

Indukcijsko segrevanje cilindričnih teles

Janez Bratina*

UDK: 621.365.5
ASM/SLA: J2g, P11

Resúme: Podane so fizikalne osnove indukcijskega segrevanja cilindričnih teles iz feromagnetnih snovi. Izvedene so relacije, ki povezujejo geometrijske in snovne parametre indukcijskega sklopa induktor-ogrevalnik z elektrotehničnimi parametri, potrebnimi za dimenzioniranje elektroenergetskih naprav. Raziskava je bila osredotočena predvsem na nizkofrekvenčno segrevanje površine velikih cilindričnih teles (0,4 m do 0,9 m), eksperimentalna naprava pa je bila zgrajena za frekvenco 50 Hz. Na cilindrih premerov 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m so bile izvršene elektrotehnične in toplotnotehnične meritve, kakor tudi meritve doseženih trdot po globini cilindričnega telesa, ki je bilo po segrevanju na potrebno temperaturo zakaljeno.

Indukcijsko segrevanje kovin je v industrijski rabi dobrih 50 let; v tem času se je razvilo v področja za indukcijsko taljenje, indukcijsko pregrevanje in indukcijsko segrevanje kovinskih teles. V uporabi so frekvence od 50 Hz do nekaj MHz ter moči teh naprav do nekaj 10 MW. Kakor je indukcijski način segrevanja za gradnjo naprav tehnično zahtevna tehnologija, tako daje v obratovanju izredne efekte v produktivnosti, kvaliteti, v čistem delovnem okolju, glede varnosti dela, v enostavnem posluževanju itd. Segrevanje površine cilindričnih teles iz feromagnetnih materialov velikih premerov je redka aplikacija, veliki premeri ogrevalca (nad 0,4 m) zahtevajo glede na potrebno globino segrevanja cilindra nizke frekvence. V članku so obdelane teoretske zakonitosti indukcijskega segrevanja; prikazani so osnovni toplotnotehnični in elektrotehnični parametri za frekvence od 50 Hz do 1000 Hz; posebej pa so poudarjeni rezultati indukcijskega segrevanja z mrežno frekvenco na eksperimentalni napravi, kjer je bila na cilindru 0,6 m dosežena moč segrevanja 600 kW in temperatura 1000°C.

Indukcijsko segrevanje temelji na zakonitostih sproščanja Joulove toplote, ki nastane, ko teče električni tok preko upornosti. Po obodu cilindričnih teles povzroči tok inducirana napetost na podoben način, kot povzroči pri transformatorju inducirana napetost tok v kratkostičnem ovojju sekundarja. Kljub analogiji z enostavno fizikalno sliko transformatorja pa so razmere pri indukcijskem segrevanju bistveno bolj komplicirane. Če se omejimo na cilindrična telesa po sl. 1, lahko ugotovimo:

— da imamo v ovojju tuljave tok J_1 , ki povzroči inducirano magnetno poljsko jakost $H = J_1 / r$ (A/m);

— magnetna poljska jakost tvori v prikazanem sistemu troje samostojnih magnetnih pretokov:

stresano polje tuljave \emptyset_1 ,

stresano polje zračne reže \emptyset_2 ,

magnetno polje, ki seže v delovno telo \emptyset_3 .

Šele magnetno polje v delovnem telesu je odločilno za indukcijo napetosti in za tok J_2 (A), ki naj telo segreva.

Zaradi prikazanih geometrijskih dispozicij in snovi telesa, v katerih teče električni tok (tuljava je bakrena, cilindrično telo je železno), je obračun električnih in energijskih parametrov kompliciran, saj niso niti gostote nastopajočih tokov enakomerne po preseku, niti ni fazni zamik med magnetno poljsko jakostjo in indukcijskim tokom konstanten.

Zaradi kožnega efekta teče več kot 63 % toka v globini vdiranja, ki je definirana:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \mu_r \omega}} \text{ [m]},$$

pri čemer je:

- ρ (Ωm) — specifična upornost snovi
- μ_0 (VS/Am) — absolutna permeabilnost snovi ($4\pi \cdot 10^{-7}$)
- μ_r — relativna permeabilnost snovi
- ω (S^{-1}) — krožna frekvenca ($\omega = 2\pi f$).

Porazdelitev magnetnega polja znotraj cilindričnega telesa je prikazana z diferencialno enačbo v cilindričnih koordinatah:

$$\frac{d^2H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} - k^2H = 0,$$

kjer je:

$$k^2 = \frac{j\mu\omega}{\rho} = 2j\alpha^2$$

Rešitev diferencialne enačbe je dana v obliki:

$$H = A_1 I_0(kr) + A_2 K_0(kr),$$

kjer so I_0 in K_0 Besselove funkcije kompleksne oblike. Končna enačba polja v cilindričnem telesu je:

$$H_r = H_0 \frac{\text{ber}' \sqrt{2}\alpha r + j \text{bei}' \sqrt{2}\alpha r}{\text{ber}' \sqrt{2}\alpha R + j \text{bei}' \sqrt{2}\alpha R}$$

$$\text{Ker je } J = -\frac{dH}{dr},$$

dobimo za porazdelitev toka v cilindričnem telesu izraz:

$$J_r = J_0 \frac{\text{ber}' \sqrt{2}\alpha r + j \text{bei}' \sqrt{2}\alpha r}{\text{ber}' \sqrt{2}\alpha R + j \text{bei}' \sqrt{2}\alpha R}$$

Besselove funkcije ber in bei se najlažje dobijo s pomočjo izračunavanja vrednosti vrst, saj so vrste močno konvergentne. Za prej uporabljene izraze so:

* Janez Bratina, dipl. inž. el. teh., Železarna Ravne

$$\text{ber}(x) = 1 - \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^4}{4} + \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^8}{576} - \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{12}}{518400} + \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{16}}{1,626 \cdot 10^9}$$

$$\text{bei}(x) = \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^2}{1} - \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^6}{36} + \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{10}}{14400} - \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{14}}{25,402 \cdot 10^6}$$

Z večanjem premera R prehajajo Besselove funkcije v trigonometrične oziroma hiperbolične funkcije. Tako dobimo za primer ravninskega telesa razdelitev magnetnega polja:

$$H_y = H_0 e^{-\frac{y}{\delta}} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{y}{\delta}\right)$$

in toka

$$J_y = J_0 e^{-\frac{y}{\delta}} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{y}{\delta}\right)$$

Ker je Joulova toplota sorazmerna kvadratu toka in upornosti, dobimo porazdelitev sproščene moči v notranjosti ploskve kot:

$$P_y = P_0 \left(1 - e^{-2\frac{y}{\delta}}\right),$$

kar pomeni, da dobimo v globini vdiranja δ sprostitvev 86,5% v telo dovedene moči.

Za cilindrično telo velja, da je v njem sproščena toplotna moč:

$$P = \mu \pi f H_{\text{om}}^2 (l_d S_d) p \text{ [W]},$$

pri čemer je:

H_0 (A/m) — temenska vrednost magnetne poljske jakosti na površini ogrevanca,

p — korekcijski faktor delovne komponente,

q — korekcijski faktor jalove komponente.

Oba navedena faktorja določata posebne razmere, v katerih se nahaja magnetno polje znotraj cilindra. V idealnih razmerah velikih teles sta oba faktorja enaka, kar pomeni fazni kot med napetostjo in tokom 45° oziroma $\cos \phi = 0,707$ v telesu, ki ga ogrevamo. V realnih razmerah cilindra pa je q vedno večji od p , zato imamo v cilindru fazni faktor vedno manjši od 0,707. Če upoštevamo še stresana magnetna polja, lahko zaključimo, da poteka induksijsko segrevanje valjastih teles pri zelo slabih faznih pogojih. Ta izvajanja nam tudi povedo, da je poleg frekvence magnetna poljska jakost na površini telesa glavni parameter za določitev moči segrevanja. Če v približku velja, da je tudi za cilindrična telesa:

$$H = \frac{JN}{l},$$

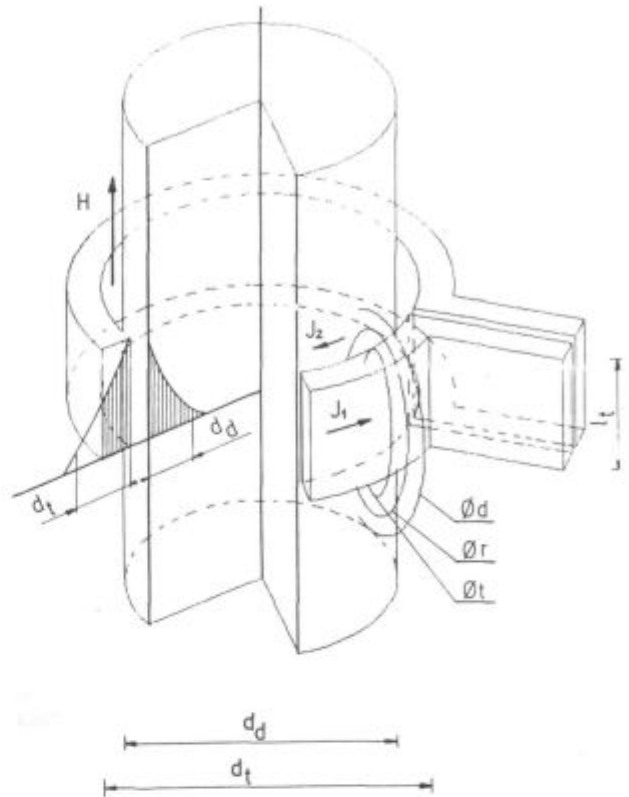
imamo v rokah že vse veličine za določitev moči segrevanja. Faktorja p in q sta definirana s pomočjo Besselovih funkcij, kot sledi:

$$p = \frac{2}{x} \cdot \frac{\text{ber}(x) \text{ber}'(x) + \text{bei}(x) \text{bei}'(x)}{\text{ber}^2(x) + \text{bei}^2(x)}$$

$$q = \frac{2}{x} \cdot \frac{\text{ber}(x) \text{bei}'(x) - \text{bei}(x) \text{ber}'(x)}{\text{ber}^2(x) + \text{bei}^2(x)}$$

pri čemer je:

$$x = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{d}{\delta}$$



Slika 1:

Sklop za induksijsko segrevanje

Fig. 1:

Assembly for induction heating

Običajna pot elektrotehničnega izračuna ogrevanja vodi preko določitve nadomestnih upornosti magnetnih in tokovnih poti po sl. 1. Vse upornosti so določene za en ovoj tuljave: upornosti sicer rastejo s kvadratom števila ovojev tuljave.

Omska upornost ogrevanca:

$$R_d = \mu_0 \mu_r \pi^2 f \frac{d_d^2}{2l_d} p \text{ [\Omega]}$$

Omska upornost tuljave:

$$R_t = \mu_0 \pi^2 f \frac{d_t}{l_t} \delta_1 k_1 \text{ [\Omega]}$$

Induktivna upornost ogrevanca:

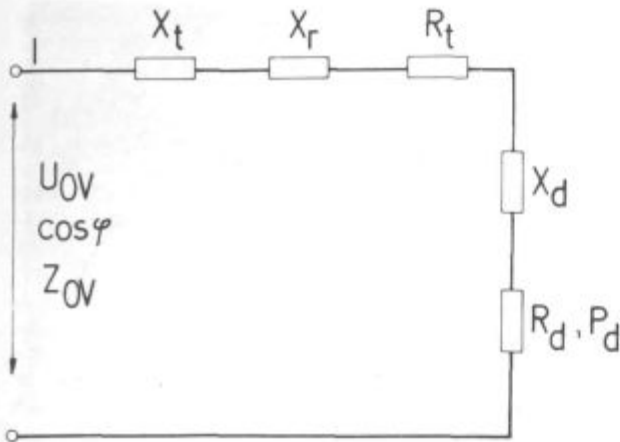
$$X_d = \mu_0 \mu_r \pi^2 f \frac{d_d^2}{2l_d} q \text{ [\Omega]}$$

Induktivna upornost zračne reže:

$$X_r = \mu_0 \pi^2 f \frac{d_t^2 - d_d^2}{2l_d} \text{ [\Omega]}$$

Induktivna upornost tuljave:

$$X_t = \mu_0 \pi^2 f \frac{d_t}{l_t} \delta_1 k_2 \text{ [\Omega]}$$



Slika 2:

Nadomestna shema upornosti indukcijskega ogrevanja

Fig. 2:

Substituting scheme of the induction heating

Pri čemer so:

- μ_0 (VS/Am) — absolutna magnetna permeabilnost,
- μ_r — relativna magnetna permeabilnost,
- f (s^{-1}) — frekvenca,
- d_d (m) — premer ogrevanca,
- d_t (m) — premer tuljave,
- l_t (m) — dolžina tuljave,
- p, q — parametri magnetnega polja,
- k_1 — korekcijski faktor tuljave,
- k_2 — korekcijski faktor tuljave,
- δ_t (m) — globina vdiranja toka v tuljavi.

Shema nadomestnih upornosti je prikazana na sl. 2.

Ugotovimo lahko, da je:

izkoristek ogrevanja:

$$\eta = \frac{R_d}{R_d + I} + \frac{\mu_r p}{\mu_r p + 2 \frac{d_t}{d_d} \cdot \frac{\delta_t}{\delta_d} k_1}$$

fazni faktor ogrevanja:

$$\cos \varphi = \frac{R_d + R_t}{Z}$$

impedanca ogrevalnega sklopa:

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

$$Z = \frac{\mu_0 \pi^2 f d_d^2}{2l_d} \cdot g$$

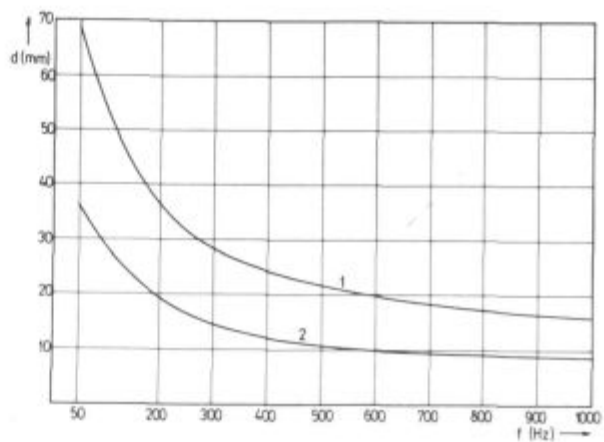
$$g = \sqrt{\left(\mu_r p + 2 \frac{d_t}{d_d} \cdot \frac{\delta_t}{\delta_d} k_1\right)^2 + \left(\mu_r q - 1 + \frac{d_t^2}{d_d^2} + \frac{d_t}{d_d} \cdot \frac{\delta_t}{\delta_d} k_2\right)^2}$$

Na podlagi zahtevane moči v ogrevancu P_p je potrebna navidezna moč:

$$P_m = \frac{P_p}{\eta \cdot \cos \varphi} \text{ [VA]}$$

Potrebna napetost ovoja:

$$U_{ov} = \sqrt{P_m Z} \text{ [V/ov]}$$



Slika 3:

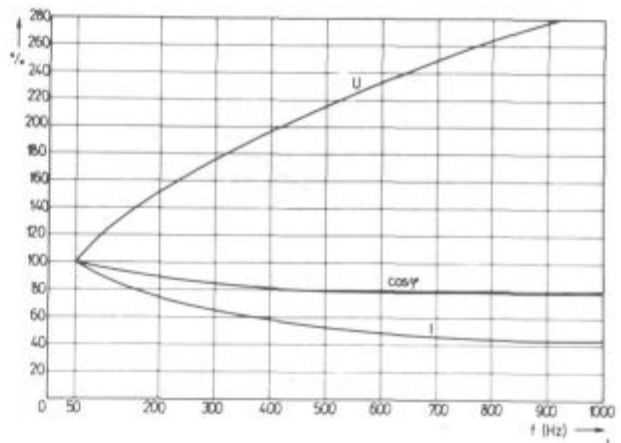
Vpliv frekvence na globino vdiranja toka

1: $\rho = 100 \cdot 10^{-8} \Omega m$ $\mu_r = 1$

2: $\rho = 50 \cdot 10^{-8} \Omega m$ $\mu_r = 2$

Fig. 3:

Penetration depth



Slika 4:

Vpliv frekvence indukcijskega ogrevanja na $U, I, \cos \varphi$ pri $P_p = \text{konst.}$ $d_d = 0,5 \text{ m.}$

Fig. 4:

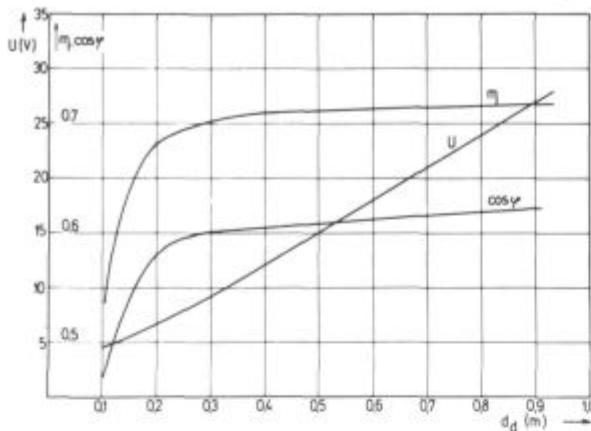
Influence of the frequency of induction heating on $U, I, \cos \varphi$ at $P_p = \text{const.}$ $d_d = 0,5 \text{ m}$

Pripadajoči amperski ovoji:

$$J = \sqrt{\frac{P_p}{Z}} \text{ [A} \cdot \text{ov]}$$

Na podlagi zgornjih izvajanj so bili opravljeni računalniški programi izračunov elektrotehničnih parametrov, ki naj bi omogočili kvantifikacijo različnih vplivnih faktorjev in iskanje optimalnih rešitev. Najbolj je seveda izražen vpliv uporabljene frekvence indukcijskega segrevanja: na sl. 3 je prikazan njen vpliv na globino prodiranja toka v cilindrično telo.

Na sl. 4 je prikazan vpliv frekvence ogrevanja na elektrotehnične parametre pri konstantnih dimenzijah ogrevanca in induktorja. Vidimo, da pri konstantni specifični moči napetost na induktorju raste s frekvenco, fazni faktor pa se pri tem slabša.

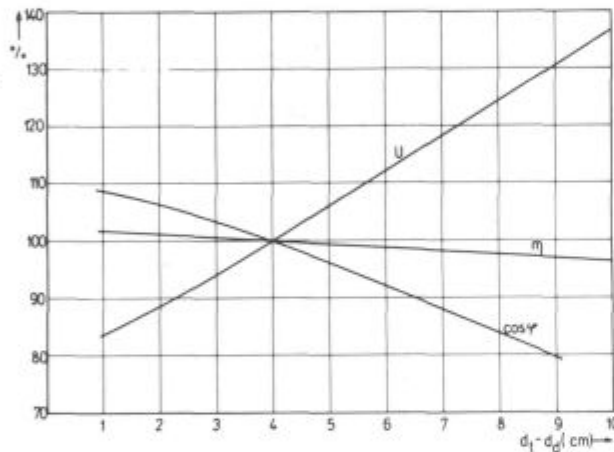


Slika 5:

Vpliv premera ogrevanca na U , η in $\cos \phi$ pri $P_p = \text{konst.}$, $\mu_r = 2$, $\rho = 50 \cdot 10^{-8} \Omega m$

Fig. 5:

Influence of the diameter of the heated body on U , η , $\cos \phi$ at the frequency 50 Hz and at $P_d = \text{const.}$, $\rho = 50 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\mu_r = 2$



Slika 6:

Vpliv zračne reže na U , η , $\cos \phi$ pri 50 Hz in $P_p = \text{konst.}$, $d_d = 0,5 m$, $\rho = 50 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\mu_r = 2$

Fig. 6:

Influence of air gap on U , η , $\cos \phi$ at $f = 50 \text{ Hz}$ and $P_d = \text{const.}$, $d = 0,5 m$, $\rho = 50 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\mu_r = 2$

Na sl. 5 je prikazan vpliv takega ogrevanja na elektrotehnične parametre za različne premere cilindričnega telesa pri konstantni dolžini induktorja in frekvenci 50 Hz. Vidimo, da potrebna napetost na induktorju raste skoraj premosorazmerno s premerom ogrevanca. Potek funkcij za izkoristek ogrevanja in za fazni faktor ogrevalnega sklopa kažeta, da postaja segrevanje cilindričnih teles s frekvenco 50 Hz pri premeru 0,25 m kritično, kar se tudi ujema s pravilom, da mora biti premer ogrevanca vsaj trikrat tolikšen, kot je globina vdiranja, če želimo doseči zadovoljive toplotne efekte.

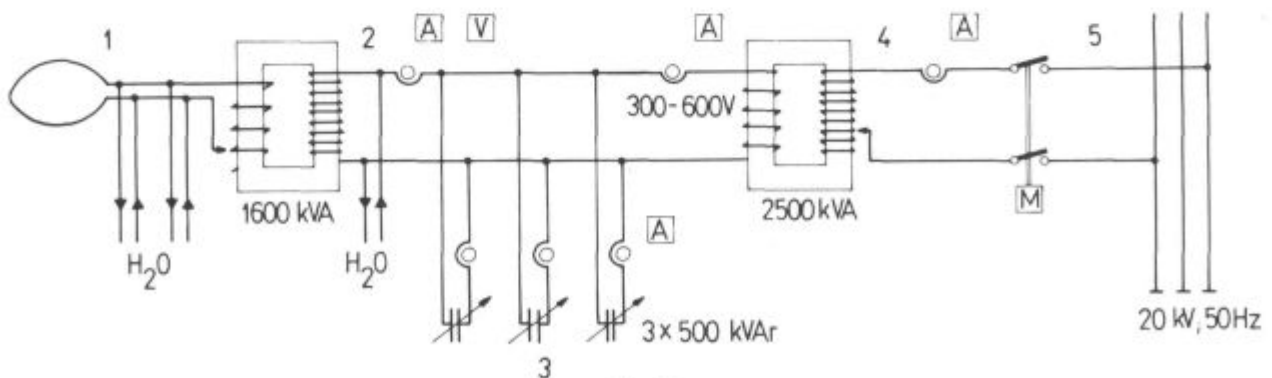
Kako odločilni vpliv na določitev elektrotehniških parametrov ima geometrijsko oblikovanje sklopa tuljavnega ogrevanec, kaže sl. 6, kjer so prikazani ti parametri v odvisnosti od velikosti zračne reže: napetost na tuljavi je sorazmerna z velikostjo reže, fazni faktor pa je po pričakovanju obratno sorazmeren z njeno vrednostjo.

Ob tako širše zastavljenem pristopu raziskave naprave za indukcijsko segrevanje cilindričnih teles in glede na možnosti izdelave naprave, se je iskanje rešitev omejilo le na ogrevanje s frekvenco 50 Hz, zaradi potreb pa predvsem za premere teles nad 0,4 m.

Ker naj bi se cilindrična telesa predvidoma segrevala na temperaturo cca 1000°C, je bilo potrebno predpostaviti izhodiščne fizikalne parametre snovi za:

- temperatura izpod Curie-jeve točke: $\rho = 50 \times 10^{-8} \Omega m$ $\mu = 2$
- temperatura iznad Curie-jeve točke: $\rho = 100 \times 10^{-8} \Omega m$ $\mu = 1$

Nizke vrednosti relativne magnetne permeabilnosti so bile izbrane zaradi predvidene velike magnetne poljske jakosti (nad 300 kA/m), kar pomeni, da se bo sicer feromagnetni material ogrevanca nahajal v področju magnetnega nasičenja. Predvidena magnetna poljska jakost že narekuje površinsko obremenitev dela ogrevanca, ki se nahaja pod tuljavo. Ta je v našem primeru mnogo nižja, kot je to običaj pri takem načinu ogrevanja, ker je bilo treba upoštevati dokaj veliko globino segrevanja in možnost nastajanja prevelikih napetosti ob prehitrem segrevanju. Kot delovna teza je bila izbrana specifična moč segrevanja 1,5 MW/m². Ob predpostavljenih fizikalnih lastnostih snovi bi bila globina vdiranja toka v hladnem 35,6 mm, v vročem stanju pa 71,1 mm. Izračunani toplotni izkoristek ogrevanja bi se pri tem gibal med 0,68—0,72, fazni faktor pa med 0,55—0,62. Če predvidimo še delovno dolžino tuljave 100 mm, bi bila potrebna navidezna moč glede na premer ogrevanja:

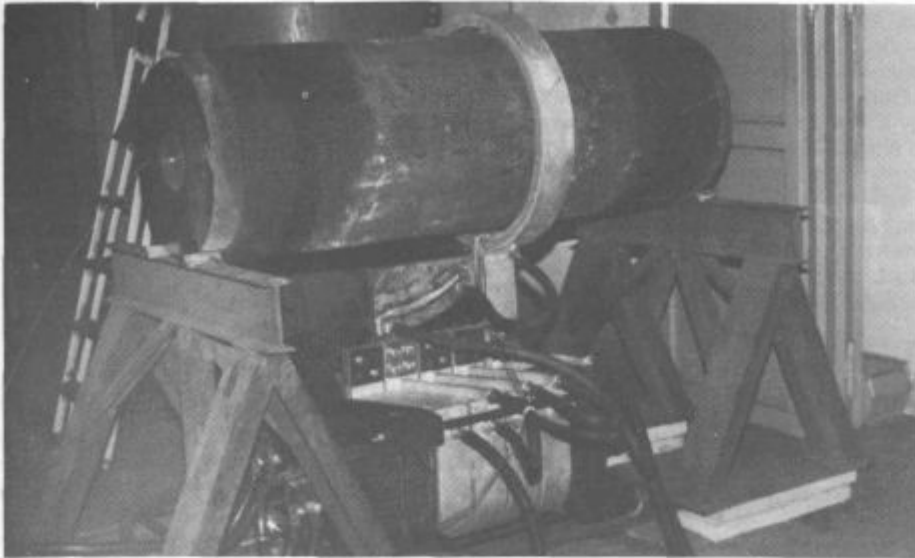


Slika 7:

Elektroenergetske naprave indukcijskega segrevanja

Fig. 7:

Electroenergetic equipment for induction heating



Slika 8:
Eksperimentalni sklop
Fig. 8:
Experimental assembly

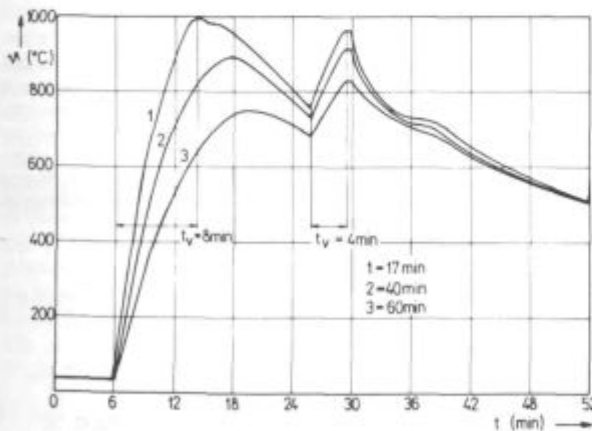
$$P_m = \frac{P_p}{\eta \cos \varphi} = \frac{1,5 \cdot \pi \cdot d_s \cdot 0,1}{0,7 \cdot 0,6} = 1,12 d_s \text{ [MVA]}$$

Za cilindrična telesa, premera 0,4 m do 0,9 m, bi potrebovali navidezno moč med 500 kVA in 1000 kVA.

Označbe na **sliki 7** pomenijo:

- 1: indukcijska tuljava
- 2: koncentrador moči 1600 kVA
- 3: kompenzacijska naprava 3 × 500 kVAR
- 4: energetski transformator 20/0,3—0,6 kV
- 5: visokonapetostno manipulacijsko stikalo.

Vse naprave so seveda enofazne, posebnost je vsekako koncentrador, katerega primarno in sekundarno navitje sta vodno hlajena, prav tako vodno hlajen pa je tudi induktor ter dovodno kabli na induktor. Eksperimentalni sklop je prikazan na **sl. 8**. Služil je za preverjanje izračunanih elektrotehniških parametrov ter ugotavljanja hitrosti in globine segrevanja.

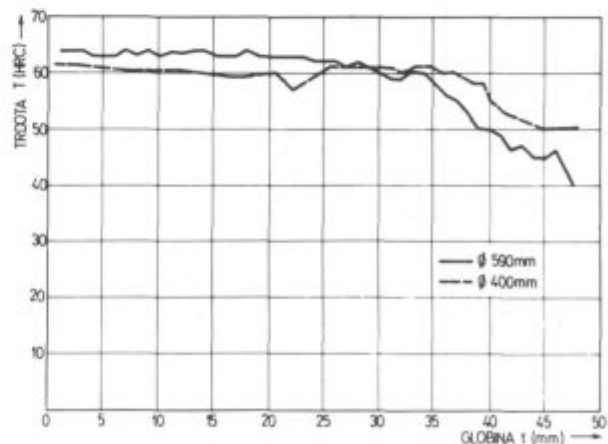


Slika 9:
Temperaturni profil pri indukcijskem segrevanju s 50 Hz (t_v — čas segrevanja)

Fig. 9:
Temperature profile in induction heating with 50 Hz (t_v — heating time)

V cilinder so bile s čelne strani izvrtane luknje, in sicer v različni oddaljenosti od površine; vanje so bili nameščeni termoelementi. Potek temperaturnih karakteristik kaže **sl. 9**. Ob obravnavanju temperaturnih razmer znotraj ogrevanca je potrebno predvsem ugotoviti, da znane analitične metode računanja temperaturnega polja pri indukcijskem segrevanju feromagnetnih snovi zahtevajo take poenostavitve, da je vprašljiva njihova zanesljivost. Bistveno vlogo pri določanju temperature porazdelitve znotraj ogrevanca imata od temperature odvisna električna upornost ter skokovita sprememba magnetnih lastnosti materiala ob prestopu Curie-jeve temperaturne točke, kakor tudi ostale spremenljive snovne karakteristike, kot sta toplotna prevodnost in sevalne lastnosti. **Sl. 9** zato le ilustrira možnosti, kako s predlagano napravo za indukcijsko segrevanjem doseči potrebne temperaturne razmere znotraj ogrevanca.

Ker se tako velikih teles ne da brez škodljivih posledic segrevati s skaniranjem, t. j. z enkratnim prehodom predmeta skozi induktor, ampak je potrebno predhodno



Slika 10:
Trdotni profil po globini kaljenega cilindra

Fig. 10:
Hardness profile across the cross section of the quenched cylinder

izvršiti indukcijsko predgrevanje, so bile nadaljne raziskave ogrevanja opravljene na indukcijskem stroju, ki poleg rotacije omogoča translacijo cilindričnih teles, kakor tudi kaljenje z vodno prho. Opravljena so bila ogrevanja cilindričnih teles, premerov 0,4 m do 0,6 m z različnimi predgrevanji, z variranjem hitrosti premikanja telesa skozi induktor in s spreminjanjem ogrevalne površinske moči. Iskali smo optimalne toplototehniške razmere, tako za segrevanje kot za ohlajanje z namenom da se po kaljenju ohrani potrebna martenzitna struktura jekla v zahtevani globini in porazdelitvi po preseku ogrevanca. Karakterističen rezultat tako zaključene raziskave kaže sl. 10.

Opravljene raziskave na področju indukcijskega segrevanja nizkih frekvenc kažejo, da je mogoče take naprave graditi z domačimi materiali in da so lahko uspešna za kontrolirano vodeno segrevanje cilindričnih teles na visoke temperature ob dobrih energetskih izkoristkih.

Literatura

1. Karel Schretzmann: Induktive Wärmezeugung und Wärmeleitung in kreiszylindrischen Stäben und Röhren, Elektrowar-me, 1966, 12
2. John Davies, Peter Simpson: Induction Heating Handbook, Mc Graw Hill, 1979

ZUSAMMENFASSUNG

Es werden physikalische Grundlagen für die induktive Erwärmung zylindrischer Körper aus ferromagnetischen Stoffen angegeben. Beziehungen, welche die geometrischen und Stoffparameter einer induktiven Zusammenfügung, Induktor-zu erwärmende Körper mit den elektrotechnischen Parametern verbinden, und die für die Dimensionierung elektrotechnischer Anlagen nötig sind werden ausgeführt. Die Untersuchung war vor

allem auf die Niedertfrequenzerwärmung der Oberfläche grosser zylindrischer Körper (0,4 m bis 0,9 m im Durchmesser), konzentriert. Die Versuchsanlage ist für die Frequenz von 50 Hz gebaut worden. An Zylindern, der Durchmesser 0,4 m, 0,5 m und 0,6 m sind elektrotechnische und wärmetechnische Messungen durchgeführt worden, so wie auch der Härteverlauf im Querschnitt des zylindrischen Körpers, nach der Induktionshärtung.

SUMMARY

Physical fundamentals of induction heating of ferromagnetic cylindrical bodies are presented. Relations between geometrical and physical parameters of induction pairs inductor/heat-ed body, and the electrotechnical parameters needed in dimensioning electroenergetic set-ups were deduced. The emphasis in the investigation was given mainly to the low-frequency heating of the surface of big cylindrical bodies (0.4 to 0.9 m). The

experimental set-up was constructed for the frequency 50 Hz. On the cylinders with diameters 0.4, 0.5, and 0.6 m were performed electrotechnical and thermal measurements, as well as the measurements of hardnesses across the cross section of the cylindrical body which was quenched after heating to the desired temperature.

СОДЕРЖАНИЕ

Рассмотрены физические основы индукционного нагрева цилиндрических тел из ферромагнитного вещества. Выполнены соотношения, которые связывают геометрические вещественные параметры индукционного узла индуктор — нагревательное тело с электротехническими параметрами, необходимые для определения размер электроэнергетических устройств.

Исследование было сосредоточено главным образом на

низкочастотный нагрев поверхностей больших цилиндрических тел (0,4 м до 0,9 м), экспериментальное же устройство было настроено на частоту 50 гц. На цилиндрах с диаметром 0,4 м, 0,5 м и 0,6 м были выполнены электротехнические и термотехнические измерения, а также измерения полученных твердостей в глубину цилиндрического тела, которое после нагрева было закалено при необходимой температуре.