

Tatjana M. Stojanović¹, Miroslav S. Milićević^{1*},
Valentina M. Nejković²

¹Bulevar Nemanjića 33/39, Niš, Srbija

²Elektronski fakultet, Niš, Srbija

Pregled oscilatora sa cevima i praktično poboljšanje generatora za VF zavarivanje čeličnih cevi

Pregledni rad

Energetska elektronika, se zadnjih decenija, razvila zbog velikog progressa i zahvaljujući razvoju i proizvodnji poluprovodničkih komponenti kao što su tiristori i tranzistori. No, i pored velike primene poluprovodnika u energetske elektronici, veliku i važnu primenu imaju elektronske cevi i to kod postrojenja i uređaja gde se traže velike snage i gde se koristi visoka frekvencija. Stoga je u ovom radu dat pregled generatora sa elektronskim cevima koji se koriste u elektrotermiji.

Ključne reči: *elektronska cev, generator, tiristor, tranzistor, frekvencija, termija, oscilator*

Uvodne teoretske postavke za oscilatore sa cevima

Oscilatori su najstarija oblast primene elektronskih cevi [10–19]. Dele se s obzirom na vrstu talasnih oblika na izlazu oscilatora. Postoje oscilatori sa sinusnim oscilacijama i relaksacioni oscilatori kod kojih se talasni oblici bitno razlikuju od sinusnih. Osnovni činioci oscilatora su uslovi započinjanja oscilacija i održavanje samih oscilacija u kolu oscilatora.

Postoje oscilatori gde je bitna i stabilnost frekvencije. Međutim, neki od tipova oscilatora su takvi da je važnije imati što veću korisnu snagu i dobar stepen iskorišćenja. Ovakvi oscilatori rade u generatorima za termičku obradu metala. Problem velike korisne snage sa dobrim stepenom iskorišćenja se rešava kao i kod pojačavača snage u klasi C. Jedina razlika je ta što kod oscilatora klase C snagu za pobudu rešetke daje izvor za napajanje anodnog kola.

Razmotrimo prosto oscilatorno kolo, sl. 1, i to kada se kondenzator napuni i kolo prepusti samom sebi tj. pražnjenju, koje je opisano diferencijalnom jednačinom:

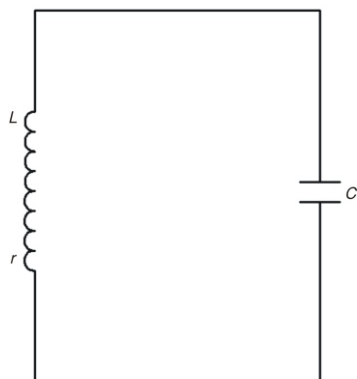
$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{CL} = 0 \quad (1)$$

Da bi pražnjenje kondenzatora bilo oscilatorno mora biti $(r/2L)^2 < 1/CL$, i struja pražnjenja je:

$$i = I_e e^{-\alpha t} \sin(\omega_r t - \varphi) \quad (2)$$

gde su $\alpha = r/2L$ i $\omega_r^2 = 1/CL$.

* Odgovorni autor; elektronska adresa: lavmiro@eunet.rs

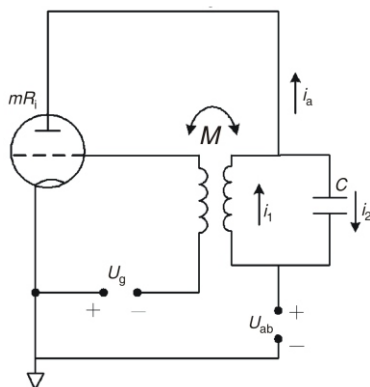


Slika 1. Prosto oscilatorno kolo

Ako je koeficijent prigušenja pozitivan, oscilacije će iščeznuti jer se sva početna energija sistema pretvara u toplotu na r . Jasno se da zaključiti da bi se amplituda oscilacija održavala konstantnom potrebno je spolja, u toku svake periode, dovesti energiju i to onoliko koliki su ukupni gubici. Ako su r i R redna i paralelna oscilatornom kolu, i neka je ρ negativna otpornost takođe paralelno vezana oscilatornom kolu, tad je uslov stalnih oscilacija:

$$|\rho| = r \frac{L}{RC} \quad (3)$$

Negativna otpornost se ostvaruje primenom elektronske cevi. Tako ćemo opisati oscilator sa induktivnom spregom dat na sl. 2. Neka su karakteristike cevi pravolinijske onda je:



Slika 2. Oscilator sa induktivnom spregom

$$R_i i_a = u_a - \mu u_g \quad (4)$$

$$i_a = i_1 + i_2 \quad (5)$$

$$u_g = M \frac{di_1}{dt} \quad (6)$$

$$u_a = r i_1 + L \frac{di_1}{dt} \quad (7)$$

$$i_2 = C \frac{du_a}{dt} \quad (8)$$

Ovde je pretpostavljeno da je rešetka na (-) potencijalu prema katodi i u rešetki ne teče struja. Zamenom poznatih po struji i_1 dobija se:

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{1}{L} r i_1 + \frac{L \mu M}{R_i C} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{LC} i_1 = 0 \quad (9)$$

Jednačina (9) je linearna diferencijalna jednačina drugog reda. Nakon rešavanja dobija se za uslov oscilovanja:

$$\alpha^2 + \omega_r^2 + 1 - \frac{r}{R_i} = 0 \quad (10)$$

gde će izraz (10) biti zadovoljen za:

$$\frac{1}{\mu} r R_i C + L + 2 R_i \sqrt{LC} + 1 - \frac{r}{R_i} = M + \frac{1}{\mu} r R_i C + L + 2 R_i \sqrt{LC} + 1 - \frac{r}{R_i} \quad (11)$$

Analizom izraza (11) pošto su svi parametri pozitivne veličine, uslov je da μ bude negativno, što se postiže suprotnim motanjem kalema u anodnom i rešetkinom kolu. U ustaljenom stanju zbog nelinearnih karakteristika cevi, koeficijent prigušenja postaje jednak nuli, tako da se za uslov oscilovanja u stacionarnom stanju dobija:

$$\alpha \frac{1}{2L} r \frac{L}{R_i} \frac{\mu M}{R_i C} 0 \quad (12)$$

gde je $M = rR_i C / L / \mu$.

Kada koeficijent uz linearni član u izrazu (9) dobije vrednost nula, za kružnu učestanost se dobija vrednost:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R_i} \right) \omega_r^2 = \left(1 + \frac{r}{R_i} \right) \frac{1}{LC} \quad (13)$$

Kod ove analize nedostatak je pretpostavka da su parametri cevi stalni i nezavisni od napona na elektrodama. Ovo ćemo razjasniti analizom oscilatora uz primenu strožije teorije. Sa sl. 2. diferencijalna jednačina koja opisuje uslove oscilatora se može napisati u obliku:

$$\frac{d^2 u_a}{dt^2} - f(u_a) \frac{du_a}{dt} - \omega_r u_a = 0 \quad (14)$$

gde u_a predstavlja trenutnu vrednost napona. Međutim, najčešće funkciju $f(u_a)$ je nemoguće predstaviti jednostavno. Čak i za prostije oblike $f(u_a)$ rešenje se skoro uvek mora tražiti približno analitički ili grafičkim putem. Radi dalje analize razmotrimo oscilator na sl. 3. Mogu se napisati sledeće jednačine:

$$i_1 = \frac{u_a}{L} dt \quad (15)$$

$$i_2 = C \frac{du_a}{dt} \quad (16)$$

$$i_3 = \frac{u_a}{R} \quad (17)$$

Anodna struja i_a je funkcija ekvivalentnog pobudnog napona na rešetki cevi:

$$i_a = f(u_g) \frac{u_a}{\mu} \quad (18)$$

Pošto je:

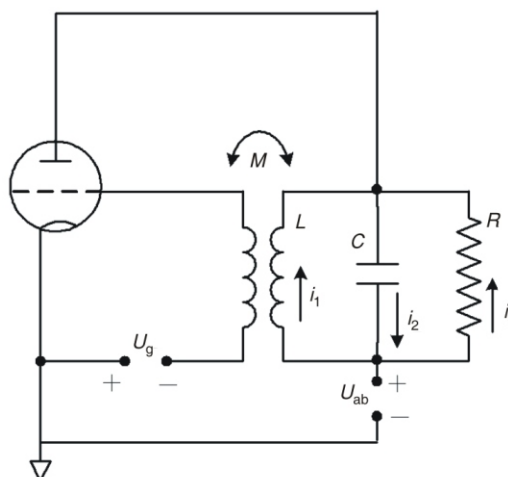
$$u_g = M \frac{di_1}{dt} = \frac{M}{L} u_a \quad (19)$$

to je:

$$i_a = f(u_g) \frac{u_a}{\mu} = f\left(\frac{M}{L} \frac{1}{\mu} u_a\right) \varphi(u_a) \quad (20)$$

Za struje u anodnom kolu važi:

$$i_a = i_1 - i_2 - i_3 = \frac{u_a}{L} dt - C \frac{du_a}{dt} - \frac{u_a}{R} \quad (21)$$



Slika 3. Šema oscilatora

gde se diferenciranjem i sređivanjem dobija:

$$\frac{d^2 u_a}{dt^2} + \frac{1}{C} + \frac{1}{R} \frac{di_a}{du_a} \frac{du_a}{dt} - \omega_r^2 u_a = 0; \quad \omega_r^2 = \frac{1}{LC} \quad (22)$$

Smenom $t_1 = \nu \varphi_r t$, dobijamo:

$$\frac{d^2 u_a}{dt_1^2} + \frac{1}{\omega_r C} + \frac{1}{R} \frac{di_a}{du_a} \frac{du_a}{dt_1} - u_a = 0 \quad (23)$$

Pretpostavimo da di_a/du_a ima stalnu vrednost. Da bi došlo do oscilovanja potrebno je da ova vrednost bude negativna i po apsolutnoj vrednosti veća od $1/R$ jer je to uslov da se započete oscilacije mogu povećati. Da bi di_a/du_a bilo negativno mora i M biti negativno. Uzmimo da je $\varphi(u_a)$ oblika:

$$i_a = \varphi(u_a) = au_a - bu_a^3 \quad (24)$$

gde su a i b konstante, te se smenom u izraz (22) dobija:

$$\frac{d^2 u_a}{dt_1^2} + \frac{1}{\omega_r C} + \frac{1}{R} (a - 3bu_a^2) \frac{du_a}{dt_1} - u_a = 0 \quad (25)$$

odnosno:

$$\frac{d^2 u_a}{dt_1^2} + \frac{a}{\omega_r C} + \frac{1}{R} \left(1 - \frac{3b}{a} u_a^2 \right) \frac{du_a}{dt_1} - u_a = 0 \quad (26)$$

Uvođenjem smena $\varepsilon = a - \frac{1}{R} - \nu \varphi_r C$ i $u_a = [a - 1/R]/3b]^{1/2} y$, ima se jednačina:

$$\frac{d^2 y}{dt_1^2} + \varepsilon (1 - y^2) \frac{dy}{dt_1} - y = 0 \quad (27)$$

Od parametra ε zavisi talasni oblik oscilacija. Za slučaj da je $\varepsilon \ll 1$ jednačina (27) se rešava u obliku:

$$y = \frac{2 \sin(t_1 - \varphi)}{\sqrt{1 + C e^{-\varepsilon t} - \frac{\varepsilon}{2} \sin(t_1 - \varphi)}} \quad (28)$$

odnosno vraćanjem na prvobitne promenljive dobijamo:

$$u_a = \frac{a \sqrt{\frac{1}{R}}}{\sqrt{1 + C e^{-\varepsilon \omega_r t}}} \sin(\omega_r t - \varphi) \quad (29)$$

gde su C i φ integracione konstante. Jednačina (29) predstavlja analitički oblik za uspostavljanje prostoperiodičnih oscilacija kod oscilatora sa induktivnom spregom. Amplituda u početku raste eksponencijalno i na kraju dostiže vrednost ustaljenog stanja, tj. kada član uz C postane zanemarljivo mali.

Oscilator sa induktivnom spregom, sl. 4., dosta primenjuje se u praksi. Sprega anodnog i rešetkinog kola ostvarena je preko međusobne induktivnosti. Samo oscilatorno kolo se može nalaziti u anodnom ili u rešetkinom kolu, ali se slučaj sa anodnim ipak više sreće u praksi.

Ranije smo izveli uslov oscilovanja i frekvenciju u obliku:

$$M = \frac{rR_i C L}{\mu} \quad (30)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R_i} \right) \quad \omega_r^2 = \frac{1}{R_i} \quad (31)$$

Kada rešimo izraz (30) po R_i i to zamenimo u izraz (31) dobijamo:

$$\omega^2 = \omega_r^2 \left(1 + d^2 \frac{1}{\frac{\mu|M|}{L}} \right) \quad (32)$$

gde je $d = r/v\phi_r L$ dekrement kola.

Ako je unutrašnja otpornost cevi vrlo velika uslov za oscilovanja je:

$$M = \frac{rC}{\frac{\mu}{R_i}} \lim_{R_i \rightarrow \infty} \frac{rC}{\frac{L}{R_i}} = \frac{rC}{S} \quad (33)$$

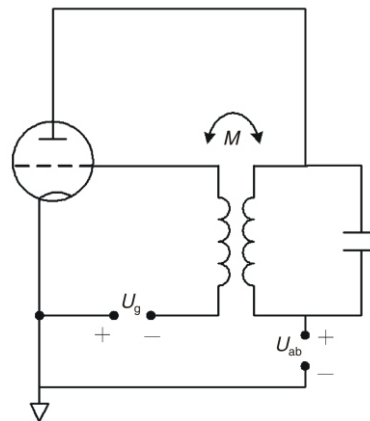
Međusobna induktivnost M treba da bude negativna, tako da bi se ostvarila pozitivna reakcija. Fazni ugao anodnog i rešetkinog napona iznosi približno oko 180° .

Što se tiče priključivanja jednosmernog anodnog napona moguća je redna i paralelna veza. Kod redne veze napon anode je vezan na red sa anodnim oscilatornim kolom. Kod paralelne veze se anodni napon vodi preko induktivnosti, koja sprečava da se naizmenična struja zatvori preko baterije na anodu cevi i preko kondenzatora koji sprečava da se jednosmerna struja ne zatvara preko kalema samog oscilatornog kola.

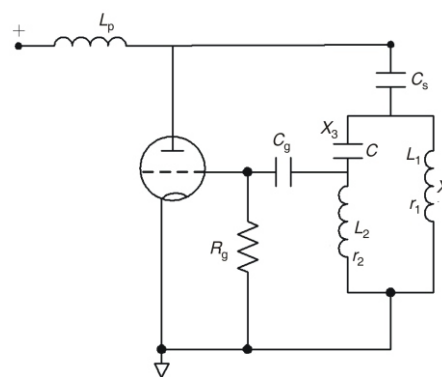
Na sl. 5 je prikazano kolo Hartlejevog oscilatora od velike praktične koristi. Kalem oscilatornog kola je podeljen na dva kalema L_1 i L_2 , a njihova sredina je vezana za katodu. Podešavanje jačine pozitivne reakcije se obavlja pomeranjem izvoda na kalemu i to je preimućstvo ovog tipa oscilatora. Na sličan način kao ranije analize oscilatora, iz [1], dobija se uslov oscilovanja:

$$\frac{1}{\omega^2} = C(L_1 - L_2) \frac{L_1 L_2}{R_i R_g} \quad (34)$$

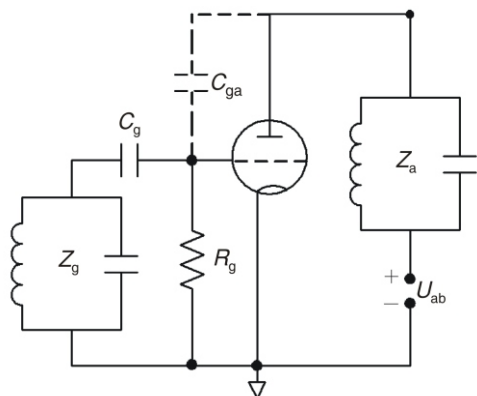
$$R_i = R_g \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) \left(R_g + \frac{L_2}{L_1} \right) \frac{L_2}{R_g C} \frac{L_1}{R_i C} \quad (35)$$



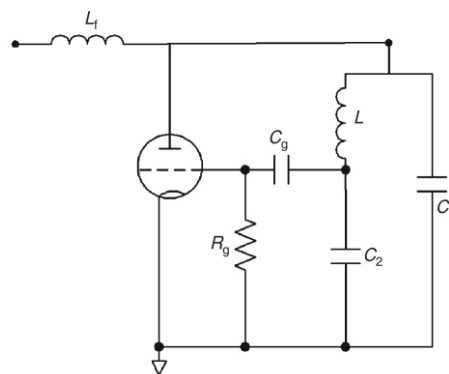
Slika 4. Oscilator sa induktivnom spregom



Slika 5. Kolo Hartlejevog oscilatora



Slika 6. Šema Hut Kinovog oscilatora



Slika 7. Kolpicov oscilator

Otpornost potrošača koja je paralelno priključena oscilatornom kolu može se uračunati kao da je unutrašnja otpornost cevi.

Šema Hut Kinovog oscilatora je prikazana na sl. 6. Sprega anodnog i rešetkinog kola je ostvarena preko kapacitivnosti C_{ga} . Oscilatorno kolo se nalazi između anode i katode, kao i između rešetke i katode. Ovde je učestanost oscilatora niža od rezonantnih učestanosti oscilatornih kola. Na osnovu [1] uslov oscilovanja je:

$$C_{ga} = \frac{2}{SR_g R_{ab} \omega} \quad (36)$$

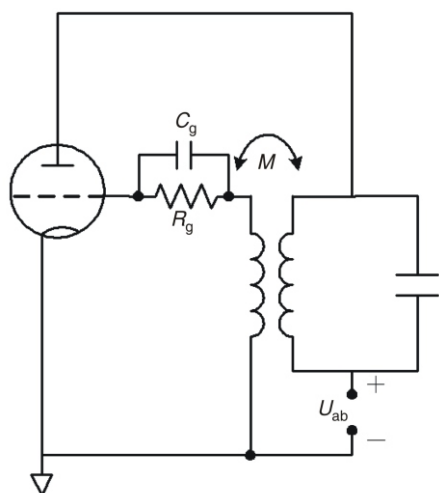
Kod ovog oscilatora je reaktansa između rešetke i katode suprotnog znaka od reaktanse između rešetke i anode, a jednakog znaka sa reaktansom između anode i katode.

Kolpicov oscilator je prikazan na sl. 7. a razlikuje se od Hartlejevog oscilatora samo po tome što su reaktanse između pojedinih elektroda suprotnog znaka. Posle izračunavanja približne vrednosti učestanosti oscilatora se dočija:

$$\omega_r^2 = \frac{1}{LC_0} \quad (37)$$

a za uslov oscilovanja:

$$R_g (\mu C_1 - C_2) = \frac{R_i C_1^2}{C_2} \quad (38)$$



Slika 8. Oscilator sa induktivnom spregom

Kod Kolpicovog oscilatora podešavanje intenziteta pozitivne reakcije nije jednostavno kao kod Hartlejevog oscilatora, zato što se promenom kapaciteta menja i radna frekvencija oscilatora. Što se tiče izobličenja ovo je bolji tip oscilatora. Ovde su anoda i katoda spojene preko kondenzatora C_1 koji predstavlja manju reaktansu za više harmonike anodne struje nego induktivnost L kod Hartlejevog oscilatora.

Radi analize ekvivalentne otpornosti prigušenja rešetkinog kola na sl. 8. je dato jedno oscilatorno kolo. Otpornik R_g i kondenzator C_g u rešetki su dati i na druge načine. Struja rešetke

proticanjem stvara pad napona na R_g što stvara prednapon rešetke. Ali rešetkina struja sadrži i komponentu radne učestanosti oscilatora. Usled ove komponente rešetkino kolo se ponaša kao ekvivalentna otpornost koja prigušuje oscilatorno kolo oscilatora i utiče na rad oscilatora.

U prvoj aproksimaciji pretpostavlja da se rešetkina struja može predstaviti pravom linijom, što je dosta dobro za praksu. Ako je R_{gi} unutrašnja otpornost rešetke cevi, to je trenutna vrednost rešetkine struje:

$$i_g = \frac{u_g}{R_{gi}} \quad (39)$$

Struja rešetke teče samo u delovima periode naizmeničnog napona. Napon rešetke je $u_g = U_{gm} \cos \beta$ gde je β ugao proticanja rešetkine struje. Za amplitudu prvog harmonika rešetkine struje se dobija:

$$I_{glm} = \frac{U_{gm}}{\pi R_{gi}} \beta \frac{\sin 2\beta}{2} \quad (40)$$

Ekvivalentna otpornost prigušenja R_g je:

$$R_g = \frac{U_{gm}}{I_{glm}} = \frac{\pi R_{gi}}{\beta \frac{\sin 2\beta}{2}} \quad (41)$$

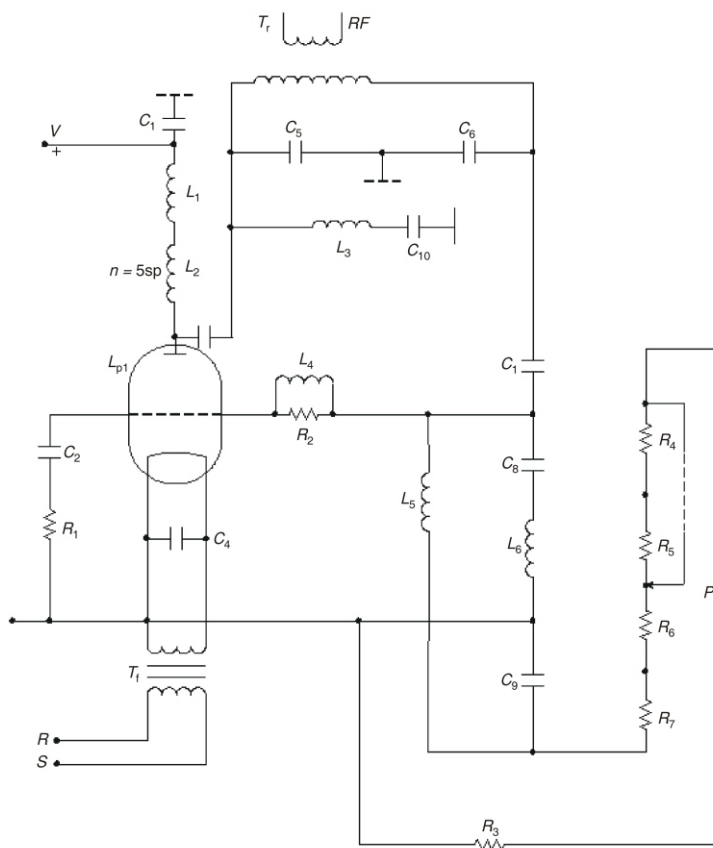
Jednačina (41) daje ekvivalentnu otpornost prigušenja, kada je otpornik R_g priključen kao na sl. 8. Sa aspekta stabilnosti rada oscilatora (pre svega stabilnosti frekvencije) povoljnije je da rešetkina struja bude što manja. To znači da odnos R_g/R_{gi} treba da je što veći jer se time smanjuje ugao proticanja rešetkine struje. Ali nažalost, gornja granica vrednosti veličine R_g određena je veličinom vremenske konstante $C_g R_g$ koja se ne sme prekoračiti jer dolazi do poznate pojave pod imenom periodičnog prekidanja oscilacija.

Praktična primena cevnih oscilatora u elektrotermiji

Na tehnološkim linijama za proizvodnju šavnih čeličnih cevi su instalisane, između ostalog, i generatori za visokofrekventno induktivno zavarivanje čeličnih cevi korisnih snaga 150 knj, sl. 9., i generator snage 250 kW. Pomenuta slika predstavlja električnu šemu oscilatora koji je glavni deo jednog generatora za zavarivanje.

Oscilator generatora snage 150 kW je realizovan elektronskom cevi L_{p1} i to je modifikovani Kolpikov oscilator dobro poznat u teoriji oscilatora. Za napajanje grejanja cevi se koristi poseban transformator T_f koji napon u primaru od 380 V naizmeničnih pretvara u potreban naizmeničan napon za grejanje cevi. Anodni napon se dovodi kao promenljiv kontinualno visok jednosmerni napon, i on se kreće u granicama od 0 do 15 kV. Promenom tog napona se kontinualno podešava i snaga generatora.

Sam anodni napon iz ispravljača se vodi preko prigušnice L_1 i L_2 na anodu cevi L_{p1} da bi se sprečio prodor signala visoke frekvencije u ispravljač. Povratna sprega sa rešetke cevi je izvedena preko kondenzatora C_2 i otpornika R_1 .



Slika 9. Generator za visokofrekventno induktivno zavarivanje

Oscilatorno kolo čini transformator T_r i kondenzator C_5 i C_6 , sa preslikanim komponentama na njih. Centralno mesto zauzima aktivni element cev L_{p1} . Transformator T_r ima višestruku ulogu i to pre svega da visok prostoperiodičan napon oscilatora smanji radi napajanja induktora, zatim da izvrši prilagođenje impedanse izlaza oscilatora na impedansu induktora. Na primar transformatora T_r , kao elementa oscilatornog kola, se preslikava preko sekundara ceo sistem induktor, impedera i sama čelična cev koja se zavaruje. Od kvaliteta čelične trake, dimenzije cevi, kvaliteta impedera kao magnetnog koncentratora, geometrije induktora i podešenja svih ovih u odnosu na kontaktnu tačku zavarivanja zavisice i vrednost impedanse koja se preslikava u primar RF transformatora T_r .

Povratna sprega sa oscilatora na upravljačku elektrodu rešetke cevi je izvedena preko kapacitivnog razdelnika napona koga čine kondenzatori C_7 i C_8 . Struja rešetke se menja tako što u kolu rešetke postoje otpornici R_4 , R_5 , R_6 , R_7 i R_3 , gde se njihovim prespajanjem preko preklopnika P_r ova jednostavno reguliše.

Karakteristično za oba oscilatora je to da rade na visokim frekvencijama koje se kreću od 400 do 500 kHz. Odavanje snage za zavarivanje se obavlja preko transformatora čija je uloga ranije opisana. Snaga je kontinualno promenljiva promenom anodnog napona i to regulisanjem ugla paljenja tiristora koji su montirani u primaru visokonaponskog transformatora.

Pomenuti generatori se napajaju iz trofaznog sistema napona i oni je pretvaraju prvo u jednosmeran napon a zatim u sinusoidalni talasni oblik frekvencije do oko 500 kHz, koja je sasvim dovoljna za napajanje induktora putem transformatora za spregu. Zna se da je glavno svojstvo napona i struja visokih frekvencija da obavljaju površinsko zagrevanje čeličnih materijala odnosno zavarivanje u konačnom smislu.

Ovi generatori su industrijski generatori i sa triodom rade na principu autooscilatora. Energija predstavljena najpre u visokom jednosmernom naponu napaja cev oscilatora čiji je izlaz preko koaksijalnih kablova povezan na izlazni transformator i dalje na induktor. Znači generator je izvor struje visoke frekvencije koji napaja potrošača koga čini sistem induktor, impedans i čelična cev koja se zavaruje.

Generatori su po stepenima smešteni u nekoliko čeličnih ormara, gde su negde ugrađeni zaštitni ekrani od aluminijumskog lima potrebne debljine. Budući da je prisutna velika disipacija u generatoru to se hlađenje, tj. odvođenje toplote, obavlja destilisanom vodom, a instalirani su i ventilatori za unutrašnje hlađenje elemenata i agregata generatora za zavarivanje cevi.

Samo oscilatorno kolo se montira što bliže mestu zavarivanja i stoga je smešteno blizu mašine i induktora tako da je oklopljeno oblogama od aluminijumskog lima. Veza sekundara i induktora je minimalna zbog smanjivanja induktanse i često se zove i pomoćni induktor.

Komandni pult sa potrebnim komandama i instrumentima je takođe smešten blizu samog mesta zavarivanja, tako da rukovalac na generatoru za zavarivanje može jednostavno da manipuliše učestvujući u procesu varenja.

Navedimo određene snage visokih frekvencija: (1) snaga visoke impedanse – to je ona snaga na izlaznim priključcima kada u generatoru nema izlaznog transformatora i (2) snaga niske impedanse – to je ona na sekundaru izlaznog transformatora. Snaga visoke impedanse je snaga na izlaznim priključcima kada u generatoru nema izlaznog transformatora. Snaga niske impedanse je na sekundaru izlaznog transformatora. Većina industrijskih primena, kao što je naš slučaj, zahteva snagu niske impedanse.

Reaktivna snaga u kVAr se oslobađa u oscilatornom kolu. Oscilatorna cev daje osobine visoke impedanse. Cev kao aktivni element radi kao oscilator u klasi C. Induktori daju faktor snage ispod jedinice što je okruženje mesta varenja.

Reaktivna snaga se stvara kod kondenzatora snage u oscilatoru. Ova snaga uvek treba da ima veliku vrednost ako se želi velika pouzdanost i iskorišćenje na induktoru.

Vrednost odnosa kVAr/ kW karakteriše pouzdanost upotrebe generatora tj. karakteriše mogućnost transformacije aktivne snage. Postoji mogućnost delovanja preko RF transformatora tako da se koriste induktori male impedanse (broj zavojaka 3, 2 i samo jedan) što omogućava veliku koncentraciju elektromagnetne energije usled čega se stvara velika toplota potrebna za zavarivanje. Reaktivna snaga treba da prolazi kroz transformator a teorija ukazuje da je reaktivni stepen korisnog dejstva odnosno odziv reaktivne snage koja je raspoloživa na sekundaru i primaru, funkcija koeficijenta sprege između ovih namotaja.

Transformatori za prilagođenje su specijalne izrade sa težnjom da se dobije veliki koeficijent sprege odnosno da se apsorbuje što manje reaktivne snage i da bude što manje rasipanja. Predviđena je promenljiva veza tj. promena koeficijenta sprege između primara i sekundara tako što se primarni namotaj podiže i spušta po vertikali menjajući spregu.

Stepen korisnog dejstva generatora visoke frekvencije je u najvećoj meri od oscilatora klase C, projektovan i realizovan tako da ostvari ugao protoka struje u rasponu od 120° do 140° električnih. Disipacija anode cevi je oko 25% od snage iz ispravljača. Ako uzmemo u obzir i gubitke i disipaciju rešetke, otpornost rešetke, kola, transformatore, kondenzatore snage, koaksijalni kabl,

tiristore i drugo dobiće se za stepen korisnog dejstva snage niske impedanse, od 65% do 70%. Da bi se dobio globalni stepen korisnog dejstva mora se uzeti u obzir snaga filamena, pomoćnih kola i same instalacije i treba da je oko 0,9, tako da za globalni koeficijent ima vrednost od 55% do 60%.

Oba opisana iz prakse generatora za induktivno zavarivanje čeličnih cevi su tipična i u upotrebi su oko 25 godina na kojima je autor ovog rada eksperimentalno istraživao. Za sve uočene nedostatke projektovana su i realizovana poboljšanja koja su tehnoeekonomski opravdana i isplativa.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja

Upotrebom novog rešenja sa MDM koncentradorom ostvaruje se energetska ušteda koja generator sa elektronskom cevi čini konkurentnim u odnosu na tranzistorski generator sa aspekta ukupnog korisnog dejstva. Generator sa elektronskim cevima je imun na industrijske smetnje i robusnost ga čini prikladnijim za neprekidnu proizvodnju. Iako je rešenje tranzistorskih generatora, na prvi pogled modernije, ono je dosta skuplje jer iziskuje veliki broj tranzistora da bi se realizovala velika snaga. To sve iziskuje probleme sa smeštajem, gabaritom i hlađenjem.

Rad na visokim frekvencijama, pored velikih smetnji industrijskog pogona gde su dosta zastupljeni tiristorski regulatori i na drugim postrojenjima, dovodi do pojave viših harmonika što predstavlja veliki problem za tranzistorsku tehniku.

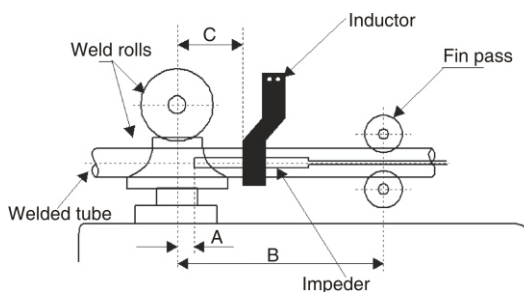
Elektronske cevi imaju prednost što se proizvode i za rad na visokom naponu, tako da za potrebnu snagu koristi manja struja. Tranzistori, pošto mogu da rade na manjim naponima, za ostvarenje

velike snage potrebna je velika struja, a to traži mnogo veliki broj tranzistora. Veliki broj tranzistora sa mnogo veza na visokim frekvencijama, koje se koriste kod induktivnog zavarivanja čeličnih cevi, stvara poseban problem.

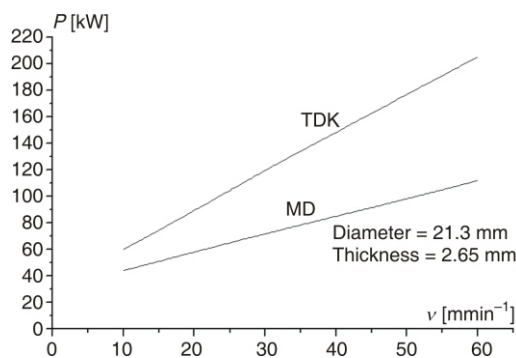
Na sl. 10 je prikazan detalj gde se vidi formiranje cevi od čelične trake i zavarivanje ispod induktora. Unutar čelične cevi, u zoni induktora, smešta se magnetni koncentrador čiji je zadatak da stvori najbolju indukciju u zoni ivica čelične trake koje se zavaruju.

Autor rada je upoređivao eksperimentalnim istraživanjem potrošnju snage iz ispravljača generatora za koncentratore od ferita i od magnetodielektričnih materijala. Dugo godina pre toga autor je radio i eksperimentisao sa feritnim materijalima i u toj tehnologiji našao kao optimalan ferit firme TDK-IP1.

Na osnovu teorijskih analiza i eksperimentalnih istraživanja ovom rešenju je suprotstavljeno rešenje sa magnetnim koncentradorima, gde je posle višegodišnjih istraživanja pronađen kao najbolji magnetodielektrik FA firme FLUXTROL – USA.



Slika 10. Slika mesta zavarivanja



Slika 11. Grafik snage u funkciji brzine zavarivanja

Na sl. 11. su prikazani grafici utroška snage za jednu i drugu vrstu koncentratora, odakle se vidi da FA koncentrator zavaruje sa znatno manjom snagom čime se stvara velika energetska ušteda. Sveukupni rezultati ovih istraživanja su verifikovani i prikazani u objavljenim radovima [15–19].

Tablica 1. Rezultati hemijskog sastava čelične cevi

| Hemijski element | Hemijski sastav u [%] | | | | |
|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| | Čelična traka | TDK koncentrator | | MDM koncentrator | |
| | | Uzorak u varu | Uzorak u preseku cevi | Uzorak u varu | Uzorak u preseku cevi |
| C | 0.24766 | 0.96890 | 0.14992 | 0.15942 | 0.24014 |
| Si | 0.01415 | 1.58527 | 0.00997 | 0.00867 | 0.02123 |
| S | 0.00938 | 0.01886 | 0.00453 | 0.00030 | 0.01169 |
| P | 0.00315 | 0.00517 | 0.00018 | 0.00432 | 0.00366 |
| Mn | 0.46453 | 4.53100 | 0.46852 | 0.43031 | 0.56453 |
| Ni | 0.00624 | 0.52641 | 0.00649 | 0.01157 | 0.01841 |
| Cr | 0.01770 | 0.08305 | 0.01718 | 0.01620 | 0.02545 |
| Mo | 0.03550 | 0.47873 | 0.03313 | 0.03157 | 0.04372 |
| V | 0.02004 | 0.08283 | 0.01213 | 0.00673 | 0.03017 |
| Cu | 0.01767 | 0.05981 | 0.01763 | 0.02271 | 0.04848 |
| W | 0.01698 | 0.5454 | 0.00516 | 0.00483 | 0.04437 |
| Ti | 0.00252 | 0.04365 | 0.00077 | 0.00010 | 0.00573 |
| Sn | 0.00067 | 0.02330 | 0.00052 | 0.00021 | 0.00506 |
| Co | 0.00595 | 0.02482 | 0.00367 | 0.00316 | 0.01087 |
| Al | 0.05359 | 0.81243 | 0.04511 | 0.03432 | 0.06666 |
| Nb | 0.02114 | 0.24467 | 0.01024 | 0.00691 | 0.04701 |
| Mg | 0.02877 | 0.09602 | 0.02541 | 0.02413 | 0.03761 |
| Fe | 99.0594 | 89.9171 | 99.1999 | 99.2347 | 98.8059 |

Daljim istraživanjem autor je sa saradnicima pokazao da se upotrebom MDM koncentratora dobija mnogo kvalitetniji var, što ilustruje tab. 1. na kojoj je prikazana tabela hemijskog sastava u pojedinim zonama vara cevi i po celom preseku, čiji su rezultati publikovani radom u [16].

Ako se uzmu zbirni rezultati dati u [15] i [16] vidi se da ovom novinom cevni generatori uz navedene prednosti su konkurentni tranzistorskim. Teško je to sad izraziti procentualno, jer za to je potrebna mnogo urednija statistika.

Zaključak

Pri izradi rada autor je koristio obimnu literaturu i svoja višegodišnja iskustva na teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima. U prvom delu rada, a na osnovu [1, 2], je data

osnovna teorija oscilatora i opisan je način sprezanja od kojih pominjemo induktivnu spregu koja je najviše zastupljena kod generatora za potrebe termije.

Prikazani su izrazi za određivanje uslova oscilovanja, kružne frekvencije i analitičkog oblika koji predstavlja uspostavljanje prostoperiodičnih oscilacija.

Posle toga je dat prikaz osnovnih tipova oscilatora. Najpre se opisuje Hartlejev, Hut-Kinov i Kolpicov oscilator.

Na eksperimentalnom generatoru snage 150 kW je, u više navrata i dugim eksperimentalnim istraživanjima, primenom jednog posve novog koncentratora od magnetodielektrika ostvaren najbolji koeficijent prenosa i pretvaranja električne u toplotnu energiju, što potvrđuje i rad objavljen u časopisu [15]. Prikazano je da i generatori sa elektronskim cevima mogu da se optimiziraju gde se ostvaruje maksimalna energetska efikasnost.

Pored navedenih rezultata, radom u [16], pokazano je da se ostvaruje finalni proizvod sa najkvalitetnijim varom u odnosu na do sada poznata rešenja u svetu. Valja napomenuti, da su dugogodišnjim istraživanjima, otkriveni i neki drugi fenomeni kod visokofrekventnog induktivnog grejanja i zavarivanja, do sada nepoznati u ovoj teoriji i praksi, a upotrebom generatora sa elektronskim cevima.

Opisana vrsta oscilatora sa cevima, uz poboljšanje i verifikacije od renomiranih časopisa čine ovaj tip generatora za elektrotermiju još uvek konkurentnim i sposobnim za ekonomičnu i kvalitetnu proizvodnju.

Želja autora ovog rada je da animira i druge stručnjake i naučnike iz ove oblasti da se priključe istraživanjima, jer i ako je ovde dosta urađeno još uvek postoje mesta i načini da se učini pomak ka nečem novom, a u smislu poboljšanja energetske efikasnosti i kvaliteta proizvoda koji se termički tretiraju.

Literatura

- [1] Raković, B., Elektronika I, Naučna knjiga, Beograd, 1968
- [2] Raković, B., Elektronika II, Naučna knjiga, Beograd, 1968
- [3] Šamov, N. A., Lunin, V. I., Ivanov, N. V., Vysokočastotnaya svarka metallov, Mašinstroenie, Leningrad, 1977
- [4] Guljajev, D., Soveršenstvovanie tehnologii proizvodstva i povišenje kačestva elektrosvarnyh trub, Tehnika, Kiev, 1984
- [5] Ivanov, N. V., Lunin, V. I., Kulžinski, L. V., Vysokočastotnaya svarka, Mašinstroenie, Leningrad, 1979
- [6] ***, Simpozijum o Elektrotermiji u metalurgiji i metaloprerađivačkoj industriji, Split, 1977
- [7] Gluhanov, N. P., Bogdanov, V. N., Svarka metallov pri vysokočastotnom nagreve, M-L, Mašgiz., 1962
- [8] Dittrich, H. F., Advanced Techniques in Radio Frequency Heating Generator Design, R. F. Heating Generator Design, PHILIPS, *Application information*, 458, 1984
- [9] Nihgtingale, D. E., A 400 kHz Induction Heater of Advanced Design for Powers up to 60 kW, *Philips Application information*, 458, 1984
- [10] Nightingale, D. E., A 300 kHz Induction Heater of Advanced Design for Powers up to 120/240 knj, *Philips information*, 458, 1984
- [11] Hubbard, C., High Frequency Contact and Induction welding of Tube, FMA Journal of Fabricator, Issue Januuar/February, 1980
- [12] G. H. International, S. A., Generators a Transistores Para Soldadura de Tube, Apartado 8056, 46080 Valencia, Espana, 2002
- [13] PLUS + THERM AG, HG – Generator IG 411 – IG 413, Technische daten, CH – 5430, Wettingen, Schweiz, 1, 2003
- [14] EFD – ELVA GmbH, HF – Generator zum Iduktiven Langstahtrohrschweisen, A – 1140, Wien, Österreich, 2002

- [15] Milićević, M., Milićević, V., Impeder for HF Inductive Welding of Steel Tubes, IEE Proceedings, Science, May, *Measurement and Technology*, 149 (2002), 3, 113–116
- [16] Milićević, M., Radaković, Z., Quality Improvement of Steel Pipes Produced by Seam Welding With New Magneto-Dielectric Impeder, *Materials Transactions*, 47 (2006), 6, 1464–1468, The Japan Institute of Metals
- [17] Milićević, M., Jovanović, T., Nejković, V., Defects Identification of the High Frequency Inductive Welding, *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, No. 2, Bor, 2013
- [18] Milićević, M., Jovanović, T., Nejković, V., High Energetic Efficacy for High Frequency Inductive Welding, *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, No. 4, Bor, 2013
- [19] Milićević, S., M., Jovanović, M. T., *Termotehnika*, ISBN 0350-218X, 40 (2014), 1, 1–9

Abstract

Review Tube Oscillator and Practical Betterment in Generator for HF Welding Steel Tube

by

*Tatjana M. STOJANOVIĆ*¹, *Miroslav S. MILIĆEVIĆ*¹*,
and *Valentina M. NEJKOVIĆ*²

¹ Bulevar Nemanjića 33/39, Niš, Serbia

² Faculty of Electronic Engineering, Niš, Serbia

Power electronics, during the last decades, was developed due the progress and development and production of semi-conductor components such as thyristors and transistors. However, beside the wide usage of semi-conductor in power electronics, electronic tubes have an important role in the facilities and devices where high power and high frequency is required. Therefore, the review of generator with electronics pipes which are used in electrothermics will be presented in this paper.

Key words: *electronic tube, generator, thyristor, transistor, frequency, welding, oscillator*

* Corresponding author; e-mail: lavmiro@eunet.rs

Rad primljen: 20. februara 2015.
Rad revidiran: 3. septembra 2016
Rad prihvaćen: 10. oktobra 2016