

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

## Modelovanie elektromagnetických polí v okolí fotovoltických článkov

Tento príspevok sa zaoberá riešením rozloženia elektromagnetického poľa v okolí fotovoltických článkov, resp. modulov, polí.

Kľúčové slová: fotovoltický článok, elektromagnetické pole, ANSYS

### I. ÚVOD

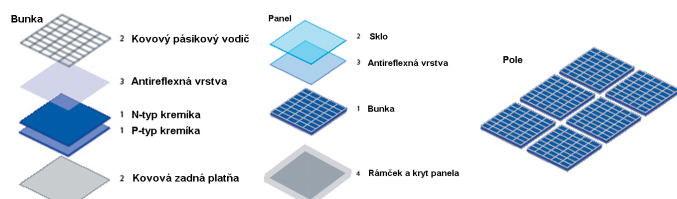
Fotovoltický (FV) článok je polovodičová súčiastka, ktorá priamo konvertuje svetelnú energiu na energiu elektrickú pomocou fotoelektrického javu. Fotovoltické články majú v súčasnosti množstvo aplikácií. FV články sa používajú napríklad na napájanie malých zariadení, ale využívajú sa aj na generovanie veľkých výkonov, kde sa zapájajú do jednotlivých modulov, tie do polí a vytvárajú fotovoltické 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, zapojenie FV článkov, ...),
- atď.

Ako už bolo vyššie spomenuté, počet slnečných dní a zapojenie FV článkov v module pomerne značne ovplyvňuje účinnosť FV článku. Zistenie presného rozloženia elektromagnetického (EM) poľa pomôže navrhnúť a zvoliť optimálny tvar, materiál, prúdové vodivé cesty FV článku, prípadne pridať dodatočné tieniace zariadenie pre zníženie vplyvu elektromagnetického poľa celého panela (modulu).

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



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

### II. MATEMATICKÉ MODELOVANIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA

Metóda výpočtu elektromagnetického poľa spočíva riešení Maxwellových rovníc. Pre všeobecné časovo premenné

elektromagnetické polia je možné Maxwellove rovnice napísať v diferenciálnom tvare ako

$$\text{(Ampérov zákon)} \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{(Faradayov zákon)} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{(Gaussov zákon)} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho \quad (4)$$

kde  $\mathbf{E}$  je elektrická intenzita,  $\mathbf{D}$  je elektrická indukcia,  $\mathbf{H}$  je magnetická intenzita,  $\mathbf{B}$  je magnetická indukcia,  $\mathbf{J}$  je vodivostná hustota prúdu a  $\rho$  je hustota elektrického náboja.

Vyššie popísané Maxwellove rovnice sú neúplné, pretože počet rovníc je menší ako počet neznámych. Tieto rovnice sa stanú úplnými, ak sa upresnia vzťahy medzi jednotlivými veličinami poľa. Nasledovné doplnujúce vzťahy platia pre lineárne izotropné prostredie

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E} \quad (7)$$

kde parametre  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  a  $\gamma$  označujú relatívnu permitivitu, relatívnu magnetickú permeabilitu a elektrickú konduktivitu materiálu (pozn.  $\gamma = 1/\rho$ , kde  $\rho$  je elektrická rezistivita). Konštanta  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  (alebo  $\text{Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) sa nazýva permeabilita vákuu a podobne  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  sa nazýva permitivita vákuu. Obe veličiny, relatívna magnetická permeabilita  $\mu_r$  a relatívna permitivita  $\epsilon_r$  sú bezrozmerné a majú veľmi podobný zmysel. Relatívna magnetická permeabilita vyjadruje schopnosť materiálu lepšie viesť magnetický tok ako vo vákuu. Tento parameter je veľmi dôležitý pri výbere materiálov, ktoré majú absorbovať magnetický tok.

Za predpokladu, že veličiny elektromagnetického poľa v Maxwellových rovniciach sú časovo premenné harmonické veličiny, je možné tieto rovnice ďalej zjednodušiť vykonaním niekoľkých úkonov vektorovej algebry a následne získať vzťahy

$$\frac{1}{\gamma} \cdot \nabla^2 \mathbf{H} = \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\mu_r} \cdot \nabla^2 \mathbf{E} = \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{E} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J}_z + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mathbf{A} \quad (10)$$

Využitím rovníc (8) až (10) s príslušnými hraničnými podmienkami je možné vyriešiť časové premenné harmonické pole (pre veličiny  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  alebo  $\mathbf{A}$ ).

Rovnice (8) až (10) sú platné pre všeobecné 3-rozmerné polia a umožňujú stanoviť požadované parametre systému ako prúd tečúci vodičmi, výkon a hustotu naindukovaného prúdu v okolitých kovových častiach.

Hoci je vo všeobecnosti dôležité stanoviť úlohu ako trojrozmernú, vo veľkej väčšine prípadov riešenia rozloženia EM poľa postačuje, ak sa úloha spracuje ako dvojrozmerná alebo jednorozmerná. Zjednodušenia sa môžu týkať napríklad aplikácií, v ktorých sa vyskytuje solenoidová cievka a v ktorých smer vektorov  $\mathbf{A}$  a  $\mathbf{E}$  pri pozdĺžnom priereze má len jednu zložku, ktorou je smer súradnice  $z$ . V priečnom priereze, vektory  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{B}$  majú tiež len jednu zložku. Tento fakt dovoľuje zjednodušiť trojrozmerné pole na dvojrozmerné pole. Napríklad, v prípade magnetického vektorového potenciálu, rovnica (10) sa môže vyjadriť v dvojrozmernej pravouhlej sústave súradníc ako

$$\frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial y^2} \right) = -\mathbf{J}_z + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mathbf{A} \quad (11)$$

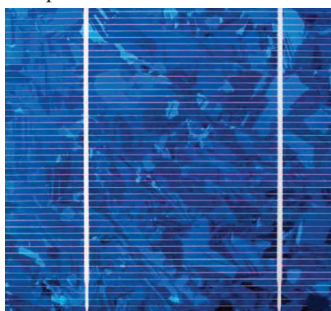
a pre osovosymetrickú polárnu sústavu súradníc ako

$$\frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial z^2} - \frac{\mathbf{A}}{r^2} \right) = -\mathbf{J}_z + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mathbf{A} \quad (12)$$

Hranica oblasti je určená tak, aby magnetický vektorový potenciál  $\mathbf{A}$  bol nulový pozdĺž hranice (Dirichletova podmienka) alebo jeho gradient bol zanedbateľne malý pozdĺž hranice v porovnaní s jeho hodnotou niekde v oblasti (v tesnej blízkosti hranice) (Neumannova podmienka  $\partial \mathbf{A} / \partial t = 0$ ). Teda, elektromagnetický problém je možné určiť prostredníctvom vzťahov pre  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  alebo  $\mathbf{H}$ . Na druhej strane, určenie správneho matematického modelu elektromagnetického poľa môže byť problematické, pretože pre rôzne aplikácie môže byť rôzny.

### III. RIEŠENIE ROZLOŽENIA ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA FV ČLÁNKU

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



Obr. 2. Fotovoltaický polykrystalický kremíkový článok

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

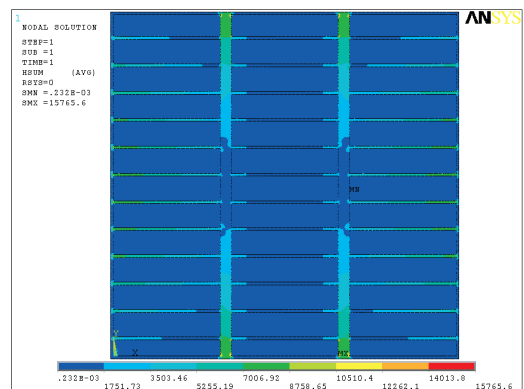
Doštička (Si):

- elektrická rezistivita  $\rho_{el} = 6,4 \cdot 10^2 \Omega \cdot m$ ,
- magnetická relatívna permeabilita  $\mu_r = 0,99995$ ,
- hmotnostná tepelná kapacita  $c = 700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- objemová hmotnosť  $\rho = 2329 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

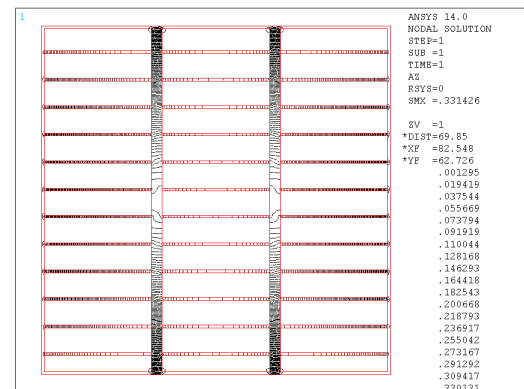
Kontakty (Ag):

- elektrická rezistivita  $\rho_{el} = 15,87 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$ ,
- magnetická relatívna permeabilita  $\mu_r = 0,99998$ ,
- hmotnostná tepelná kapacita  $c = 240 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- objemová hmotnosť  $\rho = 10490 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

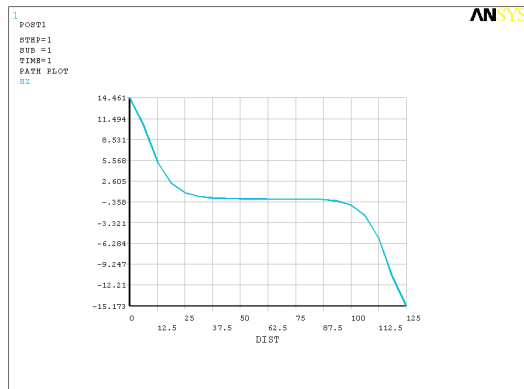
Predpokladané okolité prostredie sa uvažuje vzduch s  $\mu_r = 1$ . Uvažuje sa, že výkon jedného FV článku o rozmeroch  $125 \times 125 \text{ mm}$  je  $5 \text{ W}$  (t.j. hustota prúdu  $125 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ ).



Obr. 3. Priebeh rozloženia magnetickej intenzity EMP v okolí FV článku (pohľad spredu)



Obr. 4. Priebeh rozloženia siločiar magnetickeho poľa FV článku (pohľad spredu)

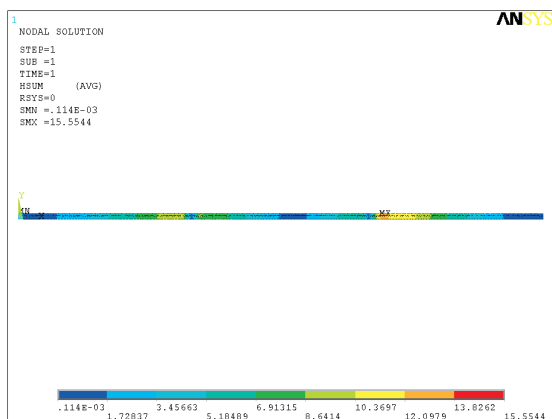


Obr. 5. Grafické znázornenie závislosti magnetickej intenzity od vzdialenosti – „stredová línia zdola-nahor“ (pohľad spredu)

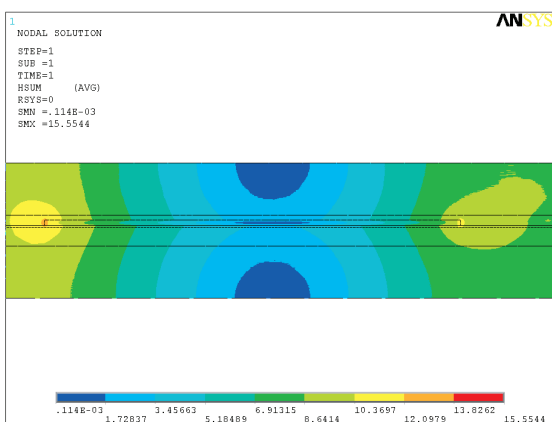
Materiálové vlastnosti pre riešenie rozloženia magnetického poľa FV článku z boku (podľa obr. 1) sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

TABUĽKA I  
Materiálové vlastnosti FV článku

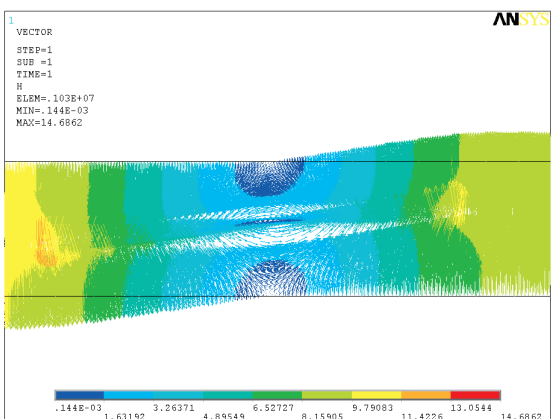
Vrstva	$\mu_r$ [-]	$\rho_{el}$ [ $\Omega\cdot m$ ]
Sklo	0,99995	$10^{14}$
Antireflexná vrstva ( $SiO_2$ )	0,99996	$10^{16}$
Kontakty (Ag)	0,99998	$15,87\cdot 10^{-9}$
N-typ kremíka (Si + P)	0,99995	$6,4\cdot 10^2$
P-typ kremíka (Si + B)	0,99995	$6,4\cdot 10^2$
Zadná platňa (Al)	1,000022	$28,2\cdot 10^{-9}$



Obr. 6. Priebek rozloženia magnetickej intenzity FV článku (pohľad z boku)



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



Obr. 8. Priebek rozloženia gradientu intenzity magnetického poľa FV článku (pohľad z boku)

Aj v simulácii pohľadu z boku sa predpokladalo, že výkon jedného FV článku, o rozmeroch  $125\times 125$  mm, je 5 W.

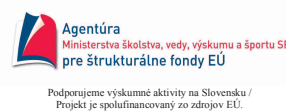
#### IV. ZÁVER

V tomto príspevku boli predstavené výsledky riešenia rozloženia elektromagnetického poľa kremíkových fotovoltaických článkov. Z priebehov na obr. 3 a obr. 6 je, podľa stanovených vstupných údajov, zrejme, že najvyššia hodnota intenzity EM poľa sa dosahuje v oblasti kontaktov prechodom jednosmerného prúdu (povrchové krajné vrstvy). Pri uvažovaní vyššej hodnoty prechádzajúceho prúdu kontaktmi (paralelné zapojenie FV článkov) by daný FV článok dosahoval vyššie hodnoty magnetickej intenzity ako sú prezentované v tomto príspevku.

Z vypočítaných údajov je zrejme, že pri danej konfigurácii by FV články neovplyvňovali okolité zariadenia a neohrozovali obsluhu, preto nie je potrebné uskutočniť dodatočné EM tienenie.

#### 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](mailto:Dusan.Medved@tuke.sk), [Michal.Kolcun@tuke.sk](mailto:Michal.Kolcun@tuke.sk), [Daniel.Hluben@tuke.sk](mailto:Daniel.Hluben@tuke.sk)

Ing. Rastislav Stolárik, Ing. Štefan Vaško, VÁDIUM s.r.o., Plzenská 2, Prešov, Slovenská Republika, [stolarik@vadium.sk](mailto:stolarik@vadium.sk), [vasko@vadium.sk](mailto:vasko@vadium.sk)