

ANALIZA UTJECAJA SJENE NA FOTONAPONSKI MODUL

ANALYSIS OF THE SHADING EFFECTS ON THE PHOTOVOLTAIC MODULE

Tonko Pale, Zvonimir Meštrović, Ivor Marković

Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10000 Zagreb

SAŽETAK

U ovom je radu napravljena analiza utjecaja sjene na fotonaponski modul. Poseban naglasak pri tome je stavljen na negativne posljedice zasjenjenja na fotonaponski modul te na ublažavanje istih pomoću prenosnih dioda. Za potrebe analize razvijen je model fotonaponskog modula u programskom paketu Matlab – Simulink te su rezultati modela validirani mjerenjima na laboratorijskom postavu. Kako bi se prikazali navedeni utjecaji, snimane su $I - V$ i $P - V$ karakteristike za različite scenarije zasjenjenja, sa spojenim i odspojenim prenosnim diodama.

Ključne riječi: Sunčeva energija, fotonapon, fotonaponski modul, utjecaj zasjenjenja, prenosne diode, simulacijski model

ABSTRACT

In this paper, an analysis of the influence of the shadow on the photovoltaic module is given. Special emphasis is placed on the negative consequences of shading on the photovoltaic module and on mitigating them using bypass diodes. A PV model was developed in the Matlab – Simulink software package, and the model results were validated by measurements on a laboratory setup. To show the mentioned influences, the $I - V$ and $P - V$ characteristics were recorded for different shaded scenarios, with connected and disconnected bypass diodes.

Keywords: Solar energy, photovoltaics, photovoltaic module, shading effect, bypass diodes, simulation model

1. UVOD

1. INTRODUCTION

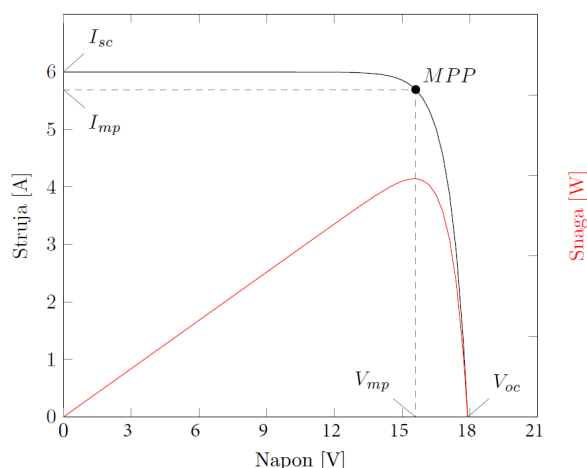
Fotonaponska ćelija je uređaj koji posredstvom fotonaponskog efekta pretvara Sunčevu energiju u električnu energiju. Radi osiguravanja prikladnog napona i snage veći broj fotonaponskih ćelija spaja se u seriju tvoreći tako fotonaponski modul.



Slika 1 Fotonaponski modul s 36 ćelija

Figure 1 PV module with 36 cells

Vrlo važan pokazatelj rada fotonaponskog modula jesu njegove $I - V$ i $P - V$ karakteristike prikazane na Slika 2. Karakteristike su u osnovi određene s četiri električne veličine: napon praznog hoda (V_{oc}), struja kratkog spoja (I_{sc}), napon u točki maksimalne snage (V_{mp}) i struja u točki maksimalne snage (I_{mp}). Vidljivo je da se točka maksimalne snage (engl. Maximum Power Point, MPP) javlja blizu koljena $I - V$ krivulje.



Slika 2 I – V i P – V krivulja fotonaponskog modula [1]

Figure 2 I – V & P – V characteristics of photovoltaic module [1]

Sve navedene veličine dane su u tehničkim listovima svakog fotonaponskog modula, a određene su pri standardnim tehničkim uvjetima (engl. *Standard Test Conditions, STC*)¹.

Pri promjenjivim atmosferskim uvjetima (sunčevog zračenja i temperature), karakteristike će poprimiti drugačije oblike (Slika 3).

Posebno je zanimljiv i složen utjecaj na I – V i P – V karakteristike koji izaziva pojava sjene preko određenog segmenta fotonaponskog modula.

Stoga će se u narednim poglavljima detaljno sagledati utjecaj zasjenjenja na fotonaponski modul, te način ublažavanja te negativne pojave korištenjem premosnih dioda.

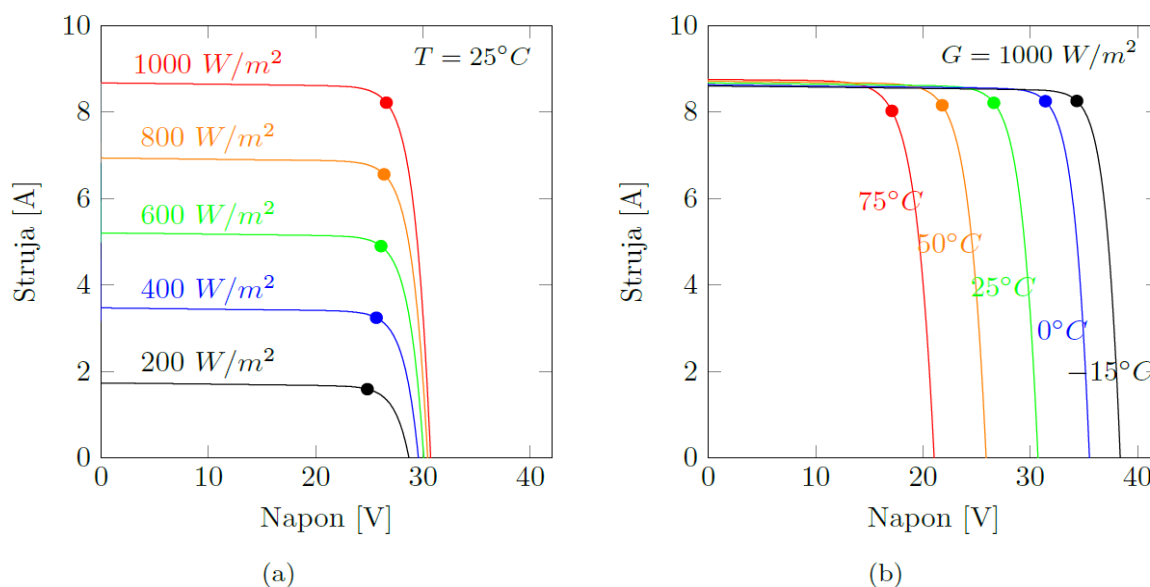
2. UTJECAJ SJENE 2. THE IMPACT OF SHADING

Najvažniji čimbenik koji ograničava rad fotonaponskog modula je pojava sjene na njegovoj površini. U načelu sjenu mogu izazvati bilo koji objekti u okruženju fotonaponskog modula ili objekti koji padnu na njegovu površinu (npr. zgrade u okruženju, drveće, lišće, snijeg i razne prljavštine).

Zasjenjenjem samo jedne ćelije dolazi do smanjenja izlaznih vrijednosti čitavog modula. Budući da fotonaponski modul nastaje serijskim spojem ćelija, samo jedna zasjenjena ćelija ograničava struju preostalih ćelija, odnosno smanjuje ukupnu izlaznu struju modula. Također, zasjenjena ćelija se ponaša kao trošilo i uzrokuje smanjenje izlaznog napona modula. Sveukupna posljedica je stoga smanjenje izlazne snage. Dodatni je problem što nezasjenjene ćelije i dalje proizvode električnu energiju. Međutim, višak proizvedene energije ne pridonosi povećanju izlaznih vrijednosti, nego se oslobađa u obliku

Slika 3 Utjecaj promjenjivog sunčevog zračenja (a) i temperature (b) [1]

Figure 3 Variable insolation (a) and temperature (b) influence [1]



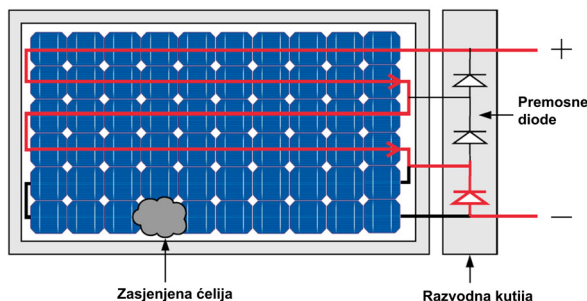
1 1.000 W/m², 25°C, AM 1.5

topline na zasjenjenim ćelijama. Stoga, zasjenjene ćelije razvijaju vrlo visoke temperature što može izazvati trajno oštećenje fotonaponskog modula (tzv. vruće točke) [2], [8].

3. PREMOSNE DIODE

3. BYPASS DIODES

Najčešće korištena metoda za ublažavanje negativnih posljedica sjene na fotonaponski modul je ugradnja premosnih dioda (engl. *Bypass diodes*). Premosne diode se spajaju antiparalelno s grupom fotonaponskih ćelija i tako dijele modul u nekoliko serijski spojenih podnizova ćelija. Kada dođe do zasjenjenja, premosne diode premošćuju zasjenjeni podniz, odnosno osiguravaju zaobilazni put za protok struje iz nezasjenjenog dijela modula. Time premosne diode smanjuju gubitke uzrokovane sjenom i sprječavaju nastanak vrućih točaka. Nestankom sjene premošćeni podniz nastavlja s normalnim radom, a premosne diode prestaju provoditi struju. Na Sliku 4 prikazano je načelo rada premosnih dioda u slučaju kada je zasjenjena jedna fotonaponska ćelija u modulu [3].



Slika 4 Načelo rada premosnih dioda [3]

Figure 4 Working principle of bypass diodes[3]

4. REZULTATI SIMULACIJE

4. SIMULATION RESULTS

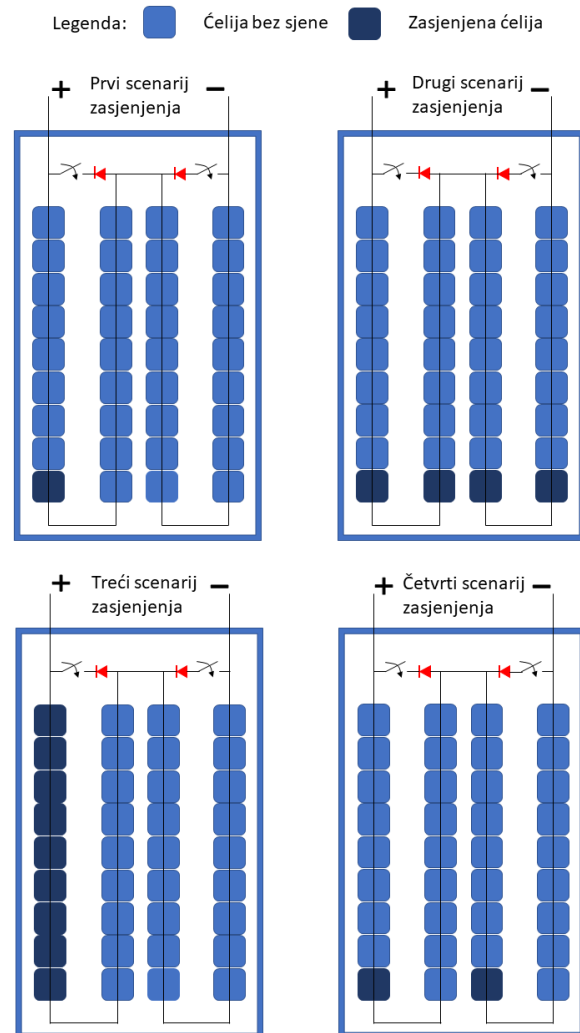
S ciljem prikaza utjecaja sjene i premosnih dioda na prilike u fotonaponskom modulu, razvijen je model u programskom paketu Matlab – Simulink. Razmatrani fotonaponski modul sastoji od dva podniza ćelija, odnosno posjeduje dvije premosne diode, a simulacije su određene za četiri scenarija zasjenjenja:

1. Zasjenjenje jedne ćelije (dio jednog podniza)

2. Zasjenjenje čitavog reda (dio oba podniza)

3. Zasjenjenje čitavog stupca (dio jednog podniza)

4. Zasjenjenje dvije ćelije (dio oba podniza)



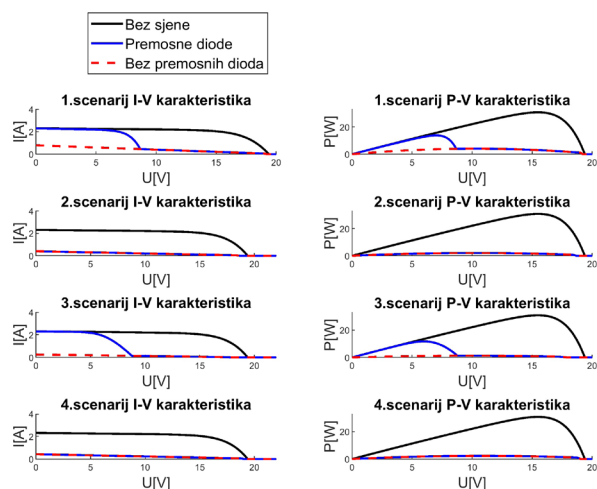
Slika 5 Scenariji zasjenjenja

Figure 5 Shading scenarios

U razvijenom modelu omogućeno je odspajanje premosnih dioda kako bi se odredio i njihov utjecaj na $I - V$ i $P - V$ karakteristiku. Na Sliku 6 prikazane su simulacijom dobivene $I - V$ i $P - V$ karakteristike.

Provedenom simulacijom na modelu bez premosnih dioda prikazan je negativni utjecaj sjene na strujno-naponske prilike u fotonaponskom modulu. Usporedbom $I - V$ karakteristike nezasjenjenog modula s dobivenim $I - V$ karakteristikama za svaki scenarij zasjenjenja, vidljivo je da sjena uzrokuje značajan pad napona i ograničava

struju fotonaponskog modula. Posljedica toga je značajno smanjenje snage, što prikazuju dobivene P – V karakteristike.



Slika 6 I – V i P – V karakteristike dobivene modelom

Figure 6 I – V and P – V characteristics obtained by model

Simulacija je ponovljena na modelu sa spojenim prenosnim diodama. Na I – V i P – V karakteristikama u prvom i drugom scenariju zasjenjenja jasno je prikazana svrha i način rada prenosnih dioda. Na njima je vidljivo da prenosne diode omogućuju premošćenje podniza ćelija na kojemu se nalazi sjena i tako smanjuju gubitke. Pri tome, nezasjenjeni podniz ćelija oblikuje prvi dio obje karakteristike, a oba podniza oblikuju drugi dio. Treba primijetiti da bez obzira na broj zasjenjenih ćelija u podnizu, prenosne diode premošćuju čitavi podniz. Naime, taj nedostatak u radu prenosnih dioda uzrokovan je ranije spomenutim načinom njihova spajanja. Idealno bi bilo spojiti svaku pojedinu ćeliju s jednom diodom, ali takav pristup nije praktičan niti ekonomičan. Stoga, iako prenosne diode smanjuju gubitke i dalje su

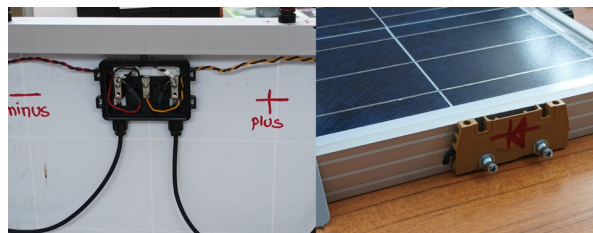
na karakteristikama vidljive negativne posljedice sjene, iako značajno ublažene.

S druge strane, I – V i P – V karakteristike dobivene simulacijom u drugom i četvrtom scenariju prikazuju ograničenja u radu prenosnih dioda. Ako se sjena nalazi na svim podnizovima ćelija koji sačinjavaju fotonaponski modul, onda prenosne diode ne mogu ispunjavati svoju zadaću. U toj situaciji pripadne I – V i P – V karakteristike su jednake kao i da nema prenosnih dioda.

5. VALIDACIJA MODELA

5. MODEL VALIDATION

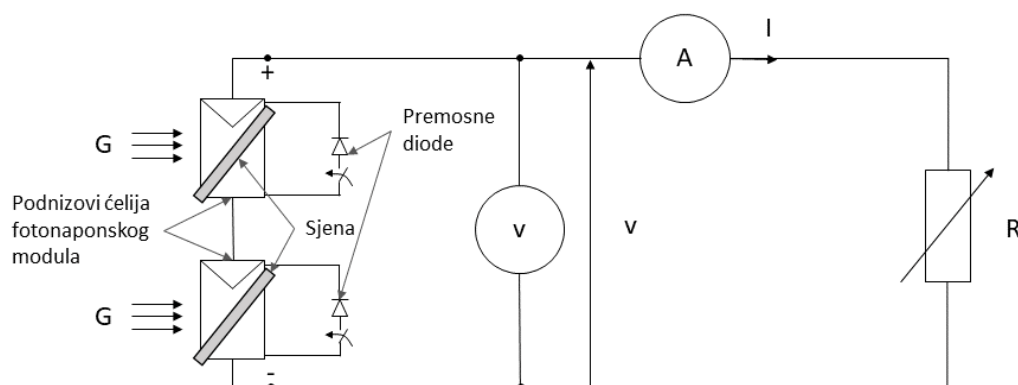
Razvijeni model validiran je stvarnim mjerenjima na laboratorijskom postavu. Za potrebe mjerenja fotonaponski modul se malo modificirao ugradnjom stezaljki-kratkospojnika kako bi se omogućilo mjerenje sa i bez ugrađenih prenosnih dioda (Slika 7 i Slika 8).



Slika 7 Modificirani fotonaponski modul

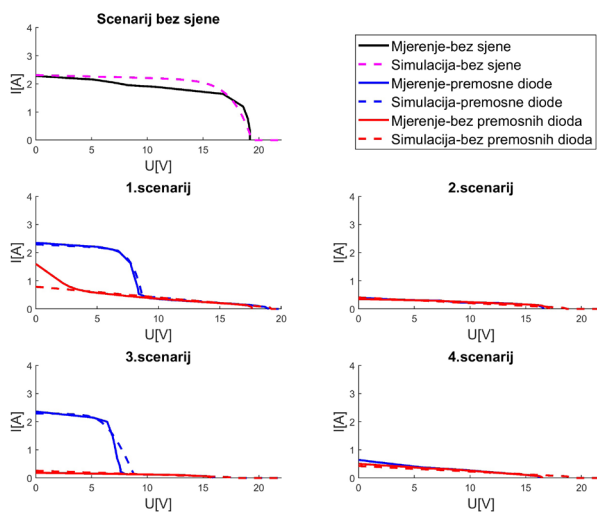
Figure 7 Modified photovoltaic module

Usporedba I – V karakteristika dobivenih modelom i stvarnim mjerenjima dana je u nastavku.



Slika 8 Shema strujnog kruga za mjerenje I – V karakteristike

Figure 8 Circuit diagram for measuring the I – V characteristic



Slika 9 Usporedba $I - V$ karakteristika dobivenih modelom i mjerenjem

Figure 9 Comparison of $I - V$ characteristics obtained by model and measurement

Vidljivo je da se rezultati modela i mjerenja vrlo dobro poklapaju.

6. PREMOSNE DIODE U POLUĆELIJSKIM FOTONAPONSKIM MODULIMA

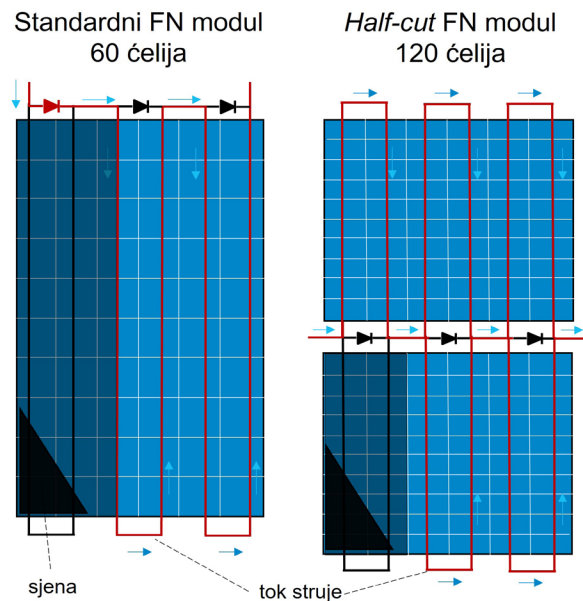
6. BYPASS DIODE IN HALF-CUT CELL PHOTOVOLTAIC MODULES

Premosne diode, zbog svoje funkcionalnosti i jednostavnosti, zadržale su se u sličnom obliku i u suvremenim izvedbama fotonaponskih modula – tzv. polućelijskim (engl. *Half-cut cell*) fotonaponskim modulima.

U polućelijskim FN modulima, ćelije su prepolovljene što rezultira dvostruko manjom internom strujom pa time i manjim gubicima. Također je i čitav FN modul podijeljen na dvije polovice koje se električki spajaju u paralelu. Na ovaj način izlazne karakteristike FN modula ostaju nepromijenjene (izlazni napon i struja isti su kao i kod FN modula u standardnoj izvedbi).

S druge strane prednosti su višestruke: bolja otpornost na pukotine (manje su dimenzije ćelija), manji gubici (dvostruko manja interna struja) i značajno bolje „ponašanje“ FN modula tijekom zasjenjenja.

Prikaz standardnog fotonaponskog modula sa 60 ćelija i polućelijskog modula sa 120 ćelija u uvjetima segmentnog zasjenjenja dan je na Slika 10. Vidljivo je da je u polućelijskoj izvedbi FN modula, funkcija premosnih dioda dodatno unaprjeđena. U konkretnom primjeru, uz iste uvjete zasjenjenja, standardni FN modul radit će sa 2/3 snage, a polućelijski modul s 5/6 snage.



Slika 10 Usporedba standardnog i polućelijskog FN modula u uvjetima zasjenjenja

Figure 10 Comparison of standard and Half-cut PV module under shading conditions

7. ZAKLJUČAK

7. CONCLUSION

Pojava sjene izrazito je negativna pojava koja izaziva značajne gubitke i može uzrokovati uništenje fotonaponskih modula. Stoga se razvijaju razne metode ublažavanja negativnih posljedica sjene. Metoda koja se najčešće koristi su premosne diode kojima se značajno smanjuju gubici izazvani sjenom te sprječava uništenje modula. Ipak, premosne diode uz sebe vežu određena ograničenja u radu i nedostatke od kojih je svakako važno za istaknuti značajno promjenjivu $I - V$ karakteristiku, ovisnu o obliku sjene.

Stoga je ovo područje još uvijek razvojno interesantno i aktivno, a inženjeri stalno unaprjeđuju dizajn fotonaponskih modula kako bi se ublažio negativni utjecaj sjene (npr. *Half-cut* dizajn ćelija) [6], [7].

8. REFERENCE

8. REFERENCES

- [1.] Z. Meštrović, Obnovljivi izvori energije: Materijali s predavanja, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2021.
- [2.] Gilbert M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems 2nd edition; Wiley-IEEE Press, 2013., ISBN: 978-1-118-63350-2
- [3.] Vieira, R. G., de Araujo, F. M., Dhimish, M., Guerra, M. I. S., A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules; Energies 2020, 13(10), 2472; doi: 10.3390/en13102472
- [4.] J. C. Teo et.al. Impact of Partial Shading on the P-V Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String; Energies 2018, 11, 1860; doi:10.3390/en11071860
- [5.] A. G. Galeano, et. al. Shading Ratio Impact on Photovoltaic Modules and Correlation with Shading Patterns; Energies 2018, 11(4), 852; doi:10.3390/en11040852
- [6.] M. T. Sarniak, Modeling the Functioning of the Half-Cells Photovoltaic Module under Partial Shading in the Matlab Package, Appl. Sci. 2020, 10, 2575; doi:10.3390/app10072575
- [7.] A. Joshi et. al., Comparison of half cut solar cells with standard solar cells, IEEE 2019, doi: 10.1109/ICASET.2019.8714488
- [8.] Lj. Majdandžić Solarni sustavi: teorijske osnove, projektiranje, ugradnja i primjeri izvedenih projekata; Zagreb: Graphis, 2010. ISBN: 953-279-027-6

AUTORI · AUTHORS



● **Tonko Pale** - je rođen 4.5.1995. godine u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Zagrebu. Daljnje školovanje nastavlja u Zagrebu na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Preddiplomski stručni

studij elektrotehnike završio je 2022. godine na smjeru Energetska elektrotehnika, a tema završnog rada je bila „Analiza utjecaja sjene na FN modul“.

Korespondencija · Correspondence

tpale1@hotmail.com



● **Zvonimir Meštrović** - je rođen 21.8.1988. godine u Zagrebu. Preddiplomski i diplomski studij završio je 2012. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, smjer Elektroenergetika.

Trenutno je zaposlen u tvrtki Encro d.o.o. kao voditelj projekata vjetroelektrana i sunčanih elektrana. Uz to, radi kao viši predavač vanjski suradnik na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu.

Korespondencija · Correspondence

zmestrovic@tvz.hr



● **Ivor Marković** - je rođen 18.10.1988. godine u Zagrebu. Preddiplomski i diplomski studij završio je 2012. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, smjer Elektroenergetika. Trenutno

radi u tvrtki Doking d.o.o. kao Product Manager i Glavni inženjer. Uz to, radi kao viši predavač vanjski suradnik na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu.

Korespondencija · Correspondence

imarkovic@tvz.hr