

PREDGOVOR

Jedna od brojnih mogućnosti pretvaranja električne energije je i pretvaranje u toplotu. Ono predstavlja osnovu iz koje je nastala nauka – elektrotermija. Za početak razvoja elektrotermije može se uzeti 1843. godina kada je Džul pronašao ovaj način dobijanja toplote koji je kasnije dobio status zakona. Dalji razvoj je usledio kada je Fuko otkrio vrtložne struje (1860) i utvrdio nastajanje toplote bez direktne veze sa električnim izvorom – bezkontaktno. Ovo je postalo osnova za kasniji razvoj nove oblasti unutar elektrotermije – induktotermija. Daljnjem razumevanju ovih procesa doprineli su radovi Maksvela (1870). Na ovim temeljima 1879. Siemens konstruiše prvu elektrolučnu a 1899. Kelin prvu indukcionu peć. Daljnji razvoj ove oblasti ide u pravcu nalaženja novih oblasti primene, rad sa većim frekvencijama, dielektrično zagrevanje, primene mikrotalasa, elektronskog mlaza itd.

Predmet razmatranja ove knjige, biće induktotermija odnosno samo jedan njen mali deo vezan za male indukcione uređaje.

Uspešan razvoj indukcionog grejanja doveo je do njegove široke primene prvo u industriji (metalurgiji) da bi se zatim proširio i na druge oblasti i dosegao do medicine (protetika) pa čak i primene u domaćinstvu.

Indukcionim načinom razvijanja toplote (grejanjem) dobijene su brojne prednosti u odnosu na postojeće. U prvom redu to je velika gustina snage, razvijanje toplote direktno u materijalu koji se greje, jednostavnija kontrola i upravljanje procesom grejanja, nepostojanje plamena, čađi itd. Velika prednost indukcionog grejanja je i ta što toplota može da se razvija i u metalu u vakuumu ili nekoj zaštitnoj atmosferi. Vrtložne struje izazivaju kretanje rastopljenog metala što je veoma pogodno pri izradi legura jer dolazi do vrlo efikasnog mešanja legirajućih elemenata. Zahvaljujući tome, indukciono grejanje našlo je svoju primenljivost u topljenju metala, izradi legura, termičkoj obradi (omekšavanje radi kovanja, presovanja, probijanja itd.), površinsko kaljenje, tvrdo i meko lemljenje, itd.

Najveći uređaji dostižu snage više megavata (velike livnice, i kovačnice). Češći su uređaji snaga reda stotinu i više kilovata. Serijska proizvodnja sitnih komada, radionice, laboratorije itd. koriste uređaje snage od nekoliko kilovata do nekoliko desetina kilovata.

Dalje slede laboratorijski uređaji za opštu upotrebu ili namenski snaga reda 10 kW, male indukcione peći za zlatarstvo snaga reda 1- 2 kW itd. kao i uređaji za domaćinstvo.

Predmet razmatranja ove knjige biće upravo mali indukcioni uređaji (snaga do oko 10 kW). Iako male snage, ova grupa uređaja je našla široku primenu u brojnim oblastima.

Zahvaljujući novim konstrukcijama masovnoj proizvodnji i padu cena u poslednje vreme indukciono grejanje se koristi i u domaćinstvu (indukcione ploče) i predstavlja ekonomičniji način od klasičnog (elektrotopnog) grejanja.

Cene prvih malih indukcionih uređaja bile su visoke (reda 1000 \$/kW) pa su prve primene bile u oblastima koje mogu da podnesu visoku cenu uređaja (rad sa

plemenitim metalima, izrada specijalnih legura itd). Razvoj savremenijih elektronskih komponenata (bipolarnih tranzistora, MOSFET IGBT itd) omogućili su jednostavniju izradu ovih uređaja. Masovnijom proizvodnjom primena se širila i cene smanjivale. Posebno snažan zamah u primeni indukcionih uređaja postignut je njihovim ulaskom u domaćinstvo što je drastično smanjilo cene.

Ovaj autor ima skromno sopstveno iskustvo u konstrukciji i izradi pretvarača energetske elektronike i malih indukcionih uređaja. To svoje iskustvo pokušao je da unese u ovu knjigu i stavi na raspolaganje i drugima kojima je to potrebno.

U prvom delu knjige daje se princip, analiza rada i izvode približni izrazi potrebni za osnovne proračune. Autor se potrudio da u knjizi pruži što više korisnih podataka o materijalima. Proračuni razvijanja toplote su približni ali i kao takvi predstavljaju dobru početnu osnovu u konstrukciji indukcionih uređaja. Konačne vrednosti nekih konstrukcionih parametara ipak se moraju utvrditi ispitivanjima na gotovim uređajima. Čitava analiza izvedena je sa elementarnom matematikom tako da bi trebala biti razumljiva čitaocu sa dobrim srednjoškolskim poznavanjem elektrotehnike. Radi boljeg razumevanja dobijenih matematičkih izraza navodi se veliki broj primera njihove primene. Neki od njih su takvi da predstavljaju konkretna rešenja za pojedine indukcione uređaje. U praksi se češće sreće paralelno rezonantno kolo. U ovoj knjizi prednost je data rednom rezonantnom kolu. Razmatranja u ovom delu su opšta i nezavisna od veličine uređaja.

U drugom delu knjiga se bavi tranzistorskim pretvaračima za napajanje indukcionih uređaja. Autor je o pretvaračima pisao posebne knjige. Ovde je prikazan samo onaj deo koji se primenjuje kod indukcionih uređaja. Posebnu vrednost predstavljaju konkretna rešenja indukcionih uređaja ovog autora. Iskustva ovog autora su u oblasti malih snaga do snaga – do oko 10 kW.

Ovom prilikom autor se zahvaljuje svima koji su doprineli da nastane ova knjiga. Posebnu zahvalnost autor upućuje:

- Svojoj firmi Elektromreži Srbije na pomoći u izdavanju ove knjige.
- DOO Fabrika Mernih Transformatora Zaječar
- Recenzentima na dobro obavljenom poslu i lepom mišljenju o knjizi.
- Kolegi Dr Burány Nándoru prof. VTŠSS Subotica, na pažljivom čitanju i korisnim primedbama i sugestijama.

Ovo je treća knjiga iz oblasti indukcionog grejanja na našem jeziku, posle knjiga:

- Elektrotermija – sistemi indukcionog grejanja, autora Veljka Brajovića
- Teorija i proračun elektromagnetnih sistema za indukciono grejanje autora Miloja Kostića

Svaka knjiga je dobrodošla ako nudi nešto novo. Autor smatra da i ova knjiga nudi nešto novo i da je vredna pažnje onih koje interesuje ova problematika. Krajnji sud daće čitaoci.

SADRŽAJ

1. INDUKCIONO GREJANJE METALA	11
1.1. PRINCIP RADA	11
1.2. VRSTE INDUKCIONIH UREĐAJA	12
1.3. PRIMENE INDUKCIONOG GREJANJA U INDUSTRIJI	13
1.3.1. <i>Topljenje</i>	15
1.3.2. <i>Livenje</i>	16
1.3.3. <i>Termičke obrade metala</i>	16
1.3.4. <i>Termičke obrade čelika</i>	17
1.3.5. <i>Zagrevanje radi lakše plastične deformacije</i>	19
1.3.6. <i>Ostale primene indukcionog grejanja</i>	20
1.4. DIREKTNO I INDIREKTNO INDUKCIONO GREJANJE	13
1.5. STRUKTURA UREĐAJA ZA INDUKCIONO GREJANJE	20
1.5.1. <i>Rezonantno kolo</i>	20
1.5.2. <i>Pretvarači za napajanje rezonantnog kola</i>	21
1.5.3. <i>Izlazni transformator</i>	23
1.6. AKTIVNA ELEKTRIČNA OTPORNOST ŠARŽE	25
1.6.1. <i>Skin efekat</i>	27
1.6.2. <i>Efekat blizine</i>	32
1.6.3. <i>Kirijeva temperatura</i>	33
1.7. FREKVENCIJA INDUKCIONIH UREĐAJA	33
1.7.1. <i>Minimalna frekvencija</i>	35
1.7.2. <i>Radne frekvencije u praksi</i>	36
1.8. NAPON INDUKTORA	37
1.9. HISTEREZISNI GUBICI	37
2. POTREBNA SNAGA GREJANJA	39
2.1. POTREBNA SNAGA ZA POVIŠENJE TEMPERATURE	39
2.1.1. <i>Toplota grejanja supstance</i>	39
2.2. TOPLOTNI GUBICI	42
2.2.1. <i>Gubitak snage zbog provođenja toplote</i>	42
2.2.2. <i>Gubitak snage zbog zračenje toplote</i>	43
2.3. UKUPNA SNAGA GREJANJA ŠARŽE	44
2.3.1. <i>Minimalna snaga grejanja šarže</i>	45
2.4. ZONA GREJANJA ŠARŽE	45
2.5. STEPEN ISKORIŠĆENJA	46
2.5.1. <i>Toplotni stepen iskorišćenja</i>	46
2.5.2. <i>Električni stepen iskorišćenja induktora</i>	47
2.5.3. <i>Stepen iskorišćenja pretvarača</i>	47
2.5.4. <i>Ukupni stepen iskorišćenja indukcionog uređaja</i>	47

2.6.	HLAĐENJE UREĐAJA INDUKCIONOG GREJANJA	48
2.6.1.	<i>Proces zagrevanja i hlađenja tela</i>	48
2.6.2.	<i>Hlađenje induktora</i>	49
3.	ANALIZA RADA INDUKTORSKOG KOLA	51
3.1.	INDUKTOR I ŠARŽA	51
3.2.	OBLICI INDUKTORA	52
3.3.	TRANSFORMATORSKI MODEL INDUKTORA	53
3.4.	AKTIVNE OTPORNOSTI INDUKTORA I ŠARŽE	56
3.4.1.	<i>Aktivna otpornost induktora</i>	56
3.4.2.	<i>Aktivna otpornost šarže</i>	57
3.5.	INDUKTIVNOSTI INDUKTORA I ŠARŽE	59
3.5.1.	<i>Sopstvena induktivnost – uopšteno</i>	59
3.5.2.	<i>Sopstvena induktivnost praznog induktora</i>	61
3.5.3.	<i>Unutrašnja induktivnost</i>	63
3.5.4.	<i>Sopstvena induktivnost šarže</i>	63
3.5.5.	<i>Međusobna induktivnost i odnos struja induktora i šarže</i>	64
3.5.6.	<i>Odnos struja šarže i induktora</i>	64
3.6.	SVEDENA AKTIVNA OTPORNOST ŠARŽE NA INDUKTOR	65
3.6.1.	<i>Neferomagnetna šarža</i>	65
3.6.2.	<i>Feromagnetna šarža</i>	65
3.7.	SVEDENE VREDNOSTI INDUKTIVNOSTI ŠARŽE NA INDUKTOR	67
3.7.1.	<i>Neferomagnetna šarža</i>	67
3.7.2.	<i>Feromagnetna šarža</i>	68
4.	SNAGA INDUKTORA	69
4.1.	PRIVIDNA SNAGA INDUKTORA	69
4.2.	AKTIVNE SNAGE INDUKTORA I ŠARŽE	70
4.2.1.	<i>Gustina snage grejanja šarže</i>	70
4.3.	REAKTIVNA SNAGA INDUKTORA	75
4.4.	KOMPENZACIJA REAKTIVNE SNAGE INDUKTORA	76
4.5.	SNAGA PRETVARAČA	78
4.6.	STEPEN ISKORIŠĆENJA	79
5.	PRILAGOĐENJE INDUKTORA I ŠARŽE INVERTORU	82
5.1.	PRILAGOĐENJE REDNOM REZONANTNOM KOLU	83
5.1.1.	<i>Prenosni odnos izlaznog transformatora</i>	84
5.2.	PRILAGOĐENJE PARALELNOM REZONANTNOM KOLU	88
5.3.	ZAGREVANJE ŠARŽE U REDNOM REZONANTNOM KOLU	89
5.3.1.	<i>Zagrevanje neferomagnetne šarže</i>	90
5.3.2.	<i>Zagrevanje feromagnetne šarže</i>	91
6.	ELEMENTI PRORAČUNA UREĐAJA INDUKCIONOG GREJANJA	93

6.1.	POTREBNA SNAGA UREĐAJA.....	94
6.2.	IZBOR REZONANTNIH KONDENZATORA	94
6.3.	IZBOR FREKVENCIJE UREĐAJA	96
6.4.	PRORAČUN INDUKTORA	97
6.4.1.	<i>Osnovne dimenzije induktora.....</i>	97
6.4.2.	<i>Broj navojaka induktora.....</i>	97
6.5.	PRORAČUN IZLAZNOG TRANSFORMATORA PRETVARAČA	101
6.5.1.	<i>Proračun broja navojaka</i>	102
6.5.2.	<i>Rasipna induktivnost transformatora.....</i>	103
7.	REDNO I PARALELNO NAPAJANJE REZONANTNOG KOLA	106
7.1.	REDNO NAPAJANJE REZONANTNOG KOLA.....	106
7.2.	PARALELNO NAPAJANJE REZONANTNOG KOLA.....	112
7.2.1.	<i>Ekvivalentna šema 1</i>	112
7.2.2.	<i>Paralelno rezonantno kolo sa rednom prigušnicom</i>	116
7.2.3.	<i>Paralelno rezonantno kolo sa rednom prigušnicom i kondenzatorom ..</i>	118
7.2.4.	<i>Ekvivalentna šema 2</i>	120
7.3.	REZIME	122
8.	ANALIZA RADA REDNOG REZONANTNOG KOLA	124
8.1.	POLAZNA RAZMATRANJA	124
8.2.	NAPON I STRUJA REZONANTNOG KOLA – PRIBLIŽNI IZRAZI.....	130
8.3.	SIMULACIJA RADA REZONANTNOG KOLA	132
8.4.	KOMENTAR REZULTATA SIMULACIJE	138
9.	PRETVARAČI ZA INDUKCIONO GREJANJE	139
9.1.	NAPAJANJE INDUKCIONIH UREĐAJA	139
9.2.	PRETVARAČI	140
9.3.	INVERTORI (DC/AC PRETVARAČI).....	141
9.4.	DUALNA KOLA	142
9.5.	NESTANDARDNE KONFIGURACIJE STRUJNIH REZONANTNIH PRETVARAČA.....	147
9.5.1.	<i>Mostni inverter sa ulaznim čoperom.....</i>	147
9.5.2.	<i>Mostni invertori bez ulaznog čopera.....</i>	148
9.5.3.	<i>Polumostni invertori.....</i>	150
9.5.4.	<i>Puš-pul inverter.....</i>	151
9.5.5.	<i>Ne simetrični mostni inverter.....</i>	152
9.5.6.	<i>Jednoimpulsni strujni pretvarači.....</i>	154
10.	KOMUTACIONI PROCESI TRANZISTORA I DIODA.....	157
10.1.	DIODA – ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE.....	157
10.1.1.	<i>Statičke karakteristike diode</i>	157
10.1.2.	<i>Dinamičko ponašanje diode</i>	158
10.2.	TRANZISTOR – ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE	159

10.2.1. Stacionarni rad tranzistora	159
10.2.2. Tranzistor u prekidačkom radu	160
10.3. KOMUTACIJA MOSFET I IGBT U PRETVARAČU	163
10.3.1. Uključenje tranzistora	163
10.3.2. Isključenje tranzistora	165
10.3.3. Minimalna pauza vođenja dva tranzistora iste grane polumosta	166
10.4. KOMUTACIJE KOD NAPONSKOG MOSTNOG INVERTORA	167
10.4.1. Nemodulisano upravljanje	167
10.4.2. Komutacija kod PWM.....	171
10.4.3. Komutacija u blizini prolaska struje kroz nulu	174
10.4.4. Uticaj kapacitivnosti tranzistora i snaberski kondenzatori	176
11. REGULACIJA SNAGE INDUKCIONOG GREJANJA.....	179
11.1. ON/OFF REGULACIJA	179
11.2. REGULACIJA PROMENOM FREKVENCije	179
11.3. REGULACIJA SNAGE MODULACIJOM IMPULSA	181
11.3.1. Impulsno amplitudna modulacija (PAM)	181
11.3.2. Impulsno širinska modulacija (PWM).....	182
11.3.3. Impulsno gustinska modulacija (PDM).....	186
12. NEKA REŠENJA INDUKCIONIH UREĐAJA OVOG AUTORA	191
12.1. INDUKCIONA PEĆ SA BIPOLARNIM TRANZISTORIMA SNAGE 10 kW.....	191
12.2. INDUKCIONI UREĐAJ SA IGBT SNAGE 8 kW	196
12.3. MONOFAZNI INDUKCIONI UREĐAJ SNAGE 2 kW SA PWM	201
12.4. MONOFAZNI INDUKCIONO UREĐAJ SNAGE 2 kW SA PDM.....	204
12.5. REŠENJA AUTORA SA PDM	205
13. MAZILIJEV PRETVARAČ (VLADIMIRO MAZILLI).....	209
14. KVAZI REZONANTNI PRETVARAČ	215
15. DODATAK	219
15.1. PODACI O MATERIJALIMA:.....	219
15.2. KARAKTERISTIKE NEKIH IGBT	222
15.3. GALERIJA FOTOGRAFIJA	234
LITERATURA	241
O AUTORU	243
IZVODI IZ RECENZIIJA	244

1. INDUKCIONO GREJANJE METALA

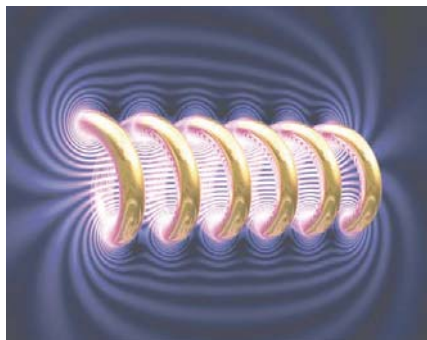
1.1. Princip rada

Princip rada indukcionog grejanja metala zasniva se na dobijanju toplote indukovanim (vrtložnim) strujama.

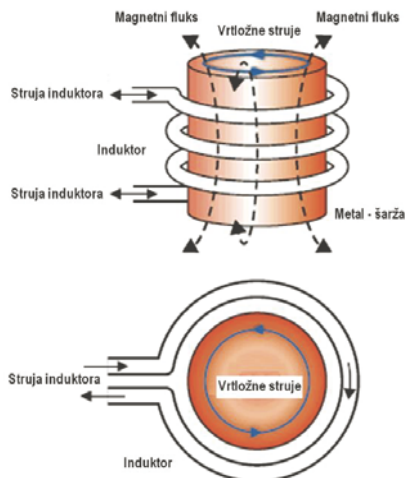
Induktor se napaja naizmeničnom strujom koja stvara promenljivo magnetno polje (sl. 1.1-1). Kada se u induktor unese metal (šarža) u njemu se indukuje struja (sl. 1.1-2). Smer indukovane struje je takav da teži da smanji polje koje ju je izazvalo. Indukovana struja u šarži se naziva i vrtložnom strujom.

Vrtložne struje postoje u magnetnim jezgrima svih uređaja koji rade sa naizmeničnom strujom. Kod jezgara transformatora i rotacionih električnih mašina pojava vrtložnih struja je nepoželjna jer ih zagreva i kod njih se teži da one budu što manje. Grejanje koje one izazivaju kod njih je gubitak energije.

Kod uređaja za indukciono grejanje cilj je obrnut, da pretvaranje električne energije u toplotu bude što jače.



Sl. 1.1-1. Magnetno polje



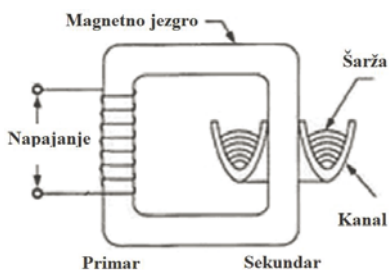
Sl. 1.1-2. Indukovanje struje u metalu

Kod indukcionog grejanja toplota se razvija u samoj šarži i ne postoji ovo ograničenje tako da se mogu postići daleko veće gustine snage (i do 100 kW/cm^2).

Kod grejanja plamenom (brenerom) gustine snage idu do oko 1 kW/cm^2 .

1.2. Vrste indukcionih uređaja

Prema načinu dobijanja indukovane struje postoji veliki broj konstrukcija ovih uređaja i njihovih veoma raznovrsnih primena. Indukcioni uređaji najvećih snaga su sa feromagnetnim jezgrom – takozvane kanalne peći i koriste se za topljenje i livenje metala. Njihov princip rada zasniva se na transformatoru sa jezgrom kod koga šarža predstavlja sekundarni namot u kratkom spoju (sl. 1.2-1).



Sl. 1.2-1. Kanalna indukciona peč – princip rada

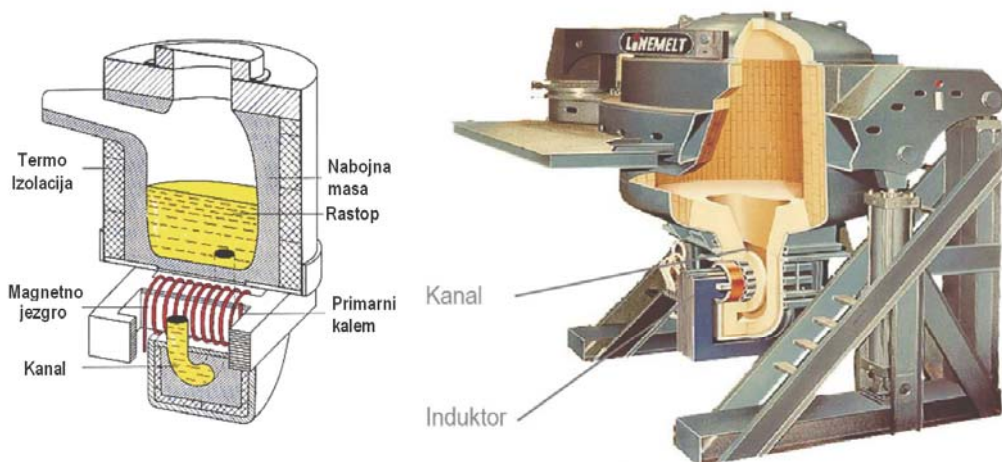
Kanalne peći (sl. 1.2-2) mogu biti sa horizontalnim otvorenim kanalom, sa (zatvorenim) potopljenim (horizontalnim ili vertikalnim) jednim ili više kanala. Kanal može da se završava u jednoj ili dve komore od kojih jedna služi za šaržiranje a druga za livenje. Napajaju se mrežnim naponom frekvencije 50 ili 60 Hz (dvofazno ili trofazno). Po pravilu to su velike topioničke jedinice (od kapaciteta reda jedne tone rastopljenog metala pa naviše). Snage ovih peći mogu biti i više MW. Najveća prednost ovih peći je što rade na mrežnoj

frekvenciji zbog čega imaju malu jediničnu cenu (po toni), i što se sa njima mogu postići najveće snage. Nedostatak je nepristupačnost kanalu (zatvoren kanal) komplikovano šaržiranje i u slučaju prekida kanala i zaleđivanja materijala mora da se razbija ozid da bi se formirao novi provodni kanal.

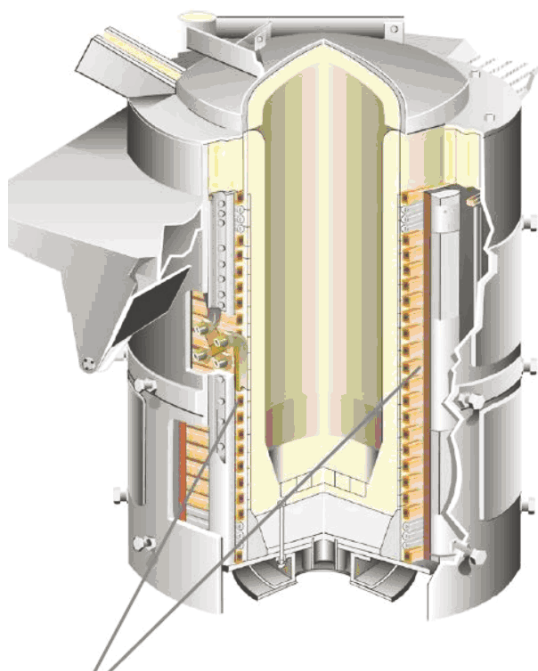
Daleko bolju pristupačnost imaju peći bez feromagnetnog jezgra – lončaste (sl. 1.2-3). One se koriste za topljenje manjih količina metala. Njihove snage mogu biti i više desetina kW pa i stotinu kW.

Indukcione lončaste peći za topljenje su vrlo interesantne kod proizvodnje legura. Elektromagnetne sile u rastopu izazivaju njegovo strujanje (motorni efekti) što vrlo efikasno meša legirajuće komponente.

Osim za topljenje i livenje, grejanje metala može da se vrši u svrhu kovanja, ili termičke obrade (na primer kaljenje, otpuštanje itd.). Za ove svrhe obično su potrebne



Sl. 1.2-2. Indukciona peč sa vertikalnim kanalom



Bakarna zavojnica

Sl. 1.2-2. Velika industrijska indukciona lončasta peć

radne frekvencije reda kHz do oko 10 kHz a snage reda više MW.

Razvoj savremenih MOSFET i IGBT omogućio je njihovu primenu i kod velikih snaga ali i frekvencija koje nisu mogle da se postignu ni najbržim tiristorima. Sa njima su dostignute snage i reda MW i frekvencije više stotina kHz.

Najmanji indukcionni uređaji u metalurgiji koriste se za preradu plemenitih metala (zlato, srebro, platina, itd) i njihove snage su reda par kW.

Slični uređaji koriste se i u medicini (zubarstvo – protetika).

Cene uređaja zavise od ugrađenog materijala, nivoa složenosti primenjene tehnologije ali i od masovnosti proizvodnje tih uređaja. Jedinične cene indukcionih uređaja za primene u metalurgiji su reda 500 – 1000 E/kW u zavisnosti od snage i namene, konstrukcije, opremljenosti, stepena automatizacije, itd. Uređaji većih snaga imaju manju jediničnu cenu i obrnuto.

U novije vreme indukciono grejanje je našlo svoju primenu i u domaćinstvu. To je dalo novi zamah ovoj oblasti i omasovljenju njene primene što je drastično oborilo cene ovih uređaja. Tako se danas cene indukcionih ploča (rešoa) snage reda 2 kW kreću oko 20 E.

1.3. Direktno i indirektno indukciono grejanje

U praksi se primenjuju dva načina – direktno i indirektno grejanje.

Kod direktnog grejanja toplota se razvija neposredno u materijalu (šarži).

Direktno grejanje pogodno je za metale i legure koji imaju veliku specifičnu električnu otpornost. Tipičan primer je grejanje čelika ispod Kirijeve temperature.

peći manjih snaga (reda stotinu kW i manje). Ovi uređaji rade na srednjim (desetine kHz) i visokim frekvencijama (stotine kHz pa i reda MHz).

Pod pećima se podrazumevaju uređaju koji imaju određenu komoru (posudu ili slično). Kod pojedinih primena materijal koji se greje stoji slobodno u vazduhu tako da se uopšteno može govoriti o uređajima za indukciono grejanje - indukcionni uređaji.

Prvi indukcionni uređaji su se napajali iz rotacionih agregata gde se napon srednje frekvencije dobijao iz sinhronog generatora sa velikim brojem polova.

Sledeća generacija napajala se pretvaračima na bazi vakuumskih cevi a zatim su došli tiristori. Za indukcionne uređaje primenjivali su se brzi tiristori i sa nima su postignute

Njime se postiže velika gustina snage i zato je posebno pogodno za površinsko kaljenje čelika uz kontrolisanu dubinu progrevanja.

Kada se vrši topljenje i livenje grejanje se vrši u loncima (ili lončićima). Kod direktnog grejanja lonac u kome se nalazi materijal mora biti od električno izolacionog materijala. To su obično keramički vatrostalni materijali – vatrostalne keramike (magnezijum-oksidi, Al_2O_3 do 2100°C , silicijum-karbid do 2700°C , volfram-karbid do 2900°C , itd.).

Veoma efikasno indukciono grejanje postiže se kod grafita jer je njegova specifična električna otpornost jako velika (oko 500 puta veća nego kod bakra). Bakar, aluminijum, zlato, srebro i slični imaju malu otpornost i potrebna je veoma velika struja za njihovo direktno grejanje. Zbog toga je pogodnije ove metale grejati indirektno. Za indirektno grejanje ili topljenje materijala mogu da se koriste i lonci od grafita, gvožđa, čelika i drugih metala.

Materijal koji se greje ima najvišu temperaturu dok je temperatura lonca niža tako da mu je i vek trajanja veći.

Kod indirektnog grejanja toplota se razvija u posudi (loncu, lončiću) sa koga se toplota prenosi na šaržu direktnim dodirom (kondukcijom) i zračenjem.

Indirektno grejanje je znatno sporije i pogodno je za dubinsko progrevanje materijala (topljenje i livenje, otpuštanje, plastične obrade, veštačkog starenja, itd.).

Grejanje praškastih, zrnastih ili lomljenih sitnih komada elektro-provodnog materijala je specifično. Kontakti između zrna stvaraju dodatne električne otpornosti

Direktno grejanje	
Dobre strane	Loše strane
- Velika gustina snage grejanja, - efikasnije korišćenje toplotne snage (greje se samo šarža), - manja inercija u grejanju (grejanje šarže počinje odmah), - lonac (ako postoji) ima nižu temperaturu od šarže, - primena i za najviše temperature šarže, - duži vek trajanja lonca, - lonac je deo toplotne izolacije šarže prema induktoru, - lakša izolacija lonca od induktora, - mešanje rastopa (pogodno za legure), - pogodno za površinsko kaljenje, otpuštanje, kovanje, tvrdo i meko lemljenje, itd.	- Nije primenljivo za materijale koji ne provode struju, - mali stepen iskorišćenja kod visoko provodnih metala (srebro, bakar, aluminijum, ...), - habanje (ispiranje) zidova lonca zbog strujanja rastopa - karburacija.

Indirektno grejanje	
Dobre strane	Loše strane
- Mogu da se greju svi materijali, - veći stepen iskorišćenja kod grejanja visoko-provodnih metala (inoks ili grafitni lonci).	- Lonac ima višu temperaturu od šarže - teža izolacija lonca od induktora - kraći vek trajanja lonca - primena za niže temperature šarže - manje efikasno korišćenje toplote (greje veća masa – šarža i lonac) - veća inercija u grejanju (sporiji početak grejanja) - potrebna je bolja toplotna izolacija od lonca prema induktoru - prisustvo grafita može da utiče na čistoću rastopa metala (legiranje) - Nije primenljivo za površinsko kaljenje.

Tab. 1.3-1. Upoređenje direktnog i indirektnog grejanja

a pogotovu ako je na njima sloj oksida. Indukovana struja je mala i grejanje je slabo. U ovom slučaju grejanju pomažu i gubici zbog histerezisa. Grejanje se može poboljšati ako se ovakvi materijali prethodno ispresuju kako bi se ostvario što bolji kontakt između zrna. U protivnom kad god je to moguće, za njih treba koristiti indirektno grejanje.

Kod topljenja metala u grafitnom loncu može da dođe do legiranja metala sa grafitom i promene strukture ili do unošenja nečistoće. To je posebno izraženo kod visoko čistih metala, gvožđa, čelika itd. Za topljenje metala sa nižom temperaturom topljenja (aluminijum i slično) mogu sa se koriste lonci od nerđajućeg čelika (inoks).

Električna struja koja se javlja u rastopljenom metalu (direktno grejanje) izaziva njegovo strujanje (kružno kretanje – karburacija) što je dobro kod izrade legura jer se legirajuće komponente intenzivno mešaju. Sa druge strane kretanje metala uz zidove lonca izaziva njegovu eroziju (ispiranje zida lonca) koja mu skraćuje vek.

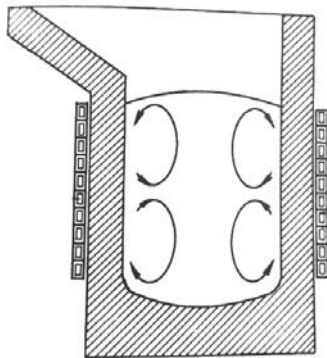
U tabeli (tab. 1.3-1) prikazane su dobre i loše strane direktnog i indirektnog grejanja. Svakako više prednosti ima direktno grejanje i zbog toga, direktno grejanje treba koristiti kad god je to moguće a indirektno samo kad ne može da se primeni direktno.

1.4. Primene indukcionog grejanja u industriji

Najznačajnije primene indukciono grejanje nalazi u metaloprerađivačkoj industriji i to prvenstveno u metalurgiji. Metal ili legura koja se greje naziva se šaržom. Grejanje šarže vrši se zbog njenog topljenja i livenja, lakše plastične deformacije ili termičke obrade. Ovde će biti pomenute samo neke od njih.

1.4.1. Topljenje

Topljenje metala postiže se zagrevanjem do temperature topljenja. Pri topljenju potrebno je da šarža bude u posudi (komori, loncu). Topljenje se vrši tokom proizvodnje metala i njegovog izdvajanja od drugih sadržaja, izrade legura, livenja itd. Grejanje može da bude direktno ili indirektno. Direktno se greju slabo provodni i metali sa visokom tačkom topljenja (platina). Visokoprovini metali (srebro, zlato, bakar, aluminijum itd.) se greju indirektno. Pri grejanju prvo se topi površinski sloj i sliva na dno lončeta, prečnik šarže se smanjuje a povećava nivo rastopa. Kod direktnog grejanja to se manifestuje kao promenljiva geometrija šarže.



Sl. 1.4-1. Strujanje rastopljenog metala loncu

Kod direktnog grejanja u rastopljenom metalu pojavljuje se motorni efekti kao posledica elektrodinamičkih sila. Elektrodinamičke sile kod kanalnih peći teže da smanje presek provodnika što može da dovede do lokalnog pregrevanja metala ili do prekida kanala. Kod lončastih peći dolazi do strujanja rastopa (karburacija sl. 1.4-1a). To se manifestuje tako što se površina rastopa u sredini izdiže i formira oblik kalote. Strujanje je intenzivnije na nižim frekvencijama. Ovo strujanje metala je dobro sa aspekta homognizacije temperaturnog polja u metalu kod legura dolazi do dobrog mešanja legirajućih elemenata ali ono dovodi do bržeg

habanja zida lonca (ispiranja).

Posude u kojima se vrši topljenje su najčešće cilindričnog oblika (lonci ili lončići) kojima odgovaraju cilindrični induktori. Provodni lonci se prave od vatrostalnih čelika, grafita itd. a neprovodni od visokotemperaturnih keramičkih materijala. Na sl. 1.4-2a prikazani su grafitni lončići za topljenje zlata i srebra veličine 1, 2 i 3 kg.

Grafit u vazduhu obgoreva pa se koriste keramičke obloge za duži vek trajanja (sl. 1.4-2b). Posle topljenja sledi livenje tako da su lončići oblikuju tako da imaju odgovarajuće kanale za izlivanje rastopljenog metala, kao i mesta za obuhvatanje i naganjanje.

Kod malih indukcionih uređaja, u zavisnosti od vrste šarže, topljenje traje nekoliko desetina minuta. Gustine snage mogu biti reda 20 do 50 W/cm².

1.4.2. Livenje

Livenje je postupak oblikovanja u kome se rastopljeni metal uliva u neku šupljinu (kalup), hladi i prelazi u čvrsto stanje. Dobijeni odlivak ima oblik šupljine (kalupa). Za livenje je potrebno podići temperaturu veću od temperature topljenja metala. Livenje (ulivanje) najčešće se vrši gravitaciono, pod pritiskom, centrifugalno, itd.

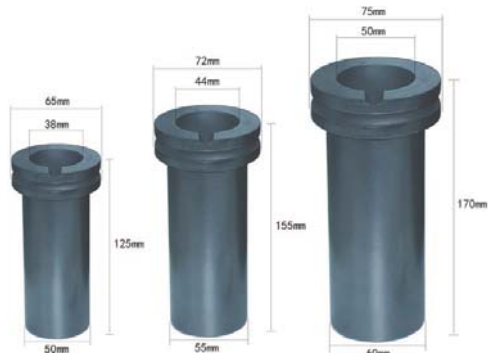
1.4.3. Termičke obrade metala

Pod termičkom obradom podrazumevaju se postupci u kojima je metal (ili legura) u čvrstom stanju a vrše se radi postizanja željenih mehaničkih osobina. To najčešće podrazumeva direktno grejanje i nepostojanje posude (lonca). Metal se greje do potrebne temperature posle čega se vrši kontrolisano hlađenje. Sredstva za hlađenje mogu biti vazduh, voda, ulje, itd.

Žarenje metala

Kod obojenih metala žarenje se primenjuje radi otpuštanja metala. Time se eliminišu zaostali naponi u metalu tokom prethodnih mehaničkih obrada (izvlačenje, kovanje, valjanje, itd). Kristalna rešetka je deformisana, metal postaje krt, ljsupa se i lako kida. Žarenjem mu se popravljja kristalna rešetka i vraća elastičnost.

I kod dobijanja legura potrebno je poštovati propisani proces, kako grejanja tako i hlađenja. Kod čelika postoji veliki broj termičkih obrada. One se sprovede radi otpuštanja (žarenje) ili poboljšanja.



a) Grafitni lončići od 1, 2 i 3 kg



b) Grafitni lončići sa keramičkom oblogom

Sl. 1.4-2. Grafitni lončići za topljenje i livenje metala (srebro i zlato)

1.4.4. Termičke obrade čelika

Žarenje čelika

Čelici se žare da bi im se smanjila tvrdoća, poboljša obradivost, mogućnost oblikovanja u hladnom stanju, da dobiju željenu mikrostrukturu, mehanička svojstva, da se pripreme za kaljenje, da im se smanje ili uklone unutrašnja naprezanja itd.

Kod žarenja je potrebno da čitava zapremina šarže dostigne potrebnu temperaturu. Da bi se progrijala cela masa šarže potrebne su male gustine snage i duže vreme grejanja. Na primer pri otpuštanju na temperaturama ispod 425°C grejanje je veoma sporo i gustine snage mogu da budu i ispod 10 W/cm^2 . Za više temperature ($425 \dots 760^{\circ}\text{C}$) gustine snage idu do oko 20 W/cm^2 . U tabeli 1.4-1 date su orijentacione vrednosti površinske gustine snage u zavisnosti od frekvencije i temperature žarenja čelika. Zbog veće dubine prodiranja pogodniji je rad sa nižom frekvencijom. Vreme žarenja je reda 1- 2 časa.

Gustine snage progrevanja čelika u zavisnosti od frekvencije i temperature zagrevanja'					
Odnosi se na komade prečnika od oko 12 do 50 mm					
	150 – 425 $^{\circ}\text{C}$	425 – 760 $^{\circ}\text{C}$	760 – 980 $^{\circ}\text{C}$	980 – 1095 $^{\circ}\text{C}$	1095 – 1205 $^{\circ}\text{C}$
Frekvencija (Hz)	Gustina snage W/cm^2	Gustina snage W/cm^2	Gustina snage W/cm^2	Gustina snage W/cm^2	Gustina snage W/cm^2
50	10	25	-	-	-
150	9	23	-	-	-
1000	6	19	8	155	220
3000	5	16	6	85	110
10 000	3	12	5	70	85

Tab. 1.4-1. Dubine progrevanja ugljeničnog čelika u zavisnosti od frekvencije

Kaljenje čelika

Kaljenjem se postiže otvrdnjavanje čelika. Pored temperature grejanja važnu ulogu ima i brzina hlađenja. Kaljenje se vrši tako što se posle zagrevanja sprovodi veoma brzo hlađenje.

Posebna vrsta kaljenja je površinsko kaljenje (ili cementacija). Ovde se termički obrađuje samo tanak površinski sloj radi poboljšanja njegove tvrdoće, otpornosti na habanje, pri čemu unutrašnjost zadržava svoja svojstva (mekoću, žilavost i slično). Temperature kaljenja prelaze Kirijevu temperaturu. U hladnom stanju dubina prodiranja struje je veoma mala da bi se iznad Kirijeve temperature povećala oko 10 puta. Pri velikim površinskim gustinama snage dubine progrevanja su približno jednake dubini prodiranja struje tako da zavise od frekvencije ali i od vremena zagrevanja. Opsezi dubina progrevanja u zavisnosti od frekvencije prikazani su na sl. 1.4-2.

Pravilnim izborom frekvencije, površinske gustine snage i brzinom grejanja podešava se dubina progrevanja površinskog sloja. Tako je za dubinu prodiranja struje reda 1 mm na 800°C potrebna frekvencija reda 200 kHz (sl. 1.6-6).

Orijentacione vrednosti frekvencije u zavisnosti od prečnika komada koji se površinski kalij prikazane su na sl. 1.4-3.

Brzine grejanja su reda sekunde. Za manje dubine progrevanja pogodnije su veće frekvencije i veće gustine snage.

Frekvencija kHz	Dubina prodiranja (mm)	Dubina progrevanja pri kaljenju (mm)													
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	
10	5														
20	3,6														
50	2,3														
100	1,5														
200	1,1														

Sl. 1.4-2. Dubine progrevanja ugljeničnog čelika u zavisnosti od frekvencije

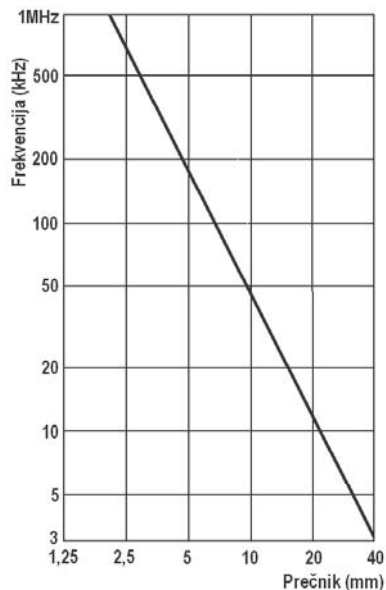
U lit. 17 preporučuju se kao optimalne vrednosti gustine snage površinskog kaljenja čelika vrednosti od oko 1,55 do 2,5 kW/cm².

Na sl. 1.4-4 prikazane su zavisnosti površinske gustine snage i vremena od dubine progrevanja i frekvencije za potrebe površinskog kaljenja ugljeničnog čelika.

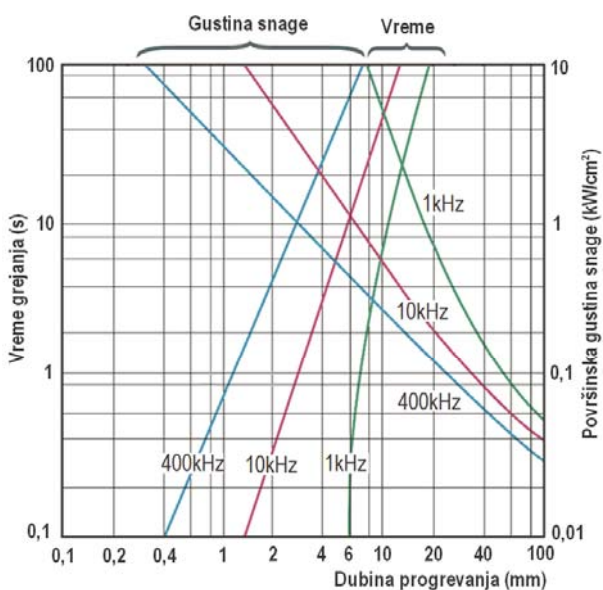
Oblici elementa koji se kali mogu biti veoma raznovrsni (osovine, rukavci, zupčanici, noževi, burgije, glodala itd). Neki elementi se mogu kaliti u celini a u nekim slučajevima kaljenje se vrši parcijalno (na primer zub po zub kod velikih zupčanika). Oblici induktora se prilagođavaju obliku komada koji se greje i mogu biti veoma raznovrsni.

Radi brzog hlađenja u kombinaciji sa induktorom mogu da stoje i mlaznice sa rashladnim sredstvom koje odmah po grejanju vrše hlađenje. Komad se spušta duž ose i rotira, greje se uska zona a ispod nje se ubrizgava sredstvo za hlađenje (linijsko kaljenje). Ovakvo kaljenje pogodno je kod dužih komada (vratila, osovine, itd.).

Kratki komadi se posle dostizanja temperature brzo uranjaju u posudu sa rashladnim sredstvom koje se nalazi u posudi ispod induktora.



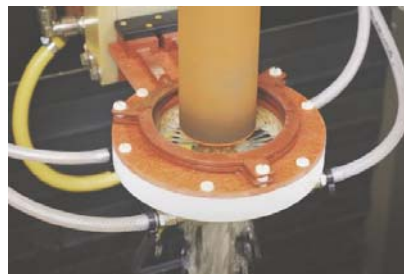
Sl. 1.4-3 Tipične frekvencije kaljenja čelika u zavisnosti od prečnika šarže



Sl. 1.4-4. Zavisnosti gustine snage i vremena od dubine progrevanja i frekvencije za ugljenični čelik

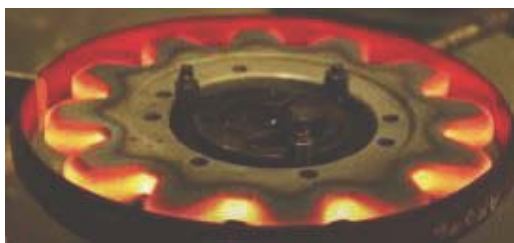


Topljenje metala u grafitnim lončićima

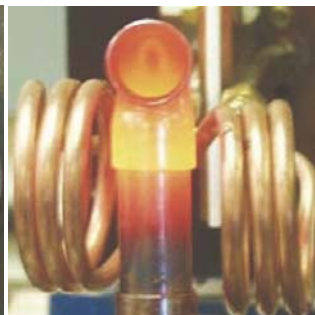


Opuštanje metala

Linijsko površinsko kaljenje osovine



Kaljenje čeličnih zupčanika



Tvrdo lemljenje metala

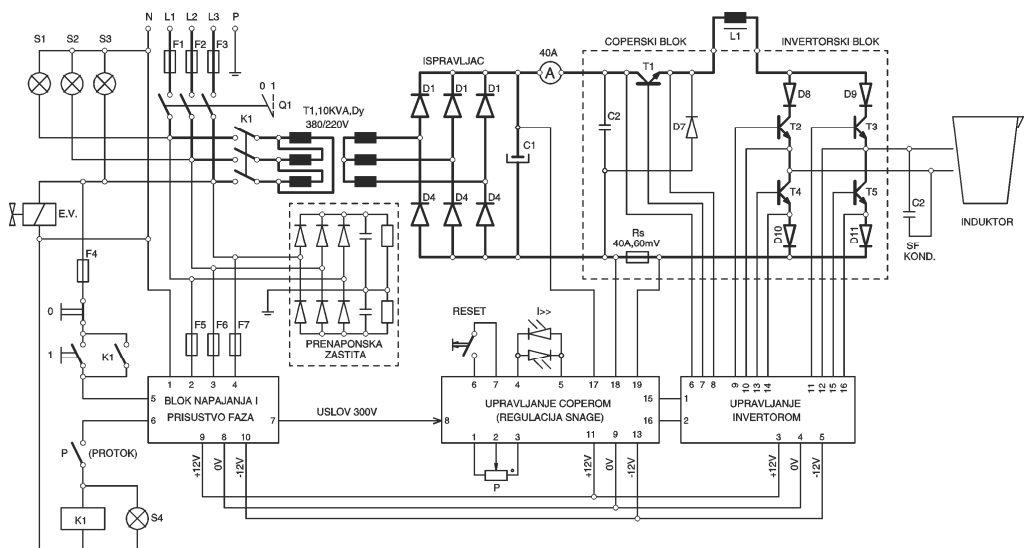
Sl. 1.4-1. Neke primene indukcionog grejanja u metalurgiji

Na sl. 12.1-7 prikazano je kolo za napajanje elektronike i detekciju prisutnosti faza kao uslov za rad uređaja. Elektronska kola se napajaju naponima $\pm 12\text{ V}$.

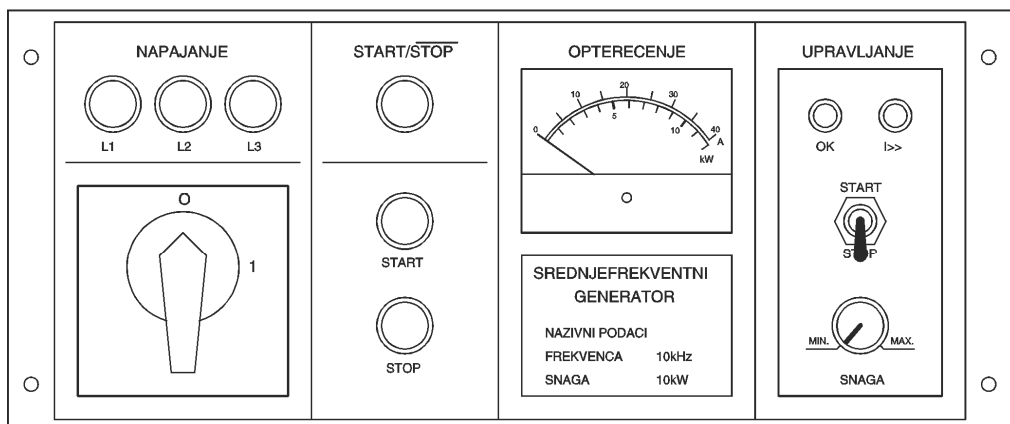
Glavni nedostatak ovog kola je glomazan mrežni transformator sa težinom od oko 50 kg. Zbog rada na relativno niskoj frekvenciji (1 kHz) prekidački gubici čoperskog tranzistora su veoma mali ali je ta cena plaćena glomaznom prigušnicom. Ako se doda i veliki rezonantni, vodom hlađeni kondenzator cela konstrukcija peći je težine reda 150 do 200 kg.

Uređaj je realizovan devedesetih godina prošlog veka i bio je predmet magistarskog rada ovog autora.

Opisani uređaj bio je početak posle koga je konstruisano više indukcionih uređaja zasnovanih na IGBT i sa radom na višim frekvencijama. Neki od njih će biti prikazani u nastavku ovog poglavlja.



Sl. 12.1-1. Indukciona peč 10 kHz, 10 kW sa strujnim invertorom i paralelnim rezonantnim kolom



Sl. 12.1-2. Izgled komandne table uređaja

12.2. Indukcioni uređaj sa IGBT snage 8 kW

Uređaj se napaja iz trofazne mreže i razvija snagu od oko 8 kW. Pretvarač radi sa naponom od oko 550 V a regulacija snage vrši se PWM u izlaznom tranzistorskom mostu. Most je izveden sa IGBT tranzistorima. Primenjeni IGBT su naponske klase 1200 V i struje oko 30 A. Invertor je naponskog tipa sa rednim rezonantnim pretkolom ispred paralelnog rezonantnog kola induktora. Na ovaj način dobijen je pretvarač čija ukupna težina ne prelazi 10 kg pri čemu je postignuta izlazna snaga od oko 8 kW. Pretvarač radi na frekvenciji od oko 10 kHz.

Regulacija snage vrši se PWM modulacijom.

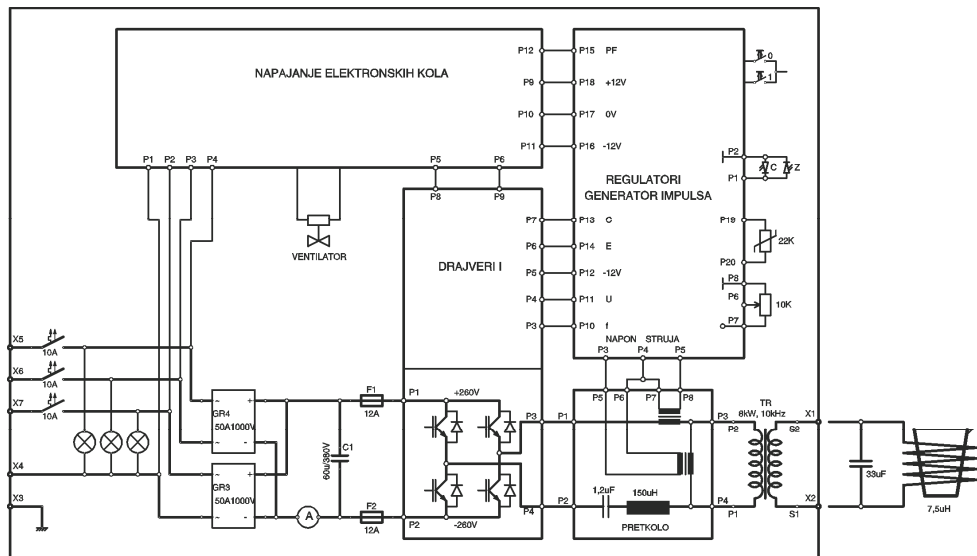
Projektovana vrednost (sl. 12.2-1) induktivnosti prigušnice je 150 μH i sa rasipnom induktivnošću izlaznog transformatora od oko 100 μH daje ukupno 250 μH . Za rezonanciju na 10 kHz potreban je redni kondenzator od oko 1,2 μF .

Na ostalim slikama prikazane su kompletne šeme pojedinih električnih kola uređaja kao i izgled prednje strane uređaja i slika celog uređaja sa induktorom.

Posle detaljnih dosadašnjih razmatranja koncepcija bi trebalo da je jasna pa se u detalje pojedinih upravljačkih kola neće ulaziti.

Konkretna uređaj je namenjen za površinsko kaljenje čeličnih mašinskih elemenata i prenosni odnos izlaznog transformatora je približno 62/20 navojaka. Jezgro je sastavljeno od 8 feritnih “U” jezgara pojedinačnog preseka oko 1,7 cm². Ukupna površina jezgra je oko 6,8 cm². Primar je motan bakarnom folijom 0,1 x 55 mm a sekundar sa istom folijom, dvostruko. Kondenzatori rezonantnog kola su 72 x 0,47 μF /630V tipa MKP10 – WIMA. Na ovom transformatoru izmerena je rasipna induktivnost transformatora od oko 130 μH i aktivna otpornost od oko 0,2 Ω . Induktivnost prigušnice je smanjena na oko 120 μH .

Nedostatak ovog rešenja je što nema aktivnu prekostrujnu zaštitu već se oslanja na regulator struje. Pasivnu prekostrujnu zaštitu čine topivi osigurači F1 i F2.



Sl. 12.2-1. Indukciona peć 10 kHz, 8 kW sa naponskim invertorom i paralelnim rezonantnim kolom



Sl. 10.2-6. Izgled uređaja