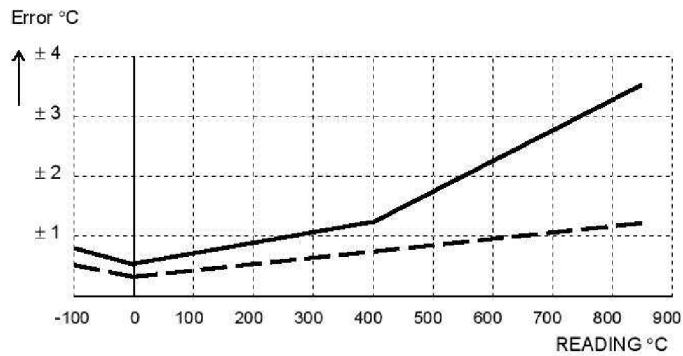
$$-0.12\% \text{ of reading/Ohm}$$

3-wire measurement:

$$-0.13\% \text{ of reading} + 2.56\text{ }^{\circ}\text{C/Ohm}$$

2-wire measurement:

$$-1.87\% \text{ of reading} + 5.15\text{ }^{\circ}\text{C/Ohm}$$



————— MAX ERROR AT T_{amb} 5...21 $^{\circ}\text{C}$ or 25...40 $^{\circ}\text{C}$

- - - - - MAX ERROR AT T_{amb} 21 $^{\circ}\text{C}$...25 $^{\circ}\text{C}$ (T_{ref})

Figure 1. Accuracy graph for the Pt-100