

# Validácia PV Sol modelu fotovoltaickej elektrárne v prostredí MatLab

Bc. Robert Irgel, Ing. Milan Perný, PhD.

Ústav vedy a výskumu, FEI STU v Bratislave  
Ústav elektrotechniky a aplikovanej elektrotechniky

xirgel@stuba.sk

**Abstrakt** – Článok sa zaoberá modelovaním výroby fotovoltaickej elektrárne a jej energetickej bilancie v závislosti od meteorologických podmienok a profilu spotreby odberného miesta. Model využíva časové rady globálneho horizontálneho slnečného žiarenia a teploty vzduchu s 15-minútovým rozlíšením. Metodika výpočtu zahŕňa transformáciu slnečného žiarenia na rovinu panelov, výpočet teploty fotovoltaického článku, výpočet okamžitej hodnoty výkonu, výpočet strát systému a obmedzenia výkonu striedača, výpočet energetickej bilancie medzi výrobou, spotrebou, vlastnou spotrebou, dodávkou energie do distribučnej siete a odberu zo siete. Výsledky modelu v prostredí MatLab sú porovnané s výstupmi komerčného simulačného nástroja PV\*SOL. Identifikované odchýlky boli analyzované z pohľadu použitých výpočtových metód a algoritmov.

## 1 Úvod

Rozvoj obnoviteľných zdrojov energie, najmä fotovoltaiky (FV), si vyžaduje presné modelovanie výrobných a spotrebných profilov elektrickej energie. V súčasnosti existuje množstvo profesionálnych nástrojov, ako napríklad PVsyst, PVcase, OpenSolar, PV\*SOL, ktoré umožňujú detailnú simuláciu fotovoltaických systémov vrátane návrhu, dimenzovania a optimalizácie. Tieto nástroje využívajú komplexné databázy meteorologických údajov, komponentov a implementujú pokročilé fyzikálne modely.

Softvér PV\*SOL predstavuje profesionálny nástroj určený na návrh a simuláciu fotovoltaických systémov. Umožňuje detailné modelovanie výroby elektrickej energie na základe databáz meteorologických údajov, presných modelov fotovoltaických modulov, striedačov a ďalších komponentov. V rámci výpočtov využíva pokročilé fyzikálne a empirické modely, napríklad detailné modely slnečnej geometrie, pokročilé modely rozptylu slnečného žiarenia, dynamické modely teploty článkov a riadené modely účinnosti striedačov. Okrem toho poskytuje aj komplexnú analýzu energetickej bilancie vrátane vlastnej spotreby, dodávky do siete a ekonomického vyhodnotenia.

Napriek vysokej presnosti týchto nástrojov je v niektorých prípadoch vhodné vytvoriť vlastný model, ktorý umožňuje detailnejšie pochopenie jednotlivých výpočtových krokov. Prostredie MatLab je na tento účel vhodné, pretože umožňuje implementáciu vlastných fyzikálnych modelov a prácu s časovými radmi. [1]

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť matematický model fotovoltaickej elektrárne v prostredí MatLab a porovnať jeho výsledky s modelom vytvoreným v programe PV\*SOL. Dôraz bol kladený na konzistentné nastavenie parametrov systému a identifikáciu príčin prípadných odchýlok.

## 2 Simulácia modelu FV zdroja

Kľúčové parametre ako je inštalovaný výkon, orientácia a sklon panelov, počet modulov, výkon striedačov, časové rozlíšenie simulácie a vstupné meteorologické údaje sú rovnako nastavené vo všetkých porovnávaných modeloch a tým je zabezpečená konzistentnosť medzi porovnávanými modelmi. [2]

### 2.1 Modelovanie slnečného žiarenia a teplotných vplyvov výpočtovým modelom Erbs, NOCT

Erbs je model slnečného žiarenia, ktorý používa empirické prístupy. Týmto modelom je určené koľko slnečného žiarenia dopadá na zemský povrch a taktiež určuje pomer priamej a difúznej zložky z celkového slnečného žiarenia. Podstata modelu spočíva v tom, že pomer medzi difúznou a globálnou zložkou žiarenia závisí od tzv. indexu jasnosti atmosféry, ktorý vyjadruje mieru priepustnosti atmosféry pre slnečné žiarenie. Tento index sa definuje ako podiel globálneho žiarenia na zemskom povrchu a extra - terestriálneho žiarenia na vrchu atmosféry:

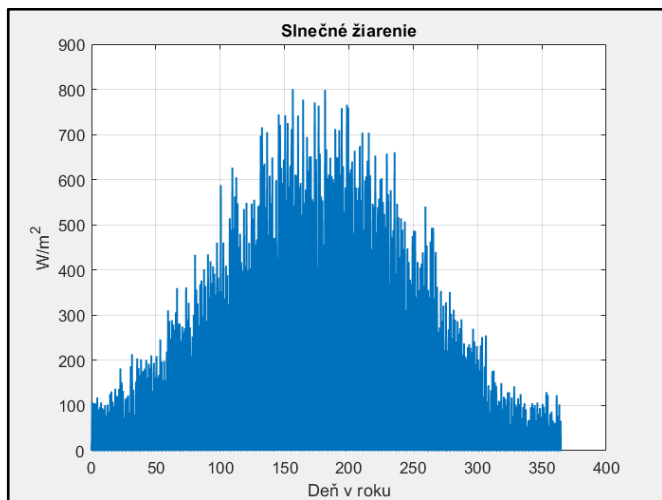
$$K_t = \frac{G}{G_0} \quad (1)$$

-  $G$  predstavuje globálne slnečné žiarenie na povrchu Zeme a  $G_0$  je extra - terestriálne žiarenie dopadajúce na horizontálnu rovinu mimo atmosféry. Hodnota indexu  $K_t$  charakterizuje stav oblohy pri nízkych hodnotách (ide o zamračené podmienky) s prevahou difúzneho žiarenia, zatiaľ čo vysoké hodnoty zodpovedajú jasnej oblohe s dominantnou priamou zložkou.

Tab. 1 Index jasnosti

Interval indexu jasnosti $K_t$	Charakter podmienok
$K_t \leq 0,22$	Silne zamračené – difúzne žiarenie dominuje
$0,22 < K_t \leq 0,80$	Premenlivé podmienky – prechod medzi difúznym a priamym žiarením
$K_t > 0,80$	Jasná obloha – dominuje priame žiarenie

Model Erbs je čisto empirický, čo znamená, že bol odvodený na základe experimentálnych meraných dát. Jeho hlavnou výhodou je jednoduchosť a nízka náročnosť na vstupné údaje, keďže vyžaduje iba globálne slnečné žiarenie a výpočet extra - terestriálneho žiarenia. Nezohľadňuje detailné vplyvy ako aerosóly, lokálnu mikroklimu alebo špecifické typy oblačnosti.



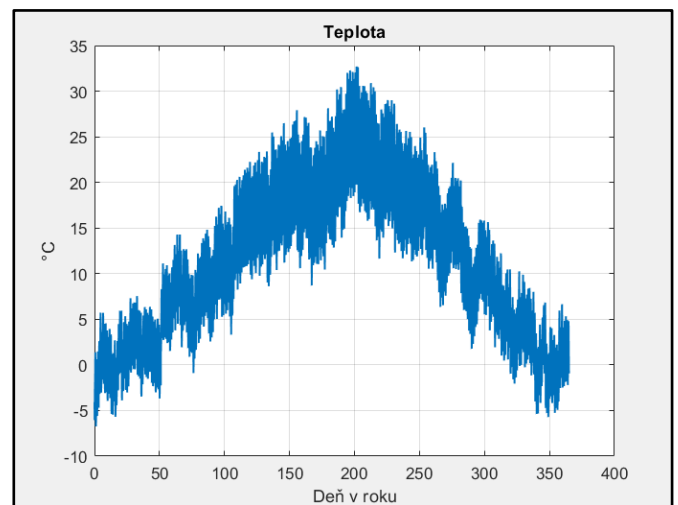
Obr. 1 Ročný priebeh slnečného žiarenia (Hviezdoslavov)

NOCT model vychádza z definície menovitej prevádzkovej teploty panelu, čo je teplota, ktorú dosiahne fotovoltaický panel za štandardizovaných referenčných podmienok. Tieto podmienky sú typicky definované ako intenzita slnečného žiarenia  $800 \text{ W/m}^2$ , teplota okolitého vzduchu  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , rýchlosť vetra  $1 \text{ m/s}$  a otvorená montážna konštrukcia panelu. Hodnota NOCT je udávaná výrobcom a zvyčajne sa pohybuje v rozsahu približne  $40$  až  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Samotný model predpokladá, že nárast teploty článku oproti teplote okolia je lineárne závislý od intenzity dopadajúceho globálneho žiarenia. Tento vzťah je možné zapísať nasledovne:

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800 \cdot G} \quad (2)$$

- kde  $T_c$  je teplota fotovoltaického článku,  $T_a$  je teplota okolitého vzduchu,  $G$  predstavuje globálne slnečné žiarenie dopadajúce na povrch panelu a NOCT je menovitá prevádzková teplota článku udaná výrobcom. Člen  $(NOCT - 20) / 800$  vyjadruje mieru nárastu teploty článku na jednotku dopadajúceho žiarenia.



Obr. 2 Ročný priebeh teploty (Hviezdoslavov, Meteonorm 8.1)

Z uvedeného vzťahu vyplýva, že pri nulovom žiarení sa teplota článku rovná teplote okolia, zatiaľ čo pri referenčnej hodnote  $800 \text{ W/m}^2$  nadobúda teplota článku hodnotu približne rovnú NOCT za predpokladu referenčných podmienok. Model teda umožňuje rýchly odhad prevádzkovej teploty bez potreby detailného modelovania tepelných procesov.

NOCT model patrí medzi empirické modely. Nezohľadňuje viaceré dôležité faktory, ako sú rýchlosť vetra, tepelné vlastnosti materiálov alebo dynamické zmeny prostredia, čo môže viesť k odchýlkam od skutočnej prevádzkovej teploty.

Napriek týmto obmedzeniam predstavuje NOCT model praktický nástroj na rýchly a dostatočne presný odhad teploty fotovoltaického článku, ktorý je následne možné využiť napríklad pri výpočte okamžitého výkonu fotovoltaického panelu v závislosti od prevádzkových podmienok. [3]

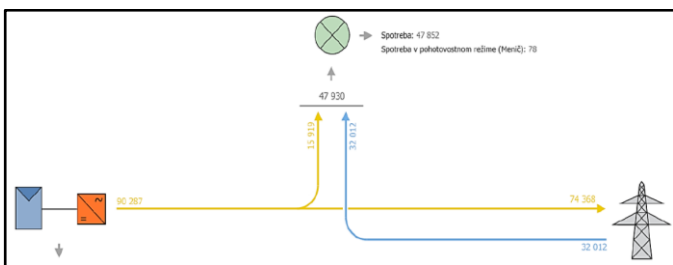
## 2.2 Klimatické podmienky danej lokality

Model bol vytvorený pre konkrétnu lokalitu Hviezdoslavov, ktorá sa nachádza na juhozápade Slovenska približne na geografických súradniciach  $48,07^\circ$  severnej zemepisnej šírky a  $17,35^\circ$  východnej zemepisnej dĺžky. Pre túto lokalitu boli použité meteorologické údaje vo forme 15-minútových časových radov globálneho horizontálneho slnečného žiarenia a teploty vzduchu.

### 2.3 Analyzovaný systém

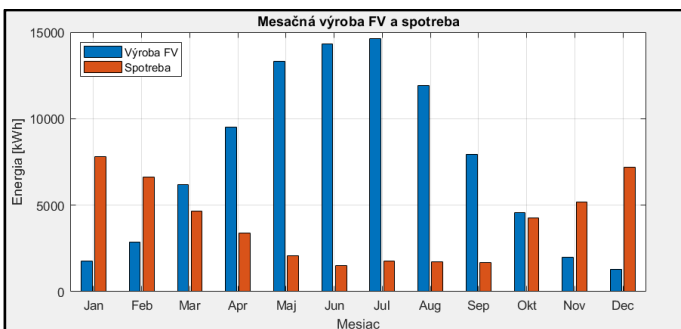
Analyzovaný fotovoltaický systém pozostáva z 252 fotovoltaických modulov s jednotkovým výkonom 410 Wp, čo predstavuje celkový inštalovaný výkon 103,32 kWp. Panely sú rozdelené na dve strešné roviny, pričom každá obsahuje 126 panelov. Obe strechy majú sklon 25°, pričom ich orientácia v azimutálnej sústave je 300° a 120°. Tento spôsob rozdelenia systému bol v MatLab modeli plne rešpektovaný, pričom výroba bola počítaná samostatne pre každú strešnú rovinu.

Systém je pripojený prostredníctvom striedačov s celkovým menovitým AC (striedavým) výkonom 96 kW. V modeli bolo zohľadnené obmedzenie výkonu striedačov, ktoré nastáva v prípade prekročenia maximálneho výkonu. Účinnosť striedača bola modelovaná konštantnou hodnotou, ktorá reprezentuje priemernú účinnosť v prevádzkovom rozsahu.



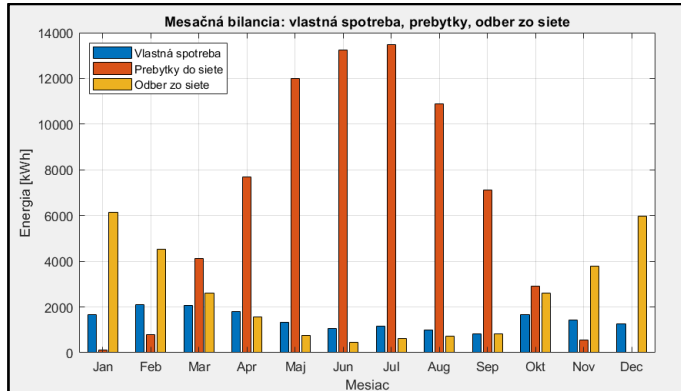
Obr. 3 Tok energie

Odborné miesto (farma JK Hviezdoslavov) predstavuje reálny spotrebiteľský profil s ročnou spotrebou približne 48 MWh, pričom spotreba bola získaná z meraných dát s 15-minútovým rozlíšením. Tieto dáta boli načítané do prostredia MatLab a časovo zosúladené s výrobou fotovoltaickej elektrárne.

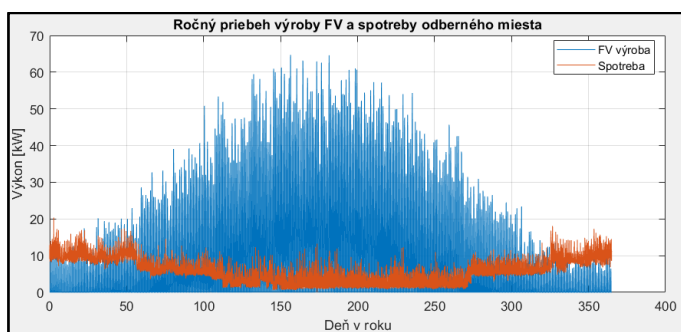


Obr. 4 Mesačná výroba FV elektrárne a spotreba OM

Výroba FV zdroja, vlastná spotreba z FV zdroja a prebytky do siete sú vypočítané modelom v prostredí MatLab a ostatné údaje zobrazené v grafoch sú reálne dáta z fakturačného elektromera obr. 2, obr. 3.



Obr. 5 Mesačná bilancia odborného miesta

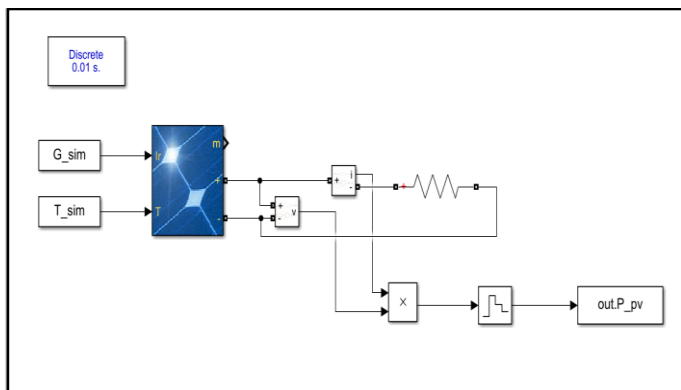


Obr. 6 Ročný priebeh výroby a spotreby odborného miesta

### 2.4 Metodika výpočtov

Transformácia slnečného žiarenia z horizontálnej roviny na rovinu panelov je implementovaná v prostredí MatLab pomocou izotropného modelu oblohy. Globálne slnečné žiarenie bolo rozdelené na priamu a difúznú zložku pomocou empirického modelu Erbs (empirický model slnečného žiarenia). Teplota fotovoltaického článku bola vypočítaná pomocou modelu NOCT (empirický model teploty povrchu panelov), ktorý umožňuje aproximovať prevádzkovú teplotu panelu na základe slnečného žiarenia a teploty okolia.

Výkon panelu bol následne vypočítaný ako funkcia slnečného žiarenia a teploty s využitím teplotného koeficientu výkonu. Celkový výkon systému bol získaný agregáciou výkonov jednotlivých strešných rovín. Energetická bilancia bola určená na základe časového prekrytia výroby a spotreby, pričom v každom časovom kroku bola vlastná spotreba definovaná ako minimum medzi okamžitou výrobou a spotrebou. Ak je výroba väčšia ako spotreba, objekt dokáže využiť len časť energie rovnú svojej spotrebe a zvyšok predstavuje prebytok, ktorý sa typicky dodáva do siete. Preto sa používa operácia minimum, ktorá zabezpečuje, že vlastná spotreba nikdy neprekročí ani výrobu, ani spotrebu. [4]



Obr. 7 Schéma modelu FV zdroja v grafickom prostredí Simulink [5]

## 2.5 Porovnanie modelov

Simulácie v prostredí MatLab prebiehajú v diskretných časových krokoch a využívajú jednoduché matematické operácie, ako sú minimum a maximum teploty, pričom pre rovnaké vstupné podmienky vždy poskytujú identické výsledky. Takýto prístup umožňuje jednoduchú implementáciu a dobrú prehľadnosť modelu, avšak na rozdiel od pokročilých nástrojov, ako je PV\*SOL, zjednodušene zachytáva dynamiku systému a reálne fyzikálne procesy aj náhle zmeny teploty okolia.

Vybrané ukazovatele, ako ročná výroba fotovoltaického systému, ročná spotreba, vlastná spotreba, prebytky do siete a odber zo siete, predstavujú kľúčové energetické toky v systéme. Tieto veličiny poskytujú ucelený obraz o správaní systému z pohľadu výroby aj spotreby energie a priamo ovplyvňujú jeho technickú aj ekonomickú efektívnosť. Z tohto dôvodu postačuje porovnávať práve tieto agregované výsledky, keďže zahŕňajú všetky dôležité procesy prebiehajúce počas simulácie.

Tab. 2 Porovnanie modelov

Jednotka [kWh]	PV*Sol	MatLab
Ročná výroba FV elektrárne	90287.0	90264.3
Ročná spotreba OM	47930.0	47930.0
Vlastná spotreba z FV elektrárne	15919.0	17328.1
Prebytky do siete	74369.0	72936.2
Odber zo siete	32012.0	30519.8

## 3 Záver

Porovnanie MatLab modelu a PV\*SOL modelu ukázalo zhodu v ukazovateli ročnej výroby fotovoltaickej elektrárne, kde rozdiel predstavoval len 0,03%, čo potvrdzuje správnosť implementovaného modelu výroby.

Významnejšie rozdiely sa prejavili v oblasti energetickej bilancie, konkrétne vo vlastnej spotrebe, ktorá bola v MatLab modeli vyššia približne o 8,85%. Tento rozdiel viedol k nižšej hodnote dodávky energie do siete a nižšiemu odberu zo siete v porovnaní s PV\*SOL.

Hlavnou príčinou týchto odchýlok je rozdielny spôsob spracovania časových radov a výpočtu energetickej bilancie. MatLab model využíva deterministický prístup založený na diskretných časových krokoch a jednoduchých operáciách typu minimum a maximum teploty, zatiaľ čo PV\*SOL implementuje pokročilé interné algoritmy, ktoré presnejšie modelujú dynamiku teploty a tok energie v reálnom čase.

Ďalším faktorom je rozdiel v modelovaní pomocných spotrieb, najmä pohotovostnej spotreby striedačov, ktorá je v PV\*SOL zahrnutá. Vplyv môžu mať aj rozdiely v modelovaní slnečného žiarenia na rovinu panelov, keďže PV\*SOL využíva pokročilejšie modely rozptylu slnečného žiarenia. [6]

Napriek týmto rozdielom možno konštatovať, že MatLab model dosahuje postačujúcu zhodu s profesionálnym softvérom PV\*SOL a predstavuje vhodný nástroj na analýzu a simuláciu fotovoltaických systémov.

Tab. 3 Zoznam skratiek

Skratky	Vysvetlenie
FV	Fotovoltaickej, fotovoltaická
OM	Odborné miesto

## Pod'akovanie

Tento článok bol financovaný EÚ Next Generation EU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I04-03-V02-00033.

Tento článok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-23-0012 pre projekt „Radiálne odolné a ohňovzdorné káble pre projekt CERN HiLumi“.

## Literatúra

- [1] Milosavljević, D. D. et al. (2022). Review and validation of photovoltaic solar simulation tools. University of Niš, Serbia.
- [2] Gurumoorthy, K. P., Nordin, N. D., Siew, K. E., Seng, C. B., Meng, L. K., Suhaimi, S. M., Azmi, A., Kasri, N. F., & Yunianta, A. (2024). Comparative study on the predicted energy generated from GCPV system between PVsyst simulation and mathematical models. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*.
- [3] Ahmad, T., Sobhan, S., Nayan, M. F. (2016). Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell. University of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh. NOCT temperature model of PV modules.
- [4] Teh, C. J. Q. et al. (2024). Indoor PV Modeling Based on the One-Diode Model. University of Malaya, Malaysia.
- [5] Tamrakar, V., Gupta, S. C., Sawle, Y. (2015). Single-Diode PV Cell Modeling and Study of Characteristics of Single and Two-Diode Equivalent Circuit. (Simulink based modelling of PV systems.) National Institute of Technology, India.
- [6] Valentin Software GmbH (2023). PV\*SOL premium – User Manual and Technical Documentation. Valentin Software, Berlin, Germany.
- [7] The MathWorks, Inc. MATLAB. Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2019b.
- [8] Valentin Software GmbH. PV\*SOL. Berlin: Valentin Software GmbH, 2024.

# Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti

Študentská vedecká a odborná činnosť  
14. apríl 2026

Organizátor:

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Editori:

Peter Benko  
Stanislav Sojak

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU.  
Náklad 50 ks CD nosičov

ISBN 978-80-227-5591-7

2.3	FM vysieláč Samuel Bukva . . . . .	78
2.4	Inteligentná vizuálna kontrola vo výrobnom závode Matej Bašista, Oto Haffner . . . . .	88
2.5	Využitie Siemens Robot Library na interoperabilné ovládanie kolaboratívneho robota UR3e Samuel Hacker, Oto Haffner . . . . .	94
2.6	Rozpoznávanie 3D identifikátorov pre účely ovládania výrobnéj linky v rozšírenej realite Egor Shveygert, Erik Kučera . . . . .	100
2.7	Rozpoznávanie 3D identifikátorov Denis Pudelka, Oto Haffner . . . . .	105
<b>3</b>	<b>Elektroenergetika, Jadrové a fyzikálne inžinierstvo</b>	<b>111</b>
3.1	Analýza vplyvu geometrie lopatiek na výkonové charakteristiky modelu malej veternej elektrárne Martin Bezák, Marek Pípa . . . . .	112
3.2	Validácia PV Sol modelu fotovoltaickej elektrárne v MatLabe Robert Irgel, Milan Perný . . . . .	118
3.3	Porovnanie vybraných softvérových nástrojov pri návrhu fotovoltaických systémov Damián Dalibor Kusovský, Miroslava Farkas Smitková . . . . .	123
3.4	Porovnanie presnosti katastrálnych máp a CLC pri vyhodnotení potenciálu agrovoltiky Illia Lazarenko, Matej Cenký, Milan Perný . . . . .	128
3.5	Influence of Layer Thickness and Substrate Temperature on Superconducting Properties of NbTiN Thin Films Nad'a Pániková, Tomáš Ščepka, Marián Precner . . . . .	135
3.6	Analýza vplyvu rastových podmienok na elektrické vlastnosti súčiastok na báze Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Zuzana Pospechová, Fridrich Egyenes, S. G. Vadlamudi, et al. . . . .	141
3.7	Analýza problematiky zariadení na uskladnenie elektriny a ich vplyvu na prevádzku a rozvoj distribučnej sústavy Radovan Šikuda, Miroslava Farkas Smitková, Jakub Zárecký, et al. . . . .	147
3.8	Bezpečnostné analýzy plynom chladeného rýchleho reaktora Adam Turcel, Jakub Lúley . . . . .	153
<b>4</b>	<b>Elektronika a fotonika</b>	<b>158</b>
4.1	Optimisation of Annealing Temperature for Conductivity Enhancement in Polycrystalline $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Thin Films Grown on Quartz Using Liquid-Injection MOCVD Tadeáš Lukáč, Michal Sobota, Dagmar Gregušová, et al. . . . .	159
4.2	Investigation of anisotropy in $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> thin films on sapphire substrates Marcel Petřík, Ondrej Pohorelec, Dagmar Gregušová, et al. . . . .	164

## Členovia programového a recenzného výboru

doc. Ing. Daniel Arbet, PhD  
doc. Mgr. Daniela Chudá, PhD.  
RNDr. Juraj Chlpík, PhD.  
Ing. Marián Choma  
doc. Ing. Aleš Chvála, PhD.  
Ing. Martin Dekan, PhD.  
doc. Ing. Martin Ernek, PhD.  
doc. Mgr. Miroslava Farkas Smitková, PhD.  
doc. Ing. Miroslav Halás, PhD.  
doc. Ing. Mária Hypiusová, PhD.  
doc. Ing. Peter Janiga, PhD.  
Ing. Tomáš Janvars, PhD.  
doc. Ing. Kvetoslava Kotuliaková, PhD.  
doc. Ing. Jaroslav Kováč, PhD.  
Ing. Soňa Kováčová, PhD.  
doc. Ing. Ladislav Körösi, PhD.  
doc. Ing. Erik Kučera, PhD.  
Ing. Matej Matuš, PhD  
Ing. Patrik Novák, PhD.  
Ing. Vladislav Novák  
Ing. Kristián Ondrejčka, PhD.  
Ing. Milan Perný, PhD.  
Ing. Štefan Počarovský, PhD.  
prof. Ing. Rastislav Róka, PhD.  
Ing. Dávid Szépvölgyi  
Ing. Šimon Tibenský  
Ing. Michal Tölgyessy, PhD.  
Ing. Izabela Trepáčová  
doc. Ing. Erik Vavrinský, PhD.  
doc. Ing. Milan Vojvoda, PhD  
prof. Ing. Pavol Zajac, PhD.  
Ing. Filip Zúbek