

Primjena haotičnog optimizacionog algoritma u estimacija parametara zamjenske šeme dvokavezne asinhronne mašine

Željko Fuštić, Martin Čalasan, Tatijana Dlačač, Branko Koprivica

Apstrakt— U ovom radu je predstavljena upotreba haotičnog optimizacionog algoritma - Chaotic Optimization Algorithm (COA) u estimaciji parametara zamjenske šeme dvokavezne asinhronne mašine. Parametri zamjenske šeme dvokavezne asinhronne mašine su određeni pomoću podataka naznačenih na natpisnoj pločici mašine (polazni moment, nominalni moment, maksimalni moment i nominalna vrijednost faktora snage). Poređenjem rezultata COA sa rezultatima dobijenim primjenom Modified Shuffled Frog - Leaping Algorithm – MSFLA i modifikovanog Njutnovog metoda uključenog u SimPowerSystem Toolbox u MATLAB (Power Asynchronous Machine Params - PAMP) pokazano je da se COA algoritam može veoma efikasno primijeniti u estimaciji parametara zamjenske šeme dvokavezne asinhronne mašine.

Ključne reči— asinhronna mašina; dvokavezna zamjenska šema; parametri; haotični optimizacioni algoritam.

I. UVOD

Asinhronna mašina je najrasprostranjenija obrtna električna mašina naizmjenične struje u električnim pogonima. Pravilno funkcionisanje i poznavanje stanja asinhronne mašine u električnim pogonima bitno je zbog smanjenja gubitaka, odsustva kvarova i monitoringa stanja [1].

Poznato je da se asinhronna mašina može predstaviti preko jednodokavezne zamjenske šeme [2]. Štaviše, jednodokavezna zamjenska šema asinhronna mašina je opisana i u IEEE standardima [3]. Određivanjem parametara zamjenske šeme dobija se slika o ponašanju i radu asinhronne mašine, performansama i njenom opštem stanju [1].

Postupak određivanja parametara asinhronne mašine se može sprovesti primjenom standardnih oglada kratkog spoja i praznog hoda. Međutim, glavni nedostatak primjene ove metode jeste u tome što je potrebno mašinu izvesti iz pogonskog stanja [3].

Osim prethodnih u literaturi su široko prihvaćena i sljedeća dva pristupa. Naime, po prvom pristupu, za estimaciju

Željko Fuštić, Crnogorski-elektrodistributivni sistem, Podgorica, Crna Gora (e-mail: zeljkofustic@gmail.com).

Martin Čalasan – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (e-mail: martinc@ucg.ac.me).

Tatijana Dlačač – Pomorski fakultet Kotor, Univerzitet Crne Gore, Put I Bokeljske brigade 44, 85330 Kotor, Crna Gora (e-mail: tanjav@ucg.ac.me).

Branko Koprivica – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32102 Čačak, Srbija (e-mail: branko.koprivica@ftn.kg.ac.rs).

parametara asinhronne mašine dovoljno je koristiti podatke sa natpisne pločice ili podatke koje daje proizvođač u svojim kataloškim podacima [4]. Međutim, glavni nedostatak primjene ove metode leži u činjenici da sve mašine nemaju svoje kataloške podatke, što je čest slučaj posebno kod starijih asinhronnih mašina. Prema drugom pristupu, parametri mašine se mogu odrediti korišćenjem izmjerenih podataka iz različitih oglada opterećivanja asinhronne mašine. Ovi metodi su široko prihvaćeni jer se mogu primijeniti na svim asinhronnim mašinama. Takođe, ovi pristupi opisuju stvarno stanje mašine. Međutim, bez obzira da li se za određivanje parametara asinhronne mašine koriste podaci sa natpisne pločice ili kataloški podaci ili se koriste podaci iz različitih oglada na asinhronnoj mašini, potrebno je koristiti i različite analitičke [5-6], numeričke [7-8], ili metaheurističke metode [9-10]. Zbog toga, ovo polje nauke je veoma interesantno za istraživanje, a posebno znajući činjenicu da se ne može tvrditi da postoji neki uneverzalno najbolji, najbrži i najtačniji metod.

U većini radova koji se tiču obe oblasti posmatra se jednodokavezna zamjenska šema asinhronne mašine. Međutim, ova zamjenska šema ne može u potpunosti da opiše čitav opseg klizanja pa se u naučnim publikacijama sve češće koristi dvokavezna zamjenska šema asinhronne mašine [11].

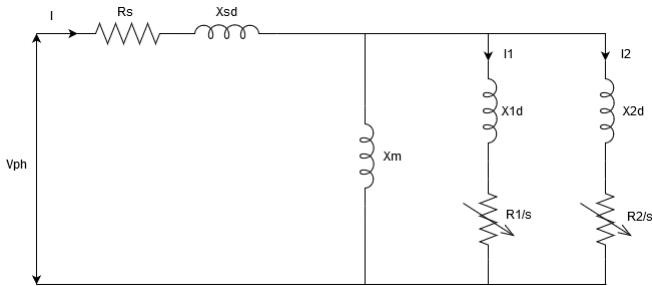
U ovom radu će biti izloženi rezultati estimacije parametara zamjenske šeme dvokavezne asinhronne mašine dobijeni uz pomoć haotičnog optimizacionog algoritma - Chaotic Optimization Algorithm (COA). Ovaj optimizacioni algoritam je našao primjenu u mnogim aplikacijama, kako kao nezavistan algoritam, tako i kao hibridna varijanta [12-13].

Rad je organizovan na sljedeći način. U drugom poglavlju je opisana zamjenska šema dvokavezne asinhronne mašine. Kratak opis haotičnog optimizacionog algoritma je dat u trećem poglavlju. Rezultati estimacije parametara asinhronne mašine su prikazani u četvrtom poglavlju. Na kraju, u petom poglavlju je dat komentar na cjelokupan rad i pravci budućih istraživanja.

II. ZAMJENSKA ŠEMA DVOKAVEZNE ASINHRONE MAŠINE

Zamjenska šema asinhronne mašine je prikazana na Slici 1. Na ovoj slici R_s i X_{sd} predstavljaju parameter statora, X_m je reaktansa magnećenja, dok su ostali parametri jednog i drugog kaveza mašine (otpornosti R_1 i R_2 i reaktanse X_{1d} i X_{2d}). Klizanje mašine je označeno sa s .

U ovom radu, za estimaciju parametara mašine koriste se podaci sa natpisne pločice mašine. Na natpisnoj pločice se nalaze sljedeće informacije: polazni moment, nominalni moment, maksimalni moment i nominalna vrijednost faktora snage.



Sl. 1. Zamjenska šema dvokavezne asinhronne mašine

Kako je cilj našeg rada procjena parametara R_s , X_{sd} , X_m , R_1 , R_2 , X_{1d} i X_{2d} potrebno je definisati odgovarajuću kriterijumsku funkciju koja minimizuju odstupanja između procijenjenih i fabričkih vrijednosti datih na natpisnoj pločici mašine. U ovom radu koristi se sljedeća kriterijumska funkcija:

$$OF = F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 + F_6^2, \quad (1)$$

gdje je

$$F_1 = \frac{T_{fl,cal} - T_{fl,m}}{T_{fl,m}}, \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{T_{st,cal} - T_{st,m}}{T_{st,m}}, \quad (3)$$

$$F_3 = \frac{T_{max,cal} - T_{max,m}}{T_{max,m}}, \quad (4)$$

$$F_4 = \frac{pf_{fl,cal} - pf_{fl,m}}{pf_{fl,m}}, \quad (5)$$

$$F_5 = \frac{I_{st,cal} - I_{st,m}}{I_{st,m}}, \quad (6)$$

$$F_6 = \frac{I_{fl,cal} - I_{fl,m}}{I_{fl,m}}. \quad (7)$$

U prethodnim jednačinama indeks fl predstavlja puno opterećenje, max predstavlja maksimalnu vrijednost, st predstavlja startnu vrijednost, cal predstavlja proračunatu tj. estimiranu vrijednost, dok indeks m predstavlja mjerenu vrijednost. Moment je označen sa velikim slovom T , faktor snage sa pf , a struja sa I .

Za određivanje struje statora i rotora korišćene su sljedeće relacije:

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}_{ph}}{R_s + jX_{sd} + \bar{Z}_p}. \quad (8)$$

gdje je \bar{V}_{ph} fazna vrijednost napona, a

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{(1/jX_m) + (1/(R_1/s + jX_{1d})) + (1/(R_2/s + jX_{2d}))}. \quad (9)$$

Polazna vrijednost struje se računa ako se uzme da je $s=1$, a pri punom opterećenju $s=s_n$.

Moment u zavisnosti od klizanja je dat izrazom:

$$T(s) = \frac{3P}{\omega_s} \left([I_1(s)]^2 \frac{R_1}{s} + [I_2(s)]^2 \frac{R_2}{s} \right). \quad (10)$$

gdje je

$$I_1(s) = \frac{Z_p I(s)}{\frac{R_1}{s} + jX_{1d}}, \quad (11)$$

i

$$I_2(s) = \frac{Z_p I(s)}{\frac{R_2}{s} + jX_{2d}}. \quad (12)$$

Vrijednost prevalnog klizanja s_m se dobija rješavanjem jednačine

$$\frac{dT(s)}{ds} = 0. \quad (13)$$

Vrijednost polaznog momenta se dobija tako što se uzme da je $s=1$, prevalnog $s=s_m$, a pri punom opterećenju $s=s_n$. Faktor snage pri punom opterećenju se računa iz aktivne i reaktivne snage mašine, shodno izrazima za prividnu (S_n), aktivnu (P_n) i reaktivnu snagu (Q_n):

$$\begin{aligned} \bar{S}_{fl} &= 3\bar{V}_{ph} \cdot (\bar{I}(s_{fl}))^* \\ P_{fl} &= \text{real}(\bar{S}_{fl}) \\ Q_{fl} &= \text{imag}(\bar{S}_{fl}) \\ pf_{fl} &= \arctan\left(\frac{Q_{fl}}{P_{fl}}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

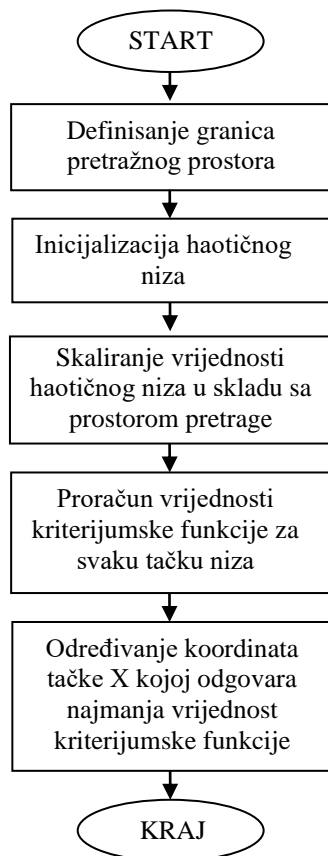
III. HAOTIČNI OPTIMIZACIONI ALGORITAM

Haotični optimizacioni algoritam se sve češće koristi u rješavanju brojnih optimizacionih problema. Prednosti ovog metoda su jednostavnost, preciznosti i kratko vrijeme izvršenja [12-13]. Algoritam koji se koristi u ovom radu u sebi sadrži Logističku jednačinu preslikavanja [12]:

$$y_{t+1} = r \cdot y_t (1 - y_t). \quad (15)$$

pri čemu je $r=4$ – vrijednost parametra r pri kojoj Logističko preslikavanje ispoljava haotično ponašanje.

Kao i drugi optimizacioni algoritmi, COA zahtijeva definisanje granica pretrage (minimalne i maksimalne vrijednosti traženih promjenjivih). Takođe, ovaj algoritam zahtijeva definisanje funkcije cilja, tj. kriterijumske funkcije, koju treba ili minimizovati ili maksimizovati u cilju traženja rješenja. Ovaj proces je prikazan *flow-chart*-om datim na Slici 2.



Sl.2. Flow-chart COA

Sušтина estimacije parametara asinhronne mašine sastoji se u sljedećem. Prvo, definišu se gornje i donje granice svakog od nepoznatih parametara koji se estimiraju (blok - *Definisanje granica pretražnog prostora*). Nakon toga se izvrši inicijalizacija svakog od parametara koristeći haotične nizove (blok - *Inicijalizacija haotičnog niza*). U zavisnosti od granica pretrage izvrši se skaliranje vrijednosti svih haotičnih nizova, koji u sebi nose informaciju o vrijednosti svakog od parametara. Takođe, vodi se računa da svaka vrijednost parametara bude u definisanim granicama (blok - *Skaliranje vrijednosti haotičnog niza u skladu sa prostorom pretrage*). Za sve parametre definisane haotičnim nizovima izvrši se proračun vrijednosti kriterijumske funkcije (blok - *Proračun vrijednosti kriterijumske funkcije za svaku tačku niza*). Nakon što se iskoriste sve kombinacije parametara definisane haotičnim sekvencama i proračunaju vrijednosti kriterijumske funkcije odaberu se oni parametri kojima odgovara minimalna vrijednost kriterijumske funkcije, tj. minimalna vrijednost odstupanja estimiranih vrijednosti od mjerenih vrijednosti određenih varijabli (blok - *Određivanje koordinata tačke X kojoj odgovara najmanja vrijednost kriterijumske funkcije*).

IV. ESTIMACIJA PARAMETARA ZAMJENSKE ŠEME DVOKAVEZNE ASINHRONE MAŠINE

COA je primijenjen na tri asinhronne mašine različitih snaga. Podaci o asinhronim mašinama su dati u Tabeli 1 [11].

TABELA I
PODACI O KORIŠĆENIM ASINHRONIM MAŠINAMA [11]

Podaci proizvođača	Mašina 1	Mašina 2	Mašina 3
Nominalna snaga - P_n	5 HP*	40 HP	148 HP
Nominalni napon - U_n	400 V	400 V	400 V
Broj pari polova	2	2	1
Frekvencija - f	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Polazni moment - T_{st}	15 Nm	260 Nm	847 Nm
Nominalni moment - T_n	25 Nm	190 Nm	353 Nm
Maksimalni moment - T_{max}	42 Nm	370 Nm	1094 Nm
Faktor snage pri punom opterećenju - pf_n	0.8	0.8	0.9
Klizanje pri punom opterećenju - s_n	0.07	0.09	0.0077

* 1HP=746W

U Tabelama II, III i IV su prikazane vrijednosti parametara dvokavezne asinhronne mašine dobijenim pomoću COA, kao i vrijednosti parametara dobijeni primjenom Power Asynchronous Machine Params – PAMP i Modified Shuffled Frog - Leaping Algorithm – MSFLA prezentovanim u [11].

Korišćenjem dobijenih parametara zamjenske šeme dvokavezne asinhronne mašine, proračunate su vrijednosti početnog, nominalnog i maksimalnog momenta. Odgovarajuće grafičke zavisnosti date su na Slikama 3, 4 i 5. Vrijednosti odstupanja su računane shodno sljedećoj relaciji:

$$\text{odstupanje} = \frac{\text{estimirana_vrijednost} - \text{kataloška_vrijednost}}{\text{kataloška_vrijednost}} \quad (16)$$

Vrijednosti greške za sve tri analizirane mašine su prikazane u Tabelama V-VII.

TABELA II
PARAMETRI ZAMJENSKE ŠEME DVOKAVEZNE ASINHRONE MAŠINE OD 5 HP

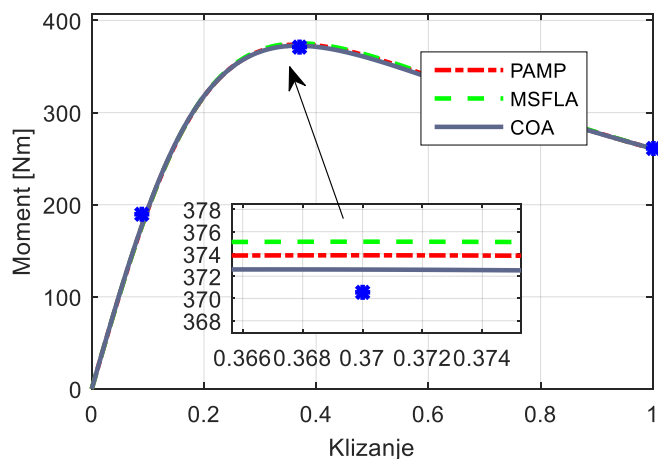
Parametri [Ω]	PAMP [11]	MSFLA [11]	COA
R_s	0.6317	0.6189	0.05336
X_{sd}	7.0686	7.0746	10.3937
X_m	72.0681	72.0694	60.8983
R_l	3.8471	3.8594	2.1293
R_2	3.8625	3.8594	9.9512
X_{ld}	7.0686	7.0746	0.0808
X_{2d}	7.0686	7.0746	0.3604

Na osnovu rezultata prikazanih na Slikama 3-5, i vrijednosti greške prikazane u Tabelama V-VII jasno se vidi da se COA može uspješno primijeniti u estimaciji parametara dvokavezne asinhronne mašine. Štaviše, jasno je da je ovaj algoritam daje odlične rezultate u estimaciji parametara mašine. Naime, vrijednosti odstupanja kataloških veličina od korespondentnih veličina proračunatih na osnovu COA parametara su ili jednake ili bolje u odnosu na slučaj kada se koriste parametri proračunati primjenom drugih metoda prezentovanih u literaturi.

TABELA III

PARAMETRI ZAMIJENSKE ŠEME DVOKAVEZNE ASINHRONE MAŠINE OD 40 HP

Parametri [Ω]	PAMP [11]	MSFLA [11]	COA
R_s	0.0003	0.0001	0.0075
X_{sd}	0.7226	0.7236	0.6828
X_m	14.2314	14.2279	14.6015
R_l	0.8748	0.8766	0.7052
R_2	0.8744	0.8766	1.1536
X_{1d}	1.5080	1.4862	1.2122
X_{2d}	0.7226	0.7236	0.9217

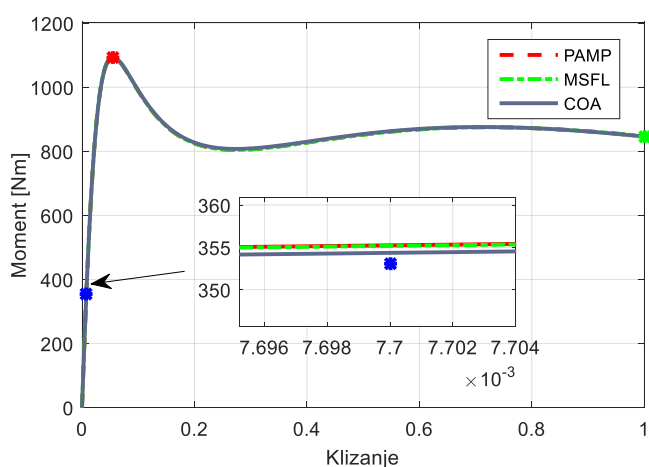


SI.4. Moment klizanje karakteristika kod 40 HP asinhrone mašine

TABELA IV

PARAMETRI ZAMIJENSKE ŠEME DVOKAVEZNE ASINHRONE MAŠINE OD 148 HP

Parametri [Ω]	PAMP [11]	MSFLA [11]	COA
R_s	0.0375	0.0377	0.0384
X_{sd}	0.0692	0.0691	0.0262
X_m	3.7385	3.7475	3.9635
R_l	0.0109	0.0109	0.0107
R_2	0.1031	0.1032	0.1840
X_{1d}	0.1424	0.1422	0.1817
X_{2d}	0.0692	0.0691	0.1818



SI.5. Moment klizanje karakteristika kod 148 HP asinhrone mašine

TABELA V

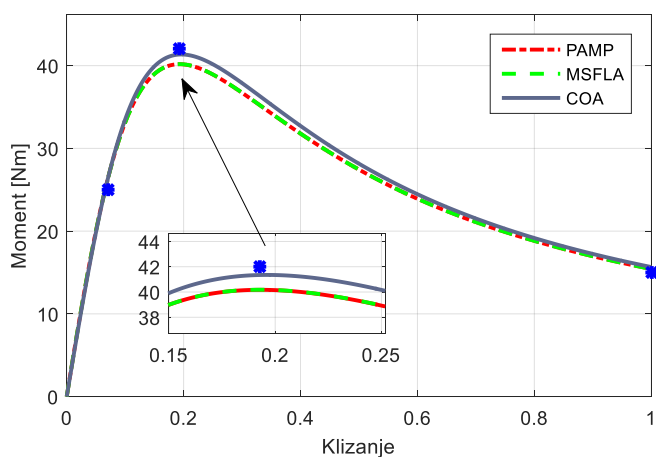
VRIJEDNOSTI GREŠKE PRI PRORAČUNU PARAMETARA ZA ASINHRONU MAŠINU OD 5 HP

	T_{st} [Nm]	T_{fl} [Nm]	T_{max} [Nm]	I_{st} [A]	I_{fl} [A]
Podaci proizvođača	15	25	42	22	8
PAMP [11]	15.4139	26.2232	40.1522	21.4744	7.8843
odstupanje	2.76%	4.89%	-4.40%	-2.39%	-1.45%
MSFLA [11]	15.428	26.2142	40.1565	21.4715	7.8793
odstupanje	2.85%	4.85%	-4.38%	-2.40%	-1.50%
COA	15.6577	26.2288	41.3456	21.6500	8.0123
odstupanje	4.38%	4.91%	-2.01%	-1.59%	0.15%

TABELA VI

VRIJEDNOSTI GREŠKE PRI PRORAČUNU PARAMETARA ZA ASINHRONU MAŠINU OD 40 HP

	T_{st} [Nm]	T_{fl} [Nm]	T_{max} [Nm]	I_{st} [A]	I_{fl} [A]
Podaci proizvođača	260.3	190	370.5	180	45
PAMP [11]	260.878	177.691	374.68	176.551	47.786
odstupanje	0.22%	-6.48%	1.13%	-1.92%	6.19%
MSFLA [11]	261.8549	177.1555	373.622	176.874	47.929
odstupanje	0.60%	-6.76%	0.85%	-1.74%	6.51%
COA	260.7806	177.545	375.18	176.575	47.774
odstupanje	0.18%	-6.55%	1.26%	-1.90%	6.17%



SI.3. Moment klizanje karakteristika kod 5 HP asinhrone mašine

TABELA VII
VRIJEDNOSTI GREŠKE PRI PRORAČUNU PARAMETARA ZA ASINHRONU MAŠINU
OD 148 HP

	T_{st} [Nm]	T_{fl} [Nm]	T_{max} [Nm]	I_{st} [A]	I_{fl} [A]
Podaci proizvođača	847.2	353	1094.3	1527.2	184
PAMP [11]	847.123	353.021	1094.28	1527.17	183.99
odstupanje	-0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	-0.01%
MSFLA [11]	847.366	351.389	1095.46	1524.28	185.2162
odstupanje	0.02%	-0.46%	0.11%	-0.19%	0.66%
COA	843.549	348.807	1087.78	1530.54	191.5974
odstupanje	-0.43%	-6.55%	-0.60%	0.22%	-4.13%

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljena primjena haotičnog optimizacionog algoritma za proračun parametara dvokavezne asinhronne mašine. Konkretno, u sprovedenoj nalizi su prikazani rezultati početnog momenta, nominalnog momenta, prevalnog momenta, nominalne i maksimalne struje dobijeni na osnovu estimiranih vrijednosti parametara, a koji su ujedno i upoređeni sa kataloškim podacima. Pokazano je da se predloženi algoritam može efikasno primijeniti u estimaciji parametara dvokavezne asinhronne mašine, kao i da je on ili jednako efikasan ili bolji od MSFLA i PAMP algoritama.

U daljem istraživačkom radu će biti analizirana primijena COA, kao i njegovih varijanti, u estimaciji parametara asinhronne mašine ako se u obzir uzme i promjena otpornosti prilikom grijanja mašine.

LITERATURA

- [1] R. Krishan, „Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control“, Ed.; Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.
- [2] J. Pedra, L. Sainz, „Parameter estimation of squirrel-cage induction motors without torque measurements,“ *IEEE Proc. Electr. Power Appl.* Vol. 153, pp. 263–270, 2006,
- [3] IEEE Standard 112. Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators; IEEE: New York City, NJ, USA, 2004.
- [4] J.M.C Guimaraes, et. all. “Parameter Determination of Asynchronous Machines from Manufacturer Data Sheet,“ *IEEE Trans. Energy Convers.* Vol. 29, pp. 689–697, 2014.
- [5] S. Yamamoto, H. Hirahara, A. Tanaka, T. Ara, “A simple method to determine double-cage rotor equivalent circuit parameters of induction

- motors from no-load and locked-rotor tests,“ *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 55, pp. 273–282, 2019.
- [6] R. Natarajan, V.K. Misra, “Parameter estimation of induction motors using a spreadsheet program on a personal computer,“ *Electr. Power Syst. Res.* Vol. 16, 157–164, 1989.
- [7] M. Akbaba, M. Taleb, A. Rumeli, “Improved estimation of induction machine parameters,“ *Electr. Power Syst. Res.* Vol. 34, pp. 65–73, 1995.
- [8] M.H. Haque, “Determination of NEMA Design Induction Motor Parameters from Manufacturer Data,“ *IEEE Trans. Energy Convers.* Vol. 23, pp. 997–1004, 2008.
- [9] I. Perez, M. Gomez-Gonzalez, F. Jurado, “Estimation of induction motor parameters using shuffled frog-leaping algorithm,“ *Electr. Eng.* Vol. 95, 267–275, 2013.
- [10] P. Nangsue, P. Pillay, S.E. Conry, “Evolutionary algorithms for induction motor parameter determination,“ *IEEE Trans. Energy Convers.* Vol. 14, pp. 447–453, 1999.
- [11] M. Gomez-Gonzalez, F. Jurado, I. Pérez, “Shuffled frog-leaping algorithm for parameter estimation of a double-cage asynchronous machine,“ *IET Electr. Power Appl.* Vol. 6, pp. 484–490, 2012.
- [12] M. Čalasan, et.all. “Estimation of Single-Diode and Two-Diode Solar Cell Parameters by Using a Chaotic Optimization Approach,“ *Energies* Vol. 12, pp. 4209, 2019.
- [13] M. Čalasan, et.all. “Estimation of Equivalent Circuit Parameters of Single-Phase Transformer by Using Chaotic Optimization Approach,“ *Energies*, Vol. 12, pp. 1697, 2019.

ABSTRACT

In this paper, the use of the Chaotic Optimization Algorithm (COA) in the estimation of the induction machine double cage equivalent circuit is presented. The parameters of the induction machine double cage equivalent circuit are determined using the parameters indicated on the nameplate of the machine (starting torque, nominal torque, maximum torque and nominal value of the power factor). Comparing the results of the COA algorithm with the results obtained using the Modified Shuffled Frog - Leaping Algorithm (MSFLA), and modified Newton method included in Simpowersystem Toolbox of Matlab (Power Asynchronous Machine Params - PAMP) it is shown that the COA algorithm can be very effectively applied in the estimation of the induction machine double cage equivalent circuit parameters.

Application of chaotic optimization algorithm in estimation of parameters of the induction machine double cage equivalent circuit

Željko Fuštić, Martin Čalasan,
Tatijana Dlabac, Branko Koprivica