

# Vliv teploty na výkon stavebně integrovaných FV polí

## *Temperature influence on performance of BIPV fields*

Kamil Staněk, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6  
Tel.: +420 224 354 473; E-mail: [kamil.stanek@fsv.cvut.cz](mailto:kamil.stanek@fsv.cvut.cz)

### **Abstract**

*This paper deals with the temperature influences on performance of back-ventilated BIPV systems. It is shown that the temperature pattern of back-ventilated BIPV fields differs from that of open-rack installations. The operating temperature typically rises along the height of the PV field resulting in higher mean operating temperature causing decrease in conversion efficiency. The influence of highly non-uniform temperature distribution within the PV field was found to be negligible and mean temperature of the PV field can be used to calculate the thermal effect on output power. Scheme of a 1D global dynamic model is presented and validated against experimental data (for a selected day, 13.9.2008) measured at a real scale PV façade at the Faculty of Civil Engineering, CTU in Prague. The model calculates the overall DC efficiency of back-ventilated BIPV field incorporating the optical and thermal effects together with the effect of low irradiance levels. A comparison with measurement is presented showing the deviation in prediction of DC production of 0,4 % for the selected day. The comparison is extended for other common modeling approaches showing that the simplest model overestimates the DC production by 10 %.*

### **1. Vymezení problému**

FV instalace na budovách mohou mít řadu podob. Častým řešením je umístění FV pole rovnoběžně s rovinou obvodového pláště (střecha, fasáda). Obvykle je kladen důraz na architektonický výraz instalace a snahou je co nejvíce začlenit FV panely do skladby obvodové konstrukce. Zde však vzniká potenciální riziko nedostatečného odvodu nadbytečného tepla ze zadní strany FV panelů vedoucí k poklesu konverzní účinnosti.



Obr. 1: Pohled na FV systémy integrované do sedlových střech pasivních domů v Koberovech [1].

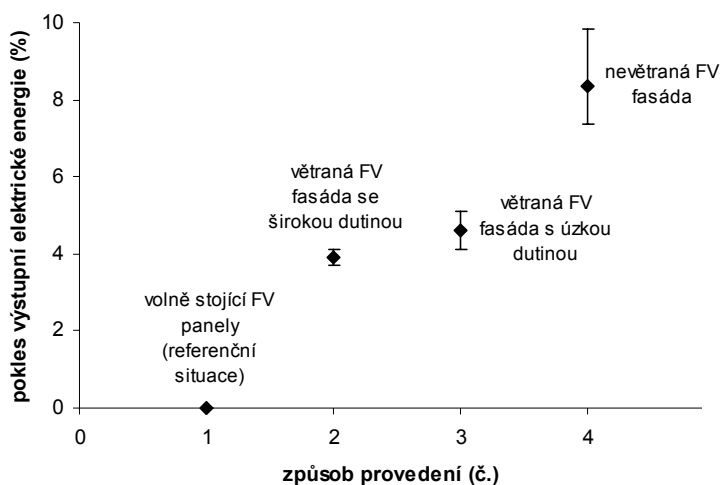
Situaci lze přiblížit na následujícím příkladu. Na pasivních domech v Koberovech byly nainstalovány dva stavebně integrované FV systémy (Obr. 1). U většího systému na domu vpředu nahrazují FV panely střešní krytinu a za nimi je zařazena 80 mm hluboká větraná dutina s nasáváním pod okapem a výdechem v úrovni hřebene. Z boků je FV pole oplechováno. U menšího systému na domě v pozadí jsou FV panely osazeny pomocí střešních háků nad krytinou, což je pravděpodobně nejběžnější způsob kotvení pro šikmé střechy. Esteticky přitažlivější řešení na prvním domě bude mít zcela jistě za následek vyšší nárůst provozní teploty FV panelů, než tomu bude u druhého domu.

S rostoucí mírou stavební integrace FV polí do obvodových plášťů budov tak mohou být umocněny dva obecně negativní vlivy s dopadem na výstupní DC výkon FV panelů:

- nárůst provozní teploty FV článků;
- nerovnoměrné rozložení teploty v rámci FV pole.

S rostoucím počtem instalací na budovách je těmto teplotním vlivům věnována zvýšená pozornost a byla publikována řada modelů, pomocí nichž lze vyčíslit jejich dopad na výstupní DC výkon FV polí a potažmo na celoroční produkci FV systému (např. [2, 3], Graf 1).

Tento příspěvek je věnován základnímu popisu tepelného chování FV polí s velkou mírou stavební integrace. Problematika je dokumentována na příkladu experimentální FV fasády instalované na Fakultě stavební ČVUT v Praze pro jeden vybraný den 13.9.2008.



Graf 1: Roční pokles produkce elektrické energie FV fasády v závislosti na způsobu provedení v porovnání s volně stojícími panely. Zpracováno na základě [2].

## 2. Experimentální FV fasáda

Základní parametry experimentální FV fasády jsou uvedeny v Tab. 1. FV fasáda je jihozápadně orientovaná a umístěná na horní polovině štítové stěny budovy. Instalace je rozdělena do dvou částí podél proskleného schodišťového traktu. Celková výška instalace je 15,2 m.

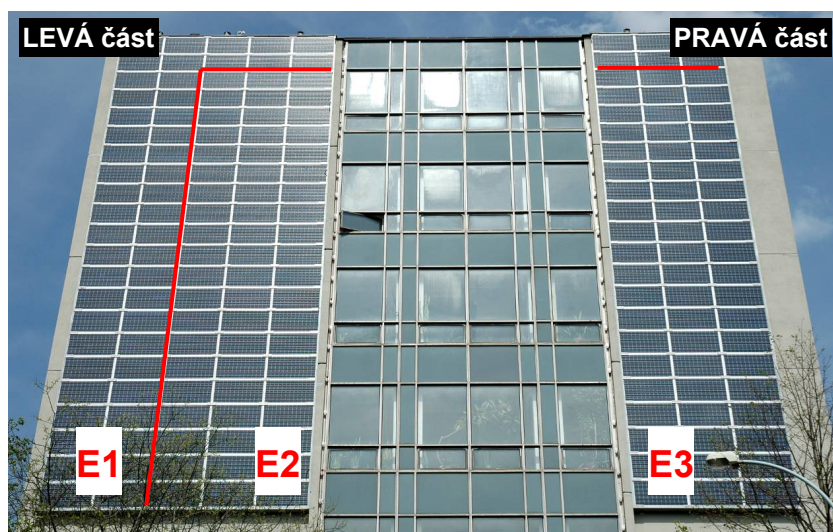
Elektricky je instalace rozdělena do tří nezávislých FV polí E1 až E3 (Obr. 2). DC výkon z FV polí je veden do síťových DC/AC měničů napětí umístěných ve střešní strojovně. AC výkon je náfázován do sítě budovy.

Tab. 1: Základní parametry experimentální FV fasády na Fakultě stavební ČVUT v Praze.

|                                           |                                   |                      |                      |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| <b>celek</b>                              |                                   |                      |                      |
| poloha                                    | JZ fasáda                         |                      |                      |
| celkový instalovaný jmenovitý DC výkon    | 18,66 kW <sub>p</sub>             |                      |                      |
| typ FV panelů / počet                     | Solartec PE 72-106-24 / 176 ks    |                      |                      |
| jmen. DC výkon / účinnost FV panelu       | 106 W <sub>p</sub> ± 5% / 12,37 % |                      |                      |
| technologie FV článků                     | monokrystalický křemík (c-Si)     |                      |                      |
| síťové DC/AC měniče napětí                | Fronius IG60                      |                      |                      |
| <b>jednotlivá FV pole</b>                 | <b>E1</b>                         | <b>E2</b>            | <b>E3</b>            |
| počet FV panelů / sérioparalelní zapojení | 56 (8x7)                          | 60 (10x6)            | 60 (10x6)            |
| plocha FV panelů                          | 48,0 m <sup>2</sup>               | 51,4 m <sup>2</sup>  | 51,4 m <sup>2</sup>  |
| jmen. DC výkon                            | 5 936 W <sub>p</sub>              | 6 360 W <sub>p</sub> | 6 360 W <sub>p</sub> |

Stavebně je FV fasáda předsazena před obvodovou stěnu budovy s hloubkou provětrávané dutiny 0,14 m. FV panely jsou uloženy mezi vodorovné hliníkové profily a kotveny bodovými nerezovými přitlačnými tvarovkami. Vodorovné profily jsou šroubovány k hlavním svislým profilům z pozinkované oceli. Svislé profily jsou neseny bodovými svařovanými nerezovými kotvami, které jsou přes tepelnou izolaci upevněny do obvodové stěny. Tloušťka tepelné izolace stěny je 0,16 m. Vnější líc tepelné izolace je opatřen základní tenkovrstvou omítkou. Boky FV fasády jsou oplechovány. Nasávání větracího vzduchu do dutiny je přes ochrannou mřížku, výdech je realizován pomocí kruhových vyústek DN200 krytých stříškami (Obr. 5). Vyústky jsou připraveny pro osazení bezmotorových ventilačních hlavíc, případně potrubí, pokud by FV fasáda měla sloužit jako solární vzduchový kolektor.

Na FV fasádě je osazeno 48 ks teplotních čidel ve třech úrovních: 1) na zadní straně FV panelů; 2) uprostřed větrané dutiny; 3) na povrchu obvodové stěny. Uprostřed výšky obou FV polí jsou umístěny termoanemometry pro měření rychlosti proudění vzduchu ve větrané dutině. V dolní a horní části FV polí jsou umístěna čidla pro měření intenzity slunečního záření v rovině FV polí. Meteorologická stanice na střeše budovy měří teplotu vnějšího vzduchu, intenzitu slunečního záření na vodorovnou rovinu a rychlost a směr větru. Elektrické veličiny jsou měřeny na měničích napětí. Časový krok měření je 5 minut.

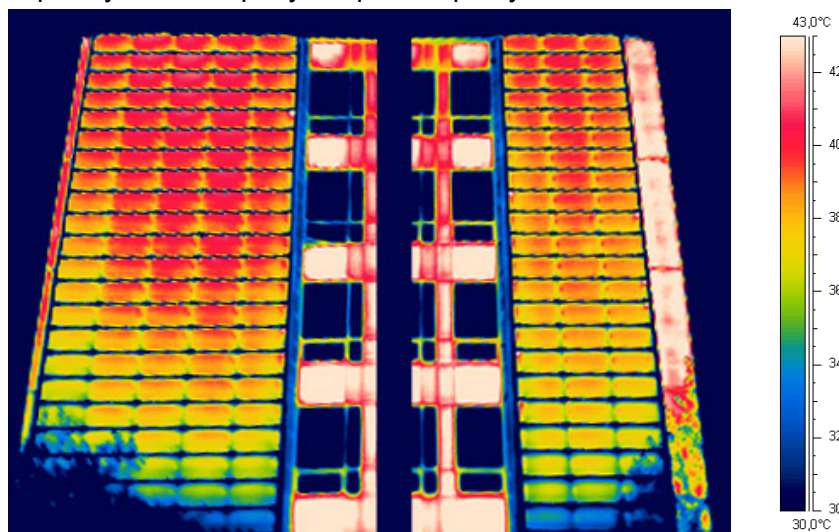


Obr. 2: Pohled na experimentální FV fasádu s vyznačením poloh jednotlivých FV polí E1 až E3.

Předmětem následující analýzy je vliv teploty na výstupní DC výkon FV pole E2 v levá části fasádního FV systému. Analýza je provedena pro typický zářivý slunný den 13.9.2008.

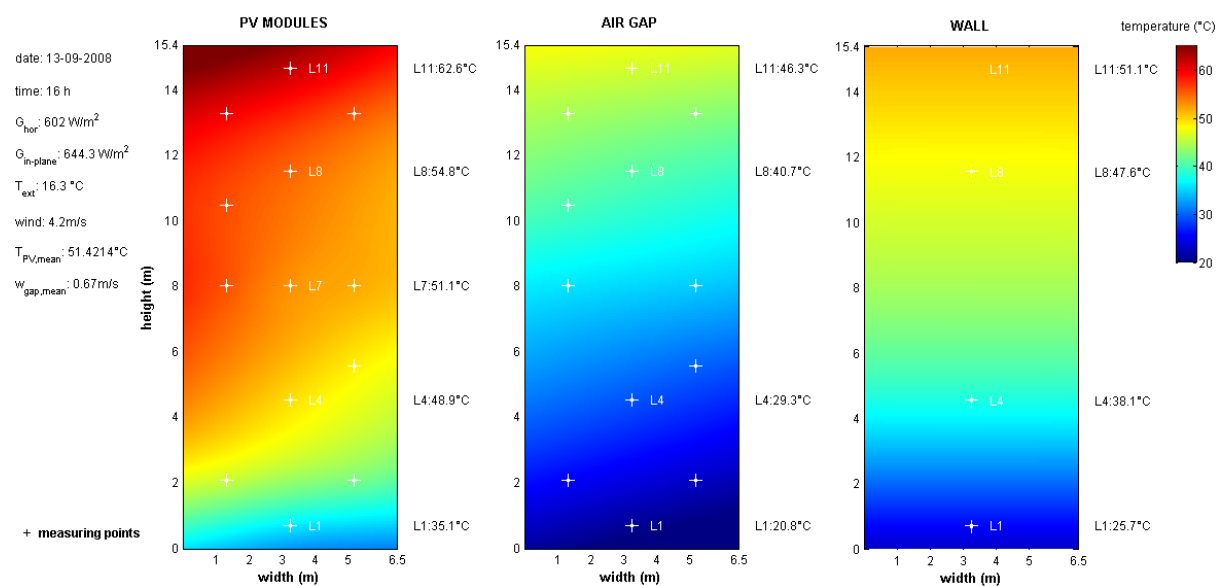
### 3. Rozložení teplot v systému větrané FV fasády

Typické rozložení teploty na fasádních FV polích lze nejrychleji přiblížit na snímku pořízeném IR kamerou. Je patrný nárůst teploty FV panelů po výšce instalace.



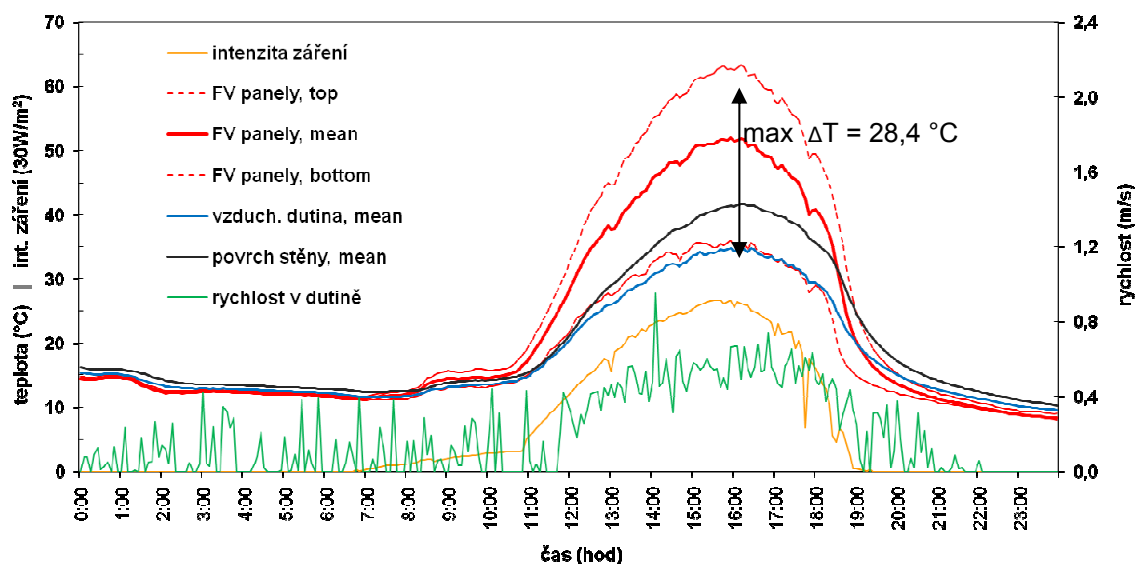
Obr. 3: IR snímek FV fasádních FV polí pořízený 28.4.2008.

Následující obrázek zachycuje měřené rozložení teplot v systému větrané FV fasády pro zářivý den 13.9.2008. Teplotní pole byla aproximována z hodnot pořízených v měřicích bodech v 16 hod, tedy v době denního teplotního maxima.



Obr. 4: Měřené teplotní rozložení v systému větrané FV fasády v 16 hod dne 13.9.2008.





Graf 2: Měřený vývoj teplot v systému větrané FV fasády dne 13.9.2008 (střední hodnoty pro oblast FV panelů, dutinu a povrch stěny + lokální hodnoty na dolní a horní řadě FV panelů). Pro doplnění je znázorněna intenzita sluneč. záření v rovině fasády a rychlost proudění vzduchu ve větrané dutině.

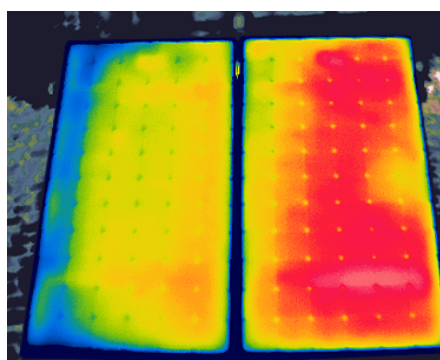
Z Obr. 4 a Grafu 2 je patrné následující:

- nárůst provozní teploty FV panelů s denním maximem 63 °C v horní části instalace;
- nárůst teplotního rozdílu mezi dolní a horní řadou FV panelů s denním max. 28,4 °C.

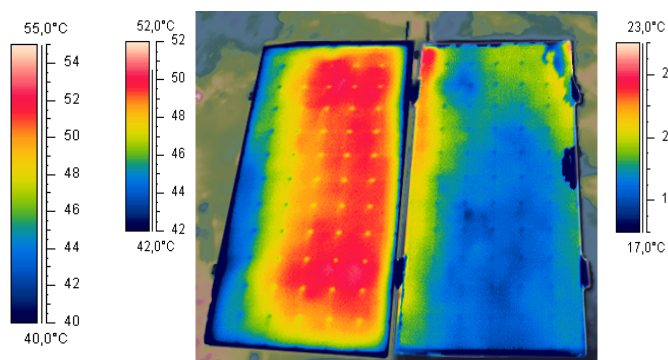
Kromě standardního negativního vlivu zvýšené teploty na konverzní účinnost FV panelů je nutné zabývat se vlivem odlišných teplot jednotlivých FV panelů v sérioparalelním zapojení na výstupní DC výkon FV polí. Pro ohraničení tohoto problému bylo provedeno venkovní měření za jasného dne na dvou FV panelech stejného typu jako na FV fasádě (Solartec PE 72-106-24). Po dosažení rovnovážného teplotního stavu byl jeden FV panel postupně ochlazován a poté byla jeho teplota udržována o 25 °C nižší oproti nechlazenému panelu (Obr. 5). Postupně byly měřeny VA charakteristiky jednotlivých panelů i jejich vzájemného sériového a paralelního spojení. V Grafu 3 jsou zobrazeny VA charakteristiky teplého a chlazeného FV panelu a jejich sériového (3a) a paralelního (3b) spojení. Pro srovnání jsou dále zobrazeny VA charakteristiky dvojice sériově, resp. paralelně spojených stejně teplých FV panelů pořízené před započítím chlazení.



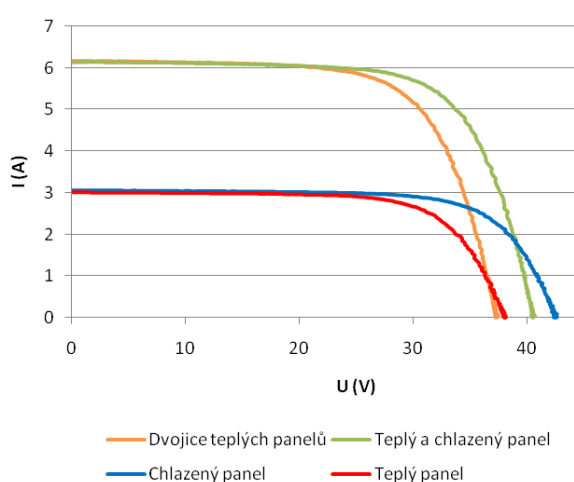
Obr. 5: Měřená sestava FV panelů.



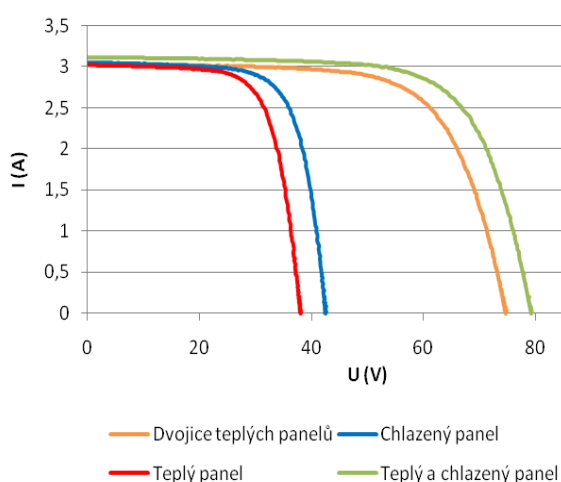
Obr. 6a: IR snímek FV panelů v ustáleném teplotním stavu na počátku měření.



Obr. 6b: IR snímek FV panelů v průběhu měření (panel vpravo je chlazený)

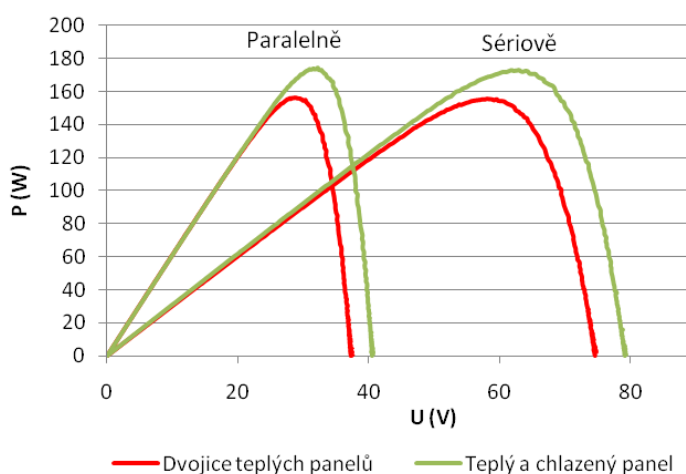


Graf 3a: VA charakteristiky jednotlivých a paralelně spojených panelů.



Graf 3b: VA charakteristiky jednotlivých a sériově spojených panelů.

Jednotlivé panely mají své body maximálního výkonu (MPP). Při jejich spojení (paralelním nebo sériovém) se vytvoří nový bod maximálního výkonu, který je zejména u paralelního zapojení „kompromisem“ z obou individuálních hodnot (3a – zelená křivka). Pro výsledné srovnání byly dopočteny výkonové charakteristiky výše uvedených kombinací zapojení FV panelů (Graf 4).

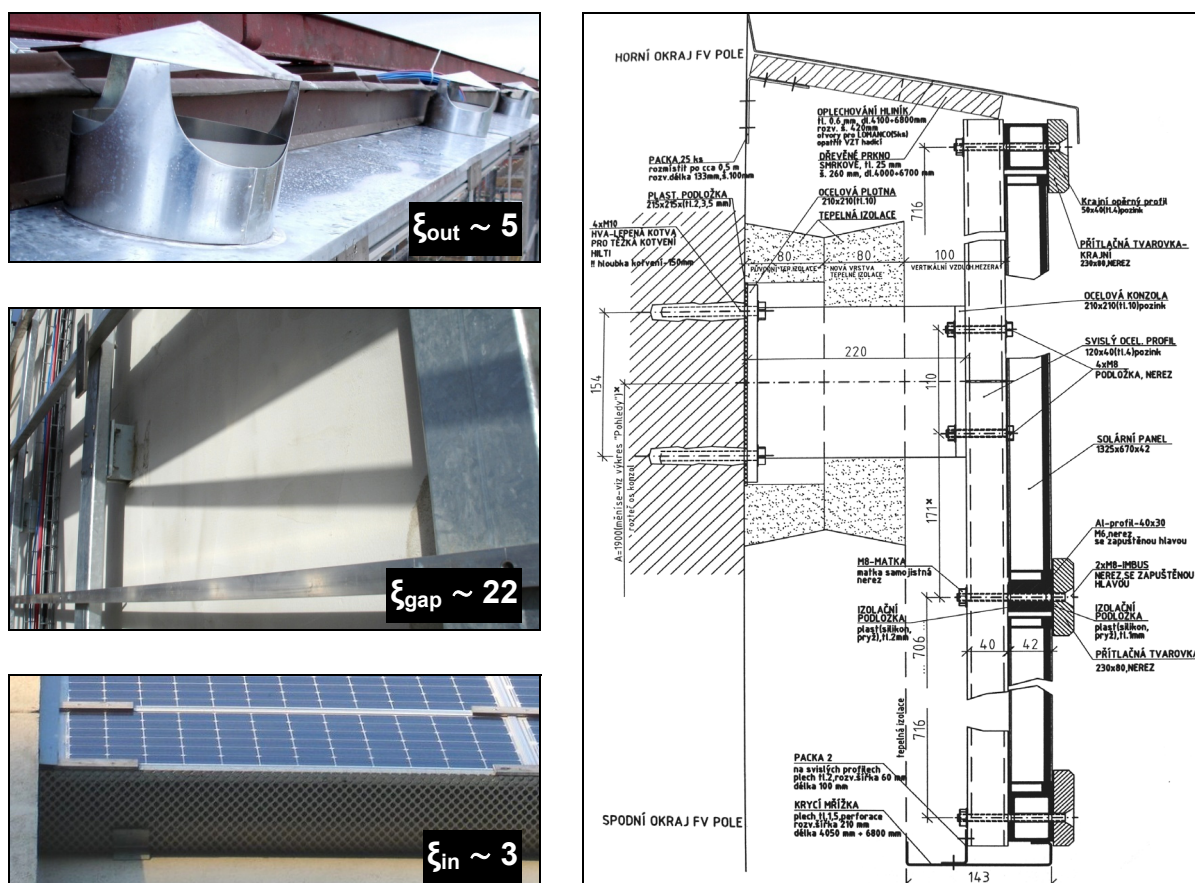


Graf 4: Výkonové charakteristiky paralelně a sériově spojených panelů.

Z výsledků měření je patrné, že způsob zapojení (sériové, paralelní) nestejně zahřátých FV panelů nemá na výsledný výkon v MPP zásadní vliv, resp. tento vliv je pod rozlišovací schopností měření ve venkovních podmínkách. Na základě laboratorního měření na dvou nestejně ohřátých c-Si článcích byl tento vliv vyčíslen jako  $< 4\%$  [4]. Lze uzavřít, že s velmi malou chybou lze výkon sériově či paralelně zapojených FV panelů počítat jako součet výkonů jednotlivých panelů s individuálními teplotami nebo použít střední teplotu. Tento závěr lze vztáhnout na celé FV pole.

#### 4. Rychlost proudění ve větrané dutině

Rychlost proudění vzduchu ve větrané dutině má přímý vliv na teplotu FV panelů, proto by měla být maximalizována pomocí vhodného konstrukčního řešení instalace. Uspořádání na vstupním a výstupním otvoru i po výšce dutiny experimentální FV fasády je patrné z Obr. 7. Pro jednotlivé úseky jsou uvedeny součinitele tlakové ztráty. Konstrukční řešení je uzpůsobeno pro osazení bezmotorových ventilačních hlavic, resp. potrubí pro případ využití odpadního tepla z větrané dutiny. V běžných případech je lépe zakončit instalaci průběžným výdechem s protidešťovými žaluziemi v celé její šířce.



Obr. 7: Konstrukční řešení vstupního a výstupního otvoru a po výšce větrané dutiny.

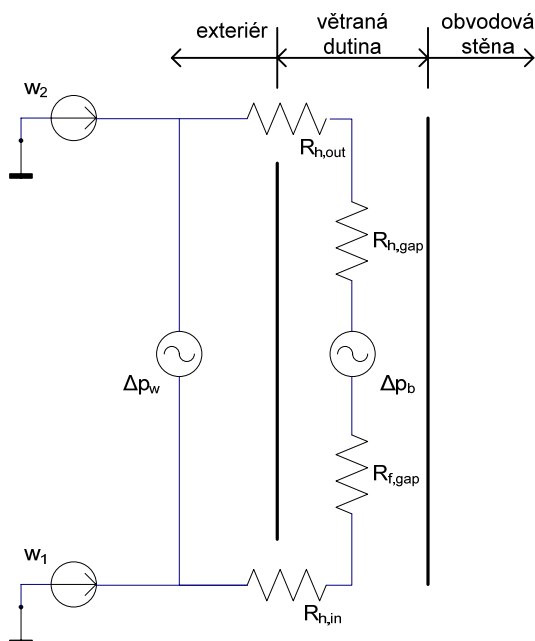
Hnacími silami, které vyvolávají proudění v dutině, jsou

- termický vztlak  $\Delta p_b$  způsobený rozdíly v hustotě vzduchu po výšce dutiny, které jsou vyvolány teplotním rozdílem;
- tlakový rozdíl mezi vstupním a výstupním otvorem vyvolaný působením větru  $\Delta p_w$ .

Proti hnacím silám působí brzdné síly

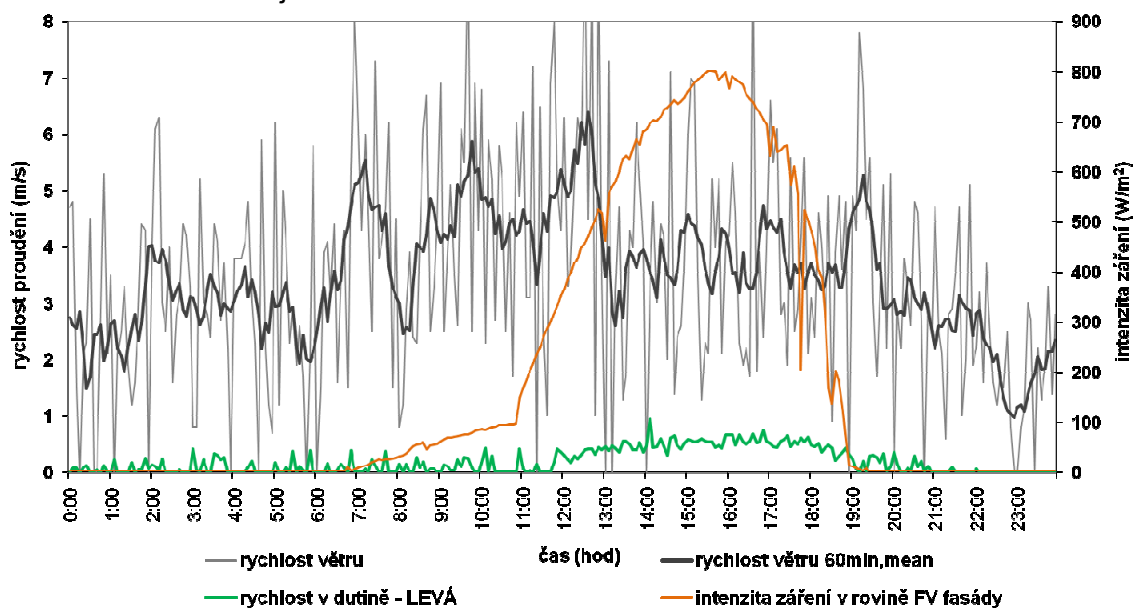
- tlaková ztráta vlivem tření  $\Delta p_f \rightarrow$  odpor  $R_{f,gap}$ ;
- tlaková ztráta vlivem místních hydraulických odporů  $\Delta p_h \rightarrow$  odpory  $R_{h,in}$ ,  $R_{h,gap}$  a  $R_{h,out}$ .

Tlakové poměry v systému větrané FV fasády lze znázornit pomocí ekvivalentního elektrického obvodu (hnací síly jsou znázorněny jako napětí, brzdné síly jako odpory a výsledný průtok dutinou je ekvivalentem elektrického proudu).



Obr. 8: Tlakové poměry v systému větrané FV fasády znázorněné jako ekvivalentní elektrický obvod.

Vývoj rychlosti proudění vzduchu ve větrané dutině experimentální FV fasády v průběhu zájmového dne 13.9.2008 je znázorněn v Grafu 5.



Graf 5: Měřený průběh rychlosti proudění ve větrané dutině FV fasády dne 13.9.2008. Pro doplnění je znázorněna intenzita slunečního záření v rovině fasády, rychlost větru a pro názornost její hodnoty zprůměrované přes interval 60 minut.



Z Grafu 5 je patrné, že na rychlost proudění ve větrané dutině má vliv především velikost konvektivního tepelného toku do dutiny ze zadní strany FV panelů a povrchu obvodové stěny. Průměrná rychlost proudění v dutině v době dopadu přímého záření (11 až 19 hod) je 0,44 m/s. Vliv větru je na proudění vyvolané termickým vztlakem superponován a je odpovědný za kolísání hodnot rychlosti. Potlačení vlivu větru je z části dáno „uzavřeností“ větrané dutiny experimentální FV fasády, zejména díky konstrukčnímu uspořádání výdechů.

## 5. Dynamický model větraného FV pole

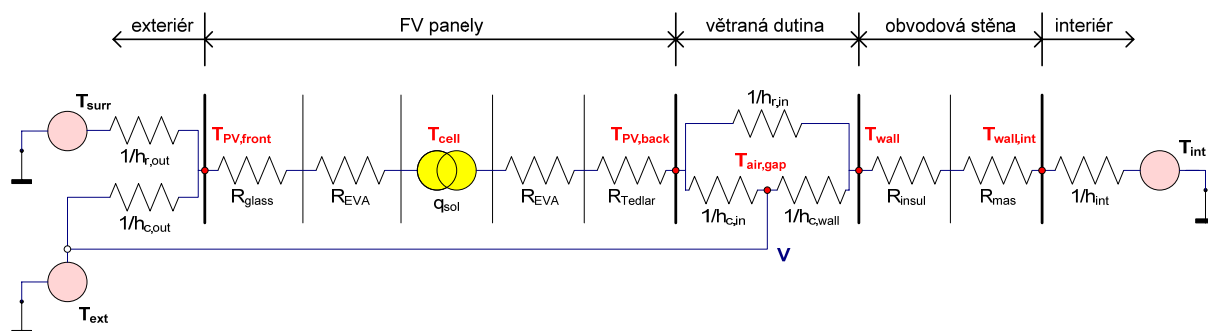
Pro předpověď chování větraných FV polí byl vyvinut 1D globální dynamický model. Globální značí, že model pracuje se středními, tzn. po výšce / délce instalace zprůměrovanými, hodnotami jednotlivých veličin. Model je založen na výpočtu

- tlakové rovnováhy a střední rychlosti proudění v systému (viz Kapitola 4);
- přenosu tepla vedením, prouděním a radiací v systému i mezi systémem a okolím;
- optických ztrát na FV panelech;
- konverzní účinnosti FV panelů v závislosti na teplotě a intenzitě dopadajícího záření.

Vliv nerovnoměrného rozložení teploty v rámci FV pole není v modelu na základě závěrů uvedených v Kapitole 3 uvažován.

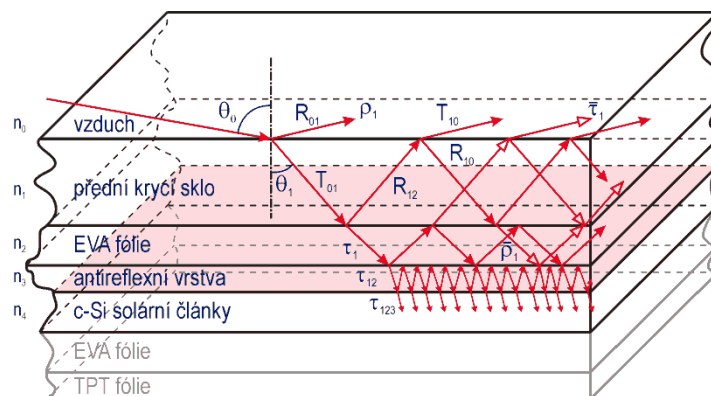
Z hlediska přenosu tepla lze větrané FV pole definovat jako soustavu dvou rovnoběžných desek s okrajovou podmínkou konstantní hustoty tepelného toku na obou deskách (obvodová stěna druhotně přijímá teplo od FV panelů radiací). Dynamické vedení tepla v oblasti FV panelů a obvodové stěny budovy je počítáno metodou konečných diferencí s vnitřním objemovým zdrojem tepla na FV panelech. Tepelné toky přirozenou a nucenou konvekcí jsou počítány dle teorie mezní vrstvy a jsou na jednotlivých površích superponovány [2, 3].

Přenos tepla v systému lze opět znázornit pomocí ekvivalentního elektrického obvodu.



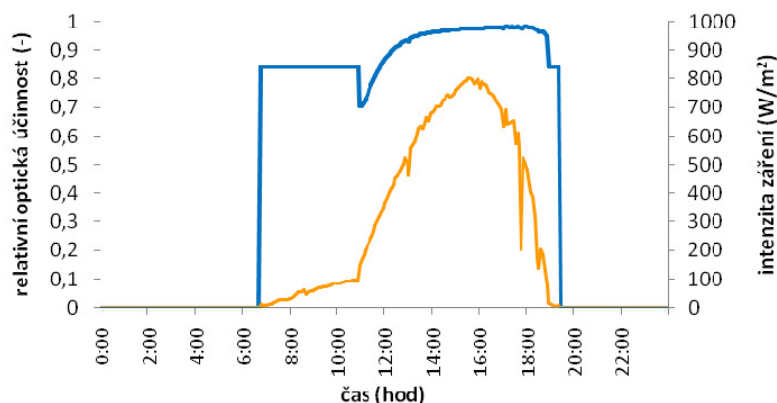
Obr. 9: Přenos tepla v systému větrané FV fasády znázorněn jako ekvivalentní elektrický obvod.

Optické ztráty na FV panelech jsou počítány pomocí optického modelu vícevrstvého systému kryt-absorbér [5]. Krytem je v tomto případě soustava *krycí sklo / EVA fólie / AR vrstva*, absorbérem jsou c-Si solární články. V rámci modelu je sluneční záření rozděleno na jednotlivé složky dle Perézova modelu [6] a optická propustnost krytu počítána pro každou složku samostatně. Výsledkem optického modelu je relativní optická účinnost FV panelů (relativní optická účinnost pro dopad paprsků ve směru normály FV panelu je rovna 1).



Obr. 10: Schéma vícevrstvé optické struktury FV panelu s c-Si články a s naznačeným chováním slunečního paprsku.

Křivka relativní optické účinnosti pro modelovaný den 13.9.2008 a JZ orientaci FV fasády má tvar zachycený v následujícím grafu. Zvýšené optické ztráty odrazem na počátku osvit FV panelů přímou složkou slunečního záření se projeví charakteristickým „zubem“ v čase 11 až 13 hod.



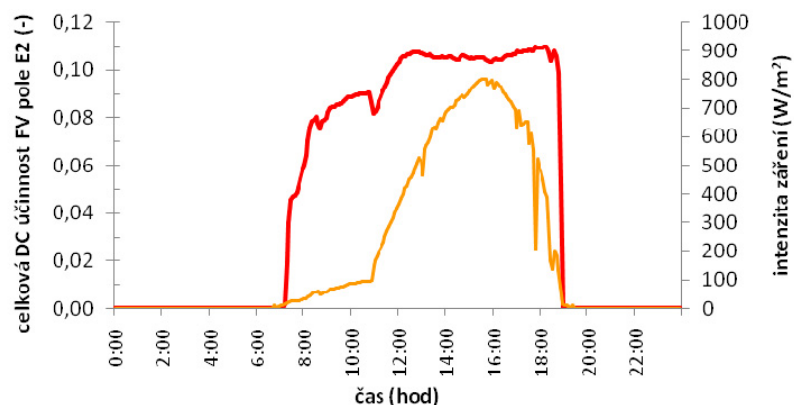
Graf 6: Křivka relativní optické účinnosti pro FV fasádu s JZ orientací v průběhu modelovaného dne 13.9.2008. Pro doplnění je znázorněna intenzita slunečního záření v rovině fasády.

Konverzní účinnost FV panelů je počítána pomocí komplexního vztahu [7], který zohledňuje pokles účinnosti vlivem nárůstu provozní teploty c-Si článků i závislost účinnosti na intenzitě dopadajícího záření (s klesající intenzitou účinnost klesá přibližně logaritmicky).

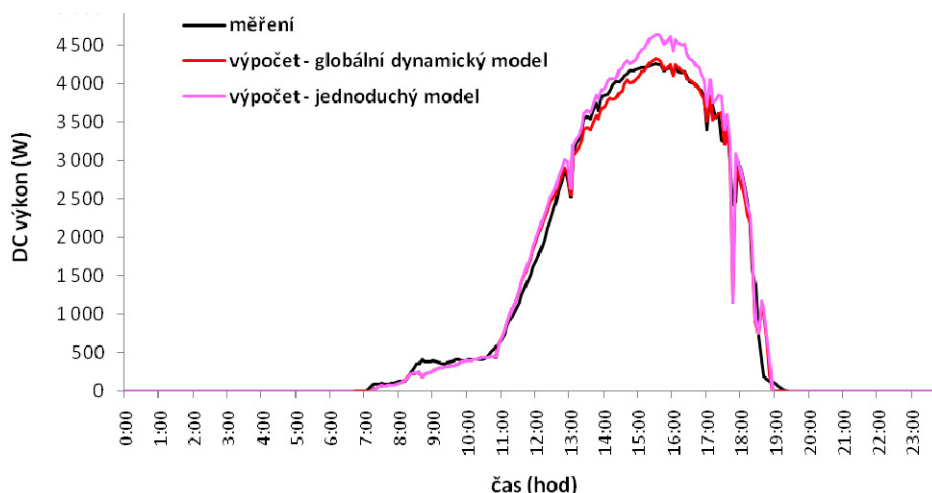
$$\eta_{conv} = \eta_{PV,STC} \left( 1 + \gamma(T_{PV} - T_{PV,STC}) + \left( 1 - \frac{G}{G_{STC}} \right) (\mu + \nu(T_{PV} - T_{PV,STC})) \right) \cdot \left( \frac{G_{STC}}{G} \right) \quad (1)$$

- $\eta_{PV,STC}$  konverzní účinnost solárních článků při STC (-)
- $\gamma$  teplotní součinitel pro výkon (1/°C); = -0,0045 1/°C pro c-Si FV panely
- $T_{PV}$  provozní teplota solárních článků (°C)
- $T_{PV,STC}$  teplota solárních článků při STC (°C); = 25 °C
- $\mu$  součinitel pro intenzitu záření (-); = -1,023 pro c-Si FV panely
- $\nu$  smíšený součinitel pro teplotu a intenzitu záření (1/°C); = 0,00399 1/°C pro c-Si FV panely
- $G$  intenzita dopadajícího slunečního záření (W/m²)
- $G_{STC}$  intenzita dopadajícího slunečního záření při STC (W/m²); = 1 000 W/m²

Popsaný model byl použit pro výpočet výstupního DC výkonu FV pole E2 během zájmového dne 13.9.2008. Výsledná křivka celkové DC účinnosti zahrnující teplotní vlivy, vliv úrovně intenzity záření a relativní optické účinnosti je znázorněna na následujícím grafu.



Graf 7: Křivka celkové DC účinnosti fasádního FV pole E2 v průběhu modelovaného dne 13.9.2008. Pro doplnění je znázorněna intenzita slunečního záření v rovině fasády.



Graf 8: Srovnání vypočteného a měřeného výstupního DC výkonu fasádního FV pole E2 v průběhu modelovaného dne 13.9.2008. Graf je doplněn o DC výkon vypočtený jednoduchým modelem.

Pro srovnání je uveden výsledek při použití jednoduchého modelu. Ten využívá modelu relativní optické účinnosti a konverzní účinnosti dle vztahu (1) stejně jako globální dynamický model, teplota FV panelů je však počítána ze standardního, běžně používaného empirického vztahu odvozeného pro c-Si FV panely v otevřené poloze (tzn. FV panely jsou rovnoměrně obtékány větrem z přední i zadní strany) [8]

$$T_{PV,back} = G \cdot e^{a+b \cdot w} + T_{ext} \quad (2)$$

$T_{PV,back}$  teplota na zadní straně FV panelů (°C)

$G$  intenzita slunečního záření dopadajícího v rovině FV panelů (W/m<sup>2</sup>)

$a$  empirický součinitel stanovující horní limit pro teplotu FV panelů při nízkých rychlostech větru a vysokých intenzitách slunečního záření (-); = -3,56 pro c-Si FV panely

$b$  empirický součinitel zohledňující míru poklesu teploty FV panelů při nárůstu rychlosti větru (-); = -0,075 pro c-Si FV panely

$w$  rychlost větru (m/s)

$T_{ext}$  teplota vnějšího vzduchu (°C)

Je evidentní, že tento způsob výpočtu provozní teploty FV panelů v systému větrané FV fasády nezachycuje teplotní nárůst způsobený omezeným odvodem odpadního tepla z větrané dutiny a tím nadhodnocuje výstupní DC výkon.

Tabulka 2 srovnává výsledky uvedených modelů na základě denní DC produkce fasádního FV pole E2 dne 13.9.2008. V posledním sloupci je navíc uveden výsledek pro jednoduchý model bez uvažování optických ztrát ve formě relativní optické účinnosti.

Tab. 2: Srovnání jednotlivých modelů na základě denní DC produkce fasádního FV pole E2 dne 13.9.2008.

| zdroj dat                      | měření | globální dynamický model | jednoduchý model | jednoduchý model se zanedbáním optických ztrát |
|--------------------------------|--------|--------------------------|------------------|------------------------------------------------|
| denní DC produkce (kWh/den)    | 24,86  | 24,76                    | 26,16            | 27,54                                          |
| relativní rozdíl oproti měření | 100 %  | 99,6 %                   | 105,2 %          | 110,8 %                                        |

## 6. Závěr

Vzorec tepelného chování stavebně integrovaných větraných FV polí je odlišný od FV polí instalovaných v otevřené poloze. Charakteristický je nárůst provozní teploty FV panelů podél větrané dutiny vedoucí k celkově vyšší střední teplotě FV pole a následnému poklesu konverzní účinnosti. Vliv samotného nerovnoměrného rozložení teploty, tzn. teplotních rozdílů mezi jednotlivými panely a větvemi panelů, na DC výkon FV pole nebyl prokázán, resp. se dá předpokládat menší než 4 %. Představený 1D globální dynamický model je dobře použitelný pro předpověď výstupního DC výkonu a výstupy z něj jsou v dobré shodě s měřením. Model zároveň ukazuje, že střední teplota FV pole je dobře použitelná pro výpočet střední konverzní účinnosti a DC výkonu FV pole. Výpočtový model musí vždy uvažovat optické vlastnosti FV panelů. Na příkladu modelového dne 13.9.2008 bylo ukázáno, že použití jednoduchého modelu, který nezahrnuje optické ztráty a zvýšený nárůst teploty FV pole, vede u stavebně integrovaného fasádního FV pole k nadhodnocení denní DC produkce o 10 %.

## Literatura

- [1] STANĚK, K. Fotovoltaika pro PD Koberovy v souvislostech. In *Pasivní domy 2008 – Sborník konference*. Brno, 2008, říjen 30 – 31. **In Press**.
- [2] EICKER, Ursula. *Solar Technologies for Buildings*. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 323 s. ISBN 0-471-48637-X.
- [3] BRINKWORTH, B. J. – SANDBERG, M. Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays. *Solar Energy*, 2006, Volume 80, Issue 1, s. 89-103.
- [4] Wolf, P., Benda, W., Machacek, Z. The effect of surface temperature distribution in PV cells on the overall power generation. In *MEDPOWER 2008 – Conference Proceedings*, Thessaloniky, listopad 2 – 5. **In Press**.
- [5] KRAUTER, S. – HANITSCH, R. Actual optical and thermal performance of PV-modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1996, Volume 41/42, s. 557-574.
- [6] DUFFIE, J. A. – BECKMAN, A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2. vyd. New York: John Wiley & Sons, 1991. 919 s. ISBN 0-471-51056-4.
- [7] POISSANT, Y. – COUTURE, L. – DIGNARD-BAILEY, L. – THEVENARD, D. CUSACK, P. – OBERHOLZER, H. Simple Test Methods for Evaluating the Energy Rating of PV Modules under Various Environmental Conditions [PDF Online]. Canmet Energy Technology Centre - Varennes: 06/2003.
- [8] KING, D. L. – BOYSON, W. E. – KRATOCHVIL, J. A. *Photovoltaic Array Performance Model*. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2004.