CRNOGORSKI KOMITET CIGRE

Mihailo Micev*
Elektrotehnički fakultet Podgorica
mihailo.micev@gmail.com

Vladan Vujičić
Elektrotehnički fakultet Podgorica
vladanv@ucg.ac.me

ESTIMACIJA PARAMETARA NELINEARNOG MODELA PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG MOTORA POMOĆU METAHEURISTIČKIH ALGORITAMA

KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu je prikazana primjena metaheurističkih algoritama u cilju estimacije parametara nelinearnog modela prekidačkog reluktantnog motora (PRM-a). U prvom dijelu rada opisan je PRM i prikazan je model koji se bazira na analitičkoj vezi između elektromagnetnog momenta, struje i pozicije rotora. Pomenuti matematički model definiše se pomoću 5 parametara čija estimacija predstavlja cilj ovoga rada. U drugom dijelu opisani su optimizacioni algoritmi korišćeni za estimaciju nepoznatih parametara. Za verifikaciju modela korišćene su eksperimentalno dobijene moment – pozicija karakteristike motora, za različite vrijednosti struje. Nakon dobijanja estimiranih vrijednosti parametara modela, izvršene su simulacije u cilju dobijanja moment – pozicija karakteristike i to za iste vrijednosti struje za koje su dobijene i eksperimentalne karakteristike. Rezultati dobijeni simulacijom dobro se poklapaju sa rezultatima dobijenim eksperimentalnim putem, čime je izvršena validacija modela sa estimiranim parametrima i pokazan je veliki stepen tačnosti pomenutog modela.

Ključne riječi: Estimacija parametara – Metaheuristički algoritam – Nelinearni model – Prekidački reluktantni motor

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE NONLINEAR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR MODEL USING METAHEURISTIC ALGORITHMS

SUMMARY

In this paper metaheuristic algorithms are used in order to estimate parameters of the nonlinear model of switched reluctance motor (SRM). In the first part, SRM and the appropriate nonlinear model based on analitical expression between electromagnetic torque, current and rotor position are described. The mentioned mathematical model is defined with 5 parameters, whose estimation is purpose of this paper. In the second part, optimization algorithms that are used for unknown parameters estimation are described. Experimentally obtained torque – position characteristics of the motor for different values of the current are used to validate the model. After getting the estimated values of parameters, simulations are carried out to obtain the torque – position characteristics for the same current values used in the experiments. The results obtained with simulation show good matching with the experimentally obtained ones. Thus, the validation of the model with the estimated parameters is completed, and great degree of accuracy of the model is shown.

Key words: Parameters estimation – Metaheuristic algorithm – Nonlinear model – Switched Reluctance motor

* Ulica Miloša Obilića S2B II/29, 81 000 Podgorica

1. UVOD

Prekidački reluktantni motor (PRM) je veoma jednostavne i robusne konstrukcije – na rotoru nema namotaja ni stalnih magneta, što se pozitivno odražava na radne karakteristike motora. Naime, odsustvo namotaja dovodi do toga da je moment inercije rotora mali čime su omogućene nagle promjene brzine. Kako na rotoru nema ni magneta, moguć je rad u širokom dijapazonu brzina bez opasnosti da može doći do oštećenja rotora. Usljed istaknute strukture statora i rotora, u normalnom režimu rada magnetski materijal od kojeg je napravljen motor često ulazi u zasićenje. Radom u zasićenju se povećava snaga motora, ali induktivnost faze je tada funkcija ne samo pozicije rotora, već i struje [1] – [3].

Adekvatno modelovanje PRM-a podrazumijeva uzimanje u obzir zasićenja, posebno onog koje se javlja na ivicama polova statora i rotora. Jedan od pristupa je utvrđivanje fluks – struja karakteristika, za više pozicija rotora, na osnovu kojih je moguće procijeniti moment, kao i kompletno modelovati mašinu. Ove karakteristike mogu se utvrditi eksperimentalnim putem na postojećoj mašini, ali i primjenom metoda konačnih elemenata (FEM – Finite Element Method), [4]. Neki od modela PRM-a zasnovani su na matematičkom opisu fluks – struja krivih, ali je za njihovo definisanje neophodno koristiti unaprijed utvrđene karakteristike [5] – [7]. Još jednu grupu matematičkih modela PRM-a predstavljaju analitički modeli koji su zasnovani na analizi magnetskog kola mašine. Ovi modeli vrše kombinaciju relacija kojima se opisuje magnetsko kolo mašine i iskustvenih relacija, [8] – [10].

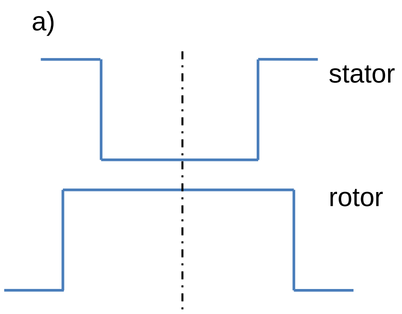
Jedinstveni matematički model PRM-a koji se bazira na inverzibilnoj funkciji momenta prikazan je u [11]. Ovaj model je karakterističan po tome što je zasnovan na analitičkom izrazu za moment u funkciji struje i pozicije rotora koji se može invertovati, pa je moguće dobiti i analitički izraz za struju u funkciji momenta i pozicije rotora. Model se takođe može iskoristiti i za utvrđivanje fluks – struja zavisnosti i dinamičkih karakteristika motora. Za definisanje modela neophodno je utvrditi 5 parametara. U ovom radu predloženi su postupci estimiranja nepoznatih parametara pomoću dva metaheuristička algoritma: GWO (Grey Wolf Optimizer) [12] – [13] i DE (Differential Evolution) [14] – [15].

Rad je organizovan na sljedeći način: drugo poglavlje sadrži osnovne informacije o PRM-u, treće poglavlje daje detaljan opis korišćenog matematičkog modela motora, u četvrtom poglavlju su detaljno opisani metaheuristički algoritmi koji se koriste za optimizaciju. Simulacioni rezultati su prikazani u petom poglavlju. Na kraju, sumirani rezultati su dati u zaključku.

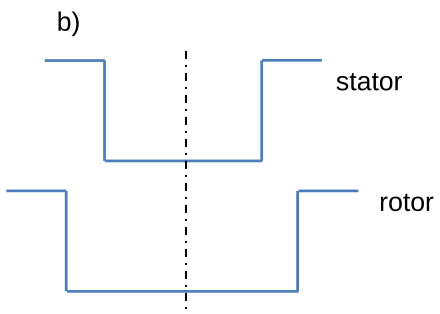
2. PREKIDAČKI RELUKTANTNI MOTOR

Prema konstrukciji, prekidački reluktantni motor (PRM) je najprostiji od svih električnih mašina. Rotor i stator su sastavljeni od međusobno izolovanih feromagnetskih limova, kao i kod konvencionalnih mašina. Istaknuti polovi se nalaze na statoru i na rotoru, pri čemu se oko istaknutih polova statora nalaze koncentrično postavljeni namotaji, a na rotoru nema namotaja ni stalnih magneta.

Princip rada PRM-a je veoma jednostavan: elektromagnetski moment nastaje kao rezultat težnje magnetskog fluksa (kojeg stvara fazni namotaj statora kroz koji se propušta struja) da se zatvori putem najmanje reluktanse. Kada se dovede napon na namotaj faze statora, kroz tu fazu protiče struja koja stvara magnetski fluks. Rotor dolazi u poziciju u kojoj zajedno sa statorom obrazuje magnetsko kolo najmanje reluktanse, odnosno u poziciju koju karakteriše najmanji vazdušni procjep. Ova pozicija se naziva usaglašenom pozicijom i prikazana je na slici 1a. Suprotna usaglašenoj je neusaglašena pozicija koju karakteriše najveći vazdušni procjep, pa je samim tim i reluktansa najveća (slika 1b). Priključivanjem sljedeće faze na napon, rotor se pomjera ka poziciji u kojoj je najmanja reluktansa za novostvoreni fluks.



Slika 1a. Usaglašeni položaj rotora

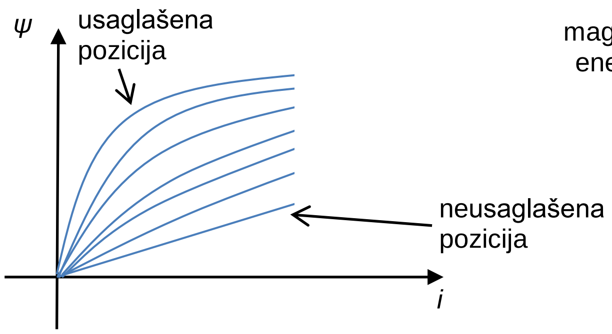


Slika 1b. Neusaglašeni položaj rotora

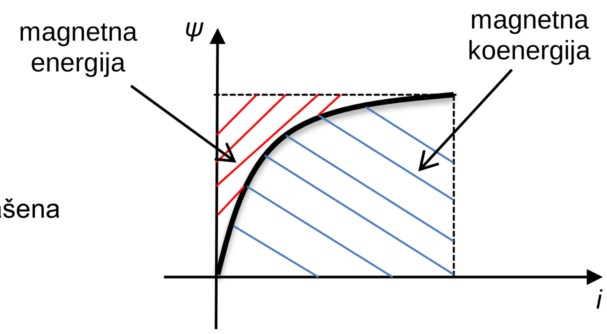
Naponska jednačina jedne faze PRM-a data je izrazom (1)

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt}, \tag{1}$$

gdje je u napon koji je doveden na fazni namotaj, i fazna struja, R otpornost namotaja faze, a ψ magnetsko obuhvatanje namotaja ($\psi=N\phi$, N – broj navojaka, ϕ - fluks kroz jedan navojak). Tokom rada, materijal od koga je napravljen motor ulazi u zasićenje, a stepen zasićenja zavisi od međusobnog položaja rotora i statora. Stoga, induktivnost faze zavisi od pozicije rotora i od vrijednosti struje. Tipične fluks – struja karakteristike za različite pozicije rotora prikazane su na slici 2. U cilju definisanja izraza za elektromagnetski moment motora neophodno je uvesti pojmove magnetna energija i magnetna koenergija. Za određenu poziciju rotora, pojmovi magnetne energije i koenergije su ilustrovani na slici 3.



Slika 2. Fluks – struja karakteristike za različite pozicije



Slika 3. Ilustracija pojmova magnetne energije i koenergije

Magnetna energija W_m i koenergija W_m' mogu se definisati kao:

$$W_m(\theta,\psi) = \int_0^{\psi} i(\theta,\psi)d\psi \tag{2}$$

$$W_m'(\theta,i) = \int_0^{i} \psi(\theta,i)di, \tag{3}$$

pri čemu važi da je $W_m+W_m'=\psi i$. Ukoliko se pozicija rotora i struja usvoje kao nezavisne promjenljive, tada se elektromagnetski moment računa na osnovu (4), a ukoliko se pozicija rotora i fluks obuhvatanja usvoje kao nezavisne promjenljive onda se moment računa na osnovu (5):

$$M(\theta,i) = \frac{\partial Wm'(\theta,i)}{\partial\theta} \tag{4}$$

$$M(\theta,\psi) = -\frac{\partial Wm(\theta,\psi)}{\partial\theta}. \tag{5}$$

Približan izraz za elektromagnetski moment, kada se zanermari efekat zasićenja ($L(\theta,i)\approx L(\theta)$), dat je izrazom (6):

$$M = 0.5i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta}. \qquad (6)$$

3. NELINEARNI MODEL PRM-A

U [11] predložen je model PRM-a koji je zasnovan na analitičkom izrazu za elektromagnetski moment u funkciji fazne struje i pozicije rotora. Može se reći da izraz predstavlja inverzibilnu funkciju momenta, zbog toga što je moguće izraziti i struju faze kao funkciju momenta i pozicije.

3.1. Osnovne jednačine modela

U cilju dobijanja adekvatnog izraza za elektromagnetski moment koristi se izraz (7):

$$M(\theta,i) = \frac{0.5L_{0p}i^2}{(1+fi^p)^{\frac{1}{p}}}, \qquad (7)$$

gdje je p konstanta, $f=f(\theta)$ je funkcija pozicije rotora, a $L_{0p}=L_{0p}(\theta)$ je funkcija koja aproksimira izvod induktivnosti i zavisi od pozicije rotora. Kombinacijom izraza (3), (4) i (7) dolazi se do izraza (8) kojim se računa fluks obuhvatanja:

$$\psi(\theta,i) = \int_{\theta_u}^{\theta} \frac{L_{0p}i(1+fi^p)}{(1+fi^p)^{\frac{1}{p}+1}} d\theta + L_u i, \qquad (8)$$

gdje je $\theta_u \leq \theta \leq \theta_{al}$, gdje je oznaka za θ_u neusaglašenu poziciju rotora, θ_{al} oznaka za usaglašenu poziciju rotora, a L_u je oznaka za induktivnost namotaja pri neusaglašenoj poziciji.
Uzimajući u obzir da je fluks obuhvatanja funkcija pozicije rotora i fazne struje, važi izraz (9):

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial i}\frac{di}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial\theta}\omega. \qquad (9)$$

Kombinujući izraze (1) i (9) dolazi se do izraza (10) za priraštaj struje:

$$di = \frac{u - Ri - \omega L_{0p} i \dfrac{1+0.5fi^p}{(1+fi^p)^{\frac{1}{p}+1}}}{\displaystyle\int_{\theta_u}^{\theta} L_{0p} \frac{1-0.5(p-1)fi^p}{(1+fi^p)^{\frac{1}{p}+2}} d\theta + L_u} dt. \qquad (10)$$

Koristeći formulu (10) računa se priraštaj struje Δi za kratak vremenski interval $\Delta t=t_2-t_1$, pa se trenutna vrijednost struje dobija pomoću formule (11):

$$i(t_2) = i(t_1) + \Delta i. \qquad (11)$$

3.2. Određivanje parametra *p* i funkcija $f(\theta)$ i $L_{0p}(\theta)$

Osnovni uslov koji mora ispuniti parametar p je da fluks obuhvatanja raste sa porastom struje za bilo koju poziciju rotora θ i bilo koju vrijednost struje i. U radu u kojem je predložen opisani nelinearni model pokazano je da se za većinu motora može uzeti da je p=3.

Analitički izraz kojim se definiše funkcija $L_{0p}(\theta)$ je:

$$L_{0p}(x) = k \cdot \frac{\left(\dfrac{x}{x_{bo}}\right)^n f_{shape}(x) + f_{rise}(x)}{1+\left(\dfrac{x}{x_{bo}}\right)^n} \cdot f_{fall}(x), \qquad (12)$$

gdje je $x=(\theta - \theta_u)/(\theta_{al} - \theta_u)$ normalizovana pozicija rotora, x_{bo} normalizovana pozicija koja odgovara početku preklapanja polova rotora i statora, k konstanta koja definiše maksimalnu vrijednost L_{0p} a n broj dovoljno veliki da uslov (13) bude ispunjen:

$$\frac{\left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^n}{1+\left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^n} \approx \begin{cases} 0, & 0 \le x < x_{bo} \\ 1, & x_{bo} < x \le 1 \end{cases}. \tag{13}$$

Funkcija $f_{shape}(x)$ se definiše prema formuli (14):

$$f_{shape}(x) = 1 - k_{fall} \cdot (x - x_1)^2, \tag{14}$$

gdje je x_1 pozicija kada je 20% statorovog pola preklopljeno rotorovim polom, a k_{fall} konstanta koja definiše brzinu pada funkcije L_{0p} nakon pozicije x_1.

Funkcija $f_{rise}(x)$ se definiše prema izrazu (15):

$$f_{rise}(x) = k_{rise} \cdot \left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^{3/2}, \tag{15}$$

pri čemu parametar k_{rise} tipično uzima vrijednosti između 0.1 i 0.25.

Posljednja funkcija koju je neophodno definisati u cilju računanja funkcije $L_{0p}(\theta)$ je $f_{fall}(x)$ i ona se definiše na sljedeći način:

$$f_{fall}(x) = 1 - x^m, \tag{16}$$

gdje je m parametar modela.

Konstanta k se računa prema formuli :

$$k = \frac{\mu_0 N^2 L_{st} r_1}{2\delta}, \tag{17}$$

gdje N predstavlja broj navojaka po fazi, L_{st} aksijalnu dužinu statora, r_1 unutrašnji poluprečnik statora a μ_0 permeabilnost vakuuma.

Funkcija $f(\theta)$ je data analitičkim izrazom:

$$f = \frac{c_1}{1 + c(x - x_{bo})^2} + \frac{c_2}{1 + c(x - x_{eo})^2}, \tag{18}$$

gdje je x_{eo} normalizovana pozicija pri kojoj počinje potpuno preklapanje polova rotora i statora, a c, c_1 i c_2 su konstante koje treba estimirati kako bi funkcija f bila u potpunosti definisana. U tom cilju, uvodi se konstanta f_c koja ustvari predstavlja vrijednost funkcije f u poziciji $x=x_c$ (x_c je pozicija kada su statorovi polovi do pola preklopljeni polovima rotora, tj. $x_c=(x_{bo}+x_{eo})/2$):

$$f_c = f(x = x_c) = \left(\frac{\mu_0 N}{4\delta B_{sat}}\right)^p, \tag{19}$$

gdje je B_{sat} indukcija zasićenja koja tipično uzima vrijednosti između 1.5 T i 1.65 T. Sada se konstante c_1 i c_2 računaju koristeći formule (20) i (21), respektivno:

$$c_1 = k_{c1}{}^p f_c \tag{20}$$

$$c_2 = \frac{2}{p - 1} 2^p f_c, \tag{21}$$

gdje je k_{c1} parametar čija je vrijednost u opsegu 1 – 1.3. Na osnovu vrijednosti f_c, c_1 i c_2, konstanta c se računa na sljedeći način:

$$c = 4 \cdot \frac{\frac{c_1}{f_c} + \frac{c_2}{f_c} - 1}{(x_{eo} - x_{bo})^2}. \tag{22}$$

Na samom kraju, potrebno je izvršiti korekciju jednačine (18) kako bi se dobili bolji rezultati za region $0<x<x_{bo}$. Korigovana vrijednost se označava sa f_1 i računa prema formuli (23):

$$f_1 = f \cdot \frac{\left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^n}{1+\left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^n}. \tag{23}$$

Za rezultate simulacije koji su prikazani u [11] korišćene su sljedeće vrijednosti parametara modela: n=13, k_{fall}=0.5, m=25, B_{sat}=1.5 T i k_{c1}=1.3.

4. METAHEURISTIČKI ALGORITMI

Algoritme koji pronalaze rješenja koja su zadovoljavajuće dobra, ali ne nude nikakve garancije da će uspjeti pronaći optimalno rješenje, te koji imaju relativno nisku računsku složenost nazivamo heuristički algoritmi. Metaheuristika je skup algoritamskih koncepata koji se koriste za definisanje heurističkih metoda primjenjivih na širok skup problema. Može se reći da su metaheurističke metode ustvari heurističke metode koje nisu osmišljene isključivo za jedan problem, već su, uz određena prilagođavanja, primjenjive na veliki broj problema. Jedna od podjela metaheurističkih algoritama je na evolucijske algoritme i algoritme rojeva. U nastavku će biti opisan po jedan algoritam iz obije grupe – GWO algoritam koji pripada algoritmima rojeva i DE algoritam koji pripada evolucijskim algoritmima.

4.1. GWO (Grey Wolf Optimizer) algoritam

Inspiracija za ovaj algoritam je pronađena u ponašanju vrhovnih predatora – sivih vukova (grey wolves) u prirodi. Čopor sivih vukova je hijerarhijski organizovan: na vrhu ljestvice su alfa vukovi, ispod njih su beta vukovi, zatim slijede delta vukovi i na samom dnu ljestvice, omega vukovi. Još jedan interesantan aspekat socijalnog ponašanja vukova je grupni lov, koji se sastoji iz 3 faze: praćenje plijena, okruživanje plijena i napad na plijen.

U cilju matematičkog modelovanja socijalne hijerarhije vukova, pozicija alfa vuka predstavlja najbolje rješenje za zadati optimizacioni problem. Pozicije beta i delta vukova predstavljaju najbolja rješenja nakon alfa vuka, dok su ostala rješenja ustvari pozicije omega vukova.

Kao što je već pomenuto, prilikom grupnog lova vukovi okružuju plijen. Ovaj proces se može matematički modelovati formulom (24):

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \left|\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)\right|, \tag{24}$$

gdje t predstavlja trenutnu iteraciju, $\vec{X}$ vektor pozicije sivih vukova, $\vec{X}_p$ vektor pozicije plijena, a $\vec{A}$ i $\vec{C}$ su vektori koeficijenata koji se računaju prema formuli (25):

$$\begin{aligned} \vec{A} &= 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \\ \vec{C} &= 2 \cdot \vec{r}_2, \end{aligned} \tag{25}$$

pri čemu su elementi vektora $\vec{r}_1$ i $\vec{r}_2$ slučajni brojevi između 0 i 1, a komponente vektora $\vec{a}$ linearno opadaju tokom iteracija sa vrijednosti 2 na vrijednost 0, prema formuli (26) (u kojoj t_{max} predstavlja maksimalni broj iteracija):

$$\vec{a} = 2 - 2 \cdot \frac{t}{t_{max}}. \tag{26}$$

Vektor pozicija vukova sadrži pozicije od kojih svaka predstavlja jedno od rješenja za zadati problem optimizacije. Rješenje ne mora sadržati u sebi samo jedan parametar, već je broj parametara jednak dimenzionalnosti rješenja. Na taj način, za D-dimenzionalni optimizacioni problem, rješenje ovog algoritma – pozicija alfa vuka se sastoji od D parametara (brojeva) koji predstavljaju optimalno rješenje početnog optimizacionog problema.

Međutim, prilikom primjene formule (24) postoji problem – lokacija plijena nije tačno poznata, što se za neki optimizacioni problem može prevesti kao da lokacija optimuma nije poznata. Stoga, radi prevazilaženja ovoga problema i matematičkog modelovanja procesa grupnog lova, pretpostavlja se da alfa, beta i delta vukovi imaju bolje „znanje“ o lokaciji plijena u odnosu na ostale (omega) vukove. Uzimajući to u obzir, prva tri najbolja rješenja se čuvaju (pozicije alfa – α, beta – β i delta – δ vukova), a pozicije omega – ω vukova se ažuriraju prema pozicijama vrhovna tri vuka. Opisani proces se modeluje formulama (27), (28) i (29):

$$\vec{D}_\alpha = \left|\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}\right|,\ \vec{D}_\beta = \left|\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}\right|,\ \vec{D}_\delta = \left|\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}\right|, \tag{27}$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha,\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta,\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta, \tag{28}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}. \tag{29}$$

Algoritam se završava kada se dostigne maksimalan broj iteracija (t_{max}), a rješenje optimizacionog problema je trenutna pozicija alfa vuka $(\vec{X}_\alpha)$. .

4.2. DE (Differential Evolution) algoritam

Prilikom implementacije ovog algoritma definiše se populacija koja se sastoji od vektora $\vec{x}_i^{\,G}$, i=1, 2, 3, ..., NP, gdje NP označava veličinu populacije, G označava redni broj generacije (iteracije), a i označava redni broj vektora. Jedan vektor $\vec{x}$ predstavlja jedno rješenje i naziva se genom ili hromozom. Jedno rješenje se sastoji iz D parametara, gdje D predstavlja dimenziju problema, a samim tim i rješenja. Drugim riječima, vektor $\vec{x}$ ima D elemenata. Takođe je potrebno definisati i funkciju cilja (fitness funkciju) f, čija minimizacija je cilj ovog algoritma. Koraci u implementaciji DE algoritmi su sljedeći:

1.) Inicijalizacija populacije:

$$x_{j,i}^{\,0} = rand_{j,i}\left[0,1\right]\cdot(x_j^{(U)} - x_j^{(L)}) + x_j^{(L)}, \tag{30}$$

gdje j=1, 2, ..., D, a $x_j^{(U)}$ i $x_j^{(L)}$ predstavljaju gornju i donju granicu za parametar j, respektivno.

2.) Mutacija:

Za svaki vektor $\vec{x}_i^{\,G}$ generiše se vektor mutacije $\vec{v}_i^{\,G+1}$ prema formuli (31):

$$\vec{v}_i^{\,G+1} = \vec{x}_{n1}^{\,G} + F\cdot(\vec{x}_{n2}^{\,G} - \vec{x}_{n3}^{\,G}), \tag{31}$$

pri čemu su n_1, n_2 i n_3 nasumično odabrani i međusobno različiti indeksi koji takođe moraju biti različiti od trenutnog indeksa i, a F je parametar koji se ne mijenja tokom procesa optimizacije i koji uzima vrijednost iz opsega (0,2].

3.) Krosing – over ili rekombinacija:

U procesu rekombinacije definiše se probni vektor $\vec{u}_i^{\,G+1}$:

$$u_{j,i}^{\,G+1} = \begin{cases} v_{j,i}^{\,G+1}, \ rand\left[0,1\right) \le CR \ ili \ j{=}k \\ x_{j,i}^{\,G}, \ ina\check{c}e \end{cases}, \tag{32}$$

pri čemu j=1, 2, ..., D, a k je nasumično odabrani broj iz skupa {1, 2, ..., D } koji se bira ponovo za svako i (za svaki hromozom). CR je parametar iz intervala [0,1] koji se naziva faktor rekombinacije i koji kontroliše vjerovatnoću da komponenta probnog vektora bude iz vektora mutacije $\vec{v}_i^{\,G+1}$ umjesto iz roditeljskog vektora $\vec{x}_i^{\,G}$. Uslov $j=k$ je neophodan kako bi se osiguralo da bar jedan parametar probnog vektora bude iz vektora mutacije.

4.) Selekcija:

Posljednji korak je selekcija, tj. određivanje populacije za sljedeću generaciju. Radi toga, vrši se poređenje probnog vektora $\vec{u}_i^{\,G+1}$ i roditeljskog vektora $\vec{x}_i^{\,G}$, pa se naredna generacija određuje na sljedeći način:

$$\vec{x}_i^{\,G+1} = \begin{cases} \vec{u}_i^{\,G+1}, \ f(\vec{u}_i^{\,G+1}) \le f(\vec{x}_i^{\,G}) \\ \vec{x}_i^{\,G}, \ f(\vec{x}_i^{\,G}) \le f(\vec{u}_i^{\,G+1}) \end{cases}. \tag{33}$$

Na ovaj način je osigurano da je svaka individua odnosno hromozom naredne generacije isti ili bolji od njemu odgovarajućeg iz prethodne generacije. Na kraju, iz populacije posljednje generacije određuje se najbolji hromozom (onaj vektor $\vec{x}_i$ za koji funkcija cilja ima najmanju vrijednost) i on predstavlja optimalno rješenje problema.

5. REZULTATI SIMULACIJA

Opisani metaheuristički algoritmi su iskorišćeni za estimaciju parametara nelinearnog modela PRM–a. Prilikom primjene algoritama neophodno je definisati granice unutar kojih se nalaze vrijednosti parametara koji se optimizuju: za n su granice od 10 do 15, za m od 20 do 35, za B_{sat} od 1.5 do 1.65, za k_{c1} od 1 do 1.3 i za k_{rise} od 0.1 do 0.3. Tačnost modela, uz primjenu estimiranih parametara, verifikovana je poređenjem moment – pozicija karakteristika definisanih jednačinama modela i odgovarajućih stvarnih, eksperimentalno utvrđenih, karakteristika razmatranog motora [10].

Za parametre DE algoritma su usvojene sljedeće vrijednosti: F=0.85 i CR=0.9, a za oba (GWO i DE) je usvojeno da je maksimalan broj iteracija jednak 200, a veličina populacije jednaka 100.

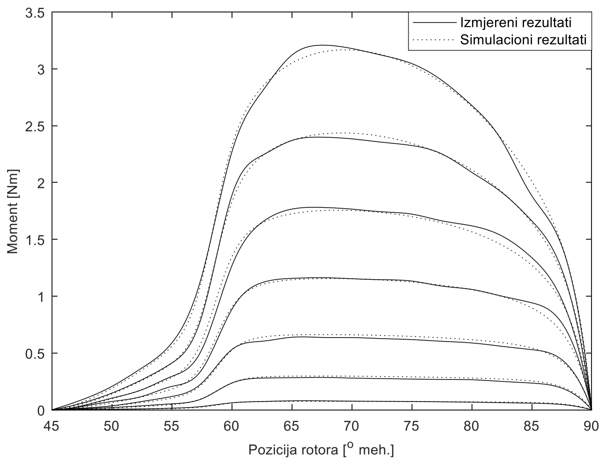
U tabeli I su prikazane vrijednosti parametara modela koje su usvojene u [11], kao i vrijednosti parametara utvrđenih pomoću navedenih metaheurističkih algoritama. Takođe, date su i vrijednosti funkcije cilja, tj. sume kvadrata odstupanja proračunatog od izmjerenog momenta. Na osnovu vrijednosti funkcije cilja, koja je manja kada se parametri estimiraju pomoću metaheurističkih algoritama, zaključuje se da se moment – pozicija karakteristike bolje poklapaju sa eksperimentalno utvrđenim kada se koriste estimirani parametri. U istoj tabeli je prikazano vrijeme potrebno za izvršavanje GWO i DE algoritma. Na slikama 4 i 5 su prikazane karakteristike moment – pozicija i fluks – struja, respektivno, dobijene pomoću jednačina modela, uz korišćenje parametara utvrđenih korišćenjem GWO algoritma. Na istim slikama prikazane su i odgovarajuće eksperimentalno utvrđene karakteristike. Poređenja moment – pozicija i fluks – struja karakteristika su data na slikama 6 i 7, respektivno, uz korišćenje parametara utvrđenih pomoću DE algoritma. Na slikama 4 i 6, moment – pozicija karakteristike prikazane su za vrijednosti struja od 0.5 A do 3.5 A, sa korakom od 0.5 A, dok su na slikama 5 i 7 fluks – struja zavisnosti prikazane sa korakom pozicije od 5° mehaničkih.

Prilikom primjene navedenih algoritama, neophodno je bilo definisati funkciju cilja f koja se minimizuje u postupku optimizacije. U ovom radu je korišćena funkcija cilja koja predstavlja sumu kvadrata razlike između izračunatih M_{iz} i izmjerenih M_{mj} vrijednosti momenta za struje od 0.5 A do 3.5 A, sa korakom od 0.5 A. Navedena funkcija se definiše formulom:

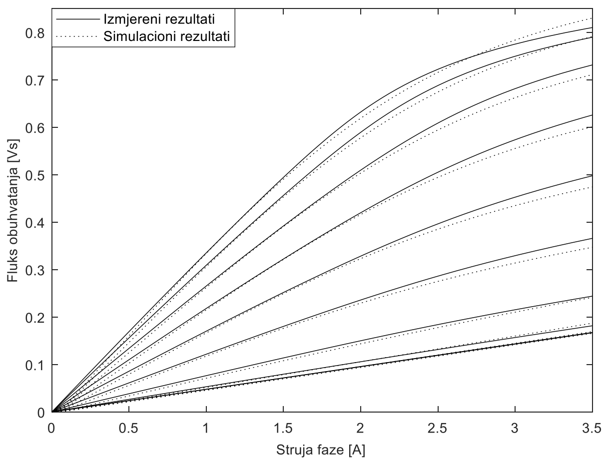
$$f = \sum_{i=0.5\,\mathrm{A}}^{i=3.5\,\mathrm{A}} (M_{iz}(i) - M_{mj}(i))^2. \tag{34}$$

Tabela I. Rezultati optimizacije parametara modela

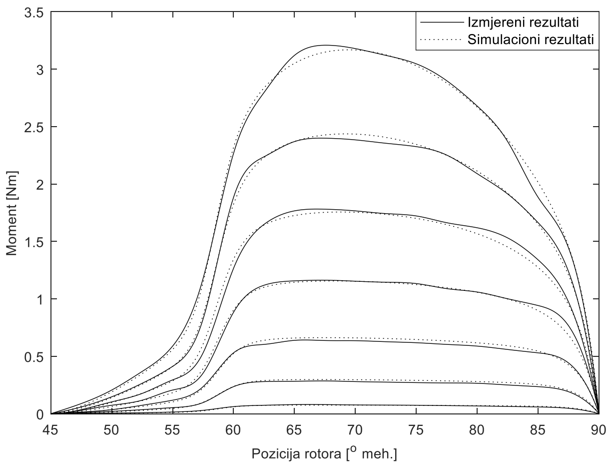
parametri modela	[11]	GWO algoritam	DE algoritam
n	13	14,4746	14,4202
m	25	27,839	27,8605
B_{sat}	1.5	1,5127	1,514
k_{c1}	1.3	1,296	1,2968
k_{rise}	0.25	0,2426	0,2426
f	3.438	2,4768	2,476
vrijeme (s)	/	142	622



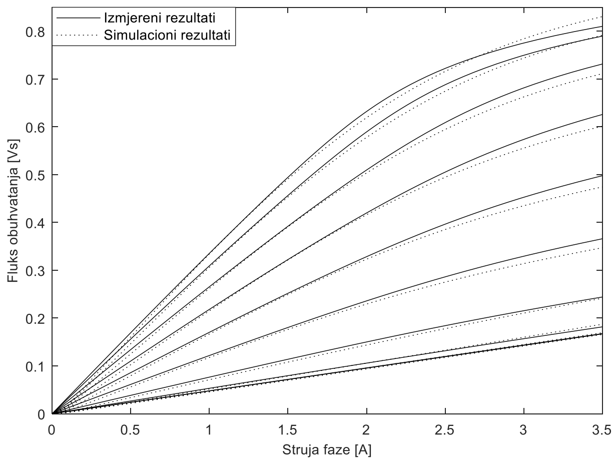
Slika 4. Izmjerene i proračunate statičke karakteristike dobijene pomoću GWO algoritma



Slika 5. Izmjerene i proračunate fluks - struja karakteristike dobijene pomoću GWO algoritma



Slika 6. Izmjerene i proračunate statičke karakteristike dobijene pomoću DE algoritma



Slika 7. Izmjerene i proračunate fluks - struja karakteristike dobijene pomoću DE algoritma

6. ZAKLJUČAK

U radu je razmotrena mogućnost primjene metaheurističkih algoritama u postupku određivanja nepoznatih parametara nelinearnog modela PRM-a. Optimalni parametri modela, utvrđeni nezavisno korišćenjem GWO i DE algoritma, upotrijebljeni su za definisanje fluks – struja i moment – pozicija zavisnosti. Proračunate karakteristike, u oba slučaja, izuzetno dobro se poklapaju sa odgovarajućim eksperimentalno utvrđenim karakteristikama. Oba algoritma daju podjednako kvalitetne rezultate, s tim što je vrijeme potrebno za izvršavanje GWO algoritma nešto manje od vremena potrebnog za izvršavanje DE algoritma (142 sekunde naspram 622 sekunde).

7 LITERATURA

[1] M. Ćalasan, "*Upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom i topologije energetskog pretvarača za rad u kontinualnom režimu*", doktorska disertacija, Podgorica, jun 2017. godine

[2] Ž.J. Grbo, "*Energetski pretvarači za prekidački reluktantni motor*", Doktorska disertacija, Beograd, 2007. godine

[3] V. Vujičić, "*Prekidački reluktantni motori*", skripta, Podgorica, februar 2005. godine

[4] B. Parreira, *et. all.*, "Obtaining the magnetic characteristics of an 8/6 switched reluctance machine: from FEM analysis to the experimental tests," *IEEE Trans. Ind. Electr*., Vol. 52, Issue 6, pp. 1635 – 1643, Dec. 2005.

[5] M. Ilić-Spong, *et. al*., “Feedback Linearizing Control of Switched Reluctance Motors,“ *IEEE Trans Automatic Control*, Vol. AC-32, No. 5, pp. 371-379, May 1987.
[6] D.A. Torrey, J. H. Lang, “Modeling a nonlinear variable-reluctance motor drive,” *IEE Proceedings*, pt. B, Vol. 137, No. 5, pp. 314–326, Sept. 1990.
[7] W.M. Chan, W.F. Weldon, “*Development of a Simple Nonlinear Switched Reluctance Motor Model using Measured Flux Linkage Data and Curve Fit*,“ IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 5-9. October, 1997. DOI: 10.1109/IAS.1997.643044
[8] A.V. Radun, “Design considerations for the switched reluctance motor,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1079–1087, Sept./Oct. 1995.
[9] TJ.E. Miller, M.McGilp, “Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design,“ *IEE Proceedings*, Vol. 137, Pt. B, No. 6, pp. 337-347, Nov. 1990.
[10] V.P. Vujičić, S.N. Vukosavić, “A Simple Nonlinear Model of the Switched Reluctance Motor,“ *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 15, No. 4, pp. 395-400, Dec. 2000.
[11] V.P. Vujičić, “Modeling of a Switched Reluctance Machine Based on the Invertible Torque Function,“ *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 44, No. 9, pp. 2186-2194, Sept. 2008.
[12] W. Long and S. Xu, “A novel grey wolf optimizer for global optimization problems,” *Proc. 2016 IEEE Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC 2016*, no. 1, pp. 1266–1270, 2017.
[13] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
[14] S. Das and P. N. Suganthan, “ Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2011.
[15] H. K. Kim, J. K. Chong, K. Y. Park, and D. A. Lowther, “Differential evolution strategy for constrained global optimization and application to practical engineering problems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 4, pp. 1565–1568, 2007.