

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

ADAPTIVNI KRMILNIK ELEKTROEROZIJSKEGA  
PROCESA GRAJEN S POMOČJO UMETNE  
INTELIGENCE

DIPLOMSKA NALOGA VISOKOŠOLSKEGA ŠTUDIJA

Joško Valentinčič

Ljubljana, 1997

UNIVERZA V LJUBLJANI  
Fakulteta za strojništvo

ADAPTIVNI KRMILNIK ELEKTROEROZIJSKEGA  
PROCESA GRAJEN S POMOČJO UMETNE  
INTELIGENCE

DIPLOMSKA NALOGA VISOKOŠOLSKEGA ŠTUDIJA

Joško Valentinčič

Mentor: doc.dr. Mihael Junkar, dipl.ing.

Ljubljana, 1997

*Zahvaljujem se*

*vsem članom Laboratorija za alternativne tehnologije za topel sprejem v delovno okolje, prijetno vzdušje in nesebično pomoč pri problemih, katerih ni primanjkovalo.*

## **Adaptivni krmilnik elektroerozijskega procesa grajen s pomočjo umetne inteligence**

Joško Valentinčič

Ključne besede: elektroerozija  
umetna inteligenca  
strojno učenje  
krmilnik  
FORS

Izvleček: Obravnavali smo karakteristike elektroerozijskega procesa in ugotavljali povezave med posameznimi parametri, ki v procesu nastopajo. Predstavili smo vrsto sistemov, ki so bili grajeni za doseg čimboljših karakteristik procesa in predstavili lasten krmilni sistem, katerega referenčni model je bil grajen z modeliranjem operaterjevih posegov v proces. Modeliranje smo izvedli s sistemom FORS (First Order Regression System). Dobljena pravila smo prevedli v obliko algoritma *if-then* pravil v programskem jeziku Pascal. Krmilnik je bil preiskušn v praksi.

## **Adaptive Controller for EDM Process Build by Artificial Intelligence**

Joško Valentinčič

Key words: EDM  
artificial intelligence  
machine learning  
controller  
FORS

Abstract: In our work characteristics of EDM (Electrical Discharge Machining) are presented. Relations between parameters which take part in the machining are discussed. Some controllers which have already been developed are described. Further on new controller with reference model which have been build by FORS (First Order Regression System) which works on basis of machine learning is presented. Developed reference model have been translated into algorithm of *if-then* rules in Turbo Pascal language. Controller have been experimentally tested.

# Kazalo

<b>1. UVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2. ELEKTROEROZIJSKI PROCES (EDM)</b> .....	<b>10</b>
2.1 POTEK OBDELAVE .....	10
2.2 PREGLED PROCESOV POTOPNE ELEKTROEROZIJE.....	11
2.3 POTEK RAZELEKTRITVE PRI ISKRNEM ELEKTROEROZIJSKEM PROCESU .....	12
2.4 PARAMETRI ISKRNEGA ELEKTROEROZIJSKEGA PROCESA .....	13
2.5 DELITEV PARAMETROV .....	14
2.6 VHODNI PARAMETRI V PROCES .....	15
2.6.1 <i>Generatorji impulzov</i> .....	15
I Izofrekventni statični impulzni generator.....	16
II Izoenergijski statični impulzni generator .....	17
III Statični impulzni generator z vžigno napetostno konico .....	17
IV Statični impulzni generator z vžigalnim impulzom .....	18
V Generator s krmiljeno obliko tokovnega impulza .....	18
VI Večkanalni statični impulzni generatorji .....	19
2.6.2 <i>Oblika izhodnih impulzov iz generatorja</i> .....	19
I Trapezna oblika impulzov .....	19
II Sinusna oblika impulzov .....	20
2.6.3 <i>Izpiranje reže, dielektrik</i> .....	20
2.7 PROCESNI PARAMETRI.....	21
2.7.1 <i>Klasifikacija razelektritev</i> .....	21
I Prosti impulzi - A .....	22
II Delovne razelektritve - B .....	23
III Prehodne razelektritve - BC.....	23
IV Obločne razelektritve - C.....	23
V Zakasnele razelektritve - CD.....	23
VI Kratkostične razelektritve - D.....	23
2.7.2 <i>Izmenjava materiala med elektrodama</i> .....	24
2.7.3 <i>Temperatura v reži</i> .....	24
2.8 IZHODNI PARAMETRI IZ PROCESA .....	25
2.8.1 <i>Produktivnost</i> .....	25
2.8.2 <i>Obraba elektrode</i> .....	26
2.8.3 <i>Integriteta površine</i> .....	29
I Hrapavost .....	29
II Toplotno prizadeta plast.....	29
III Doseganje čimboljše integritete površine .....	30
IV Predikcija integritete površine.....	32
2.9 IZBOLJŠANJE ELEKTROEROZIJSKEGA PROCESA BREZ KRMILJENJA .....	32
2.9.1 <i>Odmikanje elektrode</i> .....	33
2.9.2 <i>Nihanje elektrode</i> .....	33
2.9.3 <i>Planetarno gibanje elektrode</i> .....	33
2.9.4 <i>Ultrazvočne vibracije elektrode</i> .....	34
2.9.5 <i>Dovajanje kisika v režo</i> .....	34
2.9.6 <i>Preprečevanje neželenih impulzov</i> .....	34
2.9.7 <i>Ostali alternativni pristopi</i> .....	35
<b>3. KRMILJENJE ELEKTROEROZIJSKEGA PROCESA</b> .....	<b>36</b>
3.1 POMEMBNE KARAKTERISTIKE PRI VODENJU ELEKTROEROZIJSKEGA PROCESA .....	36
3.2 PARAMETRI ELEKTROEROZIJSKEGA PROCESA S STALIŠČA KRMILNIKA.....	36
3.2.1 <i>Identifikacija procesa</i> .....	37
3.2.2 <i>Krmiljenje procesa</i> .....	38
3.3 ADAPTIVNO KRMILJENJE .....	38
3.4 PRIMERI KRMILNIKOV ZA ELEKTROEROZIJSKI PROCES .....	40
3.4.1 <i>Vodenje s pomočjo referenčnega modela</i> .....	40
3.4.2 <i>Večnivojski adaptivni krmilnik</i> .....	40
3.4.3 <i>Krmilnik z mehko logiko</i> .....	41

3.4.4 Odmik elektrode po potrebi.....	41
3.4.5 Identifikacija na podlagi frekvenčne porazdelitve časa zakasnitve vžiga .....	42
3.4.6 Direktno krmiljenje servo sistema.....	42
3.4.7 Testni impulzi .....	43
3.4.8 Vodenje procesa z funkcijsko vrednostjo deležev razelektritev .....	43
<b>4. METODE UMETNE INTELIGENCE.....</b>	<b>44</b>
4.1 UVOD.....	44
4.2 EKSPERTNI SISTEM .....	44
4.3 PARADIGMA STROJNEGA UČENJA .....	46
4.4 SISTEM FORS .....	46
4.5 MODELIRANJE OPERATERJEVIH POSEGOV V PROCES .....	46
<b>5. ADAPTIVNI KRMILNIK RAZVIT NA FAKULTETI ZA STROJNIŠTVO .....</b>	<b>48</b>
5.1 UVOD.....	48
5.2 NAPRAVA ZA ELEKTROEROZIJSKO GREZENJE INGERSOLL 80P .....	48
5.2.1 Sklop za regulacijo velikosti reže .....	48
5.2.2 Impulzni generator.....	49
5.2.3 Močnostna stopnja .....	50
5.2.4 Sklop za regulacijo onesnaženosti reže .....	50
5.3 ADAPTIVNI KRMILNIK.....	50
5.3.1 Identifikacija procesa.....	51
I Elektroerozijski procesni analizator .....	51
II Modifikacijski elementi .....	51
III A/D pretvornik.....	51
IV Računalnik.....	53
5.3.2 Krmiljenje procesa .....	54
5.3.3 Referenčni model.....	54
I Izvedba modeliranja operaterjevih posegov v proces s pomočjo sistema FORS .....	56
II Nadgradnja in modifikacija rezultatov pridobljenih z modeliranjem .....	58
5.4 PREIZKUSI.....	60
5.4.1 Elektroerozijski proces, ki ga vodi operater.....	62
5.4.2 Elektroerozijski proces voden s FORS-ovim algoritmom.....	63
5.4.3 Elektroerozijski proces voden z modificiranim algoritmom.....	66
5.4.4 Komentar rezultatov.....	70
<b>6. ZAKLJUČEK.....</b>	<b>72</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>75</b>

## Uporabljene oznake

$\tau$	obremenilni količnik
$d_w$	globina bele plasti [ $\mu m$ ]
$E$	energija razelektritve [ $J$ ]
$e$	gostota energije [ $J/mm^2$ ]
$f_p$	frekvenca impulzov [ $Hz$ ]
$I$	tok — dejanski tok v reži [ $A$ ]
$i_e$	imenski tok — maksimalna vrednost toka, ki lahko steče med elektrodama [ $A$ ]
$i_{e1}$	impulzni tok prvega generatorja — manjši tok [ $A$ ]
$i_{e2}$	impulzni tok drugega generatorja — večji tok [ $A$ ]
$i_r$	razelektritveni tok [ $A$ ]
$K$	časovna konstanta servo sistema
$N$	moč impulza [ $W$ ]
$R_a$	srednje aritmetično odstopanje neravnin [ $\mu m$ ]
$t_d$	čas zakasnitve vžiga [ $\mu s$ ]
$t_{df}$	vsota časov $t_d$ , $t_r$ in $t_f$
$t_e$	čas vzdrževanja gorilne napetosti — čas razelektritve [ $\mu s$ ]
$t_f$	čas padca napetosti — čas, v katerem pade napetost iz nivoja proste napetosti na nivo razelektritvene napetosti [ $\mu s$ ]
$t_i$	čas pulza — čas trajanja celotnega impulza [ $\mu s$ ]
$t_{i,kr}$	trajanje impulza da ravno nastopi taljenje — predpostavka ploskovnega izvora [ $\mu s$ ]
$t_{i,opt}$	optimalno trajanje impulza glede na predpostavko točkovnega izvora [ $\mu s$ ]
$t_o$	čas pavze — čas med dvema impulzoma [ $\mu s$ ]
$t_p$	čas periode — čas med začetkoma dveh impulzov [ $\mu s$ ]
$t_r$	čas porasta napetosti [ $\mu s$ ]
$U$	napetost — dejanska napetost v reži [ $V$ ]
$U'$	povprečna napetost v reži čez veliko število razelektritev (cca. 1000) [ $V$ ]
$u_b$	vžigalna konica napetosti — pri generatorjih z vžigalnim impulzom [ $V$ ]
$U_{gen}$	napetost, ki jo generira generator impulzov [ $V$ ]
$u_i$	imenska napetost — napetost na elektrodah tik pred razelektritvijo, največja napetost [ $V$ ]
$u_r$	razelektritvena napetost [ $V$ ]
$U_{ref}$	referenčna napetost v reži, na podlagi katere reagira servo sistem [ $V$ ]
$V_e$	obraba orodja [ $g/min$ ]
$V_w$	odvzem materiala [ $g/min$ ]

# 1. Uvod

Procese delimo v osnovni dve skupini, deterministične in stohastične. Deterministične procese je mogoče dobro popisati z matematičnimi enačbami. V tehniki večino problemov obravnavamo deterministično, kar se za zahtevano natančnost v večini primerov izkaže za zadostno. Tipičen strohastičen proces je met kovanca, kjer naslednji dogodek ni v nikakršni odvisnosti od predhodnega. Obstaja pa še vmesna skupina procesov — kaotični procesi, kjer je naslednji dogodek v odvisnosti od predhodnega, ta odvisnost pa z medsebojno razdaljo dogodkov pada.

V nalogi se bomo ukvarjali s problemom vodenja procesa elektroerozijske obdelave, in sicer potopne erozije. V literaturi se navaja, da je to stohastičen proces. Pri tem pa se moramo zavedati, da se oznaka “stohastičen proces” običajno uporablja tako za stohastične kot tudi za kaotične procese. Elektroerozijski proces je zagotovo bolj stohastičen kot determinističen, oziroma parametri, s katerimi proces identificiramo imajo takšne karakteristike. Za nekatere je celo dokazano, da so neodvisni od njegovega predhodnika.

V praksi se je izkazalo, da je za optimalne karakteristike procesa potreben stalen nadzor in po potrebi posredovanje v proces. Pojavljale so se različne rešitve problema, od stalne prisotnosti operaterja, pa do raznih krmilnikov, ki so bili grajeni na principih matematičnih modelov, mehke logike (*angl.* fuzzy logic), metod umetne inteligence (*angl.* artificial intelligence), itd. Pri tem so uporabljali ali operaterjevo ali ekspertno znanje. V našem primeru smo se odločili za gradnjo adaptivnega sistema na principu zajemanja operaterjevega znanja s pomočjo ene od metod umetne inteligence, t.j. strojnega učenja (*angl.* machine learning). To pravilo nam je služilo kot osnova za generiranje pravila vodenja procesa, ki zajema tako znanje operaterja, kot tudi tehnologa.

V pričujočem delu si bomo najprej ogledali kako in zakaj pri elektroerozijskem procesu pride do obdelave. Nadalje bomo definirali značilne parametre elektroerozijskega procesa in jih razdelili na vhodne, procesne in izhodne parametre glede na proces in njihove medsebojne vplive, kar nam bo omogočilo lažji in bolj sistematičen pristop k identifikaciji in krmiljenju procesa. Na primerih si bomo ogledali razne prijeme, ki izboljšajo stabilnost procesa ter razne pristope h gradnji krmilnikov. Ogledali si bomo, kateri krmilniki so adaptivni in ugotovili, kateri parametri so primerni za vhodne in izhodne parametre v krmilnik. Nekaj bomo spregovorili o metodah umetne inteligence in si podrobneje ogledali principe strojnega učenja. To metodo bomo uporabili za obdelavo podatkov operaterjevega vodenja procesa in tvorili algoritem vodenja procesa, ki naj bi bil po karakteristikah čimbliže operaterjevim sposobnostim. Te karakteristike bomo na koncu preverili v praksi.

## 2. Elektroerozijski proces (EDM<sup>1</sup>)

### 2.1 Potek obdelave

Pri vseh elektroerozijskih postopkih sta obdelovanec in orodje spojena z virom električne energije; predstavljata elektrodi, med katerima teče proces razelektritev skozi dielektrik. Pri potopni eroziji, tej se bomo v tem delu posvetili, je obdelovanec fiksno vpet na mizo, položaj orodja pa je določen s hidravličnim sistemom. Med seboj sta krmiljeno ali periodično razmaknjeni za določeno razdaljo — režo. V reži se sprošča energija predvsem v obliki toplote, zgoščene v zelo majhni prostornini. Material obdelovanca in deloma tudi orodja se zaradi te toplote na površini zmehča, raztali, razpade in deloma izpari. Spremenjeno prostornino materiala odnesejo električni, toplotni in hidrodinamični procesi s površine obdelovanca. Pogoji za potek procesa je le električna prevodnost obdelovanca. Med procesom se spreminjajo tudi kemične in druge lastnosti dielektrika /Slika 2.1/.

Slika 2.1: Fotografije elektroerozijskega procesa

Iskro povzroča napetost, ki mora prebiti izolacijsko trdnost dielektrika med elektrodama. To se zgodi na mestu, kjer je razdalja med elektrodama najmanjša oziroma prevodnost dielektrika največja. V tekočini, ki ionizira, se naredi električno prevoden kanal plazme. Potek energije v času obstoja kanala plazme, vpliva na količino raztaljenega in uparjenega materiala na elektrodah. Po prenehanju dotoka energije nastane implozija kanala. Hitro zmanjšanje tlaka

---

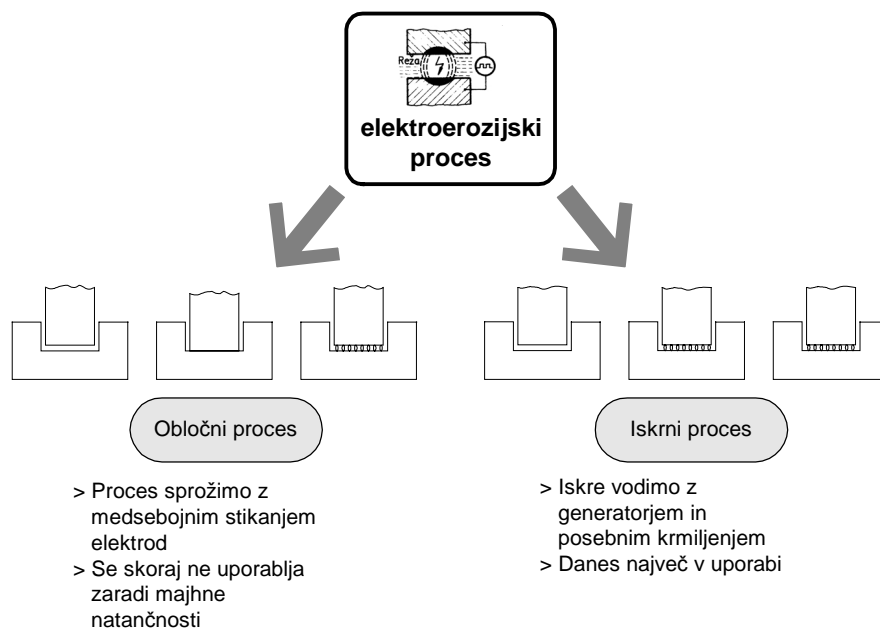
<sup>1</sup>EDM — Electrical Discharge Machining

povzročata elektromehanske sile, ki odnesejo raztaljen in uparjen material elektrod; ta se v hladnem dielektriku ponovno ohladi. Odnášanje iz reže uravnava gibanje dielektrika, ki se pretaka, odnaša in hladi izločene delce. Obenem hladi tudi elektrode. S primernim izbiranjem oblike in trajanja impulzov dobimo po globini in ploščini omejene kraterje na površini obdelovanca na mestih, kjer je bil material odnesen. Količina in potek sproščene energije na površini povzročata različne oblike kraterjev [ROETHEL86].

## 2.2 Pregled procesov potopne elektroerozije

Razelektritev med dvema elektrodama lahko povzročamo na več načinov [ROETHEL86] /Slika 2.2/. Najpreprosteje sprožimo proces razelektritve z medsebojnim stikanjem elektrod (**Obločni elektroerozijski proces**). Na mestu dotika se energija spreminja v glavnem v Jouleovo toploto. Neposreden dotik sproži proces, nakar elektrodo odmaknemo. Aksialna nihanja orodja povzročajo periodične prekinitve procesa. Tako dobimo prostorsko in časovno zaporedno ločene stacionarne razelektritve, od katerih je odvisno odnašanje materiala. Tak proces imenujemo obločna elektroerozija. Obločna elektroerozija se dandanes uporablja zelo redko. Uporabljamo jo lahko za odnašanje, kjer ni potrebna velika natančnost ločenih površin. Največkrat pride v poštev za odstranjevanje zlomljenih svetrov iz izvrtine in podobno.

Danes je v uporabi največ **iskrna elektroerozija**, kjer vodimo električne iskre popolnoma električno z generatorjem in posebnim krmiljenjem. Nadalje bomo imeli v mislih te procese.



Slika 2.2: Delitev elektroerozijskih procesov

Pri iskrnem procesu sta elektrodi nameščeni v neprevodni tekočini (dielektriku) na majhni medsebojni oddaljenosti (0,005 - 0,5 mm), ki jo imenujemo delovna reža. Primerna napetost povzroči električno iskro med elektrodama. Na površini elektrod ostane po razelektritvi elektroerozijski krater. Obdelana površina sestoji iz množice kraterjev, katerih dimenzije in oblike so odvisne od električnih parametrov procesa in materialov elektrod. Med obdelavo orodje čedalje globlje prodira v obdelovanec in v njem pušča svojo obliko. Obdelovanec je vedno tista elektroda, ki močnejše erodira.

### 2.3 Potek razelektritve pri iskrnem elektroerozijskem procesu

Pri iskrni eroziji ne pride do stikanja elektrod; ti sta vedno razmaknjeni. Pod vplivom električnega polja prično izhajati iz katode elektroni in pospeševati hitrost proti anodi. S tem tok močno narašča. Začenja se razelektritev. Pri tem se sprošča toplota, ki uplinja dielektrik, na anodi temperatura hitro naraste. Razlog visokega porasta toka v reži je majhna električna upornost v reži in magnetni "pinch" efekt. Nato pride do toplotne disociacije molekul in toplotne ionizacije atomov. Vzpostavi se ioniziran kanal — plazma. Nastajajo ioni, ki potujejo proti katodi, vendar njene temperature ne dvignejo tako hitro, kot to storijo elektroni na anodi [CROKAL71, ROETHEL86]. Za daljše čase impulza je padec potenciala napetosti linearen z gostoto toka v reži, za krajše pa ta zakonitost ne velja [ZINGER56], kar se ujema z ugotovitvijo, da pri kratkih časih impulza (0,2 do 2  $\mu$ s) veljajo drugačne zakonitosti, ki še niso razložene [HEUVEL69].

Na začetku razelektritve teče večji del toka po površini elektrode (skin efekt). Po približno 1 ms se vzpostavi enaka gostota toka po celotnem volumnu elektrode [CHINCHOLLE]. Kanal plazme se širi v odvisnosti od dovedene energije [ROETHEL86] in s širjenjem pada gostota toka [LUO90]. Med trajanjem impulza ima razelektritev tendenco k nastanku obloka; takrat gostota toka pade [CROKAL71]. V okolici kanala plazme se med procesom razvijejo plinski mehurčki. Pri porastu toka se plin v prostoru širi, kar pospešuje energija pare iz površine raztaljene kovine [ROETHEL86].

Po prenehanju dovajanja energije pride do implozije. Kanal plazme se razdeli na dva dela. Delitev je odvisna od temperature elektrod in sicer je večji del plazme pri toplejši elektrodi. Večji del plazme pomeni tudi večje nataljevanje materiala [CHINCHOLLE]. Tlak v mehurčku hitro pade, celo pod atmosferski tlak. Uparjalna temperatura in uparjalni tlak se zato znižata precej hitreje od temperature na površini kraterja. Padec tlaka povzroča zavretje pregrete kovine v kraterju, nastanek par in izmetavanje drobnih kapljic tekoče kovine. Pri izbranih časih razelektritve<sup>1</sup> ( $t_e$ ), se pojavlja največje odnašanje pri približno enakomernem poteku energije razelektritve [ROETHEL86].

Raziskave kraterjev so pokazale, da toplotni pojavi niso edini vzrok za odnašanje. Na mestu preboja nastajajo na elektrodah tokovi in moči velikih gostot ( $I/A=10^6-10^7$  A/cm<sup>2</sup> [ROETHEL86],  $P/A=10^5-10^6$  W/mm<sup>2</sup> [DAUW86]). Površino erodirajo tudi električna polja velikih jakosti, ki omogočajo odnašanje delcev s površine.

Dovedena energija v obliki impulza povzroča v začetnem času 0,01 do 0,1  $\mu$ s povišanje temperature na površini do vrelišča kovine. Kovina se v kraterju tali. S preizkusi je bilo ugotovljeno, da iz kraterja izpari 15 do 40 % materiala, ko doseže energija razelektritve svoj maksimum. V ekstremnih primerih se lahko upari do 80 % prostornine kraterja, in to pri velikih specifičnih tokovih in izredno kratkih impulzih. Razumljivo je, da je potem razmerje med odnašanjem in vloženo toplotno energijo v tem primeru manjše kot prej. Razlog je v tem, da je uparjalna toplota večja od talilne toplote. Pri dobro izbranih časih impulza je celotna odvzeta prostornina precej večja od prostornine odvzete z uparjanjem [ROETHEL86].

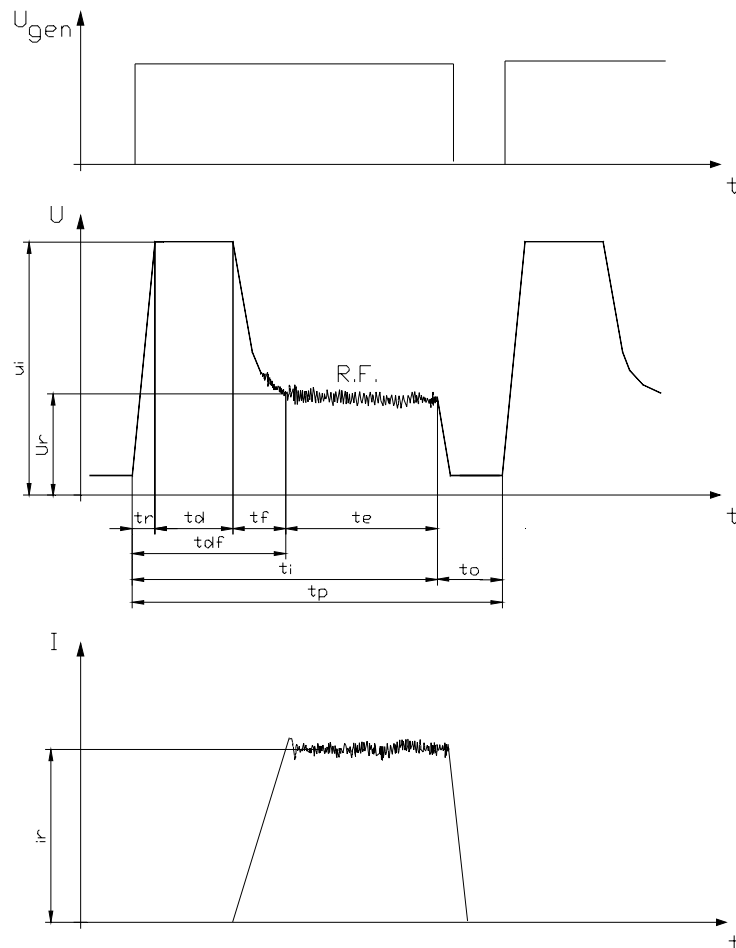
Na odnašanje močno vplivajo polariteta in fizikalne lastnosti elektrodnih materialov ter čas in potek toka razelektritve. S primerno izbranim parom orodje - obdelovanec imamo pri grezenju na obdelovancu do 99,5 % odnašanja in na orodju do 0,5 % odnašanja materiala. Pri grobih obdelavah imamo na orodju iz bakra do 20 % obrabe (do 1 % grafit), pri finih obdelavah pa do 5 % za baker (do 10 % za grafit) pri največji gostoti toka 5 - 10 A/cm<sup>2</sup> [ROETHEL86].

---

<sup>1</sup>Definicija časa trajanja razelektritve je podana v poglavju 2.4 - Parametri iskrnega elektroerozijskega procesa

## 2.4 Parametri iskrnega elektroerozijskega procesa

Osnova iskrnemu elektroerozijskemu procesu so električni impulzi, ki so generirani v generatorju impulzov z napetostjo nekaj voltov in tokom nekaj miliamperov. Običajno je možnost nastavljanja časa trajanja impulza<sup>1</sup> ( $t_i$ ) in časa pavze ( $t_o$ ) med dvema impulzoma /Slika 2.3/. Impulzi se v močnostnem delu ojačajo do nastavljene vrednosti. Med razelektritvijo so dejanske vrednosti toka<sup>2</sup> ( $i_r$ ) in napetosti ( $u_r$ ) nižje. Kljub temu pa z nastavljanjem imenske vrednosti toka ( $i_e$ ) in imenske vrednosti napetosti ( $u_i$ ) znatno vplivamo na karakteristike procesa. Te so odvisne tudi od razmer v reži med elektrodama, katere uravnavamo z razdaljo med elektrodama in pretokom (tlakom) dielektrika. Položaj orodja, običajno bakrena ali grafitna elektroda, je krmiljen s hidravličnim servo sistemom, običajno preko referenčne napetosti ( $U_{ref}$ ), ki jo določa operater preko potenciometra. Reža je tolikšna, da je povprečna napetost v reži enaka referenčni (pog. 5.3). Poleg referenčne napetosti nastavljamo tudi časovno konstanto servo sistema ( $K$ ). Obdelovanec je fiksno vpet na mizo in potopljen v dielektrik. Pretok le-tega skozi režo se uravnava z ventilom.



Slika 2.3: K definiciji parametrov elektroerozijskega procesa

Kot vidimo, potek razelektritve lahko nastavljamo le posredno preko zgoraj naštetih parametrov. Dejanski potek električnega toka ( $I$ ) in napetosti ( $U$ ) v reži je torej precej

<sup>1</sup>angl. pulse duration

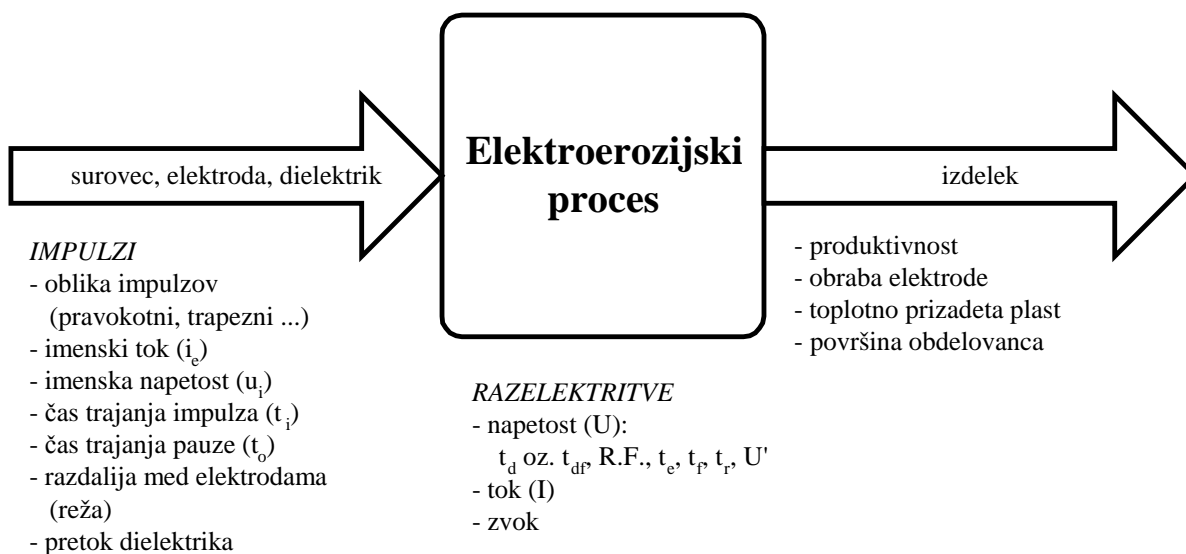
<sup>2</sup>Na sliki /Slika 2.3/, ki prikazuje idealno razelektritve, je tok razelektritve ( $i_r$ ) enak imenskemu toku ( $i_e$ ). Poleg takšnih razelektritvev se pojavljajo tudi nenormalne, pri katerih je tok razelektritve manjši od imenskega toka.

naključen. Na tokovnem, še posebej pa na napetostnem signalu določimo razne parametre, s katerimi identificiramo proces. S poznavanjem teh parametrov se odločimo o načinu poseganja v proces v smislu čimboljših karakteristik. To so: čas zakasnitve vžiga<sup>1</sup> ( $t_d$  ali  $t_{df}$ ), čas trajanja razelektritve ( $t_e$ ), čas rasti napetosti<sup>2</sup> ( $t_r$ ), čas padca napetosti<sup>3</sup> ( $t_f$ ), visokofrekvenčni signal<sup>4</sup> (R.F.).

## 2.5 Delitev parametrov

Zamislimo si npr. nam bolj znani proces struženja. V povezavi s tem procesom nastopajo različne veličine, ki jih lahko delimo na vhodne (rezalna hitrost, podajanje, material orodja in obdelovanca...), procesne (vibracije stroja, zračnost v vodilih, upogib obdelovanca) in izhodne (oblikovna natančnost, hrapavost površine, volumen odvzetega materiala...). Pri tem hočemo z nastavljenimi vhodnimi parametri doseči nam čimboljše izhodne parametre. Povezava med njimi pa poteka preko procesnih parametrov, ki so določeni s kvaliteto stroja.

Pri elektroerozijskem postopku je delitev še bolj pomembna, ker so procesni parametri odvisni od vhodnih parametrov in velikega deleža naključne komponente. tako je na podlagi vhodnih parametrov mogoče le slutiti procesne in dalje izhodne parametre /Slika 2.4/. Zaradi tega je bilo narejenih veliko raziskav in preizkušeno veliko prijemov za čim boljše obvladovanje procesa.



Slika 2.4: Parametri, ki nastopajo pri elektroerozijskem procesu

Veliko raziskovalcev je pristopilo k raziskavi elektroerozijskega procesa s pomočjo mono razelektritve (*angl.* single shot). To pomeni, da generator generira samo en impulz. Tako nastopi samo ena razelektritev in en krater. Za oba lahko določimo vse parametre. Na prvi pogled je to zelo eleganten pristop k ugotavljanju povezav med navedenimi vrstami parametrov, v resnici pa so razmere pri mono razelektritvi precej drugačne v primerjavi z običajnim procesom. Razlogov za razlike je več. Pri mono razelektritvi rabimo večjo gostoto energije za enak rezultat, ker je reža manj onesnažena v primerjavi z običajnim procesom

<sup>1</sup>*angl.* ignition delay time. Nekateri uporabljajo čas zakasnitve vžiga po definiciji parametra  $t_d$ , drugi pa  $t_{df}$ .

<sup>2</sup>*angl.* voltage raise time

<sup>3</sup>*angl.* voltage fall time

<sup>4</sup>*angl.* radio frequency signal (*pog.* 2.7)

[HEUVEL69]. Večja onesnaženost reže pomeni manjšo električno upornost, kar se odraža na samem procesu [ROETHEL86, WECK92, DAUW83, SNOEYS, BRUYN80a, BRUYN80b]. Pri mono razelektritvi imamo torej razmere v reži precej drugačne od tistih pri kontinuiranem procesu. Razlike so tako velike, da rezultatov mono razelektritve ne moremo direktno aplicirati [ROETHEL86]. Zato je večina raziskav potekala na kontinuiranem procesu.

Oglejmo si sedaj podrobneje parametre, ki nastopajo v elektroerozijskem procesu.

## 2.6 Vhodni parametri v proces

Vhodne parametre pri elektroerozijskem procesu delimo v dve skupini:

- nastavitveni parametri

Nastavimo jih pred začetkom obdelave in s tem določimo tip obdelave (groba, fina).

Nastavitve niso univerzalne za vse stroje, zato vsak proizvajalec elektroerozijske naprave priporoča vrednosti nastavitvenih parametrov za željen način dela. Vrednosti nastavitvenih parametrov so med drugim odvisne tudi od materiala elektrod.

- krmilni parametri

Te operater med procesom spreminja tako, da zagotavlja čim boljše karakteristike procesa.

Kateri so nastavitveni in kateri krmilni parametri je pogojeno predvsem s tipom stroja oziroma generatorja impulzov. Običajno so nastavitveni parametri imenska vrednost napetosti ( $u_i$ ), imenska vrednost toka ( $i_e$ ), čas impulza ( $t_i$ ) in polarnost elektrod, ostali so krmilni.

Pomen vhodnih parametrov na izhodne je v večji meri podan v poglavju 2.8 - Izhodni parametri.

### 2.6.1 Generatorji impulzov

Najpomembnejši vhodni parameter v proces je električni impulz, ki nastane v generatorju impulzov in se ojača v močnostnem delu. Časovni potek impulza je odvisen od vrste generatorja, to pa vpliva tudi na potek razelektritve. Ločimo tri osnovne vrste generatorjev [ROETHEL86]:

1. **Rotacijski impulzni generatorji** imajo vir napetosti vključen neposredno v razelektritveni tokokrog. Uporaba teh nizkofrekventnih generatorjev je dandanes zanemarljiva predvsem zato, ker omogočajo le grobo obdelavo.
2. **Relaksacijski generatorji** so sestavljeni iz dveh delov - tokokroga za polnjenje in tokokroga za praznjenje /Slika 2.5/. Polnilni tokokrog vsebuje vir enosmernega toka in hranilnike energije iz kapacitivnih, induktivnih in kombiniranih členov (RC, RLC, in RLCD). Pri nekrmiljenih generatrojih ima reža funkcijo stikala, ki sprosti energijo pri prekoračitvi prebojne napetosti z značilnim potekom razelektritev. Razumljivo je, da takega generatorja ni mogoče dobro krmiliti. Zato imajo nekatere izvedbe do neke mere krmiljen proces s tranzistorji, ki se uporabljajo za fino obdelavo. To vrsto generatorjev se uporablja pri napravah za elektroerozijsko rezanje z žico (WEDM<sup>1</sup>).
3. **Statični impulzni generatorji** oblikujejo impulze z majhno tokovno jakostjo. Te impulze ojačimo in jih vodimo na mesto obdelave. Tokovni impulzi so vzbujani z napetostnimi, ki jih je mogoče nastavljanje in krmiliti. Posredno ali neposredno lahko pri njih nastavljammo imensko napetost, imenski tok razelektritve, čas impulza in čas pavze. Tako je nastavljena

---

<sup>1</sup>WEDM — Wire Electro Discharge Machining

frekvenca impulzov oziroma čas periode. Osnovna oblika poteka razelektritev v reži je s tem podana. V procesu prihaja do sprememb delovnih razmer in zato ta oblika ni stalna in se spreminja. Ostali oznaki pomenita čas razelektritve ( $t_e$ ) in čas zakasnitve vžiga ( $t_d$ ).

Slika 2.5: Relaksacijski generator in potek razelektritev. Na diagramu impulzov je  $t_p$  čas periode,  $t_e$  pa čas razelektritve [ROETHEL86].

Statične generatorje uporabljamo povsod pri grezenju, zato bomo podrobneje pogledali te vrste generatorjev [ROETHEL86].

### *I Izofrekventni statični impulzni generator*

Prva osnovna vrsta generatorjev so izofrekventni impulzni generatorji, ki jih poznamo v dveh izvedbah: z dvema monostabilnima multivibratorjema in z astabilnim in monostabilnim multivibratorjem. Obe izvedbi zagotavljata enak potek razelektritev /Slika 2.6/.

Slika 2.6: Izofrekventne razelektritve [ROETHEL86]

Izofrekventni generator **z dvema monostabilnima multivibratorjema** je izvedba, ki določa s prvim generatorjem čas impulza ( $t_i$ ), pri tem jakostni tranzistorji prevajajo tok. Drugi generator uravnava čas pavze ( $t_o$ ), ko jakostni tranzistorji ne prevajajo toka. S tem je posredno nastavljena perioda impulzov ( $t_p$ ).

Izofrekventni generatorji ne omogočajo nastavljanja časa razelektritve ( $t_e$ ). Tako dobimo od impulza do impulza različno energijo razelektritve, ki je odvisna od časa zakasnitve vžiga ( $t_d$ ). Če je ta čas manjši od časa naraščanja napetosti na imensko vrednost, potem te napetosti ne dosežemo in pride do nezaželenega preboja, ki povzroča nenormalne razelektritve (razelektritev tipa C, *pog. 2.7.1*). Pri preveliki zakasnitvi vžiga do preboja sploh ne pride. Generatorju lahko nastavimo tudi maksimalno vrednost toka ( $i_e$ ) v delovnem impulzu z vklapljanjem večjega ali manjšega števila vzporedne vezanih jakostnih tranzistorjev.

Statični **generator z astabilnim in monostabilnim multivibratorjem** omogoča z astabilnim multivibratorjem oblikovanje impulzov, nastavljanje frekvence impulzov, s tem pa posredno čas periode ( $t_p$ ). Prirejani monostabilni multivibrator omogoča nastavitev trajanja impulza ( $t_i$ ).

Izofrekvenčno krmiljenje časa ne upošteva razmer v delovni reži in s tem ne krmili energije posameznih impulzov. Predvsem pri fini obdelavi, ko delamo s kratkimi impulzi, postane relativni čas razelektritve premajhen in odvzem materiala močno pade.

## ***II Izoenergijski statični impulzni generator***

Izoenergijski impulzni generator daje impulze z enakim časom razelektritve ( $t_e$ ) /Slika 2.7/. Tako zakasnitev vžiga ( $t_d$ ) ne vpliva na energijo posameznih impulzov. Z različno zakasnitvijo vžiga se spreminja tudi impulzna frekvenca. Glede na to, da se impulz podaljša, če se podaljša čas zakasnitve vžiga ( $t_d$ ), se zmanjša tudi frekvenca. Kljub manjši frekvenci dobimo zadovoljivo odnašanje tudi pri procesu fine obdelave. V generator je vgrajen detektor zakasnitve vžiga, s katerim ugotovimo začetek delovne razelektritve, ki krmili monostabilni multivibrator, na katerem je nastavljen čas dolžne razelektritve. Drug monostabilni multivibrator pa omogoča nastavitev časa intervala ( $t_0$ ).

Slika 2.7: Izoenergijski impulzi. [ROETHEL86]

Izvedena je bila primerjava med izofrekvenčnimi in izoenergijskimi generatorji. Nekateri ugotavljajo, da med obema načinoma delovanja ni značilne razlike. Ugotavljajo, da zaradi narave obeh procesov ne more biti med njima razlike, saj je pri obeh čas zakasnitve vžiga enak [CORNEL78, ROETHEL86].

Drugi se s tem ne strinjajo. Trdijo, da so svoje ugotovitve postavljali na podlagi procesa, ki je potekal v dokaj stabilnih pogojih. V zahtevnejših pogojih se pojavi razlika. Zaradi različne zakasnitve impulza se njegova oblika bolj spremeni pri izofrekventnem generatorju; izoenergijski prilagaja dolžino impulza času zakasnitve. Pri izofrekventnem generatorju to pomeni večjo obrabo orodja [BRUYN80b, RAJUKAR92, KONIG75, HEUVEL69, WECK92, BOTDEN71].

## ***III Statični impulzni generator z vžigno napetostno konico***

Te vrste generatorji dajejo na začetku impulza večjo vžigno konico napetosti ( $u_b$ ), ki je večja od vžigne napetosti ( $u_i$ ) /Slika 2.8/. Tak potek napetosti povzroči zelo zanesljivo preboj dielektrika in na podlagi preboja delovno razelektritve. Če že v začetku večja napetost ne povzroči preboja, do razelektritve sploh ne pride. Frekvenca impulzov je stalna in se s časom

ne večja in niti ne manjša. Taki generatorji omogočajo delo z večjo delovno režo, ki omogoča boljše izpiranje. Primerni so predvsem za daljše impulze (*pog. 2.6.2*).

Slika 2.8: Impulzi z veliko vžigno napetostjo. [ROETHEL86]

#### ***IV Statični impulzni generator z vžigalnim impulzom***

Pri tem sistemu ima generator dva samostojna generatorja, ki sta vključena vzporedno. Prvi generator daje impulz z višjo vžigalno napetostjo ( $u_b$ ) in majhnim impulznim tokom ( $i_{e1}$ ) /*Slika 2.9*/. Drugi daje impulz z velikim impulznim tokom ( $i_{e2}$ ) in nizko prsto (delovno) napetostjo ( $u_i$ ). Prvi generator povzroči preboj dielektrika in oblikovanje kanala plazme, drugi pa daje potrebno tokovno moč za odnašanje materiala. Pojav napetosti drugega generatorja je lahko časovno premaknjen in tako stopnjuje impulzni tok na začetku tokovnega impulza. Tudi ta izvedba omogoča večjo vžigalno napetost in s tem večjo delovno režo. Stopnjevano naraščanje impulznega toka povzroča manjšo relativno obrabo elektrode in tudi manjšo linearno obrabo ostrih robov. Proces je bolj stabilen in s tem tudi učinkovitost procesa, ker je vžig zagotovljen. Sistem je uporabnejši pri obdelavi jekla na jeklo ali pri kovinah, ki terjajo večje potencialne razlike na površinah za oblikovanje preboja.

Slika 2.9: Kombinirani impulzi. [ROETHEL86]

#### ***V Generator s krmiljeno obliko tokovnega impulza***

Z linearnim programiranjem je mogoče določiti optimalno razporeditev energije med eno samo razelektrivijo in s tem tudi oblikovati tokovni impulz. Zato pri tej vrsti generatorja lahko nastavljam naraščanje impulznega toka med razelektrivijo. Iz raziskav (*pog. 2.6.2*) je

razvidno, da je oblika impulza precej pomembna za zagotavljanje želenih izhodnih parametrov.

## VI Večkanalni statični impulzni generatorji

Iz osnov je razumljivo, da je posledica povečanja impulznega toka večje odnašanje materiala. To smo tudi želeli. Vendar ob tem bolj poškodujemo površino z globljim toplotnim vplivom. Obenem se poveča tudi hrapavost površine. Zato so v svetu razvili večkanalni sistem, pri katerem obdeluje obdelovanec večje število med seboj izoliranih elektrod. Vsaka elektroda ima lahko svoj impulzni generator, vendar morajo biti ti med seboj sinhronizirani. Druga izvedba omogoča, da en sam generator s krmilno enoto napaja več elektrod. Krmiljenje je naravnano na najnižjo delovno napetost v reži glede na vse elektrode. Zato učinkujejo motnje na posameznem kanalu na delovanje vseh kanalov. To pa zmanjšuje učinkovitost procesa. Zato je mogoče v praksi uporabljati le do štiri, včasih do 8 kanalov, ker imajo vsi isti sistem za primik elektrode k obdelovancu.

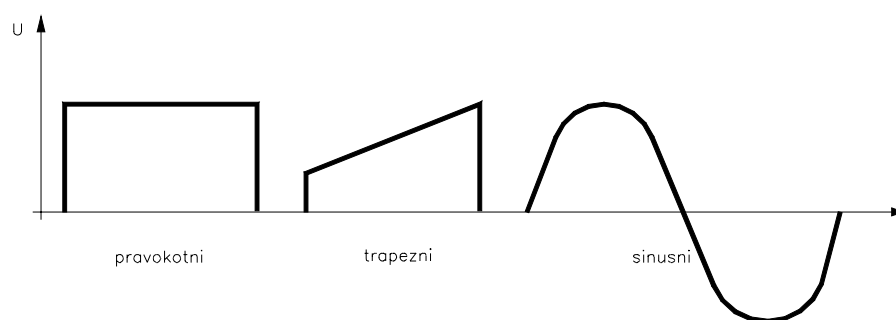
### 2.6.2 Oblika izhodnih impulzov iz generatorja

Pri iskrni potopni eroziji so največ v uporabi pravokotni impulzi generirani z izofrekventnim ali izoenergijskim generatorjem.

Iz raziskav je bilo ugotovljeno, da optimalna oblika tokovnega impulza ne velja za vse primere obdelave. Odvisna je od delovnih razmer in materialov elektrod. Manjšo obrabo elektrode so z nepravokotnimi impulzi dosegli razni avtorji [FEENY78, MOTOKI76, HAVLEC77, KONIG80].

Pri dolgih časih delovnih razelektritev ( $t_e > 100 \mu s$ ) je optimalna oblika s tokovnim vrhom na začetku razelektritve, pri kratkih ( $t_e < 50 \mu s$ ) pa je tokovni optimalni vrh na koncu impulza. Z oblikovanjem tokovnega impulza dobimo do 15 % večje odnašanje in do stokrat manjšo relativno obrabo elektrode [TANIGUC71].

V praksi se največkrat uporablja pravokotne impulze, redkeje pa trapezne in sinusne /Slika 2.10/.



Slika 2.10: Pravokotna, trapezna in sinusna oblika napetostnega impulza

#### I Trapezna oblika impulzov

Manjšo obrabo elektrode dosežemo s trapezno obliko impulzov in konstantno režo. Glede na teorijo razelektritve (pog. 2.3) se v ioniziranem plinu kanal plazme pri razelektritvi poveča. Če se tok tudi za toliko poveča, je gostota toka konstantna, kar je ugodno za proces [BRUYN68].

Proces z trapeznimi impulzi je z enako dolžino in energijo impulza manj stabilen, kot proces z pravokotnimi impulzi. Reža se namreč zmanjša in zato je proces bolj nagnjen h

kratkostičnim, in s tem k obločnim razelektritvam (klasifikacija razelektritev je podana v poglavju 2.7.1). Možno je izdelati sistem za preprečevanje obločnih impulzov in s tem odpraviti slabosti trapeznih impulzov. Kot generator trapeznih impulzov se izoenergijski izkaže kot boljša rešitev. Izofrekventni generator namreč povzroča dolge čase med dvema impulzoma, kar povzroča višjo začetno napetost. Globalno gledano se pri trapeznih impulzih (izoenergijski generator) zmanjša obraba elektrode. Razlog gre iskati v manjšem toku na začetku impulza. Rezultate pa lahko interpretiramo tudi tako, da rečemo, da dosega proces s trapeznimi impulzi do dvakrat večji odvzem materiala pri enaki obrabi elektrode in hrapavosti površine v primerjavi z pravokotnimi impulzi. Poleg tega je povprečni tok pri trapeznih impulzih pri enaki dolžini impulza in enakem odvzemu materiala za 25% manjši. To bi lahko pomenilo tudi boljšo integriteto površine, kar pa ni raziskano [BRUYN80a, BRUYN80b].

S stopničastimi impulzi, ki so aproksimacija trapeznih, dosežemo slabše rezultate [KONIG80].

## ***II Sinusna oblika impulzov***

S sinusno obliko impulzov dosežemo izredno majhno obrabo. Razlog je v tem, da je na začetku impulza v reži več elektronov kot ionov. Ti se gibljejo pospešeno proti anodi in zadevajo vanjo. Na svoji poti ionizirajo atome dielektika, ki dobijo pozitiven predznak. Teh nastaja vedno več in potujejo proti katodi. Tako s spremembo polaritete dosežemo, da potuje glavni tok delcev vedno proti obdelovancu [VEROMAN64].

### **2.6.3 Izpiranje reže, dielektrik**

Na lastnosti elektroerozijskega procesa vplivata tudi način in vrsta izpiranja reže z dielektrikom. Le-ta je od vhoda v delovno režo do izhoda čedalje bolj zasičen z delci obdelovanca in vedno bolj segret. Odnoseni delci se dodatno še mešajo s produkti med procesom razpadlega in kemično spremenjenega dielektrika, zato se njegove lastnosti med pretokom spreminjajo. Povečuje se prevodnost in s tem možnost za nastanek lokalno večjega števila impulzov in tudi nenormalnih razelektritev. Uporabljamo mnogo načinov izpiranja, ki so odvisni od konstrukcijskih oblik obdelovancev oz. elektrod. Delimo jih v tri osnovne: kontinuirno tlačno, kontinuirno sesalno in periodično [ROETHEL86].

Pri grobi obdelavi se pojavljajo plinski mehurčki. S podtlakom, ki nastaja pri kontinuirano sesalnem načinu izpiranja, bi nastale neugodne razmere in rezultat je slaba kvaliteta površine. Zato se pri grobi obdelavi ne odločimo za tak način izpiranja. Za fino obdelavo pa je vseeno [HEUVEL69].

Pri vsaki obdelavi moramo krmiliti pretok oz. tlak dielektrika do optimalnih razmer. V raziskavah je bilo ugotovljeno, da so majhni pretoki pri dobrem krmiljenju impulzov najugodnejši [ROETHEL86].

Dielektriki se ločijo med seboj tudi po gostoti in drugih lastnostih, ki vplivajo na proces. Predvsem se ločijo po prevodnosti, ki vpliva na velikost reže. Izbiranje vrste je odvisno od načina obdelave (groba, fina). Pri grezenju uporabljamo dielektrike iz ogljikovodikov. Njihova naloga je izpiranje reže (odstranjevanje delcev), hlajenje in oklepanje kanala plazme, da dobimo večjo gostoto toka [ROETHEL86]. Ker zahteva menjava dielektrika veliko časa, se večinoma uporabljajo dielektriki, ki so primerni tako za grobo, kot tudi za fino obdelavo.

Vpliv izpiranja na izhodne parametre je podrobneje podan v poglavju 2.8 - Izhodni parametri.

## 2.7 Procesni parametri

Razelektritve povzročajo električni impulzi, ki se oblikujejo v generatorju v predpisanem časovnem zaporedju. Med procesne parametre sodijo predvsem tipični časi poteka napetosti med elektrodama. Načeloma bi lahko zasledovali tudi potek toka med razelektritvijo, vendar je zaradi velikih frekvenc to tehnično zahtevnejše. Potrebovali bi kompleksnejšo merilno verigo. Poleg tega so naprave za merjenje toka omejene z največjo frekvenco 10 MHz. Merjenje toka na podlagi padca napetosti zahteva od upora majhno kapacitivnost in induktivnost, da je še vedno možno zasledovanje visokofrekvenčnih komponent signala [SNOEYS]. Zaradi tega vsi sistemi identifikacije procesnih parametrov bazirajo na zasledovanju napetosti v reži.

Največ pozornosti pri identifikaciji procesa je bilo posvečeno času zakasnitve vžiga in času razelektritve. Poleg teh tipičnih časov, se je kot pomemben parameter pokazal tudi visokofrekvenčni šum (*angl.* high frequency noise signal — H.F.), ki je del razelektritivne napetosti in emitiran kot radijski signal (*angl.* radio frequency signals — R.F.). Ta se namreč pojavi samo pri delovnih razelektritvah. V poglavju 2.8 - Izhodni parametri smo razdelali pomen posameznega parametra na karakteristike procesa, o identifikaciji procesa preko procesnih parametrov pa bomo detalneje govorili v poglavju 3.2.1 in 5.3.

Čas zakasnitve vžiga ( $t_{df}$ ) so poizkušali napovedovati na podlagi para predhodnik — naslednik ( $t_{df,n-1}$  —  $t_{df,n}$ ), a se je z uporabo teorije kaosa izkazalo, da takšno napovedovanje ni možno [WECK92].

### 2.7.1 Klasifikacija razelektritev

V literaturi se navaja različne načine klasificiranja razelektritev. Največ klasifikacijskih sistemov uporablja čas zakasnitve vžiga kot edini kriterij klasificiranja. Glede vpliva razelektritev na karakteristike procesa v osnovi ločimo štiri vrste razelektritev /Slika 2.11/, s čimer operater na stroju identificira proces in ga tudi pravilno vodi [ROETHEL86]. Prosti impulzi<sup>1</sup> (A) imajo čas zakasnitve vžiga enak celotni dolžini impulza, čas trajanja razelektritve pa je enak nič, saj razelektritev ne nastopi. Nasprotno imajo kratkostične razelektritve (D) čas zakasnitve vžiga enak nič, čas trajanja razelektritve pa je enak dolžini celotnega impulza. Obločne in delovne razelektritve so nekje vmes. Delovne razelektritve imajo daljši čas zakasnitve vžiga, obločne pa imajo čas zakasnitve vžiga skoraj enak nič.

Slika 2.11: Štiri osnovne oblike razelektritev [KOMEL97].

Poleg zakasnitve vžiga so pomembni tudi drugi parametri na napetostnem signalu (*pog.* 2.8). S posebnim identifikacijskim sistemom je možno istočasno določiti vse čase poteka napetosti v reži /Slika 2.12/. Identifikacija poteka tako, da signal razelektritve položimo v

<sup>1</sup>V tem primeru ne moremo govoriti o razelektritvi, ker dejansko ne nastopi.

“mrežo” in zasledujemo čase, ko napetostni signal preide določene pragove napetosti [DAUW83, DAUW86].

Slika 2.12: Identifikacija parametrov razelektritve [DAUW83]

- $t_r$  ... čas potreben za dvig napetosti iz nivoja N0 na nivo N4
- $t_d$  ... čas, ko je napetost nad nivojem N4
- $t_f$  ... čas od N1 do N4 ali od N4 do N4'
- $t_e$  ... čas med N5 in N6

Dokazano je, da se obloki pojavljajo tudi pri daljših časih zakasnitve vžiga [SNOEYS80, WANG85, WANG88, WANG89], tako da klasifikacija na osnovi časa zakasnitve vžiga ni zanesljiva. Parameter, ki najbolje loči delovne razelektritve od ostalih je visokofrekvenčni signal (R.F.), ki je emitiran samo pri delovnih razelektrivah [WANG85, WANG88, WANG89, RAJUKAR83, PANDIT87, RAJUKAR88a, RAJUKAR88b, BHATT78, HON87, SHAW79, AHMED87].

Eksperimenti so pokazali, da identifikacija sistema preko R.F. signalov pripomore h kvaliteti površine [RAJUKAR88a, RAJUKAR88b]. R.F. signal oz. njegova frekvenčna širina je odvisna od materiala in polarnosti elektrod [WANG89].

Seveda pa se na tem mestu pojavi vprašanje definicije delovnih in obločnih razelektritev. Ker nas v končni fazo zanimajo doseženi izhodni parametri, je najboljša definicija delovnih razelektritev tista, ki zagotavlja najboljše karakteristike procesa. V omenjenih raziskavah se je identifikacija razelektritev s pomočjo R.F. signalov izkazala za zelo uspešno (glej tudi poglavje 3.2 - Parametri elektroerozijskega procesa s stališča krmilnika).

### ***I Prosti impulzi - A***

Če je prevodnost premajhna (reža prevelika) do razelektritve ne pride in dobimo prosti (prazni) impulz, ki ne povzroča tokovnega impulza. To pomeni, da ne pride do nikakršnega

odvzema materiala. Taki impulzi za proces niso škodljivi; njihov prevelik delež samo zmanjšuje produktivnost procesa [ROETHEL86].

Čas trajanja impulza je potrebno določiti glede na napetost razelektritve. Ugodno je, če je delež prostih impulzov okrog 10%. Tako imamo boljše izpiranje [ALBINSKI].

## **II Delovne razelektritve - B**

Delovne razelektritve, ki so zaželeno, odnašajo material in so opisane s kratkim zakasnilnim časom vžiga, v katerem pride do ionizacije ter nato do preboja električnega toka skozi kanal plazme. Napetost pade. Velikost padca je značilna za kombinacijo elektrodnih materialov. Med padanjem oscilira z visoko frekvenco (R.F. signali) [RAJUKAR92]. Hkrati se s padanjem napetosti večja tok [ROETHEL86].

## **III Prehodne razelektritve<sup>1</sup> - BC**

Prehodne razelektritve so definirane tako, da jih je mogoče identificirati samo z R.F. signalom. Od delovnih se ločijo po tem, da ima R.F. signal manjšo amplitudo in frekvenco, obločne razelektritve pa tega signala sploh nimajo. Prehodne razelektritve še ne povzročajo poškodb površine. Uporabljajo se za napovedovanje obločnih razelektritev.

## **IV Obločne razelektritve - C**

Tretja vrsta razelektritev so nenormalne razelektritve, ki nastajajo zaradi prevelike prevodnosti v delovni reži oz. zaradi časovno premajhne razdalje med posameznimi impulzi, ki je manjša od potrebnega časa za deionizacijo. Daljši čas deionizacije je posledica pretoplega ali premočno onesnaženega dielektrika [ROETHEL86, SNOEYS]. Značilno za nenormalne razelektritve je, da nimajo začetne zakasnitve vžiga, oz. je čas zakasnitve minimalen, medtem ko je tok med razelektritvijo skoraj konstanten. Pri raziskavah je bilo ugotovljeno, da se delovne razelektritve naključno razmeščajo po površini obdelovanca, nenormalne razelektritve pa zelo rade nadaljujejo razelektritev na mestu poprejšnje razelektritve [ROETHEL90]. Na ta način povzročajo lokalne toplotne preobremenitve obdelovanca in poškodbe na površini, ki se kažejo v obliki obžigov in povečanja števila mikrorazpok.

Običajno se razelektritve, ki imajo zakasnitev vžiga ( $t_{df}$ ) manjši od 2  $\mu s$  smatrajo za obločne [WECK92].

## **V Zakasnele razelektritve<sup>2</sup> - CD**

Pri teh razelektritvah traja zakasnitev vžiga skoraj čez celoten impulz; razelektritev nastopi tik preden generator zaključi z električnim impulzom. Takšne razelektritve niso zaželeno, saj so eden od povzročiteljev obrabe elektrode (pog.2.8.2).

## **VI Kratkostične razelektritve - D**

Četrta oblika razelektritev so kratkostične, pri katerih napetost v reži tudi v začetku ne naraste, medtem ko doseže tok razelektritve svojo maksimalno vrednost [ROETHEL86].

Predlagani so tudi drugi sistemi klasificiranja. Poleg navedenega, je predlagana klasifikacija razelektritev glede na produktivnost in obrabo elektrode, s katerim dobimo več grup [SNOEYS].

---

<sup>1</sup>angl. transient arc pulses

<sup>2</sup>angl. late ignition discharges

## 2.7.2 Izmenjava materiala med elektrodama

Med razelektritvijo pride do odvzema in delno tudi do izmenjave materiala med elektrodama, ki je odvisna od poteka razelektritve [ROETHEL86, LEE88]. Navedeni so trije primeri toka materiala [ROETHEL76].

**Kratek stik:** Električni tok steče preko majhnega upora v tekočini ali plinu. Pri tem most kratkega stika eksplodira, pojavi se oblok in pride do izmenjave materiala med elektrodama. Pojavi se obraba orodja (baker, grafit) in ta se naloži na obdelovanec.

**Kanal plazme:** Električni tok steče preko ioniziranih delcev. Največji prenos materiala je dosežen pri pojavu obloka, kateri se pojavlja na mestih še ne deionizirane kovine, plinskih mehurčkov in tam, kjer se material še ni strdil.

**Tok erodiranih delcev:** Večinoma so to delci katode, ki so prisotni v dielektriku. Ti pridejo v stik z nataljeno elektrodo in odnašajo nataljen material s pomočjo izpiranja reže (*pog. 2.8.3*).

## 2.7.3 Temperatura v reži

V uvodnem delu (*pog. 2.3*) smo navedli, da se pri razelektritvi pojavi plazemski kanal z izjemno visoko temperaturo. Za ugodne karakteristike procesa ima temperatura neko optimalno vrednost. Ker je temperatura odvisna od časa trajanja razelektritve, je možno za posamezen primer obdelave določiti optimalno trajanje razelektritve [LEEMREIS].

Ob predpostavki točkovnega izvora toplote z neko močjo, trajanjem impulza in pravokotnih impulzov, je energija impulza enaka produktu moči in času trajanja /*En. 1*/.

$$\text{En. 1: } E = t_i \cdot N$$

kjer je

E ... energija razelektritve

$t_i$  ... čas trajanja impulza

N ... moč impulza

Fourierjeva diferencialna enačba za nestacionarni toplotni problem ima za rešitev sferično porazdelitev temperature z izvirom na mestu razelektritve (točka). Optimalno trajanje impulza ( $t_{i,opt}$ ) je takrat, ko se čimveč materiala natali, to pa je takrat, ko je temperatura taljenja dosežena čim dlje od izvora (na čim večjem radiju) /*En. 2*/ . Ugotovljeno je, da je razmerje med optimalnim trajanjem impulza za jeklo in baker približno 7:1. Optimalno trajanje je odvisno od energije razelektritve (E). Za območje 1 J je optimalno trajanje impulza približno 1000  $\mu s$ , za območje 1 mJ pa 20  $\mu s$ .

Po tej teoriji je v izvoru temperatura neskončna. Dejansko seveda ni tako. Zato je uveden nov model, ki predpostavlja ploskovni izvor toplote. Na podlagi tega izračunamo kritični čas trajanja impulza ( $t_{i,kr}$ ) /*En. 3*/ . Pri tem času ravno nastopi taljenje materiala.

$$\text{En. 2: } t_{i,opt} = (X \cdot E)^{2/3}$$

$$\text{En. 3: } t_{i,kr} = Y \cdot e^2$$

X, Y ... računani na podlagi parametrov, ki jih je težko natančno določiti. Nekateri od njih so odvisni od temperature vendar zadostuje podajanje konstantnih vrednosti. Te so za različne materiale podani v citirani literaturi.

e ... gostota energije [J/mm<sup>2</sup>]

V praksi je lahko parameter  $t_{i,opt} > t_{i,kr}$  ali pa je  $t_{i,opt} < t_{i,kr}$ . V slednjem primeru se obrabi lahko izvignemo le na račun produktivnosti (*pog. 2.8.3*).

## 2.8 Izhodni parametri iz procesa

Rezultat procesa so izhodni parametri. Smisel krmiljenja je dosegati čim boljše karakteristike procesa, ki se odražajo na izhodnih parametrih.

Glavna izhodna parametra pri elektroerozijski obdelavi sta čas obdelave in kvaliteta površine. Ker se medsebojno izključujeta, se obdelava običajno vrši v dveh stopnjah: groba in fina obdelava. Merilo za čas obdelave je običajno odvzem materiala, za kvaliteto površine pa srednja vrednost neravnin ( $R_a$ ), čeprav nekateri avtorji navajajo, da ta parameter ni najbolj informativen atribut površine [PEKLENIK69, PANDIT74, JUNKAR96]. Po elektroerozijski obdelavi obdelovance dostikrat še brusimo in/ali poliramo. S tem zmanjšamo hrapavost in deloma odstranimo površinsko prizadeto plast, ki je za funkcionalnost izdelka v večini primerov velikega pomena. Prav tako je pomembna tudi obraba elektrode, saj prav natančnost oblike elektrode definira natančnost izdelka. Pogosto je potrebno imeti za eno obdelavo dve elektrodi; za fino in grobo obdelavo, kar pa pomeni večje stroške zaradi izdelave dveh elektrod in daljši čas obdelave zaradi prekinjanja procesa in menjave elektrode [SCHUMA88].

Načeloma ločimo različne strategije vodenja procesa. Te so v smislu:

- čimvečje produktivnosti
- čimmanjše obrabe elektrode
- čimboljše integritete površine

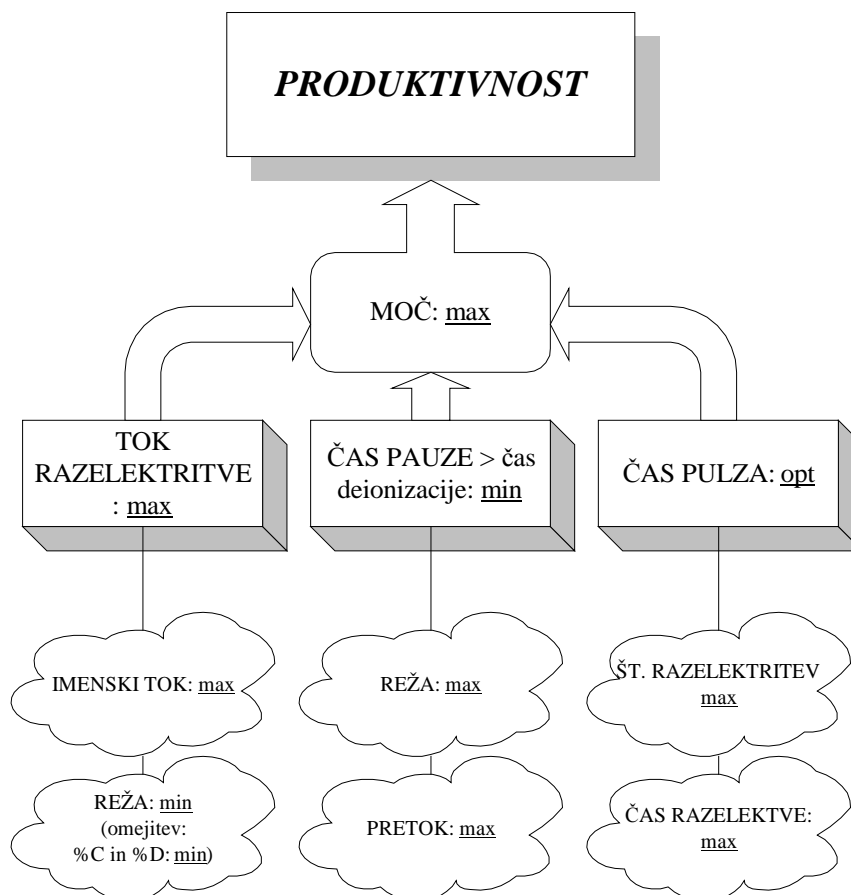
Vsaka teh strategij določa specifične zahteve za vodenje procesa o katerih bomo govorili v naslednjih pod poglavjih.

### 2.8.1 Produktivnost

Produktivnost vrednotimo s količino odvzetega materiala obdelovanca v časovni enoti. Količino običajno merimo z maso, lahko pa tudi z volumnom. Parameter imenujemo specifični odvzem in ga označimo z  $V_w$ . Merimo ga v enotah  $g/min$  ali  $mm^3/min$ .

Za čimvečji odvzem materiala moramo v proces dovesti čimveč energije in jo pretvoriti v koristno delo /Slika 2.13/.

1. Tok razelektritve naj bo čimvečji. To dosežemo s čimvečjim imenskim tokom /KONIG75/ in čimmanjšo režo med obdelovancem in elektrodo. Pri določevanju reže smo omejeni z deležem obločnih in kratkostičnih razelektritev. V skrajnem primeru, ko se elektroda in obdelovanec dotikata (razdalja v reži je enaka 0), bi imeli razelektritveni tok enak imenskemu toku, vendar do odnašanja ne bi prišlo. O škodljivosti obločnih razelektritev smo že govorili (pog. 2.6).
2. Ker med posameznimi impulzi ne poteka aktivna obdelava, želimo da je ta čas čimkrajši. V skrajnem primeru je lahko enak 0. Takrat ne moramo govoriti o iskrni elektroeroziji; obdelava bi lahko tekla le po principu obločne elektroerozije (pog. 2.2). Obstaja spodnja dovoljena meja trajanja pavze med impulzi. Določena je s časom deionizacije dielektrika v reži. Čas pavze mora biti vsaj tolikšen, kot je čas deionizacije (pog. 2.7.1 - Klasifikacija razelektritev). Seveda želimo, da je čas deionizacije čimmanjši. To dosežemo z intenzivnejšim izpiranjem, izpiranje pa je intenzivnejše pri večji reži in večjem pretoku.
3. Dolžina impulza naj bo po eni strani čimvečja [RAJUKAR92, WECK92], krajši impulzi pa pri enaki dolžini pavze pomenijo večje število razelektritev v nekem obdobju. Optimalna vrednost obstaja, ni pa raziskan. V praksi se impulzi daljši od  $1000 \mu s$  redko uporabljajo.



Slika 2.13: Doseganje maksimalne produktivnosti

## 2.8.2 Obraba elektrode

Obraba elektrode je definirana enako kot specifični odvzem materiala, le da gre tukaj za material orodja. Specifično obrabo elektrode označimo z  $V_e$ .

Obraba elektrode je pomembna izhodna karakteristika procesa. Njen vzrok je energijsko neravnovesje med katodo in anodo [DAUW86]. Obraba naj bo čimmanjša zaradi stroškov, ki se ob tem pojavljajo. Vpliv parametrov procesa na obrabo elektrode je bolj kompleksen, kot je to primer pri produktivnosti /Slika 2.14/. Veliko je bilo že raziskanega glede obrabe. Na osnovi vhodnih in procesnih parametrov so z različnimi pristopi poizkušali napovedovati obrabo. Nekatere ugotovitve se medsebojno dopolnjujejo, druge prekrivajo, tretje so medsebojno neodvisne, imamo pa tudi ugotovitve, ki so si medsebojno nasprotujoče.

1. Za obrabo elektrode je pomembna porazdelitev energije v reži [LEEMREIS]. Obraba je največja v prvih nanosekundah razelektritve [BOTDEN71]. Takrat je gostota moči na elektrodi največja. Odvisna je od plazemskega toka, ki ga tvori tok elektronov in ionov [MOTOKI67, DIJCK] in dalje od hitrosti vzpostavitve plazme, ki je v korelaciji z časom padca napetosti. Dokazano je, da imajo razelektritve s kratkim časom padca napetosti večji porast toka elektronov. Za majhno obrabo pri nizki energiji razelektritve je pomembno čimbolj zmanjšati padec potenciala na površini orodja [LEEMREIS]. Obločne in kratkostične razelektritve imajo nenaden padec napetosti in s tem tako velik porast toka, da se material (tudi elektrode) uparja. Zaradi tega je priporočljiva uporaba omejitve porasta toka elektronov [DAUW85, DAUW86].

m8.vsd

Slika 2.14: Doseganje minimalne obrabe elektrode

Tako dosežemo do 70% manjšo obrabo [ENNING80]. Preizkusi so pokazali veliko uporabnost zasledovanja obrabe in krmiljenja procesa na podlagi časa padca napetosti [DAUW86]. Raziskan je bil vpliv posameznih obločnih razelektritev na obrabo elektrode. Razvit je bil sistem za preprečevanje vsakršne razelektritve, ki bi imela čas zakasnitve vžiga manjši od  $2 \mu s$ . Izkazalo se je, da te razelektritve niso tako škodljive, da bi jih morali striktno preprečevati [BRUYN82]. Poizkus napovedovanja obrabe na podlagi deleža obločnih razelektritev se je izkazal za neuspešnega [ROETHEL90], drugi avtorji [SNOEYS75, SNOEYS77, WECK92] pa ugotavljajo, da večji delež obločnih razelektritev<sup>1</sup> pomeni manjši odvzem materiala in večjo obrabo elektrode. Delež kratkostičnih razelektritev naj bo čimmanjši. Nekateri celo navajajo, da so kratkostične razelektritve glavni vzrok obrabe elektrode [ALBINSKI80].

Gostota moči na elektrodi je odvisna tudi od toka razelektritve, ki naj bo čimmanjši [RAJUKAR92]. Zato naj bo imenski tok čimmanjši in reža čimvečja.

2. Za manjšo obrabo je ugodno, če v režo dovajamo majhne količine kisika [KIMOTO60]. To namreč omogoča tvorbo oksidne plasti na elektrodo in s tem se poveča emisivnost elektronov iz elektrode. Preizkusi so dejansko pokazali manjšo obrabo elektrode, vprašanje pa je, če je trditev o povečani emisivnosti elektronov pravilna, saj gre pričakovati pri večji emisivnosti večjo gostoto moči na elektrodi.
3. Poleg obločnih povzročajo obrabo tudi zakasnele razelektritve [WECK92]. Razlog, da na obrabo vplivajo impulzi s kratkim časom trajanja razelektritve, je verjetno v tem, da je na začetku impulza razelektritveni kanal ozek in gostota energije tako velika, da natali material orodja. Če ima impulz dolg čas razelektritve, se gostota energije z večanjem premera kanala plazme manjša, tako da se material elektrode zopet strdi in obraba je minimalna. Če traja razelektritev kratek čas, impulz preneha preden se je kanal toliko razširil, da bi se material strdil. Tako ostane po koncu impulza nataljen, pretok dielektrika pa ga izpere [KONIG75, HEUVEL69]. S prekinjanjem toka, če se po določenem času od začetka impulza razelektritev še ni pojavila, dosežemo manjšo obrabo (*pog. 2.9.6*). Iz tega sklepamo, da dosežemo z izoenergijskim generatorjem manjšo obrabo elektrode, ker je čas trajanja razelektritve konstantno nastavljen in ga določi operater.
4. V *pog. 2.7.3* - Temperatura v reži smo obravnavali optimalno trajanje impulza ( $t_{i,opt}$ ) in kritično trajanje impulza ( $t_{i,kr}$ ). Če je trajanje impulza, pri neki določeni energiji večje od kritičnega trajanja ( $t_{i,kr}$ ) gledano za material orodja, potem nimamo obrabe /*En. 2, En. 3*/. Za primer navajamo obdelavo jekla z energijo  $50 mJ$ . Optimalni čas je približno  $100 \mu s$ , kritični čas za grafitno elektrodo pa je pod to vrednostjo. Zaradi tega do obrabe elektrode ne pride, kar potrjujejo tudi eksperimenti. Majhne energije pridejo v poštev pri fini obdelavi ( $10 mJ$  in manj). Takrat je optimalno trajanje krajše od kritičnega, zato se relativna obraba poveča [LEEMREIS].

Obrabo je možno napovedovati oziroma krmiliti na podlagi koeficienta  $t_e/i_e$ . Ta koeficient naj bo za manjšo obrabo večji kot  $10 \mu s/A$ . Ker je čas trajanja razelektritve pri izofrekventnem generatorju naključen, je težko zagotoviti točno določen koeficient  $t_e/i_e$ . Izoenergijski generator zagotavlja v tem primeru boljše kontrolo procesa [RAJUKAR92].

5. Temperatura elektrod pogojuje, kje se bo plazma delila na dva dela (*pog. 2.3*). Ker sta običajno temperaturi elektrod med seboj različni, delitev plazme ni simetrična. Več plazme pomeni večje nataljevanje materiala in večji odvzem. Na podlagi teh ugotovitev stremimo k čim nižji temperaturi orodja; pri manjšem premeru orodja je temperatura višja [CHINCHOLLE].

---

<sup>1</sup>V tem primeru se smatra za obločno razelektritev tisto, ki ima  $t_d$  manjši od  $2 \mu s$ .

6. Pretok dielektrika pogojuje hitrost le-tega skozi režo. Ker je v dielektriku polno delcev obdelovanca ter zaradi principa razloženega pod točko 1 je manjša obraba elektrode pri manjšem pretoku dielektrika.

Za različne konfiguracije elektrod, je vsota obrabe elektrode in odvzema materiala vedno konstantna ( $V_e + V_w = \text{konst.}$ ) [CHINCHOLLE]. Pretok dielektrika ima optimalno vrednost glede na obrabo orodja in na odvzem materiala. Ta dva optimuma sta enaka [ALBINSKI80].

### 2.8.3 Integriteta površine

#### *I Hrapavost*

Po obdelavi z elektroerozijo je običajno rezultat mat površina s plitvimi kraterji, ostanki materiala v obliki kroglic, ki so posledica razelektritev. Ti ostanki nastanejo, ko se material natali zaradi povišane toplote, nato pa se strdi zelo hitro, pri tem pa se prime nazaj na površino [LEE88].

Zanimiv je tudi vpliv vrste generatorja (izofrekventni - izoenergijski) na kvaliteto površine. Na diagramu /Slika 2.15/ vidimo, da so izofrekventni generatorji boljši pri manjših časih trajanja razelektritve, vendar lahko z manjšo imensko vrednostjo toka dosežemo z izoenergijskim generatorjem enake oziroma še boljše rezultate [LUO90].

#### *II Toplotno prizadeta plast*

Stanje materiala na površini obdelovanca se med obdelavo spreminja med trdim, nataljenim in plinastim stanjem [ROETHEL76]. Zaradi tega dobimo po obdelavi **spremembe faznih plasti** po globini. Značilne spremembe nastanejo po globini pri mikrotrdoti, kemični sestavi in strukturi. Na obdelani površini nastane bela plast, ki se med procesom lokalno pretali. Želimo da je ta plast čim tanjša, saj s stališča integritete površine ni ugodna (ima mikrorazpoke in nezaželeno trdoto). Pri jeklih je pod njo plast sekundarnega kaljenja in nato sekundarnega popuščanja. Slednja je v primerjavi s prvima dvema najdebelejša.

Slika 2.15: Vpliv vrste generatorja, imenske vrednosti toka ( $i_e$ ) in časa trajanja razelektritve ( $t_e$ ) na hrapavost površine [LUO90]

Poleg medsebojnega mešanja materialov elektrod in obdelovanca se mešajo tudi sestavine dielektrika. Tako nastala mešanica oz. zlitina se nato zelo hitro ohladi (*pog.* 2.7.2) [LEE88, ROETHEL76]. Temperaturni gradient je odvisen od materiala elektrod, dielektrika in dejanskih razmer razelektritev. Pojavljajo se tri plasti /Slika 2.16/ [LEE88]:

- **Zunanja (bela) plast:** Nastaja zaradi hitrega ohlajanja. Z naraščanjem energije se ta plast debeli. Širi se iz površine proti notranjosti in se ne odzove na jedkanje.
- **Srednja (temna) plast:** Nastaja z ločevanjem na mikro nivoju, ki nastopi zaradi neravnotežnega strjevanja raztaljenega materiala na dnu kraterja. Sestavljena je iz finih dendritov. Širi se iz notranjosti navzven.
- **Toplotno neprizadeti material:** Pod površino obdelovanca, kjer se temperatura ne dvigne tako visoko, da bi vplivala na lastnosti materiala, ostane struktura le-tega nespremenjena.

Slika 2.16: Tri plasti na površini obdelovanca [LEE88]

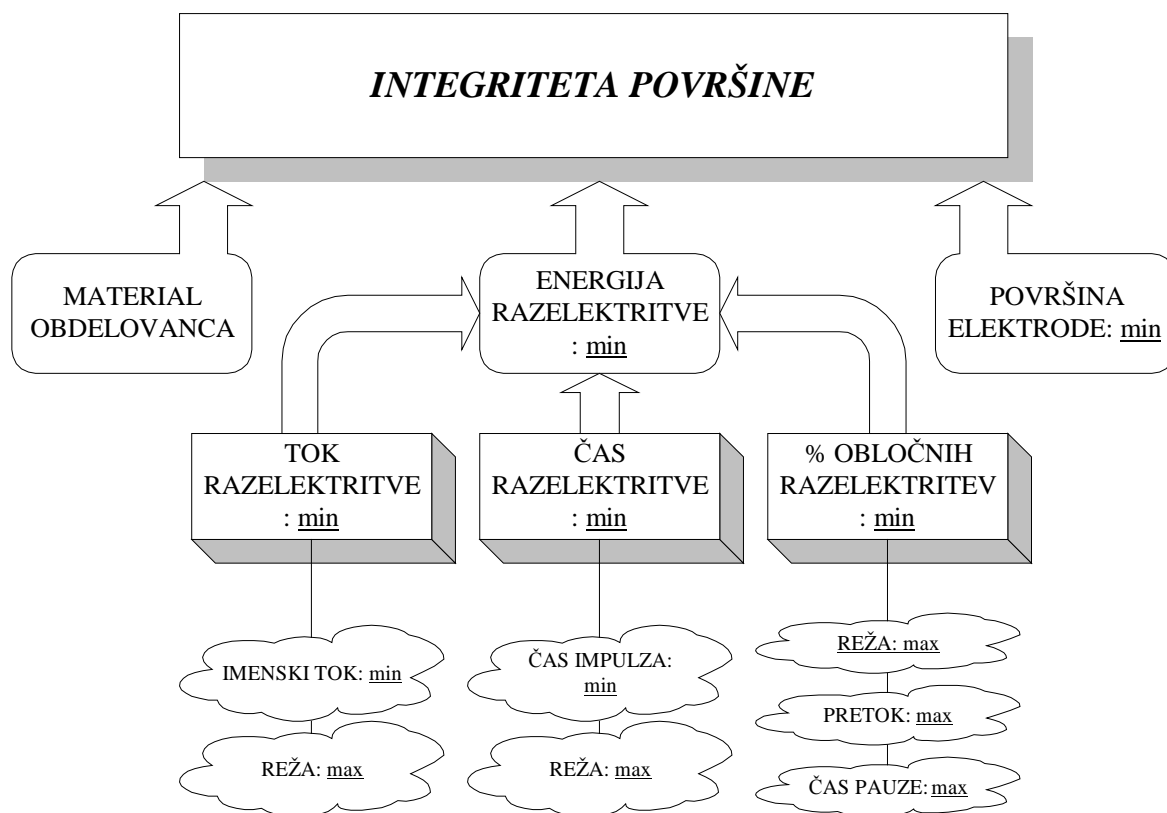
Pri obdelavi nastane na površini obdelovanca veliko **mikrorazpok**. Večinoma segajo samo do globine bele plasti in po pravilu potekajo v smeri normale na površino. Na podlagi tega smatramo, da je material poškodovan do globine bele plasti [LEE88], ki jo lahko odpravimo z elektroerozijsko obdelavo z impulzi izredno majhnih energij [KHANG77].

### **III Doseganje čimboljše integritete površine**

Vhodni in procesni parametri elektroerozijskega procesa vplivajo hkrati na mikrorazpoke, toplotno prizadeto plast in hrapavost površine /Slika 2.17/. Sprememba nekega parametra ne povzroči spremembe samo enega od naštetih atributov površine, ampak spremembo vseh atributov v isti smeri, bodisi izboljšanja ali poslabšanja. Izjema je le material obdelovanca, ki ne vpliva na hrapavost površine [LEE88], vpliva pa na spremembo faznih plasti in mikrorazpoke [ROETHEL86]. Izkazalo se je tudi, da je pri večjih površinah elektrode hrapavost generirane površine slabša [LOU90].

Za kvalitetno površino moramo zagotoviti čimmanjšo energijo posameznih razelektritev. Večja energija razelektritve pomeni globlje kraterje [LEE88]. Hrapavost površine je namreč odvisna od velikosti kraterja, ta pa je preko temperature plazme proporcionalen energiji razelektritve [LOU90]. Tudi velikost toplotnega vpliva je odvisna od oblike in količine sproščene toplotne energije [ROETHEL86]. Z večjo energijo razelektritve je tudi več razpok, ki nastanejo zaradi velike toplotne obremenitve in izredno hitrega ohlajanja [LEE88, KHANG77] in so posledica prekoračenja trdnosti materiala pod vplivom dodatnih notranjih napetosti, ki že obstajajo na površini materiala. Večje so napetosti v osnovnem materialu (npr. kot posledica kaljenja) prej pride do pojava mikrorazpok in mikrorazpoke so tudi gostejše.

Razporeditev mikrorazpok na površini je odvisna tudi od smeri izpiranja reže ter od oblike in energije impulzov [ROETHEL86].



Slika 2.17: Doseganje čimboljše integritete površine

1. Za manjšo energijo razelektritve naj bo tok razelektritve čimmanjši [RAJUKAR92]. Dosežemo ga z majhnim imenskim tokom ob čimvečji razdalji med elektrodo in obdelovancem.
2. Čas razelektritve naj bo čimkrajši, za kar potrebujemo veliko režo in kratek čas impulza [KHANG77]. Na tem mestu velja navesti povezavo med imenskim tokom in trajanjem razelektritve. Večja imenska vrednost toka in krajši čas trajanja razelektritve pomeni večjo gostoto energije<sup>1</sup>. Ko je energija razelektritve večja od energije potrebne za uparjanje, dobimo na površini dosti večje kraterje [LOU90].
3. Delež obločnih razelektritev popisuje razmere v reži. Nekateri avtorji [ROETHEL76] trdijo, da so za integriteto površine razmere v reži pomembne, drugi [KHANG77] pa so pri istih parametrih in različnih razmerah v reži dobili dobro ponovljivost rezultatov in tudi obdelava na večjih globinah ni pokazala spremembe kvalitete površine [CROKAL71].
4. Ugotovljeno je bilo, da hrapavosti ni moč napovedovati s časom zakasnitve vžiga<sup>2</sup>, frekvenčna porazdelitev zakasnitve vžiga pa je v korelaciji s hrapavostjo generirane površine [WECK80]. Glede na definicijo obločnih razelektritev gre pričakovati njihov negativen vpliv na integriteto površine, zato ga v našem primeru upoštevamo. Za doseg

<sup>1</sup>V poglavju 2.3 - Potek razelektritve pri iskrnem elektroerozijskem procesu smo navedli, da med razelektritvijo vrednost toka ( $i_r$ ) pada, kanal plazme pa se širi. Tako imamo pri krajših časih trajanja razelektritve ( $t_e$ ) povprečno večjo gostoto energije.

<sup>2</sup>Obločna razelektritev je običajno definirana s časom zakasnitve vžiga.

majhnega deleža teh razelektritev rabimo veliko režo, pretok in dolgo pavzo med posameznimi razelektritvami.

#### **IV Predikcija integritete površine**

Globina bele plasti je odvisna predvsem od energije razelektritve. Na podlagi preizkusov je bila izvedena sledeča empirična enačba, ki povezuje ta dva parametra /En. 4/. O globini bele plasti lahko sklepamo tudi na podlagi hrapavosti površine, poznati pa moramo dejanski tok v reži (I) /En. 5/ [LEE88].

$$\text{En. 4: } d_w = 3,57 \cdot E^{1/3}$$

$$\text{En. 5: } R_a = 0,75 + 0,23 \cdot I^{2/3} \cdot d_w^{1/3}$$

Hrapavost površine je zelo malo odvisna od materiala obdelovanca, zato je material v zgornjih enačbah zanemarljiv.

Čas razelektritve ni pomemben samo zaradi produktivnosti, obrabe in hrapavosti površine, ampak tudi zaradi toplotno prizadete cone. Pri večjem odvzemu materiala dobimo večjo hrapavost površine. Ker je za večji odzvem materiala potreben daljši impulz, je tudi generirana toplota večja, posledica pa je, da se meja taljenja materiala širi. Ugotovljena je sledeča odvisnost integritete površine od trajanja impulza [KHANG77]:

$$t_i = 6 \mu s \quad \dots \text{ lepa površina}$$

$$t_i = 80 \mu s \quad \dots \text{ še vedno dobra površina, večji krater}$$

$$t_i = 2800 \mu s \quad \dots \text{ pojavljajo se razpoke}$$

### **2.9 Izboljšanje elektroerozijskega procesa brez krmiljenja**

Izbira primerne oblike impulzov, imenske napetosti, toka in ostalih vhodnih parametrov je prvi, vendar ne zadostni korak k stabilnemu procesu. Zato proizvajalci elektroerozijskih strojev že dalj časa uporabljajo razne pristope za izboljšanje stabilnosti obdelave. Ena od možnosti je izboljšanje pogojev izpiranja delovnega prostora z različnimi vzorci nihanja elektrode napram obdelovancu /Slika 2.18/. Gibanja so NC, CNC vodena ali pa planetarna z ročno nastavitvijo ekscentričnosti [KOMEL97]. Stabilnost procesa izboljšamo tudi s preprečevanjem neželenih razelektritev bodisi s posebnimi električnimi vezji ali pa s krmiljenjem procesa.

Slika 2.18: Najpogosteje uporabljeni tipi gibanja elektrode [KOMEL97]

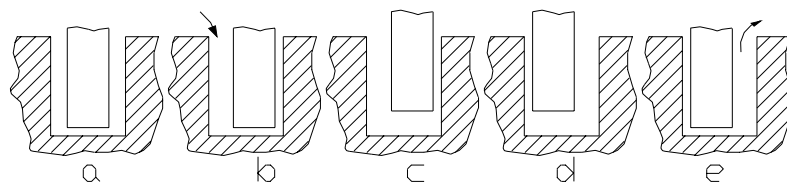
Poglejmo si nekaj pristopov k izboljšanju procesnih karakteristik brez uporabe krmilnika.

### 2.9.1 Odmikanje elektrode<sup>1</sup>

Večina elektroerozijskih strojev ima vgrajeno možnost periodičnega odmika elektrode (orodja). Čas odmika je možno nastavljati. Običajno se ta funkcija uporablja pri obdelavah, kjer je otežkočeno izpiranje reže. Elektroda se po določenem času obdelave odmakne od obdelovanca in proces prekine. Reža se izpere in tako izboljšajo pogoji obdelave, nato se elektroda zopet približa obdelovancu in proces se nadaljuje v izboljšanih pogojih obdelave. Časi odmika so kratki (1 s). Vsak odmik pomeni prekinitev procesa, zato težimo ki čimmanj odmikom. Najboljša rešitev je odmik po potrebi, za katerega potrebujemo poseben krmilnik, katerega navajamo v poglavju 3.4.4 - Odmik elektrode po potrebi.

### 2.9.2 Nihanje elektrode

V primeru, ko imamo otežkočeno izpiranje reže, se je težko izogniti obločnim impulzom. To je še posebej problem pri kompleksnih oblikah obdelovancev, ki ne dopuščajo dovajanja dielektrika skozi elektrodo. V takih primerih se običajno poslužimo odmikanja elektrode (pog. 2.9.1), kar pa zmanjša učinkovitost obdelave. Zaradi tega je bil razvit sistem posebnega gibanja elektrode /Slika 2.19/, ki omogoča obdelavo brez dvigovanja elektrode in brez dodatnega izpiranja reže. Gibanje elektrode je v obliki kvadrata, tako se velikost reže stalno spreminja [MASUZAWA83, MASUZAWA90].



Slika 2.19: Gibanje elektrode za dosego prisilnega izpiranja reže [MASUZAWA90]

Z nihanjem elektrode povečamo pretok dielektrika. S tem sistemom se poveča produktivnost, slabost pa je relativno velika obraba elektrode.

### 2.9.3 Planetarno gibanje elektrode

Z namenom povečanja produktivnosti so v sedemdesetih letih prvič predstavili elektroerozijsko obdelavo z planetarnim gibanjem elektrode. Poleg tega za celotno obdelavo zadostuje ena ali mogoče dve elektrodi. S planetarnim gibanjem dosežemo večjo natančnost izdelave [SNOEYS86, STEALE89].

Planetarno gibanje je sestavljeno iz dveh osnovnih gibanj. Poleg podajalnega gibanja, ki je prisotno pri običajnem elektroerozijskem procesu imamo tukaj še orbitalno gibanje elektrode okrog osi pravokotne na površino obdelovanca. S kroženjem okrog te osi, se elektroda vrti tudi okrog svoje osi. S takim gibanjem dosežemo premer vdolbine večji od premera elektrode in je odvisen od ekscentričnosti elektrode.

Primerjava hrapavosti površine je pokazala, da se pri istih pogojih dela s planetarnim gibanjem elektrode doseže boljšo hrapavost površine, kot pa z običajno elektroerozijsko obdelavo. Dosežene so hrapavosti  $R_{\max}$  pod  $1 \mu m$ , kar pomeni zrcalno površino [TAKAWA83].

---

<sup>1</sup>angl. jump

Zrcalno površino pa je možno doseči tudi z običajno elektroerozijsko obdelavo. Za to so potrebni zelo kratki impulzi in imenski tokovi okrog 1 A [LOU90].

#### 2.9.4 Ultrazvočne vibracije elektrode

Ko potrebujemo ostre robove, nihanje ali orbitalno gibanje elektrode ne pride v poštev. Pri ultrazvočnih vibracijah elektrode se ostri robovi ohranijo.

To je podoben mehanizem kot zgoraj navedeno nihanje elektrode, le da tukaj elektroda niha samo v vertikalni smeri in to z veliko frekvenco (20 kHz) in majhno amplitudo (0 do 30  $\mu\text{m}$ ). S tem dosežemo prisilno izpiranje reže. Pri uporabi grafitne elektrode se hitrost odvzema poveča za 30% pri grobi obdelavi in 300% pri fini obdelavi. Rezultat se ujema s teorijo, da so vibracije koristne takrat, ko je odvzem majhen. Poleg tega ultrazvočno nihanje elektrode skoraj ne vpliva na kvaliteto površine, omogoča pa večje globine erodiranja z elektrodami, ki nimajo luknje za dovajanje dielektrika v režo. Velika prednost sistema je možnost obdelave grafitne elektrode z ultrazvokom direktno na stroju. Pri enem vpetju elektrodo obdelamo po klasičnem postopku ultrazvočne obdelave, nato pa brez prevpenjanja elektrode lahko vršimo obdelavo z elektroerozijskim postopkom. Tako lahko obrabljeno elektrodo obnovimo kar na stroju. Postopek ultrazvočne obelave se je za kompleksnejše oblike elektrod izkazal za hitrejšega in bolj ekonomičnega v primerjavi z NC-frezanjem [KREMER80].

#### 2.9.5 Dovajanje kisika v režo

S poznavanjem postopka plazemskega rezanja, pri katerem je proces intenzivnejši, če se v območje rezanja dovaja več kisika, pridemo do ideje, da pri elektroerozijskem postopku dovajamo v režo kisik. S tem dosežemo večjo oksidacijo med razelektritvijo, kar pomeni večjo eksplozivno energijo. To pokaže tudi merjenje temperature obdelovanca med procesom. Delci, ki se tvorijo v reži in se nabirajo v dielektriku, vsebujejo velik delež  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Iz rezultatov lahko zaključimo, da se približno polovica dovedenega kisika kemijsko veže z bližnjimi elementi. Delež energije, nastale zaradi dovajanja kisika, je 5,6% v celotni energiji razelektritve [KUNIEDA91].

Preizkusi so bili izvedeni v deionizirani vodi, ker je v kerozinu in ostalih gorljivih dielektrikih velika nevarnost vžiga. Ugotovljeno je bilo, da za določen proces obstaja optimalna količina dovedenega kisika, saj preveč kisika pomeni, da je v reži premalo dielektrika, zato je odvzem materiala slabši. Poleg tega je odvzem materiala z dovajanjem kisika relativno večji pri manjših energijah razelektritev in pri večji reži. Z dovajanjem majhnih količin kisika v režo dosežemo manjšo obrabo (pog. 2.8.2).

#### 2.9.6 Preprečevanje neželenih impulzov

Pred obločnimi se vedno pojavijo kratkostične razelektritve. Proces spravimo nazaj v stabilno stanje tako, da dovedemo impulz z večjo energijo. S tem preprečimo obločne razelektritve [BRUYN80a, BRUYN80b].

Na sistemu, kjer je impulz prekinjen 4  $\mu\text{s}$  pred koncem, če se do takrat razelektritev še ni pojavila je manjša obraba za 30 % [WECK92].

### 2.9.7 Ostali alternativni pristopi

Poznana sta postopka elektrokemične (ECM<sup>1</sup>) in elektroerozijske obdelave (EDM). Ta dva postopka so združili skupaj [MCGEUGH83] v en proces, tako, da je odvzem fizikalen in kemični. Pri tem postopku glaven odvzem vršijo obločne razelektritve. Uporabljali so generator, ki je generiral 10  $\mu s$  dolge impulze brez pavze med njimi. Poleg tega so uporabljali še nihanje elektrode, ki je bilo usklajeno z impulzi. Postopek je imel boljši odvzem materiala in večjo toplotno prizadeto cono.

Tanimura in ostali [TANIMURA89] so preizkušali proces brez klasičnega dielektrika; v režo so dovajali mešanico plina in tekočine.

V poročilu [NASA85] navajajo, da je možen elektroerozijski proces brez tekočega medija. Namesto tega se uporablja argon ali helij.

Ti viri navajajo, da je proces elektroerozije brez tekočega medija možen, niso pa se toliko posvečali izboljšanju elektroerozijskega procesa.

---

<sup>1</sup>ECM — Electro Chemical Machining

### 3. Krmiljenje elektroerozijskega procesa

Pred leti so klasični elektroerozijski stroji zaznavali povprečno napetost v reži in operaterju omogočali spreminjanje referenčne napetosti. Servo sistem je razdalijo v reži spreminjal tako, da je bila razlika med povprečno in nastavljeno napetostjo v vsakem trenutku čimmanjša. Izkazalo se je, da to ne zadostuje za vodenje tako dinamičnega in stohastičnega procesa, kot je elektroerozijski. Zato so začeli graditi sisteme, ki zaznavajo delež obločnih razelektritev glede na zakasnitev vžiga in krmilili proces s spreminjanjem pavze med impulzi. Ker je elektroerozijski proces precej naključen in se njegove lastnosti spreminjajo skupaj s spreminjanjem pogojev obdelave, je uvedba kompleksnejšega krmiljenja nujna. V ta namen je potrebno zagotoviti kvaliteten servo sistem, ki je sposoben režo prilagajati karakteristikam razelektritve [RAJUKAR89].

Elektroerozijski proces spada v skupino procesov, za katere ne moremo napisati sistemskih enačb, sistemski parametri pa se s časom spreminjajo [ZHAO90].

#### 3.1 Pomembne karakteristike pri vodenju elektroerozijskega procesa

Stroj na tehničnem nivoju je izvedljiv le, če so vsi podsistemi kvalitetni. Nivo podsistemov določa nivo celotnega stroja oz. nivo stroja je enak nivoju najslabšega podsistema. Faktorji, ki najbolj vplivajo na karakteristike procesa, so sledeči [ENDEL80]:

1. Natančnost pozicioniranja orodja, statični in dinamični parametri procesa.
2. Natančna in predvsem hitra kontrola gibanja orodja (pri žični eroziji).
3. Generator impulzov in močnostni del naj imata možnost čimvečje kontrole uporabnika.
4. Metoda vodenja procesa in drugi podsistemi (pretok dielektrika...).
5. Komunikacija med operaterjem in strojem.
6. Način realizacije modula za kontrolo procesov.
7. Odprtost kontrolnega sistema; kako lahko dodajamo nove module oz. v primeru adaptivnega vodenja nastavljanje začetnih parametrov.
8. Diagnosticiranje procesa.

Za kvalitetno krmiljenje reže potrebujemo dober servo sistem (reakcijski čas manjši od 1 ms), ki je potreben pogoj za kvalitetno vodenje procesa. Brez dobrega servo sistema tudi še tako dober adaptivni krmilnik nima dovolj manevrskega prostora za vodenje procesa [BOCCAD95].

#### 3.2 Parametri elektroerozijskega procesa s stališča krmilnika

V poglavju 2.6 smo s stališča procesa delili vhodne parametre v proces na nastavitvene in krmilne. S stališča krmilnika imamo drugačno delitev parametrov. Tako pri krmilniku elektroerozijskega procesa nastopajo parametri, ki vstopajo v krmilnik — **identifikacijski parametri** in parametri, ki iz krmilnika izstopajo — **krmilni parametri**. Na podlagi identifikacijskih parametrov krmilnik identificira proces, s pomočjo krmilnih pa posega v proces in ga vodi tako, da je le-ta čimbolj stabilen.

V sledeči tabeli so podani identifikacijski in krmilni parametri. Razdeljeni so v dve skupini: parametre že uporabljene za izvedbo krmilnika in parametre, ki za to do sedaj še niso bili uporabljeni, njih uporaba pa je možna /Tabela 3.1/.

Tabela 3.1: Vhodni in izhodni parametri krmilnika elektroerozijskega procesa

	Identifikacijski	Krmilni
Uporabljeni	čas zakasnitve vžiga ( $t_d$ ) čas zakasnitve vžiga ( $t_{df}$ ) frekvenčna porazdelitev zakasnitve vžiga ( $t_d$ ) čas trajanja razelektritve ( $t_e$ ) čas padca napetosti ( $t_f$ ) visokofrekvenčni signal (R.F.) povprečna napetost v reži upornost v reži	položaj elektrode (reža) pretok, tlak dielektrika čas impulza ( $t_i$ )  čas pavze ( $t_o$ ) odmik elektrode <sup>1</sup>
Neuporabljeni	zvok (20 do 20.000 Hz)	imenska vrednost toka ( $i_e$ ) imenska vrednost napetosti ( $u_i$ )

Iz tabele vidimo, da so procesni parametri elektroerozijskega procesa uporabljeni za identifikacijo procesa oziroma kot vhodni parametri v krmilnik, vhodni parametri v elektroerozijski proces pa za krmilne parametre oziroma kot izhodne parametre iz krmilnika.

### 3.2.1 Identifikacija procesa

Vsekakor je za identifikacijo procesa pomemben potek toka in napetosti v reži, ki sta neposredno odvisna od razmer v reži. V poglavju 2.7 smo navedli, da je zaradi tehnične izvedbe primernejši napetostni signal. Informacijo o razmerah v reži daje tudi upornost v reži. Velika verjetnost je, da bi se kot pomemben podatek pokazal tudi zvok (senzor v območju 20 do 20.000 Hz), ki nastaja med razelektritvijo, saj se operater pri vodenju procesa opira tudi na ta podatek, vendar raziskave v tej smeri še niso bile narejene. Za krmilnik je pomembno, da razpolagamo z obliko informacij, ki je primerna za hitro obdelavo. Električni signali so tipičen predstavnik takih informacij, tako da za zasledovanje poteka napetosti in upornosti ne potrebujemo posebnih senzorjev in pretvornikov. Gradient spreminjanja upornosti v reži je precej majhen, tako da je njen zajem enostaven. Drugače pa je z napetostnim signalom, ki se izjemno hitro spreminja. Zato poznamo različne pristope k vrednotenju tega signala.

Raziskan je bil potek sile pri razelektritvi, rezultati pa ne dajejo nobenih uporabnih informacij za identifikacijo procesa [HUI92].

Najenostavnejša možnost je zajem povprečne napetosti čez določeno obdobje (določeno število impulzov). Naredili smo nekaj eksperimentov v rizičnih pogojih dela<sup>2</sup>. Napetost je bila na začetku konstantna, ko pa je začela padati, so se začele pojavljati tudi obločne razelektritve. Napetost je vedno bolj padala, dokler ni v reži nastal kratek stik in proces se je ustavil. To dokazuje na uporabnost takega vrednotenja napetostnega signala. Prednost takega sistema je predvsem v cenenosti opreme za zajem napetostnega signala. Potrebujemo le voltmeter, ki omogoča priklop na konkretno izvedbo krmilnika. V našem primeru je to digitalni voltmeter s standardnim vmesnikom za povezavo na PC (npr. RS232).

<sup>1</sup>Krmiljenje položaja elektrode pomeni premike elektrode brez prekinitve procesa, odmik pa pomeni tako velik odmik elektrode, da pride do prekinitve procesa.

<sup>2</sup>Vhodni parametri so bili tako nastavljeni, da je velika verjetnost pojavljanja obločnih razelektritev, kar vodi do poškodbe površine in celo zaustavitve procesa.

Bolj sofisticirana metoda je določanje posameznih procesnih parametrov na napetostnem signalu, ki daje več informacij o samem procesu (*pog. 2.7 - Procesni parametri*). Vsak od teh parametrov ima neskončno zalogo vrednosti, zato se je uveljavil sistem klasificiranja razelektritev. S tem reduciramo število podatkov, ki vstopajo v krmilnik. O klasifikaciji smo govorili v poglavju 2.7.1. Na tem mestu velja ponoviti le, da se kot parameter klasifikacije običajno uporablja čas zakasnitve vžiga, ki je obratno sorazmeren z jakostjo električnega polja in zato primeren parameter za krmiljenje reže [HEUVEL74]. Možna je tudi uporaba R.F. signala, s katerim natančneje določimo delovne razelektritve.

Za klasifikacijo potrebujemo posebno elektronsko vezje (analogno ali digitalno), ki je sposobno izvesti klasifikacijo in sprotno<sup>1</sup> podajati deleže posameznih razelektritev. Druga rešitev je A/D pretvornik (zadostuje vzorčenje 10 MHz [DAUW86]), ki posreduje podatke naprej v računalnik, kjer se izvaja klasifikacija. Ta način je za raziskovalno delo zagotovo boljši, saj imamo možnost enostavnega spreminjanja kriterijev klasificiranja z algoritmom, napisanim v enem od programskih jezikov. Na ta način imamo odprt sistem, v katerega lahko poljubno posegamo. Za industrijsko uporabo je primernejša uporaba elektronskega vezja.

Gradnja krmilnika za elektroerozijski proces običajno poteka v sledečih fazah. Najprej se zgradi čimbolj odprt sistem, ki omogoča kvalitetne raziskave. Predlagamo uporabo osebnega računalnika s kvalitetnim A/D pretvornikom in možnostjo krmiljenja procesa. Pridobljeno znanje v obliki programskega algoritma se nato prevede v elektronsko vezje in tako dobimo zaprt sistem z že vgrajenim znanjem, ki je primeren za vgradnjo na klasični elektroerozijski stroj.

### 3.2.2 Krmiljenje procesa

Krmilnik vodi proces preko krmilnih parametrov. Več krmilnih parametrov pomeni boljšo kontrolo nad procesom. Seveda zahteva gradnja krmilnika z več krmilnimi parametri tudi več znanja. V prejšnji tabeli /*Tabela 3.1*/ smo navedli nekaj krmilnih parametrov. Najpogosteje se uporablja krmiljenje razdalje med elektrodama in čas pavze med dvema impulzoma. Pomemben je tudi pretok dielektrika, saj je predpogoj za stabilnost procesa konstantna prevodnost v reži. Odvzet material, ki plava v dielektriku spreminja upornost reže, zato je priporočljivo poleg reže krmiliti tudi pretok dielektrika [ROETHEL76]. S tem preprečujemo neželene razelektritve in manjšo obrabo elektrode.

### 3.3 Adaptivno krmiljenje

V literaturi je adaptivni krmilnik različno definiran. Gibsonova definicija adaptivnega sistema se glasi: "Adaptivni sistem je tisti, ki zagotavlja kontinuirano merjenje karakteristik procesa in v primerjavi z referenčnim modelom vpliva na proces tako, da je zadoščeno referenčnemu modelu." [GIBSON]. Na osnovi te definicije Davies loči med *statičnimi* in *dinamičnimi* adaptivnimi sistemi. V prvo skupino sodijo krmilniki s klasično povratno zanko, slednje pa imenuje prave adaptivne sisteme. Zanje postavlja sledeče zahteve [DAVIES70]:

- vsebovati definiran referenčni model
- zmožnost ugotavljanja karakteristik procesa v jeziku referenčnega modela
- na podlagi primerjave med dejanskimi karakteristikami in referenčnim modelom tako vplivati na proces, da njuna razlika čimmanjša

---

<sup>1</sup>*angl.* on-line

- prilagajanje tega vplivanja na proces na osnovi karakteristik procesa ali z drugimi besedami, spreminjati prenosno karakteristiko krmilnika.

Ko imamo opravka s krmiljenjem procesov, običajno imenujemo adaptivne krmilnike tiste, ki ugotavljajo karakteristike procesa in jih primerjajo z referenčnimi. Na osnovi te razlike so sposobni optimalno voditi proces.

Z razvojem CNC<sup>1</sup> strojev, predvsem pa fleksibilnih obdelovalnih sistemov (FMC<sup>2</sup>) se večja tudi uporaba adaptivnega vodenja procesov. Z adaptivnim krmiljenjem dosežemo, da se proces prilagaja (adaptira) na spremembe, ki med samim procesom nastopajo. Glede na prilagajanje spremembam, ločimo tri sisteme adaptivnega krmiljenja:

- adaptivno krmiljenje (ACC<sup>3</sup>)
- adaptivno krmiljenje z optimizacijo (ACO<sup>4</sup>)
- geometrično adaptivno krmiljenje (GAC<sup>5</sup>)

Pri **ACC** sistemu določimo omejitve procesa, območja v katera proces ne sme priti. Ko izhodni parametri dosežejo mejo območja adaptivni krmilnik reagira tako, da se proces premakne nazaj v zahtevano območje. Pri struženju smo omejeni z močjo, momentom, silo ... V primeru, da se premer obdelovanca spreminja, bo krmilnik v primeru dosežene meje nekega parametra, spremenil npr. globino rezanja tako, da bo sistem stalno v dovoljenih mejah. S tem imamo tudi varovanje procesa pred kolizijo.

Za elektroerozijski proces pomeni ACC kontrola zagotavljanje poteka procesa v varnem območju. To pomeni preprečevanje obločnih impulzov in ostalih degeneracij procesa [BOCCAD95].

Pri **ACO** sistemu določimo optimalno točko procesa, npr. prenosno funkcijo. Z adaptivnim krmiljenjem vplivamo na proces tako, da je dejanska prenosna funkcija (zagotavljamo jo s sprotno identifikacijo vhodov in izhodov iz sistema), čimbolj podobna teoretični (idealni). Na primeru struženja se zasleduje rezalno ( $F_z$ ) in odzivno ( $F_y$ ) silo. Razmerje energijskih spektrov sil je prenosna funkcija. Če dejanska vrednost odstopa od želene, adaptivni sistem po določenem algoritmu spremeni ustrezne parametre procesa.

Ko imamo zagotovljen potek procesa v varnem območju, je nadaljnja naloga zagotoviti optimalno delovanje. ACO sistem zagotavlja optimalne parametre procesa v smislu čimvečje produktivnosti, kvalitete površine, obrabe elektrode, itd. [BOCCAD95].

Z **GAC** sistemom optimiramo natančnost sistema. To so npr. dimenzijska natančnost, oblikovna natančnost, kvaliteta površine... Pri struženju se npr. z večanjem obrabe proste ploskve premer obdelovanca večja. Adaptivni sistem primika nož k obdelovancu točno za vrednost obrabe proste ploskve. Tako je premer obdelovanca po celotni dolžini konstanten.

---

<sup>1</sup>CNC — Computer Numerical Control

<sup>2</sup>FMC — Flexible Machining Centre

<sup>3</sup>ACC — Adaptive Control Constraint

<sup>4</sup>ACO — Adaptive Control Optimisation

<sup>5</sup>GAC — Geometrical Adaptive Control

## 3.4 Primeri krmilnikov za elektroerozijski proces

### 3.4.1 Vodenje s pomočjo referenčnega modela

Sistem bazira na kontrolni teoriji referenčnega modela (*angl.* model reference control theory) [RAJUKAR89].

Računalnik zajema podatke iz identifikacijske enote in računa referenčno napetost za servo sistem ( $U_{ref}$ ), kateri prilagodi velikost reže tej napetosti s pomočjo povratne zveze, ki zagotavlja informacijo, kdaj je dejanska napetost enaka referenčni. Ko je temu pogoju zadoščeno, se reža ne spreminja več.

Dejanska napetost v reži ni odvisna samo od razdalje v reži, ampak tudi od obremenilnega količnika ( $\tau=t_i/t_p$ ,  $t_p=t_i+t_o$ ). Pri izoenergijskem generatorju se obremenilni količnik stalno spreminja ( $t_e = konst$ ). Identifikacija procesa se vrši z R.F. signali.

Referenčni model bazira na ugotavljanju parametra  $y$ , ki je definiran z enačbo /En. 6/:

$$\text{En. 6: } y = 2 \cdot \frac{t_d}{t_i} + \frac{t_e}{t_i}$$

Glede na deleže posameznih impulzov ima parameter  $y$  sledeče vrednosti:

$$100\% \text{ A} \quad \dots t_d/t_i=1 \quad \& \quad t_e/t_i=0 \quad \Rightarrow y=2$$

$$100\% \text{ B} \quad \dots t_d/t_i=0,5 \quad \& \quad t_e/t_i=0 \quad \Rightarrow y=1$$

$$100\% \text{ C ali D} \quad \dots t_d/t_i=0 \quad \& \quad t_e/t_i=0 \quad \Rightarrow y=0$$

Proces je stabilen, ko je parameter  $y=1$ .

Z uporabo referenčnega modela, opisanega servo sistema za zagotavljanje konstantnega časa zakasnitve vžiga, so bili v primerjavi s sistemom brez R.F. identifikacije procesa in brez uporabe referenčnega modela, dobljeni sledeči rezultati:

- Boljša stabilnost sistema, manjša reža  $\Rightarrow$  manj prostih razelektritev  $\Rightarrow$  produktivnost večja za 38%
- Čas obdelave skrajšan na polovico, obločne razelektritve se ne pojavljajo. Adaptivni krmilnik je sposoben nadaljevati obdelavo, čeprav je bil proces že prekinjen zaradi obžiganja<sup>1</sup>.

### 3.4.2 Večnivojski adaptivni krmilnik

Kot parameter za popis razmer v reži je uporabljen čas zakasnitve vžiga ( $t_{df}$ ), kot možen parameter pa je navedena tudi povprečna vrednost napetosti [WECK92].

Za računanje razlik med nastavljeno in dejansko srednjo vrednostjo časa zakasnitve vžiga ( $t_{df}$ ) moramo vzeti primerno (optimalno) število razelektritev. Če je to število preveliko, bo reakcija sistema na nezaželen potek procesa prepočasna, pri premajhnem vzorčenju pa bo sistem spreminjal parametre procesa na podlagi naključnih obločnih razelektritev, ki niso rezultat neprimernih vhodnih parametrov, kar vodi do nestabilnosti procesa. Optimalno vzorčenje je odvisno od stabilnosti procesa. Zato je izveden krmilnik, ki velikost vzorca prilagaja stabilnosti procesa.

---

<sup>1</sup>Obžiganje se pojavi zaradi prevelikega deleža obločnih razelektritev, ki se pojavljajo na enem mestu. Tam se površina pregreje. Na obdelovancu se pojavi velik krater, na elektrodi pa ogljikov nalepek. Brez prekinitve procesa in čiščenja elektrode in obdelovanca je normalen proces skoraj nemogoče nazaj uspostaviti.

Optimizacijski algoritem kontrolira čas zakasnitve vžiga ( $t_{df}$ ), hitrost servo sistema (ločeno podajalno in odmično hitrost), čas impulza in število impulzov, na podlagi katerih računa povprečno vrednost zakasnitve vžiga. Napoved obrabe elektrode se računa na podlagi števila obločnih in zakasnelih razelektritev.

Proces se začne z nastavljenimi vrednostmi časa zakasnitve vžiga. V prvem nivoju optimizacijski algoritem to vrednost manjša, dokler se ne doseže mejna obraba elektrode. S tem se večja produktivnost procesa. V drugem nivoju se za vsako spremembo vrednosti časa zakasnitve vžiga izvede pet poizkusov z različno podajalno hitrostjo servo sistema in različnim trajanjem impulza. V tretjem nivoju se za vsako vrednost podajalne hitrosti določi še optimalno odmično hitrost servo sistema. Tako dobimo optimalno delovanje sistema. Stalno se vrši kontrola srednje vrednosti parametra  $t_{df}$  in obrabe elektrode. Če se čas zakasnitve vžiga razlikuje od nastavljene vrednosti, potem se najde optimalna vrednost s pomočjo optimiziranja odmične hitrosti (tretji nivo). V primeru manjše obrabe elektrode od nastavljene se zmanjša nastavljena vrednost parametra  $t_{df}$  in ponovijo se vsi trije nivoji. Če je obraba večja, se poizkuša najti rešitev na drugem in tretjem nivoju. Če ni rešitve, znižanja obrabe, se poveča nastavljena vrednost zakasnitve vžiga.

S takšno optimizacijo je dosežena 30 % manjša obraba elektrode pri enaki produktivnosti.

### 3.4.3 Krmilnik z mehko logiko

1. Mehka logika (*angl.* fuzzy logic) pride v poštev predvsem tam, kjer ni mogoče vpeljati matematičnega modela oz. je sistem skrajno nelinearen. Podatke črpa iz baze pravil, ki so lahko delno kontradiktorna ali redundantna. Tak sistem je blizu človeškemu mišljenju, zato dopušča direktno implementacijo operaterjevega znanja. Poleg tega lahko krmilnik z mehko logiko pokriva večji obseg stanja procesa, kot klasični krmilniki. Navedene karakteristike so idealne za elektroerozijski proces [BOCCAD95].

Pri tem sistemu se je identifikacija procesa vršila preko časa zakasnitve vžiga ( $t_d$ ). Določena je referenčna vrednost časa zakasnitve vžiga in preko povratne zveze izvedeno krmiljenje procesa tako, da je razlika med dejanskim in referenčnim časom zakasnitve vžiga čimmanjša.

Z opisanim sistemom je dosežena je 40% večja produktivnost v primerjavi s procesom brez adaptivne kontrole.

2. Operaterjevo znanje je težko popisati v matematični obliki. Z mehko logiko je to lažje.

Potek operaterjevega dela:

- pred obdelavo: nastavitev načina dela (grobo, fino)
- med obdelavo: spreminjanje parametrov obdelave v smislu stabilnega procesa
- v sili: včasih so potrebni drastični ukrepi, da se vzpostavi stabilno stanje

Mehka logika omogoča posnemanje operaterjevega znanja v smislu kvantitete in kvalitete (kateri parameter se bo za koliko spremenil).

Znana so pravila, kdaj je proces stabilen. Z mehko logiko so poizkušali vzpostaviti čimbolj stabilen proces. To so uspeli tako dobro, kot operater [MORITA].

### 3.4.4 Odmik elektrode po potrebi

Identifikacija deležev posameznih razelektritev je potekala preko R.F. signala. Odmik elektrode je bil izveden na podlagi sledeče enačbe /En. 7/:

En. 7:  $y = x_1 + 2x_2 + 5x_3 + 5x_4 + 0x_5$

- $x_1$  ... delež delovnih razelektritev
- $x_2$  ... delež prehodnih razelektritev
- $x_3$  ... delež obločnih razelektritev
- $x_4$  ... delež kratkostičnih razelektritev
- $x_5$  ... delež prostih impulzov

Če je bila vrednost  $y$  manjša od 1, se je čas med dvema odmikoma povečeval, pri vrednosti  $y$  večji od 1 pa se je čas zmanjševal. Ko je čas dosegel vrednost 0, se je elektroda za hip odmaknila od obdelovanca, nato pa se je obdelava nadaljevala [ZHAO90].

Krmiljenje dviga elektrode je bilo izvedeno tudi na podlagi sledečega pravila: Ko je število obločnih impulzov v 50 ms večje kot število delovnih ter število delovnih večje od števila kratkostičnih, izvedi odmik [MASUZAWA83].

### 3.4.5 Identifikacija na podlagi frekvenčne porazdelitve časa zakasnitve vžiga

Čas zakasnitve vžiga ( $t_d$ ) je naključen, kljub temu lahko s tem parametrom identificiramo proces. V danem primeru je identifikacija potekala s krivuljo frekvenčne porazdelitve časa zakasnitve vžiga. Znana je povezava med kratkim časom zakasnitve vžiga, relativno frekvenco razelektritev in obrabo elektrode [KONIG79]. Na podlagi frekvence razelektritev in časa zakasnitve vžiga ne moremo sklepati na produktivnost in obrabo elektrode [WECK80], lahko pa sklepamo na podlagi oblike krivulje frekvenčne porazdelitve zakasnitve vžiga. S tem sistemom so dosegli napovedovanje produktivnosti in obrabe elektrode na 4% natančno.

Ločili so tri območja časa zakasnitve vžiga:

- T1 ... majhen  $t_d$ : obraba elektrode
- T2 ... srednji  $t_d$ : odvzem materiala
- T3 ... velik  $t_d$ : prosti impulzi

Ugotovitve:

- Zasedovanje T2 je primerno za krmiljenje (optimizacijo) podajalnega sistema, za doseg maksimalnega odvzema je potrebno dosežati čimvečji količnik T2/T1.
- Na faktor T2 ima referenčna napetost večji vpliv kot ojačevalna napetost regulatorja.
- Za večjo produktivnost je ugodnejši čimmanjši čas pavze. V primeru več zaporednih prostih impulzov začasno povečamo čas pavze, da povečamo število razelektritev s krajšim časom zakasnitve vžiga. Krmiljenje časa pavze ima manjši reakcijski čas, kot krmiljenje servo sistema.

### 3.4.6 Direktno krmiljenje servo sistema

V zadnjem času je veliko avtorjev baziralo na detektiranju razmer v reži in konstruiralo veliko adaptivnih krmilnikov, ki so krmilili servo sistem preko referenčne napetosti in preko povratne zveze iskali optimalno stanje procesa. Izkazalo se je, da direktno krmiljenje servo sistema uspešnejše, kot iskanje optimuma preko referenčne napetosti ( $U_{ref}$ ) in povratne zveze.

Izvedeno krmilje direktno kontrolira položaj reže. Reakcijski čas sistema je 2  $\mu s$ . Med procesom teče identifikacija matematičnega modela, ki predstavlja povezavo med servo sistemom in izhodnimi parametri (parametri razelektritve). S predstavljenim sistemom so dosegli 15% izboljšanje produktivnosti. programski algoritem vodenja procesa je preveden v elektronsko vezje. S tem je sistem postal zaprt in primeren za vgradnjo na katerikoli elektroerozijski stroj [RAJUKAR90].

### 3.4.7 Testni impulzi

Eksperimenti so bili izvedeni brez izpiranja reže. S tem so bili pogoji obdelave še posebej zahtevni. Določili so dva praga napetosti v reži, 90V in 15 V. Dejansko napetost je bilo možno ugotavljati preko t.i. testnih impulzov. Ko je *testna* napetost bila v navedenih mejah, je generator spustil *pravi* impulz, ki je vodil do razelektritve. Identifikacija procesa je potekala z R.F. signalom. Rezultati so pokazali izboljšanje produktivnosti in kvalitete površine ter zmanjšanje obrabe elektrode [RAJUKAR92].

### 3.4.8 Vodenje procesa z funkcijsko vrednostjo deležev razelektritev

Uveden je bil faktor  $\phi$  ki je v dobri korelaciji z produktivnostjo [SNOEYS75, STEELAND75]. Definiran je s sledečo enačbo:

$$\text{En. 8: } \phi = \frac{\sum t_e}{\sum t_p} = \frac{\sum t_e}{\sum t_i} \cdot \frac{\sum t_i}{\sum t_p} = \phi' \cdot \tau$$

Za izofrekventne generatorje je obremenilni količnik ( $\tau$ ) konstanten in zajema vpliv pavze med dvema impulzoma. Parameter  $\phi'$  predstavlja pojav neefektivnih razelektritev in povprečno vrednost časa zakasnitve vžiga ( $t_d$ ). Faktor  $\phi$  naj bo čimvečji; s tem bo produktivnost maksimalna. To je takrat, ko so vse razelektritve delovne, zakasnitev vžiga majhna v primerjavi z trajanjem impulza in trajanje impulza kratko [SNOEYS].

Ugotovitve:

- večja napetost v reži vodi k manjšem deležu obločnih impulzov.
- večja napetost v reži in kratek čas trajanja impulza vodi k manjši obrabi elektrode. Pri daljšem trajanju impulza je obraba večja.
- $t_i = 5 \mu s \Rightarrow$  obraba je funkcija delovnih in obločnih razelektritev
- $t_i > 20 \mu s \Rightarrow$  obraba je funkcija obločnih razelektritev

Z dodatnim virom napetosti, ki ne povzroča v reži toka večjega od 100 mA lahko merimo napetosti v reži in tako dobimo dodatne informacije o procesu. Med trajanjem impulza se pojavijo sledeče situacije:

- naraščanje napetosti do zgornje meje pomeni veliko upornost v reži, kar vodi do prostih impulzov ali delovnih razelektritev
- visokofrekvenčno nihanje napetosti pomeni manjšo upornost v reži
- napetost enaka 0 pomeni, da v reži ni upornosti, torej kratkostične razelektritve

## 4. Metode umetne inteligence

V prejšnjih poglavjih smo videli, da so imeli različni avtorji različne pristope k gradnji krmilnika elektroerozijskega procesa. Predstavljeni so različni pristopi k gradnji krmilnika, od precej enostavnih, pa do kompleksnih adaptivnih krmilnikov.

V našem primeru smo modelirali operaterjevo znanje s pomočjo ene od metod umetne inteligence, zato spregovorimo najprej nekaj o teh metodah.

### 4.1 Uvod

Pri racionalnem opisu problemov se običajno srečujemo z modeli, ki se bolj ali manj ujemajo z dejanskim potekom procesov. Procese delimo na deterministične in stohastične. Deterministične procese je možno zajeti v nek (matematični) model seveda z določeno napako, za stohastične pa je uporaba modela problematična. V praksi imamo veliko opravka s stohastičnimi procesi, za katere je gradnja matematičnega modela precej zahtevna in pogosto za zahtevano natančnost neizvedljiva naloga.

Poljuben proces lahko obravnavamo na različne načine [LEBAR95]:

- deterministično
- statistično
- z metodami umetne inteligence<sup>1</sup>.

Proces lahko obravnavamo deterministično, če poznamo odvisnost med vhodnimi in izhodnimi količinami, pa še narava procesa mora biti takšna, da so motilne količine, ki v proces vstopajo zanemarljivo majhne.

Statistični pristop upošteva stohastično naravo procesa in odnose med vhodnimi in izhodnimi količinami določi s statističnimi metodami.

Z metodami umetne inteligence, opišemo problemsko domeno z nekim simboličnim opisnim jezikom. Uporabimo lahko različne pristope k opisu: ekspertne sisteme (Dvorak, 1987), nevronske mreže (Miller in sod. 1990; Hunt in sod. 1992), mehko logiko (Lee, 1990) in genetske algoritme (Renders in Nordvik, 1992) [URBANČIČ94].

V primeru ekspertnih sistemov<sup>2</sup> znanje največkrat predstavimo z množico pravil v obliki {če pogoj *P*, potem sklep *C* (*if - then*)} pravila. Izkaže se, da je takšna oblika pravil najbolj pregledna, nova pravila je lahko dodajati, pravila lahko spreminjamo neodvisno enega od drugih. Drugi možni opisi so: semantične mreže in okviri (*angl.* frames) [BRATKO90].

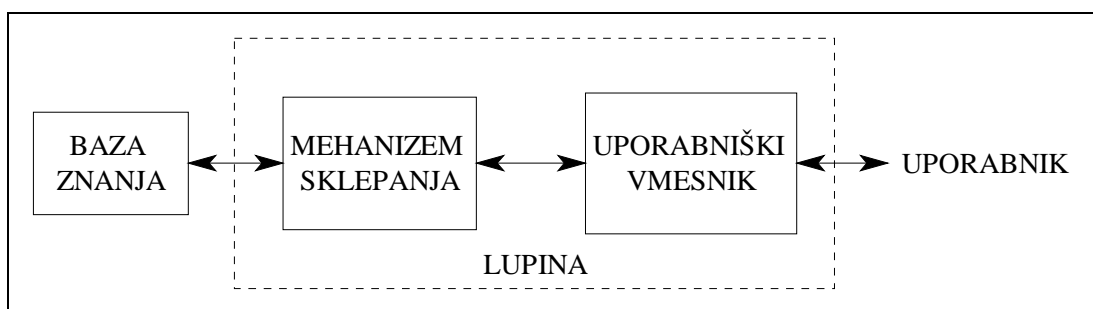
### 4.2 Ekspertni sistem

Vzemimo, da je naš namen, zgraditi ekspertni sistem za določeno problemsko področje. Ekspertni sistem sestavljajo trije osnovni deli /Slika 4.1/: 1. baza znanja, 2. mehanizem sklepanja in 3. uporabniški vmesnik.

---

<sup>1</sup>**umetna inteligenca:** sposobnost stroja, da rešuje umske probleme, slovar slovenskega knjižnega jezika, V. zvezek, str.263

<sup>2</sup>**ekspertni sistem:** "ekspertni sistem je program, ki se vede podobno kot izvedenec za določeno ožje področje. Kot od izvedenca pričakujemo tudi od ekspertnega sistema, da zna pojasniti svoje odločitve in sklepanje, ki je do odločitve vodilo. Pogosto pričakujemo tudi, da zna uporabljati nezanesljivo in nepopolno informacijo" [BRATKO89].

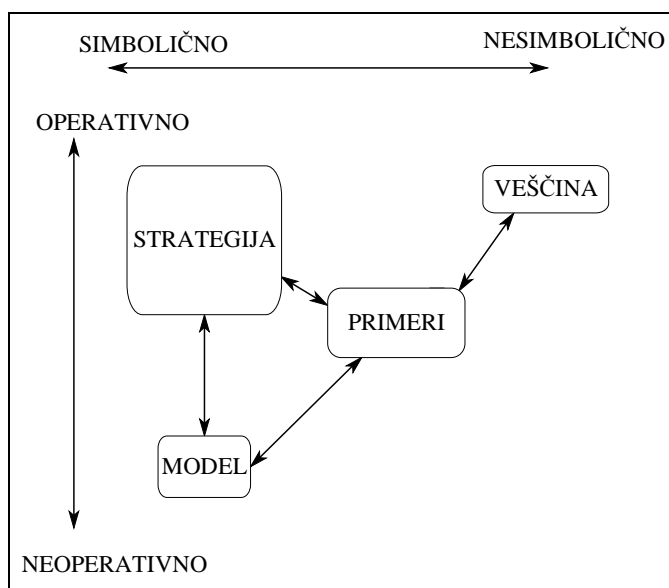


Slika 4.1: Zgradba ekspertnih sistemov [BRATKO89].

V bazi znanja je shranjeno znanje, ki je potrebno za odločanje o problemih na področju, na katerem bomo ekspertni sistem uporabljali. Mehanizem sklepanja zna aktivno uporabljati znanje iz baze znanja. Uporabniški vmesnik skrbi za komunikacijo med sistemom in uporabnikom. Uporabniku omogoča vpogled v proces reševanja problema, ki ga vodi mehanizem sklepanja. Pomeni, da zna ekspertni sistem rešiti problem in odgovoriti na vprašanje zakaj in kako. Odgovor na vprašanje zakaj pojasni, zakaj sistem potrebuje podatek, odgovor na vprašanje kako pojasni, kako je program prišel do rešitve [BRATKO89].

Lupine ekspertnih sistemov so danes že komercialno dostopni programi, tako da si s tem delom področja ne delamo skrbi. Baza znanja je tisti del ekspertnega sistema, ki ga morajo priskrbeti strokovnjaki s področja, za katerega je ekspertni sistem namenjen.

Znanje je po svoji naravi večplastno. Ni nujno, da imata osebi, ki opravita enako delo tudi enako globokega znanje o tem delu. Eden se je na delo morda privadil, ne da bi razumel znanje, ki tiči zadaj. Drugi, strokovnjak s področja pozna problem teoretično in opravlja delo razumsko. Za prvega pravimo, da delo obvladuje na nivoju večšine (površinsko znanje), za drugega da ima globoko znanje o področju. Predvsem kadar ima nekdo znanje na nivoju večšine ga ne bo mogel izraziti v obliki eksplicitnih pravil /Slika 4.2/.



Slika 4.2: Vrste znanja, razvrščene glede na stopnjo operativnosti in izrazljivost na simboličnem nivoju [URBANČIČ94].

V takih primerih je ena od možnih rešitev uporaba metode umetne inteligence — strojnega učenja. Gre se za to, da naprava za strojno učenje (računalnik) primerja več parov vhodov in

izhodov iz sistema in poizkuša najti kakršnokoli zakonitost na podlagi relacij med ustreznim vhodom in izhodom. Pri iskanju povezav, zakonitosti, lahko stroju pomagamo s podajanjem posameznih pravil, namigov (*angl. hints*)<sup>1</sup> [ABU95].

Oblike učenja variirajo v intervalu od *učenja s pripovedovanjem*<sup>2</sup>, pri katerem je vsa teža na učitelju, do *učenja z odkrivanjem*<sup>3</sup>, kjer je vsa težavnost dela na učencu. Nekje vmes je *učenje iz primerov*<sup>4</sup> ali induktivno učenje. Učitelj priskrbi informativne učne primere, do konceptov pa se mora dokopati učenec sam [BRATKO90].

Cilj strojnega učenja je, da dosežemo, da bo stroj posnemal ciljno funkcijo, to je želeno preslikavo vhodnih količin v izhodne [ABU95]. Ne glede na to za katero vrsto učenja gre, potrebujemo jezik, s katerim bomo opisali objekte, ki sestavljajo učno množico in koncepte, do katerih se je program dokopal. V glavnem ločimo dva načina opisovanja: relacijski opis in atributivni opis.

*Relacijski*, imenovan tudi *strukturni*, opis je primeren za opisovanje objektov in relacij med njimi. Opis je sestavljen iz naštevanja sestavnih delov in iz opisovanja relacij med njimi. Za naše delo je še posebej pomemben *atributivni* opis, ki podaja vrednosti atributov, s katerimi se da objekt ali koncept opisati [LEBAR95].

### 4.3 Paradigma strojnega učenja

Razvitih je bilo več načinov strojnega učenja. Za vse je značilno, da so prilagojeni specifičnemu problemu in imajo polno *prostih parametrov*, s katerimi je možna dokončna prilagoditev. Delovanje naprave za strojno učenje lahko gledamo matematično kot funkcijo, ki povezuje vhodne parametre (specifikacije problema, ki naj bi bil rešen) z izhodnimi (odločitve ali akcije, ki naj bi bile izvedene). Cilj strojnega učenja je torej generiranje ciljne funkcije, ki povezuje vhodne in izhodne parametre. S pomočjo učnih primerov (parov vhod-izhod) se določijo vrednosti prostih parametrov. Z vsakim učnim primerom dobimo proste parametre natančneje določene, dokler ne najdemo prave ciljne funkcije [ABU95].

### 4.4 Sistem FORS

Sistem FORS (First Order Regression System) je nastal v okviru doktorske disertacije Arama Karaliča na Inštitutu Josef Stefan v Ljubljani [KARALIČ95]. To je sistem za regresijsko analizo, s katero modeliramo soodvisnost neodvisnih spremenljivk.

Pojem 'regresija' je najbolj poznan iz modeliranja funkcijske soodvisnosti dveh spremenljivk. Iskana funkcijska odvisnost je tu lahko linearna, kvadratična ipd. Vendar pa pojem regresije lahko razširimo na iskanje najprimernejšega modela izmed poljubne množice modelov-kandidatov. Sistem FORS išče model, ki je opredeljen z Prologovim programom, regresira pa različne programe s ciljem poiskati najprimernejšega [KOMEL97].

### 4.5 Modeliranje operaterjevih posegov v proces

Pomemben pristop učenja, je učenje veščine vodenja, ki jo uporablja izučeni operater pri mnogih realnih sistemih. Operaterjeva veščina vodenja zadošča performančnim zahtevam krmiljenja in je zato dovolj bogat vir znanja o vodenju sistema. Vendar do problemov pride

---

<sup>1</sup>Če bi bil proces popolnoma determinističen, bi ga v celoti lahko popisali že s takšnimi pravili.

<sup>2</sup>*angl.* learning by being told

<sup>3</sup>*angl.* learning by discovery

<sup>4</sup>*angl.* learning by examples

pri zajemanju operaterjeve veščine, saj je le ta razpoložljiva v nesimbolični in nenumerični obliki, mnogokrat je tudi izven operaterjeve zavesti. V takih primerih uporabimo metodo modeliranja operaterjeve veščine [KOMEL97].

Metoda modeliranja operaterjeve veščine je metoda učenja zakonitosti vodenja sistema, ki se uči na osnovi operaterjevega zgleда. Operater vodi proces, pri tem so snemana vsa stanja procesa in akcije operaterja. Z metodami strojnega učenja nato generiramo simbolični opis pravila vodenja. Dobljen simbolični opis lahko generiramo z različnimi orodji za avtomatsko učenje. V naši raziskavi smo uporabili orodje FORS [KARALIČ95].

## 5. Adaptivni krmilnik razvit na Fakulteti za strojništvo

### 5.1 Uvod

V zadnjih letih se na trgu pojavljajo elektroerozijske naprave, ki imajo že prigraden adaptivni krmilnik. Včasih temu ni bilo tako. Operater je imel dve možnosti: (1) stalno nadzorovati proces in spreminjati vhodne parametre v smislu stabilnosti procesa oziroma karakteristik procesa (produktivnost, hrapavost, itd.), (2) nastaviti delovanje stroja globoko v varnem področju. Na račun slabše produktivnosti nadzor ni stalno potreben.

Za doseganje kvalitetne površine mora operater stalno nadzorovati in voditi proces. V našem primeru smo elektroerozijski napravi prigradili adaptivni krmilnik. Ker je v razvojni fazi, se algoritem vodenja skriva v programski opremi in ga zelo enostavno lahko prilagajamo našim željam. Strojna oprema in zasnova programske opreme krmilnika je nastala v okviru magistrskega dela Komel Igorja [KOMEL97]. V svojem delu je krepko nakazal smernice za nadaljnje raziskave na področju (nad)gradnje sistema za vodenje procesa elektroerozije. Ker je v njegovem delu podrobno opisan celotni adaptivni sistem, bomo navedli le pomembnejše gradnike sistema skupaj z nekaj spremembami.

### 5.2 Naprava za elektroerozijsko grezenje *INGERSOLL 80P*

Elektroerozijska naprava /Slika 5.1/ omogoča nastavljanje načina dela z nastavitvenimi parametri in ročno krmiljenje procesa s krmilnimi parametri.

**Nastavitveni parametri** so:

- imenska vrednost toka ( $i_e$ )
- imenska vrednost napetosti ( $u_i$ )
- čas impulza ( $t_i$ )
- polariteta
- (vrsta dielektrika, material in oblika elektrode, material obdelovanca)

**Krmilni parametri** so:

- čas pavze ( $t_o$ )
- referenčna napetost ( $U_{ref}$ ); z njo krmilimo razdalijo v reži
- časovna konstanta servo sistema (hitrost odziva) ( $K$ )
- pretok (tlak) dielektrika
- (intervalni dvig elektrode)

Glavna novost je uvedba novega generatorja impulzov, ki je bil razvit v podjetju Virtek d.o.o. iz Nove Gorice. Prednost generatorja je, da omogoča poljubno spreminjanje trajanja impulza in pavze med obdelavo. S tem je možno spreminjati trajanje impulzov med procesom, kar prejšnji generator ni dopuščal. Prejšnji generator je dopuščal le spreminjanje obremenilnega količnika, t.j. razmerja med obema časoma. Izkazalo se je, da je pri fini obdelavi, kjer imamo kratke čase trajanja impulza, proces bolj stabilen.

#### 5.2.1 Sklop za regulacijo velikosti reže

Sklop je klasični primer krmiljenja položaja s povratno zvezo. Močnostni signal z ojačevalca poganja servo motor. Vhod v ojačevalca je signal odstopka med dejansko povprečno napetostjo na elektrodah in referenčno napetostjo, ki jo z potenciometrom

določamo ročno. Krmiljena veličina je dejanska povprečna napetost na elektrodah, vendar je s položajem elektrode v tesni linearni zvezi.

igor3-2.af3

Slika 5.1: Shematski prikaz glavnih funkcijskih sklopov elektroerozijskega stroja INGERSOLL 80P glede na nastavitvene in krmilne parametre [KOMEL97].

### 5.2.2 Impulzni generator

Impulzni generator je digitalno vezje v obliki kartice za PC računalnik. Generira pravokotne impulze, katerim trajanje impulza in pavze med njimi, nastavljamo preko programske opreme (procedure so napisane v programskem jeziku Pascal). Prednost novega generatorja je v stabilnejši obliki impulzov (tudi izredno kratkih) kar se odraža na stabilnejšem procesu, še posebej pri fini obdelavi. Poleg tega lahko operater med procesom spreminja trajanje impulza, kar prejšnji generator ni dopuščal. Tako lahko poteka glajenje<sup>1</sup> kontinuirano, brez prekinitve procesa.

---

<sup>1</sup>Glajenje pomeni spreminjanje načina dela od grobe obdelave proti fini. S tem v končni fazi dosežemo gladko površino brez bele plasti.

Dobljeni signal krmili močnostno stopnjo. Pri tem se časovni parametri ohranjajo.

### 5.2.3 Močnostna stopnja

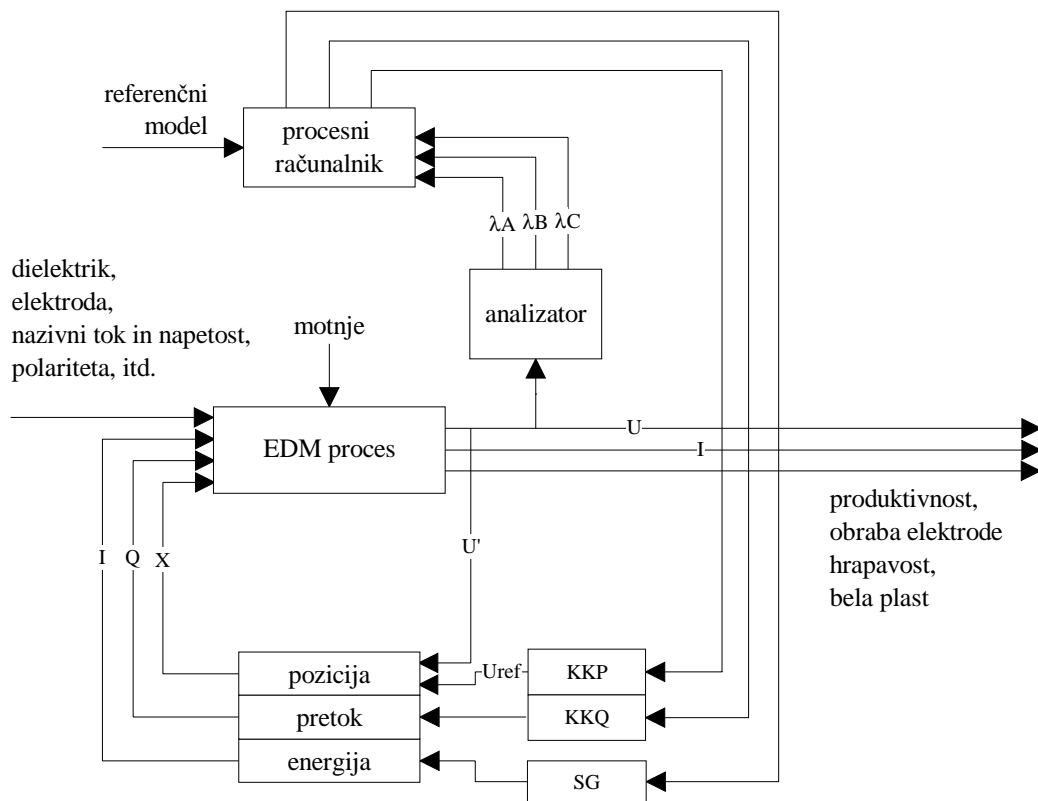
Ta sklop zagotavlja obdelovalno energijo. Močan usmernik zagotavlja enosmerni tok z možnostjo nastavljanja tokovne omejitve ( $i_e$ ) in proste napetosti ( $u_i$ ). Ta vir električnega toka je krmiljen z signalom impulznega generatorja prek kaskade tranzistorjev. Sklop vključuje še prekretno stikalo za spreminjanje polaritete na elektrodah.

### 5.2.4 Sklop za regulacijo onesnaženosti reže

Črpalka zagotavlja pretok dielektrika v reži. Z ventilom lahko učinek izpiranja spreminjamo in tako reguliramo optimalne pogoje v reži. Regulacija se podreja zelo različnim okoliščinam izpiranja. Te so največkrat vezane na oblikovne zahteve in na zahteve po površinski hrapavosti obdelovanca.

## 5.3 Adaptivni krmilnik

Sledeča slika /Slika 5.2/ prikazuje blokovni diagram adaptivnega krmilnika. Imamo elektroerozijski proces, v katerega vstopajo vhodni parametri, kot so dielektrik, elektroda (material, oblika), električni tok, napetost, itd. (pog. 2.6) in izstopajo procesni in izhodni parametri, kot so električni tok, napetost, obraba elektrode, itd. (pog. 2.7 in 2.8). Identifikacija procesa poteka le na izhodni strani preko tokovnega in napetostnega signala.



Slika 5.2: Blokovni diagram adaptivnega krmilnika

V procesni računalnik vstopa povprečna vrednost toka in deleži prostih, delovnih in obločnih razelektritev, ki so definirani v analizatorju. Referenčni model je implicitno definiran iz  $if$ -

then pravili v adaptacijskem algoritmu. Procesni računalnik posreduje akcije glede na velikost reže in pretoka, dolžino impulza in pavze med impulzi ter glede na deleže posameznih razelektritev. Akcije se prenesejo na krmilnik koračnih motorjev za krmiljenje reže (KKP) in pretoka (KKQ) ter na generator impulzov (SG). Pozicijski, pretočni in energijski del določajo položaj elektrode napram obdelovancu, pretok dielektrika ter trajanje impulza in pavze med njimi. Posebnost je določanje položaja elektrode. V pozicijski del (servo sistem) vstopa povprečna napetost v reži ( $U'$ ) in referenčna napetost ( $U_{ref}$ ), ki jo določa procesni računalnik z adaptacijskim algoritmom. Servo sistem z razdalijo v reži zagotavlja, da je povprečna napetost enaka referenčni ( $U'=U_{ref}$ ). V proces vstopajo tudi motnje, predvsem v smislu onesnaženja reže, kar vpliva na upornost v reži in potek razelektritve.

Adaptivni krmilnik lahko obravnavamo tudi s tehnološkega stališča /Slika 5.3/.

### 5.3.1 Identifikacija procesa

Identifikacija poteka na podlagi napetostnega signala v reži /Slika 5.4/. Z zasledovanjem časa zakasnitve vžiga na napetostnem signalu, se razelektritve klasificira v štiri skupine:

- prosti impulzi — A
- delovne razelektritve — B
- obločne razelektritve — C
- kratkostične razelektritve — D

#### *I Elektroerozijski procesni analizator*

Elektroerozijski procesni analizator je elektronska logična analogna naprava, ki na podlagi časa zakasnitve vžiga razločuje navedene štiri tipe razelektritev. Na osnovi klasificiranih napetostnih impulzov analizator tvori relativne frekvence pojavljanja posameznega tipa razelektritev ( $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$ ,  $\lambda_C$ ,  $\lambda_D$ ) znotraj vzorca 100 oz. 1000 zaporednih impulzov in jih kot eno številske atribute procesne performance prikaže na prikazni enoti.

#### *II Modifikacijski elementi*

Identifikacija elektroerozijskega procesa poteka preko štirih procesnih parametrov: pogostost prostih impulzov ter delovnih in obločnih razelektritev. Kratkostičnih ne zajemamo, saj velja:  $\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D = 1$

Zajem deležev posameznih tipov impulzov je izveden z elementi za optično ločitev med napetostnim nivojem računalnika in obdelovalnim napetostnim nivojem stroja.

Ker tako pridobljeni napetostni signal še vedno vsebuje visokofrekvenčna nihanja je potrebno signal filtrirati. Mejne frekvence nizkopasovnih filtrov sovpadajo z mejno frekvenco prikazovalnih enot (1 Hz za ampermeter s kazalcem).

#### *III A/D pretvornik*

Tako obdelan signal nato vzorčimo z A/D pretvornikom. To je komponenta, ki analogen signal v prvi fazi pretvori v sekvenco diskretnih vrednosti, nato pa še v binarno kodo. Omenjeni dve fazi je mogoče razpoznati tudi v samem delovanju A/D pretvornika. Vzorčenje analognega signala na diskretne vrednosti je programsko krmiljeno v zelenem ritmu, medtem ko se kodiranje posamezne diskretne vrednosti v binarno kodo izvede samodejno. Generiranje binarne kode iz napetostnega nivoja, ki ga želimo vzorčiti poteka kot zaporedno primerjanje testnih napetostnih nivojev A/D pretvornika in analognega napetostnega nivoja od najpomembnejšega bita proti manj pomembnim.

Uporabljen je bil 12 bitni A/D pretvornik, kar pomeni diskretizacijo merilnega območja 9V v 4095 enako velikih enot. Od 16 razpoložljivih kanalov so bili uporabljeni trije za prej omenjene tri procesne parametre.

igor 3-10.af3

Slika 5.3: Shema adaptivnega krmilnika [KOMEL97]

Slika 5.4: Identifikacija elektroerozijskega procesa [KOMEL97].

#### IV Računalnik

V merilni verigi je bil uporabljen osebni računalnik PC 386, 40MHz, opremljen z omenjeno A/D kartico in impulznim generatorjem. Za krmiljenje reže in pretoka dielektrika so bila uporabljena paralelna I/O vrata.

$$En. 9: \quad Stanje(t_n) = \begin{bmatrix} U_{ref} & Q & t_i & t_o \\ avg(A(t_n), 3s) & avg(A(t_n), 20s) & std(A(t_n), 3s) & std(A(t_n), 20s) \\ avg(B(t_n), 3s) & avg(B(t_n), 20s) & std(B(t_n), 3s) & std(B(t_n), 20s) \\ avg(C(t_n), 3s) & avg(C(t_n), 20s) & std(C(t_n), 3s) & std(C(t_n), 20s) \end{bmatrix}$$

$$avg(X(t_n), \Delta t) = \frac{1}{\Delta t \cdot f} \cdot \sum_{i=n-(\Delta t \cdot f)}^n X(t_i)$$

$$std(X(t_n), \Delta t) = \sqrt{\frac{1}{\Delta t \cdot f} \cdot \sum_{i=n-(\Delta t \cdot f)}^n [X(t_i) - avg(X(t_n), \Delta t)]^2}$$

- f ... frekvenca vzorčenja [ $s^{-1}$ ]
- X ... identifikacijska veličina
- $U_{ref}$  .. referenčna napetost za servo sistem
- Q ... pretok dielektrika
- $t_i$  ... čas impulza
- $t_o$  ... čas pavze

Iz dobljenih podatkov računalnik sproti izračunava srednje vrednosti in povprečni absolutni odstopek deležev posameznih razelektritev od povprečne vrednosti<sup>1</sup> na časovnem intervalu 0,8 s in 9,8 s. Izbira časovnega intervala je prilagojena človeškemu reakcijskemu času in načinu opazovanja procesa obdelave.

Stanje sistema v nekem trenutku /En. 9/ je tako popisano s temi šestnajstimi atributi - štirimi statistikami vsake od treh identifikacijskih veličin, ter štirimi atributi, ki nosijo informacijo o razdalji v reži, pretoku, času impulza in pavze. Slednji štirje parametri se spreminjajo le ob posegu operaterja oz. krmilnika v proces.

Za elektroerozijski proces so značilni hitri dogodki v smislu razelektritev (nivo mikro sekund) in precej počasen potek obdelave (več ur). V tem smislu z omenjenim identifikacijskim sistemom zadostimo zahtevam, saj analizator analizira dogodke na nivoju mikro sekund, računalnik pa identificira proces vsako desetinko sekunde.

### 5.3.2 Krmiljenje procesa

Poleg identifikacije in odločanja je krmiljenje stroja osnovna funkcija vsakega adaptivnega krmiljenja. Odločitev sprejeta v odločitvenem delu algoritma se v krmilnem delu algoritma prenese na izhodna vrata računalnika. Krmilimo sledeče vhodne parametre: referenčno napetost servo sistema, pretok dielektrika skozi režo, čas impulza in čas pavze. V ta namen imamo na razpolago akcije povečanja in zmanjšanja vsakega od sledečih parametrov:

- velikost reže
- izpiranje reže
- čas impulza
- čas pavze

Komunikacija operaterja z krmilnikom poteka preko tipkovnice in monitorja, nastavitve načina pa gre preko stikal na močnostnem delu /Slika 5.5, Slika 5.6/.

### 5.3.3 Referenčni model

Omejitev pri obliki referenčnega modela so določene z lastnostmi in sposobnostmi krmilnika in ostalih delov elektroerozijske naprave. Tako je bila že v osnovi izključena uporaba široke palete znanja o procesu, ki smo ga navedli v uvodnem poglavju z naslovom *Elektroerozijski proces (EDM) (pog. 2)*.

Z obstoječim sistemom smo omejeni na identifikacijo procesa le preko povprečnega deleža treh vrst razelektritev čez 1000 impulzov. Te deleže lahko zajema računalnik le na vsake 0,2 sekunde. Zato smo se odločili za identifikacijo procesa preko deležev razelektritev zadnjih štirih zajemov računalnika in zadnjih 48 zajemov računalnika /En. 9/, kar ustreza 0,8 oz. 9,6 sekunde. Prejšnja verzija krmilnika, katero je razvil Komel, je zajemala deleže vsake 0,25 sekunde in računala statistične vrednosti zadnje 3 in zadnjih 20 sekund. Nove nastavitve so se izkazale za uspešnejše, saj krmilnik hitreje reagira na spremembe procesa. Oscilacije krmilnika zmanjšamo s primernimi nastavitvami referenčnega modela.

Ker imamo na voljo veliko vhodnih parametrov v krmilnik (pog. 5.3.1), na osnovi katerih se nastavlja vhodne parametre v proces, smo se za ugotavljanje povezav med njimi, odločili za uporabo ene izmed metod umetne inteligence, to je strojnega učenja. Uporabili smo sistem FORS, opisan v poglavju 4.4.

---

<sup>1</sup>Definiran je podobno kot standardna deviacija, le da gre pri deviaciji za vsoto kvadratov odstopka, tukaj pa za vsoto absolutnih vrednosti odstopka.

Slika 5.5: Fotografija celotne naprave skupaj s krmilnikom

Slika 5.6: Zaslona procesnega računalnika

## ***I Izvedba modeliranja operaterjevih posegov v proces s pomočjo sistema FORS***

Za izvedbo modeliranja operaterjeve veščine je bil zgrajen sistem, ki je ob vsakem operaterjevem posegu v proces, poleg posega (enega od štirih krmilnih parametrov) beležil tudi stanje procesa /En. 9/. Operater je zagotavljal stabilnost procesa samo s spreminjanjem razdalje in pretoka v reži, čeprav sistem omogoča tudi spreminjanje trajanje impulza in pavze med impulzi. Razlog je v tem, da je operater poznal princip vodenja procesa s starim generatorjem, ki je imel med obdelavo možnost spreminjanja obremenilnega količnika, na novem generatorju pa se posebej spreminja čas pulza in čas pavze kar pa operater še ni obvladal. Tako sta čas trajanja impulza in čas pavze nastavljena pred začetkom obdelave in se med obdelavo ne spreminjata.

Po eno urni obdelavi je nastala velika baza podatkov, iz katere je bilo potrebno izluščiti pravila vodenja procesa. Pri tem smo si pomagali s sistemom FORS, ki je podal statistična pravila vodenja:

če  $avgC48 > 12.7$ , potem je verjetnost da operater poveča režo = 0.7  
če  $avgC48 > 12.7$  in  $avgB4 < 55.5$ , potem je verjetnost zmanjšanja reže = 0.2  
če  $avgC48 > 12.7$  in  $avgB4 < 55.5$ , potem je verjetnost zmanjšanja reže = 0.5  
.  
.  
.

Tako generirana pravila smo prevedli v algoritem, napisan v programu Turbo Pascal 5.5, v katerem je napisan tudi glavni program, ki obsega identifikacijo procesa, upravljanje z generatorjem impulzov ter krmiljenje razdalje in pretoka v reži. Program vsake 0,2 sekunde vzorči vrednosti deležev posameznih razelektritev in računa njihove statistične vrednosti v zadnje 0,8 sekunde in 9,6 sekunde. Tako imamo vzorce s 4 oz. 48 elementi.

Algoritem vodenja procesa implicitno definira referenčni model in je sestavljen iz treh delov. V prvem in drugem delu se nabirajo verjetnosti za posamezne akcije (razdalje in pretok v reži), v tretjem delu algoritma pa se izvršijo akcije, katerih števec je dosegel vrednost večjo od 1 ali manjšo od -1 /Slika 5.7/.

Kot vidimo, je se prvi in drugi del strogo ločita na "nabiranje" verjetnosti za spremembo razdalje v reži in verjetnosti za spremembo pretoka v reži. Za pretok je značilno, da se med procesom lahko samo povečuje, kar je pri zunanjem izpiranju reže<sup>1</sup> razumljivo. Z vedno večjim pogrezanjem elektrode v obdelovanec, se pogoji izpiranja vedno bolj slabšajo, zato tudi operater med obdelavo pretoka ni zmanjševal temveč ga je v določenih situacijah samo povečeval. Algoritem je torej temu primeren.

Ko je operater opisoval svoj način vodenja procesa, ni znal povedati, kdaj se odloči, za povečanje pretoka [KOMEL97]. Z modeliranjem njegovih posegov v proces s sistemom FORS, se je izkazalo, da je glavni dejavnik, ki ga upošteva za odločitev o povečanju pretoka, stabilnost procesa. S tem so se potrdile hipoteze, da se je mogoče z uporabo strojnega učenja dokopati do pravil, katera ostajajo skrita v t.i. mojstrskih znanjih.

### ***NIVO 1: Razdalja v reži***

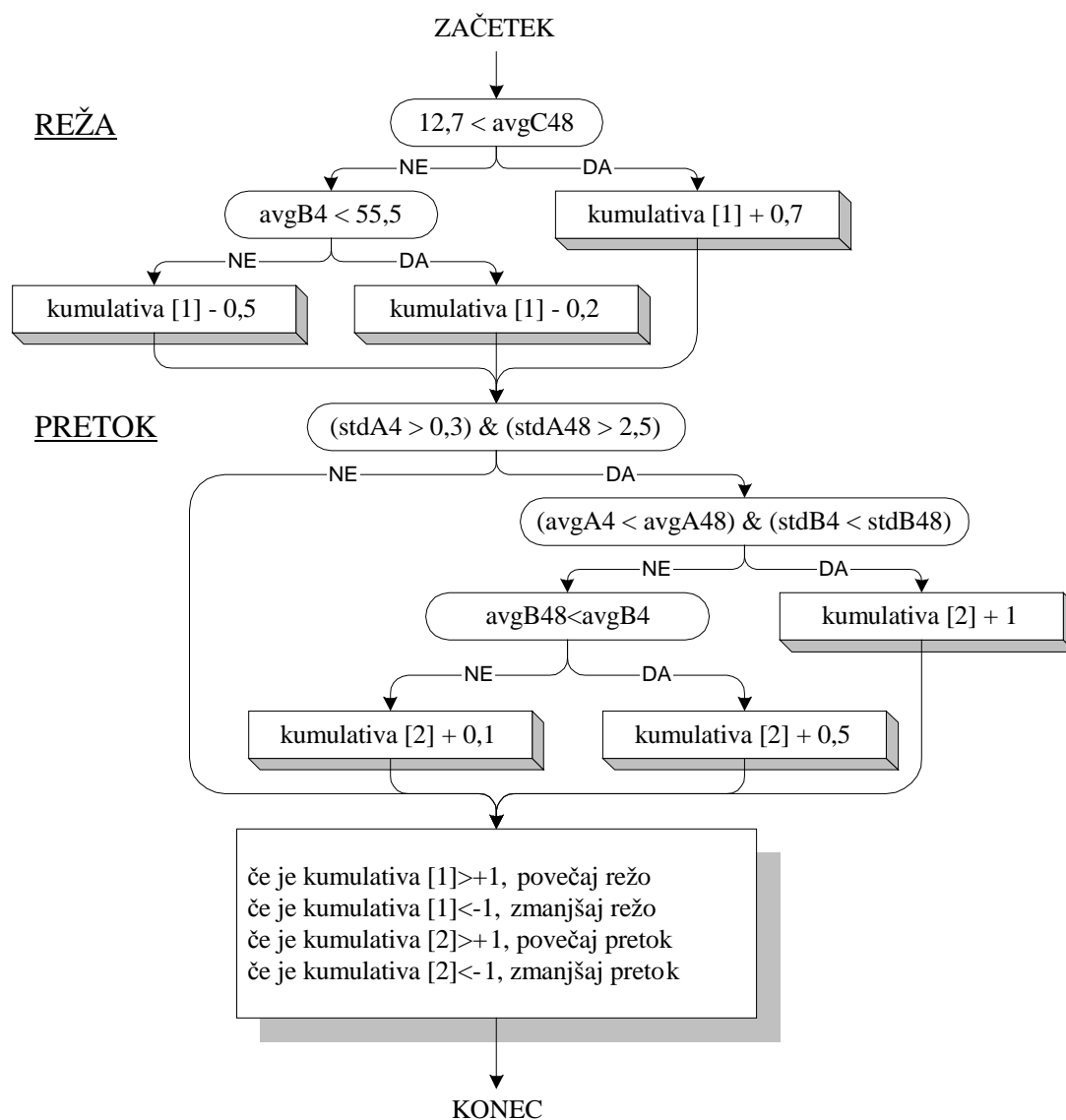
S krmiljenjem razdalje v reži dosežemo večji ali manjši delež obločnih razelektritev. Tako imamo najprej preverjanje povprečnega deleža obločnih razelektritev v zadnjih 9,6 sekundah ( $avgC48$ ). Če ta delež presega 12,7 %, se števec za spremembo razdalje v reži (kumulativa[1]) poveča za 0,7. Če temu ni tako, potem ob deležu delavnih razelektritev v zadnji 0,8 sekunde ( $avgB4$ ) manjšem oz. enakem 55,5 % se taisti števec (kumulativa[1]) poveča za 0,2. V

---

<sup>1</sup>V tem primeru se dielektrik dovaja z zunanji strani, kar je za proces manj ugodno, kot če dielektrik dovajamo skozi elektrodo. V slednjem primeru bi bila smiselna tudi možnost zmanjševanje pretoka.

primeru neizpoljenega zadnjega pogoja se števec zmanjša za 0,5. Zmanjševanje števca pomeni intenzifikacijo procesa.

Ko v drugi fazi kontroliramo delež delavnih razelektritev (B) v bistvu kontroliramo delež prostih impulzov (A), saj ob majhnem deležu obločnih razelektritev (C) in deležu delavnih razelektritev manjšem od neke vrednosti pomeni, da je več prostih razelektritev. Teoretično bi bilo lahko tudi več kratkostičnih, vendar na našem sistemu to ni bil primer.



Slika 5.7: Algoritem, ki ga je predlagal sistem FORS na osnovi operaterjevega vodenja procesa

### NIVO 2: Pretok dielektrika v reži

Sprememba (povečanje) pretoka dielektrika v reži je odvisna od stabilnosti procesa. Ko postaja proces manj stabilen, je potrebno povečati pretok. Informacijo o stabilnosti procesa nosi vsota absolutnih odstopkov deleža določene vrste razelektritve. Števec za pretok (kumulativa [2]) se torej poveča, če je absolutni odstopek deleža prostih razelektritev v zadnji 0,8 sekunde (stdA4) večji od 0,3 % in taisti delež v zadnji 9,8 sekunde (stdA48) večji od 2,5 %. Smiselnost uporabe obeh veličin je v tem, da krmilnik počasneje reagira na povečanje

nestabilnosti procesa in preneha povečevati števec takoj, ko se začne stabilnost večati. Če se delež prostih impulzov manjša (avgA) in delež delovnih impulzov postaja stabilnejši (stdB) potem se števec za pretok (kumulativa [2]) poveča za 0,1. V nasprotnem primeru se taisti števec poveča za 0,5 le, če se delež delovnih razelektritev (avgB) veča; če se ne, potem se števec poveča za 0,1.

### NIVO 3: Izvedba akcij

Če je vrednost katerega od števecov (kumulativa [1] in kumulativa [2]) večja oz. manjša od 1 oz -1, potem se izvede ustrezna akcija.

## **II Nadgradnja in modifikacija rezultatov pridobljenih z modeliranjem**

Preizkusi so pokazali določene slabosti tega algoritma (pog. 5.4), zato smo to strategijo delno modificirali in nadgradili s kontrolo pavze med posameznimi impulzi. Tako smo dobili pet nivojev. V prvih štirih se "nabirajo" verjetnosti za posamezne akcije, v petem pa se ob pogoju verjetnosti 1 ali več le-te tudi izvršijo /Slika 5.8/.

### NIVO 1: razdalja v reži

Potrebna je bila sprememba hitrosti reakcije na prevelik delež obločnih razelektritev. Tako se preverja povprečna vrednost obločnih razelektritev v zadnji 0,8 sekunde (avgC4) z vrednostjo 8,89 %, namesto v zadnji 9,6 sekunde z 12,7 %. Za intenzivno zmanjšanje števca (kumulativa [1]) smo postavili nov pogoj in sicer, da mora biti povprečni delež obločnih razelektritev (avgC4, avgC48) v zadnji 0,8 sekunde in 9,6 sekunde manjši od 2 % ter stabilnost delovnih razelektritev (stdB) se mora večati.

Z uvedbo krmiljenja pavze med impulzi (NIVO 3), se je zmanjšanje vrednosti zmanjševanja števca za razdalijo v reži izkazalo za potrebno. Obločne razelektritve namreč odpravljamo s povečanjem reže ali s povečanjem pavze med impulzi. Pri nespremenjenih inkrementih za zmanjševanje števca za režo, je krmilnik spravil proces v neefektivno področje, saj je režo zmanjševal proti minimumu, pavzo pa povečeval preko vseh mej. Povečanje inkrementov za pavzo je vodilo k prevelikim oscilacijam procesa; rešitev je torej bila zmanjšanje inkrementov za režo.

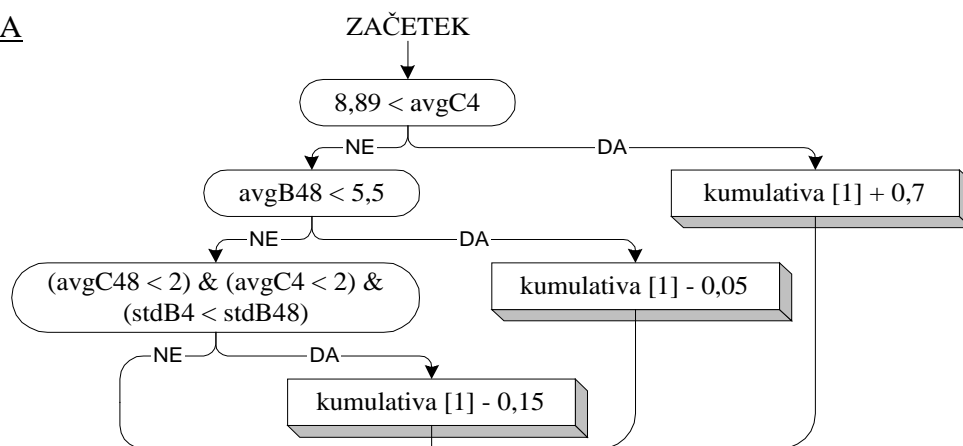
### NIVO 2: Pretok dielektrika v reži

Izkazalo se je, da potrebujemo povečanje pretoka pri manjši nestabilnosti procesa, zato smo postavili ostrejšo definicijo stabilnosti procesa oz. deleža prostih impulzov (0,3→0,21 in 2,5→1,75). Glede pretoka je to edina sprememba.

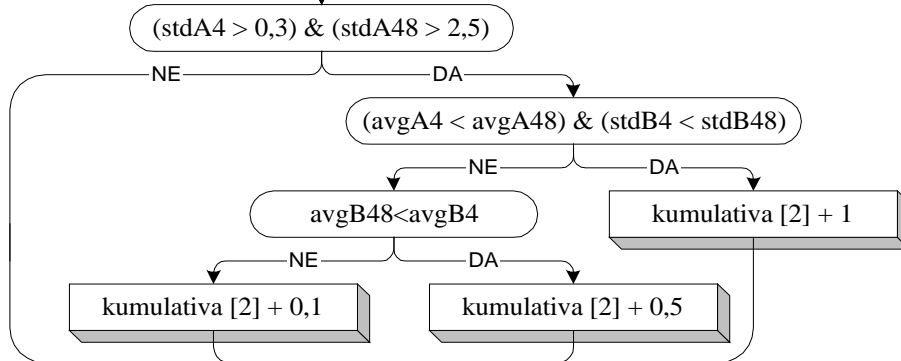
### NIVO 3: Pavza med impulzi

Pri tvorbi pravil za krmiljenje reže smo se nismo mogli opreti na umetno inteligenco ampak smo morali uporabiti lastno znanje. Izhajali smo iz predpostavke, da s spremembo reže grobo nastavljammo potek procesa, s pretokom pa skrbimo za stabilnost. Pavzo želimo imeti čim manjšo zaradi večje produktivnosti, ne sme pa biti premajhna, ker to vodi do nestabilnosti procesa, ki ga na večjih globinah obdelave in z zunanjim izpiranjem, s povečanjem pretoka in reže ne moremo stabilizirati. Tako smo pavzo med impulzi v večji meri uporabili za fino krmiljenje procesa, uporabljena pa je tudi za hitro vzpostavitev stabilnosti.

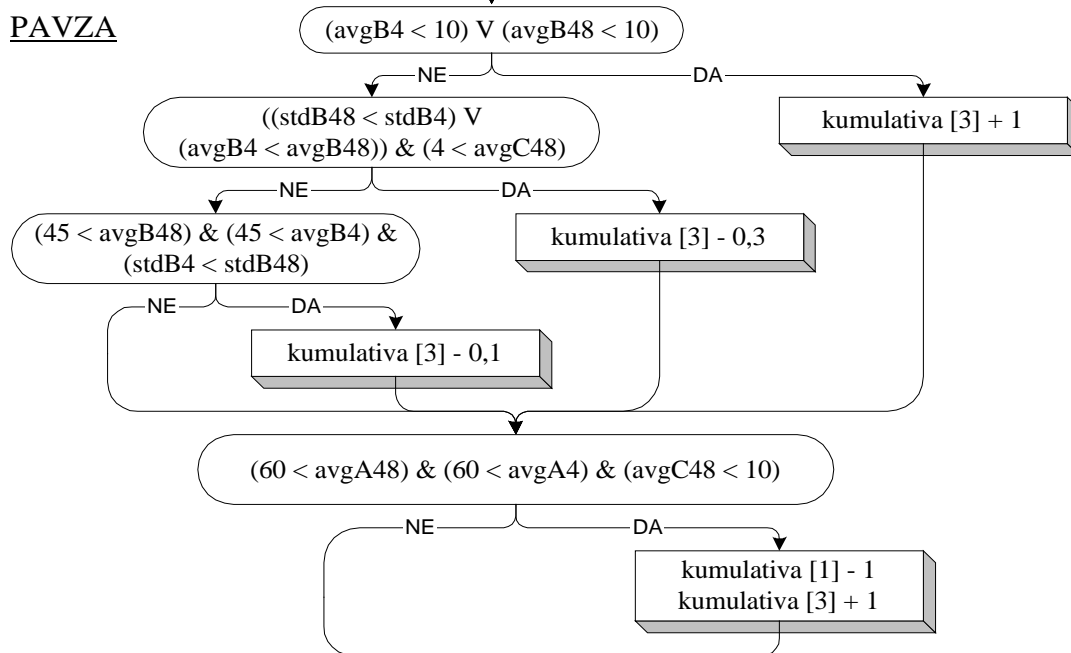
REŽA



PRETOK



PAVZA



če je kumulativa [1] > +1, povečaj režo  
če je kumulativa [1] < -1, zmanjšaj režo  
če je kumulativa [2] > +1, povečaj pretok  
če je kumulativa [2] < -1, zmanjšaj pretok  
če je kumulativa [3] > +1, povečaj pavzo  
če je kumulativa [4] < -1, zmanjšaj pavzo

KONEC

Slika 5.8: Nadgrajen in delno modificiran algoritem vodenja procesa

Izkazalo se je, da pomeni majhen delež delovnih razelektritev veliko nestabilnost procesa<sup>1</sup>, zato je takrat potrebno drastično povečati čas pavze. Ob izpolnjenem prvem pogoju na nivoju 3, se števec za pavzo (kumulativa [3]) poveča za 1. Znak *ali* pomeni takojšnjo reakcijo na majhen delež delovnih razelektritev (avgB4, avgB48) in vztrajnost v večanju števca tudi še nekaj časa po vzpostavitvi stabilnosti. Če temu pogoju ni izpolnjeno, potem se ob majhnem deležu obločnih razelektritev (avgC48) in hkrati povečani stabilnosti (stdB) ali zmanjšanem deležu (stdB) delovnih razelektritev števec poveča za 0,3. Če tudi to ni izpolnjeno, potem se števec zmanjša, vendar le če je povprečje delovnih razelektritev dovolj veliko (avgB4, avgB48) in njihov delež (stdB) bolj stabilen. Če ne, števec za pavzo ostane nespremenjen.

#### NIVO 4: Stabilnost za specifično stanje procesa

Izkazalo se je, da lahko nastopi situacija, katera zahteva specifične ukrepe. Tej situaciji bi se sicer morali s kvalitetnim krmiljenjem izogniti, vendar s to opremo to ni mogoče. Potrebovali bi namreč sistem za dvig elektrode po potrebi (*pog. 3.4.4*) oz. direktno kontrolo servo sistema, saj je izpiranje v večjih globinah tako slabo, da je dvig elektrode nujen. Tako smo uvedli posebno pravilo, s pomočjo katerega poizkušamo stabilizirati proces. Stabilnost dosežemo s takojšnjim povečanjem pavze med impulzi in zmanjšanjem reže.

#### NIVO 5: Izvedba akcij

Če je vrednost katerega od števcov (kumulativa [1] in kumulativa [2]) večja oz. manjša od 1 oz. -1, potem izvede ustrezno akcijo.

## 5.4 Preizkusi

Opravili smo tri vrste preizkusov. Najprej je proces trikrat vodil operater (preizkusi *O1*, *O2* in *O3*), nato smo testirali FORS-ov algoritem tudi s tremi preizkusi (preizkusi *F1*, *F2* in *F3*). Ker rezultati niso bili zadovoljivi, smo algoritem modificirali in z njim izvedli pet preizkusov (preizkusi *M1*, *M2*, *M3*, *M4* in *M5*).

Podatki o preizkusnih pogojih so podani v sledečih tabelah /*Tabela 5.1*, *Tabela 5.2*/. Vse preizkuse smo izvedli na istem stroju in v istem dielektriku. Obdelovanci in elektrode so bile iz istega materiala in enako pripravljene. Prav tako so bili začetni pogoji (referenčna napetost, ki določa velikost reže in pretok dielektrika) za vse preizkuse enaki.

Izpiranje reže je zunanje iz treh smeri /*Slika 5.9*/. Na omenjeni sliki je lepo viden celotni delovni prostor elektroerozijske naprave.

Na podlagi preizkusov smo ocenili kvaliteto krmilnika. Rezultate smo primerjali z rezultati, ki jih je z vodenjem procesa dosegel **operater**, ki je trikrat vodil proces: v smislu čimvečje produktivnosti, čimmanjše obrabe in s periodičnim odmikanjem elektrode.

Testirali smo algoritem, ki je nastal z modeliranjem operaterjevih posegov v proces z metodo **FORS**. Naredili smo tri preizkuse, dvakrat pri izredno grobih nastavitvah obdelave z različnimi smermi izpiranja in en preizkus z enakimi nastavitvami, kot jih je uporabljal operater.

---

<sup>1</sup>Algoritem krmilnika veliko vpliva na posamezna stanja procesa. Za naš krmilnik se je izkazalo, da se majhen delež delovnih razelektritev pojavlja le takrat, ko delaža prostih impulzov in obločnih razelektritev izmenično nihata od nič do maksimalne vrednosti. To je mogoče zato, ker dejansko krmilimo razdalijo v reži posredno preko referenčne napetosti v reži. Tako se razdalija spreminja tudi, če je referenčna napetost nespremenjena. Pri prevelikem deležu obločnih razelektritev se začne pojavljati obžiganje (razelektritve na enem mestu) kar povzroči padec napetosti v reži, zato se reža samodejno poveča toliko, da se pojavljajo samo proste razelektritve. S tem se napetost poveča in reža zmanjša. Zaradi poškodbe površine se zopet pojavljajo obločne razelektritve in obžiganje. Potrebna je večja pavza med posameznimi impulzi.

Tabela 5.1: Preizkusni pogoji za vse preizkuse  
(O1, O2, O3, F1, F2, F3, M1, M2, M3, M4 in M5)

	material	geometrija
elektroda	elektrolitski baker	valj $\phi 20$ mm, ravno čelo
obdelovanec	orodno jeklo OCR 12	brušena ravna površina
stroj	INGERSOLL 80P	
dielektrik	EROZOL 20	
pretok [l/min]	1,02	
začetna reža [potenciometer: 0 do 10]	7	

Tabela 5.2: Nastavitveni parametri pri preizkusih

oznaka preizku.	imenski tok ( $i_e$ ) [A]	imenska napetost ( $u_i$ ) [V]	dolžina impulza ( $t_i$ ) [ $\mu m$ ]	dolžina pavze ( $t_o$ ) [ $\mu m$ ]
O1	13	140	450	50
O2	13	140	450	50
O3	6	140	300	60
F1	60	120	500	50
F2	60	120	500	50
F3	13	140	450	50
M1	13	120	450	-
M2	13	140	450	-
M3	60	120	800	-
M4 <sup>1</sup>	19	120	600	-
M5	6	140	300	-

Slika 5.9: Fotografija preizkuševališča

<sup>1</sup> Pri tem preizkusu smo spreminjali način dela; manjšali imensko napetost in dolžino impulza

Preizkusi so pokazali potrebo po modifikaciji FORS-ovega algoritma. Delno smo ga modificirali in dodali krmilne ukaze za spreminjanje pavze med impulzi. Po večkratnih preizkusih (ki jih v tem delu ne navajamo) smo prišli do **modificiranega** algoritma. Testirali smo ga s petimi različnimi nastavitvenimi parametri, med njimi tudi s periodičnim dvigovanjem elektrode.

#### 5.4.1 Elektroerozijski proces, ki ga vodi operater

Operater je vodil proces trikrat. Prvič, da bi dosegel čimvečjo produktivnost, drugič, da bi dosegel čimmanjšo obrabo in tretjič, z uporabo periodičnega odmikanja elektrode. V teh primerih je bila dolžina pavze med impulzi nastavitveni parameter, ker je operater med procesom ni spreminjal in je ostala enaka čez cel proces obdelave /Tabela 5.2/. Doseženi rezultati bodo referenca za uspešnost krmilnika.

Obakrat pri enakih nastavitvenih parametrih. Tretjič je nastavil proces na obdelavo s periodičnim odmikanjem elektrode.

##### Preizkus O1:

Operater je vodil proces tako, da bi dosegel čimvečjo produktivnost, ne glede na obrabo elektrode ali kvaliteto površine. Dopuščal od 10 % do 15 % obločnih razelektritev ob minimalnem deležu prostih impulzov. Proces je bil ves čas na meji stabilnosti /Tabela 5.3/.

Tabela 5.3: Rezultati obdelave: operater, preizkus O1

	obdelovanec	elektroda
končna globina [mm]	3	
čas obdelave [min]	28,5	
odvzeti material [g]	7,4520	-0,0011 <sup>1</sup>
V <sub>w</sub> oz. V <sub>e</sub> [g/min]	0,261	0

##### Preizkus O2:

Operater je vodil proces tako, da bi dosegel čimmanjšo obrabo. Delež obločnih razelektritev je bil najmanjši možen ob minimalnem deležu prostih razelektritev. Proces je bil globoko v varnem področju /Tabela 5.4/.

<sup>1</sup>Masa elektrode je bila po obdelavi večja kot pred obdelavo. Sklepamo, da se je nekaj delcev pri izmenjavi materiala v reži sprijelo na elektrodo. Rečemo lahko, da obrabe elektrode ni.

Tabela 5.4: Rezultati obdelave: operater, preizkus O2

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	3	
čas obdelave [min]	30,83	
odvzeti material [g]	7,4223	0,0089
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,241	0,0003

Preizkus O3:

V primeru slabših pogojev izpiranja se običajno uporablja periodično odmikanje elektrode (pog. 2.9.1). Tako se izognemo pojavu obžiganja. Izvedena je bila obdelava te vrste, ki je trajala približno 40 minut brez operaterjevega posredovanja, kar je v praksi tudi običajno. Služila nam bo za primerjavo rezultatov dobljenih z uporabo krmilnika /Tabela 5.5/.

Tabela 5.5: Rezultati obdelave: operater, preizkus O3

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	0,1	
čas obdelave [min]	42,16	
odvzeti material [g]	0,3245	0,0034
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,007	0,00008

**5.4.2 Elektroerozijski proces voden s FORS-ovim algoritmom**

Preizkušali smo algoritem, ki je nastal na podlagi modeliranja operaterjevih posegov v proces. Izvedli smo tri preizkuse pri različnih nastavitvenih parametrih /Tabela 5.2/. Tudi v tem primeru je bil čas pavze med posameznimi impulzi nastavitveni parameter, saj ga algoritem med procesom ni spreminjal.

Preizkus F1:

Najprej smo preizkušali z izredno grobo obdelavo. Pri taki obdelavi je stabilnost procesa lahko doseči, kar pa krmilniku ni uspelo /Tabela 5.6/.

Pri vseh preizkusih s FORS-ovim algoritmom se je pokazala ista slabost. Krmilnik po tem algoritmu vodi proces pregloboko v rizičnem področju, zato proces stalno niha. Ko je proces stabilen, krmilnik v smislu večje produktivnosti zmanjšuje režo. Začnejo se pojavljati obločne razelektritve, na katere pa krmilnik počasi reagira (zaradi pogoja  $12,7 < \text{avgC48}$ ). Ko poveča režo, se vzpostavi stabilno stanje, nakar se ponovno prične intenzifikacija. Tako proces stalno niha med prostimi impulzi in obločnimi razelektritvami. Na določeni globini je reža preveč zapolnjena z delci obdelovanca, pojavi se obžiganje, ki traja dokler se proces ne prekine /Slika 5.10/.

Tabela 5.6: Rezultati obdelave: FORS, preizkus F1

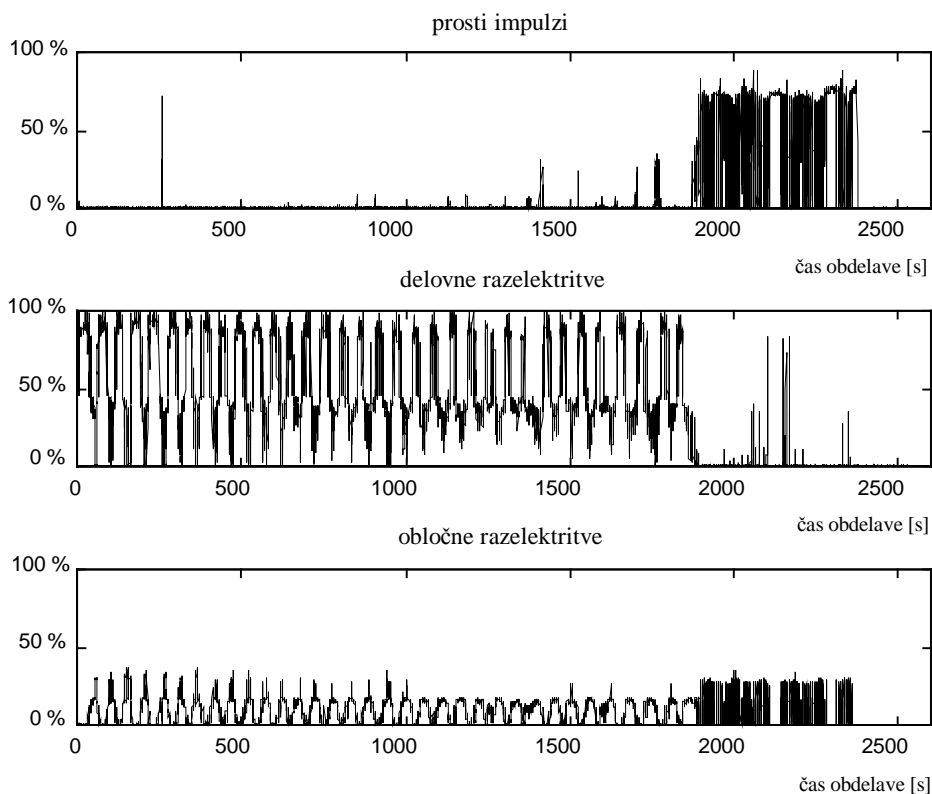
	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	5,5	
čas obdelave [min]	28,7	
odvzeti material [g]	13,5871	0,0536
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,473	0,0023

Tabela 5.7: Rezultati obdelave: FORS, preizkus F2

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	5,5	
čas obdelave [min]	23,0	
odvzeti material [g]	14,4701	0,0536
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,629	0,0024

Preizkus F2:

Ponovili smo preizkus s spremenjeno smerjo izpiranja reže z namenom, da se dielektrik ne bo zadrževal na sredini reže. Prej je bilo namreč izpiranje iz vseh smeri, sedaj pa smo vse šobe namestili na eno stran reže. Pričakovali bi, da bo sedaj dielektrik prosto iztekal na drugi strani reže in obžiganje se ne bo pojavilo na sredini. To se je tudi zgodilo, vendar se je obžiganje pojavilo na prosti strani. Rezultat je bil še slabši /Tabela 5.7/.



Slika 5.10: Potek prostih, delovnih in obločnih razelektritev pri krmiljenju procesa s FORS-ovim algoritmom v preizkusu F3

Tabela 5.8: Rezultati obdelave: FORS, preizkus F3

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	3	
čas obdelave [min]	42,22	
odvzeti material [g]	6,4021	0,032
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,152	0,0008

### Preizkus F3:

Ker se algoritem ni zadovoljivo izkazal pri izredno grobi obdelavi, ni bilo mogoče pričakovati dobrega rezultata pri manj grobi obdelavi. Zaradi primerjave z ostalimi rezultati, je bil tak preizkus vseeno izveden. Nastavljen je bil način dela, kot ga je uporabljal operater v prvem in drugem preizkusu. Algoritem se je tudi v tem primeru izkazal za neuspešnega /Tabela 5.8/.

### **5.4.3 Elektroerozijski proces voden z modificiranim algoritmom**

Kot smo že omenili, smo prejšnji algoritem modificirali in mu dodali možnost spreminjanja pavze med posameznimi impulzi. Modifikacije niso uspele takoj v prvem poizkusu. Vmesnih rezultatov nima smisla navajati, zato pogledjmo rezultate končnega algoritma.

Izvedeno je bilo pet preizkusov pri različnih nastavitvenih parametrih /Tabela 5.2/. Algoritem je bil sposoben spreminjati pavzo med impulzi, torej pavza ni bila več nastavitveni parameter.

### Preizkus M1:

Nastavitveni parametri so bili nastavljeni tako, kot jih operater običajno nastavlja za grobo obdelavo. Proces je lepo tekel do globine dveh milimetrov, nato pa je postal nestabilen. Krmilnik je stalno korigiral proces in ga tudi uspešno vodil (z minimalnim obžiganjem). Produktivnost od dveh milimetrov dalje ni zadovoljiva /Tabela 5.9/.

Tabela 5.9: Rezultati obdelave: končni algoritem, preizkus M1

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	4,5	
čas obdelave [min]	184,17	
odvzeti material [g]	10,6364	0,0081
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,057	0,00004

### Preizkus M2:

Poizkus smo izvedli z namenom primerjave uspešnosti operaterja in modificiranega algoritma. Nastavitveni parametri so enaki, kot so bili pri operaterjevem prvem in drugem preizkusu. Proces je tekel tako, kot v prvem preizkusu (M1). Na globini dveh milimetrov se poslabšajo razmere izpiranja reže. To se zgodi po 700 sekundah obdelave /Slika 5.11/. Krmilnik zagotavlja delež obločnih razelektritev v dovoljenih mejah, nastopi pa nihanje procesa med delovnimi in obločnimi razelektritvami, kar je odraz pojava obžiganja. Od tukaj dalje produktivnost ni več zadovoljiva. Na obdelovancu je vidna sled obžiganja /Tabela 5.10/.

Tabela 5.10: Rezultati obdelave: končni algoritem, preizkus M2

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	3	
čas obdelave [min]	119,14	
odvzeti material [g]	11,3068	0,0086
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,095	0,00007

Preizkus M3:

Preizkušena je bila obdelava v izredno grobem načinu. Proces tudi na večjih globinah ni postal nestabilen; rezultati so zadovoljivi /Tabela 5.11/. Pri obdelavi se pojavi relativno velika obraba elektrode, kar je posledica grobega načina dela, ne pa napačnega krmiljenja.

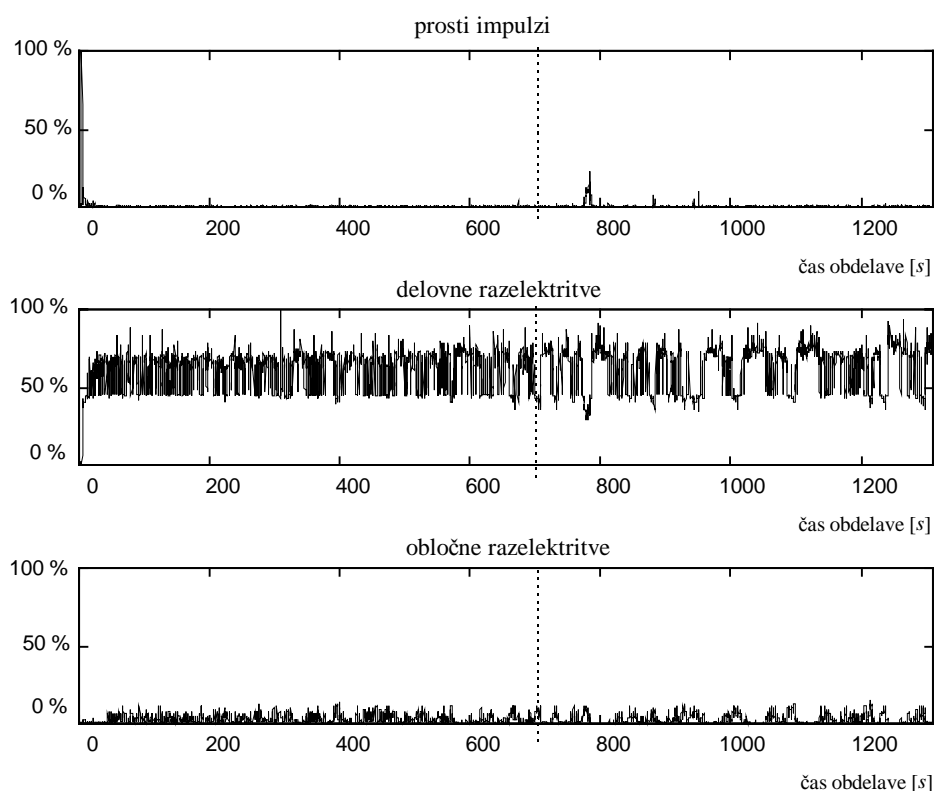
Krmilnik je čez celotno obdelavo držal delež obločnih razelektritev v dovoljenih mejah. Celoten proces je potekal prvih 80 sekund precej stabilno /Slika 5.12/. Delež prostih impulzov je bil minimalen, obdelava je večinoma potekala z delovnimi razelektritvami.

Med 80 in 300 sekund se je delež prostih impulzov povečal, kar pomeni manjšo produktivnost. Ker se je začel pojavljati večji delež obločnih razelektritev, je krmilnik reagiral z povečanjem reže, kar je imelo za posledico večji delež prostih razelektritev. Vzroke za nagibanje procesa k obločnim razelektritvam gre iskati predvsem v slabših pogojih izpiranja.

Povečanje reže pomeni boljše pogoje izpiranja, zaradi česar se je proces po 300 sekundah stabiliziral in obdelava se je nadaljevala z enako produktivnostjo kot na začetku.

Preizkus M4:

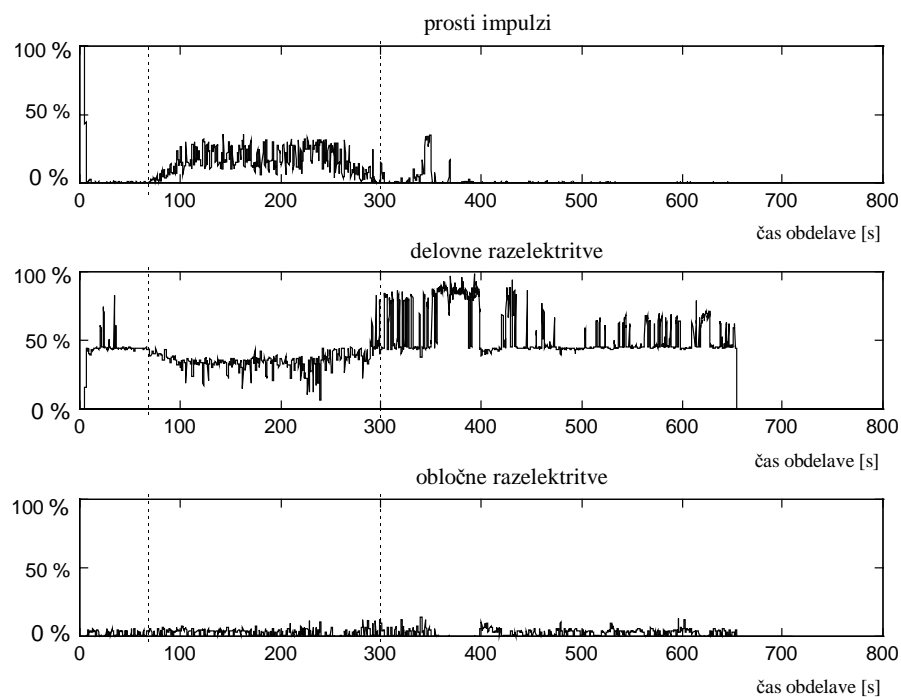
Preizkušali smo uporabnost krmiljenja pri finejših načinih dela. Obdelavo smo začeli z grobim načinom (kar je v praksi običajno). Po 8 min smo začeli zmanjševati imenski tok in čas impulza. Krmilnik je skrbel za pravilno nastavljanje ostalih parametrov. Preizkus smo končali z najfinejšo obdelavo. Rezultati so pokazali uporabnost krmilnika /Tabela 5.12/, saj operaterju pri glajenju ni potrebno skrbeti za ostale parametre. Izkazalo se je, da krmilnik pri tej vrsti obdelave zelo ugodno nastavlja čas pavze med impulzi.



Slika 5.11: Potek prostih, delovnih in obločnih razelektritev pri krmiljenju procesa z modificiranim algoritmom v pogojih običajne grobe obdelave (M2)

Tabela 5.11: Rezultati obdelave: končni algoritem, preizkus M3

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	3	
čas obdelave [min]	11,83	
odvzeti material [g]	11,4440	0,0354
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,967	0,003



Slika 5.12: Potek prostih, delovnih in obločnih razelektritev pri krmiljenju procesa z modificiranim algoritmom v izredno grobih pogojih (*M3*)

Tabela 5.12: Rezultati obdelave: končni algoritem, preizkus M4

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	2	
čas obdelave [min]	18,92	
odvzeti material [g]	4,2440	0,0095
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,224	0,0005

Preizkus M5:

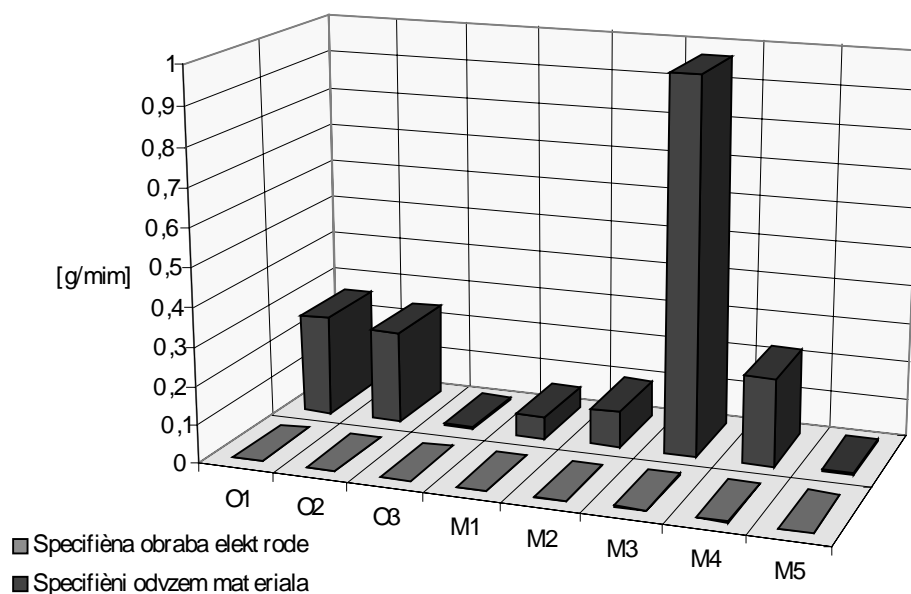
Ta preizkus je ekvivalenten tretjemu operaterjevemu preizkusu (*O3*), ki je potekal brez uporabe krmilnika in s periodičnim dviganjem elektrode. V tem preizkusu (*M5*) je sodeloval tudi krmilnik /Tabela 5.13/.

Tabela 5.13: Rezultati obdelave: končni algoritem, preizkus M5

	obdelovanec	elektroda
globina [mm]	0,1	
čas obdelave [min]	42,47	
odvzeti material [g]	0,3398	-0,0001
$V_w$ oz. $V_e$ [g/min]	0,008	0

#### 5.4.4 Komentar rezultatov

Iz preizkusov operaterjevega vodenja procesa (*preizkus O1* in *O2*) se je izkazalo, da je obraba za malenkost manjša v prvem preizkusu /*Slika 5.13*/, kar je potrdilo ugotovitve, da delež obločnih razelektritev ne vpliva na obrabo elektrode (*pog. 2.8.2*). Pokazalo se je, da je odvzem materiala večji, če teče proces na meji stabilnosti, kar pomeni, da dopuščamo majhen delež obločnih razelektritev. Produktivnost je bila namreč v *preizkusu O1* večja kot v *preizkusu O2*. Primerjava specifičnega odvzema prvih dveh preizkusov (*O1* in *O2*) s tretjim (*O3*), pokaže veliko manjšo produktivnost pri uporabi periodičnega dvigovanja elektrode (*preizkus O3*). Ker se v praksi takšen način obdelave veliko uporablja, bi bilo smiselno dvig elektrode krmiliti tako, da bi se elektroda dvignila le takrat, ko bi bilo to nujno potrebno (*pog. 2.9.1*).



Slika 5.13: Primerjava rezultatov preizkusov

Sistem FORS je predlagal algoritma za kontrolo reže in pretoka, ki sta po strukturi sicer pravilna, parametre spreminjanja števecv pa je bilo potrebno spremeniti. Razloge gre po vsej verjetnosti iskati v spremenjenih karakteristikah stroja, ki je bil v obdobju med snemanjem operaterja in izvedbo poizkusov v okvari, po popravilu pa, po trditvah operaterja, ni imel več enakih karakteristik, predvsem glede kontrole referenčne napetosti in s tem razdalje v reži.

Primerjava med *preizkusom O1* in *preizkusom M2*, kjer so bili nastavni parametri enaki vidimo, da je krmilnik precej slabši kot operater. Glavni problem krmilnika je obdelava na večjih globinah, kjer je izpiranje reže otežkočeno. Operater takrat vodi proces globoko v varnem področju ali pa uporabi periodično odmikanje elektrode. Referenčni model krmilnika vodi proces na meji stabilnosti, kar pomeni veliko produktivnost, v večjih globinah pa postane proces nestabilen in s tem tudi produktivnost drastično pade. Do globine dveh milimetrov so se pokazali rezultati še primerljivi, pri obdelavah v večjih globinah pa je operater znatno boljši.

*Preizkus M3* je pokazal uporabnost krmilnika za prehod iz grobe na fino obdelavo. Trenutna izvedba krmilnika ne omogoča samodejnega prehoda iz grobega na fin način obdelave, zato pa omogoča operaterju spreminjanje imenskega toka in trajanja impulza, ostale parametre pa nastavlja sam.

Primerjava *preizkusov O3* in *M5* pokaže, da je krmilnik pri vodenju procesa s periodičnim dvigovanjem elektrode tako dober, kot operater. Periodično odmikanje elektrode zagotavlja izredno dobre pogoje izpiranja, kar potrjuje, da ima krmilnik v nerizičnih pogojih dela dobre karakteristike.

V vseh primerih je obraba elektrode majhna, razen v *preizkusu M3*, kjer so bile uporabljene izredno grobe nastavitve obdelave. Za vrednotenje kvalitete vodenja procesa s stališča obrabe elektrode so bili izvedeni časovno prekratki preizkusi, da bi lahko z gotovostjo potegnili kakršnekoli zaključke.

Čeprav se z rezultati nismo približali kvaliteti operaterjevega vodenja procesa, smo s krmilnikom lahko zadovoljni, saj se je pri fini obdelavi izkazal primeren za uporabo, ker je znatna izboljšava v primerjavi s prejšnjo verzijo krmilnika, ki ga je razvil Komel Igor in predstavil v svojem delu [KOMEL97].

S preizkusi se je pokazalo, da so možnosti za nadaljne izboljšave krmilnika odprte. Izkazalo se je, da bi na obstoječem sistemu potrebovali dva algoritma, za obdelavo v rizičnih in nerizičnih pogojih ter pravilo, po katerem bi se krmilnik odločil za uporabo enega oziroma drugega algoritma. Takrat bi lahko pričakovali, da bi krmilnik dosegal enake rezultate, kot operater. S krmiljenjem odmika elektrode po potrebi, pa lahko celo pričakujemo boljše rezultate krmilnika.

## 6. Zaključek

V nalogi je zajet pregled splošnih ugotovitev na področju elektroerozijske obdelave. Nekateri teh ugotovitev so bile uporabljene pri modifikaciji algoritma vodenja.

Veliko dela je bilo opravljenega na izboljšanju strojne opreme krmilnika. S povečanjem napetosti na izhodni strani elementov za optično ločitev signalov, povečanjem območja delovanja A/D pretvornika in novo kalibracijo le-tega je bila dosežena večja ločljivost identifikacijskega sistema.

Na nivoju programske opreme je bila izvedena integracija procedur v osnovni program v procesnem računalniku, preko katerih je možna komunikacija z generatorjem impulzov, kar omogoča uporabo novega generatorja in s tem možnost prehoda iz grobe v fino obdelavo brez prekinitve procesa. V osnovnem programu je bil spremenjen uporabniški vmesnik, ki omogoča lažjo komunikacijo operaterja s krmilnikom in uporabo programa na Hercules grafiki. Povečana je bila tudi hitrost delovanja osnovnega programa in hitrost izvedbe krmiljenja vhodnih parametrov v proces. To je omogočilo hitrejše odzivanje krmilnika na spremembe v procesu in možnost računanja statističnih veličin na krajšem časovnem intervalu, kar se je pokazalo za učinkovito. Izvedena je bila sinteza referenčnega modela v obliki *if - then* pravil z modeliranjem operaterjevih posegov v proces s pomočjo metode strojnega učenja, sistema FORS. S tem je bil sistem FORS v praksi preizkušen.

Tako kot pri vsakem obdelovalnem procesu, tudi pri elektroerozijskem ločimo grobo in fino obdelavo, saj so zahteve za vodenje procesa pri obeh načinih različne. Pri grobi obdelavi želimo imeti čimvečjo produktivnost oziroma odvzem materiala, zato rabimo čimvečji imenski tok, čimmanjšo imensko napetost, minimalen čas pavze med posameznimi impulzi in optimalno trajanje impulza. Pri fini obdelavi je naš cilj kvalitetna površina v smislu hrapavosti in toplotno prizadete plasti. Za dosego teh ciljev moramo voditi proces tako, da so reža med elektrodo in obdelovancem, čas pavze in pretok čimvečji, čas impulza, imenski tok in površina elektrode pa čimmanjši. Pri tem je velikega pomena tudi obraba elektrode, saj z obrabo izgubljammo natančnost na izdelku. Za dosego majhne obrabe naj bosta pretok dielektrika in imenski tok minimalna, premer elektrode in reža pa čimvečja. Poznamo tudi posebne načine zmanjševanja obrabe elektrode. To so razna elektronska vezja, ki preprečujejo nezaželene razelektritve (obločne in zakasnele) ter dovajanje majhnih količin kisika v režo.

V reži med elektrodo in obdelovancem moramo zagotoviti pretok dielektrika, da se odzvati material obdelovanca odstrani iz reže. V nasprotnem primeru je proces nestabilen in nastanejo trajne poškodbe površine. Ker pomeni večji pretok večjo obrabo elektrode, je med obdelavo primerno poiskati optimum.

Pri krmiljenju se identifikacija procesa in regulacija servo sistema pokažeta kot glavna dejavnika za kvalitetno vodenje procesa. Identifikacija mora potekati na nivoju mikro sekund, torej na nivoju posameznih razelektritev, krmiljenje servo sistema pa mora omogočati poljubno spreminjanje velikosti reže in reakcijski čas servo sistema mora biti manjši od ene mili sekunde.

Celoten spekter krmilnikov, ki so bili proučeni pokrivajo veliko število identifikacijskih in krmilnih parametrov, ni pa še bil zgrajen krmilnik, ki bi med obdelavo spreminjal imenske vrednosti toka in napetosti. Tudi čas impulza se le redko uporablja v te namene. Za identifikacijo procesa zvok, ki ga sliši človek, še ni bil uporabljen. Velika možnost obstaja, da

bi s krmiljenjem vseh parametrov procesa (tudi nastavitvenih) in identifikacije procesa tudi z zvokom, dosegli kvalitetno krmiljenje.

V nalogi smo si pri gradnji krmilnika oziroma njegovega referenčnega modela pomagali z metodo umetne inteligence, to je strojnim učenjem. Pridobljen algoritem se je v praksi izkazal za neuspešnega, vendar gre po vsej verjetnosti iskati razloge v spremenjenih karakteristikah stroja, saj se je struktura pravil pokazala kot pravilna, parametre v pravilih pa je bilo potrebno za doseg boljših rezultatov delno modificirati.

Zanimiv rezultat se je pokazal pri pravilu za kontroliranje pretoka dielektrika. V primeru zunanega izpiranja reže, se pogoji izpiranja s povečevanjem globine vedno bolj slabšajo. Zato je potrebno pretok s povečevanjem globine vedno bolj povečevati. S sistemom FORS smo dobili pravilo, ki pravi, da operater spreminja pretok dielektrika glede na stabilnost procesa. Ko je operater opisoval svoj način vodenja procesa, ni znal pojasniti, kdaj se odloči, za povečanje pretoka. Z modeliranjem njegovih posegov v proces s sistemom FORS, se je izkazalo, da je glavni dejavnik, ki ga upošteva za odločitev o povečanju pretoka, stabilnost procesa /Slika 5.7/. S tem so se potrdile hipoteze, da se je mogoče z uporabo strojnega učenja dokopati do pravil, katera ostajajo skrita v t.i. mojstrskih znanjih.

Modificiran in nadgrajen algoritem se ni izkazal enakovreden operaterju, pokazal pa je nekatere dobre lastnosti. Uspešnost krmilnika je predvsem v:

- dobri regulaciji pretoka dielektrika, vendar samo za zunanje izpiranje
- sposobnosti vodenja procesa tudi takrat, ko se pojavi minimalno obžiganje oz. da je krmilnik v stanju voditi proces tudi takrat, ko bi se proces brez nadzora prekinil. To je predvsem zasluga dobrega krmiljenja pavze.

Krmilnik je uporaben za manjše globine erodiranja /Slika 5.11/ oziroma za primere, ko je zagotovljeno dobro izpiranje. Dobre rezultate dobimo tako pri grobi, kot pri fini obdelavi, primeren pa je tudi za obdelavo s periodičnim odmikanjem elektrode. V primeru slabega izpiranja reže krmilnik odpove. Proces se sicer ne prekine, izhodni parametri iz procesa pa so izredno slabi. Najenostavnejša rešitev je prigraditev dodatnega sklopa *if - then* pravil, s katerimi bi ugotavljali stanje procesa. Ko bi le-ta začel kazati znake slabega izpiranja reže, bi krmilnik preklopil v varnejše področje delovanja, se pravi na algoritem podoben temu, le da bi bili parametri postavljeni globlje v varno področje. Dobre rezultate lahko pričakujemo na osnovi preizkusov, saj je krmilnik na osnovi novega algoritma vodil proces brez prekinitve, tudi če se je pojavilo obžiganje, kar je bila slabost algoritma, ki ga je predstavil Komel. Boljša in bolj univerzalna rešitev je omogočanje krmilniku dvigovanja elektrode po potrebi, kar pa bi zahtevalo dodatno investiranje v servo sistem. S takim sistemom pričakujemo, da bo krmilnik uspešnejši od operaterja.

Na krmilniku in referenčnem modelu je ostalo še veliko dela. Najprej je potrebno ugotoviti vpliv trajanja impulza na potek procesa in kako različne kombinacije vhodnih parametrov vplivajo na proces. To je pomembna informacija pri gradnji referenčnega modela, saj se je pri modifikaciji FORS-ovega algoritma pokazalo za pomembno, da tako povečanje pavze med impulzi, kot povečanje reže, zmanjšuje obločne razelektritve. Trajanje impulza se sicer v večini primerov uporablja kot nastavitveni parameter, iz preizkusov pa se vidi, da ima vpliv na stabilnost procesa.

Za primer izpiranja reže skozi elektrodo je potrebno izvesti modifikacije algoritma, saj tam pričakujemo potrebo po zmanjševanju pretoka. Dodati je potrebno algoritem za krmiljenje procesa v varnem območju, v ta namen pa raziskati, kateri so znaki slabega izpiranja in takrat izvesti prehod med algoritmi.

Glede umetne inteligence bi dobre rezultate lahko pričakovali pri uporabi strojnega učenja na način, da bi podali strukturo algoritma vodenja in bazo podatkov operaterjevega vodenja procesa, metoda pa bi določila parametre v tej strukturi. Na nek način bi bil to sistem, ki je v svetu že znan pod imenom *Machines that Learn from Hints* [ABU95].

## 7. Literatura

- ABU95 Abu-Mustafa Yaser S.: *Machines That Learn from Hints*, Scientific American, April 1995, pp.68-73
- AHMED87 Ahmed M.S.: *Radio Frequency Based Adaptive Control for Electrical Discharge Texturing*, EDM Digest, Sept./Oct. 1987, pp. 8-10 — citirano v [RAJUKAR92]
- ALBINSKI80 Albinski K., Liebeskind A.: *Characteristics of the Process of Electric Discharge Machining*, Proceedings ISEM 6, Krakow 1980
- BHATT78 Bhattacharyya S.D., El-Menshawy M.F.: *Monitoring the EDM Process by Radio Signals*, International Journal of Production Research, Vol 16, No 5, 1978 — citirano v [MORITA]
- BOCCAD95 Boccadoro M., Dauw D.F.: *About the Application of Fuzzy Controllers in High-Performance Die-Sinking EDM Machines*, Annals of the CIRP Vol. 44/1/1995, pp 147-150
- BOTDEN71 Botden P.J.: *Inleiding over ontladingsverschijnselen in het vonkerosis proces*, CFT verslag nr. 03/71, Philips centre for technology — citirano v [DAUW86]
- BRATKO89 Bratko I.: *Prolog in umetna inteligenca*, DMFA, Ljubljana 1989
- BRATKO90 Bratko I.: *Prolog in Artificial Intelligence - 2nd edition*, Addison - Wesley, 1990.
- BRUYN68 Bruyn H.E.de: *Slope Control: a Great Improvement in Spark Erosion*, Annals of the CIRP 16/1968 — citirano v [HEUVEL69, BRUYN80a,b]
- BRUYN80a Bruyn H.E. de: *A Sable Process with Trapezoidal Pulses*, Proceedings ISEM 6, Krakow 1980
- BRUYN80b Bruyn H.E.de, Pekelharing A.J.: *Comparison of Various Erosion Systems with Rectangular and Trapezoidal Pulse Forms*, Annals of the CIRP 29/1/1980
- BRUYN82 Bruyn H.E.: *Has the "Delay Time" Influence on the EDM-Process*, Annals of the CIRP Vol. 31/1/1982, pp 103-106
- CHINCHOLLE Chincholle: *Metal Removal and Adaptive Control in EDM*, vir ni znan
- CORNEL78 Cornelissen H., Sneys R., Kruth J.P.: *"Technological Surfaces"- An objective criterion for Comparing EDM - Systems*, Annals of the CIRP, Vol XVII, 1978
- CROKAL71 Crookall J.R., Heuvelman C.J.: *Elektro-Discharge Machining — the State of the Art*, Annals of the CIRP vol. 20, 1971, pp. 113-120
- DAUW83 Dauw D.F., Snoeys R., Dekeyser R.: *Advanced Pulse Discriminating System for EDM Process Analysis and Control*, Annals of the CIRP Vol. 32/2/83, pp 541-549
- DAUW85 Dauw D.: *On Line Identification and Optimisation of Electro-Discharge Machining*, Theses K.U. Leuven, Belgium, 1985 — citirano v [DAUW86]
- DAUW86 Dauw D.: *On the Derivation and Application of a Real-Time Tool Wear*

- Sensor in EDM*, Annals of the CIRP 35/1/1986
- DAVIES70 Davies W.D.T: *System Identification for Self-Adaptive Control*, John Wiley & Sons, Great Britan 1970
- DIJCK Van Dijck F.: *Physico-Mathematical Analysis of the Electro Discharge Machining Process*, Ph.D thesis Katholieke Universiteit Leuven 73 D2 — citirano v [DAUW86]
- ENDEL80 Endel A., Diveky P.: *Concept and Solution of Control Systems for EDM Machines*, Proceedings ISEM 6, Krakow 1980
- ENNING80 Enning H.J.: Ein Beitrag zur Reduzierung des Elektrodenverschleisses bie der funkerosiven Senkbearbeitung Dissertation T.H. Aachen, 1980 — citirano v [BRUYN82]
- FEENY78 Feeny C.J., Crookall J.R.: *The Effectivness of Non-rectangular Pulseforms in Electrodischarge Machining*, Proceedings of the 19<sup>th</sup> Machine Tool Design and Research Conference, 1978 — citirano v [Bruyn80a,b]
- GIBSON Gibson J.E.: *What you should know about Adaptive Systems*, Control Eng. (reprint) — citirano v [DAVIES70]
- HAVLEC77 Havlec J., Zimanyi J.: *Composite Current pulses in EDM*, Proceedings ISEM 5, Wolfsberg 1977
- HEUVEL69 Heuvelman C. J.: *Some Aspects of the Research on Electro-Erosion Machining*, Annals of the CIRP vol. 17/1969, pp. 195-199
- HEUVEL74 Heuvelman C.J.: *Ignition Delay as a Sensor for the Electro-Discharge Servo Machining*, Proc.Int.Conf. on Production Engineering, Tokyo 1974 — citirano v [BRUYN82]
- HON87 Hon K.K., Razavi E.S.: *A Contribuaan to the Monitoring and Control of EDM Based on High Frequency Methods*, ISth NAMRC Proceedings,1987, pp. 413-417 — citirano v [RAJUKAR92]
- HUAI92 Huai-yi Z.: *New Phenomena in Discharge Force and a New Point of View about Electroerosion Mechanism*, Proceedings ISEM 10, 6-8 May 1992, Magdeburg, pp. 332-335
- JUNKAR96 Junkar M., Valentinčič J., Lebar A.: *Enotni dogodek kot osnovni element obdelane površine*, Mednarodna konferenca o tribologiji SLOTTRIB'96, Slovensko društvo za tribologijo, Ljubljana 1996
- KARALIČ95 Karalič A.: *First Order Regression*, dissertation, University of Ljubljana, Ljubljana 1995
- KHANG77 Kahng C.H., Rajurkar K.P.: *Surface Characteristics Behavior Due to Rough and Fine Cutting by EDM*, Annals of the CIRP 25/1/77
- KIMOTO60 Kimoto Y.: *On the ratio of Electrode-Wear in Electro-Discharge Machining*, JSPE, Vo1.26 No.10, 601-606 (v Japonščini) — citirano v [KUNIEDA91]
- KOMEL97 Komel I.: Magistersko delo, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1997
- KONIG75 König W., Wertheim R., Zvirin Y., Toren M.: *Material Removal and Energy Distribution in Electrical Discharge Machining*, Annals of the CIRP 24/1/1975, pp. 95-100

- KONIG79 König W., Enning H.J.: *Verschleißminderung durch adaptive Regelung beim funkenerosiven Senken*, Industrie-Anzeiger 101. Jg. Nr. 55, 1979 — citirano v [WECK80]
- KONIG80 König W., Enning H.J.: *EDM - Influence of Stepped Current Pulses on the Work Result*, Proceedings ISEM 6, Krakow 1980
- KREMER80 Kremer D., Bazine B., Moisan A., Bessaguet L., Astier A., Thanh N.K.: *Ultrasonic Machining Improves EDM Technology*, Proceedings ISEM 6, Krakow 1980
- KUNIEDA91 Kunieda M., Furuoya S.: *Improvement of EDM Efficiency by Supplying Oxygen into Gap*, Annals of the CIRP 40/101991
- LEE88 Lee L. C., Lim L. C., Narayanan V., Venkatesh V. C.: *Quantification of Surface Damage of Tool Steels after EDM*, Int. Jap. Mach. Tools Manufacturing, vol. 28/4/1988, pp. 359-372
- LEEMREIS Leemreis J.H.: *Generatoren voor vonkverspaningsmachines*, Report MFR. 20-4100-22 of the Mechanical Engineering Works of N.V. Philips Gloeilampenfabriken, Eindhoven — citirano v [HEUVEL69]
- LOU90 Lou Y.F., Chen C.G.: *Effect of a Pulsed Electromagnetic Field on the Surface Roughness in Superfinishing EDM*, Precision Engineering, vol. 12, No 2, April 1990, pp. 97-100
- MASUZAWA83 Masuzawa T., Heuvelman C.J.: *A Self-Flushing Method with Spark-Erosion Machining*, Annals of the CIRP 32/1/83, pp. 109-111
- MASUZAWA90 Masuzawa T., Cui X., Fujino M.: *A New Flushing Method for EDM Diesinking*, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol. 24/3/1990, pp. 223-224
- MCGEOUGH83 McGeough J.A., Khayry A.B.M, Munro W.: *Theoretical and Experimental Investigation of the Relative Effects of Spark Erosion and Electrochemical Dissolution in Electrochemical ARC Machining*, Annals of the CIRP 32/1/83, pp. 113-118
- MORITA Morita A., Imai Y., Noda A., Maruyama H., Kobayashi K.: *Fuzzy Controller for EDM*
- MOTOKI67 Motoki M., Hashiguchi K.: *Energy Distribution at the Gap in Electric Discharge Machining*, Annals of the CIRP vol. XIV, 1967, pp. 485-489
- MOTOKI76 Motoki M., Ikoni T.: *Effect of Superimposed and Added Pulse on Electrode Erosion*, Journal of Japan Society of Electrical Machining Engineers, vol 10-19, 1976 — citirano v [BRUYN80a,80b]
- NASA85 NASA, USA, 1985: *Inert-Gas Electrical-Discharge Machining*, NTIS Tech Note. Uhlig, H.H — citirano v [KUNIEDA91]
- PAHLIT68 Pahlitzsch G., Visser A., Funk W.: *Der Polaritäts-effekt beim Funken-Erodieren*, Annals of the CIRP 16/1968 — citirano v [HEUVEL69]
- PANDIT74 Pandit S.M.: *Data Dependent System: A New Approach to Manufacturing System Analysis*, Proc. Int'l. Conf. in Prod. Eng., part I, Tokyo, Japan, 1974, pp.82-87 — citirano v [KHANG77]
- PANDIT87 Pandit S.M., Mueller T.M.: *Verification of On-line Computer Control of EDM by DDS*, ASME Journal of Engineering for Industry, May 1987, Vol. 109, pp. 117-121 — citirano v [RAJUKAR90]

- PEKLENIK67 Peklenik J.: *Investigation of Surface Typology*, Annals of the CIRP 15/1967, pp. 381-385
- RAJUKAR83 Rajurkar K.P., Pandit S.M., Wittig W.H.: *Pulse Current as a Sensor for On-line Control of EDM*, 11 th NAMRC Proceedings, 1983, pp. 379-385 — citirano v [RAJUKAR90]
- RAJUKAR88a Rajurkar K.P., Ahmed M.S., Royo G.F.: *Effect of R.F. Control and Orbital Motion on EDM Performance*, Proc. of ISEM-9, CIRP 1988, pp. 30-33.
- RAJUKAR88b Rajurkar K.P., Royo G.F.: *Improvement in EDM Performance by R.F. Control and Orbital Motion*, ASME Symposium Volume on Research and Technological Developments in Non-Traditional Machining, PED-Vol. 34, 1988, pp. 51-62 — citirano v [RAJUKAR92]
- RAJUKAR89 Rajurkar K.P.: *A New Model Reference Adaptive Control of EDM*, Annals of the CIRP 38/1/1989, pp. 183-186
- RAJUKAR90 Rajurkar K. P., Wang W.M.: *Real-Time Stochastic Model and Control of EDM*, Annals of the CIRP 39/1/90
- RAJUKAR92 Rajurkar K.P., Wang W. M.: *Improvement in EDM Surface Roughness and other Performances with an R.F. Control System*, Proceedings ISEM 10, 6-8 May 1992, Magdeburg, pp. 383-394
- ROETHEL76 Roethel F., Garbajs V.: *Contribution to the Micro-Analysis of the Spark Eroded Surfaces*, Annals of the CIRP 25/1/76, p.p.135-140
- ROETHEL86 Roethel F.: *Strokovne informacije 9, Posebni postopki obdelave, 13. seminar LAKOS-a*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1986, p.p. 34-78
- ROETHEL90 Roethel F., Junkar M., Žnidaršič M.: *Electrode Edge Wear in Dependence on EDM Process Parameters*, Second International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST '90, Trento, Italy
- SCHUMA88 Schumacher B., Weckerle D.: *Funkenerosion*, 1988
- SHAW79 Shaw T.W., Lee L.C., Crookall J.R.: *Automation of the EDM Process*, Proceedings of 20th International Conference of Machine Tool Design and Research, 1979, pp. 591-598 — citirano v [RAJUKAR89]
- SNOEYS Snoeys R., Cornelissen H., Kruth J.P., Leuven K.U.: *Analysis of the EDM Process*, vir ni znan
- SNOEYS75 Snoeys R., Cornelissen H.: *Correlation between Electro-Discharge Machining Data and Machining Settings*, Annals of the CIRP, vol 24/1/1975
- SNOEYS77 Snoeys R., Cornelissen H., Kruth J.P.: *Analysis of the EDM process*, Proceedings ISEM-5 Wolfsburg 1977, Switzerland p.p.1-6
- STEALE89 Steale F., Kruth J.P.: *A Computer Integrated Machining Strategy for Planetary EDM*, Annals of the CIRP 38/1/1989, pp. 187-190 — citirano v [RAJUKAR90]
- SNOEYS80 Snoeys R., Dauw D., Kruth J.P.: *Improved Adaptive Control System for EDM Process*, Annals of the CIRP 29/1/80, pp. 97-101
- STEELANDT75 Van Steelandt F., Verbeemen G.: *Verband tussen machine instelling, proces parameters en bewerkingsresultaten bij het vonkerosief*

- verspanen van staal*, thesis - afdeling Werkplaatstechniek, Katholieke Universiteit Leuven, 1975 — citirano v [SNOEYS ]
- TAKAWA83 Takawashi T.: *Study on a Mirror Surface Machining by Planetary EDM*, Proceedings of ISEM 7, April 1983, pp. 137-147 — citirano v [LOU90]
- TANIGUC71 Taniguchi N., Kinoshita N., Fukai M.: *The Optimum Form of the Current Impulse in EDM*, Annals of the CIRP 20/1/1971
- TANIMURA89 Tanimura T., Isuzugawa K., Fujita I., Iwamoto A., Kamitani T., Proc. of ISEM 9, 1989, pp. 313-316.
- URBANČIČ94 Urbančič T.: *Avtomatizirana sinteza znanja*, doktorska dizertacija, Ljubljana, 1994.
- VEROMAN64 Veroman V.Ju.: *Die Standzeit des Werkzeugs bei elektroerosivenen Bearbeitung*. Extract of the Leningrad House for Scientific-Technical Propaganda, Leningrad 1964 — citirano v [HEUVEL69]
- WANG85 Wang W.M.: *Investigations of Detecting Discharge Parameters and Adaptive Control for EDM*, Ph.D. Thesis, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 1985 — citirano v [RAJUKAR90]
- WANG88 Wang W.M.: *A New EDM Adaptive Control Plan Using Self-Tuning Control Algorithm*, Proceedings of ASEM Manufacturing International '88, Vol. 1, ASME, 1988, pp. 227-233 — citirano v [RAJUKAR90]
- WANG89 Wang W.M., Rajurkar K.P.: *New Servo Interface and Model Reference Control for EDM*, 17th NAMRC Proceedings, 1989, pp. 281-286 — citirano v [RAJUKAR92]
- WECK80 Weck M., König W., Peuler H.: *Automatic Control and Supervision of EDM Process*, Proceedings ISEM 6, Krakow 1980
- ZHAO90 Zhao W., Masuzawa T.: *Adaptive Control of EDM-JUMP with Self-Tuning Approach*, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol 24, No 1, Mar. 1990, pp. 45-50
- ZINGER56 Zingerman A.S.: *Propagation of a Discharge Column*, Zh. Tekh. Fiz. 26,5, 1956 — citirano v [BRUYN80a,b]

## IZJAVA

Diplomsko delo sem samostojno izdelal pod vodstvom mentorja doc.dr. Mihael Junkarja.

Joško Valentinčič

Ljubljana, dne 20.7.2001