

Dušan Medveď, Michal Kolcun, Jaroslav Petráš, Rastislav Stolárik, Štefan Vaško

## Farbivom senzitivované slnečné články (DSSC)

Tento príspevok sa zaoberá predstavením výhod využitia farbivom senzitivovaných slnečných článkov (DSSC). Nakoľko nastal veľký rozmach fotovoltaických výrobní, s ich náhlym nasadením sa objavili mnohé nepredvídané problémy, ako napríklad náhle zníženie výkonu pri zamračenom počasi. Preto sa začali vyvíjať a upravovať fotovoltaické články, ktoré by pracovali takmer s konštantným výkonom za rôzneho počasia. DSSC články sú takouto alternatívou, ktorá ponúka pri pomerne priaznivej cene dodávku stabilného výkonu.

Kľúčové slová: DSSC, fotovoltaický článok

This paper deals with the benefits of the use of Dye Sensitized Solar Cells (DSSC). Since there was a great expansion of electricity production from photovoltaic power plants, with their sudden deployment there raised many unpredicted problems, such as a sudden decrease in power on cloudy weather. Therefore companies started to develop and modify photovoltaic cells, which worked with almost constant power. DSSC cells are such an alternative that offers at relatively competitive price stable supply of power.

Keywords: DSSC, photovoltaic cell

### I. ÚVOD

Farbivom senzitivované slnečné články (DSSC), niekedy tiež označované ako farbocitlivé články (DSC), sú fotovoltaické (slnečné) články tretej generácie, ktoré premieňajú akékoľvek viditeľné svetlo na elektrickú energiu.

Táto nová trieda pokročilých slnečných článkov by sa dala porovnať k umelej fotosyntéze podľa spôsobu, akým sa napodobňuje vstrebávanie svetelnej energie v prírode.

Farbivom senzitivované slnečné články (DSSC) boli vynájdené v roku 1991 profesorom Michaelom Grätzelom a Dr. Brianom O'Reganom na École Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), vo Švajčiarsku a preto sa často nazývajú tieto články ako Grätzelove články, alebo v skratke GCell.

DSSC technológia môže byť mnohako využitá, pretože aplikácie DSSC článkov nemajú hraníc a môžu sa použiť v širokom rozsahu svetelných podmienok ako v exteriéri, tak i v interiéri a umožňujú užívateľom premeniť prirodzené i umelé svetlo na užitočnú energiu pre napájanie širokej škály elektronických zariadení [1].

### II. ROZDELENIE FOTOVOLTICKÝCH ČLÁNKOV PODĽA GENERÁCIE

Fotovoltaické články majú za sebou takmer 68 rokov vývoja. Prvý patent na solárny článok bol podaný v roku 1946 Russelom Ohlom, ktorý taktiež stál na počiatku rozvoja kremíkových solárnych článkov. Odvtedy bol vyvinutý celý rad konštrukcií, typov s využitím rôznych materiálov. Doposiaľ existujú štyri generácie fotovoltaických článkov [3]:

**Prvá generácia:** Je tvorená fotovoltaickými článkami z doštičiek monokryštalického kremíka, v ktorých je vytvorený veľkoplošný P-N prechod. Sú dnes najpoužívanejšou technológiou na trhu (cca 90 %), hlavne na veľké inštalácie. Komerčne sa začal ich predaj niekedy v sedemdesiatych rokoch 20. storočia. I napriek tomu, že je ich výroba náročná a pomerne drahá (je to spôsobené hlavne drahým vstupným materiálom – veľmi čistým kremíkom), budú ešte v niekoľkých ďalších rokoch pravdepodobne vládnuť na trhu.

**Druhá generácia:** Dôvodom pre rozvoj článkov druhej generácie bola hlavne snaha o zníženie nákladov na výrobu – úsporou drahého

základného materiálu, čistého kremíka, sa výrazne zlacní výroba. Články druhej generácie majú 100-krát až 1000-krát tenšiu aktívnu absorpčnú polovodičovú vrstvu (takzvaný thin-film). Najbežnejšie sú články z polykryštalického, amorfného a mikrokryštalického kremíka. Využitie nachádzajú aj materiály ako silicon-germanium, či silicon-karbid, ale taktiež tzv. zmesové polovodiče z materiálov ako Cu, In, Ga, S, Se, označované vo všeobecnosti ako CIS štruktúry. Ich hlavnou nevýhodou je však nižšia účinnosť (v sériovej výrobe cca pod 10 %, účinnosť ďalej klesá časom) a menšia stabilita. V posledných rokoch našli tenkovrstvové články využitie hlavne v aplikáciách, ktoré vyžadujú ohybnosť a pružnosť (napríklad súčasť oblečenia). Komerčne sa začali články druhej generácie predávať v polovici osemdesiatych rokov.

**Tretia generácia:** Predstavuje akúsi revolúciu vo fotovoltaike. Zaraďujeme sem systémy využívajúce k separácii nábojov aj iné metódy ako P-N prechod a často tiež aj iné materiály ako len polovodiče. Hlavným cieľom je predovšetkým snaha o maximalizáciu počtu absorbovaných fotónov a následne generovaných párov elektrón-diera („prúdový zisk“), ale aj maximalizáciu využitia energie dopadajúcich fotónov („napäťový“ zisk fotovoltaických článkov). Jedná sa predovšetkým o fotoelektrochemické články a polymérické články. Ich zloženie spočíva v polymére s konjugovanými dvojnými väzbami a molekulách Fullerenu [4]. V súčasnej dobe sa výskum zameriava tiež na viacvrstvové solárne články (z tenkých vrstiev), články s viacnásobnými pásmi, články, ktoré by využívali „horúcich“ nosičov náboja pre generáciu viac párov elektrón-diera. Uplatňujú sa tiež nanoštruktúry vo forme uhlíkových nanotrubičiek alebo nanotyčieniek, alebo štruktúry vytvorené nanosením takzvaných kvantových bodiek na vhodnú podložku. Výhodou týchto štruktúr je možnosť cieľového vyladenia optických a elektrických vlastností. Nie sme teda závislí len od štruktúr, ktoré nám poskytuje príroda a Mendelejevova tabuľka prvkov. Praktické využitie týchto článkov je zatiaľ nízke (nízka účinnosť, malá stabilita vlastností a životnosti). Zatiaľ najbližšie ku komerčnému využitiu majú asi flexibilné fotovoltaické moduly založené na organických polyméroch.

**Štvrtá generácia:** tvoria ju kompozitné fotovoltaické články zložené z jednotlivých vrstiev, ktoré sú schopné využívať širokú časť slnečného spektra. Je to preto, že každá z vrstiev je schopná využiť

svetlo v určitom rozsahu vlnových dĺžok. Žiarenie, ktoré nedokáže využiť prepustí do hlbších vrstiev, kde je následne využité.

### III. AKO FUNGUJE DSSC ČLÁNOK

**Farbivo** je fotoaktívny materiál DSSC, ktorý ak je senzibovaný svetlom, môže vyrábať elektrinu.

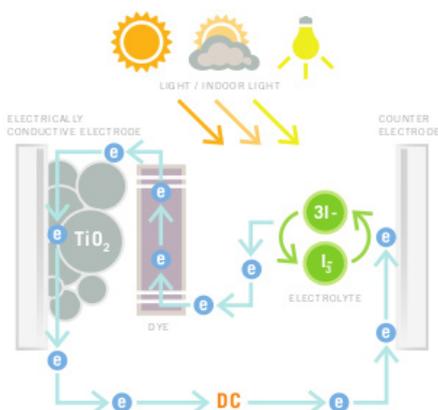
Farbivo zachytáva fotóny dopadajúceho svetla (slnečné svetlo a tiež okolité umelé svetlo) a využíva ich energiu k excitácii elektrónov, teda správa sa ako chlorofyl pri fotosyntéze.

Farbivo vstrekuje tento excitovaný elektrón do oxidu titaničitého (je to biely pigment bežne vyskytujúci sa v bielej farbe).

Elektrón je odvádzaný od nanokryštalického oxidu titaničitého (v malej nano-kryštalickej vrstve oxidu titaničitého).

Chemický elektrolyt v článku potom uzavrie obvod tak, že elektróny sa vrátia späť do farbiva.

Pohyb elektrónov vytvára energiu, ktorú je možné získať napríklad do nabíjateľných batérií, superkondenzátorov alebo iných elektrických zariadení.



Obr. 1. Princíp výroby elektriny v DSSC článku

### IV. VÝHODY NASADENIA DSSC

Výhody farbivom senzitivovaných slnečných článkov sa ukazujú vo využití v rôznych aplikáciách, kde bežné solárne články nie sú vhodné. GCell články typu DSSC sa ukazujú ako jedny z perspektívnych fotovoltických článkov tretieho typu, a sú vhodné aj do aplikácií vo vnútri budov.

#### *Výhody DSSC článkov:*

##### *Výkon aj pri nízkom osvetlení*

GCell články pracujú v širokom svetelnom spektre a za rôznych svetelných podmienok, ktoré robia tieto články vhodné pre aplikácie v miestach so zatienením alebo s difúznym svetlom, bez slnečného žiarenia.

##### *Optimalizovaný výkon*

GCell materiály a farbivá sa môžu vyladiť tak, aby boli optimálne pre rôzne svetelné podmienky, či už pre vnútorné alebo vonkajšie aplikácie.

##### *Výkon aj pri vyššej teplote*

Účinnosť GCell článkov nedegraduje so zvýšenou teplotou, takže je možné aj pri vyššej teplote článkov efektívne získavať energiu na priamom slnku.

##### *Nízke výrobné náklady*

GCell články sú vyrobené nízkoenergetickou sériovou metódou a sú vysoko efektívne.

#### *Ekologicky šetrné solárne články*

GCell používajú lacné a ekologicky šetrné nano-materiály, ktorých je v prírode dostatok, teda nie je obava o ich vyčerpanie.

#### *Rozmanitosť podkladov*

GCell sa vyrábajú na tenkej vrstve, na flexibilnom, robustnom, plastovom podklade. DSSC sa môžu tiež aplikovať na kovový alebo sklenený podklad.

#### *Univerzálna integrácia článkov do rôznych aplikácií*

Vnútorné moduly GCell sú vysoko flexibilné, odolné a ľahké. Vďaka tomu sú veľmi univerzálne a môžu byť začlenené do širokej škály výrobkov.

#### *Predpokladané výhody DSSC do budúcnosti*

DSSC je nová technológia, ktorá bola po prvý raz komerčne využitá spoločnosťou G24 v roku 2009 (pre porovnanie, solárne články prvej generácie boli využité v satelitných aplikáciách v roku 1958). Existuje mnoho ďalších budúcich výhod a možností DSSC, ktoré je možné zahrnúť už pri výrobe, ako napríklad farebný tón, transparentnosť a zvyšovanie vyrábaného výkonu z danej plochy.

### V. EFEKTÍVNOSŤ DSSC

Za posledných 20 rokov sa účinnosť DSSC naďalej zvyšuje a najvyššia účinnosť bola dosiahnutá 15 % profesorom Michaelom Grätzelom a jeho tímom z École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Tieto výskumné články sú vyrobené v laboratórnych podmienkach a neskôr budú prenesené do sériovej výroby.

#### *Meranie efektívnosti DSSC článkov*

Účinnosť DSSC a ďalších solárnych článkov pre vonkajšie použitie, ako sú napríklad stavebné integrované fotovoltické články, sa zvyčajne meria za štandardných testovacích podmienok a to sú teplota 25 °C, ožiarenie 1000 W·m<sup>-2</sup>, hustota vzduchu 1,5 kg m<sup>-3</sup>.

Za týchto testovacích podmienok solárny článok s 1 m<sup>2</sup> plochy a 10 % účinnosťou premeny energie vyrobí 100 W výkonu.

#### *Efektívnosť DSSC pre vnútorné aplikácie*

Naproti tomu, výpočet účinnosti DSSC článkov pre vnútorné aplikácie sa trochu odlišuje. Pre vnútorné priestory hustota vzduchu 1,5 kg m<sup>-3</sup> nie je relevantná pre FV aplikácie.

Napríklad, ak by sme použili realistické vnútorné osvetlenie a povrch pre vnútorné aplikácie, tak podmienky by boli nasledovné: ožiarenie 100 mW·cm<sup>-2</sup>, teda 1 cm<sup>2</sup> plochy článku vyrobí 10 mW pri 10 % účinnosti premeny.

#### *Meranie slnečného výkonu pomocou hustoty energie*

Pomocou hustoty výkonu sa môže realizovať konkrétnejšie meranie výkonu GCell článkov pri vnútorných aplikáciách. Táto metóda využíva výstupný výkon (napr. mikrowatty) pre danú plochu (napríklad na cm<sup>2</sup>) pri danej úrovni svietivosti (napríklad 200 luxov).

#### *Zvyšovanie účinnosti DSSC*

Potenciál na zvyšovanie účinnosti premeny energie DSSC článkov je jedným z dôvodov, pre ktorý sa tieto články považujú za veľmi sľubnú a ekonomicky efektívnu metódu premeny svetla na elektrickú energiu.

Zvyšovanie účinnosti DSSC článkov je podporené v rámci výskumno-vývojových programov v rámci veľkých chemických podnikov, ktoré umožňujú využitie nových kombinácií materiálov, chemického zloženia a bunkových štruktúr. Oblasti, v ktorých je

možné zlepšiť účinnosť sú aj využitie nových farbív, elektrolytov, redoxných párov, fotoanód a zmena konfigurácie tandemových článkov.

Tak napríklad použitie dvoch úrovní tandemových DSSC článkov môže dosiahnuť až 46 % účinnosť premeny (podľa prof. Grätzela).

#### **Teoretická hranica účinnosti DSSC**

Teoretická fotoelektrická hranica účinnosti premeny DSSC článkov, využitím jednoduchého prepojenia za štandardných testovacích podmienok 32 % (podľa prof. Grätzela).

Dvojstupňový tandemový DSSC článok by mohol dosiahnuť za rovnakých podmienok 46 % účinnosť. Vyšší stupeň účinnosti, do 40 %, by mohol byť dosiahnutý pri vnútorných aplikáciách alebo difúznom svetle, ak je vo svetle aspoň malý obsah infračerveného žiarenia.

### **VI. FLEXIBILNÉ SOLÁRNE ČLÁNKY**

Flexibilné solárne články od spoločnosti G24 Power sú pomerne ľahké a tenké, ale dosť robustné a odolné na to, aby vydržali každodenné použitie.

**Vysoko flexibilné** – boli tak testované, aby vydržali ohýbanie viac ako 10 000-krát do polomeru 25 mm, a ich výkon bol bez poklesu.

**Robustné** – sú dostatočne pevné, aby vydržali určitý náraz, teda nie je pri nich strach z rozbitia.

**Tenké** – približne 1 mm hrubá vrstva (cca hrúbka kreditnej karty) je potrebná pre dané články, ak by sa pridali na vhodné aplikácie.

**Ľahké** – sú ľahšie v porovnaní s krehkými sklenenými modulmi, teda je jednoduchšia preprava a nižšie riziko rozbitia počas prepravy.

#### **Precízne skonštruovanie pre každodenné použitie**

GCell články sú presne navrhnuté na flexibilných materiáloch a tak dávajú dizajnérom univerzálny nástroj s flexibilnými solárnymi článkami, ktoré môžu zapracovať do rôznych aplikácií. Na rozdiel od pevných sklenených solárnych článkov, tieto články majú nízky profil, a tak aj lepšiu integráciu do príslušnej aplikácie. GCell sa často integrujú do tenkej vrstvy aplikácií s dobrým vzhľadom a tak, aby vonkajšia plocha bola čo najviac orientovaná k svetelnému zdroju a mohla tak získavať čo najviac energie zo svetla.

Ako jedna z potenciálnych úspor pri nasadení na už existujúce aplikácie je, že tieto pružné solárne články postačujú zafixovať na danú aplikáciu len obojstrannou lepiacou páskou, prípadne iným spôsobom. Články GCell nie je potrebné umiestňovať do špeciálneho rámečka a chrániť sklenenú vrstvu ako pri konvenčných kremíkových článkoch.

Výroba solárnych článkov na ľahkých pružných podkladoch tiež umožňuje, aby boli výrobky navrhnuté so zníženou hmotnosťou (menej materiálu) a tak môže vzniknúť trh s novými ľahšími produktmi obsahujúcimi články GCell.



Obr. 2. Flexibilné GCell články

#### **Prospešnosť pre koncového užívateľa**

Mechanicky robustné a flexibilné solárne články, ktoré sa používajú zaintegrované v prenosnej elektronike (mobilný telefón, ovládač k TV, myš, klávesnica, ...), dávajú užívateľovi voľnosť v pohybe bez káblov a tiež užívateľ tak môže vďaka nim využívať zariadenia, bez toho, aby ich musel často nabíjať. Ich tvarová variabilnosť a farebný odtieň dopĺňa atraktivitu danej aplikácie.

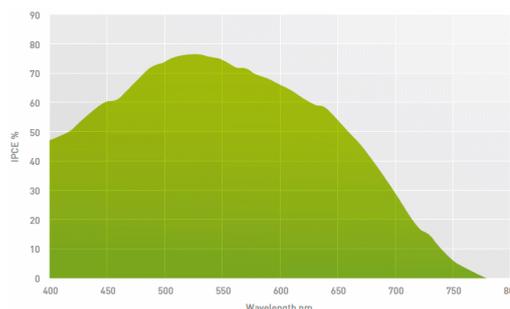
### **VII. DSSC ČLÁNKY PRE VNÚTORNÉ POUŽITIE**

GCell je jednou z prvých volieb pre návrhárov a elektroinžinierov, ktorí hľadajú DSSC pre vnútorné aplikácie, sú flexibilné a majú pomerne dobrú výkonnosť pri nízkej intenzite svetla. S článkom GCell sa stáva každý zdroj svetla zdrojom energie.

GCell sa môžu začleniť do širokého spektra vnútorných a prenosných aplikácií, ktoré využívajú nabíjateľné batérie, super kondenzátory alebo priamo napájajú niektoré spotrebiče a využívajú jednorazové batérie (typu AA).

Výstup z GCell článkov, rovnako ako vo všetkých ostatných vnútorných solárnych článkoch, sa líši v závislosti od typu zdroja svetla, ktorému sú vystavené. Je to preto, lebo účinnosť fotoelektrickej premeny sa mení v závislosti od vlnovej dĺžky a intenzity dopadajúceho svetla.

Absorpčné spektrum GCell článkov je v rozmedzí od 390 až 700 nm. Vrchol absorpcie je približne v rozsahu 500 až 550 nm.

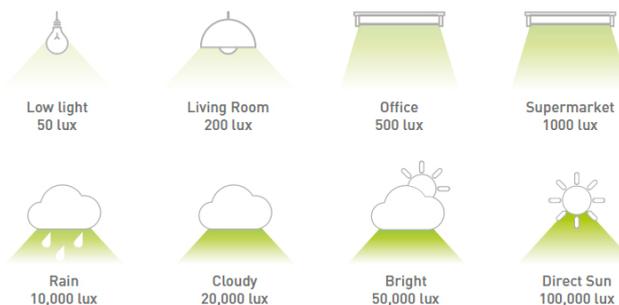


Obr. 3. Graf závislosti účinnosti fotoelektrickej premeny v závislosti od vlnovej dĺžky

#### **Použitie GCell DSSC článkov pre vnútorné aplikácie**

GCell sú stále použiteľné vo vnútorných priestoroch budov aj pri pomerne zlých svetelných podmienkach. Osvetlenie interiéru je zvyčajne uvedené v jednotkách lux. Táto jednotka osvetlenosti je založená na spektrálnej citlivosti ľudského oka, t.j. na viditeľnom svetle.

GCell pracujú v širokom rozsahu vnútorných svetelných podmienok od zlých svetelných podmienok (50 lux) po slabú osvetlenú obývaciu izbu (cca 200 lux), až po silne osvetlené supermarket (1000 lux).



Obr. 4. Príklad osvetlenosti pre jednotlivé priestory a zdroje svetla

GCell články boli naladené na vnútorné svetelné podmienky a tak poskytujú vyšší výkon. Spektrálna odozva GCell článku je podobná ľudskému oku; infračervené a ultrafialové svetlo majú len malý vplyv na jeho energetickú účinnosť.

#### Nastavenie uhla dopadu

Svetlo vo vnútri budov je už difúzne (je rozptýlené), ako napr. svetlo z fluorescenčných trubíc (výbojok), takže vplyv svetla na uhol dopadu nemá veľký vplyv. Vzhľadom k tomu, že difúzne svetlo a uhol dopadu nemajú až taký veľký vplyv na účinnosť, intenzita osvetlenia má vplyv na účinnosť a teda aj na výstupný výkon GCell článkov.

Dokonca aj pri vonkajších svetelných podmienkach, účinnosť fotoelektrickej premeny GCell článkov nemá až taký rapidný vplyv na uhol dopadu. Nastavenie uhla dopadu v rozpätí od 60° do 90° vplyva na účinnosť približne 5 percentami.

### VIII. UMEĽÁ FOTOSYNTÉZA

Umeľá fotosyntéza je fráza zavedená profesorom Michaelom Grätzelom, ktorá popisuje funkciu farbivom senzitivovaných slnečných článkov. Podobne ako list zo stromu, GCell zbiera energiu zo svetla a transformuje ju na využiteľnú energiu („palivo“).

Mnoho nových vedeckých technológií hľadá nové smery na výrobu čistého paliva bez toho, aby sa produkovali akékoľvek škodlivé vedľajšie produkty, ako napríklad skleníkové plyny. Umeľá fotosyntéza má potenciál na výrobu paliva pre dopravu vo forme kvapalného vodíka (Liquid Hydrogen – LH2) a paliva na báze uhlíka pre priemysel, ako je metanol (CH3OH).

#### Napodobňovanie fotosyntézy

Odpoveď na otázku, čo presne sa deje v rastlinách pri dopade slnečného žiarenia, nie je jednoduchá. Vývoj rastlín sa vyvíjal miliardy rokov, až pokým sa vyvinul spôsob efektívneho využitia slnečnej energie fotosyntézou.

GCell články používajú napodobňovanie umelej fotosyntézy a vyrábajú elektrinu, ktorá sa použije na nabíjanie batérií alebo priamo na napájanie rôznych aplikácií. Využívanie energie dostupnej v slnečnom žiarení a čiastočne aj na recykláciu svetla z vnútorných priestorov, je jednou z ciest pre nájdenie trvalého zdroja energie a tiež oblasť, v ktorej sa môže veda a výskum zdokonaľovať.

#### Aplikácie umelej fotosyntézy

GCell článkom sa podarilo replikovať prírodnú fotosyntézu a tiež priniesť nové objavy v oblasti fyziky, chémie, vedy o materiáloch a nanotechnológiách a tiež vytvoriť nové obchodné príležitosti pre aplikovanie článkov do prenosných zariadení, kde sa klasické kremíkové fotovoltaické články nedajú použiť.

GCell články efektívne využívajú proces umelej fotosyntézy, ktorý je lacný a má široké uplatnenie. Vďaka svojej schopnosti využiť pomerne nízke osvetlenie alebo difúzne svetlo, GCell články majú veľký potenciál uplatniť sa v širokej škále trhu, kde sa iné fotovoltaické technológie neuplatnili.

Vnútorné, prenosné a/alebo nositeľné aplikácie pre získavanie energie sa budú v budúcnosti častejšie objavovať vďaka GCell článkom a ponúknu tak rozvoj nových aplikácií.

#### Príklady využitia GCell článkov

- *Spotrebná elektronika:* hodinky, čítačka kníh, bezdrôtová klávesnica a myš, diaľkový ovládač, mobilný telefón, tablet;
- *Senzory a akčné členy:* ovládacie prvky, detektory pohybu/dymu,...., motorizované žalúzie, bezdrôtové snímače;
- *Malo/veľkoobchod:* elektronické cenovky, hovoriace akciové letáky, napájané bezkontaktné karty s čipom, označovače tovaru proti odcudzeniu, a pod.

### IX. VYUŽITIE DSSC ČLÁNKOV V PROJEKTE

V projekte s ITMS kódom 26220220080 budú použité DSSC články s kremíkovou vrstvou a umelým farbivom (farbivo 535-bisTBA, farbivo 505, farbivo 620-1H3TBA). Typ farbiva a jeho hrúbka má vplyv na účinnosť premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu.

#### 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 ITMS kódom: 26220220080, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

#### LITERATÚRA

- [1] G24 Power Limited: *Dye Sensitized Solar Cells*. [online] [cit. 24.7.2014] Dostupné na internete: < <http://gcell.com/dye-sensitized-solar-cells> >
- [2] Czech RE Agency: *Fotovoltaika pro každého*. [online]. [cit. 24.7.2014]. Dostupné na internete: < <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika> >
- [3] Isolar: *Stručný generačný vývoj*. [online]. [cit. 24.7.2014]. Dostupný na internete: < [http://www.isolar.cz/?p=p\\_3&sName=technologie](http://www.isolar.cz/?p=p_3&sName=technologie) >
- [4] *Fullerene*. [online]. [cit. 24.7.2014]. Dostupný na internete: < <http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene> >

#### ADRESY AUTOROV

Ing. Dušan Medveď, PhD., Dr.h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD., Ing. Jaroslav Petráš, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Dusan.Medved@tuke.sk, Michal.Kolcun@tuke.sk, Jaroslav.Petras@tuke.sk

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