

Dušan Medveď, Michal Kolcun, Daniel Hlubeň, Rastislav Stolárik, Štefan Vaško

Modelovanie teplotných polí v okolí fotovoltaických článkov

Tento príspevok sa zaoberá riešením rozloženia teplotného poľa v okolí fotovoltaických článkov, resp. modulov, polí.

Kľúčové slová: fotovoltaický článok, teplotné pole, ANSYS

I. ÚVOD

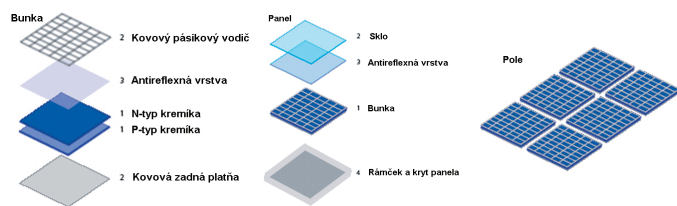
Fotovoltaický (FV) článok je polovodičová súčiastka, ktorá priamo konvertuje svetelnú energiu na energiu elektrickú pomocou fotoelektrického javu. Fotovoltaické články majú v súčasnosti množstvo aplikácií. FV články sa používajú napríklad na napájanie malých zariadení, ale využívajú sa aj na generovanie veľkých výkonov, kde sa zapájajú do jednotlivých modulov, tie do polí a vytvárajú fotovoltaické elektrárne. Aj elektrizačná sústava zažíva pomerne značné prírastky v pripojení nových FV elektrární, ktorých výkon je potrebné predikovať.

Účinnosť FV článkov závisí od množstva faktorov. Medzi najdôležitejšie faktory ovplyvňujúce účinnosť FV článkov patrí:

- kvalita a druh použitého materiálu, z ktorého je FV článok vyrobený (monokryštalický Si, polykryštalický Si, amorfný Si, GaAs, CdTe, CdS, ...),
- lokalita, v ktorej je FV umiestnený (počet slnečných dní v roku, využiteľné množstvo slnečnej energie dopadajúcej na povrch FV článku, teplota okolia v danej lokalite, ...),
- geometrické vyhotovenie FV článku (sklon FV článku, rôzny tvar, ...),
- atď.

Ako už bolo vyššie spomenuté, teplota okolia pomerne značne ovplyvňuje účinnosť FV článku. Zistenie presného rozloženia teplotného poľa pomôže navrhnúť a zvoliť optimálny tvar, materiál, prúdové vodivé cesty FV článku, prípadne pridať dodatočné chladiace zariadenie pre zníženie teploty celého panela (modulu).

V tomto príspevku bude v ďalšej časti uvedený návrh riešenia rozloženia teplotného poľa jedného typického FV kremíkového článku o rozmeroch 125×125 mm.



Obr. 1. Grafické znázornenie FV bunky, panela a poľa

II. MATEMATICKÉ MODELOVANIE TEPLOTNÉHO POĽA

Matematické modelovanie je jedna z často používaných metód pri stanovení rozloženia teplotného poľa. Teoretické modely sa menia od jednoduchých, ktoré je možné spočítať jednoduchými vzťahmi „na papieri“, až po zložité, ktorých numerická analýza vyžaduje

niekoľkohodinové výpočty využitím moderných superpočítačov. Výber vhodného teoretického modelu závisí od niekoľkých faktorov, ktoré zahŕňajú zložitosť inžinierskej úlohy, presnosť výpočtu, čas výpočtu a v neposlednom rade cenu.

Pred samotným výpočtom je dôležité rešpektovať skutočnosť, že akákoľvek výpočtová metóda môže prinajlepšom vyprodukovať len také výsledky, ktoré sú odvodené z fyzikálnych rovníc. Preto, prvým a jedným z najdôležitejších krokov v matematickom modelovaní je výber správneho teoretického modelu, ktorý správne popisuje technologický proces alebo jav.

Vo všeobecnosti, časovo premenné procesy tepelného deja je možné popísať rovnicou vedenia tepla:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \cdot \nabla \vartheta) = q_e \quad (1)$$

kde ϑ je teplota, ρ je objemová hmotnosť materiálu, c je merná tepelná kapacita, λ je tepelná vodivosť materiálu a q_e je merný tepelný výkon vnútorného zdroja energie v jednotke objemu. Tento merný tepelný výkon zdroja energie q_e sa získa z výpočtu dopadajúceho sálavého toku z výtvarných článkov ohrievacieho telesa na povrch skúmaného materiálu.

Materiálové veličiny λ a c sú nelineárne funkcie teploty. V mnohých aplikáciách tepelného namáhania je možné tieto veličiny definovať ako konštantné. Naproti tomu, pri precíznejšej analýze sa tieto veličiny uvažujú ako funkcie teploty.

Rovnica (1), spolu s vhodnými hraničnými a počiatočnými podmienkami, predstavuje rozloženie teploty v trojrozmernom priestore v ľubovoľnom čase a v ľubovoľnom mieste poľa. Počiatočná teplotná podmienka sa vzťahuje na rozloženie teploty v čase $t = 0$ s, preto táto podmienka sa stanovuje len pri časovo premenných teplotných poliach, kde teplota je funkciou priestorových súradníc a aj času.

V mnohých úlohách tepelného namáhania, hraničné podmienky sa kombinujú s tepelnými stratami spôsobenými prúdením a sálaním. Ako príklad takejto hraničnej podmienky je možné uviesť výraz [2]

$$-\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} = \alpha \cdot (\vartheta_p - \vartheta_0) + c_p \cdot (\vartheta_p^4 - \vartheta_0^4) + q_p \quad (2)$$

kde $\partial \vartheta / \partial n$ je teplotný gradient v smere normály k povrchu v uvažovanom bode, α je koeficient prestupu tepla prostredím, c_p je koeficient sálania šedého povrchu (súčin Stefan-Boltzmannovej konštanty a príslušnej emisivity) q_p je generovaný výkon na povrchu skúmaného materiálu a n vyjadruje normálový vektor k hranici povrchu.

Ak je ohrievané teleso symetrické pozdĺž osi symetrie, Neumannova hraničná podmienka má tvar

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

Neumannova hraničná podmienka vyjadruje skutočnosť, pri ktorej teplotný gradient v smere normály k osi symetrie je rovný nule. Alebo inými slovami, v osi symetrie neprebíha žiadna výmena tepla. Táto hraničná podmienka sa rovnako používa, ak je povrch valcového telesa dokonale izolovaný.

V prípade rozloženia teploty v telese valcového tvaru, rovnicu (1) je možné formálnym prepisom uviesť do tvaru

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + q_e \quad (4)$$

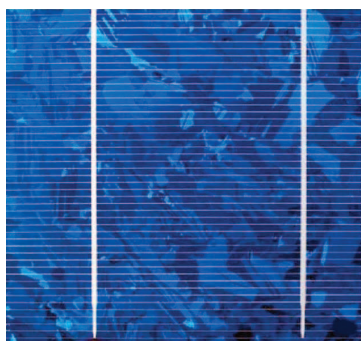
Podobne, rovnica (1) sa môže v pravouhlej sústave súradníc (napr. pre rovinnú dosku, hranol) prepísať do tvaru

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + q_e \quad (5)$$

Rovnice (4) a (5) spolu s hraničnými podmienkami (2) a (3) sa najviac používajú pri matematickom modelovaní tepelných procesov.

III. VÝPOČET ROZLOŽENIA TEPLOTNÉHO POĽA FV ČLÁNKU

Pre stanovenie rozloženia teplotného poľa bol vybraný kremíkový FV článok podľa obr. 2.



Obr. 2. Grafické znázornenie FV bunky, panela a poľa

Materiálové vlastnosti panela (predpokladá sa len Si) a kontaktov (Ag) zadané v simulačnom prostredí sú nasledovné:

Doštička (Si):

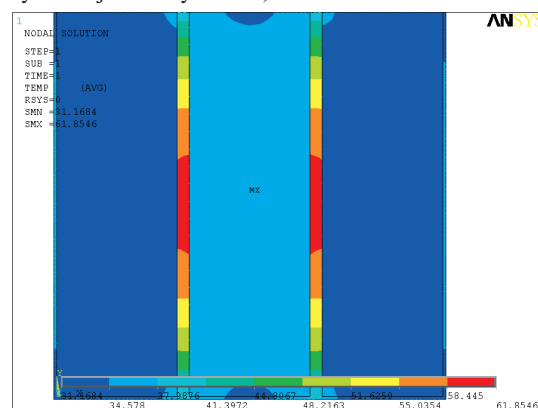
- koeficient tepelnej vodivosti $\lambda = 149 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- hmotnostná tepelná kapacita $c = 700 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- objemová hmotnosť $\rho = 2329 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Kontakty (Ag):

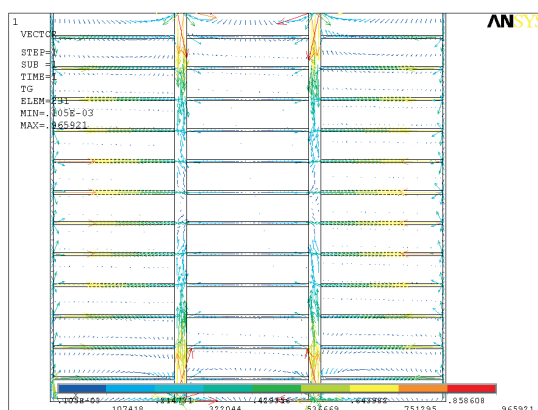
- koeficient tepelnej vodivosti $\lambda = 429 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- hmotnostná tepelná kapacita $c = 240 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- objemová hmotnosť $\rho = 10490 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

Predpokladaná teplota okolia sa uvažuje $\vartheta_0 = 25 \text{ C}$, ako aj počiatočná teplota celého FV článku. Uvažuje sa, že výkon jedného FV článku o rozmeroch $125 \times 125 \text{ mm}$ je 5 W . Koeficient prestupu tepla α je stanovený na $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, nakoľko jednotlivé FV články sú

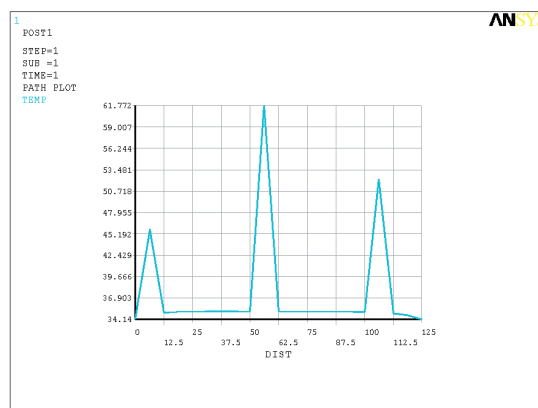
poukladané jeden vedľa druhého do modulu (tento koeficient bol aplikovaný na krajné strany článku).



Obr. 3. Priebeh rozloženia teploty FV článku (pohľad spredu)



Obr. 4. Priebeh rozloženia teplotného gradientu FV článku (pohľad spredu)

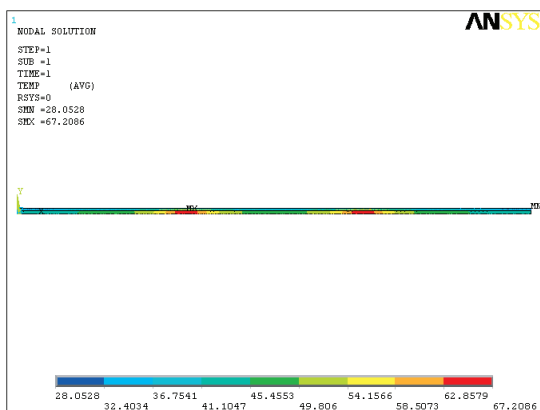


Obr. 5. Grafické znázornenie teploty od vzdialenosti - „stredová línia“ pohľad spredu

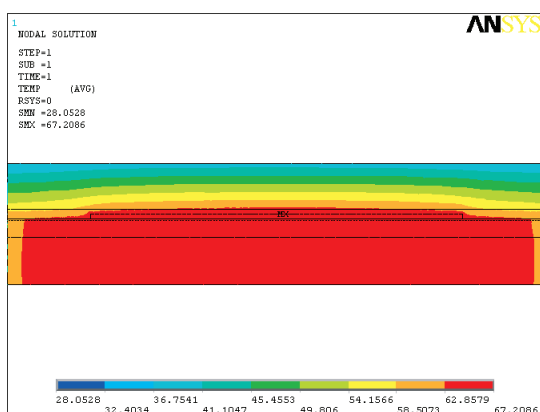
Materiálové vlastnosti pre riešenie rozloženia teplotného poľa z boku (podľa obr. 1) sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

TABUĽKA I
Materiálové vlastnosti FV článku

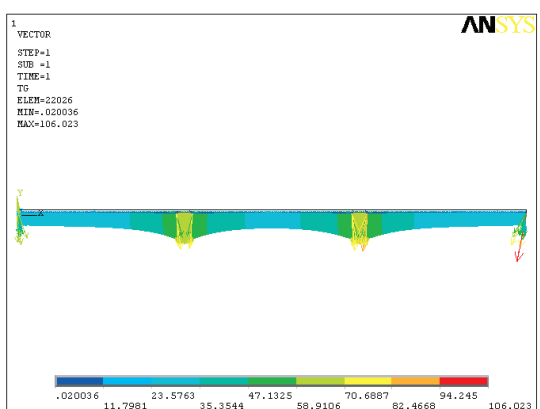
| Vrstva | λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] |
|--|--|---|--|
| Sklo | 1,38 | 840 | 3800 |
| Antireflexná vrstva (SiO_2) | 1,04 | 703 | 2648 |
| Kontakty (Ag) | 429 | 240 | 10490 |
| N-typ kremíka (Si + P) | 155 | – | – |
| P-typ kremíka (Si + B) | 149 | 700 | 2329 |
| Zadná platňa (Al) | 237 | 910 | 2700 |



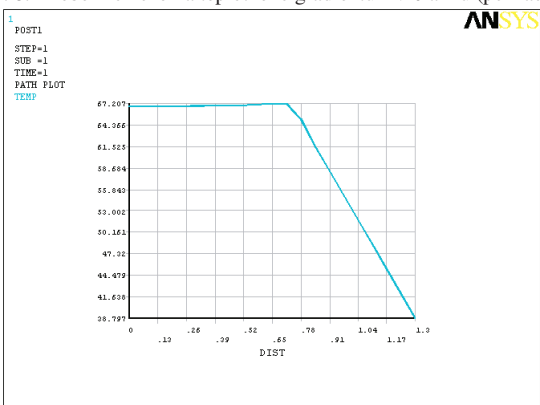
Obr. 6. Priebeh rozloženia teploty FV článku (pohľad z boku)



Obr. 7. Detailný pohľad na obr. 6 v mieste kontaktu



Obr. 8. Priebeh rozloženia teplotného gradientu FV článku (pohľad z boku)



Obr. 9. Grafické znázornenie teploty od vzdialenosti – „stredová línia“ pohľad z boku v mieste kontaktu – smer: od zadnej spodnej platne k prednému sklu)

Aj v simulácii pohľadu z boku sa predpokladala teplota okolia $\vartheta_0 = 25\text{ C}$, ako aj počiatočná teplota celého FV článku. Uvažovalo sa, že výkon jedného FV článku, o rozmeroch $125 \times 125\text{ mm}$, je 5 W . Koefficient prestupu tepla α bol stanovený na $3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (z bočných stien), $5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (z oblasti skla), $2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (zospodu).

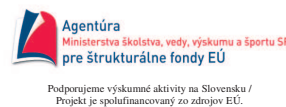
IV. ZÁVER

V tomto príspevku boli predstavené výsledky riešenia rozloženia teplotného poľa kremíkových fotovoltaických článkov. Z priebehov na obr. 3 a obr. 6 je, podľa stanovených vstupných údajov koeficientov prestupu tepla do okolia, zrejme, že najvyššia teplota sa dosahuje prechodom jednosmerného prúdu v oblasti kontaktov. Pri uvažovaní vyššej teploty okolia (v slnečných dňoch) a emisivity povrchu FV článku (tmavý povrch) by daný FV článok dosahoval značne vyššie teploty sú ako prezentované v tomto príspevku.

Z tohto dôvodu je potrebné navrhnuť a doplniť FV článok o chladiacu spodnú vrstvu, prípadne zabezpečiť vhodné zníženie teploty odvodom tepla.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Výskum charakteristík fotovoltaických komponentov pre efektívne projektovanie solárnych systémov, s kódom ITMS: 26220220080, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



LITERATÚRA

- [1] Novák, P., Medveď, D.: *Premeny elektrickej energie*. Košice: Technická univerzita. 2012. 194 s. ISBN 978-80-553-0883-8.
- [2] Novák, P.: *Elektrické teplo*. Košice. Equilibria. 2010. ISBN978-80-89284-48-1.
- [3] Rot, D. *Efektívni řešení fyzikálně sdružených problémů z oblasti elektrotepelných technologií*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2009, 165 s.
- [4] Rot, D., Kožený, J. *Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukci ve studeném kelímku*. ElectroScope, 2010, roč. 2010, č. 4, s. 1-6. ISSN: 1802-4564.
- [5] Medveď, D.: *Možnosti zvýšenia účinnosti fotovoltaických panelov*. In: Elektroenergetika. Roč. 4, č. 1 (2011), s. 29-32. - ISSN 1337-6756.
- [6] Medveď, D.: *Využitie numerických metód pri tepelnom namáhaní vzoriek*. In: ELEN 2008 : Odborná konferencia : Masarykova kolej, Praha 6 - Dejvice, 2.-3. září 2008. Praha : ČVUT, 2008. p. 1-4. ISBN 978-80-254-2293-9.
- [7] Medveď, D.: *Modeling of electromagnetic and thermal fields in induction heating*. In: ELEKTROENERGETIKA 2011 : proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering : 21. - 23.9.2011, Stará Lesná, Slovak Republic. - Košice : TU, 2011 S. 157-163. - ISBN 978-80-553-0724-4

ADRESY AUTOROV

Ing. Dušan Medveď, PhD., prof. Ing. Michal Kolcun, PhD., Ing. Daniel Hlubeň, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Dusan.Medved@tuke.sk, Michal.Kolcun@tuke.sk, Daniel.Hluben@tuke.sk

Ing. Rastislav Stolárik, Ing. Štefan Vaško, VÁDIUM s.r.o., Plzenská 2, Prešov, Slovenská Republika, stolarik@vadium.sk, vasko@vadium.sk