

Simulacija inverterškega vira toka in postopka varjenja MIG/MAG

Marjan GOLOB

Izveček: Dinamične lastnosti so zelo pomembne za učinkovito delovanje vira toka varilne naprave, vendar pogosto niso bile obravnavane v povezavi z dinamičnim obnašanjem elektroobločnega procesa varjenja. Prispevek predstavlja problematiko razvoja inverterških izvorov varilnega toka, ki temelji na metodah modeliranja in simulacij. Simulacijski model inverterškega izvora varilnega toka s tokovnim regulatorjem je izveden v povezavi s simulacijskim modelom varilnega procesa MIG/MAG. Hkratna simulacija obeh modelov izpostavlja prednosti simulacijskih metod pri hitrem razvoju strojne in programske opreme novih varilnih naprav.

Ključne besede: modeliranje in simulacija, elektroobločno varjenje, izvor varilnega toka, inverterški močnostni izvor varilnega toka

■ 1 Uvod

Če želi proizvajalec varilnih naprav ostati konkurenčen na trgu, mora obvladovati hiter proces razvoja tako strojne kot programske opreme varilnih naprav. Pri tem je zelo pomemben kratek čas realizacije projekta od ideje do novega izdelka na trgu. Čas razvoja novega izdelka je možno skrajšati z obvladovanjem novih tehnologij hitrega razvoja prototipov in modernih simulacijskih tehnik. Z razvojem računalniške tehnologije so se simulacijske tehnike uveljavile tudi na področju razvoja varilnih tehnologij in varilnih naprav. Simulacijski modeli na osnovi različnih matematičnih modelov [1], [2] se uporabljajo za analizo elektroobločnih postopkov varjenja in za potrebe razvoja regulacijskih algoritmov inverterških izvorov varilnega toka [3], [4], [5].

V prispevku je predstavljen primer uporabe simulacijskih modelov izvora varilnega toka in simula-

cijskih modelov procesa varjenja v skupnem simulacijskem okolju. Opisan je matematični model varilnega postopka MIG/MAG, ki je osnova za simulacijski model procesa varjenja. Temu smo dodali simulacijski model DC-DC-pretvornika s polnim mostičnim vezjem v programu Matlab/Simulink, ki omogoča analizo delovanja inverterškega izvora varilnega toka in razvoj tokovnega regulatorja inverterškega vezja s pulzno širinsko modulacijo (ang. Pulse Width Modulation – PWM).

Povezava obeh modelov je primerna za izvedbo koncepta delnega vključevanja strojne opreme v simulacijsko zanko (ang. Hardware-in-the-Loop Simulation – HIL) in koncepta pospešenega razvoja (ang. Rapid-Prototyping – RP) regulacijskih algoritmov izvorov varilnega toka [6], [7]. Za obe metodi je značilna uporaba simulacijskih modelov posameznih gradnikov pri razvoju prototipov naprav, programske opreme in tudi novih tehnoloških postopkov, na primer novih postopkov elektroobločnega varjenja. Koncept HIL omogoča razvoj in testiranje prototipov krmilnikov varilnih naprav v simulacijskem okolju, kjer je simuliran izbrani proces varjenja.

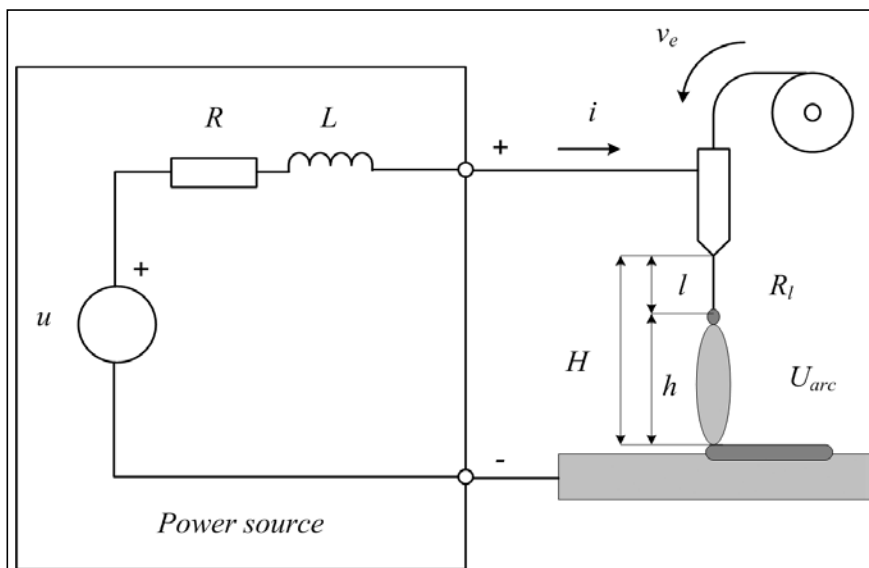
Poglavitna prednost tega koncepta je nadzorovano simulacijsko okolje, v katerem je možno vključiti zahteve različnih varilnih procesov, motilne signale in šume merilnih signalov, simuliranje različnih režimov delovanja in druge spremembe procesa, ki so pomembne za delovanje naprave.

V nadaljevanju je najprej predstavljen matematični model elektroobločnega postopka varjenja MIG/MAG, ki predstavlja osnovo simulacijskega modela procesa varjenja. Sledi opis simulacije inverterškega izvora varilnega toka, izvedenega z mostičnim vezjem DC-DC. Oba modela, simulacijski model elektroobločnega postopka varjenja in simulacijski model inverterškega izvora varilnega toka, smo združili v skupni simulacijski shemi. Uporabnost simulacijskih rezultatov predstavljamo s primerom regulacije toka inverterškega izvora z diskretnim PI-regulatorjem.

■ 2 Matematični model elektroobločnega postopka varjenja MIG/MAG

Postopek varjenja MIG/MAG je eden od temeljnih postopkov

Izr. prof. dr. Marjan Golob, univ. dipl. inž., Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko



Slika 1. Električni tokokrog procesa elektroobločnega varjenja s taljivo elektrodo

elektroobločnega spajanja materialov in je v številnih raziskavah dobro opisan. Za potrebe simulacij pri razvoju varilnih naprav smo se omejili na matematične modele, ki zadovoljivo opisujejo dinamično obnašanje procesa varjenja. Električni varilni vir toka in sam proces elektroobločnega varjenja lahko obravnavamo kot enostavni električni tokokrog, predstavljen na *sliki 1*.

Električni močnostni vir varilne naprave je predstavljen kot napetostni vir z znano napetostjo u , ki jo obravnavamo kot vhodno veličino modela. Parametra električnega izvora sta njegova induktivnost L in notranja upornost R , izhodna veličina modela izvora pa je varilni tok i . V primeru elektroobločnega postopka varjenja z dodatnim materialom se oblok vzpostavi med varjencem in taljivo elektrodo, ki jo dodajamo s hitrostjo v_e , za kar poskrbi podajalna naprava. Elektroda se dodaja v obliki varilne žice iz zlitine, ki ima svojo specifično upornost ρ . Na osnovi te, preseka elektrode A in razdalje dela elektrode od mesta izgorevanja do mesta električnega stika s šobo varilne pištole l lahko izračunamo upornost dodatne elektrode R_l . Med varjenjem se med elektrodo in varjencem ustvari električni oblok, ki je fizikalno gledano zapleten pojav. V številnih, v veliki večini empiričnih raziskavah so električni oblok avtorji obravnavali na različne načine, kjer so bolj ali

manj natančno opisali odvisnost napetosti električnega obloka u_{arc} od parametrov, kot so dolžina obloka h , lastnosti zaščitnih plinov v primeru postopka varjenja MIG/MAG, vrste prenosa taline ipd. V primeru električnega tokokroga na *sliki 1* lahko predpostavimo, da so veličine u , R , L , ρ in A neodvisne veličine oziroma parametri modela, veličine i , l , in u_{arc} pa odvisne veličine v enačbi:

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + i \cdot R_l + u_{arc}$$

Upornost dodatne elektrode R_l lahko obravnavamo kot vsoto dveh delov: upornosti nestaljene elektrode (prosti konec žice dolžine l_s) in upornosti kapljice (dolžine l_d), ki predstavlja vnos materiala iz elektrode na varjenec. Z upoštevanjem obeh dolžin lahko spremenljivko l zapišemo kot vsoto $l = l_s + l_d$. Spreminjanje dolžine kapljice l_d je zapleten fizikalni pojav, ki potrebuje posebno obravnavo. Dinamika spreminjanja nestaljene elektrode l_s pa je odvisna od hitrosti podajanja elektrode v_e , od hitrosti taljenja elektrode v_m in od hitrosti vertikalnih pomikov pištole v_c , ki so lahko posledica nemirne roke varilca. Definiramo lahko razdaljo H med kontaktom pištole in varjencem. Če zanemarimo dolžino kapljice (l_d je 0 in $l = l_s$), lahko izračunamo dolžino obloka $h = H - l$. Ob nemodelirani dinamiki rasti kapljice (l_d je 0) je potrebno opisati še pojav taljenja dodatne varilne elektrode in pojav

spreminjanja napetosti električnega obloka.

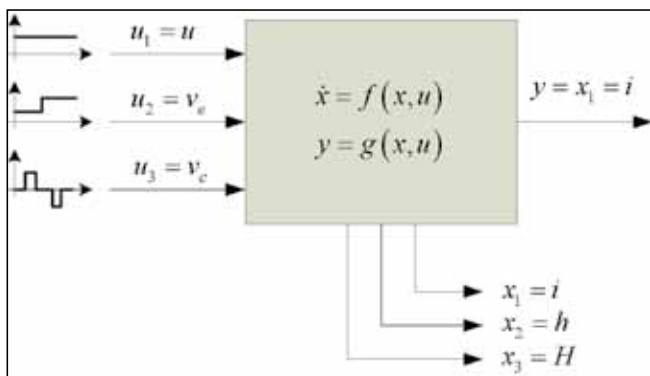
Električni oblok nastane med procesom varjenja med elektrodo in varjencem. V primeru pozitivne napetosti na kontaktu varilne pištole predstavlja vrh elektrode anoda in zvar na varjencu katoda. Enostaven model napetostnih razmer v obloku lahko zapišemo kot vsoto treh napetosti. Napetost u_{a+c} predstavlja vsoto dveh padcev napetosti: napetosti zaradi procesa nastanka kapljice na vrhu elektrode (anoda ima + potencial) in napetosti zaradi tvorbe zvara na varjencu (katoda ima - potencial). Padec napetosti samega obloka izračunamo iz napetosti zaradi električne poljske jakosti E in dolžine obloka h ter padca napetosti, ki je odvisen od upornosti R_{arc} in varilnega toka i . Predvsem napetost u_{a+c} je odvisna od načina prenosa materiala (kratkostični, pršiči, ...), procesa rasti kapljice, velikosti kapljice in drugih vplivov. Za potrebe naših simulacij obravnavamo u_{a+c} poenostavljeno, kot konstantno vrednost. Napetostno enačbo električnega tokokroga na *sliki 1* zapišemo kot:

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{\rho}{A} \cdot l + u_{a+c} + E \cdot h + i \cdot R_{arc}$$

V delu [8] je podrobno opisan postopek modeliranja elektroobločnega procesa varjenja, ki upošteva nelinearni model hitrosti taljenja elektrode in model spreminjanja napetosti električnega obloka. Različne študije, na primer [9], [10] in [11], obravnavajo fizikalni fenomen odtaljevanja elektrode. V njih avtorji predlagajo različne empirične enačbe, ki opisujejo odvisnost talilnega učinka od varilnega toka. Ob upoštevanju modela talilnega učinka in hitrosti odtaljevanja elektrode dobimo enačbo za hitrost spreminjanja dolžine obloka:

$$\frac{dh}{dt} = k_1 \cdot i + k_2 \cdot i^2 \cdot l - v_e - v_c$$

ki upošteva hitrost odtaljevanja elektrode kot nelinearno karakteristik toka. Empirični konstanti k_1 in k_2 sta



Slika 2. Blokovna predstavitev matematičnega modela elektroobločnega procesa varjenja s talilno elektrodo, zapisanega v prostoru stanj

podani za določen tip varilne žice oziroma glede na vrsto dodatnega materiala. Raziskave [9] so pokazale zanemarljiv vpliv vrste zaščitnega plina na talilni učinek.

Model na osnovi enačb (1), (2) in (3) lahko zapišemo v prostoru stanj in pri tem uvedemo tri spremenljivke stanja: varilni tok $x_1 = i$, dolžino obloka $x_2 = h$ in razdaljo med kontaktom pištrole in varjencem $x_3 = H$. Ob upoštevanju treh vhodnih spremenljivk $u_1 = u$, $u_2 = v_e$ in $u_3 = v_c$ in ene izhodne veličin $y = x_1$, kot je grafično prikazano na *sliki 2*, dobimo nelinearni model procesa, zapisan v prostoru stanj:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \left(u_1 - R \cdot x_1 - \frac{\rho}{A} \cdot x_1 \cdot (x_3 - x_2) - u_{arc} - E \cdot x_2 - x_1 \cdot R_{arc} \right)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_1^2 \cdot (x_3 - x_2) - u_2 - u_3$$

$$\frac{dx_3}{dt} = u_3$$

$$y = x_1$$

Nelinearni model procesa elektroobločnega varjenja z dodatno elektrodo (4) ne upošteva pomembnih fizikalnih pojavov, kot so nastanek in rast varilne kapljice, odcepitev kapljice od elektrode in prelet varilne kapljice preko obloka, kakor tudi ne vplivov številnih parametrov, na primer materiala varilne žice, spremembe temperature varilne žice, vrste zaščitnega plina in drugih. Razumevanje in modeliranje teh pojavov je cilj naših nadaljnjih raziskav. Pri izbiri modela za potrebe načrtovanja regulacijskih sistemov je potrebno upoštevati pravo razmerje med kompleksnostjo modela na eni strani in možnostjo realizacije modela v simulacijski obliki na drugi strani.

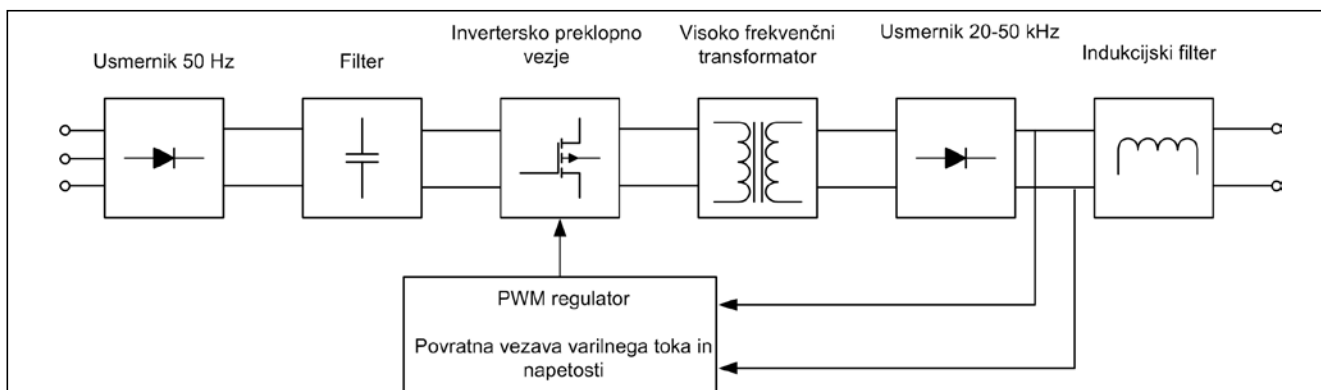
3 Simulacijski model inverterskega izvora varilnega toka

Inverterski izvor varilnega toka je predstavljen na *sliki 3*. Sestavljajo ga naslednji gradniki: usmerniško vezje, ki izmenično omrežno napetost usmeri in filtrira, invertersko preklopno vezje, ki enosmerni signal razsmeri na višjo frekvenco, visokofrekvenčni feritni transformator, visokofrekvenčni usmernik in indukcijski filter. Pogosto so inverterska preklopna vezja izvedena kot DC-DC-pretvorniki s

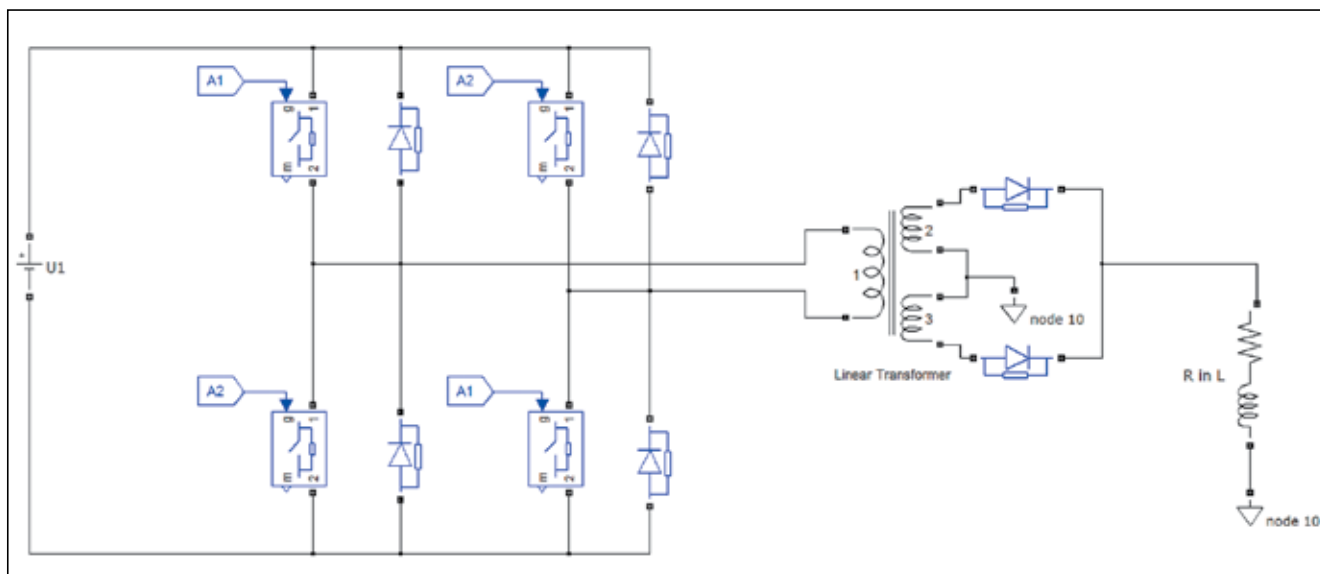
polnim mostičnim vezjem. Stikalna vezja v polnem mostiču so izvedena z močnostnimi elektronskimi elementi, kot so na primer tranzistorji MOSFET in IGBT. Stikalna vezja krmilimo z mikroračunalniško podprtimi krmilnimi vezji, ki jih imenujemo pulznoširinski (ang. Pulse Width Modulation – PWM) regulatorji. Za simulacijo elektronskih vezij se uporabljajo namenski simulacijski programi, kot so na primer MultiSim, PowerSim, SPICE in drugi. Programi omogočajo analizo delovanja posameznih elementov in vezij, niso pa primerni za povezovanje simulacijskih shem elektronskih vezij z aplikacijami zunaj področja močnostne elektronike.

Zato smo se odločili simulirati invertersko elektronsko vezje v programu Matlab Simulink, kar nam omogoča uporaba simulacijskih blokov iz Simulink knjižnice SimPowerSystems. Najpomembnejši element inverterskega izvora varilnega toka je invertersko preklopno vezje, izvedeno s polnim mostičem. Simulacijska shema enofaznega polnega mostiča, izvedena s simulacijskimi elementi SsimPowerSystem v simulacijskem okolju Simulink, je predstavljena na *sliki 4*.

V shemi smo uporabili osnovne elemente – idealna preklopna stikala in linearni transformator. V knjižnici so na voljo tudi zahtevnejši elementi, kjer lahko nastavimo številne parametre iz specifikacij konkretnih močnostnih elektronskih elementov in transformatorjev.



Slika 3. Električna blokovna shema inverterskega izvora varilnega toka



Slika 4. Simulacijska shema inverternega preklopnega vezja v izvedbi polnega mostiča DC-DC-pretvornika

■ 4 Simulacija inverternega izvora varilnega toka in postopka varjenja MIG/MAG

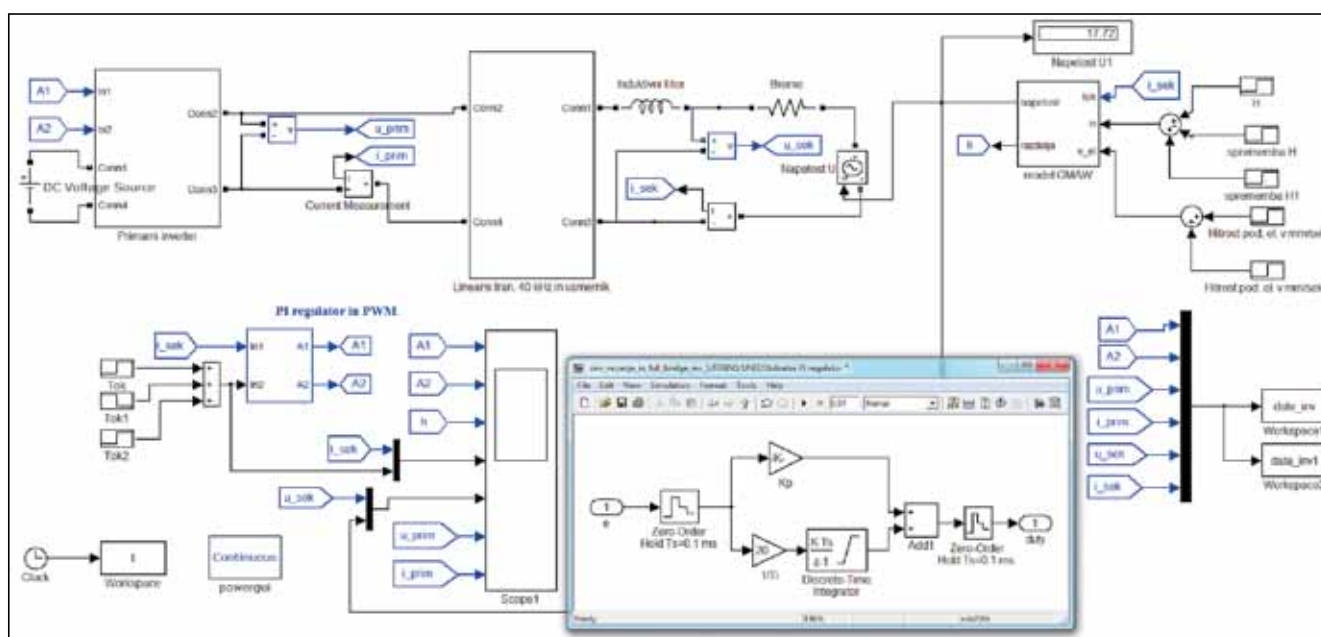
Oba modela, simulacijski model postopka varjenja MIG/MAG in simulacijski model inverternega izvora varilnega toka, smo združili v skupni simulacijski shemi. Simulacija nam omogoča opazovanje medsebojne odvisnosti obeh modelov, saj je obremenitev inverternega izvora varilnega toka odvisna od izhoda simulacijskega modela postopka varjenja. Na ta način simuliramo

delovanje izvora varilnega toka pri različnih načinih krmiljenja varilnega toka (enosmerni tok, pulzni tok, ...) in hkrati opazujemo spreminjane razmer na procesu varjenja (dolžina obloka, hitrost taljenja elektrode, ...). Povezava obeh modelov je zelo uporabna pri načrtovanju strukture in parametrov regulatorja izvora varilnega toka. Na sliki 5 je predstavljena simulacijska shema v okolju Simulink, kjer so v regulacijsko zaprto zanko povezani model močnostnega izvora varilnega toka, model elektroobločnega postopka varjenja in regulator varilnega

toka. Slednji je izveden kot diskretni proporcionalno-integralni (PI) regulator z enostavno strukturo, prikazano v samostojnem bloku simulacijskega modela na sliki 5.

Parametri, uporabljeni v simulacijah, so predstavljeni v preglednici 1.

Na sliki 6 so predstavljeni časovni poteki signalov simulacije, kjer smo s PI-regulatorjem regulirali kot odprtja (*duty*) na polnem mostiču inverterja varilnega izvora. Pri tem smo predpostavili konstantno hitrost varjenja na avtomatski varilni napravi in na-



Slika 5. Simulacija inverternega izvora varilnega toka in modela procesa varjenja MIG/MAG. Izvedena je regulacija varilnega toka z diskretnim PI-regulatorjem.

Tabela 1. Parametri modela elektroobločnega procesa varjenja, uporabljeni v simulaciji

Parametri procesa varjena	
R – upornost električnega izvora	0,015 Ω
L – induktivnost električnega izvora	18 μH
ρ – specifična upornost elektrode	0,1 Ω/m
d – premer elektrode	1,2 mm
E – konstanta električne poljske jakosti	0,675V/m
U_{a+c} – konstanta anodne in katodne napetosti	11,7 V
R_{arc} – upornost obloka	0,022 Ω
v_e – hitrost podajanja varilne žice	5–10 m/min
K_1 – konstanta taljenja varilne žice	0,4147 m/As
K_2 – konstanta taljenja varilne žice	7,5e-5 (A^2s) ⁻¹

stavili začetno razdaljo med varilno pištolo in varjencem H na 16 mm in začetni tok 25 A. Začetna vrednost dolžine prostega konca žice l je 10 mm, zato znaša začetna dolžina obloka h 6 mm. Spremembe vseh treh dolžin med izvajanjem simulacije so izrisane v prvem grafu slike 6. Z modro barvo smo označili razdaljo med varilno pištolo in varjencem H , z vijoličasto barvo dolžino prostega konca žice l pri varjenju MIG/MAG in z oranžno barvo dolžino električnega obloka h . Pri času $t = 1$ ms smo simulirali spremembo referenčne vrednosti varilnega toka s 25 A na 200 A, kar je razvidno na drugem grafu slike 6. Čas vzorčenja v zanki tokovnega regulatorja smo nastavili na 100 μs in PI-regulator s primerno izbranimi parametri T_i in K_p v parite-

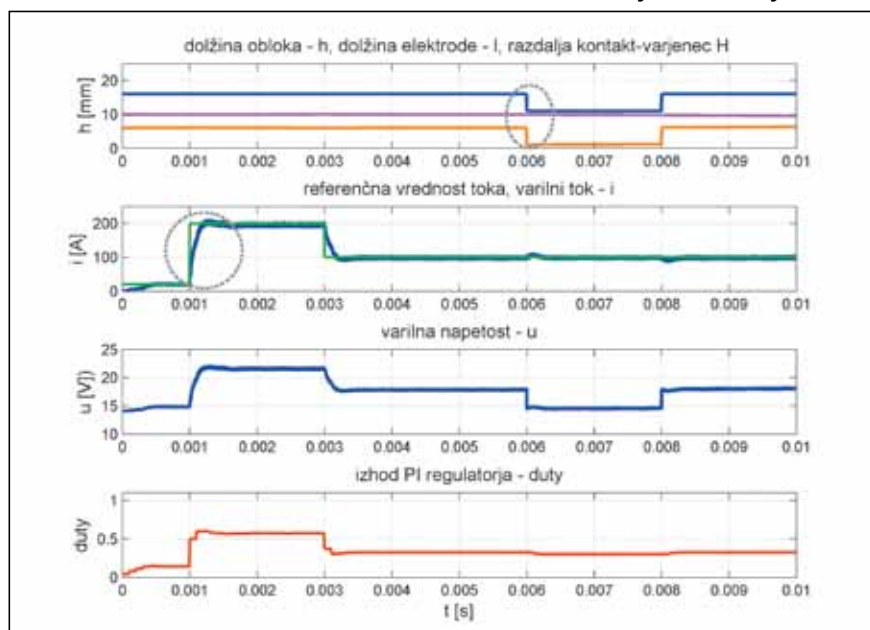
racijah izračuna novo vrednost odprtosti *duty* stikal na polnem mostiču simuliranega DC-DC-pretvornika. Odziva varilnega toka in varilne napetosti sta prikazana z modro barvo v drugem in tretjem grafu slike 6. Pri negativni spremembi referenčnega toka z 200 A na 100 A, simulirani v 3 ms, so odzivi podobni. V drugi polovici simulacije smo simulirali premik razdalje med varilno pištolo in varjencem H za 4 mm, ki je lahko posledica giba varilca. Spremembo obravnavamo kot motilni signal, na katerega se je PI-regulator ustrezno odzval z dinamično kompenzacijo spremembe toka. Prehodni pojavi so stabilni, prenehaj je minimalen in čas izravnave sprejemljivo kratek.

Za razumevanje delovanja inver-

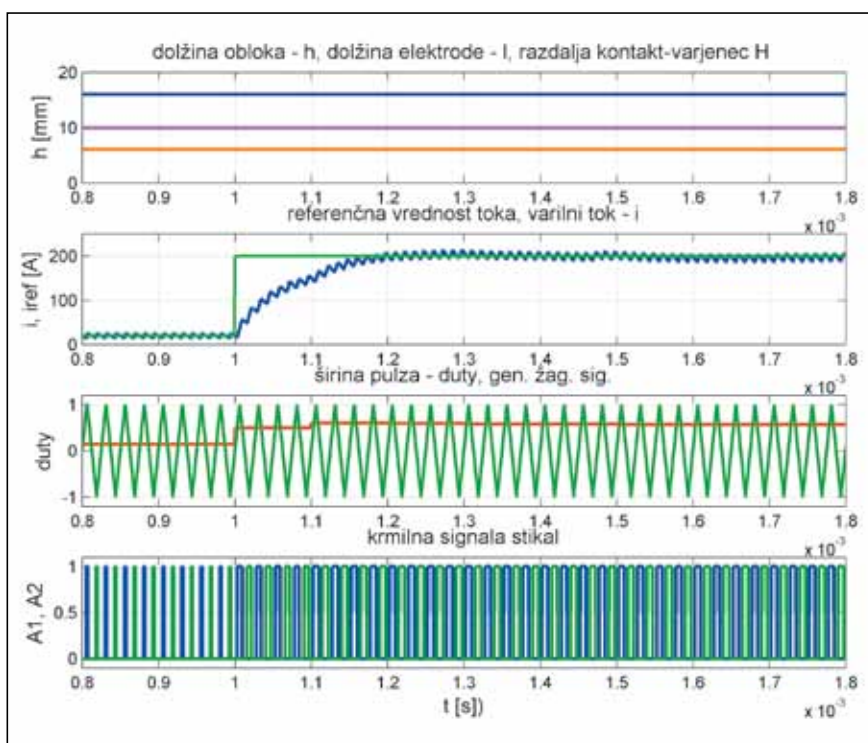
terskega izvora varilnega toka je pomembno razumevanje časovnih potekov signalov na DC-DC-pretvorniku in krmilnem vezju, ki generira signal pulznoširinske modulacije. Na slikah 7 in 8 so prikazani časovni poteki signalov za oba prehodna pojava, ki smo ju na sliki 5 označili s črtkanima elipsama. Časovno okno rezultatov je zmanjšano na interval približno 1 ms na sliki 7 in 1,4 ms na sliki 8. Na obeh slikah so v tretjem in četrtem grafu predstavljeni časovni poteki signalov PWM-krmilnika, kot so generator žagaste napetosti – zelena črta, izhod iz PI-regulatorja ali kot odprtja tranzistorjev – rdeča črta in signala za odpiranje tranzistorjev obeh vej DC-DC-pretvornika A1 – modra črta in A2 – zelena črta. Signal iz PWM-generatorja žage, ki se uporablja za generiranje krmilnih pulzov stikal A1 in A2, primerjamo s kotom odprtja – *duty*, ki ga dobimo iz PI-tokovnega regulatorja. Širina pulza se veča, posledica je povečanje varilnega toka. Frekvenca izmeničnega toka na primarni strani linearnega transformatorja je bila 40 kHz. Razdalja med varilno pištolo in varjencem H , predstavljena na prvem grafu z modro črto, se ni spreminjala in konstantni sta bili tudi dolžini prostega konca žice l – črta vijoličaste barve in električnega obloka h – oranžna črta.

Na sliki 8 so predstavljeni časovni poteki signalov, ki ilustrirajo dinamični odziv diskretnega PI-regulatorja toka na spremembo razdalje med varilno pištolo in varjencem H . V 6 ms simulacije smo dolžino H zmanjšali za 4 mm s 16 na 12 mm, kot je predstavljeno z modro barvo na prvem grafu slike 8. Posledično se je spremenila dolžina obloka h – oranžna črta in zato se je povečala vrednost varilnega toka – modra črta na drugem grafu, ki ga je regulator ustrezno kompenziral z zmanjšanjem kota odprtja tranzistorjev na DC-DC-pretvorniku, kot je razvidno iz časovnih potekov signalov v drugem, tretjem in četrtem grafu na sliki 8.

V opisanem primeru simulacije delovanja inverterskega izvora varilnega toka in postopka varjenja MIG/MAG smo predstavili poteke električnih signalov DC-DC-pretvornika ob



Slika 6. Rezultati simulacije procesa varjenja MIG/MAG s PWM-regulacijo toka v simuliranem inverterskem izvoru varilnega toka. V prvem grafu so spremembe dolžin H – modra črta, h – oranžna črta in l – vijolična črta.



Slika 7. Odziv diskretnega PI-regulatorja varilnega toka na spremembo referenčne vrednosti varilnega toka (drugi graf) in ustrezno krmiljenje PWM-modulacije na stikalih DC-DC-pretvornika inverterskega varilnega izvora (tretji in četrti graf). Razdalja kontakt - varjenec H je v prvem grafu predstavljena z modro barvo in je konstantna. Prav tako se nista spremenili dolžina elektrode l (vijolična barva) in dolžina obloka h (oranžna barva).

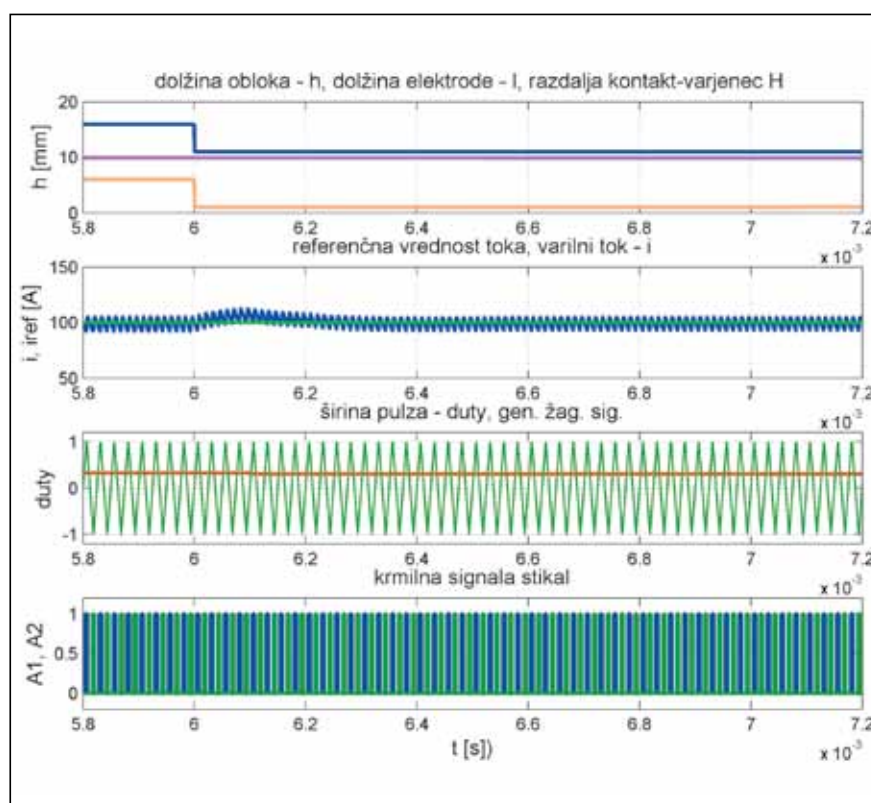
uporabi idealnih stikal in idealnega linearnega transformatorja. Ob izбору natančno določenih močnostnih elementov, na primer IGBT-tranzistorjev, lahko v knjižnici SimPowerSystems izberemo naprednejše bloke za simulacijo močnostnih elektronskih elementov in nastavimo konkretne parametre močnostnih stikal. V tem primeru bi nas zanimali poteki časovnih signalov napetosti in toka na stikalih, torej na primarni strani transformatorja. Oblika signalov je bolj ali manj popačena in s frekvenčno analizo signalov lahko opazujemo vpliv višjih harmonskih komponent signala na delovanje pretvornika. Na sliki 9 sta izrisana časovni potek toka, ki ga opazujemo na primarni strani transformatorja, in ustrezna amplitudna frekvenčna karakteristika, ki smo jo dobili z FFT-analizo. Preklopna frekvenca delovanja inverterja je bila 40 kHz. Simulacijo smo izvedli z izbranim korakom simulacije 0,1 μ s.

Opisane simulacije so koristne za razumevanje delovanja inverterske-

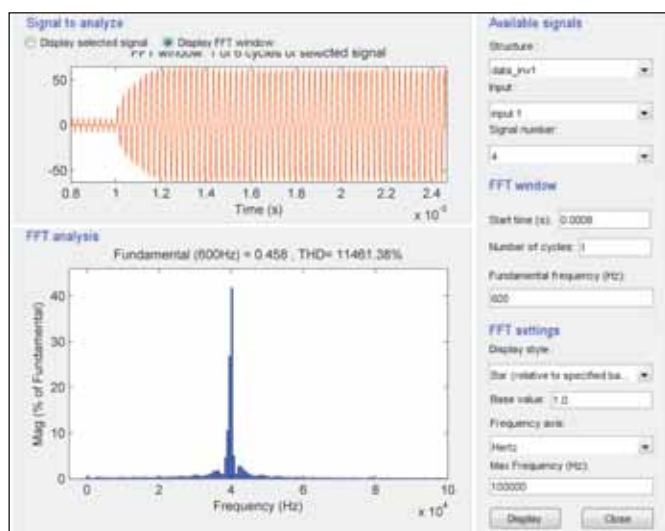
ga varilnega izvora in optimiranje parametrov opisanega regulatorja varilnega toka. Omogočajo razvoj in načrtovanje zahtevnejših izvedb regulacijskih struktur, kot so kaskadna regulacija, regulator v prostoru stanj in drugih.

5 Zaključek

V delu smo predstavili uporabo simulacijskih metod pri razvoju varilnih naprav. Razvili smo simulacijski model elektroobločnega procesa varjenja z dodajanjem talilne varilne žice in simulacijski model inverterskega izvora varilnega toka z DC-DC-pretvornikom. Predlagani matematični model procesa varjenja MIG/MAG z dodajanjem talilne varilne žice je izveden kot nelinearni model v prostoru stanj, ki pa ne upošteva nekaterih pomembnih fizikalnih pojavov, kot so nastanek in rast varilne kapljice, odcepitev kapljice od elektrode in prelet varilne kapljice čez oblok. Prav tako niso upoštevane spremembe vplivov številnih parametrov, kot so sestava materiala varilne žice, spremem-



Slika 8. Odziv diskretnega PI-regulatorja na motnjo v obliki spremembe razdalje med varilno pištolo in varjenecem H s 16 mm na 12 mm. V prvem grafu so spremembe dolžin H – modra črta, h – oranžna črta in l – vijolična črta.



Slika 9. Frekvenčna analiza toka na primarni strani transformatorja inverterskega varilnega izvora

be temperature varilne žice, vrste zaščitnega plina ipd. Razumevanje in modeliranje teh pojavov in njihov vpliv na dinamično obnašanje regulacijskega procesa varilne naprave so cilji naših nadaljnjih raziskav.

Predstavili smo tudi simulacijski model enostavnega inverterskega izvora varilnega toka, ki smo ga testirali v isti aplikaciji s procesom varjenja MIG/MAG. Rezultati simulacije so pokazali, da inverter na osnovi polnega DC-DC-pretvornika z enostavnim diskretnim PI-regulatorjem varilnega toka zadovoljivo sledi spremembam referenčne vrednosti toka. S simulacijo inverterskega izvora varilnega toka v istem simulacijskem okolju s simulacijskim modelom procesa varjenja je omogočena analiza delovanja različnih izvedb močnostnih gradnikov varilnih naprav, močnostnih pretvornikov, regulacijskih in krmilnih sistemov v pov-

ezavi z izbranimi varilnimi tehnologijami. Tak pristop k razvoju lahko zniža stroške in skrajša čas razvoja novih varilnih naprav.

Viri

- [1] K. L. Moore, D. S. Naidu, S. Ozcelik: Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding. Elsevier, 2003.
- [2] R. Yender, J. Tyler, K. L. Moore, D. S. Naidu: Gas Metal Arc Welding Control: Part 1 – Modeling and Analysis. In *Nonlinear Analysis, Methods and Applications*, 30, str. 3101–3111. Proc. 2nd World Congress of Nonlinear Analysts, 1997.
- [3] M. Golob, A. Koves, A. Puklavac, B. Torvornik: Modelling, Simulation and Fuzzy Control of the GMAW process. In 15th Triennial World Congr. Int. Fed. of Automatic Control, 2002.
- [4] J. S. Thomsen: Control of Pulsed Gas Metal Arc Welding, *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 1 (2006), str. 115–125,
- [5] J. Zhang and B. L. Walcott: Adaptive Interval Model Control of Arc Welding Process, *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, 14(6) 2006, str. 1127–1134.
- [6] B. Lu, X. Wu, H. Figueroa and A. Monti: A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, št. 2, str. 919–931, 2007.
- [7] G. G. Parma and V. Dinavahi: Real-Time Digital Hardware Simulation of Power Electronics and Drives, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, št. 2, str. 1235–1246, 2007.
- [8] M. Golob, B. Tovornik: Modelling, simulation and control of gas metal arc welding. In 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Prague, Czech Republic. vol. 2, 6 strani, 2010
- [9] A. Lesnewich: Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding: Part I – Control of electrode melting rate. *Welding Journal*, 37(1958) 8, str. 418S–425S.
- [10] J. Tusek, M. Suban: Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. *Journal of Materials Processing Technology*, (119) 2001, str. 185–192.
- [11] E. Halmøy: Wire melting rate, droplet temperature and effective anode potential. In: Proceedings of the International Conference on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, London, 1979, str. 49–57.

Zahvala

Avtor se zahvaljuje Javni agenciji za raziskovalno dejavnost RS in podjetju Varstroj, d. d., za delno sofinanciranje opisanih raziskav.

Simulation of inverter welding power source and MIG/MAG welding process

Abstract: Dynamic behaviour is of great importance for an efficient welding power supply, but often has not been investigated together with dynamic behaviour of the electric arc welding process. This article presents the problems of development inverter welding power sources based on modelling and simulation techniques. Simulation model of inverter power source with current controller is implemented together with simulation model of MIG/MAG welding process. The combined simulation of both models shows the advantages of using simulation methods by the rapid development of hardware and software for welding equipment.

Keywords: modelling and simulation, gas metal arc welding process, welding power source, inverter power supply, DC-DC converter