

Marek Pavlík

## Vplyv hot spotov na prevádzku fotovoltaických systémov

Tento príspevok sa zaoberá problematikou hot spotov na fotovoltaických paneloch (FVP). Hot spoty predstavujú oblasti vo vnútri FVP, kde dochádza k nadmernému nahromadeniu tepla, čo môže viesť k trvalému poškodeniu panelu a zníženiu jeho účinnosti a životnosti. Príčiny vzniku hot spotov sú rôznorodé, zahŕňajú zatienenie, nedostatky materiálov či výrobné chyby. Výskyt hot spotov môže mať závažné následky na výkon fotovoltaického systému a jeho hospodársku efektívnosť.

Článok analyzuje vznik hot spotov a navrhuje možné opatrenia na ich predchádzanie a riešenie. Zároveň predstavuje simulačný model, ktorý ilustruje vplyv hot spotu na V-A charakteristiku FVP. Výsledky simulácie naznačujú, že hot spoty môžu viesť k významným zmenám v charakteristike panelu, čo má priamy dopad na jeho výkon a stabilitu. Analýza ukazuje, že správne riadenie a detekcia hot spotov sú nevyhnutné pre optimalizáciu prevádzky fotovoltaických systémov.

Kľúčové slová: Hot spot, MPP bod, fotovoltaický panel

This scientific article addresses the issue of hot spots on photovoltaic panels (PV). Hot spots represent areas inside PV panels where excessive heat accumulation occurs, which can lead to permanent damage to the panel and a reduction in its efficiency and lifespan. The causes of hot spot formation are diverse, including shading, material deficiencies, or manufacturing defects. The occurrence of hot spots can have serious consequences on the performance of the photovoltaic system and its economic efficiency.

The article analyzes the formation of hot spots and proposes possible measures to prevent and address them. It also presents a simulation model illustrating the impact of hot spots on the V-A characteristics of PV panels. Simulation results suggest that hot spots can lead to significant changes in the panel's characteristics, directly impacting its performance and stability. The analysis demonstrates that proper management and detection of hot spots are essential for optimizing the operation of photovoltaic systems. **(The Impact of Hot Spots on the Operation of Photovoltaic Systems)**

Keywords: Hot spot, MPP point, photovoltaic panel

### I. ÚVOD

Potreba znižovania skleníkových plynov a potreba zvyšovania spotreby elektrickej energie viedla k vyššiemu podielu výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Na Slovensku sú okrem vodných elektrární aj podmienky na priamu premenu slnečnej energie na elektrickú energiu. Nárast inštalovaných fotovoltaických elektrární je za posledné roky značný. Prispelo k tomu viacero faktorov. Jednak podpora štátu, ktorý poskytuje dotácie pre vybudovanie fotovoltaických zdrojov a taktiež aj obava domácností a priemyslu zo zvýšených cien elektrickej energie, ktoré boli zaznamenané za posledné obdobie.

Zvýšený počet fotovoltaických zdrojov so sebou prináša zvýšené riziko ich stabilnej prevádzky pre distribučné spoločnosti, ale aj pre prevádzkovateľa fotovoltaického zdroja. Počas prevádzky fotovoltaického zdroja nastáva množstvo problémov, ktoré budú v tejto práci rozoberané. Tieto problémy spôsobujú zníženie množstva vyrobenej elektrickej energie, čím sa predlžuje návratnosť investície.

Fotovoltaický zdroj energie je jednosmerný zdroj a je preto potreba transformácia jednosmerného napätia na striedavé. Pri tejto transformácii nastávajú straty, ktoré závisia od množstva faktorov. Samotnú prevádzku fotovoltaického zdroja sprevádzajú mnohé meniace sa podmienky - meniace sa teplotné podmienky a meniace sa slnečné žiarenie. Tieto, na prvý pohľad nepodstatné zmeny, ovplyvňujú generovaný výkon z fotovoltaického zdroja (FVZ). Mnoho neviditeľných parametrov, akými sú teplota fotovoltaického panela, jeho degradácia, defekty a iné, spôsobujú značné rozdiely v množstve vyrobenej elektrickej energie. Na druhej strane však fotovoltaické elektrárne predstavujú značné problémy počas svojej prevádzky.

V Tab.1 je možné vidieť potenciál aj iných obnoviteľných zdrojov energie na Slovensku a v súčasnosti sa uvažuje o podpore a výstavbe práve veterných elektrární.

TABUĽKA I [1]  
Potenciál OZE na Slovensku

Zdroj	Celkový potenciál		Technický potenciál	
	TJ	GWh	TJ	GWh
<b>Vodná energia:</b>	<b>23 760</b>	<b>6 600</b>	<b>23 760</b>	<b>6 600</b>
Veľké vodné elektrárne	20 160	5 600	20 160	5 600
Malé vodné elektrárne	3 600	1 000	3 600	1 000
<b>Biomasa</b>	<b>120 300</b>	<b>33 400</b>	<b>120 300</b>	<b>33 400</b>
Lesná biomasa	16 900	4 700	16 900	4 700
Poľnohospodárska biomasa	28 600	7 950	28 600	7 950
Biopalivá	7 000	1 950	7 000	1 950
Bioplyn	6 900	1 900	6 900	1 900
Ostatná biomasa	60 900	16 900	60 900	16 900
<b>Veterná energia</b>			2 160	600
<b>Geotermálna energia</b>				
	174 640	48 500	22 680	6 300
	194 537 000	54 038 000	34 000	9 450
<b>Slnečná energia</b>				
	194 855 700	54 126 500	202 900	56 350
<b>SPOLU</b>				

Slnčná energia je považovaná za nestabilný zdroj energie a je pomerne problematické predikovať výrobu elektrickej energie zo slnka. Preto prevádzka spôsobuje výkyvy v dodávke elektrickej energie, čo spôsobuje problémy hlavne pre distribučné spoločnosti. Mnoho fotovoltaických elektrární, ktoré sú inštalované na strechách rodinných domov sú navyše jednofázové, čo spôsobuje nesymetriu v sieti.

## II. HOT SPOTY NA FOTOVOLTICKÝCH PANELOCH

Hot spoty v kontexte fotovoltaických systémov sa nazývajú oblasti, kde dochádza k nadmernej koncentrácii tepla vo vnútri fotovoltaického panela. Hot spoty sa môžu vyskytovať z mnoho dôvodov, akými sú zatienenie FVP, nekonzistencia materiálov, nedostatky pri výrobe fotovoltaického panela a iné. Tieto teplotné nezrovnalosti môžu mať negatívne dopady na celkovú účinnosť a životnosť FV panelov[2][3][4].

Hot spoty sú bežným javom a ťažko sa dajú predvídať. Teploty v týchto oblastiach môžu dosiahnuť až 150°C, čo vedie k trvalému a nezvratnému poškodeniu fotovoltaického panela, ako je rozbitie skla vplyvom vysokej teploty, degradácia článkov a teda aj panela a pod.. Keď sú FV články zapojené sériovo a jeden z článkov je zatienený, zníži sa celkový prúd v sériovom zapojení týchto článkov, čo spôsobí, že dobré články budú produkovať vyššie napätie, ktoré často môže reverzným spôsobom ovplyvniť zlý článok [4][5][6].

Prevádzkový prúd celej tejto sériovej časti sa približuje k skratovému prúdu zatieneného článku. Energia generovaná v dobrých článkoch sa bude sústreďovať v zatienenom FV článku, čím sa zvyšuje celková teplota chybného FV článku pretože sa veľké množstvo energie sústreďuje na malej ploche. Táto energia sa „spotrebúva“ v tomto chybnom FV článku a premieňa sa na teplo, ktoré môže dosiahnuť až spomínaných 150 °C. Obrovská spotreba energie v malej oblasti vedie k miestnemu prehriatiu vo FV paneli. To spôsobuje zníženie účinnosti FV panela a zníženie množstva vyrobenej elektrickej energie v tomto paneli ako aj v celom fotovoltaickom systéme. V závažných prípadoch môžu hot spoty spôsobiť trvalé poškodenie FVP, znížiť jeho životnosť a tým spôsobiť zvýšenie doby návratnosti fotovoltaickej elektrárne[6].

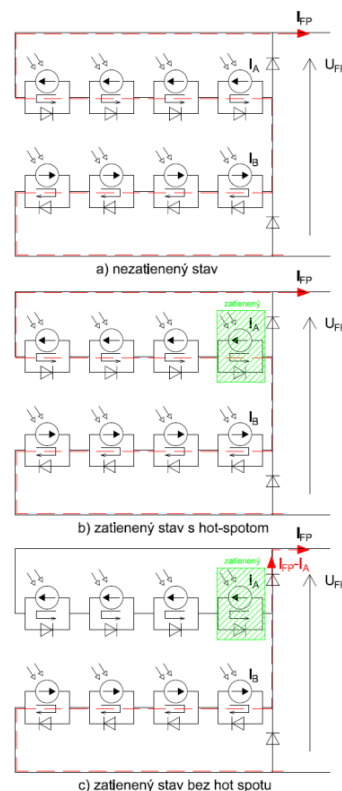
Hlavnou príčinou vzniku hot spotov na FV paneloch je zatienenie. Keď je časť FV panela zatienená, sériovo zapojené FV články vytvárajú veľké reverzné napätie na zatienenom FV článku. To spôsobí nahromadenie tepla v danej zatienenej oblasti, čo vedie k zvýšeniu tepla v postihnutej oblasti a to vedie k vzniku hot spotov. Okrem toho môže zatienenie spôsobiť zníženie celkovej účinnosti FV panela, pretože FV články v zatienenej oblasti nie sú schopné produkovať elektrinu rovnakou mierou ako zvyšok FV panela. Ďalším faktorom, ktorý prispieva k vzniku hot spotov, je nahromadenie prachu a nečistôt na FV paneli. Špina a prach na povrchu FV panela môžu brániť prenikaniu slnečného žiarenia, ktoré by normálne dopadalo na FV články. To vedie k zníženiu výkonu a zvýšeniu teploty fotovoltaického panela. Navyše, nečistoty môžu ovplyvniť prúdenie vzduchu cez panel, resp. po jeho povrchu, čo je kľúčové pre odvádzanie tepla a udržanie konzistentnej teploty FV panela. A ako už bolo v práci viackrát spomínané, teplota podstatne ovplyvňuje prevádzku fotovoltaického panela, čo sa premietne v nižšom generovanom výkone z tohto fotovoltaického panela ako aj celého systému. Návrh a konštrukcia FV panela môžu tiež zohrávať úlohu pri vzniku hot spotov. Nedostatočná izolácia alebo neprimeraná ventilácia môžu viesť k prehriatiu a vzniku hot spotov, pretože sa teplo nedokáže efektívne rozptýliť. V niektorých prípadoch môžu byť samotné články

zle navrhnuté alebo vyrobené, čo vedie k zníženiu výkonu a zvýšeniu množstva generovaného tepla [4][7][8].

Pre zabránenie vzniku hot spotov je potrebné zvážiť príčiny vzniku hot spotov. Na zabránenie vzniku hot spotov je potrebné pravidelne čistiť FV panely, čo je počas bežnej prevádzky neefektívne. Občasny dažď môže napomôcť čisteniu FV panelov. Aj správna izolácia a chladenie FV panelov môže pomôcť pri rozptyľovaní tepla a zabrániť prehriatiu. Toto však ovplyvňuje aj cenu samotného návrhu FV systému. V prípade zatienenia je taktiež možné použitie bypass diód ako už bolo spomenuté v kapitole 3.9. Bypass diódy sú už bežnou súčasťou FV panelov a teda v takom prípade výkon FV systému nie je ovplyvnený zatienením alebo poruchou jedného FV panela. V súčasnosti väčšina panelov používa tri diódy na 60 alebo 72 FV článkov, alebo jednu diódu na každých 20 alebo 24 FV článkov. Bypass diódy sú obvykle vypočítané na konkrétny prúd a napätie. Sú preto vybrané na základe špecifikácie konkrétneho FV panela, v ktorom sa používajú. Zvyčajne sú umiestnené na zadnej strane panela a sú navrhnuté tak, aby boli čo najkompaktnejšie [1][5][9].

## III. ANALÝZA VZNIKU HOT SPOTOV

Hot spoty vznikajú kvôli ich nehomogenity vo FV článkoch alebo kvôli nerovnomernému osvetleniu. Tieto nežiaduce miesta môžu vzniknúť kvôli tieňom, špine, poškodeniu FV článkov alebo kvôli vadám pri výrobe. Následkom toho sa zvyšuje teplota, čo vedie k zníženiu účinnosti a životnosti panelov. Detekcia hot spotov je kritická pretože tradičné metódy ako termovízia sú časovo náročné a vyžadujú priame slnečné svetlo. Vplyvom teploty sa mení aj tvar V-A charakteristiky a to tak, že so zvýšením teploty klesá napätie na FVP. Preto, ak počas prevádzky FV systému vznikne hot spot, prejaví sa to najmä na poklese napätia – Obr.1.



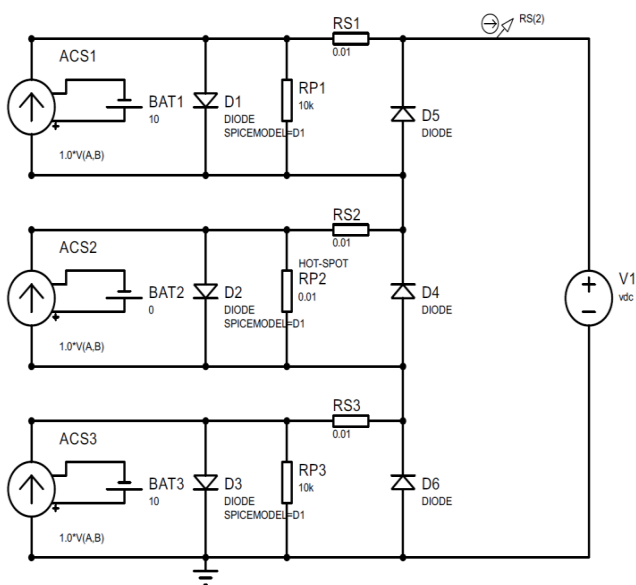
Obr. 1. Tri situácie pre vysvetlenie vzniku hot spotov

Na Obr. 1 je možné popísať a porovnať tri situácie:[3][9]

- Nezatielený stav
- Zatielený stav (jeden modul zatielený) s hot-spotom
- Zatielený stav (jeden modul zatielený) bez hot-spotu

V prípade nezatieleného stavu pracuje FVP bez problémov a prúdy  $I_A$  a  $I_B$  sú rovnaké. A ten je rovný IFP. V prípade b) kedy je zatielený jeden modul na FVP, ktorý je poškodený hot-spotom, vtedy je situácia odlišná. V prípade, že porovnáme situáciu b) a c), nastáva tu rozdiel v hodnote generovaného prúdu IFP. V prípade, ak by FVP neobsahoval hot spot (situácia c) ), vtedy by sa uviedla do činnosti by pass dióda, cez ktorú by tiekol prúd  $I_B$ . Avšak v časti, kde sa nachádza hot spot, na tejto časti FVČ sa zníži hodnota paralelného rezistora a cez tento rezistor preteká prúd do vrchnej časti FVP. V tomto prípade bypass dióda nereaguje. Ak však zatienujeme jednu časť na FVP, v takom prípade (keďže hodnota paralelného rezistora je vysoká) bypass dióda zareaguje a cez ňu preteká prúd a teda cez vrchnú časť prúd nepreteká. Taktiež platí, že ak by FVP neobsahoval bypass diódy, v takom prípade by bol generovaný prúd v celej sériovej časti (vrchná + spodná časť) rovný 0 [8][9].

Na Obr. 2 je zobrazený simulačný model pozostávajúci z troch FV článkov zapojených v sérii. Druhý FVČ je zatielený (napätie na napätím riadenom prúdovom zdroji je nastavený na hodnotu 0) a na tomto FVČ je vytvorený hot spot – hodnota druhého paralelného rezistora  $R_{P2}=0,01 \Omega$ . Ako už bolo skôr spomenuté, hot spot spôsobí zníženie hodnoty paralelného odporu vo FVČ.



Obr. 2. Simulačný model hot spotov

#### IV. VÝSLEDKY SIMULÁCIE

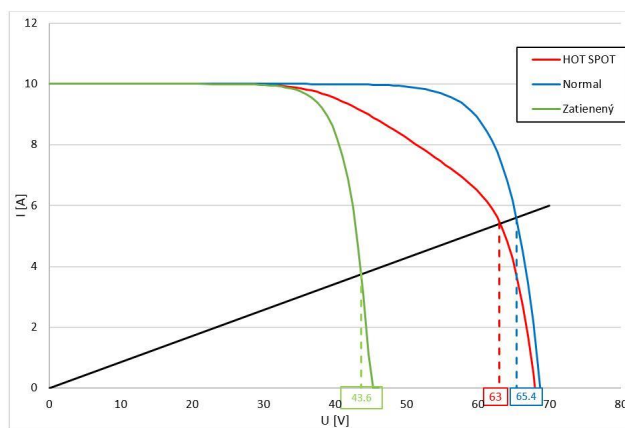
Výsledná V-A charakteristika FVP s a bez hot spotu je zobrazená na Obr. 3, kde je možné pozorovať nasledovné:

- Hot spot spôsobil zmenu v tvare V-A charakteristiky ako je možné vidieť na Obr. 3. Zmena tvaru sa prejavila aj na zmene tvaru kolena V-A charakteristiky.
- Vplyvom hot spotu sa neznižil prúd nakrátko  $I_{SC}$ , ten zostal rovnaký a to 10A. Rovnako ako aj pre zatielený FVP.

c) Napätie naprázdno  $U_{oc}$  sa znížilo z hodnoty 68,5 V na 67 V, čo je pokles o 2,2%. Napätie naprázdno pre zatielený FVP sa znížilo z hodnoty 68,5 V na 45,3 V, čo je pokles o 34%. Z výsledkov vyplýva, že v prípade zatieleného FVP bez hot spotu poklesne napätie  $U_{oc}$  podstatne viac ako v prípade zatieleného FVP s hot spotom.

d) Na Obr. 3 je zobrazená čiernou farbou priamka záťaže, ktorá pretína V-A charakteristiky vo všetkých troch prípadoch. Je tu možné pozorovať pokles napätia z hodnoty 65,4 V (modrá krivka – normal) na hodnotu 43,6 V (zelená krivka – zatielený), resp. na hodnotu 63 V (červená krivka – hot spot).

e) V prípade, že by neboli prítomné bypass diódy, pri zatielenom FVP (zelená krivka) by bola hodnota prúdu 0 A.



Obr. 3. Porovnanie V-A charakteristík FV panelov – HOT SPOT (červená), Normál (modrá) a Zatielený (zelená)

#### V. ZÁVER A DISKUSIA

Hot spoty predstavujú závažný problém v oblasti fotovoltaických systémov, ktorý má potenciálne negatívne dôsledky na ich účinnosť, životnosť a celkovú výkonnosť. Ich výskyt je multifaktoriálny, a môže byť spôsobený rôznymi faktormi, vrátane zatienia, nehomogenít vo výrobe, poškodenia materiálov alebo neprimeraného návrhu a konštrukcie panelov.

Jedným z najdôležitejších aspektov je identifikácia spôsobov, ako efektívne detegovať a riadiť hot spoty. Tradičné metódy ako termovízia môžu byť časovo náročné a nepraktické, preto je potrebné preskúmať možnosti využitia pokročilých technológií alebo algoritmov na automatizované sledovanie a diagnostiku týchto problémov. Vývoj nových senzorov alebo softvérových nástrojov, ktoré by umožnili rýchle a presné zistenie hot spotov, by mohol prispieť k zlepšeniu prevádzky a údržby fotovoltaických systémov.

Okrem toho je potrebné venovať pozornosť opatreniam na minimalizovanie vzniku hot spotov už v rámci návrhu a výroby fotovoltaických panelov. To môže zahŕňať lepšiu izoláciu, zlepšené chladenie, a presnejšiu kontrolu procesov výroby. Ďalším dôležitým aspektom je optimalizácia dizajnu fotovoltaických systémov tak, aby sa minimalizovala pravdepodobnosť zatienia a nerovnomerného osvetlenia panelov.

V neposlednom rade, ďalší výskum by sa mal zamerať na posilnenie poznatkov o spôsoboch, ako hot spoty ovplyvňujú celkovú prevádzku fotovoltaických systémov v rôznych klimatických a prevádzkových podmienkach. To môže zahŕňať experimentálne štúdie

alebo rozsiahle simulácie, ktoré by umožnili lepšie pochopenie dynamiky a mechanizmov vzniku hot spotov a ich následkov.

### POĎAKOVANIE

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0576 „Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou“ a Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-21-0312 „Dynamické pridelovanie kapacít elektrickej energie“.

### LITERATÚRA

- [1] M. Pavlík, "Obnoviteľné zdroje energie vo všeobecnosti," 1.vyd. Technická univerzita v Košiciach, 2019. 75 s. ISBN 978-80-553-3317-5.
- [2] A. Refaat, M. Elgamal and N. V. Korovkin, "A Novel Photovoltaic Current Collector Optimizer to Extract Maximum Power during Partial Shading or Mismatch Conditions," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 407-412, doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657173.
- [3] J. Qian, A. Thomson, A. Blakers and M. Ernst, "Comparison of Half-Cell and Full-Cell Module Hotspot-Induced Temperature by Simulation," in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 8, no. 3, pp. 834-839, May 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2817692.
- [4] A. M. Imtiaz, F. H. Khan and H. Kamath, "All-in-One Photovoltaic Power System: Features and Challenges Involved in Cell-Level Power Conversion in ac Solar Cells," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 19, no. 4, pp. 12-23, July-Aug. 2013, doi: 10.1109/MIAS.2012.2215658.
- [5] M. Dhimish, V. Holmes, B. Mehrdadi, M. Dales and P. Mather, "Output-Power Enhancement for Hot Spotted Polycrystalline Photovoltaic Solar Cells," in IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 18, no. 1, pp. 37-45, March 2018, doi: 10.1109/TDMR.2017.2780224.
- [6] M. Dhimish, P. Mather and V. Holmes, "Evaluating Power Loss and Performance Ratio of Hot-Spotted Photovoltaic Modules," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 65, no. 12, pp. 5419-5427, Dec. 2018, doi: 10.1109/TED.2018.2877806.
- [7] D. P. Winston, "Efficient Output Power Enhancement and Protection Technique for Hot Spotted Solar Photovoltaic Modules," in IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 19, no. 4, pp. 664-670, Dec. 2019, doi: 10.1109/TDMR.2019.2945194.
- [8] G. Chiriac, C. Nituca, D. Cuciureanu and I. Murgescu, "Analysis of hot-spots effects on the performances of a photovoltaic system used in Romania," 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), Iasi, Romania, 2017, pp. 239-244, doi: 10.1109/SIELMEN.2017.8123325.
- [9] M. Alajmi, K. Awedat, M. S. Aldeen and S. Alwagdani, "IR Thermal Image Analysis: An Efficient Algorithm for Accurate Hot-Spot Fault Detection and Localization in Solar Photovoltaic Systems," 2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), Brookings, SD, USA, 2019, pp. 162-168, doi: 10.1109/EIT.2019.8833855.

### ADRESY AUTOROV

Marek Pavlík, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [marek.pavlik@tuke.sk](mailto:marek.pavlik@tuke.sk)