

Optimizacija indukcijskega segrevanja z numeričnim modeliranjem in genetskim algoritmom

Matej Kranjc, Anže Županič, Tomaž Jarm, Damijan Miklavčič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: Matej.Kranjc@fe.uni-lj.si

Povzetek. Toplotna obdelava kovin z indukcijskim segrevanjem je v industriji prisotna že vrsto let. V zadnjem času se je ob čedalje večji računalniški zmogljivosti problem indukcijskega segrevanja prenesel tudi v numerično okolje, kjer pa je bilo narejenih zelo malo študij, povezanih z optimizacijo. V okviru naše študije smo želeli predstaviti zmožljiv in v praksi uporaben način reševanja problema postavitve tuljave in nastavitve parametrov električnega toka za doseg želenega profila segrevanja valjastega obdelovanca. Problem smo reševali z metodo končnih elementov v dvodimenzionalnem osno-simetričnem koordinatnem sistemu. Optimizacija z genetskim algoritmom se je izkazala za zelo učinkovito, saj se je optimizirana rešitev zelo približala globalnemu optimumu. V primerjavi z intuitivnim nastavljanjem parametrov se je ciljni del obdelovanca segrel hitreje in z manj porabljenimi energije. Zanesljivost algoritma smo pokazali s konvergiranjem rešitev h globalnemu optimumu ob večkratnemu zagonu med seboj neodvisnih optimizacij. Učinkovitost in zanesljivost genetskega algoritma sta prednosti optimizacije indukcijskega segrevanja, ki bosta ob kompleksnejših geometrijah v prihodnje še bolj izrazita.

Ključne besede: indukcijsko segrevanje, genetski algoritem, optimizacija, metoda končnih elementov

Optimization of induction heating using numerical modeling and genetic algorithm

Extended abstract. Induction heating is one of the most widely used methods for heat treatment of steel. However, due to the complex interplay of electromagnetic, thermal and metallurgic phenomena, it is very demanding to model it numerically. The aim of our study was to determine the optimal coil position and the optimal amplitude and frequency of the electric current to attain the desired heat profile (temperature of the outer layer of the heated steel object should reach 450 – 500 K) by using the genetic algorithm optimization method in combination with finite-element numerical modelling. The object of our study was a non-ferromagnetic steel cylinder (Fig. 1) surrounded by a copper coil consisting of four loops. We calculated the magnetic field (Eq. 4), which causes joule heating (Eq. 6), and redistribution of the temperature throughout the material. In our calculations we took into account the steels temperature-dependent material properties (Eqs. 1, 2 and 3). We considered the following optimization parameter constraints: position of the single-coil loop and amplitude and frequency of the electric current through the coil (Fig. 2). Solutions were selected according to their fitness (Eq. 9) depending on the accuracy of heating and the amount of the used energy. We compared our optimized solution with an educated

guess and the actual global optimum. The optimized solution and the global optimum had very comparable temperature profiles and almost identical fitness function values due to a better selection of the electric current parameters compared to the educated guess (Table 3). The genetic algorithm was terminated after 30 generations, when the fitness of the top solution usually converged close to the global optimum (Fig. 4). One of the advantages of our approach is the adaptability of the algorithm enabling its easy use in various heat treatment applications. Even though the optimized solution is not identical to the global optimum, it is always close to it and it can also be used as an initial approximation for other more precise deterministic optimization methods. We demonstrated that our approach assures precise heating of the steel cylinder at low-energy consumption and high time-efficiency. We believe these advantages will become even more pronounced when the algorithm is used on more complex induction heating problems.

Keywords: induction heating, genetic algorithm, optimization, finite-element method

1 Uvod

Indukcijsko segrevanje je eden najpopularnejših postopkov za toplotno obdelavo kovin. Njegove pomembne prednosti v primerjavi z drugimi postopki so možnost zelo hitrega segrevanja natančno določenih lokaliziranih območij na obdelovancu, energijska varčnost in prijaznost do okolja [1].

Proces indukcijskega segrevanja je zapletena kombinacija med seboj soodvisnih elektromagnetnih, termičnih in metalurških pojavov. Osnova indukcijskega segrevanja je izmenično elektromagnetno polje, ki ga ustvarimo v tuljavi, po kateri teče izmenični električni tok. To izmenično elektromagnetno polje inducira v obdelovancu vrtnične tokove, zaradi katerih se v obdelovancu sprošča energija v obliki toplote. Toplota se s toplotnim prevajanjem prenaša po obdelovancu. V praksi je zelo težko ugotoviti, kakšno obliko in postavitev tuljave je treba uporabiti za določeno obliko obdelovanca in želeni profil segrevanja, zato so računalniške simulacije zelo dobrodošle pri načrtovanju indukcijskih sistemov.

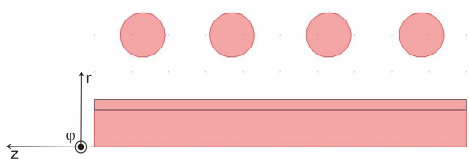
Cilj naše študije je bil prikazati uspešno delovanje genetskega algoritma pri reševanju problema optimalne postavitve tuljave in nastavitve parametrov električnega toka za doseg želenega profila segrevanja. Dobljene optimalne parametre smo primerjali z intuitivno rešitvijo in globalnim optimumom, ki smo ga določili s pregledom vsega prostora dopustnih rešitev. Za primerjavo so služili ustreznost porazdelitve temperature v obdelovancu ter čas in energija, potrebna za doseg želene temperature v ciljnem območju obdelovanca. Pokazali smo, da je naš algoritem zanesljiv, prilagodljiv in da dobro konvergira proti globalnemu optimumu.

2 Materiali in metode

2.1 Numerični model

2.1.1 Geometrija

Predmet obravnave je jeklen valj višine 100 mm in premera 12,5 mm (slika 1). Cilj je segreti območje debeline 2,5 mm na robnem delu plašča valja med 450 in 500 K. Valj je nameščen v tuljavo, ki je sestavljena iz štirih ovojev premera 12 mm. Zaradi preprostejšega in hitrejšega numeričnega računanja in osne simetrije problema ne rešujemo v tridimenzionalnem prostoru, ampak je postavljen v osno-simetričen dvodimenzionalni prostor [2].



Slika 1: Geometrija modela: jekleni valj s krožnimi štirimi ovoji, postavljen v dvodimenzionalni osno-simetrični model.

Fig 1: Geometric model: steel cylinder surrounded by a coil of four loops placed in a two-dimensional axial-symmetric coordinate system.

2.1.2 Snovne lastnosti

Temperatura snovi pri indukcijskem segrevanju se spreminja v tako velikem razponu, da je treba upoštevati temperaturno odvisnost snovnih lastnosti [3, 4].

Predmet izračuna indukcijskega segrevanja je neferomagnetno jeklo z oznako X5CrNi 18/9 (1.4301), ki je v industriji prisotno že vrsto let in se uporablja v različne namene. Temperaturno odvisnost parametrov opišemo z enačbami 1, 2 in 3 [5, 6], pri čemer so σ specifična električna prevodnost (Sm^{-1}), C specifična toplotna kapaciteta ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) in λ toplotna prevodnost ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

$$\sigma(T) = 1 / (4.9659 \cdot 10^{-7} + T \cdot 8.4121 \cdot 10^{-10} - T^2 \cdot 3.7246 \times 10^{-13} + T^4 \cdot 6.1960 \cdot 10^{-17}) \quad (1)$$

$$C(T) = 351.93 + T \cdot 976 \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

$$\lambda(T) = 11.215 + T \cdot 1.4087 \cdot 10^{-2} \quad (3)$$

2.1.3 Uporabljene enačbe

Končna oblika parcialne diferencialne elektromagnetne enačbe v osno-simetričnem koordinatnem sistemu (4) izhaja iz Maxwellovih enačb elektromagnetnega polja. V njej pomeni σ specifično električno prevodnost medija (Sm^{-1}), ω krožno frekvenco (s^{-1}), r polmer (m), J^e gostoto zunanega električnega toka (Am^{-2}), μ_0 permeabilnost praznega prostora (NA^{-2}), \mathbf{u} pa je vektor, ki je povezan z magnetnim potencialom [7].

$$\left(j\sigma\omega r u - J^e - r\mu_0^{-1} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \mu_0^{-1} 3 \frac{\partial u}{\partial r} + r\mu_0^{-1} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \bar{\mathbf{e}}_\phi = 0 \quad (4)$$

Spreminjanje temperature in prenašanje toplote opišemo z osnovno toplotno enačbo (5), v kateri je ρ gostota snovi (kgm^{-3}), C specifična toplotna kapaciteta ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), T temperatura (K), λ toplotna prevodnost ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) in Q (J) toplotni vir, ki prek zveze v enačbi (6) ponazarja v jeklu inducirane vrtnične tokove, ki se odražajo v obliki toplotnih izgub.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{\mathbf{V}} \cdot (-\lambda \bar{\mathbf{V}} T) = Q \quad (5)$$

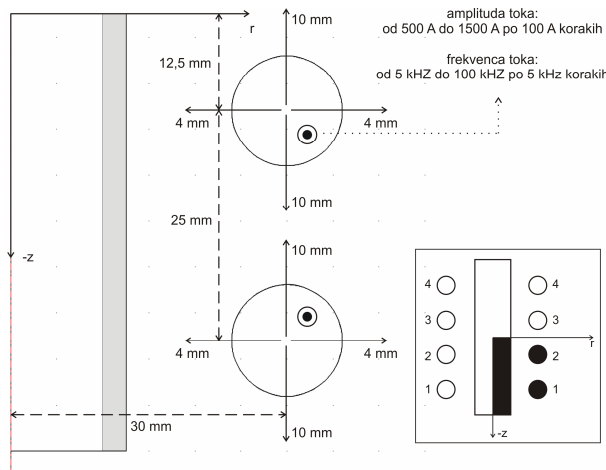
$$Q = \frac{1}{2} \text{Re} \left(\bar{\mathbf{J}} \left(\bar{\mathbf{E}}^* + \sigma^{-1} \bar{\mathbf{J}}^* \right) \right) \quad (6)$$

2.1.4 Robni in začetni pogoji

Na robu prostora, v katerem se nahaja problem, smo predpostavili magnetno in toplotno izolacijo. Začetno temperaturo celotnega sistema smo postavili na 293 K.

2.2 Genetski algoritem

Programsko kodo genetskega algoritma [8, 9, 10] smo napisali v programskem paketu Matlab 2007a. Algoritem je povezan s programskim paketom COMSOL Multiphysics, ki omogoča numerično reševanje z metodo končnih elementov. Optimizacija je potekala na osebнем računalniku (AMD 2,2 GHZ s 3 GB pomnilnika) in je trajala v povprečju štiri ure. Diskretno spreminjajoči se parametri optimizacije so bili amplituda in frekvenca električnega toka skozi vse štiri ovoje ter relativni položaj posameznih ovojev glede na obdelovanca. Prostor dopustnih rešitev je prikazan na sliki 2. Središča zank tuljav se lahko približajo koordinatni osi z na 20 mm in oddaljijo za 40 mm. Med seboj se lahko približajo na 5 mm in oddaljijo za 45 mm.



Slika 2: Območja spreminjanja parametrov problema med optimizacijo. Obdelovanec v obliki valja je postavljen s središčno vzdolž osi z . Oboji tuljave se lahko premikajo v vse štiri smeri v označenem območju z diskretnimi koraki (2 mm v smeri osi r in 1 mm v smeri osi z). Tok, ki teče skozi ovoje, se spreminja vrednost amplitude in frekvence. S sivo barvo je označen vrhnji del plašča obdelovanca, ki ga želimo segreti na želeno temperaturo. Zaradi simetrije in večje preglednosti je prikazana spodnja četrtina modela (črno obarvan del celotnega modela na manjši sliki spodaj desno).

Fig. 2: Constraints of the optimization parameters. The cylinders centre axis is placed along axis z . Coil loops can change their position in all four directions in the marked region with discrete steps (2 mm in the direction of axis r and 1 mm in the direction of axis z). Frequency and amplitude of the electric current through the loops are also constrained. The outer layer of the cylinder, which is meant to be heated, is coloured in gray. The figure only shows the lower quarter of the model due to symmetries (black coloured part of the whole model in the smaller figure below on the right).

Vrednosti parametrov prve generacije rešitev $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ so bili določeni naključno in so tvorili tako imenovano prvotno populacijo. Rešitve te populacije so se nato razmnoževale s križanjem ali mutacijo ter ustvarile naslednje generacije rešitev. Križanje poteka tako, da je vsaka nova rešitev $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ naključna linearna kombinacija predhodnih dveh rešitev X in Y (enačba 7). Pri mutaciji je vsaka nova rešitev $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ naključna variacija ene rešitve X (enačba 8).

$$z_i = a_i \cdot x_i + (1 - a_i) \cdot y_i, \quad a_i \in [0; 1]. \quad (7)$$

$$m_i = x_i + b_i \cdot x_i, \quad b_i \in [-0, 3; 0, 3]. \quad (8)$$

Rešitve za razmnoževanje so bile izbrane glede na kvaliteto rešitve oziroma funkcijo uspešnosti F (enačba 9), ki jo določajo porabljena energija (E), površina ciljnega območja obdelovanca segretega nad 450 K ($P_{Tspodnja}$), vendar ne nad 500 K ($P_{Tzgornja}$), kjer je $P_{celotna}$ celotna površina ciljnega območja. E_{maks} predstavlja oceno maksimalne možne porabljene energije za segrevanje. Konstanti $P_{celotna}$ in E_{maks} opravljata vlogo normiranja posameznih komponent funkcije. Obe komponenti sta tudi uteženi z utežmi, ki ovrednotijo posamezno komponento. Na ta način ima lahko drugi člen največjo vrednost 100 in tretji 20. Konstanti člen 20 na začetku funkcije služi zagotavljanju nenegativne vrednosti funkcije pri vseh možnih rešitvah. Funkcija uspešnosti je zastavljena tako, da bo uspešnost višja v primeru, ko bo celoten opazovani del obdelovanca segret med 450 K in 500 K pri tem pa bo porabljene čim manj energije.

$$F = 20 + 100 \cdot \left(\frac{P_{Tspodnja} - P_{Tzgornja}}{P_{celotna}} \right) - 20 \cdot \left(\frac{E}{E_{maks}} \right) \quad (9)$$

Optimizacija z genetskim algoritmom je bila prekinjena po 30 generacijah, kar je v vseh primerih zadoščalo za konvergenco (slika 4). Ostali parametri genetskega algoritma so podani v tabeli 1.

Tabela 1: Parametri genetskega algoritma.

Table 1: Parameters of the genetic algorithm.

Velikost začetne populacije	Število generacij	Verjetnost križanja	Verjetnost mutacije
30	30	0.75	0.25

2.3 Protokol

Na začetku smo se problema lotili intuitivno. Glede na ciljno območje segrevanja smo primerno temu postavili zanke tuljav. Preizkusili smo več različnih vrednosti

amplitude in frekvence toka ter med vsemi rešitvami izbrali tisto z najvišjo vrednostjo funkcije uspešnosti, izračunano po enačbi (9). To rešitev smo poimenovali intuitivna rešitev (IR).

Genetski algoritem smo poglani petdesetkrat in ob vsaki posamezni optimizaciji algoritma spremljali konvergiranje rešitve. Primer konvergiranja petih naključno izbranih rešitev algoritma h globalnemu optimumu smo prikazali tudi na sliki 4. Med vsemi dobljenimi rešitvami algoritma smo izbrali srednjo rešitev glede na funkcijo uspešnosti. To rešitev smo poimenovali optimizirana rešitev (OR). Izračunali smo tudi globalno rešitev (GR), ki smo jo določili s pregledom celotnega prostora dopustnih rešitev.

3 Rezultati

V tabeli 2 so podani parametri problema izračunane intuitivne rešitve, optimizirane rešitve in globalne rešitve.

Tabela 2: Parametri izračunane intuitivne rešitve (IR), optimizirane rešitve (OR) in globalne rešitve (GR). Polmer ($R1-4$; ovoji so oštevilčeni od spodaj navzgor) se nanaša na razdaljo med z osjo ($r = 0$) in središčem ovojev tuljav (slika 2). Oddaljenost od horizontalne osi r skozi središče koordinatnega sistema do središča zank tuljav je označen z $Z1-4$. Skozi vse štiri ovoje je tek eltrični tok amplitude I in frekvence f .

Table 2: Parameter solutions of an educated guess (IR), an optimized solution (OR) and the actual global optimum (GR). Radiuses $R1-4$ denote distances between axis z ($r = 0$) and centre points of each loop (Fig. 2). Distances between horizontal axis r and centre points of each loop are marked with $Z1-4$. Amplitude of electric current I and current frequency f are also presented.

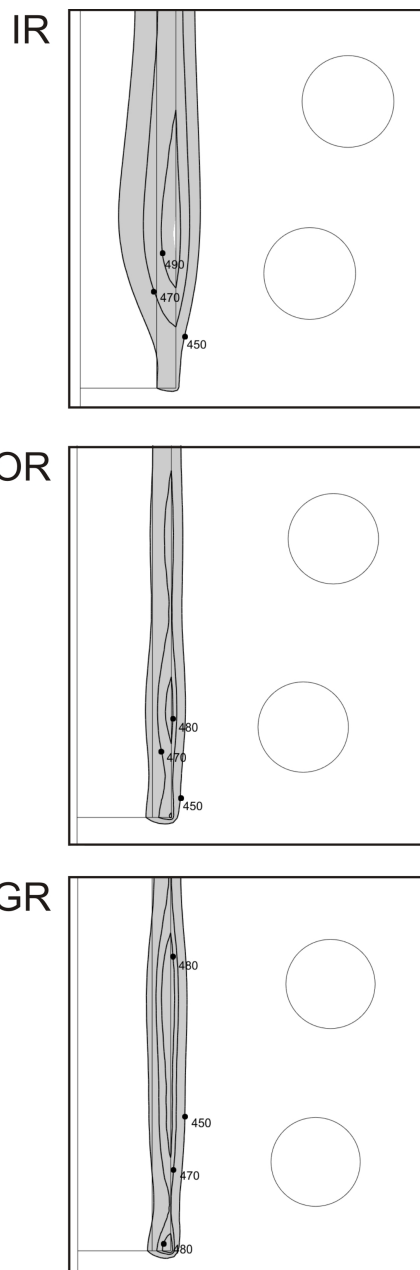
	$R1$ [mm]	$Z1$ [mm]	$R2$ [mm]	$Z2$ [mm]	$R3$ [mm]	$Z3$ [mm]
IR	30	-35	35	-12,5	35	12,5
OR	30	-38	34	-13	34	13
GR	32	-38	34	-14	34	15

	$R4$ [mm]	$Z4$ [mm]	I [A]	f [kHz]
IP	30	35	800	80
OR	30	37	1100	60
GR	32	38	1100	90

Na prvi pogled so parametri rešitev v vseh treh primerih zelo podobni. Razporeditev ovojev je v vseh primerih simetrična glede na os r , pri tem pa sta srednja ovoja bolj oddaljena od obdelovanca kot robna ovoja. Rešitve se najbolj razlikujejo v vrednosti amplitude in frekvence toka, kar vpliva na porazdelitev temperature obdelovanca, še bolj pa na porabljeno energijo.

Slika 3 prikazuje porazdelitev temperature v obdelovancu v območju med 450 in 500 K za vse tri rešitve. Temperaturni interval v primerih optimizirane

in globalne rešitve je veliko uspešneje lokaliziran v ciljno območje segrevanja obdelovanca.



Slika 3: Razporeditev želene temperature v ciljnem območju obdelovanca pri IR, OR in GR. Zaradi simetrije je prikazan samo spodnji del obdelovanca.

Fig. 3: Temperature profile of IR, OR and GR at the outer layer of the cylinder. The figure only shows the lower part of the problem due to the symmetry.

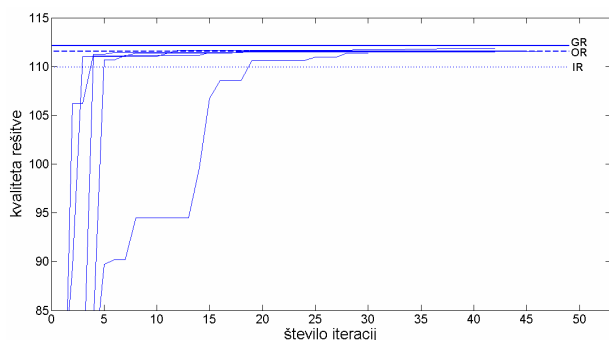
Primerjava časa potrebnega za doseg želene temperature v ciljnem območju obdelovanca, potrebne energije in kvalitete rešitve med intuitivno, optimizirano in globalno rešitvijo, je prikazana v tabeli 3.

Tabela 3: Primerjava porabljenega časa potrebnega za doseg želene temperature v ciljnem območju obdelovanca, potrebne energije in kvalitete rešitve med IR, OR in GR.

Table 3: Comparison of used computer time, needed energy to attain the desired temperature profile and values of fitness function between IR, OR and GR.

	čas [s]	energija [kJ]	kvaliteta
IR	19,4	454	109,91
OR	10,8	403	111,53
GR	8,8	389	112,13

Ponovljivost rezultatov optimizacije je prikazana na sliki 4. Zaradi preglednosti ni izrisanih vseh petdeset potekov spreminjanja rešitev med delovanjem algoritma, ampak samo pet naključno izbranih. Po 20 iteracijah so vse rešitve genetskega algoritma presegle kvaliteto intuitivne rešitve in konvergirale h globalni rešitvi.



Slika 4: Prikaz naraščajoče kvalitete petih rešitev v med seboj neodvisnih optimizacij z genetskim algoritmom. Z ravno neprekinjeno črto je označena globalna rešitev (GR), sledi ji črtkana črta kot optimizirana rešitev (OR). S spodnjo pikčasto črto je predstavljena intuitivna rešitev (IR).

Fig. 4: Increasing fitness function values for five randomly chosen solutions. All genetic algorithm solutions exceeded fitness function value of the educated guess (IR). Global optimum (GR) is marked with a solid line, optimized solution (OR) is marked with a broken line and educated guess is marked with a dotted line.

4 Razprava

V okviru naše študije smo želeli predstaviti zmožljiv in v praksi uporaben način reševanja problema postavitev tuljave in nastavitve parametrov električnega toka za doseg želene temperature profila segrevanja. Rešitve genetskega algoritma, ki smo jih dobili z večkratnimi med seboj neodvisnimi optimizacijskimi teki, so vse konvergirale h globalnemu optimumu.

Postavitev ovojev intuitivne rešitve je zelo podobna postavitvi optimizirane rešitve (tabela 2). Na tako preprostem primeru lahko posameznik s poznavanjem osnov fizikalnega ozadja indukcijskega segrevanja razmeroma hitro ugotovi primerno postavitev ovojev tuljave, ki bo segrelo naše ciljno območje na želeno temperaturo. Težave pa nastopijo pri izbiri pravilne

kombinacije amplitude in frekvence toka. Z višanjem frekvence se namreč spreminja vdorna globina elektromagnetnega polja in s tem segrevanje obdelovanca. Višina amplitude toka pa vpliva na hitrost segrevanja. Zavedati se moramo, da se s temperaturo spreminjajo snovne lastnosti, kar znova vpliva na vdorno globino. Intuitivno doseči pravilno razmerje obeh veličin se je zato izkazalo za težavno, predvsem pa časovno potratno. Boljša izbira amplitude in frekvence optimizirane rešitve genetskega algoritma je čas samega segrevanja, potrebnega za doseg želene temperature v ciljnem območju obdelovanca skrajšala za 19 % in potrebno energijo za 11 %, kar je posledično izboljšalo kvaliteto rešitve za 1,5 % (tabela 3) glede na kriterijsko funkcijo. V obeh primerih se je ciljno območje segrevanja obdelovanca segrelo na želeno temperaturo, vendar je segrevanje pri optimizirani rešitvi boljše lokalizirano (slika 3). Globalna rešitev ima podobno porazdelitev temperature, vendar je zaradi krajšega časa potrebnega za doseg želene temperature v ciljnem območju obdelovanca 3,5 % energijsko manj potratno v primerjavi z optimizirano rešitvijo in zato posledično kvalitetnejša.

Genetski algoritem se je v našem primeru izkazal kot zelo dobra izbira za optimizacijo indukcijskega grejta. Njegovo zanesljivost ilustrira konvergenca vseh rešitev algoritma h globalni rešitvi problema (slika 4). Druga prednost je prilagodljivost, saj je mogoče programsko kodo algoritma hitro prilagoditi točno določeni aplikaciji. Na primer: pri kaljenju kovin je poudarek na doseganju želene temperature na ciljnem delu obdelovanca, pri kovanju, pa je pomembnejša porabljena energija [1]. V obeh primerih je prilagoditev programske kode preprosta, saj je treba prilagoditi le uteži posameznih komponent funkcije uspešnosti ali dodati nove komponente.

Med pomanjkljivostmi genetskega algoritma je morda najpomembnejše, da optimizirana rešitev ni enaka globalnemu optimumu; lahko pa se mu zelo približa in pomeni začetni približek za natančnejšo optimizacijo s katero izmed determinističnih optimizacijskih metod. Poleg tega lahko genetski algoritem ponudi več topološko različnih rešitev podobno visoke kvalitete in s tem uporabniku več možnosti za implementacijo konkretne rešitve.

Optimizacija postavitve tuljave in parametrov električnega toka je pri reševanju problemov indukcijskega segrevanja pomemben napredek. Že pri preprostem problemu indukcijskega segrevanja smo prikazali pomembne prednosti algoritma, predvsem zanesljivo zagotavljanje natančnosti procesa segrevanja ob manjši energiji in večji časovni učinkovitosti. V prihodnje nameravamo algoritem preizkusiti na kompleksnejših geometrijah, pri katerih pričakujemo, da bodo te prednosti še bolj izrazite.

5 Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo.

6 Literatura

- [1] Rudnev V, Loveless D, Cook R, Black M (2003) Handbook of induction heating. New York, Basel
- [2] Kranjc M, Županič A, Jarm T, Miklavčič D (2008) Vpliv geometrije tuljave na procesorski čas in natančnost rešitve pri numerične modeliranju indukcijskega segrevanja z metodo končnih elementov. Zbornik sedemnajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2008, 29. 9. - 1.10 2008, Portorož, Slovenija
- [3] Sadeghipour K, Dopkin J A, Li K (1995) A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel. Computers in industry 28:195-205
- [4] Kawase Y, Miyatake T, Hirata K (2000) Thermal analysis of steel blade quenching by induction heating. IEEE transactions on magnetics 36(4):1788-1791
- [5] Chaboudez C, Clain S, Glardon R, Rappaz J, Swierkosz M, Touzani R (1994) Numerical modeling of induction heating of long workpieces. IEEE transactions on magnetics, vol. 30, no. 6, pp. 502-5037
- [6] Davies E J (1990) Conduction and induction heating, IEE power engineering series II, United Kingdom
- [7] Kranjc M, Županič A, Jarm T, Miklavčič D (2007) Model indukcijskega segrevanja karbonskega jekla. Zbornik šestnajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2007, 24. - 26. september 2007, Portorož, Slovenija
- [8] Holland J H (1992) Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. Cambridge: MIT Press
- [9] Županič A, Čorović S, Miklavčič D (2008) Optimization of electrode position and electric pulse amplitude in electrochemotherapy. Radiol. Oncol. 42: 93-101
- [10] Čorović S, Županič A, Miklavčič D (2008) Numerical modeling and optimization of electric field distribution in subcutaneous tumor treated with electrochemotherapy using needle electrodes. IEEE Trans. Plasma Sci. 36: 1665-1672

Matej Kranjc je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in je zaposlen kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za biokibernetiko na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo raziskovalno delo je osredotočeno na numerično reševanje problemov indukcijskega segrevanja in razvoj elektronskih sistemov biomedicinskih naprav.

Anže Županič je diplomiral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in je zaposlen kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za biokibernetiko na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo raziskovalno delo je osredotočeno na numerično modeliranje in optimizacijo genske elektrotransfekcije in drugih medicinskih terapij na podlagi elektroporacije.

Tomaž Jarm je doktoriral leta 1999 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je zaposlen kot pedagog in raziskovalec. Njegovo raziskovalno delo je vezano predvsem na področji merilnih metod v biomedicinski tehniki in obdelave signalov, v zadnjem času pa tudi indukcijskega segrevanja.

Damijan Miklavčič je doktoriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je trenutno zaposlen kot redni profesor in predstojnik Laboratorija za biokibernetiko. Njegovo raziskovalno delo je v zadnjih letih povezano s prenosom genov in zdravilnih učinkovin pri zdravljenju raka z elektroporacijo, razvojem strojne opreme in numeričnem modeliranjem bioloških procesov.