

PRIMJENA VISOKOFREKVENCIJSKIH PRETVARAČA U UREĐAJIMA ZA ZAVARIVANJE REL POSTUPKOM

Ivan Petrović¹, Denis Pelin², Ivan Samardžić³, Marinko Stojkov³

¹poslijediplomski doktorski studij, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, FERIT Osijek

²Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, FERIT Osijek

³Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu

Ključne riječi: Električni luk, REL uređaj za zavarivanje, VF trafo, inverterski uređaj za zavarivanje.

Key words: Electric arc, electrode welding maschine, HF transformer, inverters welding maschine.

Sažetak:

U ovome radu opisan je električni uređaj za zavarivanja REL postupkom, s naglaskom na ugradnju energetskih pretvarača za zavarivanje. Također su opisani razni tipovi izvora za zavarivanje, s raznim oblicima regulacije struje, odnosno napona zavarivanja. Analizirana je ovisnost povećanja frekvencije u odnosu na smanjenje same površine Fe jezgre, time i mase transformatora. Snimljen je valni oblik napona na jednom od tranzistora koji rade na visokim frekvencijama na uređaju za zavarivanje.

Abstract

This paper describes the REL welding electrical circuit, with emphasis on the structure of an inverter welding device. Various types of welding sources are also described, with various forms of current control, or welding voltage. The calculation of the dependence of the frequency increase with respect to the decrease in the surface area of the Fe core and thus the mass of the transformer is presented. A voltage waveform was recorded on one of the transistors operating at high frequencies on the inverter device of the welding source.

1 UVOD

Razvoj izvora struje za elektrolučno zavarivanje traje već gotovo 100 godina. Tijekom tog vremena, konstrukcija izvora je prošla nekoliko razvojnih koraka. Neke izvedbe i danas se koriste, dok su neke zamijenjene boljim i suvremenijim rješenjima. Glavna zadaća izvora struje za elektrolučno zavarivanje je preuređiti napon mreže na razinu koja omogućava sigurno uspostavljanje luka. Pri tome je i važna mogućnost mijenjanja karakteristike luka. Pri gradnji izvora struje bitna je i sigurnost, stoga se strujni krug zavarivanja galvanski odvaja od mrežnog dijela uređaja. Kod svih vrsta izvora elektrolučnog zavarivanja, u tu svrhu koriste se transformatori.

Postoje dvije vrste izvora struje za zavarivanja, neupravljeni sustavi i sustavi s povratnom vezom. Kod neupravljenih izvora, potreban parametar zavarivanja se odabire, ali stvarna vrijednost odabranog parametra ovisi o pouzdanosti izvora. Kako nema povratne veze o stvarnoj vrijednosti parametara, sustav je osjetljiv na sve vanjske utjecaje, na primjer promjene napona mreže.

Sustavi upravljeni pomoći povratne petlje sadrže sklop koji očitava stvarnu vrijednost parametara zavarivanja i čini nužne popravke u cilju održavanja parametara na zadanoj vrijednosti, neovisno o vanjskim utjecajima. Najčešći parametri koji se mjere kod izvora struje zavarivanja su: struja zavarivanja, napon luka, brzina žice, induktivnost, frekvencija impulsa itd.

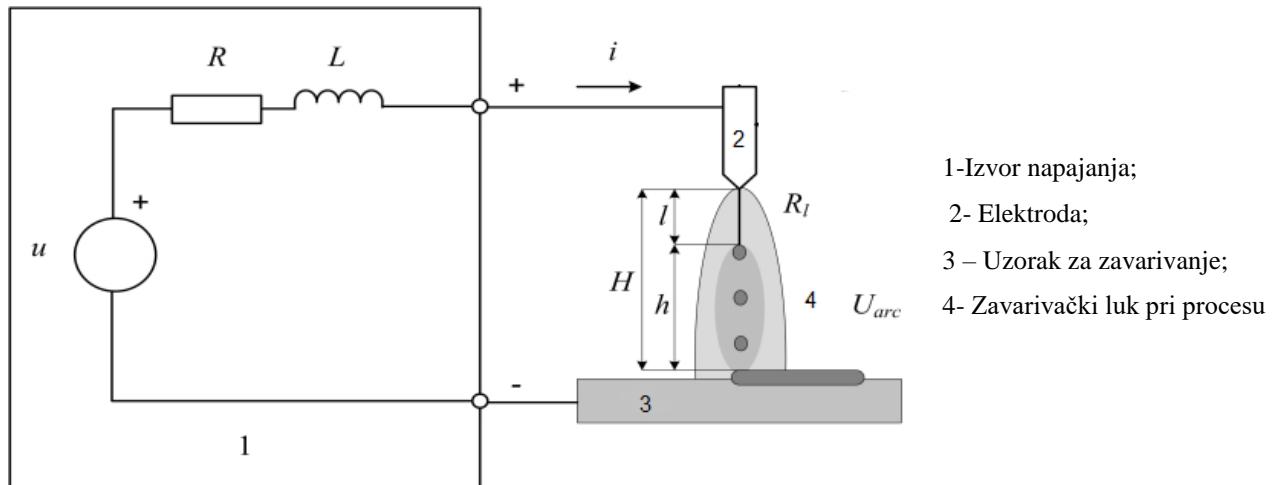


Figure 1. Osnovni elementi strujnog kruga za zavarivanje

1.1 Proces zavarivanja REL postupkom

U procesu zavarivanja obloženom elektrodom (REL postupkom) predstavlja se strujni krug s upravljačkim naponom u kao ulaznom varijablom. Strujni krug zavarivanja čini izvor napajanja sa svojim vrijednostima induktiviteta L i otpora R , dok je struja zavarivanja i , R_l otpor elektrode (stick-out) koji sudjeluje u zavarivanju koji se tali, U_{arc} – napon električnog luka.

Vrijednost električnog otpora dijela elektrode (stick-out) ovisi o spec. otporu materijala elektrode ρ , presjeku elektrode A i duljini l elektrode koja sudjeluje u procesu zavarivanja.

Električni otpor elektrode R_l računa se prema izrazu (1.1):

$$R_l = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1.1)$$

Otpor elektrode R_l ovisi ukupnoj dužini elektrode l i dijelu elektrode koji se tali tj. prelazi u kapljice $l=l_s+l_d$. Dinamika taljenja elektrode, tj. smanjenja njene duljine l_s ovisi o brzini pomicanja elektrode v_e i brzini taljenja v_m vertikalnoj brzini v_c „stiskanja“ elektrode na uzorak.

Vrh elektrode koji sudjeluje u procesu zavarivanja udaljen je od uzorka za visinu H ako se isključi ($l_d=0$, i $l=l_s$), dužina električnog luka prema slici jedan dobije se izrazom (1.2):

$$h = H - l \quad (1.2)$$

Dinamika „stick-outa“ taljenja elektrode računa se prema (1.3) izrazu:

$$\frac{dl}{dt} = v_e - v_m + v_c. \quad (1.3)$$

Sređivanjem izraza 1.2 i 1.3 dobije se izraz za duljinu električnog luka:

$$\frac{dh}{dt} = v_m - v_e - v_c \quad (1.4)$$

Iraz 1.4 predstavlja model, brzinu taljenja v_m elektrode i napon električnog luka U_{arc} koji je potrebno opisati detaljnije. Prilikom zavarivanja struja teče kroz elektrodu, ona istu zagrijava, povećavajući joj električni otpor.

Model električnog luka pri shemi tj. slici 1, možemo dati izrazom (1.5):

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + i \cdot R_l + U_{arc}. \quad (1.5)$$

Prilikom zavarivanja struja teče kroz elektrodu, ona istu zagrijava, povećavajući joj električni otpor.

Jednostavniji model napona električnog luka dobije se prema izrazu (1.6)

$$\mathbf{u}_{arc} = \mathbf{u}_{a+c} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{h} + \mathbf{i} \cdot \mathbf{R}_{arc} \quad (1.6)$$

Napon koji utječe na trošenje elektrode dobije se sređivanjem izraza 1.5 do 1.6. i iznosi:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + L \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{\rho}{A} \cdot l + \mathbf{u}_{a+c} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{h} + \mathbf{i} \cdot \mathbf{R}_{arc} \quad (1.7)$$

1.2 Način rada transformatora

Princip rada transformatora može se opisati na slijedeći način, energiju iz pojne mreže preuzima primarni namot te se posredstvom magnetskog toka u jezgri prenosi u sekundarni namot s iznosom struje i napona različitim od primarnog (slika 2.).

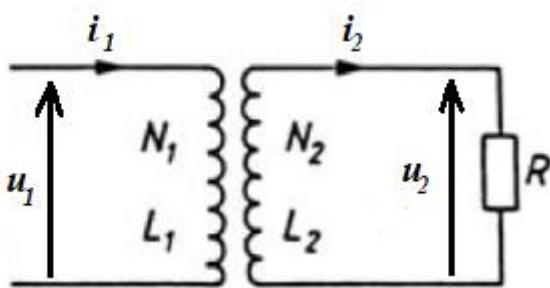


Figure 2. Idealni transformator

Primarni izmjenični napon $u_1(t)$ proizvodi pomoću zakona indukcije (Faradayev) magnetski tok sinusnog oblika u namotu primara:

$$\mathbf{u}_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.8)$$

koji na namotu sekundara induciran napon $u_2(t)$:

$$\mathbf{u}_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.9)$$

U idealnom dvonamotnom transformatoru sa željeznom jezgrom i magnetski ulančanim namotima bez gubitaka u jezgri, omjer transformacije praktički je jednak broju zavoja njegovih namota:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{I_2}{I_1} = n \quad (1.10)$$

pri čemu je prividna snaga primara i sekundara ista:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = S_2 = U_2 \cdot I_2 \quad (1.11)$$

iz čega se dobiva da je omjer efektivnih vrijednosti struja obrnuto proporcionalan prijenosnom omjeru:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{n} \quad (1.12)$$

Uz pomoć Faradewayevog zakona i izraza za magnetsku indukciju dobiven je izraz:

$$U = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot A_{Fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (1.13)$$

iz kojeg se po zakonu sličnosti transformatora može dobiti izraz za početni napon po zavoju koji je potreban kao početna vrijednost u traženju projektnog rješenja:

$$A_{Fe} = C_{Fe} \cdot \sqrt{\frac{S_N}{n_J \times f}} \cdot 10^3 \quad (1.14)$$

gdje su:

U [V] ...inducirani napon

f [Hz] ...frekvencija [50 Hz]

N [-] ...broj zavoja

B [T] ...magnetska indukcija [1,7 T]

A_{Fe} [cm²] ... presjek jezgre aktivnog dijela

C_{Fe} [cm²(V A s)^{1/2}] ...konstanta jezgre za optimalni omjer masa željeza i bakra (između 4 i 6) [4,4] za odabranu mag. indukciju od 1,7 T.

S_N [MVA] ...nazivna snaga

n_J [-] ...vrsta jezgre

$n_J = 1$ za jednofaznu jezgru ogrnutog tipa

$n_J = 2$ za jednofaznu jezgru jezgrastog tipa

$n_J = 3$ za trofaznu jezgru.

Uvrštavanjem izraza (1.13) u (1.14):

$$\frac{U}{N} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot B \cdot C_{Fe} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_J \cdot f}} \cdot \sqrt{S_N} \cdot 10^{-4} \cdot 10^3 \quad (1.15)$$

Za odabране iskustvene vrijednosti dobiven je izraz za napon po zavoju:

$$\frac{U}{N} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot 50 \cdot 1,7 \cdot 4,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 50}} \cdot \sqrt{S_N} \cdot 10^{-4} \cdot 10^3 \quad (1.16)$$

$$\frac{U}{N} = 13,5 \cdot \sqrt{S_N} \quad (1.17)$$

Rad na visokoj frekvenciji (kHz) omogućuje smanjenje veličine transformatora u odnosu na 50/60 Hz, zbog izraza Faradayeva zakona.

$$E = \frac{2\pi f N_a B}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot N_a \cdot B \quad (1.18)$$

Povećanjem frekvencije broj namota po voltu N/E koji je proporcionalan količini bakra korištenog u namotu i a, presjek jezgre može biti reduciran. Korištenjem viših frekvencija transformatori može biti fizički puno manji, (iako je odgovarajući materijal Fe-jezgre, kao što je feritni), pri manjoj gustoći toka jezgra može prenijeti više snage bez postizanja zasićenja i manji broj namotaja (iako je smanjen otpor primarnog i sekundarnog namotaja). Međutim specifični gubici jezgre [W/kg], također i „skin efekt“ povećavaju se s povećanjem frekvencije.

Uređaji za elektrolučno zavarivanje uglavnom se napajaju iz mreže napona 400/230 V, 50 Hz, u kojima transformator galvanski odvaja napon mreže (400/230 V) od napona 50 V kojim se provodi elektrolučno zavarivanje. Da bi se osigurao stabilan električni luk, transformator za zavarivanje treba imati veliku induktivnost, što znači da bi trebao imati povećanu masu. Na frekvencijama mreže od 50 Hz, transformatori su povećanih izmjera, što dovodi i do većih gubitaka, pogotovo u jezgri [4].

Prednosti VF pretvarača je smanjena težina, učinkovitost je 85-90 %, poboljšano djelovanje na mrežu, jer imamo priključen ispravljač, a ne trafo na 50 Hz, čime se smanjuje $\cos \phi$.

Zbog veće valovitosti izlazne struje zavarivanja na nižim frekvencijama (iz višestrukih pretvarača), ubacuje se prigušnica kako bi se valovitost struje zavarivanja smanjila, no time bi se povećala sama masa cjelokupnog uređaja za zavarivanje. Masa takvih uređaja za zavarivanje iznosi oko 100 kg, veličine 32 inch-a ($0,8 \times 0,8$ m kutija).

Alternativno mogu se koristiti visokofrekventni pretvarači [4]. Naprednija energetska elektronika koristi rezonantan pretvarač, koji imaju manje prekidne gubitke sklapanja na visokim frekvencijama prebacivanja, čime se smanjuje veličina pasivne komponente, poboljšavajući time energetske uvjete na mrežu rada pretvarača. Postoje razni tipovi pretvarača. Izmjenična struja glavnog napajanja je ispravljena i filtrirana. Kontrolirani PWM signal u oscilatoru dostiže frekvenciju do 30 kHz, (pretvarajući tako istosmjerni u pulsirajući napon).

Kontrolirani signal pogoni izlazne tranzistore (koji su u pulsirajućem modu) na primaru isporučuju visok napon, a malu struju. Na izlazu transformatora dobije se visoko frekventna jakost struje velikog iznosa i niske vrijednosti napona koji je upotrebljiv za zavarivanje. Kao rezultat visoke frekvencije na primaru, transformator nije samo manji po dimenzijama nego ima i nisku apsorpciju.

2 IZMJENJIVAČKI IZVOR ZA ZAVARIVANJE

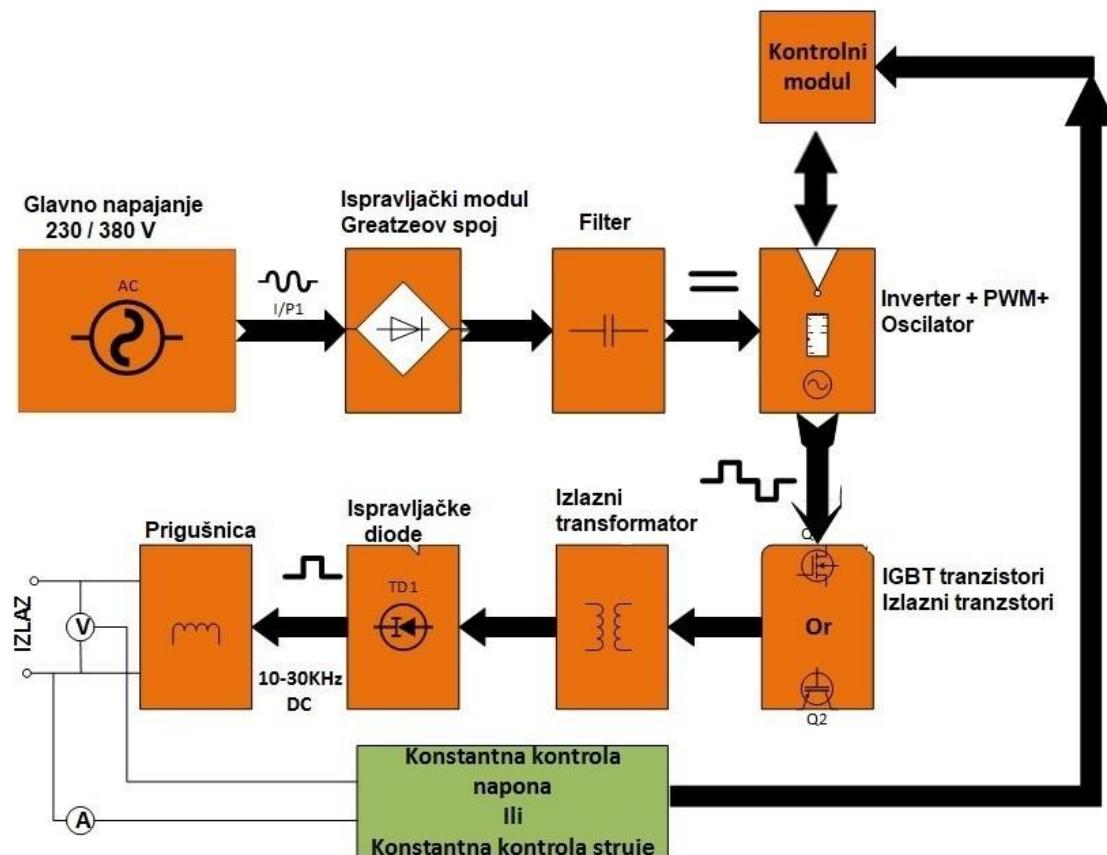


Figure 3. Blok dijagram izmjenjivačkog izvora napajanja

Izmjenjivački uređaj za zavarivanje koristi ispravljački modul za pretvorbu izmjeničnog napona u istosmjerni napon. Brzim uključenjem MOSFET (S_1 i S_2) i isključenjem kreira se pulsna, visoko frekventna istosmjerna struja. Tipični frekventni opseg se kreće između 10 kHz i 30 kHz, premda je moguće generirati i frekvencije preko 100 kHz. Ova visoko-frekventna, jakost struje malog iznosa dovodi se na primar transformatora posebno prilagođene jezgre, gdje se transformira u visoko strujni, nisko-naponski pulsirajući istosmjerni izvor energije, prije nego što se ponovno ispravi. Upravo ovdje nastaje velika prednost izmjenjivača nad klasičnim uređajima za zavarivanje.

Izmjenična struja glavnog napajanja je ispravljena i filtrirana pretvarajući izmjeničnu struju u istosmjernu struju. Kontrolirani PWM signal u oscilatoru dostiže frekvenciju do 30 kHz, (pretvarajući tako istosmjerni u pulsirajući napon). Kontrolirani signal pogoni izlazne tranzistore (koji su u pulsirajućem modu) na primaru isporučuju visok napon, a malu struju. Na izlazu transformatora dobije se visoko frekventna jakost struje velikog iznosa i niskog napona koji je upotrebljiv za zavarivanje. Kao rezultat visoke frekvencije na primaru, transformator nije samo manji po dimenzijama nego ima i nisku apsorpciju. Ispravljačke diode ispravljaju napon sekundara i preko filtera dobije se upotrebljiv napon, povratnom vezom osigurava se konstantna usporedba vrijednosti parametara za zavarivanje koju upravlja procesor.

Kontrola PWM signala i oscilatora vrši se uvijek na dva načina, analognim i digitalnim putem. Novije generacije uređaja za zavarivanje (Fronius, Kempf, Esab i dr.), koriste mikrokontrolere i procesore sa već zadanim parametrima zavarivanja, te je sam proces podignut na viši nivo, i prilagođen za manje iskusne zavarivače.



Figure 4. Unutrašnjost izvora za zavarivanje REL postupkom, proizvođača Fronius

Izmjenjivački izvori koriste fizičku zakonitost koja povezuje frekvenciju transformiranog napona i veličinu jezgre. Prema toj zakonitosti, što je viša frekvencija, transformator će biti manji. Na primarnoj strani izvora struje nalazi se sklop za pretvorbu frekvencije, koji mrežnu frekvenciju (obično 50 Hz) podiže na 50 – 100 kHz. Napon koji sada ima visoku frekvenciju, mora se sniziti na veličinu prikladnu za zavarivanje.

Za oba načina zavarivanja potreban je transformator koji će pretvoriti ulaznu struju na odgovarajuću struju za zavarivanje, s tim što je s izmjenjivačkim načinom mnogo efikasnije na visokoj frekvenciji, te je rezultat mnogo manji transformator koji smanjuje veličinu i težinu samog uređaja. Energija potrebna za čitav proces se daleko smanjuje (do 40 %), zato što efikasniji transformator gubi manje energije za zagrijavanje, tako se na tipičnoj mreži napona 230 V moguće postići veću jakost struje zavarivanja. Na taj način, zbog veće frekvencije izlazne struje, izmjenjivački aparati za zavarivanje ostvaruju „mekšu“ ravnomjerniju karakteristiku tijekom procesa zavarivanja.

Druga prednost je konstantan monitoring i regulacija struje i napona tijekom procesa zavarivanja, što za posljedicu ima rezultat uštede na elektrodama (ARC), žici za zavarivanje (MIG - Metal Inert Gas), kao i zaštitnom plinu (TIG – Tungsten Inert Gas), elektrolučno zavarivanje metaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina. Kontrola izlaznih karakteristika može biti različita.

3 EKSPERIMENTALNI DIO

Na izmjenjivačkom uređaju za zavarivanje proizvođača Fronius, izvršeno je snimanje valnih oblika napona. Na jednom od četiri tranzistora izvršeno je snimanje prikazano na sljedećim slikama.

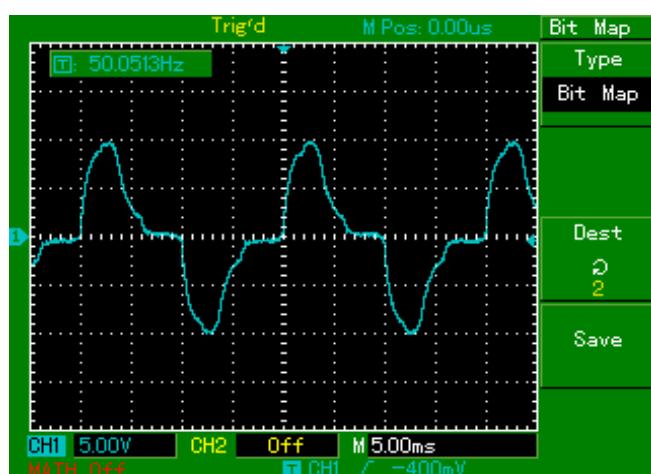


Figure 5. Valni oblik ulaznog napona tranzistora

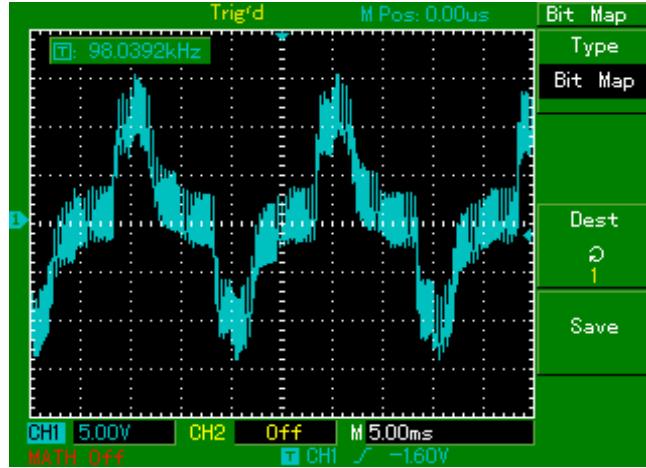


Figure 6. Valni oblik izlaznog napona iz tranzistora.

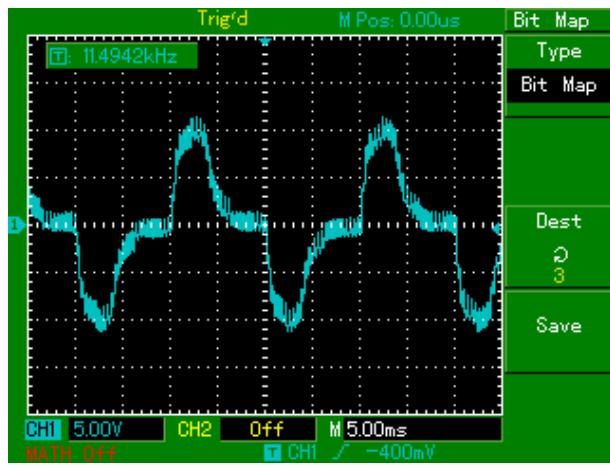


Figure 7. Valni oblik upravljačkog napona

Povećanjem frekvencije broj namota po voltu N/E koji je proporcionalan količini bakra korištenog u namotu i a, presjek jezgre može biti reduciran. Korištenjem viših frekvencija transformatori može biti fizički puno manji, (iako je odgovarajući materijal Fe-jezgre, kao što je feritni), pri manjoj gustoći toka jezgra može prenijeti više snage bez postizanja zasićenja i manji broj namotaja (iako je smanjen otpor primarnog i sekundarnog namotaja). Međutim specifični gubici jezgre [W/kg], također i „skin efekt“ povećavaju se s povećanjem frekvencije.

Table 1. Ovisnosti promjene frekvencije napojne mreže transformatora o njegovim dimenzijama.

f [Hz]	S_n [MVA]	n_j	C_{Fe} [$\text{cm}^2(\text{V A s})^{1/2}$]	A_{Fe} [cm^2]	$a=b$ [cm]
50	0,0055	2	4,4	32,63	5,71
60	0,0055	2	4,4	29,79	5,46
100	0,0055	2	4,4	23,07	4,80
500	0,0055	2	4,4	10,32	3,21
1000	0,0055	2	4,4	7,30	2,70
5000	0,0055	2	4,4	3,26	1,81
10000	0,0055	2	4,4	2,31	1,52
15000	0,0055	2	4,4	1,88	1,37
20000	0,0055	2	4,4	1,63	1,28
30000	0,0055	2	4,4	1,33	1,15

Iz tablice 1. vidljivo je da transformator na nižim frekvencijama (50 Hz) ima veću površinu Fe jezgre, a time i veću masu. Vrijednost površine Fe jezgre A_{Fe} računa se prema izrazu 1.14. čije su vrijednosti date u tablici. Vrijednost $a=b$ mjere su dimenzija stupca (slika 8).

Uređaji za elektrolučno zavarivanje uglavnom se napajaju iz mreže napona 400/230 V, 50 Hz, u kojima transformator galvanski odvaja napon mreže (400/230 V) od napona 50 V kojim se provodi elektrolučno zavarivanje. Da bi se osigurao stabilan električni luk, transformator za zavarivanje treba imati veliku induktivnost, što znači da bi trebao imati povećanu masu. Na frekvencijama mreže od 50 Hz, transformatori su povećanih izmjera, što dovodi i do većih gubitaka, pogotovo u jezgri [4].

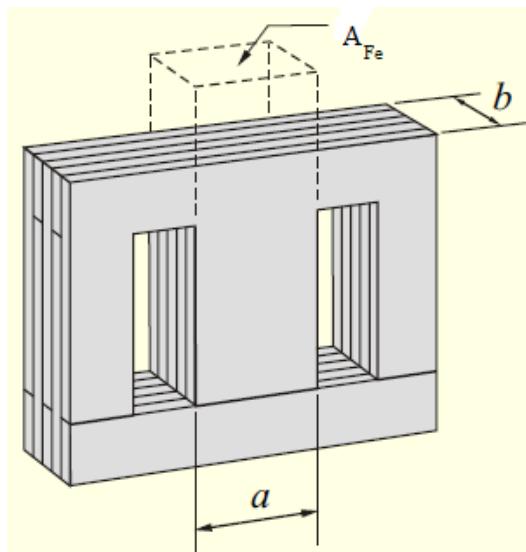


Figure 8. Jezgra mrežnog transformatora sklopljena od E i I limova

Zbog veće valovitosti izlazne struje zavarivanja na nižim frekvencijama (iz višestrukih pretvarača), ubacuje se prigušnica kako bi se valovitost struje zavarivanja smanjila, no time bi se povećala sama masa cjelokupnog uređaja za zavarivanje

4 ZAKLJUČAK

U ovome radu prikazane su građe izvora za zavarivanje od klasičnih izvora s transformatorom na 50 Hz, mase stotinjak kilograma što ovisi o snazi pojedinih izvora do visokofrekventnih transformatora kojima masa opada s porastom frekvencije upravljanja, prikazan proračun u tablici 1.

U novije vrijeme kako cijena elektroničkih komponenti opada, povećana je pouzdanost u radu, a lagana im je dostupnost nabave sve se više prelazi na uređaje za zavarivanje kojima se upravlja pomoću mikroprocesora i komponentama energetske elektronike, dobivajući time stabilan električni luk pri zavarivanju u različitim radnim točkama, dobivajući tome bolju energetsku učinkovitost samih uređaja za zavarivanje.

Također su prikazani valni oblici napona na jednom od četiri upravljačka IGBT tranzistora, iz kojih je vidljivo da prema obliku su slični, dok iznos vrijednosti napona uvelike se razlikuje od napona ulaza i napona izlaza.

Povećavajući frekvenciju okidanja tranzistora dobijemo na smanjenju mase transformatora, smanjenju omskog otpora namota time i gubitaka u bakru koji se pretvaraju u Joule-ovu toplinu, međutim treba paziti na gubitke „skin“ efekta i specifičnih gubitaka u jezgri. Zbog smanjene mase samih uređaja lakša je mobilnost istih što je u industriji izuzetno bitno, zbog sitnih popravaka kod zavarivanja i terenskih poslova, a najbitnije je da je cijena uređaja prihvatljivija.

5 LITERATURA

- [1] K. L. Moore, D. S. Naidu, R. Yender, J. Tyler, “Arc Welding Control: Part 1 – Modelling and Analysis”, *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, vol. 30, pp. 3101–3111, 1997. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S0362-546X\(97\)00372](http://dx.doi.org/10.1016/S0362-546X(97)00372)
- [2] K. L. Moore, D. S. Naidu, S. Ozcelik, *Modelling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding*. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd., 2003.
- [3] M. Golob, A. Koves, A. Puklavec, B. Tovornik, “Modelling, simulation and fuzzy control of the GMAW process”, in *Conf. Proc. 15th Int. Federation of Automatic Control (IFAC)*

- *Triennial World Congress on Automatic Control*, Barcelona, Spain, 2002, vol. 13, pp.253–258.
- [4] J. Scemeliovas, “Determination of Optimal Pulse Current for Arc Welding”, *Elektronika Ir Elektrotechnika*, no. 7, pp. 87–90, 2009.
- [5] M. D. Ngo, V. H. Duy, N. T. Phuong, H. K. Kim, S. B. Kim, “Development of digital gas metal arc welding system”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, no. 1–3, pp. 384–391, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec>. 2007.02.010
- [6] J. Tusek, M. Suban, “Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, pp. 185–192, 2001. [Online].
- [7] C. Aghion, O. Ursaru, “Three-Phase inverter Controlled by ISCPWM and DPWM-S1”, *Elektronika Ir Elektrotechnika*, no. 3, pp. 87–90, 2012.
- [8] O. Krejcar, I. Spicka, R. Frischer, “Implementation of Full-Featured PID Regulator in Microcontrollers”, *Elektronika Ir Elektrotechnika*, no. 7, pp. 77–82, 2011.
- [9] A. Petrovas, S. Lissauskas, R. Rinkeviciene, “Digital Automatic Control System with PID Controller”, *Elektronika Ir Elektrotechnika*, no. 4, pp. 13–16, 2011.
- [10] Fronius, Wels, Austria, 2017. www.fronius.com