

ANALIZA VARILNEGA TRANSFORMATORJA ZA POTREBE RAZVOJA ROBOTSKEGA UPOROVNEGA TOČKOVNEGA VARJENJA

Robert Brezovnik, Jožef Ritonja

Izvleček:

V avtomobilski industriji se množično uporabljajo sistemi za uporovno točkovno varjenje za varjenje avtomobilskih karoserij, pri katerih je varilni transformator nameščen na premikajočem se robotu, zato je teža transformatorja pomemben dejavnik. Težo transformatorja lahko znižamo z višjo napajalno frekvenco, saj lahko uporabimo manjši presek železnega jedra in posledično navitij, kar precej zmanjša težo transformatorja. Višja napajalna frekvenca transformatorja pa onemogoča doseganje enake najvišje vrednosti varilnega toka pri enakem bremenu. Prispevek se osredotoča na modeliranje sistema za uporovno točkovno varjenje in na analizo frekvenčne odvisnosti največje vrednosti varilnega toka pri istem bremenu. Prispevek prav tako obravnava razloge za izgubo prevajalnega razmerja in frekvenčno odvisnost zmanjšanja efektivnega prevajalnega razmerja z višanjem napajalne frekvence.

Ključne besede:

uporovno točkovno varjenje, transformator, DC-DC-pretvornik, pulznoširinska modulacija, prevajalno razmerje, vezni model

1 Uvod

Sistemi za uporovno točkovno varjenje (UTV) se uporabljajo za spajanje pločevin, aluminija in drugih električno prevodnih tankih materialov, zato se najbolj množično uporabljajo v avtomobilski industriji za varjenje avtomobilskih karoserij (*slika 1*). Pogosto se uporabljajo tudi v letalski in železniški industriji, pri sestavljanju kovinskega pohištva, sestavljanju baterijskih celic za električna vozila in drugih podobnih aplikacijah, kjer je treba trajno zagotoviti trden in zanesljiv spoj dveh relativno tankih prevodnih materialov [1]. Za spajanje pločevin se uporabljajo tudi druge metode, kot so vijachenje, kovičenje, klasično varjenje z oblokom, lasersko varjenje, ne nazadnje pa tudi lepljenje. Vsaka od naštetih metod ima svoje prednosti in slabosti, vendar se UTV predvsem v avtomobilski industriji množično uporablja že več kot 100 let predvsem zaradi možnosti avtomatizacije procesov UTV s pomočjo robotov.



Slika 1: Uporovno točkovno varjenje karoserije avtomobila BMW serije 3 (Vir: wikipedia [2])

Izdelava sodobnega avtomobila na avtomatiziranih in robotiziranih tekočih trakovih danes traja v povprečju od 18 do 35 ur, pri tem ima spajanje pločevine s pomočjo UTV pomembno vlogo, saj sestava avtomobila zahteva približno od 4 do 6 tisoč varov. Sodobna avtomobilska tovarna ima zaradi tega veliko število robotov, od katerih je določen delež namenjen zgolj za UTV. Po podatkih mednarodnega združenja za robotiko (International Federation of Robotics [3]) je bilo samo v letu 2021 po vsem svetu na novo nameščenih več kot 517.000 novih indu-

Dr. Robert Brezovnik, univ. dipl. inž., **prof. dr. Jožef Ritonja**, univ. dipl. inž., oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

strijskih robotov, kar predstavlja rekordno vrednost in kar 31 % letno rast. V svetovnem merilu je danes v industriji delujočih več kot 3,5 milijona industrijskih robotov, kolikšen delež je namenjen izključno za UTV, je težko oceniti.

Sisteme z UTV lahko razdelimo v dve skupini [4]. V eno skupino spadajo varilni sistemi, ki za napajanje varilnega transformatorja (TR) uporabljajo enofazno izmenično napetost in tok [5]. Takšni sistemi imajo relativno preprosto strukturo, ampak nizko napajalno frekvenco omrežja (50 Hz ali 60 Hz) in nizek faktor delavnosti [6]. Nizka napajalna frekvenca zahteva relativno velik presek železnega jedra TR, kar pomeni tudi veliko težo, zato se uporabljajo predvsem za stacionarne varilne sisteme. V drugo skupino spadajo varilni sistemi, ki za napajanje varilnega TR uporabljajo trifazno izmenično napetost in srednjefrekvenčni TR s prigradenim polnovalnim usmernikom na izhodu, ki zagotavlja enosmerni varilni tok. Ti sistemi imajo kompleksnejšo strukturo in visoko frekvenco napajanja TR, ki lahko znaša od 1 kHz do več kot 20 kHz [7], vendar so dražji. Vodenje enosmerne varilnega toka se zagotavlja s pulznoširinsko modulacijo (PŠM) s sredinsko umeščenimi pulzi.

Zaradi visoke napajalne frekvence varilnega TR v primerjavi s sistemi z izmeničnim varilnim tokom lahko z višanjem napajalne frekvence bistveno zmanjšamo potrebni presek železnega jedra varilnega TR. Zmanjšanje preseka železnega jedra TR pa hkrati bistveno zmanjša tudi težo jedra in navitij TR, saj se precej skrajša obseg ovojev navitij. Teža varilnega TR pa je pomembna predvsem pri sistemih za UTV, kjer je varilni TR z varilnimi kleščami nameščen na premikajočem se robotu v proizvodni liniji in se tako premika skupaj z robotom (slika 1).

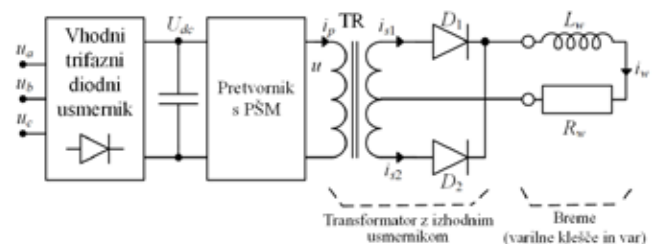
Premikanje robota s težkim varilnim TR in varilnimi kleščami zahteva ustrezno moč robota in porabo električne energije, ki se lahko zmanjša z lažjim varilnim TR, ki ga napajamo z višjo frekvenco napajalne napetosti. Žal pa se z višanjem frekvence napajalne napetosti varilnega TR pojavljajo tudi negativni vplivi, saj z naraščanjem frekvence upada največja vrednost enosmerne varilnega toka, ki ga lahko tak sistem doseže, pri istem bremenu. V tem prispevku je obravnavan vpliv frekvence napajalne napetosti varilnega TR in vrednosti parametrov nadomestnega vezja sistema za UTV na velikost največjega varilnega toka, ki ga lahko ta sistem doseže pri isti vrednosti bremena [8]. Pojasnjena je tudi izguba efektivnega prevajalnega razmerja D_e glede na nastavljeno prevajalno razmerje D pri pulznoširinski modulaciji, saj izguba prevajalnega razmerja narašča z naraščanjem frekvence.

V članku so najprej opisani sistem za uporovno točkovno varjenje, njegove osnovne komponente in merilna oprema (poglavje 2), nato je predstavljeno modeliranje osnovnih komponent in določanje vre-

dnosti parametrov modela (poglavje 3). Na osnovi modela so predstavljeni numerični izračuni, na katerih temelji analiza vpliva napajalne frekvence na velikost varilnega toka (poglavje 4), in končni rezultati analize (poglavje 5).

2 Opis sistema za uporovno točkovno varjenje

V tem prispevku je obravnavan sistem za UTV, ki sodi v prej obravnavano drugo skupino varilnih sistemov, ki izkoriščajo trifazno izmenično napajalno napetost in zagotavljajo visok enosmerni varilni tok. Taki sistemi se običajno uporabljajo v avtomobilski industriji za varjenje karoserij in so v grobem sestavljeni iz naslednjih komponent (slika 2): trifaznega polnovalnega diodnega usmernika, ki zagotavlja vir enosmerne napetosti, ki jo s pomočjo frekvenčnega pretvornika in PŠM pretvorimo v izmenično pravokotno napetost, s katero napajamo varilni TR, ki ima na sekundarni strani navitje s sredinskim odcepom, na katerega je priključen diodni usmernik. Naloga diodnega usmernika na sekundarni strani TR je usmeriti izmenično v enosmerno napetost, ki preko varilnih klešč in elektrod dovaja velik enosmerni varilni tok na mesto, kjer želimo spojiti dve pločevini.



Slika 2 : Osnovni elementi sistema za uporovno točkovno varjenje

Frekvenčni pretvornik s polnovalnim diodnim usmernikom je običajno stran od robota, na katerem je nameščen varilni TR z varilnimi kleščami, zato sta frekvenčni pretvornik in varilni TR lahko povezana z daljšim kablom, ki lahko v dolžino meri tudi več kot 30 metrov, zato njegov vpliv ni zanemarljiv in ga je treba ustrezno upoštevati pri modeliranju.

2.1 Trifazni polnovalni usmernik z gladilnimi kondenzatorji in frekvenčni pretvornik

Za laboratorijske raziskave TR za UTV je bil posebej izdelan frekvenčni pretvornik (slika 3), ki mu je možno spreminjati vse ključne parametre. Kupljene industrijske izvedbe so običajno zaprtega tipa z le malo možnostmi sprememb parametrov in načina vodenja. Frekvenčni pretvornik je sestavljen iz trifaznega napajalnega priključka, ki je povezan na



Slika 3 : Po meri izdelan laboratorijski frekvenčni pretvornik

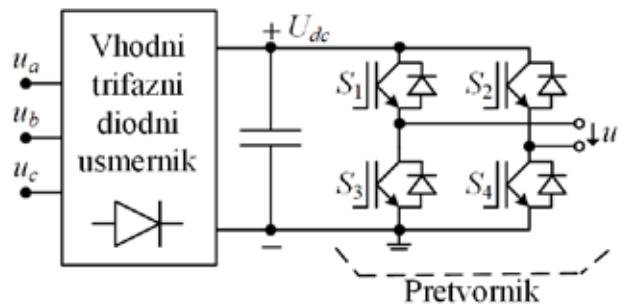
trifazni polnovalni diodni usmernik (SKKD 162/16 Semicron), ki skupaj z gladilnimi kondenzatorji s kapacitivnostjo 2 mF zagotavlja enosmerni vir napetosti približne vrednosti 560 V.

Pri zagotavljanju visokega varilnega toka se enosmerna napetost frekvenčnega pretvornika lahko sesede tudi za 80 V, kar je za analize delovanja TR neugodno, zaradi tega želimo čim višjo skupno kapacitivnost kondenzatorjev. Enosmerno napetost razsmerimo s pomočjo štirih stikalnih tranzistorjev (S_1 do S_2), ki sta po dva vezana zaporedno in med katera priključimo primarno navitje varilnega TR (slika 4).

Na sliki 3 frekvenčnega pretvornika stikalni tranzistorji niso vidni, saj se nahajajo pod kovinsko ploščo, sestavljata pa ga dva Semikronova IGBT-modula SKiiP 642GB-120-2WD, kjer vsak modul vsebuje dva IGBT-ja. Posamezni modul lahko obratuje do frekvence 20 kHz, pri največji napetosti enosmerne vodila 900 V in prevaja tokove do 600 A. Modul že vsebuje zaščito proti vklopu dveh tranzistorjev v isti veji ter tokovno in temperaturno zaščito, prav tako pa je vodno hlajen. Stikalne tranzistorje vedno odpiramo diagonalno (S_1 in S_4 ali S_2 in S_3) in tako zagotovimo na primarnem navitju varilnega TR pozitivno ali negativno vrednost enosmerne napetosti $U_{dc} = 560$ V. Signale za odpiranje in zapiranje stikalnih tranzistorjev zagotavljamo s pomočjo krmilnega sistema dSpace DSP1103, ki ima poseben izhod za PŠM, katere frekvenco lahko nastavljamo največ do 10 kHz, prevajalno razmerje D pa spreminjamo od 0 do 1.

2.2 Varilni TR s prigradenim polnovalnim usmernikom na sekundarju

V prispevku je obravnavan varilni TR podjetja BOSCH Rexroth s kataložsko oznako PSG 6130 RSTK, ki je prikazan na sliki 5. Iz nazivnih podatkov TR je razvidno [9], da je napajalna napetost primarnega navitja 530 V frekvence 1 kHz, sekundarna napetost brez obremenitve znaša 8,9 V, trajni varilni tok pri 100 % prevajalnem razmerju pa znaša 6,5 kA. Ker je nazivna navidezna moč 130 kVA, se lahko varilni



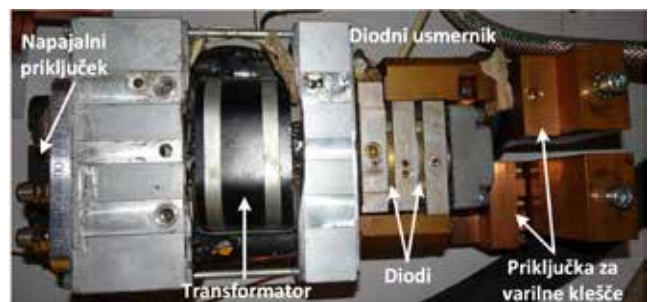
Slika 4 : Vhodni usmernik z enosmerno napetostjo vodila in s stikalnimi tranzistorji

tok bistveno poveča tudi na 25 kA, če se ustrezno zmanjša čas trajanja varjenja in je upornost bremena dovolj nizka. Prestavno razmerje števila obojev med primarnim in sekundarnim navitjem znaša 55 : 1. Dolžina, širina in višina TR so 332 mm, 150 mm in 106 mm, teža znaša 15,1 kg, vodno hlajenje pa zahteva pretok 6 l/min.

Za laboratorijsko analizo TR potrebujemo dostop do posameznih delov TR in izhodnega diodnega usmernika, za ta namen se odstrani ohišje TR, kar je prikazano na sliki 6 z oznakami posameznih elementov. Izhodni diodni usmernik vsebuje dve diodi tipa 56DNO6B01 podjetja Infineon, ki sta okrogle oblike s premerom 50 mm in debelino 5 mm. Dovoljena velikost toka diode je odvisna tudi od časa trajanja prevajanja, krajši, kot je čas prevajanja, višjo



Slika 5 : Varilni transformator PSG 6130 RSTK (Vir: katalog podjetja BOSCH Rexroth)



Slika 6 : Varilni transformator z odstranjenim ohišjem za prikaz notranjosti

vrednost toka lahko dosežemo, kar je povezano s hlajenjem. Pri laboratorijskih meritvah čas trajanja varjenja ni presegal 50 ms, velikost efektivne vrednosti varilnega toka pa ni presegala 25 kA. Masivni bakreni in aluminijasti deli TR (sekundarni ovoji) in diodnega usmernika v notranjosti vsebujejo kanale za vodno hlajenje, ki je aktivno v času izvajanja meritev.

2.3 Breme varilnega transformatorja – finožični vodnik

Pri dejanskih sistemih za UTV se velik varilni tok na izhodu varilnega TR z diodnim usmernikom s pomočjo varilnih klešč in elektrod dovede na mesto, kjer želimo ustvariti točkovni var. Naloga varilnih klešč ni samo dovajanje enosmernega varilnega toka, ampak tudi zagotavljanje ustrezno velike sile, s katero klešče stisnejo oba prevodna materiala na mestu varjenja. Velikost sile in velikost varilnega toka morata biti ustrezno določena, saj to vpliva na kakovost vara. Pri laboratorijskih analizah sistema za UTV se uporablja nadomestek varilnih klešč v obliki finožičnega vodno hlajenega vodnika dolžine 2,1 m s premerom 27 mm (z izolacijo 35 mm), ki je prikazan na *sliki 7*. Finožični vodnik ima približno enake vrednosti induktivnosti in ohmske upornosti, kot je skupna ohmska upornost varilnih klešč, varilnih elektrod in materiala na mestu varjenja.

2.4 Merilna oprema

Za izvajanje laboratorijskih meritev na sistemu za UTV je zahtevana posebna merilna oprema, saj imamo opravka s hitrimi prehodnimi pojavi in velikimi tokovi, ki lahko presegajo 30 kA. Meritev toka na primarni strani TR se je izvajala s PEM Rogowski coil CWT 3 LFR (*slika 8*), ki omogoča merjenje to-



Slika 8 : Tuljavica Rogowski – PEM Rogowski coil CWT 3 LFR



Slika 7 : Breme varilnega TR v obliki vodno hlajenega finožičnega vodnika

kov do 600 A z natančnostjo 0,2 %. Meritve velikih tokov na sekundarni strani TR so se izvajale s PEM Rogowski coil CWT 150 LFR, ki omogoča merjenje tokov do 30 kA z natančnostjo 0,2 %.

Za merjenje visokih napetosti enosmernega vodila frekvenčnega pretvornika in primarne napetosti varilnega TR so bile uporabljene diferenčne sonde CHAUVIN ARNOUX DIFFERENTIAL PROBE DP 25, ki lahko merijo napetosti do 1000 V. Vse meritve tokov in napetosti so se izvajale z merilno opremo Dewetron DEWE-2600 (HSI), ki je sposobna zajemati podatke s hitrostjo 10 MS/s z visoko natančnostjo, neodvisno od velikosti merilnega območja. Merilni sistem v enem ohišju združuje računalnik s programsko opremo Dewesoft in merilni sistem s priključki na zadnji strani, ki mu lahko programsko nastavljamo merilno območje in filtriranje signalov.

3 Modeliranje sistema za uporovno točkovno varjenje

Da lahko izvajamo numerične izračune sistema za UTV in analiziramo njegovo dinamiko pri različnih vrednostih parametrov sistema, moramo najprej pripraviti ustrezne modele posameznih komponent (*slika 2*) in določiti vrednosti parametrov.

Vhodni trifazni diodni usmernik skrbi za zagotavljanje enosmerne napetosti vodila frekvenčnega pretvornika, vendar njegovo modeliranje ni smiselno, saj je napetost vodila dejansko odvisna od številnih vplivov, ki jih težko upoštevamo pri numeričnih izračunih. Zaradi tega raje upoštevamo, da je enosmerna napetost vodila konstantna vrednost $U_{dc} = 560$ V.

Frekvenčni pretvornik modeliramo kot konstantni vir enosmerne napetosti vodila U_{dc} s štirimi stikali, ki jih ustrezno odpiramo in zapiramo s pomočjo PŠM. Stikala so idealna z zanemarljivo vrednostjo upornosti v času prevajanja in z zelo visoko upornostjo v času, ko ni prevajanja. Tudi povratne zaščitne diode ob stikalih modeliramo na način, da je njihov vpliv glede padca napetosti zanemarljiv, torej z zelo niz-

ko povratno napetostjo in zanemarljivo upornostjo v prevodni smeri in zelo visoko upornostjo v zaporni smeri. Od frekvenčnega pretvornika do priključkov primarnega navitja TR vodi daljši napajalni kabel, ki ga modeliramo zgolj kot zaporedno upornost in induktivnost, saj je kapacitivnost zanemarljiva.

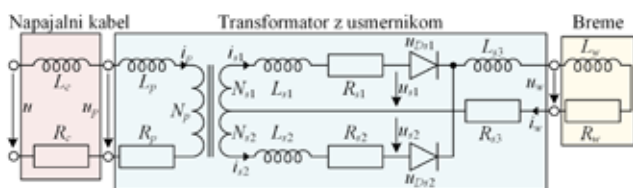
TR modeliramo zgolj z ustreznim upoštevanjem razsipanih upornosti in induktivnosti primarnega navitja ter sekundarnega navitja s sredinskim odcepom, saj upornosti in induktivnosti prevladujejo v primerjavi s kapacitivnostmi. Ustrezno upošteevamo tudi prestavno razmerje števila ovojev primarnega in sekundarnega navitja 55 : 1. Železnega jedra pri modeliranju ne upoštevamo, torej gre za idealni linearni TR brez izgub v železu in brez nasičenja. Izgube v železu TR so zanemarljive v primerjavi z izgubami v navitjih in diodah izhodnega diodnega usmernika, TR pa mora obratovati v linearnem delu magnetilne krivulje, v nasprotnem primeru se lahko primarni tok TR toliko poveča, da se aktivira tokovna zaščita.

Izhodni polnovalni diodni usmernik, priključen na sekundarno navitje TR, modeliramo z dvema diodama, ki prevajata električni tok samo v eni smeri, podano pa imata povratno napetost in upornost v prevodni smeri ter visoko upornost v zaporni smeri.

Breme na izhodu polnovalnega diodnega usmernika modeliramo kot zaporedno vezavo upornosti in induktivnosti finožičnega vodnika, ki je nadomestek za varilne klešče z elektrodami in upornostjo varjenca.

3.1 Določitev vrednosti parametrov nadomestnega vezja

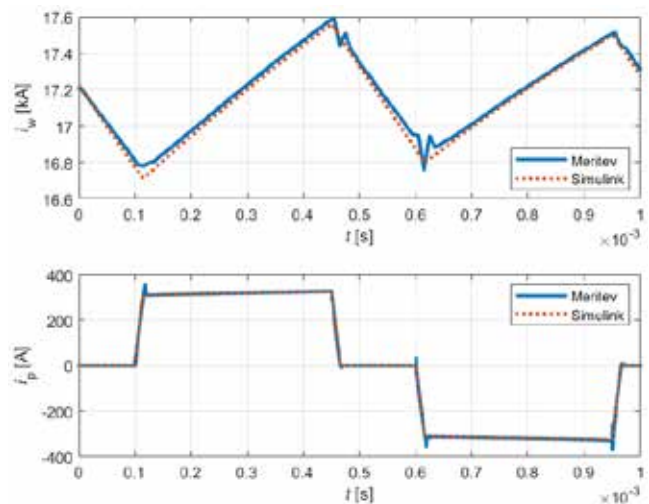
Iz opisa modeliranja sistema za UTV je razvidno, da je model v večini sestavljen iz upornosti in induktivnosti ter povratnih napetosti diod. Če sta podatka o nadomestni upornosti (0,037 mΩ) in povratni napetosti diode (0,66 V) izhodnega usmernika kataloška podatka, pa so upornosti in razsipane induktivnosti TR, bremena in priključnega kabla neznane vrednosti, ki jih je treba določiti (slika 9). V veznem modelu sta L_c in R_c induktivnost in upornost priključnega kabla med frekvenčnim pretvornikom in primarnim navitjem TR. Razsipana induktivnost in upornost primarnega navitja TR sta označeni z L_p in R_p . Razsipana induktivnost in upornost prvega se-



Slika 9 : Vezni model sistema za uporovno točkovno varjenje

kundarnega ovoja sta označeni z L_{s1} in R_{s1} , drugega sekundarnega ovoja pa z L_{s2} in R_{s2} . Skupni deli TR s sredinskim odcepom in diodnega usmernika, po katerih teče skupni varilni tok, so označeni s skupno razsipano induktivnostjo L_{s3} in upornostjo R_{s3} . Z L_w in R_w sta označena induktivnost in upornost bremena, ki je v našem primeru finožični vodnik.

Za določitev vrednosti parametrov veznega modela sistema za UTV smo uporabili optimizacijski algoritem [10, 11], ki deluje na osnovi roja delcev [12, 13] (Particle Swarm Optimization, kratica PSO). Za optimizacijski algoritem smo določili kriterijsko funkcijo, s pomočjo katere smo določili takšne vrednosti parametrov veznega modela, da je bil integral absolutnega odstopanja med izmerjenim in izračunanim časovnim potekom modela varilnega i_w in primarnega toka TR i_p v času ene periode čim manjši. Pri tem smo upoštevali eno periodo obeh



Slika 10 : Primerjava izmerjenih in z modelom izračunanih časovnih potekov tokov

Tabela 1 : Vrednosti parametrov veznega modela sistema za UTV

Opis	Parameter	Vrednost
Priključni kabel	L_c	3,8153 μH
	R_c	9,4 mΩ
Prim. navitje TR	L_p	2,5636 μH
	R_p	24,03 mΩ
1. sek. veja TR	L_{s1}	12 nH
	R_{s1}	27,7 μΩ
2. sek. veja TR	L_{s2}	14 nH
	R_{s2}	32,76 μΩ
Skupni deli obeh sekundarnih vej	L_{s3}	36,1 nH
	R_{s3}	56,2 μΩ
Breme	L_w	1,2981 μH
	R_w	220,52 μΩ

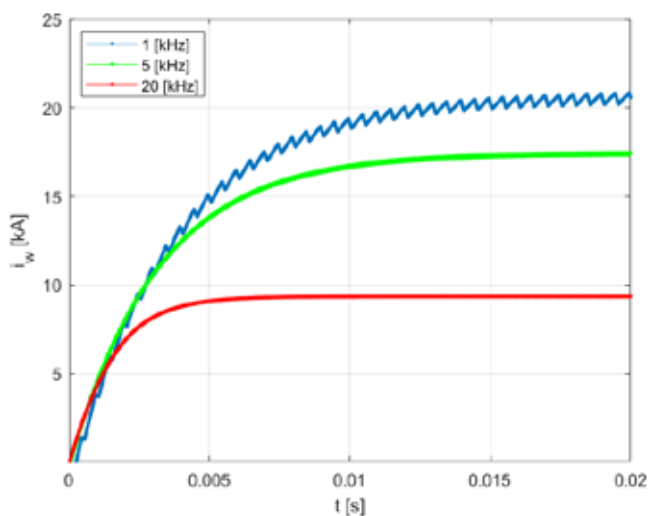
časovnih potekov tokov v stacionarnem stanju efektivne vrednosti varilnega toka i_w .

Na *sliki 10* je prikazana primerjava med izmerjenim in z modelom izračunanim časovnim potekom varilnega i_w in primarnega toka i_p varilnega TR, ki upošteva z optimizacijo pridobljene vrednosti parametrov modela, ki so podane v *tabeli 1*. Iz primerjave izmerjenih in izračunanih časovnih potekov tokov na *sliki 10* je razvidno, da je optimizacijski algoritem uspel doseči zelo dobro ujemanje obeh časovnih potekov tokov in da izbrani model sistema za UTV zelo dobro opisuje njegovo dinamiko, čeprav v modelu niso upoštevane kapacitivnosti sistema.

4 Analiza vpliva frekvence PŠM na velikost varilnega toka

S pomočjo modela so bili narejeni numerični izračuni odziva sistema za UTV pri različnih vrednostih frekvence napajalne napetosti, ki jo določimo s pomočjo PŠM. Na *sliki 11* je prikazana primerjava treh časovnih potekov varilnega toka pri treh različnih frekvencah PŠM, in sicer pri nazivni frekvenci 1 kHz, za katero je narejen TR, ter pri dveh višjih frekvencah 5 kHz in 20 kHz, prevajalno razmerje pa je v vseh primerih enako $D = 0,8$ oziroma 80 %. Vse ostale vrednosti parametrov modela sistema za UTV so ostale nespremenjene. Kot je razvidno s *slike 11*, se je vrednost varilnega toka v stacionarnem stanju bistveno znižala s povišanjem frekvence, pri 20 kHz se je tok znižal za približno 50 %.

Da bi bolje razumeli vpliv frekvence napajalne napetosti na vrednost varilnega toka v stacionarnem stanju, je treba natančneje pogledati časovne po-



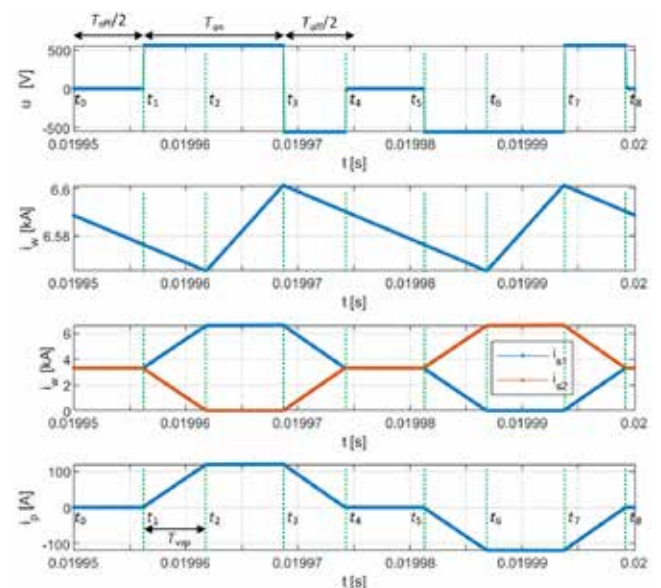
Slika 11 : Primerjava časovnih potekov varilnega toka i_w pri treh frekvencah PŠM in prevajalnem razmerju $D = 0,8$

teke tokov in napetosti v času ene periode, ko se varilni tok že ustali, kar je prikazano na *sliki 12*. Na prvem diagramu *slike* je prikazan časovni potek napetosti u na začetku priključnega kabla varilnega TR, na drugem diagramu je prikazan časovni potek varilnega toka i_w . Na tretjem diagramu sta prikazana časovna poteka posamezne sekundarne veje TR i_{s1} in i_{s2} , katerih vsota je enaka varilnemu toku i_w , na zadnjem diagramu pa je prikazan časovni potek primarnega toka i_p . Na prvem in zadnjem diagramu so za lažjo razlago označeni tudi posamezni časovni intervali z oznakami od t_0 do t_8 in pomožne zelene vertikalne črtkane črte na vseh štirih diagramih. V nadaljevanju bo podana razlaga samo za prvo polperiodo, saj je dogajanje podobno v drugi polperiodi, le primarna napetost u in tok i_p sta negativna.

Na prvem diagramu *slike 12* je prikazan časovni potek napajalne napetosti u , ki je določen s PŠM s frekvenco 20 kHz in nastavljenim prevajalnim razmerjem $D = 0,5$. Glede na nastavitve PŠM je nad prvo polovico časovnega poteka napajalne napetosti TR označen časovni interval T_{on} , ko sta odprti dve diagonalni stikali frekvenčnega pretvornika in je na navitju TR priključena pozitivna napajalna napetost $u = 560$ V. Čas T_{on} je odvisen od nastavljenega prevajalnega razmerja D in ga izračunamo z (1), če upoštevamo čas ene polperiode.

$$T_{on} = 0,5 \cdot T \cdot D = 0,5 \cdot D / f \tag{1}$$

Zaradi prisotne napetosti u na primarnem navitju TR se začne pri t_1 vrednost primarnega toka hitro povečevati z vrednosti nič, hkrati pa se oba toka sekundarnih vej TR začneta hitro spreminjati, kjer tok i_{s2} začne strmo padati proti vrednosti nič, tok i_{s1} pa začne hitro naraščati proti vrednosti varilnega toka i_w . Ta hitri prehodni pojav se konča pri t_2 ,



Slika 12 : Izračunani časovni poteki napetosti in tokov v času ene periode ustaljenega varilnega toka

ko na sekundarno stran TR reducirani primarni tok $i'_p = i_p \cdot 55$ doseže vrednost varilnega toka $i_w = i'_p$ in hkrati velja $i_{s2} = 0$ ter $i_{s1} = i_w$. Čas hitrega vzpona primarnega toka i_p od t_1 do t_2 je na četrtem diagramu slike 12 označen s T_{vzpd} , najpomembnejše pa je dejstvo, da v tem časovnem intervalu varilni tok i_w kljub priključenosti napetosti še vedno pada. Pričakovali bi, da bi varilni tok i_w v eni polperiodi vedno naraščal v časovnem intervalu T_{on} , ko je na primarno navitje TR priključena napetost, in vedno padal v časovnem intervalu T_{off} ko na primarnem navitju TR ni priključene napetosti. Kot je bilo omenjeno, to ne drži, saj varilni tok v časovnem intervalu T_{vzpd} še vedno pada kljub napetosti na primarnem navitju TR. Čas vzpona T_{vzpd} primarnega toka nam torej podaljša čas padanja varilnega toka na časovni interval $T_{off} + T_{vzpd}$ in skrajša čas dejanskega naraščanja varilnega toka na časovni interval $T_{on} - T_{vzpd}$, kar pa ravno določa efektivno prevajalno razmerje (2), ki je vedno manjše od nastavljenega prevajalnega razmerja D :

$$D_e = \frac{T_{on} - T_{vzpd}}{0,5 \cdot T} \quad (2)$$

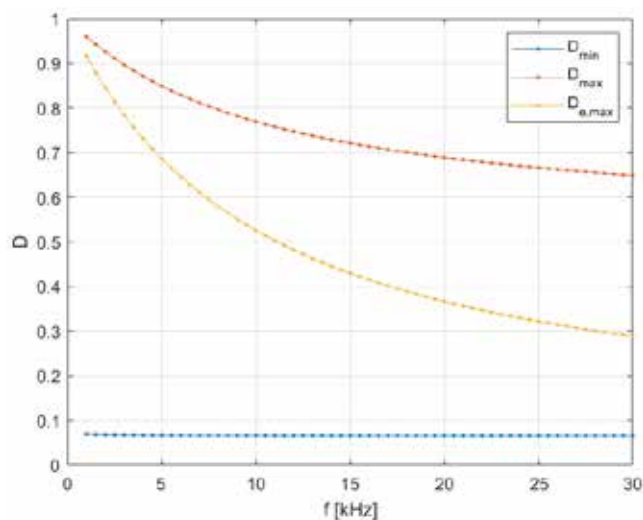
Večji, kot je varilni tok, daljši je časovni interval T_{vzpd} in obratno, seveda pa velja, da bo čas T_{vzpd} enak pri enaki vrednosti varilnega toka, ne glede na frekvenco PŠM, ki pa zmanjšuje časovni interval T_{on} pri enaki vrednosti nastavljenega prevajalnega razmerja D . Iz omenjenega lahko zaključimo, da bo pri višjih frekvencah PŠM časovni interval T_{vzpd} precej bolj skrajšal čas dejanskega naraščanja varilnega toka $T_{on} - T_{vzpd}$ kot pa pri nižjih frekvencah, kar bo pomenilo toliko nižje efektivno prevajalno razmerje D_e glede na nastavljeno prevajalno razmerje D oziroma izguba prevajalnega razmerja ($D - D_e$) je pri višjih frekvencah večja. Pri višjih frekvencah PŠM je potencialno možno doseči enako vrednost varilnega toka kot pri nižjih frekvencah, vendar moramo povišati nastavljeno prevajalno razmerje D za toliko, da ostane efektivno prevajalno razmerje D_e enako. Z višjim D moramo dejansko kompenzirati izgubo prevajalnega razmerja, da dosežemo enak varilni tok. Prevajalnega razmerja D pa ne moremo kompenzirati v nedogled, saj je lahko največ $D = 1$, takrat velja $T_{on} = T/2$, zato pri višjih frekvencah ne moremo doseči tako velikega varilnega toka, kot ga lahko pri nižjih frekvencah, zaradi tega pa je največja vrednost varilnega toka odvisna od frekvence PŠM. Varilni tok pa ne narašča z naraščanjem prevajalnega razmerja vse do vrednosti $D = 1$, ampak se naraščanje ustavi že pri nižji vrednosti, ki jo imenujemo D_{max} , takrat se namreč zgodi, da v časovnem poteku primarnega toka i_p ni več intervala, kjer bi bil tok enak nič, ampak i_p pade s pozitivne vrednosti na vrednost nič in takoj začne naraščati v negativno smer ali obratno. Pri višjih frekvencah torej lahko kompenziramo izgubo prevajalnega razmerja samo do vrednosti D_{max} , saj nadaljnje višanje ne poviša več varilnega toka, D_{max} pa se prav tako znižuje z višanjem frekvence. Zaradi omenjenega se z višanjem frekven-

ce PŠM največja vrednost varilnega toka samo še znižuje kljub nastavljenemu največjemu možnemu prevajalnemu razmerju $D = 1$.

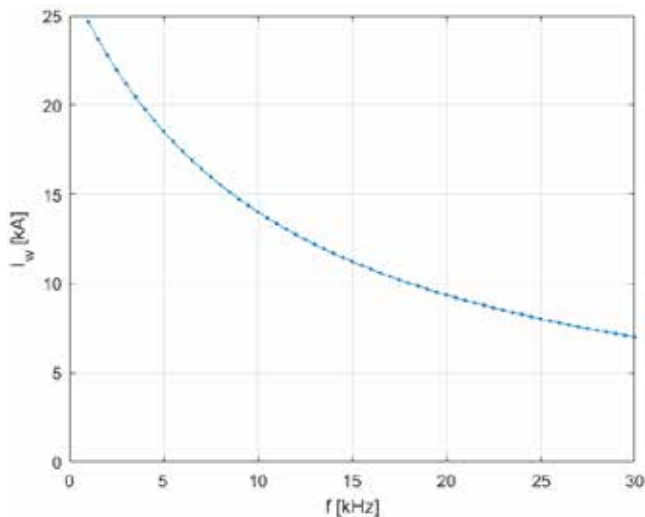
5 Rezultati analize vpliva frekvence PŠM na velikost varilnega toka sistema za UTV

S pomočjo pripravljenega modela sistema za UTV je bila narejena vrsta numeričnih izračunov pri različnih vrednostih frekvence PŠM od 1 kHz do 30 kHz po koraku 0,5 kHz. Pri vsaki frekvenci PŠM se je poiskalo največje prevajalno razmerje D_{max} , do katerega varilni tok še narašča, in minimalno prevajalno razmerje D_{min} , ki še zagotavlja varilni tok brez vmesnih časovnih intervalov, kjer bi bil varilni tok enak nič. Pri nastavljenem D_{max} se je s pomočjo (2) izračunalo tudi efektivno prevajalno razmerje $D_{e,max}$, ki dejansko vpliva na velikost varilnega toka. Na *sliki 13* so prikazani rezultati omenjenih izračunov D_{min} , D_{max} in $D_{e,max}$ v odvisnosti od frekvence PŠM. S slike je razvidno, da vsa tri prevajalna razmerja upadajo z naraščanjem frekvence, vključno z D_{min} , čeprav je videti konstantna vrednost.

Na velikost največjega varilnega toka v stacionarnem stanju vpliva efektivno prevajalno razmerje $D_{e,max}$ kljub najvišjemu možnemu nastavljenemu prevajalnemu razmerju $D = 1$ ali D_{max} , zato s padanjem $D_{e,max}$ pada tudi največja efektivna vrednost varilnega toka I_w , ki jo lahko dosežemo, kot je prikazano na *sliki 14*. Pri upoštevanih parametrih modela sistema za UTV in enakem bremenu lahko pri frekvenci 1 kHz dosežemo skoraj 25 kA efektivne vrednosti varilnega toka I_w , pri 15 kHz se vrednost več kot razpolovi, pri 30 kHz pa dosežemo samo še približno 7 kA, kar je manj kot tretjina vrednosti, kot je pri 1 kHz.



Slika 13 : Odvisnost prevajalnih razmerij od frekvence PŠM-sistema za UTV



Slika 14 : Odvisnost efektivne vrednosti varilnega toka od frekvence PŠM

Iz analize je bilo ugotovljeno, da je čas hitrega vzpona primarnega toka v intervalu T_{vzp} glavni razlog za frekvenčno odvisnost varilnega toka, saj skrajša čas dejanskega naraščanja varilnega toka in podaljša čas padanja varilnega toka, kar pa ravno določa efektivno vrednost varilnega toka v stacionarnem stanju. Če želimo zmanjšati frekvenčno odvisnost največje vrednosti varilnega toka, moramo skrajšati čas vzpona primarnega toka T_{vzp} , kar pa pomeni, da je treba spremeniti vrednosti parametrov veznega modela sistema za UTV, ki bodo omogočali hitrejši vzpon primarnega toka. Na hitrejši vzpon primarnega toka lahko vplivamo z zmanjšanjem induktivnosti priključnega kabla in razsipanih induktivnosti transformatorja z diodnim usmernikom [14] ali pa s povišanjem upornosti, vendar s tem hkrati neposredno vplivamo na velikost varilnega toka, kar ni zaželeno.

6 Zaključek

Sistemi za UTV se uporabljajo predvsem v avtomobilski industriji za varjenje karoserij, kjer je varilni TR skupaj z varilnimi kleščami nameščen na premikajočem se robotu, zato je teža TR pomemben dejavnik. Težo transformatorja lahko zmanjšamo, če povečamo frekvenco PŠM, ki določa napajalno napetost TR, saj lahko pri višji frekvenci zmanjšamo presek železnega jedra. Manjši presek železnega jedra zmanjša volumen in težo jedra in hkrati težo navitja, saj se hkrati zmanjša tudi obseg navitja. Višja frekvenca napajalne napetosti TR pa po analizah sledeč zmanjša največjo vrednost varilnega toka, ki ga lahko sistem doseže pri istem bremenu. V prispevku je bil analiziran sistem za UTV z industrijskim varilnim TR, za katerega so bili določeni model in vrednosti parametrov. S pomočjo modela, ki zelo dobro opisuje dinamiko sistema,

so bili narejeni številni numerični izračuni, ki kažejo na precejšnjo odvisnost največje vrednosti varilnega toka od frekvence PŠM pri enakem bremenu. Na osnovi podrobne analize časovnih potekov tokov in napetosti v času ene periode ustaljenega varilnega toka je bilo ugotovljeno, da v časovnem intervalu pritisnjene napetosti na primarnem navitju TR varilni tok kljub napetosti še vedno pada, vse dokler reducirana vrednost primarnega toka i'_p z vrednosti nič ne naraste na vrednost varilnega toka i_w . Ta čas hitrega vzpona primarnega toka povzroča razliko med nastavljenim prevajalnim razmerjem D in efektivnim prevajalnim razmerjem D_e , kar imenujemo izguba prevajalnega razmerja. Vrednost varilnega toka v stacionarnem stanju je določena z efektivnim prevajalnim razmerjem D_e , ki pa se precej zmanjša z naraščanjem frekvence, zato se zmanjša tudi največja vrednost varilnega toka. Da zmanjšamo izgubo prevajalnega razmerja, je treba spremeniti vrednosti parametrov sistema za UTV, ki bodo omogočale hitrejši vzpon primarnega toka, kar lahko najbolj učinkovito dosežemo z zmanjšanjem predvsem razsipanih induktivnosti TR in diodnega usmernika.

Viri

- [1] N. T. Williams and J. D. Parker, »Review of resistance spot welding of steel sheets Part 1 Modelling and control of weld nugget formation,« *International Materials Reviews*, vol. 49, no. 2, pp. 45-75, 2004, doi: 10.1179/095066004225010523.
- [2] By BMW Werk Leipzig - <http://bmw-werk-leipzig.de>, CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11928438>.
- [3] International Federation of Robotics, »World Robotics Report«. [Na spletu]. Dostopno: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/wr-report-all-time-high-with-half-a-million-robots-installed>. [Dostop: 22. mar. 2024.]
- [4] K. Zhou and H. Li; »A Comparative Study of Single-Phase AC and Medium Frequency DC Resistance Spot Welding Using Finite Element Modeling,« *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107260-107271, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3000794.
- [5] W.-H. Ko, J.-C. Gu, and W.-J. Lee; »Energy efficiency improvement of a single-phase ac spot welding machine by using an advanced thyristor switched detuning capacitor bank,« *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1-1, 2018, doi: 10.1109/tia.2018.2796060.
- [6] K. Zhou and L. Cai; »Online Measuring Power Factor in AC Resistance Spot Welding,« *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 1, pp. 575-582, 2014, doi: 10.1109/tie.2013.2244540.
- [7] J. Biela, U. Badstuebner, and J. W. Kolar; »Im-

pact of Power Density Maximization on Efficiency of DC-DC Converter Systems,« (in English), IEEE T Power Electr, vol. 24, no. 1-2, pp. 288-300, Jan-Feb 2009, doi: 10.1109/Tpel.2009.2006355.

- [8] R. Brezovnik, J. Cernelic, M. Petrun, D. Dolinar, and J. Ritonja; »Impact of the Switching Frequency on the Welding Current of a Spot-Welding System,« IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 12, pp. 9291-9301, 2017, doi: 10.1109/tie.2017.2711549.
- [9] Priročnik Rexroth PSG 6130.xx RSTK srednje frekvenčnega varilnega transformatorja [Na spletu] Dostopno: https://store.boschrexroth.com/Resistance-welding?cclcl=en_DE. [Dostop: 13. mar. 2024.]
- [10] X. Wang and K. Zhou; »Electrical Parameter Identification of Medium-Frequency DC Resistance Spot Welding System Using Intelligent Algorithm,« IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 26, no. 4, pp. 1791-1802, 2021, doi: 10.1109/tmech.2021.3075479.
- [11] M. Petrun, K. Deželak, D. Dolinar, and G. Stumberger; "Determining the parameters of a resistance spot welding transformer using differential evolution," IEEETrans.Magn., vol. 50, no. 4, Apr. 2014, Art. no. 8400304.
- [12] Kennedy, J.; Eberhart, R. C. Particle swarm optimization. Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw., Nov. 1995, pp. 1942-1948.
- [13] Particle Swarm Optimization Algorithm. [Na spletu]. Dostopno: <https://mathworks.com/help/gads/particle-swarm-optimization-algorithm.html>. [Dostop: 27. mar. 2024.]
- [14] R. Brezovnik; Vpliv preklopne frekvence sistema za uporovno točkovno varjenje na varilni tok in na izgube, Maribor, 2018. (<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?lang=slv&id=70111>) [Dostop: 27. mar. 2024.]

Analysis of the welding transformer for the development of robotic resistance spot welding

Abstract:

In the automotive industry, resistance spot welding systems are used extensively for welding car bodies, where the welding transformer is installed on a moving robot, so the weight of the transformer is an important factor. The weight of the transformer can be reduced by a higher switching frequency, as a smaller cross-section of the iron core and thus the windings can be used, which significantly reduces the weight of the transformer. However, a higher switching frequency of the transformer makes it impossible to achieve the same maximum welding current value at the same load. The paper focuses on the modelling of the resistance spot welding system and the analysis of the frequency dependence of the maximum value of the welding current at the same load. It also discusses the reasons for the loss of duty cycle and the frequency dependence of the decrease in effective duty cycle by increasing the switching frequency.

Keywords:

resistance spot welding, transformer, DC-DC converter, pulse-width modulation, duty cycle, circuit model

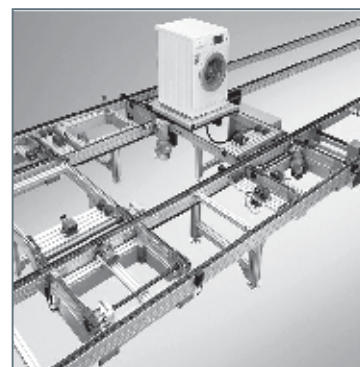
Rexroth

ORGATEX®

LEANPRODUCTS®



BOSCH



OPL
automation

OPL avtomatizacija, d.o.o.
Dobrave 2
SI-1236 Trzin, Slovenija

Tel. +386 (0) 1 560 22 40
Tel. +386 (0) 1 560 22 41
Mobil. +386 (0) 41 667 999
E-mail: info@opl.si
www.opl.si