

# Rekonstrukcija krmiljenja servomotorjev na indukcijskem kalilnem stroju

Rok Šertel<sup>1</sup>, Janez Pogorelc<sup>1</sup>, Boris Bizjak<sup>1</sup>, Karl Gotlih<sup>2</sup>, Stanko Vrčkovnik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

<sup>3</sup> Viptronik d.o.o., Koroška cesta 14, 2390 Ravne na Koroškem  
e-pošta: rok.sertel@gmail.com, rok.sertel@student.um.si

## Reconstruction of controlling servomotors on induction hardening machine

**Abstract.** In this article, we present reconstruction of the entire regulation of servomotors on induction hardening machine. Machine will work more precise and more reliable with the replacement of control. The entire automation of the machine has been developed for the controller S7-300. In addition, the operation of the machine can be supervised and managed via user interface on the control panel. For introduction we present electromagnetic background of induction hardening, following with mechanical construction of induction hardening machine. After that we describe controlling system and software which controls the entire process.

## 1 Uvod

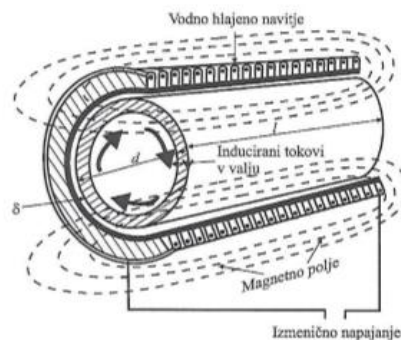
Indukcijsko kaljenje je postopek površinske toplotne obdelave, med katerim se zaradi elektromagnetne indukcije tanek površinski sloj na določenih površinah jeklenega obdelovanca hitro segreva do temperature avstenitizacije, nato pa se z hitrim hlajenjem doseže želeni martenzit ter posledično doseže zelena trdota. S tem postopkom zagotovimo odpornost proti obrabi površin obdelovanca brez strukturnih sprememb v njegovem jedru. Da bi dosegli zelene lastnosti, mora biti površinski sloj predpisane oblike, predpisana pa sta tudi globina kaljenja in površinska trdota. Pri tem ne sme priti do spremembe izmer in oblike obdelovanca. Za doseg teht zahtev je bilo treba razviti:

- matematični model za optimizacijo oblike induktorjev in simuliranje procesa,
- ustrezno bazo podatkov za spremljanje lastnosti materiala in delovnih karakteristik opreme,
- krmilne algoritme procesa za določen material,
- geometrijsko obliko obdelovanca in enofrekvenčno (ali dwo-frekvenčno) obdelavo, ki omogoča zeleno kakovost kaljenega sloja.

## 2 Fizikalne osnove indukcijskega kaljenja

Indukcijsko segrevanje temelji na fizikalnem pojavu indukcije električne napetosti v ogrevancu, ki ga povzroči izmenično magnetno polje, v katerem leži ogrevanec. Napetost požene tok (Slika 1) po obodu

električno prevodnega ogrevanca, tako kot požene pri transformatorju inducirana napetost v kratko sklenjenem ovojju sekundarja kratkostični tok in povzroči v njem jouske izgube. Toplota se sprošča v ogrevancu: velikost toplotne moči in njena porazdelitev po preseku ogrevanca je odvisna predvsem od elektroenergetskih parametrov indukcijske naprave. Magnetna poljska jakost [A/m] na površini ogrevanca določa velikost toka na površini in posledično njeno gostoto moči [W/m<sup>2</sup>]. Poleg električnih in magnetnih lastnosti ogrevanega materiala je za globino vdiranja toka v obdelovanec oziroma za globino področja sproščanja toplote v njem odgovorna frekvenca, s katero naprava deluje.



Slika 1: Potek silnic pri indukcijskem segrevanju kovinskega valja

Kljub analogiji z enostavno fizikalno sliko transformatorja so razmere pri indukcijskem segrevanju bistveno bolj zapletene. Če se omejimo na cilindrična telesa po sliki 1, lahko ugotovimo, da imamo v ovajih tuljave izmenični tok, ki povzroči magnetno poljsko jakost:

$$H = \frac{N_1 \cdot I_1}{l}, \quad (1)$$

pri čemer je:

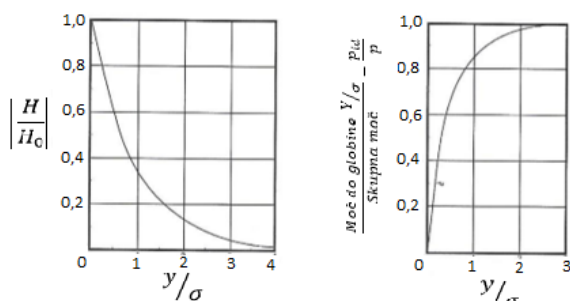
- |       |                           |
|-------|---------------------------|
| $N_1$ | - število ovojev tuljave, |
| $I_1$ | - tok skozi tuljavo [A],  |
| $l$   | - dolžina tuljave [m].    |

Magnetna poljska jakost  $H$  tvori troje samostojnih magnetnih pretokov: stresano polje tuljave, stresano polje zračne reže, magnetno polje obdelovanca. Šele magnetno polje v delovnem telesu je odgovorno za inducirano napetost v njem in za tok, ki naj telo segreva. Zaradi kožnega efekta pada tok v preseku obdelovanca po eksponentni funkciji ( $e^{-y}$ ), tako da je v relativni globini

$y=1$ , merjeno od površine, njegova velikost  $e^{-1}=0,368$ . Globino, pri kateri pade tok na to vrednost, imenujemo globino vdiranja  $\delta$ . Odvisna je izključno od električne upornosti in magnetne permeabilnosti obdelovanca ter od frekvence magnetnega polja. Globina vdiranja je pomembna zaradi tega, ker se do te globine sprošča 86,5 % vse v obdelovanec dovedene toplote. Do globine vdiranja  $2\delta$  se sprosti 98,2 % v obdelovanec dovedene toplote [7]. Zaradi teh dejstev se v pogovornem jeziku globina vdiranja  $\delta$  poenostavljeno uporablja kot nadomestek za globino ogrevanja (Slika 2). Globina vdiranja se izračuna po enačbi:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot f}}, \quad (2)$$

$\rho$  - specifična upornost obdelovanca [ $\Omega\text{m}$ ],  
 $\mu_r$  - relativna permeabilnost obdelovanca,  
 $\mu_0$  - absolutna permeabilnost [ $\text{Hm}^{-1}$ ],  
 $f$  - frekvenca [ $\text{s}^{-1}$ ].



Slika 2: Globina vdiranja toka in globina segrevanja

Izračun indukcijskega segrevanja vodi preko določitve nadomestnih upornosti magnetnih in tokovnih poti na en ovoj tuljave, pri čemer je celotni sklop dejanskih upornosti odvisen od kvadrata števila ovojev tuljave:

$$R_{dej} = R_{ovoj} \cdot N^2 \quad (3)$$

Ohmska upornost obdelovanca:

$$R_d = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \frac{d_d^2}{2 \cdot l_d} \cdot p \quad (4)$$

Ohmska upornost tuljave:

$$R_t = \mu_0 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \frac{d_t}{l_t} \cdot \delta_t \cdot k_1 \quad (5)$$

Induktivna upornost obdelovanca:

$$X_d = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \frac{d_d^2}{2 \cdot l_d} \cdot q \quad (6)$$

Induktivna upornost zračne reže:

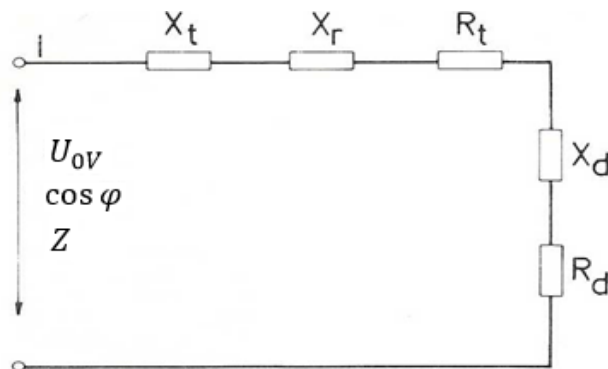
$$X_r = \mu_0 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \frac{d_t^2 - d_d^2}{2 \cdot l_d} \quad (7)$$

Induktivna upornost tuljave:

$$X_t = \mu_0 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \frac{d_t}{l_d} \cdot \delta_t \cdot k_2 \quad (8)$$

pri čemer so:

- $d_d$  - premer obdelovanca [m],
- $d_t$  - premer tuljave [m],
- $l_d$  - dolžina obdelovanca v tuljavi [m],
- $l_t$  - dolžina tuljave [m],
- $k_1$  - korekcijski faktor tuljave,
- $k_2$  - korekcijski faktor tuljave,
- $\delta_t$  - globina vdiranja toka v tuljavi [m],
- $p$  - korekcijski faktor delovne komponente,
- $q$  - korekcijski faktor jalove komponente.



Slika 3: Nadomestna shema upornosti indukcijskega ogrevanja

Nadomestne upornosti so vezane zaporedno (slika 3), zato lahko za kompleksno upornost ogrevalnega sklopa zapišemo njeno velikost:

$$Z = \sqrt{(R_d + R_t)^2 + (X_d + X_t + X_r)^2} \quad (9)$$

Pri tem je fazni faktor ogrevalnega sklopa:

$$\cos\varphi = \frac{R_d + R_t}{Z} \quad (10)$$

Izkoristek ogrevalne naprave:

$$\eta = \frac{R_d}{R_d + R_t} \quad (11)$$

Na podlagi zahtevane moči v obdelovancu  $P_0$  [W] je potrebna navidezna moč indukcijske naprave:

$$S = \frac{P_0}{\eta \cdot \cos\varphi} \quad (12)$$

Da dobimo zahtevano moč  $P_0$  [W] v obdelovancu, potrebujemo v indukcijski tuljavi napetost ovoja:

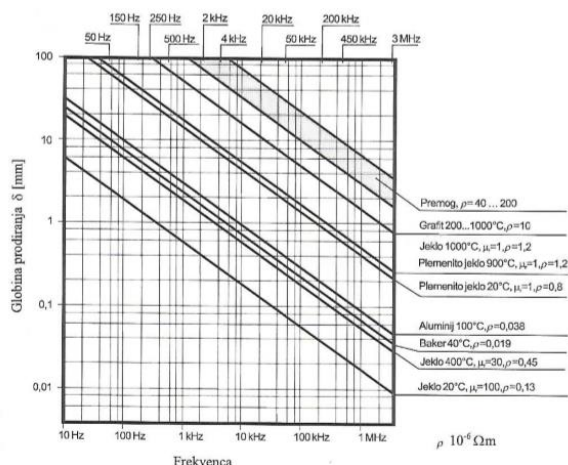
$$U_{ov} = \sqrt{S \cdot Z} \quad (13)$$

in ustrezeni tok skozi ovoje tuljave:

$$I = \sqrt{\frac{S}{Z}} \quad (14)$$

Na osnovi zgornjih enačb ter poznavanja elektromagnetnih in geometrijskih lastnosti obdelovanca je sedaj mogoče zahtevano toplotno moč v ogrevancu določiti potrebne parametre indukcijske ogrevalne naprave. Pri poznavanju materialnih lastnosti je največ težav pri uporabi razpoložljivih elektromagnetnih karakteristik obdelovanca. Za določitev parametrov obdelovanca potrebujemo relativno permeabilnost  $\mu_r$  obdelovanca, ki pa je zelo odvisna od magnetne poljske jakosti (nizko ogljikovo jeklo ima pri  $H = 10000$  A/m

relativno permeabilnost  $\mu_r = 150$ , pri  $H = 200000$  A/m pa le  $\mu_r = 8$ ) [1][2].



Slika 4: Globina vdiranja za različne prevodne materiale pri različnih delovnih frekvencah

### 3 Opis stroja

Avtomatizirati je bilo potrebno namenski stroj za kaljenje zunanjih in notranjih ozobj zobnikov ter tečin in čepov jeklenega valja. Sestavljen je iz nagibne mize s podstavkom, dodatne delovne mize za kaljenje valjev, podpornih koles na delovni mizi, triosno pomičnega manipulatorja z induktorjem ter rezervoarja hladilne tekočine (Slika 5). Nagibna miza s podstavkom je v primeru kaljenja ležajnih tečin nagnjena za  $70^\circ$ . V primeru kaljenja površin valjev pa je v kombinaciji z delovno mizo v horizontalnem položaju.

Tabela 1: Tehnični podatki stroja

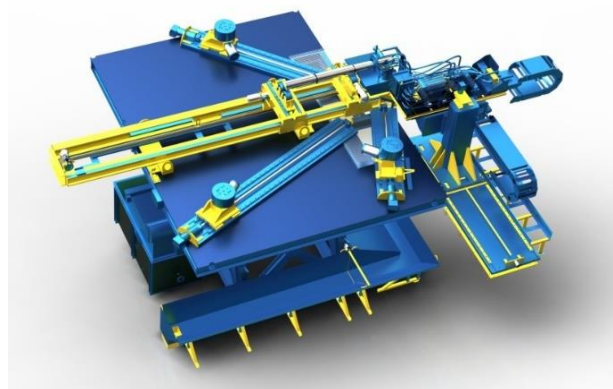
Masa	16,3 t
Mere (Š x D x V)	8000 x 10000 x 6550 mm
Frekvenca kaljenja	od 4 kHz do 25 kHz
Moč stroja	200 kW
<b>Obdelovanci</b>	
Masa	do 6500 kg
Dolžina kaljenja	600 mm
Največji premer valja	400 mm
Največja dolžina valja	5500 mm
Hitrost rotacije valja	od 10 do 30 obr/min
Hitrost kaljenja	od 0,5 do 2,5 mm/s

Tabela 2: Doseg manipulatorja

X smer	1710 mm
Y smer	543 mm
Z smer	823 mm

Prav tako je stroj sestavljen iz indukcijsko segrevalne naprave in pretvornika. Pri kalilnem stroju je obdelovanec postavljen na podporna kolesa na pomični platformi. Servomotorji [4] na našem sistemu so namenjeni pomikanju triosnega manipulatorja z induktorjem, ter upravljanju podporne mize. Vnašanje podatkov v sam sistem delovanja (Slika 6) prek uporabniškega pulta smo izvedli s programsko opremo

Movicon [3], ki deluje na principu SCADA sistema. Programska oprema je namenjena kontroliranju, analiziranju in nadzoru industrijskega procesa. Programski paket omogoča vizualizacijo sistema, kar pa zagotavlja enostavno nastavitve konfiguracije za krmilnik, enostavno deklariranje spremenljivk, sprotne opozarjanje na napake oziroma alarmiranje, omogoča tudi celovito grafično spremljanje celotnega procesa. Komunikacija med krmilnikom družine S7-300, tipa 315-2DP in servo regulatorjem Unidrive [5] ni povzročala težav. Programski paket za izdelavo funkcijskih zahtev stroja smo izvedli v Siemensovem STEP 7 [6].

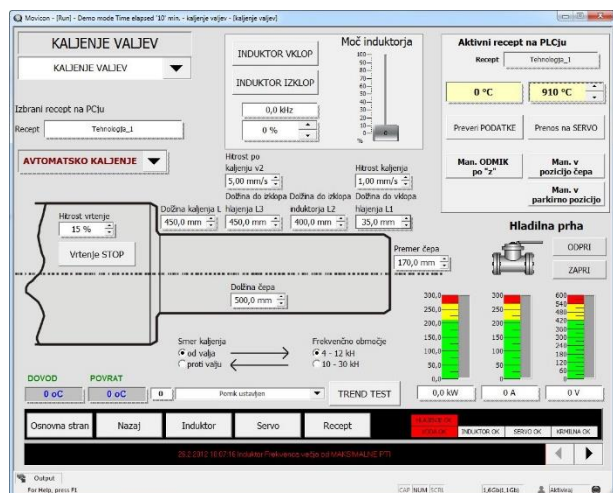


Slika 5: Mehanska slika indukcijskega stroja

### 4 Delovanje stroja

Indukcijsko kaljenje se izvaja v dveh korakih. V prvem koraku izvedemo predgretje. Ko upravljelec opravi ustrezno pozicioniranje podporne mize z valji in manipulatorja z induktorjem na obdelovanec ter nastavi vse potrebne parametre za kaljenje, vklopi dovod hladilne vode za hlajenje opreme z izbiro »hladilna prha« na sliki 6. Nato se nastavi ustrezno frekvenčno delovanje induktorja v polju nastavitve induktorja in v primeru, da so vsi statusni pogoji izpolnjeni, lahko izvede postopek segrevanja. Motor zažene vrtenje obdelovanca. Hitrost rotacije nastavi operater v polju »hitrost kaljenja« do največ 30 obr/min. Pri segrevanju se obdelovanec segreje na temperaturo do  $750^\circ\text{C}$ . Ko dosežemo nastavljeno temperaturo lahko pričnemo s korakom kaljenja. Pri tem segrejem obdelovanec na temperaturo od  $900$  do  $1100^\circ\text{C}$ . Hitrost podajanja kaljenja nastavi operater z gumbom »hitrost kaljenja«, katera znaša 0,5 do 2,5 mm/s. Postopek kaljenja se nato izvede od startne pozicije induktorja na valju, katerega nastavimo ročno, do končne pozicije (dolžina kaljenja L) glede na vnesene parametre. Hlajenje valja oziroma vodna prha se vključi na poziciji vneseni v vnosno polje (dolžina do vklopa hlajenja L1). Induktor oziroma segrevanje se izključi na poziciji vneseni v vnosno polje (dolžina do izklopa induktorja L2). Hlajenje valja oziroma vodna prha se izključi na poziciji vneseni v vnosno polje (dolžina do izklopa hlajenja L3). Postopek kaljenja se zaključi na poziciji vneseni v vnosno polje (dolžina kaljenja L). Po končanem postopku kaljenja se z uporabo ročnega

upravljalca z induktorjem s triosnim pomičnim manipulatorjem odmaknemo po osi Z [8].

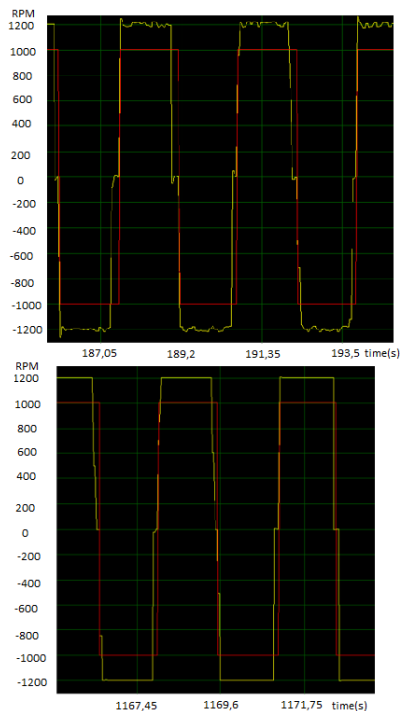


Slika 6: Grafični vmesnik kalilnega stroja

## 5 Zagon stroja

Naša naloga je bila zagotoviti pravilno delovanje in izvajanje funkcijskih zahtev indukcijskega kalilnega stroja. Zato smo pri prvem zagonu naredili tako imenovani »stres test« delovanja motorjev. V programskem okolju STEP 7 smo izdelali program, kjer se motor vrti s hitrostjo 1200 vrtljajev na minuto, smer vrtenja pa se menja vsakih 1,5 s. Programska oprema CTSOft omogoča funkcijo osciloskopa, kjer spremljamo odzive opazovanega motorja na želeno rampo našega signala (Slika 7). Lotili smo se optimizacije hitrostne in pozicijske zanke regulatorja. Signal temnejše barve predstavlja našo želeno pravokotno rampo oziroma signal, kjer je nastavljeno hitro spreminjanje smeri rotacije motorja. Signal svetlejši pa prikazuje dejanski odziv motorja na to rampo. Po tovarniških nastavitvah parametrov regulatorja se pojavi prenihaj, ki je bil prisoten ob menjavi smeri rotacije motorja. Temu je sledilo eksperimentalno določevanje parametrov regulatorja. Torej smo mogli določiti potrebno ojačanje (ang. gain). Ko smo dosegli zadovoljive odzive regulatorja servomotorja, smo lahko pričeli s testiranjem kaljenja obdelovanca.

Indukcijsko smo kalili pri temperaturi 900 °C. Glavne funkcije programa so zajemale izbiro režima delovanja, ki je lahko ročno ali avtomatsko. Pomiki osi manipulatorja so izvedljivi preko daljinskega upravljalca ali preko upravljalnega pulta. Pred vsakim prvim delovanjem moramo opraviti obvezno referenciranje. To storimo tako, da na zaslonu SCADA sistema izberemo funkcijo referenciranja. Stroj nato samodejno poišče referenčna stikala v oseh X, Y ter Z in tam nastavi ničelno točko oziroma referenco. Gibanje posameznih osi poteka zaporedoma.



Slika 7: Primerjava odzivnosti motorja pred in po optimizaciji regulatorja

## 6 Zaključek

V članku je predstavljen potek kompletne rekonstrukcije krmiljenja servo sistema na starejšem indukcijskem kalilnem stroju. Stroj je sestavljen iz indukcijsko segrevalne naprave in pretvornika. Pogon manipulatorja z induktorjem pa krmilimo s pomočjo servomotorjev. Celoten sistem lahko nadziramo preko uporabniškega vmesnika na upravljalnem pultu. Nadzor nad sistemom nam prikazuje vse vnesene parametre kaljenja, recepture kaljenja, vizualno predstavo ter ob primeru napake prikazuje kje se je le-ta pojavila.

Sam projekt je multidisciplinarn narave in vključuje znanja: metalurgije, strojništva, energetike, avtomatike in mehatronike. Ta projekt pa ni edini, podjetje Viptronik je izdelalo že vrsto indukcijskih kalilnih strojev, kar je plod več desetletnih izkušenj [7]. Članek tudi prikazuje kako so študenti FERi in FS Univerze v Mariboru vključeni v lokalno industrijsko okolje [7][8].

## Literatura

- [1] Janez Bratina, Indukcijsko segrevanje cilindričnih teles, 1986
- [2] Jože Voršič, Janez Bratina, *Elektrotermija*, Univerza v Mariboru, 2000
- [3] Micon, <https://www.progea.com/>
- [4] Unimotor, <http://www.emersonindustrial.com>
- [5] Unidrive, <http://www.emersonindustrial.com>
- [6] SIMATIC Software : Ladder logic for S7-300 [http://dce.felk.cvut.cz/rs/s7\\_ladder.pdf](http://dce.felk.cvut.cz/rs/s7_ladder.pdf)
- [7] Rok Spanžel, Indukcijski kalilni stroj, diplomsko delo, FERi, Univerza v Mariboru, 2007
- [8] Rok Šertel, Rekonstrukcija krmiljenja servomotorjev na induktivnem kalilnem stroju, diplomsko delo, FERi, Univerza v Mariboru, 2017