

UDK 621.9.048.4:621.9.025.7

Primerjava učinkov elektroerozijskega procesa krmiljenega z izofrekvenčnimi in izoenergijskimi generatorji pri obdelavi karbidnih trdin

FRANC ROETHEL in MARJAN DOBOVŠEK

1. UVOD

Uporaba elektroerozijske obdelave se je pri nas v zadnjih letih močno razširila. Ugotovimo lahko, da smo v ta namen uvozili vrsto strojev oz. naprav z različnimi lastnostmi generatorjev. Tu so mišljene predvsem naprave za grezenje. Kljub nekaterim nestrokovnim trditvam, da v slovenski industriji ne uporabljamo in ne vpeljujemo novih tehnologij, lahko trdimo, da si zanje povsod zelo prizadevajo. Ovire so predvsem sredstva za investicije, ki jih ni dovolj. Prav zato pa je tembolj pomembno, kaj kupiti, da bomo lahko zanesljivo načrtno investirali. V splošnem ne dajemo prednosti investicijam, kjer samo izboljšujemo tehnologijo, temveč so veliko bolj zaželene investicije v nove tovarne in objekte.

Zato bi bilo treba razmisliti bolj določno, kje lahko hitro razvijemo nove naprave, s katerimi bi lahko izboljšali strukturo naše tehnologije. Sem sodijo vsekakor elektroerozijske naprave. Dandanes še ne moremo trditi, da je razvoj domačih naprav rentabilen. V ta namen bo treba raziskati tržišča doma in na tujem. Znano je, da je na Japonskem s približno 115 milijoni prebivalcev kar 12 izdelovalcev elektroerozijskih naprav, pri nas pa nobenega.

2. OSNOVE ZA ODLOČANJE PRI IZBIRI ELEKTROEROZIJSKEGA SISTEMA

Glavna merila za izbiro obdelovalnega postopka so bila že objavljena [1]. Ta so v zmožnosti naprave, da daje izdelek v želeni obliki v čim krajšem času z zagotovljeno želeno kakovostjo in najmanjšimi stroški procesa. Kaj lahko dosežemo z elektroerozijskim grezenjem ali rezanjem z žico, je znano [2]. Tudi vplivi različnih parametrov na izdelavo zelene površine so deloma že znani iz domačih [3, 4, 5, 6] in tujih objav.

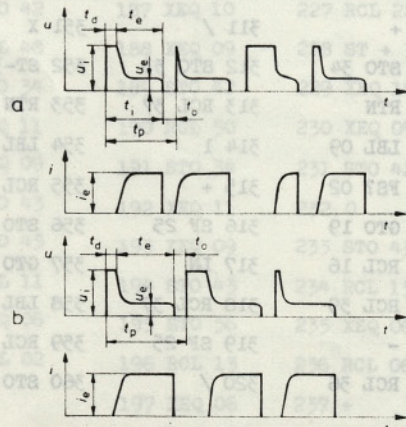
Najpomembnejše merilo pri izbiri naprave oz. sistema generatorja je zanesljiva gospodarnost procesa in s tem naprave. Glavni parametri gospodarnosti so: nabavna cena naprave in njena časovna uporaba, stroški surovca, stroški orodja, stroški dielektrika, maziva, čistil, filtrov itd., stroški vzdrževanja naprave, potrebni obdelovalni pripomočki, stroški delavca, ki streže napravi, hitrost obdelave, mrtvi in obdelovalni čas, velikost serije izdelkov in možnost hitrega popravila morebitne okvare. Medtem, ko lahko omenjeno izračunamo [1] in pridemo do odločitev, se zatika pri vzdrževalnem popravilu. Poglavitno vprašanje je namreč v tem, da ima vsaka orodjarna navadno le po eno namensko elektroerozijsko napravo, ko pa pride do okvare, lahko

obstane izdelovalna linija, ki je vezana na izdelavo orodij. V prihodnje bodo popravila zanesljiva le pri domačem izdelovalcu opreme.

Elektroerozijske naprave se med seboj razlikujejo po konstrukciji strojev, napravi za dovod dielektrika in predvsem po konstrukciji elektroerozijskega generatorja. V rabi sta izofrekvenčni in izoenergijski sistem generatorja, ki sta bila že preizkušana pri obdelavi orodnih jekel [8]. Drugih rezultatov podobnih analiz ni. Zato smo se odločili primerjati lastnosti sistemov pri obdelavi karbidnih trdin. Odločili smo se za karbidno trdino G-2 domače izdelave. Nekaj podatkov nahajamo v literaturi [9], ki se nanašajo na primerjave odnašanja snovi v enoti časa in obrabo elektrode. Ta raziskava nima namena ugotavljati obdelovalnosti v najtežjih merilnih razmerah, saj so stroški raziskave preveliki. Gre le za testiranje, če že ugotovljena podobnost pri obdelavi orodnih jekel velja tudi za karbidne trdine.

3. ZNAČILNOSTI PRIMERJANIH ELEKTROEROZIJSKIH GENERATORJEV

Primerjavo elektroerozijske obdelovalnosti smo opravili na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani na napravi AGIETRON 600AB z izofrekvenčnim generatorjem AGIEPULS 45K in v delovni organizaciji ISKRA na napravi CHARMILLES z izoenergijskim generatorjem ISOPULS P50. Obe vrsti generatorjev se razlikujeta po vrsti krmiljenja. Pri izofrekvenčnem generatorju si sledijo impulzi s konstantno frekvenco (sl. 1). Čas razelektritve (t_e) v posameznih impulzih se spreminja in je odvisen od



Sl. 1. Tokovne in napetostne karakteristike impulzov na izofrekvenčnem (a) in izoenergijskem generatorju (b) [8]

Razpredelnica 1: Osnovne značilnosti naprav

	Način delovanja		izofrekvenčni		izoenergijski
Generator	prosta napetost	u_i	V	100	80
	povp. razel. tok	i_e	A	5...75	1,1...72
	čas impulza	t_i	μ s	3...2000	2...1600
	čas intervala	t_0	μ s	7...2000	2...1600
	impulzni faktor	—	—	0,065...0,94	0,02...0,97
Servo-sistem	hitr. reak. servo		Hz	elektromehanski 20	elektrohidrav. 70

Razpredelnica 2: Osnovne značilnosti elektrod in obdelovancev

Material	Sestava (%)					Gostota kg/m ³	Dimenzije
	Cu	W	Wc	TiC	Co		
elektroda Ecu	99,9	—	—	—	—	8 870	Ø 15/3
elektroda WCu	30	70	—	—	—	15 200	Ø 15/3
obdelovanec G-2	—	—	81	3	12	14 300	Ø 17 × 5

zakasnitve vžiga (t_a). Pri izoenergijskem generatorju pa je čas razelektritve (t_e) konstanten pri spreminjajoči se frekvenci impulzov (f_p). Frekvenca je pri njem odvisna od zakasnitve vžiga (t_a). V obeh primerih je čas zakasnitve vžiga odvisen od razmer v delovni reži. V razpredelnici 1 navajamo osnovne značilnosti testiranih elektroerozijskih naprav.

4. PRIMERJALNE MERITVE OBDELOVALNOSTI

4.1. Izbrani parametri za krmiljenje procesa

Za elektrodo smo uporabili votli valj s premerom 15 mm in luknjo 3 mm za izpiranje pri pretoku dielektrika $q = 0,3 \text{ cm}^3/\text{s}$. Elektrode so bile iz dveh vrst materialov: iz elektroliznega bakra (ECu) ter zlitine volframa in bakra (WCu) (razpredelnica 2).

Material obdelovanca je bila karbidna trdina G-2, domače izdelave. Uporabili smo dve vrsti dielektrika (razpredelnica 3).

Razpredelnica 3: Lastnosti dielektrikov

Dielektrik	Gostota kg/m ³	Viskoznost pri 20 °C (mm ² /s)	Vnetišče °C
Schell sol TD	754	6,25	46
Mentor 28	790	6,6	124

Nastavne parametre smo izbrali tako, da meritve lahko primerjamo z rezultati meritev obdelovalnosti mednarodne kooperacijske raziskave v okviru CIRP.*

Oba generatorja — žal — nista dopuščala popolnoma enakih nastavitvev. Predvsem zaradi njihovih značilnosti ni bilo mogoče enako nastaviti proste napetosti in razelektritvenega toka. Pri testih smo uporabljali na elektrodi negativno polariteto (razpredelnica 4).

4.2. Merilni sistem in merjeni parametri

4.2.1. Izofrekvenčni impulzi

Pri meritvah na elektroerozijski napravi z izofrekvenčnim generatorjem smo uporabljali analizador elektroerozijskih impulzov domače izdelave. Z njim lahko merimo vsote števila posameznih tipov impulzov med testom [8].

Z analizatorjem (sl. 2) štejemo število prostih impulzov N_i , število učinkovitih razelektritev N_e , število nenormalnih razelektritev N_{ea} ter število kratkih stikov N_s . Analizador določi relativne parametre, ki kažejo trenutno stanje v procesu. Razmerja posameznih tipov impulzov proti skupnemu številu impulzov dobimo:

* Collège International pour l'Étude Scientifique des Techniques de Production Mécanique.

Razpredelnica 4: Časi razelektritve t_e in časi impulza t_i

Obdelovanec: G-2

$q = 0,3 \text{ cm}^3/\text{s}$

Elektroda: ECu (—)

Čas	μs				V_i	i_e	Dielektrik
					V	A	
t_e IE	3	12	25	100	80	9	Mentor 28
t_e IF	3	6,9	14,4	34,2	100	10	Schell sol TD
t_i IE	7,8	23,9	53,3	237,2	80	9	Mentor 28
t_i IF	3,5	10	21	87	100	10	Schell sol TD
t_e IE	3	12	25	100	80	27	Mentor 28
t_e IF	2,3	8,8	18,2	71,2	100	25	Schell sol TD
t_i IE	6,2	21,5	34,6	180,6	80	27	Mentor 28
t_i IF	3,5	10	21	87	100	25	Schell sol TD

Elektroda: WCu $\varnothing 15/3$ (—)

Čas	μs				V_i	i_e	Dielektrik
					V	A	
t_e IE	3	12	25	100	80	9	Mentor 28
t_e IF	2,7	6,9	12	33,5	100	10	Schell sol TD
t_i IE	9,2	21,6	53,3	224,1	80	9	Mentor 28
t_i IF	3,5	10	21	87	100	10	Schell sol TD
t_e IE	3	12	25	100	80	27	Mentor 28
t_e IF	2,9	6,6	17	65	100	25	Schell sol TD
t_i IE	5,6	21,1	45,7	173,8	80	27	Mentor 28
t_i IF	3,5	10	21	87	100	25	Schell sol TD

— relativno frekvenco učinkovitih razelektritvev:

$$\lambda_e = \frac{f_e}{f_p} \tag{1}$$

— relativno frekvenco prostih impulzov:

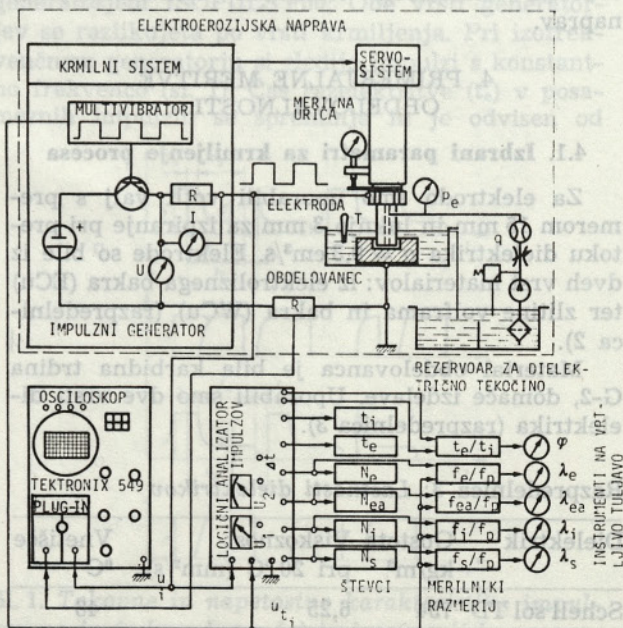
$$\lambda_i = \frac{f_i}{f_p} \tag{2}$$

— relativno frekvenco nenormalnih razelektritvev:

$$\lambda_{ea} = \frac{f_{ea}}{f_p} \tag{3}$$

— relativno frekvenco kratkih stikov:

$$\lambda_s = \frac{f_s}{f_p} \tag{4}$$



Sl. 2. Merilni stavek elektroerozijskega procesa

INSTRUMENTI NA VRT. LJUVO TULJAVO

pri čemer pomenijo

$$t \quad \text{— skupni čas testa v časovni enoti}$$

$$f_p = \frac{1}{t_p} \quad \text{— število impulzov v časovni enoti} \quad (5)$$

$$f_e = \frac{N_e}{t} \quad \text{— število efektivnih impulzov v časovni enoti} \quad (6)$$

$$f_i = \frac{N_i}{t} \quad \text{— število prostih impulzov v časovni enoti} \quad (7)$$

$$f_{ea} = \frac{N_{ea}}{t} \quad \text{— število nenormalnih impulzov v časovni enoti} \quad (8)$$

$$f_s = \frac{N_s}{t} \quad \text{— število kratkih stikov v časovni enoti} \quad (9)$$

Nadalje lahko z analizatorjem merimo vsoto časov impulzov ($\sum t_i$), vsoto časov razelektritev ($\sum t_e$) ali vsoto časov zakasnitev vžiga ($\sum t_d$).

Iz njih dobimo povprečni relativni čas razelektritev Φ , ki je definiran z razmerjem med vsoto časov razelektritev in vsoto časov impulzov:

$$\Phi = \frac{\sum t_e}{\sum t_i} \quad (10)$$

Kot glavno merilo za obdelovalnost smo merili erodirani material obdelovanca in elektrode na enoto časa v odvisnosti od nastavnih parametrov.

$$V_W = \frac{\Delta G_W}{\varrho_W t} \quad \text{— erodirani material obdelovanca na enoto časa: (mm³/s)} \quad (11)$$

$$V_E = \frac{\Delta G_E}{\varrho_E t} \quad \text{— obraba elektrode na enoto časa: (mm³/s)} \quad (12)$$

V teh enačbah pomenijo:

ΔG_W — spremembo mase obdelovanca med obdelavo

ΔG_E — spremembo mase elektrode med obdelavo

ϱ_W — gostoto obdelovanca in

ϱ_E — gostoto elektrode.

Razmerje med obrabo elektrode in erodiranim materialom obdelovanca je relativna obraba elektrode. Izražena je z enačbo

$$\vartheta = \frac{V_E}{V_W} \quad (13)$$

Posebej zanimive rezultate dajo izračuni erodiranega materiala obdelovanca na čas razelektritve (V_{Wte}) in obrabe elektrode na čas razelektritve (V_{Ete}). S tema parametroma lahko primerjamo učinke v povprečnem času ene razelektritve.

Tako dobimo:

$$V_{Wte} = \frac{\Delta G_W}{\varrho_W \sum t_e} \quad \text{(mm³/s)} \quad (14)$$

in

$$V_{Ete} = \frac{\Delta G_E}{\varrho_E \sum t_e} \quad \text{(mm³/s)} \quad (15)$$

4.2.2. Izoenergijski impulzi

Pri meritvah na elektroerozijski napravi z izoenergijskim generatorjem zaradi tehničnih težav nismo mogli uporabljati analizatorja. Generator je vključen v redno izdelavo in ga med obratovanjem nismo mogli vezati na analizator. Za krmiljenje in nadzor procesa je k stroju prigrajen monitor, ki opozarja operaterja na pojav nenormalnih razelektritev in kratkih stikov; ne omogoča pa štetja posameznih tipov impulzov oz. izračuna relativnih parametrov.

Efektivnost procesa smo izračunali iz delovne napetosti (U), ki smo jo med procesom merili s serijo impulzov. Čas razelektritve (t_e) in čas intervala (t_0) sta nastavljiva parametra.

$$U = \frac{1}{t_d + t_e + t_0} \cdot \left(\int_0^{t_d} u_i dt + \int_0^{t_e} u_e dt + \int_0^{t_0} u_0 dt \right) = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} u dt \quad (16)$$

V enačbi (16) smo uporabili čas zakasnitve vžiga t_d posameznega impulza. Iz delovne napetosti U lahko izračunamo le čas zakasnitve vžiga povprečnega impulza \bar{t}_d , ker smo z voltmetrom izmerili samo delovne napetosti serije impulzov.

$$U = \frac{1}{\bar{t}_d + t_e + t_0} (u_i \bar{t}_d + \bar{u}_e t_e + u_0 t_0) \quad (17)$$

Vrednosti proste napetosti ($u_i = 80$ V) in v času intervala ($u_0 = 0$) sta znani. Povprečno razelektritveno napetost u_e , ki jo lahko izračunamo tudi po enačbi:

$$\bar{u}_e = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} u dt \quad (18)$$

smo izmerili na osciloskopu ($\bar{u}_e = 18 \dots 22$ V).

Povprečni čas zakasnitve vžiga izračunamo iz enačbe (16)

$$\bar{t}_d = \frac{\bar{u}_e t_e + u_0 t_0 - U(t_e - t_0)}{U - u_i} \quad (19)$$

Povprečni čas periode izračunamo:

$$\bar{t}_p = \bar{t}_d + t_e + t_0 \quad (20)$$

Povprečni čas impulza je

$$\bar{t}_i = \bar{t}_d + t_e \quad (21)$$

Po enačbi (5) lahko iz povprečnega časa periode izračunamo povprečno impulzno frekvenco f_p . Iz znanega celotnega časa testa (t) izračunamo število vseh impulzov med testom:

$$N_p = \bar{f}_p t \quad (22)$$

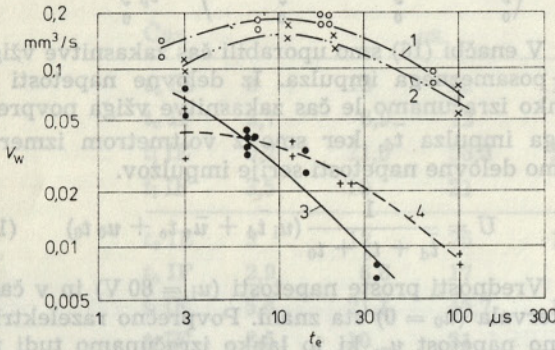
Pri uporabljenem izoenergijskem generatorju ni prostih impulzov. Zato so v izračunano število impulzov vštete le dejanske in nenormalne razelektritve ter kratki stiki.

4.3. Rezultati meritev

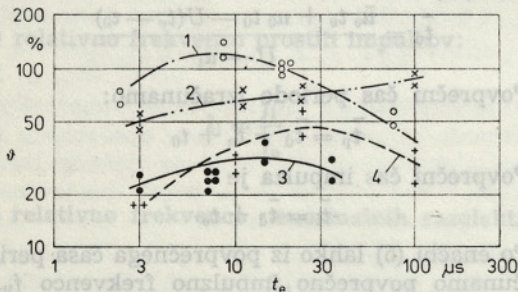
Meritve so obsegale meritve obdelovalnosti in delovnih parametrov. Rezultate meritev smo med seboj primerjali pri povprečnem času razelektritve (\bar{t}_e) in povprečnem času impulza (\bar{t}_i). Pri izofrekvenčnem generatorju, kjer je nastavitveni parameter čas impulza (t_i), smo povprečni čas razelektritve (\bar{t}_e) izračunali iz rezultatov meritev delovnih parametrov:

$$\bar{t}_e = \frac{\sum t_e}{\sum N_e} \quad (23)$$

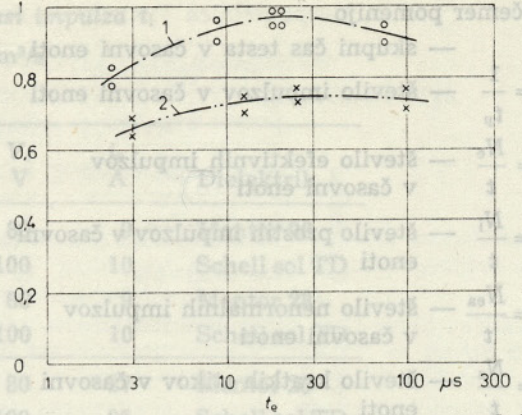
Pri izoenergijskem generatorju, kjer je nastavni parameter čas razelektritve (t_e), pa smo iz meritev delovne napetosti (U) izračunali povprečni čas impulza (\bar{t}_i) (21). Iz razpredelnice 4 je razvidno, da so odstopki manjši pri večjih tokovih razelektritev (\bar{i}_e), kjer je proces potekal stabilneje. Odstopki pri časih razelektritve (t_e) so manjši, kakor pri časih impulzov (t_i).



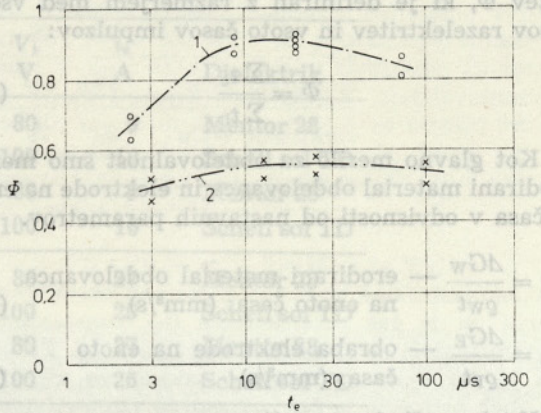
Sl. 3. Erodირani material obdelovanca V_w v odvisnosti od časa razelektritve t_e
 Krivulja 1 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 25$ A,
 krivulja 2 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 27$ A,
 krivulja 3 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 10$ A in
 krivulja 4 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 9$ A.
 Elektroda ECu, obdelovanec G 2.



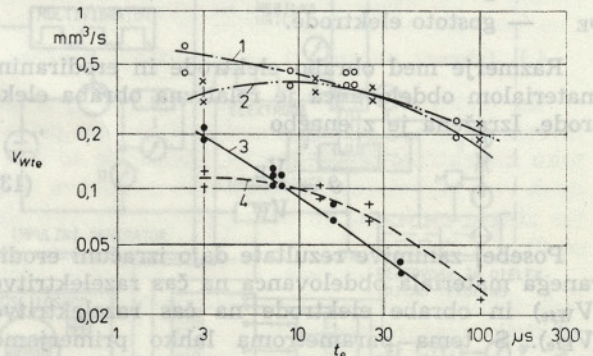
Sl. 4. Relativna obraba elektrode φ v odvisnosti od časa razelektritve t_e
 Krivulja 1 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 25$ A,
 krivulja 2 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 27$ A,
 krivulja 3 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 10$ A in
 krivulja 4 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 9$ A.
 Elektroda ECu, obdelovanec G 2.



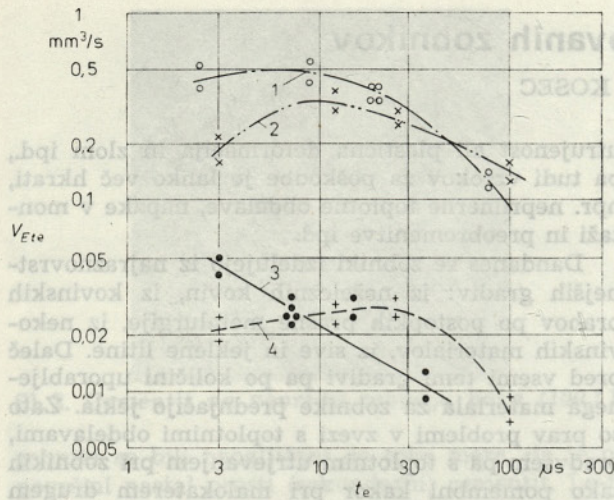
Sl. 5. Relativna frekvenca λ_e v odvisnosti od časa razelektritve t_e
 Krivulja 1 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 25$ A in
 krivulja 2 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 27$ A.
 Elektroda ECu, obdelovanec G 2.



Sl. 6. Relativni čas razelektritve Φ v odvisnosti od časa razelektritve t_e
 Krivulja 1 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 25$ A in
 krivulja 2 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 27$ A.
 Elektroda ECu, obdelovanec G 2.

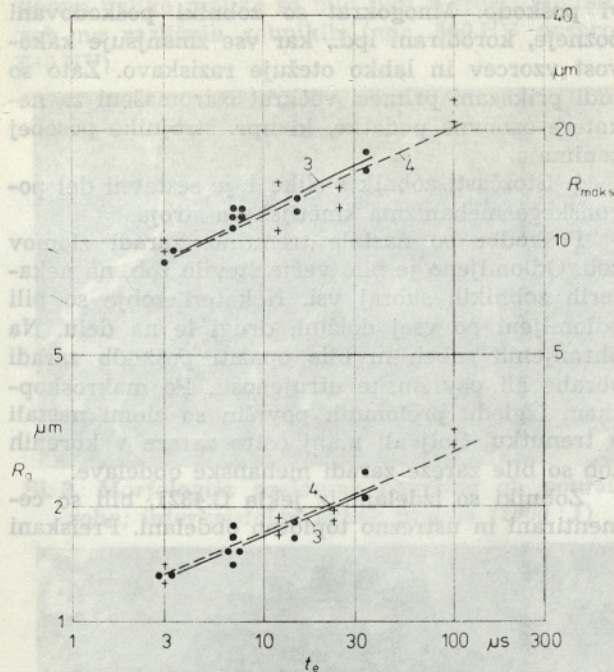


Sl. 7. Erodირani material obdelovanca na čas razelektritve V_{we} v odvisnosti od časa razelektritve t_e
 Krivulja 1 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 25$ A,
 krivulja 2 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 27$ A,
 krivulja 3 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 10$ A in
 krivulja 4 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 9$ A.
 Elektroda ECu, obdelovanec G 2.



Sl. 8. Obraba elektrode na čas razelektritve V_{Ete} v odvisnosti od časa razelektritve t_e

Krivulja 1 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 25$ A,
 krivulja 2 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 27$ A,
 krivulja 3 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 10$ A in
 krivulja 4 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 9$ A.
 Elektroda ECu, obdelovanec G 2.



Sl. 9. Srednji odstopkec profila R_a in največja višina grebenov R_{maks} v odvisnosti od časa razelektritve t_e

Krivulja 3 — izofrekvenčni generator z $\bar{i}_e = 10$ A in
 krivulja 4 — izoenergijski generator z $\bar{i}_e = 9$ A.
 Elektroda ECu, obdelovanec G 2.

Rezultate meritev obdelovalnosti in delovnih parametrov za elektrodo iz ECu in za obdelovanec G 2 kažejo diagrami — sl. 3 do 9.

5. SKLEP

Za primerjavo rezultatov so primernejše odvisnosti posameznih veličin glede na čas razelektritve (razpredelnica 4). Količina erodiranega materiala in obraba elektrode (slike 3, 4, 7 in 8) je odvisna od učinkovitosti obdelave (slike 5 in 6). Z večanjem učinkovitosti se povečuje tudi količina erodiranega materiala in obraba elektrode. Pri hrapavosti obdelanih površin ni opaziti večjih razlik (sl. 9).

Sklepamo, da na produktivnost naprave vpliva v večji meri učinkovitost krmiljenja naprave kakor pa vrsta generatorja. Učinkovnejše bodo napravo krmilili zmogljivi operator in adaptivni krmilni sistemi, ki preprečujejo pojave motenj v procesu.

Na izkoriščenost naprave zelo vpliva tudi organiziranost vzdrževanja, ki pa je zaradi specifičnosti naprave v veliki meri odvisna od izdelovalca naprave.

LITERATURA

- [1] Roethel, F.: Nekaj misli o izbiri posebnih tehnoloških postopkov za obdelavo; Strojniški vestnik, 1977, št. 1—2, str. 23...28.
- [2] Roethel, F.: Elektroerozijska obdelava na naših tleh; Strojniški vestnik, 1976, št. 11—12, str. 325...332.
- [3] Dobovšek, M., Roethel, F.: Prispevek k raziskavam obdelovalnosti po postopku EDM; 11. jugoslovnsko svetovanje za proizvodstveno mašinstvo 2, Ohrid, 1977, str. 179...188.
- [4] Roethel, F., Kosec, L., Garbajs, V.: Contribution to the Microanalysis of the Spark eroded Surfaces; Annals of the CIRP, Vol. 25/1/1976, s. 135...140.
- [5] Kosec, L., Roethel, F., Garbajs, V.: Kennzeichen von Randzonen beim funkenerosiven Bearbeiten; Fertigung, 1978, št. 1, str. 9...13.
- [6] Roethel, F., Dobovšek, M., Garbajs, V.: Primerjava lastnosti domačega in tujega materiala za utope pri obdelavi z elektroerozijo. Zbornik objav — I, XII. jugoslovnskega posvetovanja proizvodnega strojništva, Maribor, 1978, str. 12.1 do 12.10.
- [7] Cornelissen, H., Snoeys, R., Kruth J. P.: Technological surfaces, an objective criterion for comparing EDM-systems; CIRP Annals 1978, Vol. 27/1, 1978, str. 101...106.
- [8] Garbajs, V., Mikac, S., Roethel, F.: Meritve EDM parametrov; Zbornik na trudovi — 11. jugoslovnsko svetovanje za proizvodstveno mašinstvo, 2, Ohrid, 1977, str. 156...166.
- [9] Roethel, F., Dobovšek, M.: Izbira sistemov za elektroerozijsko obdelavo orodij za preoblikovanje; Zbornik svetovanja — 14. svetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Čačak, 1980, str. 137...149.

Naslov avtorjev: prof. dr. Franc Roethel, dipl. inž.,
 asist. Marjan Dobovšek, dipl. inž.
 oba: Fakulteta za strojništvo,
 Ljubljana.