

# Primjena teorije haosa u estimaciji parametara solarne ćelije

Dražen Jovanović  
Sektor za mjerenja  
Crnogorski elektrodistributivni sistem  
Podgorica, Crna Gora  
e-mail: [drazenjovanovic@outlook.com](mailto:drazenjovanovic@outlook.com)

Martin Čalasan, Vesna Rubežić i Luka Lazović  
Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet Crne Gore  
Podgorica, Crna Gora  
e-mail: [martinc@ac.me](mailto:martinc@ac.me); [vesnar@ac.me](mailto:vesnar@ac.me); [lukal@ac.me](mailto:lukal@ac.me)

**Sažetak**— Za estimaciju parametara jednodiodnog modela solarne ćelije u ovom radu je predložen haotični optimizacioni algoritam zasnovan na jednačinama koje opisuju logističko preslikavanje. Estimirane su vrijednosti redne i paralelne otpornosti, vrijednost fotostruje, struje saturacije diode i koeficijent idealnosti diode. Estimirani parametri, strujno-naponske (I-V) i snaga-napon (P-V) karakteristike solarne ćelije dobijene pomoću predloženog algoritma su upoređene sa rezultatima dobijenim pomoću devet različitih optimizacionih metoda. Dobijeni rezultati su pokazali da predloženi algoritam najbolje aproksimira mjerene karakteristike solarne ćelije.

**Ključne riječi**- haotični optimizacioni algoritam; solarna ćelija; jednodiodni model; (Chaotic Optimization Algorithm; Solar cell; one-diode solar cell model)

## I. UVOD

Solarna energija predstavlja jedan od najperspektivnijih oblika obnovljive energije. Laka instalacija, niski troškovi održavanja i u zadnje vrijeme sve niže cijene samih fotonaponskih modula su prednosti zbog kojih je udio solarne energije u proizvodnji električne energije sve veći. Takođe, sa sve većim zagađenjem životne sredine povećava se potreba za čistom električnom energijom, pa upotreba solarnih izvora energije biva značajnija.

Jedan od najznačajnijih načina upotrebe solarne energije sastoji se u njenoj upotrebi za proizvodnju električne energije (mini i velika solarna elektrana). Međutim, u cilju detaljne analize rada solarne elektrane, kao i u cilju ispitivanja priključenja solarne elektrane na elektroenergetski sistem, potrebno je poznavati detaljan matematički model solarnih ćelija. Proizvođači solarnih panela daju samo kataloške podatke o solarnim ćelijama/modulima, u koje spadaju: napon praznog hoda ( $U_{ph}$ ), struja kratkog spoja ( $I_{ks}$ ), napon i struja u tački maksimalne snage (MPP), temperaturono-strujni koeficijent  $K_i$ , temperaturno-naponski koeficijent  $K_v$  i maksimalna snaga ( $P_{max}$ ). Svi kataloški podaci su dati za nominalne uslove (STC), odnosno za temperaturu od 25°C i insolaciju 1000 W/m<sup>2</sup>. Kao što se može primjetiti parametri potrebni za modelovanje solarne ćelije se ne nalaze u kataloškim podacima, zbog toga se ti parametri estimiraju pomoću različitih estimacionih metoda.

Zadnjih dvadesetak godina, estimacija parametara solarne ćelije je postala veoma aktuelna tema mnogih svjetskih naučnih

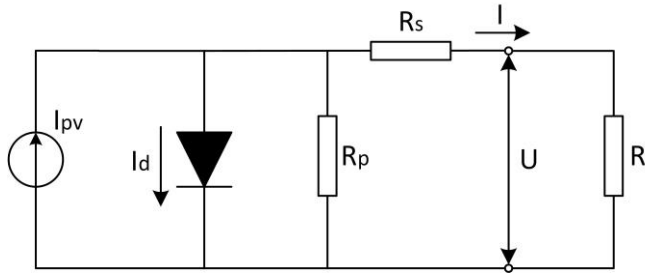
časopisa i tema istraživanja mnogih naučnika. Konkretno, u radu [1] je za estimaciju parametara modela solarne ćelije korišćen *Differential Evolution* (DE) metod. Metoda DE opisana u [2] je evoluciona iterativna optimizaciona tehnika zasnovana na procesu mutacije. Osim DE, za estimaciju parametara solarne ćelije može se iskoristiti i *Artificial Bee Colony-differential evolution* (ABC-DE) [1]. Ovaj metod je nastao na osnovu *Artificial bee swarm optimization* (ABSO) metode [3] i inspirisan je ponašanjem pčelinog roja koji traži hranu. Štaviše, ABC-DE se pokazao kao veoma uspješan u rešavanju problema iz različitih oblasti. Osim njih, može se koristiti i *Gey Wolf Optimizer* (GWO), koji opisuje hijerarhiju u čoporu sivih vukova [4], *Modified Particle Swarm Optimization* (MPSO) [1] koji predstavlja modifikovanu verziju *Particle Swarm Optimization* (PSO) [5] i koji oponaša ponašanje jata ptica, *Chaotic Asexual Reproduction Optimization* (CARO) [6], koji je nastao primjenom teorije haosa na *Asexual Reproduction Optimization* (ARO) metod a koji opisuje aseksualnu reprodukciju organizama [7], kao i *Differential Evolution Technique* (DET) [8], metod koji predstavlja modifikovanu verziju DE metoda. Na kraju, ne treba zaboraviti i da se u estimaciji parametara solarnih ćelija može iskoristiti i *Simulated Annealing* (SA) [9] algoritam koji imitira proces postepenog hlađenja metala.

U ovom radu je predložena haotična optimizaciona procedura za estimaciju parametara jednodiodnog modela solarne ćelije i to: redne otpornosti ( $R_s$ ), paralelna otpornosti ( $R_p$ ), fotostruje ( $I_{pv}$ ), struje saturacije diode ( $I_0$ ) i idealnosti diode ( $n$ ). Na osnovu estimiranih vrijednosti izvršen je proračun I-V i P-V krivih, koje su upoređene sa izmjerenim I-V i P-V karakteristikama respektivno. Takođe, estimirani parametri su upoređeni sa parametrima dobijenim drugim estimacionim metodama.

Ovaj rad je organizovan na sledeći način: drugo poglavlje će biti posvećeno modelovanju jednodiodnog modela solarne ćelije, a u trećem poglavlju će biti opisan haotični optimizacioni algoritam, kojim će se estimirati parametri solarne ćelije. U četvrtom poglavlju će biti prikazani rezultati simulacija i upoređeni dobijeni rezultati. Zaključna razmatranja će biti prikazana na kraju rada.

## II. MODEL SOLARNE ČELIJE

U ovom radu je za estimaciju parametara korišten jednodiodni model solarne ćelije. Na slici 1. je prikazan jednodiodni model solarne ćelije.



Slika 1. Jednodiodni model solarne ćelije

Kada se solarna ćelija osvjetli ona se ponaša kao izvor stalne struje. Ovaj izvor se modeluje foto strujom  $I_{pv}$ . Strujni izvor je paralelno vezan sa paralelnim otpornikom  $R_p$  i diodom koja se modeluje pomoću dva parametra koja se estimiraju, a to su struja saturacije  $I_0$  i koeficijent idealnosti diode  $n$ . Kolo sa slike 1. matematički se opisuje izrazom (1).

$$I = I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{q(U+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

gdje su:  $U$  izlazni napon,  $I$  izlazna struja,  $q$  je količina naelektrisanja elektrona, a  $k$  je Bolcmanova konstanta.

## III. HAOTIČNI OPTIMIZACIONI ALGORITAM

Haotično ponašanje, kao oblik ustaljenog stanja kojeg pod određenim uslovima ispoljavaju mnogi prirodni i vještački sistemi, opisano je u [10], [11]. U literaturi se mogu naći različiti tipovi haotičnih jednačina koje su primijenjene u optimizacionim metodama [12]. U ovom radu predložen je haotični optimizacioni algoritam zasnovan na jednačinama koje opisuju logističko preslikavanje. Blok dijagram haotične optimizacije parametara električnog modela solarne ćelije prikazan je na slici 2.

Fitness funkcija jednodiodnog modela [13] izvedena iz jednačine (1) data je formulom (2).

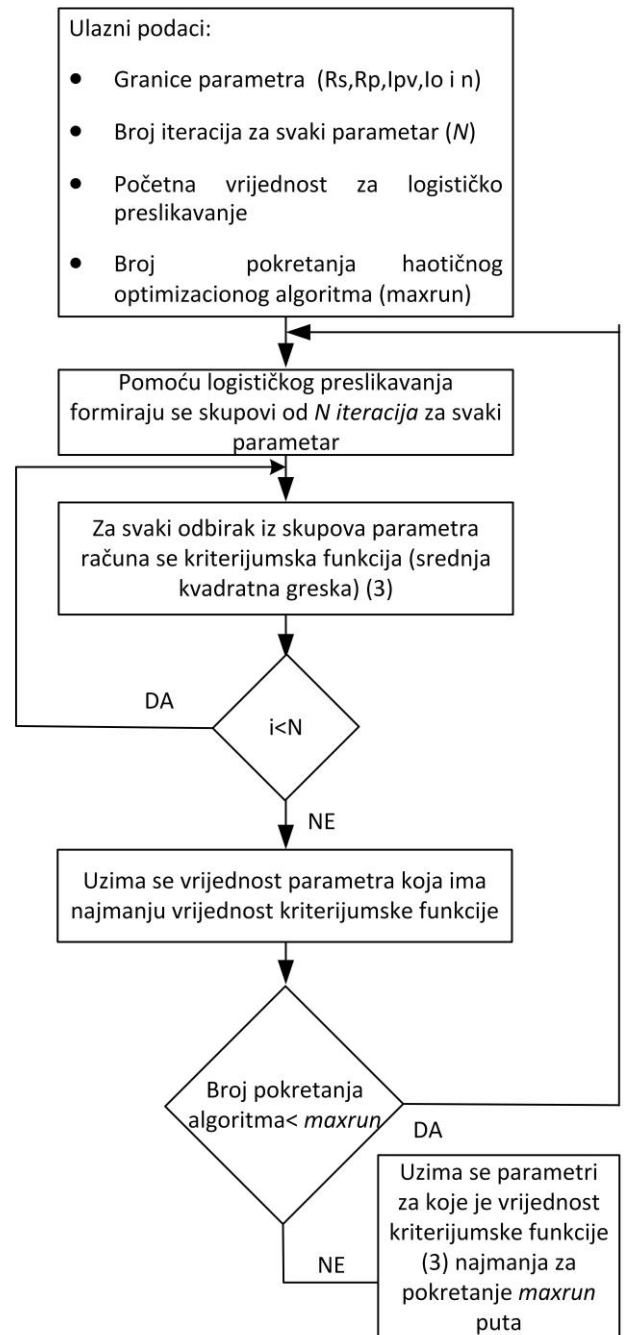
$$f(U, I) = I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{q(U+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} - I, \quad (2)$$

gdje  $U$  i  $I$  predstavljaju izmjerene vrijednosti napona i odgovarajuće vrijednosti struje.

Prije pokretanja algoritma haotičnog pretraživanja potrebno je definisati sledeće ulazne podatke: granične vrijednosti parametara koji se estimiraju, broj iteracija ( $N$ ) za svaki estimirani parametar, početnu vrijednost za logističko preslikavanje nizova (to može biti bilo koji broj između 0 i 1) i broj pokretanja haotičnog optimizacionog algoritma ( $maxrun$ ). Kada se unesu svi potrebni podaci pokreće se algoritam. Pomoću logističkog preslikavanja formiraju se nizovi za svih pet estimiranih parametara. Zatim se za svaki odabirak nizova

parametara računa kriterijumska funkcija i to kao srednja kvadratna greška (RMSE) data formulom (3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(U, I)} \quad (3)$$



Slika 2. Blok dijagram haotične optimizacije parametara

Izračunavanjem srednje kvadratne greške za sve odbirke nizova estimiranih parametara dobija se niz  $N$  grešaka. Tada se traži najmanja greška i vrijednost parametara se pamti. Ovaj postupak se ponavlja onoliko puta koliko je definisana promenljiva  $maxrun$ . Nakon toga, određuje se najmanja greška za svako pokretanje algoritma. Najbolji rezultati, tj. oni koji

imaju najmanju grešku za sve *maxrun* putanje su estimirani parametri jednodiodnog modela solarne ćelije.

#### IV. PRIMJENA HAOTIČNOG PRETRAŽIVANJA ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA SOLARNE ĆELIJE

Estimirani su parametri jednodiodne solarne ćelije tipa R.T.C France cell pri temperaturi od 33°C i insolaciji od 1000W/m<sup>2</sup>. Mjereni podaci su preuzeti iz rada [14].

##### A. Numerički rezultati

Za određivanje parametara korišćeno je deset miliona odbiraka (N=1000000) i broj pokretanja algoritma je trideset (*maxrun*=30). Granične vrijednosti unutar kojih su tražene optimalne vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije date su u Tabeli I.

TABELA I. GRANIČNE VRIJEDNOSTI PARAMETARA

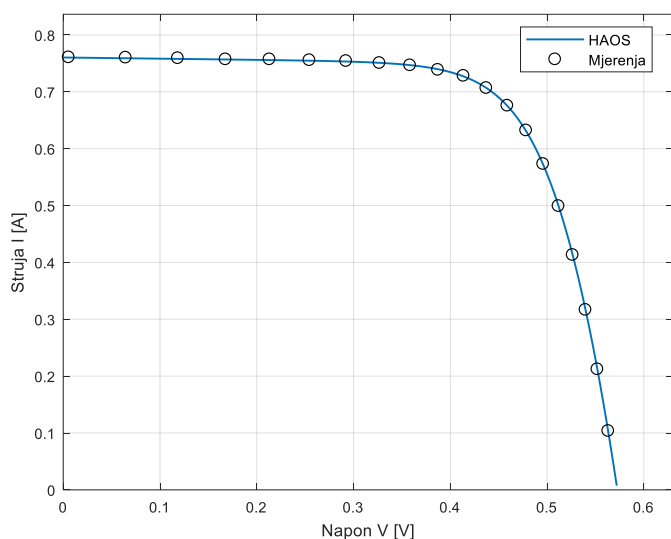
	$R_s$	$R_p$	$I_{pv}$	$I_0$	$n$
Donja granica	0,015	40	0	20e-08	0,8
Gornja granica	0,045	80	1	80e-08	2

U Tabeli II su prikazane estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška.

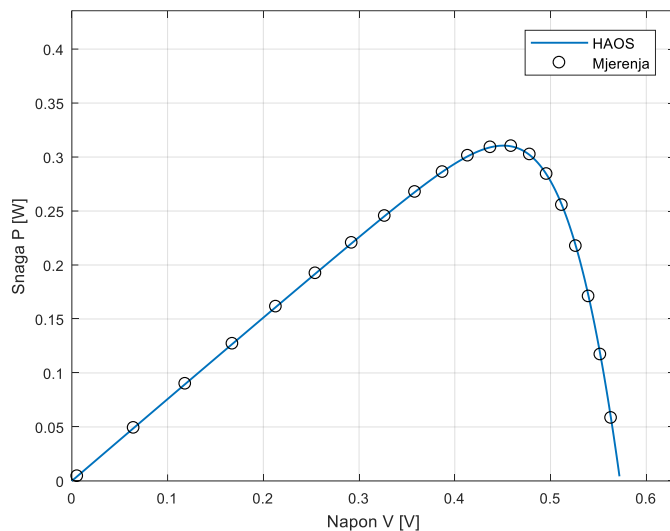
TABELA II. ESTIMIRANI PARAMETARI SOLARNE ĆELIJE

$R_s$	$R_p$	$I_{pv}$	$I_0$	$n$	RMSE
0.0367	48.7822	0.7609	2.9237e-07	1.4710	1,4707e-03

Na slikama 3 i 4 su prikazane I-V i P-V karakteristike solarne ćelije dobijene estimiranjem parametara pomoću haotičnog optimizacionog algoritma (HOA). Takođe, na grafiku je prikazana i mjerena karakteristika.



Slika 3. I-V karakteristika solarne ćelije



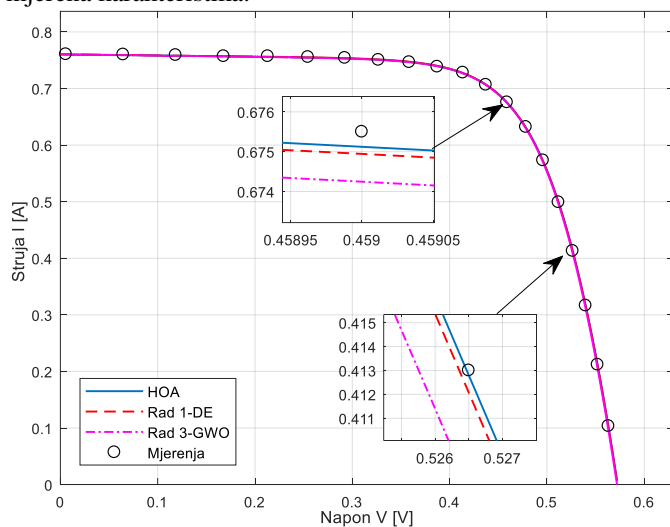
Slika 4. P-V karakteristika solarne ćelije

Sa slikama 3 i 4 se vidi da karakteristike solarne ćelije dobijene estimiranjem parametara pomoću haotičnog optimizacionog algoritma veoma dobro aproksimiraju mjerene karakteristike.

##### B. Usporedni rezultati

Rezultati dobijeni pomoću haotičnog optimizacionog algoritma (HOA) su upoređeni sa rezultatima dobijenim pomoću devet različitih optimizacionih metoda preuzetih iz literature. U Tabeli III su date estimirane vrijednosti svih pet parametara solarne ćelije i vrijednost srednje kvadratne greške (RMSE).

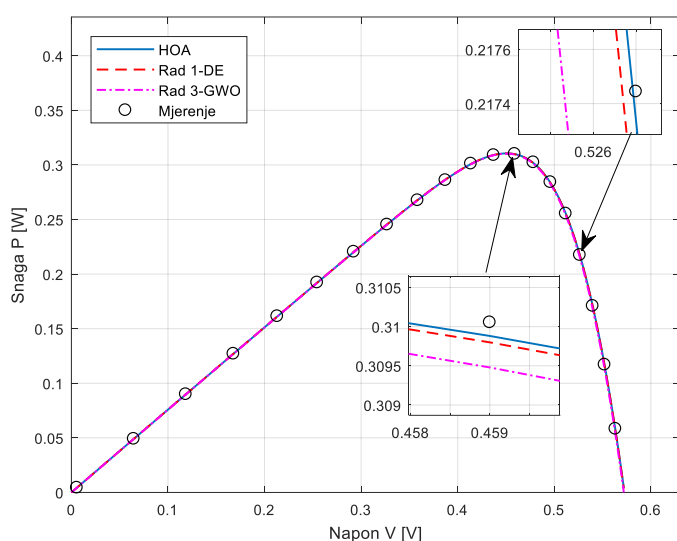
Na slikama 5 i 6 su prikazane I-V i P-V karakteristike solarne ćelije dobijene estimiranjem parametara pomoću haotičnog optimizacionog algoritma (HOA) i dva najbolja optimizaciona metoda. Takođe, na grafiku je prikazana i mjerena karakteristika.



Slika 5. Usporedna I-V karakteristika solarne ćelije

TABELA III. UPOREĐIVANJE PARAMETARA SOLARNE ČELIJE

	Algoritam	$R_s$	$R_p$	$I_{pv}$	$I_o$	$n$	RMSE (greska)
1	HOA	0.03672	48.7821	0.76090	0.29236	1.47098	1.4707E-03
2	DE [1]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.48059	2.3423E-03
3	ABCDE [1]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.47986	4.8548E-03
4	GWO [4]	1.451219	45.116309	0.760996	0.2430388	1.451219	7.2845E-03
5	CARO [6]	0.03644	53.0893	0.76079	0.31724	1.48168	8.1969E-03
6	PSO [5]	0.0363940	53.7965	0.760798	0.322721	1.48382	9.6545E-03
7	ABSO [1]	0.03659	52.2903	0.76080	0.30623	1.47986	1.4169E-02
8	SA [1]	0.0345	43.10345	0.7620	0.4798	1.5172	1.8998E-02
9	DET [8]	0.036	54.532	0.751	0.315	1.487	2.4481E-02
10	MPSO [1]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.47086	3.9022E-02



Slika 6. Usporedna P-V karakteristika solarne ćelije

Iz Tabele III se vidi da haotični optimizacioni algoritam ima najmanju vrijednost srednje kvadratne greške. Takođe, sa slika 5 i 6 se može uočiti da ovaj predloženi algoritam najbolje aproksimira mjerene karakteristike solarne ćelije.

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predložen haotični optimizacioni algoritam za estimaciju pet parametara jednodiodnog modela solarne ćelije. Predloženi haotični optimizacioni algoritam zasnovan je na jednačinama koje opisuju logističko preslikavanje. Estimirani parametri, I-V i P-V karakteristike solarne ćelije dobijene pomoću predloženog algoritma estimacije parametara su upoređene sa rezultatima dobijenim pomoću devet različitih optimizacionih metoda. Dobijeni rezultati su pokazali da predloženi algoritam najbolje aproksimira mjerene karakteristike solarne ćelije i ima najmanju vrijednost srednje kvadratne greške.

## ZAHVALNICA

Istraživanje prikazano u ovom radu dio je aktivnosti Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici na aktuelnom projektu „Cross border management of variable renewable energies and storage units enabling a transnational wholesale market (Prekogranično upravljanje promjenljivim obnovljivim izvorima energije i jedinicama za skladištenje, u cilju obezbjeđivanja internacionalnog tržišta električne energije na veliko) – CROSSBOW,“ koje finansira Ministarstvo nauke Crne Gore.

## LITERATURA

- [1] Hachana O, Hemsas KE, Tina GM, Ventura C. Comparison of different metaheuristic algorithms for parameter identification of photovoltaic cell/module. J Renew Sustain Energy 2013;5:053122J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

- [2] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces," *J. Global Optim.* 11, 341 (1997).
- [3] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [4] Jordehi AR. Time varying acceleration coefficients particle swarm optimisation (TVACPSO): A new optimisation algorithm for estimating parameters of PV cells and modules. *Energy Convers Manage* 2016;129:262–74.
- [5] Ye M, Wang X, Xu Y. Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization.
- [6] Yuan X, He Y, Liu L. Parameter extraction of solar cell models using chaotic asexual reproduction optimization. *Neural Comput Appl* 2015;26:1227–39. M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [7] Farasat A, Menhaj MB, Mansouri T, Moghadam MRS (2010) ARO: a new model-free optimization algorithm inspired from asexual reproduction. *Appl Soft Comput* 10(4):1284–1292.
- [8] Chellaswamy C, Ramesh R. Parameter extraction of solar cell models based on adaptive differential evolution algorithm. *Renew Energy* 2016;97:823–37.
- [9] El-Naggar KM, AlRashidi MR, AlHajri MF, Al-Othman AK. Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification. *Sol Energy* 2012;86:266–74.
- [10] M. P. Kennedy. "Three Steps to Chaos-Part II: A Chua's Circuit Primer," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, pp. 657-674, 1993.
- [11] J. C. Sprott, *Chaos and Time-Series Analysis*.: Oxford University Press, 2003.
- [12] V. Rubežić, L. Lazović, Ana Jovanović, "Parameter identification of Jiles-Atherton model using the chaotic optimization method," *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, Vol.37, No.6, 2018, pp. 2067-2080, ISSN 0332-1649.
- [13] Xiankun Gao, Yan Cui, Jianjun Hu, Nadeem Tahir, Guangyin Xu. Performance comparison of exponential, Lambert W function and Special Trans function based single diode solar cell. *Energy Convers Manage* 2018;171:1822–1842.
- [14] Easwarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I, Boutrif C. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers. *Int J Sol Energy* 1986;4:1–12.

#### ABSTRACT

For the estimation of the parameters of a one-diode solar cell model is proposed a Chaotic Optimization Algorithm (COA) based on equations describing logistic mapping. The values of serial and parallel resistance, photocurrent value, diodes saturation current and diode ideality factor are estimated. Estimated parameters, current-voltage (I-V) power-voltage (P-V) characteristics of the solar cell obtained by the proposed algorithm are compared with the results obtained using nine different optimization methods. The estimated results showed that the proposed algorithm best approximates the measured characteristics of the solar cell.

#### **Application of chaos theory in the estimation of solar cell parameters**

Dražen Jovanović, Martin Čalasan, Vesna Rubežić and Luka Lazović