

# GNEZDENI GENETSKI ALGORITMI PRI DOLOČANJU PARAMETROV JILES-ATHERTON HISTEREZNEGA MODELA MEHKOMAGNETNIH KOMPOZITNIH MATERIALOV

Bogomir Zidarič<sup>1</sup>, Damijan Miljavec<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TECES, Gosposvetska cesta 84, 2000 Maribor, Slovenia

<sup>2</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

**Ključne besede:** Jiles-Atherton model, mehkomagnetni kompozitni material, genetski algoritmi

**Izvelek:** Delo obravnava izpeljavo, določitev parametrov in uporabo Jiles-Athertonovega modela (J-A model) histerezne zanke mehkomagnetnega kompozitnega (SMC) materiala. Določitev parametrov J-A modela histerezne zanke je osnovana na merjenih histereznih zankah z uporabo genetskih algoritmov. Genetski algoritmi operirajo v določenem obsežnem ampak omejenem področju možnih rešitev. Možnost, da najdejo najboljšo rešitev danega problema v takšnem iskalnem področju je zelo negotova. Nov pristop optimizacije z gnezdjenimi genetskimi algoritmi omogoča zmanjšanje mej obsežnih iskalnih območij. Osnova tega pristopa je, da v genetski algoritem iskanja optimalnih mej iskalnih področij vgradimo genetski algoritem iskanja parametrov J-A modela. Opisan optimizacijski postopek smo poimenovali *GgaA*. Primerjava merjenih rezultatov in rezultatov iz optimiranega J-A modela potrjuje dobro delovanje novega optimizacijskega postopka na podlagi tako imenovanega *GgaA* algoritma.

## Nested Genetic Algorithms in Determination of Jiles-atherton Hysteresis Model Parameters for Soft-magnetic Composite Materials

**Key words:** Jiles and Atherton hysteresis model, soft magnetic composite material, genetic algorithms

**Abstract:** The paper reports the principle of derivation, parameter determination and use of Jiles and Atherton hysteresis model (J-A model) for soft magnetic composite (SMC) material. The calculation of Jiles and Atherton hysteresis model parameters is based on experimental data and genetic algorithms. Genetic algorithms operate in a given extensive but bounded area of possible solutions. To find the best solution of a problem in this area of possible solutions is uncertain. To overcome this uncertainty a new approach in use of genetic algorithms is proposed. The basis is in genetic algorithms nesting. This means one genetic algorithm built in another genetic algorithm. The procedure is named *GgaA*. Comparison between experimental results and results from optimized J-A hysteresis model confirm a proper functionality of new optimization procedure based on nested genetic algorithms.

### 1 Uvod

Matematični model histerezne zanke, ki sta ga vpeljala Jiles in Atherton (J-A model) bazira na fizikalnem dogajanju v feromagnetnem materialu in ne izključno na matematičnem ali eksperimentalnem prilagajanju histerezne zanke  $/1/, /2/$ .

### 2 Model histerezne zanke

V J-A modelu se celotno magnetizacijo  $M$  (en. 4) feromagnetnega materiala razdeli na nepovratno  $M_{irr}$  (en. 2) in povratno  $M_{rev}$  (en.3) komponento magnetizacije.

Deviška magnetilna krivulja  $M_{an}$  (histerezna zanka, če izgub ne bi bilo) je opisana z Langevinovo funkcijo:

$$M_{an} = M_s \left[ \coth \left( \frac{H + \alpha M}{a} \right) - \frac{a}{H + \alpha M} \right] \quad (1)$$

Nepovratna komponenta magnetizacije  $M_{irr}$  je povezana z energijskimi izgubami zidov domen, ki so vpeti v nečistoče materiala:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (2)$$

Povratna komponenta magnetizacije  $M_{rev}$  predstavlja delež povratnih procesov premikanja domen in njihovih zidov. V modelu ima naslednjo obliko:

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (3)$$

Celotna magnetizacija  $M$  je vsota komponent nepovratne  $M_{irr}$  in povratne  $M_{rev}$  magnetizacije:

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (4)$$

Enačbo 4 nadalje preoblikujemo na ta način, da  $M_{rev}$  nadomestimo z (en. 3) in dobimo:

$$M = (1 - c)M_{irr} + cM_{an} \quad (5)$$

kar nas pripelje do celotne diferencialne susceptibilnosti magnetizacije  $dM/dH$ :

$$\frac{dM}{dH} = (1 - c) \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (6)$$

Pet snovno odvisnih parametrov, ki se pojavijo v (en. 1) in (en. 6) so:

- $M_S$  – nasičanje magnetizacije
- $a$  – parameter oblike,
- $\alpha$  – parameter glavnega polja,
- $k$  – konstanta vpetja zidov domen v nečistoče materiala, proporcionalna histereznim izgubam,
- $c$  – konstanta napihovanja domen.

Parameter  $\delta$  nima fizikalnega pomena in ima vrednost +1 ko je  $dH/dt > 0$  in -1 v nasprotnem primeru.

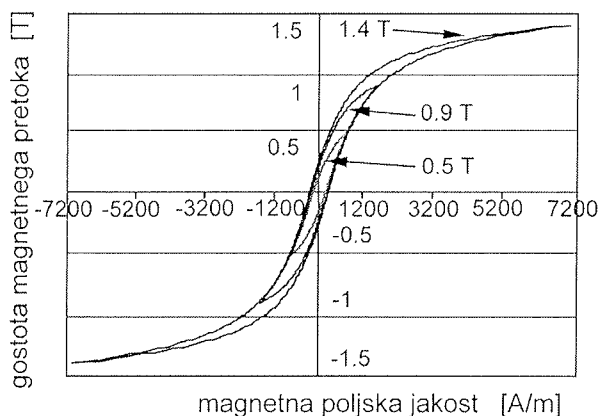
Diferencialno enačbo (en. 6) rešimo z uporabo numerične metode. Rešitve nato uporabimo za izračun gostote magnetnega pretoka  $B$ :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (7)$$

Za določitev vrednosti petih parametrov J-A histereznega modela uporabimo merilne rezultate histereznih zank in numerične optimizacijske postopke. V našem primeru smo uporabili genetske algoritme, katere bomo v nadaljevanju tudi opisali.

### 3 Merilni rezultati histereznih zank

Slika 1 prikazuje merjene statične histerezne zanke /3/ za mehkomagnetni kompozitni material.



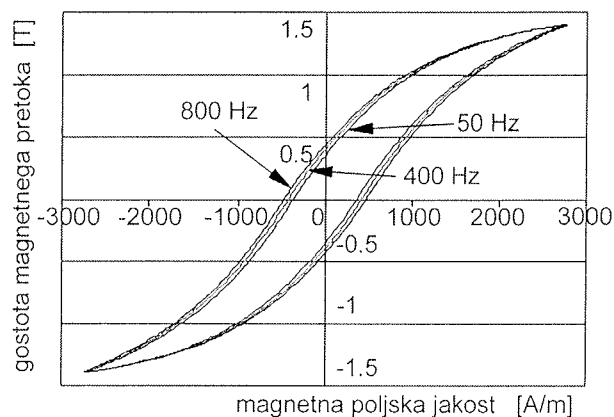
Slika 1. Merjene statične histerezne zanke pri različnih vrednostih gostote magnetnega pretoka.

Merjene statične histerezne zanke (slika 1) ne vsebujejo odziva materiala na izmenično magnetno vzbujanje. S tem pa tudi ne izgub zaradi vrtilčnih tokov in tako imenovanih dodatnih izgub. Merjene vrednosti statičnih histereznih zank pri različnih vrednostih maksimalne gostote magnetnega pretoka bodo uporabljene pri določanju parametrov J-A modela.

Histerezne zanke merjene pri različnih frekvencah vzbujanja in različnih maksimalnih vrednostih magnetizacije /3/ vsebujejo poleg histereznih izgub tudi izgube zaradi vrtilčnih tokov in dodatne izgube.

Na sliki 2 so za mehko magnetni kompozitni material prikazane merjene histerezne zanke pri različnih frekvencah vzbujanja in maksimalni vrednosti gostote magnetnega pretoka 1.4 T.

Razlika v površini med statično histerežno zanko in zankami pri različnih frekvencah kaže na prisotnost izgub zaradi vrtilčnih tokov in dodatnih izgub.



Slika 2. Merjene histerezne zanke pri različnih frekvencah vzbujanja in maksimalni vrednosti gostote magnetnega pretoka 1.4 T.

Na podlagi razlike površin histereznih zank s slike 1 in slike 2 pri isti maksimalni vrednosti gostote magnetnega pretoka lahko zaključimo, da je v mehko magnetnem kompozitnem materialu zelo malo vrtilčnih in dodatnih izgub. To pa seveda izhaja iz same zgradbe materiala /4/.

### 4 Ovrednotenje parametrov J-A modela z genetskimi algoritmi

Vrednosti parametrov J-A histereznega modela smo določili z uporabo genetskih algoritmov (GA). Genetski algoritem je optimizacijski proces, ki je osnovan na konceptu naravne selekcije in genetike /5/. Algoritem začnemo izvajati s skupkom možnih rešitev – osebkov, ki jih imenujemo začetna populacija (slika 3). Ta populacija ima naključno izbrane vrednosti parametrov.

Rešitve modelov dobljene na podlagi začetne populacije uporabimo za kreiranje nove populacije z upanjem, da bo nova populacija boljša od predhodne. Novo populacijo ustvarimo z uporabo genetskih operatorjev: selekcije, križanja in mutacije. Osebkki trenutne populacije, ki bodo sestavljali novo populacijo so izbrani glede na njihovo oceno kvalitete opisa merjene histerezne zanke s samim J-A modelom. Same lastnosti osebkov trenutne populacije, ki se bodo prenesle v naslednjo generacijo pa so podvržene genetskim operatorjem. To se generacijsko ponavlja toliko časa, dokler ni izpolnjen pogoj za zaustavitev genetskega algoritma (npr. število generacij ali izpolnitev minimalnih zahtevanih pogojev).

Z GA lahko optimiramo zvezne ali diskretno opisane sisteme, poleg tega lahko tudi rokujemo z numerično pridobljenimi podatki, merjenimi podatki ali analitičnimi funkcijami.

Uporabo genetskih algoritmov pri iskanju parametrov J-A modela bomo obravnavali v nadaljevanju.

#### 4.1 Določanje vrednosti parametrov J-A modela

Vrednosti snovno odvisnih parametrov potrebnih za pravilen opis histerezne zanke z J-A modelom (en. 6) smo določili za statične histerezne zanke. Pri tem smo uporabili merjene vrednosti s slike 1.

Sestava populacije z osebki predstavljenimi z nizom parametrov J-A modela uporabljena v optimizacijskem procesu z genetskimi algoritmi je prikazana na sliki 3.

$$pop = \begin{bmatrix} a_1 & \alpha_1 & k_1 & M_{s,1} & c_1 & ocena_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & \alpha_n & k_n & M_{s,n} & c_n & ocena_n \end{bmatrix}$$

$n$  – število možnih osebkov – rešitev.

Slika 3. Zgradba populacije

Posamezna vrstica populacije predstavlja osebek sestavljen iz parametrov J-A modela. Posamezen parameter predstavlja enega od genov osebka. K vsakemu osebku pa se pripiše še njegova ocena. Ocena osebka predstavlja ocenitev posameznika (osebka) glede na izbrano vrednotenje posameznika (npr. vsota kvadratov napake – SSE). V našem primeru smo vrednotenje osebka izbrali kot razliko med merjeno in izračunano gostoto magnetnega pretoka pri istem vzbujujanju :

$$ocena = - \left| \sum_{i=1}^n (B_{m,i} - B_{c,i}) \right| \quad (8)$$

$B_m$  – merjena gostota magnetnega pretoka,

$B_c$  – izračunana gostota magnetnega pretoka s pomočjo J-A modela,

$n$  – število meritev.

GA iščejo najboljšo rešitev izmed možnih rešitev (za vsak parameter posebej) z uporabo operatorjev GA (križanje, selekcija in mutacija). Področje možnih rešitev je omejeno z vrednostmi zgornje in spodnje meje (tabela 1). Če globalni optimum obstaja v tem področju ga GA morajo najti.

S pomočjo začetne populacije (slika 3), vrednotenja posameznega osebka in določitev njegove ocene (en. 8) ter izbranega področja iskanja (tabela 1) parametrov smo izvedli optimizacijski postopek določanja parametrov J-A modela. Postopek je bil izveden s 40 osebki v 100-tih generacijah za merjeno histerežno zanko z maksimalno gostoto magnetnega pretoka 1.4 T. Rezultati so podani v tabeli

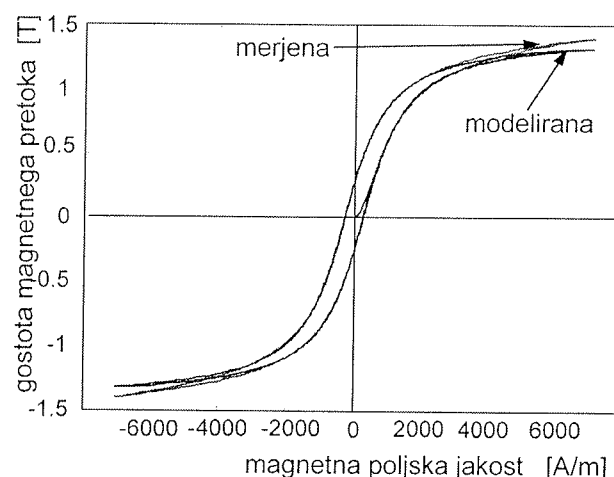
2 ter grafično prikazani v obliki optimirane histerezne zanke J-A modela na sliki 4.

| Parametri J-A modela | Zgornja meja iskalnega področja | Spodnja meja iskalnega področja |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $a$                  | 2000                            | 100                             |
| $\alpha$             | 0.002                           | 0.0001                          |
| $k$                  | 2500                            | 100                             |
| $M_s$                | $1.7 \cdot 10^6$                | $1 \cdot 10^6$                  |
| $c$                  | 0.3                             | 0.01                            |

Tabela 1. Mejne vrednosti iskalnega področja GA za merjeno statično histerežno zanko  $B_m = 1.4$  T

| Parametri J-A modela | Optimirane vrednosti |
|----------------------|----------------------|
| $a$                  | 694,684              |
| $\alpha$             | 0,000614             |
| $k$                  | 320,873              |
| $M_s$                | 1149531,87           |
| $c$                  | 0,1469               |

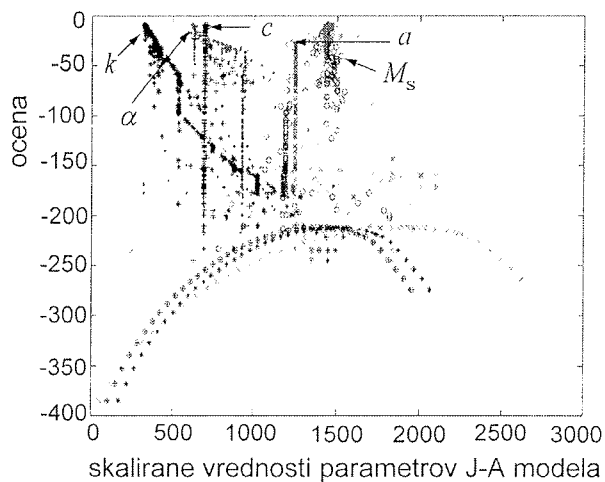
Tabela 2. Optimirane vrednosti parametrov J-A modela za merjeno statično histerežno zanko pri  $B_m = 1.4$  T



Slika 4. Optimirana histerezna zanka z GA za merjeno statično histerežno zanko pri  $B_m = 1.4$  T.

S slike 4 lahko vidimo, da GA ni našel globalnega optima ampak le neki lokalni optimum. Za ugotavljanje razloga tega problema smo opravili analizo konvergence rešitev posameznih parametrov. Konvergenca parametrov J-A modela glede na doseženo oceno je prikazana na sliki 5.

Iz konvergence parametrov  $k$ ,  $M_s$  in  $a$  (slika 5) lahko izluščimo, da je trenutno določeno področje iskanja (tabela 1) za te parametre preozko. To pomeni, da globalni optimum ne obstaja v tem določenem področju iskanja. Drugi možen razlog slabih rezultatov je premajhno število osebkov in generacij glede na operatorje GA (počasna konvergenca).



Slika 5. Konvergenca parametrov J-A modela glede na oceno.

Če področje iskanja razširimo morajo GA operirati z večjim številom osebkov in generacij (podaljša se čas računanja), saj le tako lahko pričakujemo dobre rezultate (GA morajo preiskati celotno področje iskanja). Po drugi strani, če pa zožimo področje iskanja lahko izgubimo globalni optimum. Pri tem pa seveda potrebujemo manj osebkov in manj generacij (hitra konvergenca) za celoten optimizacijski postopek.

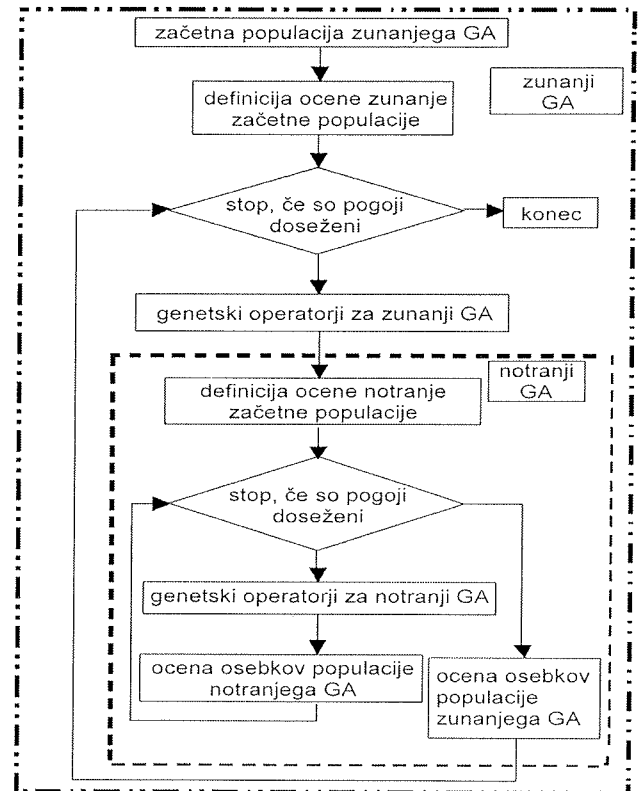
Glede na izpostavljene probleme predlagamo nov način optimizacijskega postopka na podlagi GA. Uprabnost tega načina je predvsem pri določanju globalnega optima s širokimi področji možnih vrednosti iskanih parametrov. Glavna ideja je, da uporabimo genetski algoritem, kateri je vgrajen v drugi genetski algoritem. Poimenovali smo ga z *GgaA*. Diagram poteka *GgaA* algoritma je prikazan na sliki 6.

Glavna lastnost *GgaA* je, da zunanji GA poišče optimalno zgornjo in spodnjo mejo področja iskanja, medtem, ko notranji GA zunanemu določa oceno osebka. Dejstvo je, da je na ta način iz širokega iskalnega področja izvečeno področje, ki vsebuje globalni optimum.

Osebek populacije zunanjega GA je sestavljen iz enajstih genov med katerimi prvih deset predstavlja zgornjo in spodnjo mejo iskalnega področja, zadnji pa oceno osebka. Na primer, prvi gen osebka predstavlja zgornjo mejo področja parametra  $a$ , drugi gen predstavlja spodnjo mejo področja parametra  $a$  in na enak način še za ostale parametre.

Notranji GA uporablja 40 osebkov in 100 generacij. To število osebkov in generacij je izbrano, zato ker je iskalno področje notranjega GA ozko in se pričakuje, da bo našel optimum za vsa iskalna področja (hitra konvergenca) podana z zunanjim GA. Določitev ocene osebka zunanemu GA notranji GA poišče najboljše parametre J-A modela za trenutno iskalno področje. Pri tem uporablja merjene statične histerezne zanke in vrednotenje osebka z (en. 8).

Notranji GA je uporabljen tudi ob koncu, kadar so pogoji zaustavitve *GgaA* izpolnjeni (število generacij zunanjega



Slika 6. Diagram poteka *GgaA*.

GA). V tem primeru notranji GA optimira končne vrednosti parametrov J-A modela z optimiranimi zgornjimi in spodnjimi mejami iskalnega področja dobljenimi z zunanjim GA.

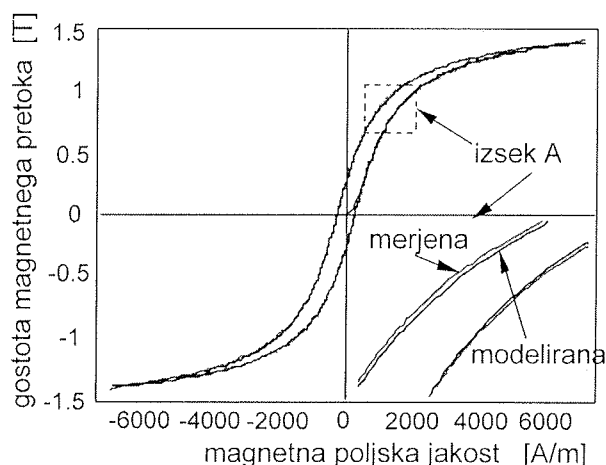
Nov pristop optimizacije z uporabo *GgaA* je bil izveden pri optimizaciji parametrov J-A modela z merjeno statično histereznim zanko z maksimalno gostoto magnetnega pretoka 1.4 T. Rezultati so predstavljeni v tabeli 3 in tabeli 4 ter grafično prikazani na sliki 7 v obliki optimirane statične histerezne zanke z J-A modelom.

| Parametri GgaA        | Meje iskalnega področja GgaA |
|-----------------------|------------------------------|
| $a$ zgornja meja      | $4000 \div 1950$             |
| $a$ spodnja meja      | $1950 \div 100$              |
| $\alpha$ zgornja meja | $0,004 \div 0,00195$         |
| $\alpha$ spodnja meja | $0,00195 \div 0,0001$        |
| $k$ zgornja meja      | $4000 \div 1950$             |
| $k$ spodnja meja      | $1950 \div 100$              |
| $M_s$ zgornja meja    | $2,4 \cdot 10^6 \div 10^6$   |
| $M_s$ spodnja meja    | $10^6 \div 0,4 \cdot 10^6$   |
| $c$ zgornja meja      | $0,3 \div 0,1475$            |
| $c$ spodnja meja      | $0,1475 \div 0,005$          |

Tabela 3. Meje iskalnega področja za *GgaA* glede na merjeno statično histereznim zanko pri maksimalnem  $B_m = 1.4$  T

| parametri J-A modela | Meje iskalnega področja optimirane z GgaA | Optimirane vrednosti z notranjim GA |
|----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| $a$                  | $1974.577 \div 124.577$                   | 1188,541                            |
| $\alpha$             | $0,00197 \div 0,000121$                   | 0,001633                            |
| $k$                  | $1974.577 \div 137.744$                   | 322,618                             |
| $M_s$                | $1,6 \cdot 10^6 \div 0,9 \cdot 10^6$      | $1,268 \cdot 10^6$                  |
| $c$                  | $0,2479 \div 0,04657$                     | 0,2220997                           |

Tabela 4. Optimirane vrednosti parametrov J-A modela glede na merjeno statično histerežno zanko pri maksimalnem  $B_m = 1.4 \text{ T}$  z uporabo GgaA.



Slika 7. Rezultati optimizacije GgaA glede na merjeno statično histerežno zanko pri maksimalnem  $B_m = 1.4 \text{ T}$  z uporabo GgaA.

S slike 7 lahko vidimo, da se modelirana histerezna zanka zelo dobro prilega merjeni. S tem je potrjeno dobro delovanje novega optimizacijskega postopka na podlagi tako imenovanega GgaA algoritma.

## 5 Zaključek

Določitev parametrov J-A modela s pomočjo genetskih algoritmov za SMC material je učinkovita metoda, če že vnaprej poznamo meje iskalnega področja, to pomeni, da poznamo okvirne vrednosti rešitev. Če pa teh okvirnih vrednosti rešitev ne poznamo in operiramo s širokim iskalnim področjem nam uporaba gnezdenih genetskih algoritmov (GgaA) daje dobre rezultate. To je razvidno tudi iz slike 7,

saj primerjava merjenih in modeliranih vrednosti histereznih zank kaže zelo majhna medsebojna odstopanja. Obenem pa so dobljeni rezultati tudi potrditev uporabe J-A modela za mehko magnetne kompozitne materiale. Potrebno pa je poudariti, da se v primeru optimizacije parametrov za dinamične histerezne zanke izgubi fizikalni pomen parametrov J-A modela.

## 6 Reference

- /1/ D. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Encyclopedia Britannica, Fifteenth Edition 1989.
- /2/ D. C. Jiles, J. B. Thoelke, Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops, IEEE Trans. Magn., vol.25, no. 5, pp. 3928 - 3930, September 1989.
- /3/ Patricia Jansson, Soft magnetic composites - a rapidly expanding materials group, Höganäs AB, Sweden, 1999.
- /4/ Damijan Miljavec, Borivoj Šuštaršič, Željko Turk, Konrad Lenasi, Magnetne lastnosti mehkomagnetnih kompozitnih materialov, Elektroteh. vestn., 2003, letn. 70, št. 3, str. 109-114.
- /5/ Wilson, P. R.; Ross, J. Neil; Brown, A. D., Optimizing the Jiles-Atherton Model of Hysteresis by a Genetic Algorithm. IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 2, pp. 989 - 993, March 2001.
- /6/ D. C. Jiles, J. B. Thoelke, M. K. Devine, Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis, IEEE Trans. Magn., vol. 28, no. 1, pp. 27 - 35, January 1992.

Bogomir Zidarič, univ. dipl. ing. el.,  
TECES,  
Gospodarska cesta 84,  
2000 Maribor,  
Slovenia

doc. dr. Damijan Miljavec,  
e-mail: miljavec@fe.uni-lj.si  
Univerza v Ljubljani,  
Fakulteta za elektrotehniko,  
Tržaška 25, 1000 Ljubljana  
Tel. (01) 476 82 81

Prispelo (Arrived): 23.03.2005

Sprejeto (Accepted): 12.06.2005