

Marek Pavlík, Ľubomír Beňa, Dušan Medveď, Zsolt Čonka, Michal Kolcun, Vladimír Kohan, Rikin Jitendrakumar Tailor, Róbert Štefko

## Vplyv defektov fotovoltického článku na výrobu elektrickej energie

Obnoviteľné zdroje sú v súčasnosti veľmi využívaným zdrojom elektrickej energie. Podporované sú aj v rámci Európskej únie. Vady fotovoltických panelov sa často vyskytujú počas implementácie a prevádzky fotovoltických panelov. Nie všetky vady sú viditeľné. V praxi sa stáva, že sa nevenuje pozornosť poruchám, ktoré sa vyskytnú počas prevádzky fotovoltickej elektrárne. Tieto poruchy spôsobujú pokles výroby elektriny, čo znižuje účinnosť tohto obnoviteľného zdroja. Tento článok popisuje chyby, ktoré sa vyskytujú počas implementácie a prevádzky fotovoltického panelu. Na základe vykonaných simulácií autori popisujú, ako vady ovplyvňujú výkonnosť fotovoltického panelu.

Kľúčové slová: fotovoltický panel, výroba elektrickej energie, P-N prechod, MPP point

Renewable sources are currently a widely used source of electricity. They are also supported within the European Union. Defects in photovoltaic panels often occur during the implementation and operation of photovoltaic panels. Not all defects can be seen. In practice, it happens that no attention is paid to defects that occur during the operation of the photovoltaic power plant. These defects cause a decrease in electricity production, which reduces the efficiency of this renewable source. This paper describes defects that occur during the implementation and operation of a photovoltaic panel. Based on the performed simulations, the authors describe how defects affect the performance of the photovoltaic panel. **(Effect of photovoltaic cell defects on electricity produce)**

Keywords: photovoltaics panel, electricity produce, P-N junction, MPP point

### I. ÚVOD

Fotovoltika (FV) je oblasť, ktorá sa zaoberá priamou premenou energie svetelného žiarenia (slniečného žiarenia vo viditeľnej oblasti) na elektrickú energiu. Na premenu sa využívajú veľkoplošné polovodičové štruktúry. Fotovoltický jav ako prvý pozoroval Becquerel v roku 1839 na elektrochemických článkoch. Rozvoj polovodičovej techniky v päťdesiatych rokoch minulého storočia, príprava priečodu P-N a poznanie fyzikálnych procesov v priečode P-N vytvorili predpoklady aj pre výrobu slnečného článku s rozumnou účinnosťou [1].

Rozhodujúcim dôvodom na zintenzívnenie výskumu fotovoltiky na pozemské využívanie bolo uvedomenie si skutočnosti, že energetické zdroje ľudstva na zemi sú vyčerpatelné, pričom hrozivé odhady predpokladali, že niektoré zdroje sa môžu vyčerpať vo veľmi krátkom čase. I keď prognózy sa postupne korigovali, aj súčasné projekty nehovorí o obdobiach dlhších ako niekoľko storočí (pre uhlie). Výhodou slnečných fotovoltických článkov je, že pracujú bezpečne, ticho, nepotrebujú žiadne palivo, neprodukujú odpad, vo väčšine inštalácií nemajú žiadne pohyblivé časti a preto nepotrebujú ani údržbu [1] [2] [3].

### II. FOTOVOLTICKÝ ČLÁNOK

Na priamu premenu svetla na elektrinu sa využívajú polovodiče. Sú to materiály s charakteristickými vlastnosťami. Z hľadiska elektrickej vodivosti pri  $T = 0 \text{ K}$  sú polovodiče dokonalé izolanty. Čisté polovodiče majú nízku vodivosť aj pri zvýšenej teplote. Pri izbovej teplote ich vodivosť závisí od koncentrácie vhodných prímiesí. Vodivosť môžeme ovplyvňovať pôsobením zvýšenej teploty, svetla alebo tlaku. Na vodivosti sa podieľajú dva druhy nosičov elektrického náboja: elektróny a diery. Energetická štruktúra elektrónov

kryštalických polovodičov obsahuje dovolené a zakázané pásy energií. Polovodičové materiály sú anorganické – Si, Ge, GaAs, CdTe, alebo organické – veľké množstvo najrôznejších organických prírodných alebo syntetických látok [2] [4] [5].

Fotovoltický (slniečny) článok obsahuje potenciálovú bariéru. Sú to opačne orientované elektrické náboje zoradené oproti sebe na deliacej línii, ktoré vytvárajú elektrické pole. Nehomogénne rozdelenie náboja na deliacej línii priečodu P-N vzniklo dôsledkom difúzie majoritných nosičov náboja (elektróny v polovodiči typu N, diery v polovodiči typu P). Na strane P po difúzii majoritných diery do strany N vzniká kladný priestorový náboj, po difúzii elektrónov z N do P vzniká záporný priestorový náboj na strane N. Elektróny a diery generované svetlom sú na bariére elektrickým poľom oddeľované (separované). Toto oddelenie spôsobuje vznik potenciálového rozdielu, resp. elektrického napätia, ktoré môže vyvolať elektrický prúd cez vonkajší obvod pripojený na polovodičovú štruktúru s potenciálovou bariérou, vystavenou svetelnému žiareniu, čomu hovoríme fotovoltický jav [1] [6] [7] [8].

### III. DEFEKTY FOTOVOLTICKÝCH ČLÁNKOV

FV články sú vo väčšine prípadov vyrobené z kremíka. Vďaka tomu sú články veľmi krehké, takže vznikajú mikrotrhliny, ktoré často nie je možné vidieť voľným okom. Mikrotrhliny vo FV článkoch môžu vzniknúť pri výrobe (od fázy výroby ingotu, cez vafle a samotné články až po zostavenie samotného panelu). Avšak tieto mikrotrhliny zvyčajne bývajú detekované pri výstupnej kontrole (kontrola elektrolymniscenciu). Takže mikrotrhliny predovšetkým vznikajú pri: [2]

- Nešetrom zaobchádzaní s panelmi pri doprave a manipulácii (nárazy, nešetrná manipulácia s paletami, "napichnutie" vidlicou vysokozdvížneho vozíka a pod.)

- Pri inštalácii (nosenie panelov na hlavu, stúpanie na sklo panelov, nárazy konektorov na zadnú stranu laminátu)

- Pri prevádzke panela vplyvom atmosférických podmienok (prudké zmeny teplôt, zaťaženie snehom, krupobitie a pod.).

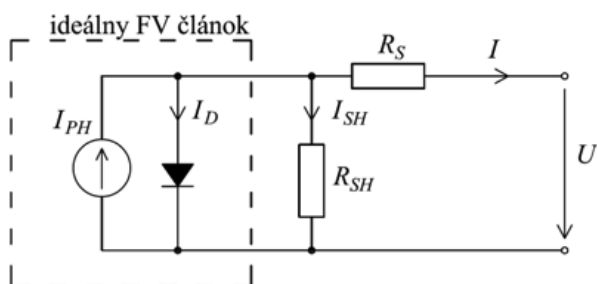
Ako náhle sú v FV článku prítomné mikrotrhliny, existuje zvýšené riziko, že počas prevádzky FV panela sa mikrotrhliny môžu rozvinúť do dlhších a širších trhlín. Je to z dôvodu mechanického namáhania spôsobeného napr. vetrom alebo snehom a termomechanického namáhania FV panelov v dôsledku odchýlok teplôt spôsobených prechodom mrakov a zmenami počasia. V závislosti od typu trhlín môžu tepelné, mechanické namáhanie a vlhkosť viesť k „mŕtvym“ alebo „neaktívnym“ častiam panela, ktoré spôsobia stratu výkonu FV článku. Mŕtva alebo neaktívna časť článku znamená, že táto poškodená časť už neprispieva k celkovému výkonu.

#### IV. MATEMATICKÝ MODEL FOTOVOLTIČKÉHO ČLÁNKU

Prieťah P-N je polovodičová dióda. Podľa polarít vonkajšieho pripojeného jednosmerného napätia tečie cez diódu prúd (priamy smer), alebo netečie (záverný smer) – vid' matematický model FV článku na Obr.1. O veľkosti prúdu na P-N prechode hovorí U-I charakteristika daná Shockleyho rovnicou:[9]

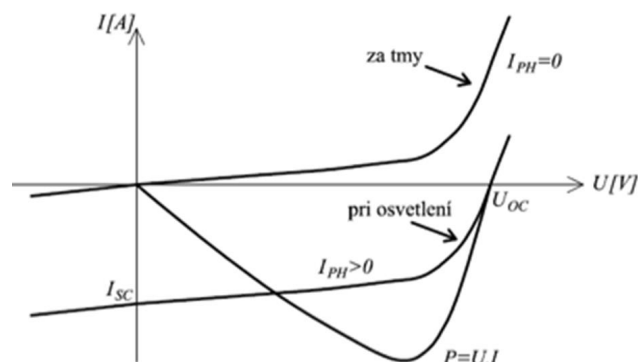
$$I_D = I_S \left( \exp \left[ \frac{qU_D}{kT} \right] - 1 \right) \quad (1)$$

Fotovoltaický článok je veľkoplošná polovodičová dióda, ktorá pracuje v generátorickom režime, ak na ňu dopadá svetlo. V tomto režime pracuje dióda vo 4. kvadrante U-I roviny. Limitné hodnoty voltampérovej charakteristiky sú napätie naprázdno  $U_{oc}$  a prúd nakrátko  $I_{sc}$ . Je zaujímavé si všimnúť, že druhý výraz v rovnici (1) je vlastne rovnica diódy so záporným znamienkom. To znamená, že graf rovnice (1) je vlastne otočená voltampérová charakteristika (VACH) diódy posunutá smerom nahor prostredníctvom prúdu  $I_{PH}$ . Týmto spôsobom sa charakteristika presunie do 1. kvadrantu.



Obr. 1. Náhradná schéma fotovoltaického článku [9].

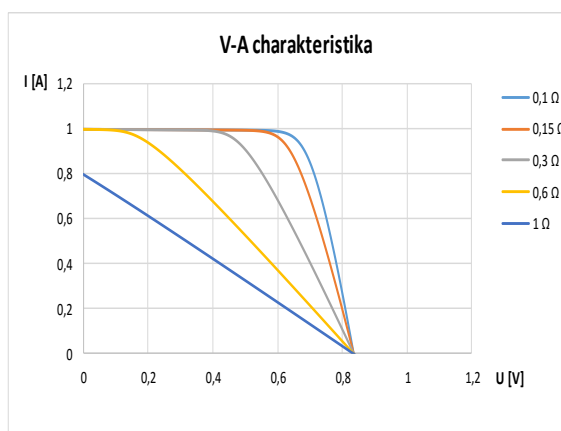
Fotovoltaický článok je veľkoplošná polovodičová dióda, ktorá pracuje v generátorickom režime, ak na ňu dopadá svetlo. V tomto režime pracuje dióda vo 4. kvadrante U-I roviny (Obr.2). Limitné hodnoty voltampérovej charakteristiky sú napätie naprázdno  $U_{oc}$  a prúd nakrátko  $I_{sc}$ . Je zaujímavé si všimnúť, že druhý výraz v rovnici (1) je vlastne rovnica diódy so záporným znamienkom. To znamená, že graf (Obr.2) je vlastne otočená voltampérová charakteristika (VACH) diódy posunutá smerom nahor prostredníctvom prúdu  $I_{PH}$ . Týmto spôsobom sa charakteristika presunie do 1. kvadrantu.



Obr. 2. Charakteristiky FV článkov [9].

#### V. VPLYV ZMENY SÉRIOVÉHO ODPORU $R_S$

Odpor  $R_S$  predstavuje straty na paneli a je odvodený z celkového odporu materiálu polovodiča, odporu kontaktov a prepojení, pričom hodnota odporu stúpa pri nedokonalých a poškodených spojoch, ktoré znamenajú vyšší prechodový odpor, čo vedie k prehrievaniu panela. Veľkosť odporu sa mení ihneď po uvedení panela do prevádzky, čo je spôsobené zmenami teplôt, v ktorých sa panel nachádza. Z výsledkov simulácie je zrejme, že ak stúpa hodnota odporu na rezistore  $R_S$ , tak sa znižuje výkon FV článku, čo je možné vidieť na charakteristikách na Obr. 3. Na tomto obrázku je znázornených päť rôznych V-A charakteristík, kde každá nich reprezentuje inú hodnotu odporov  $R_S$  a to konkrétne hodnoty 0,1; 0,15; 0,3; 0,6 a 1  $\Omega$ . Hodnoty paralelného rezistora  $R_S$ , intenzity slnečného žiarenia a teploty panela boli v simulácii nezmenené. Zistili sme, že v ideálnom prípade by mal mať FV článok hodnotu odporu rezistora  $R_S$  čo najnižšiu, vtedy článok má takmer ideálny tvar kolena resp. krivky V-A charakteristiky, čo je zobrazené na Obr. 3 pri hodnote odporu 0,1  $\Omega$ . Taktiež si je možné všimnúť, že pri zvyšovaní odporu sa mení tvar krivky a to tým spôsobom, že sa výrazne mení veľkosť prúdu a napätia s meniacou sa záťažou, pričom veľkosť prúdu nakrátko  $I_{sc}$  a napätia naprázdno  $U_{oc}$  ostáva rovnaká, to však neplatí pri hodnote odporu 1  $\Omega$ , kedy sa mení aj hodnota prúdu nakrátko  $I_{sc}$ . Tieto tvary kriviek sú nežiaduce, pretože spôsobujú pokles vyrábaného výkonu.



Obr. 3. Vplyv zmeny odporu  $R_S$  na výrobu elektrickej energie

**POĎAKOVANIE**

Tento príspevok vznikol v rámci projektu APVV-19-0576 Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou a taktiež v rámci projektu Ministerstva školstva, vedy a výskumu Slovenskej republiky číslo VEGA 1/0757/21.

**LITERATÚRA**

- [1] Pavlík, M.: Obnoviteľné zdroje energie vo všeobecnosti. 1.vyd. Technická univerzita v Košiciach, 2019. 75 s. ISBN 978-80-553-3317-5.
- [2] Pavlík, M., Obnoviteľné zdroje a iné netradičné zdroje energie. 1.vyd. Technická univerzita v Košiciach, 2019. 82 s. ISBN 978-80-553-3341-0.
- [3] Kolcun, M. et al.: Elektrárne. 1.vyd. Technická univerzita v Košiciach. 2017. 202 s. ISBN 978-80-553-3119-5.
- [4] Kalogirou, Soteris A. Solar Energy Engineering - Processes and Systems. 2. vyd. Elsevier Science & Technology. 2014. 841 s. ISBN : 978-0-12-397270-5.
- [5] Kolcun, M. et al.: Výskum charakteristík fotovoltaických komponentov pre efektívne projektovanie solárnych systémov. 1.vyd. Technická univerzita v Košiciach. 2014. 120 s. ISBN 978-80-553-1961-2.
- [6] Said, S., Massoud, A., Benammar, M., Ahmed, S.: A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystem Toolbox. Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 6, No. 12, 1965-1975.
- [7] Zielínska, A., Skowron, M. and Bień A., "Modelling of photovoltaic cells in variable conditions of temperature and intensity of solar insolation as a method of mapping the operation of the installation in real conditions,"

- 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW), 2018, pp. 200-204, doi: 10.1109/IIPHDW.2018.8388357.
- [8] Hasani, A. H. et. al., "Modelling and Simulation of Photovoltaic Solar Cell using Silvaco TCAD and Matlab Software," 2018 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE), 2018, pp. 214-217, doi: 10.1109/SMELEC.2018.8481307.
  - [9] Beláň, A., " Model fotovoltaického článku," Posterus, Roč.6, č. 10, ISSN:1338-0087.

**ADRESY AUTOROV**

Marek Pavlík, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK, Slovenská Republika, [marek.pavlik@tuke.sk](mailto:marek.pavlik@tuke.sk)  
 Ľubomír Beňa, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK, Slovenská Republika, [lubomir.bena@tuke.sk](mailto:lubomir.bena@tuke.sk)  
 Dušan Medved', Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK, Slovenská Republika, [dusan.medved@tuke.sk](mailto:dusan.medved@tuke.sk)  
 Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [michal.kolcun@tuke.sk](mailto:michal.kolcun@tuke.sk)  
 Vladimír Kohan, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK, Slovenská Republika, [vladimir.kohan@tuke.sk](mailto:vladimir.kohan@tuke.sk)  
 Rikin Jitendrakumar Tailor, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK, Slovenská Republika  
 Róbert Štefko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK, Slovenská Republika, [robert.stefko@tuke.sk](mailto:robert.stefko@tuke.sk)  
 Matej Bereš, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky [matej.beres@tuke.sk](mailto:matej.beres@tuke.sk)