

ZAJEMANJE ZNANJA ZA ADAPTIVNO VODENJE EDM PROCESA

Mihael Junkar, Igor Komel

POVZETEK:

EDM proces je precej nestabilen, zlasti pri finih režimih obdelave. Nestabilnemu delovanju se lahko izognemo z adaptivnim vodenjem procesa. Cilj naše raziskave je bila izvedba adaptivnega krmilnika, ki bo nadomestil operaterja v funkciji adaptivnega stabilizacijskega vodenja procesa. Najpomembnejši del takega krmilnika je znanje o načinu oz. strategiji adaptivnega vodenja. Ker veliko znanja o načinu vodenja že obstaja v obliki operaterjeve veščine in v obliki inženirjevega vedenja o principih odnašanja materiala z EDM, smo raziskali možnosti zajema že obstoječega znanja o problemu vodenja EDM procesa. Izvedli smo tri različice adaptivnega krmilnega sistema. Razlikovale so se v strategiji adaptivnega krmiljenja. Vse tri različice krmilnega sistema so bile preizkušene z samostojnim vodenjem zelo rizičnega primera obdelave. Dobljene so bile kvalitativne ocene v uspešnosti vodenja procesa in ugotovljena je bila smer nadaljnjih izpopolnjevanj metod za zajemanja znanja o vodenju EDM procesa.

SUMMARY:

When finishing EDM process is very stochastic and unstable. Such a unstable machining conditions is possible to prevent by adopting specific adaptive control and therefore to reach effective and reliable machining. The aim of our research is to develop a prototype EDM control system in order to replace the operator's adaptive controlling functions. The most important part of such a automatic control system is the knowledge concerning the strategy of system's adaptive behaviour.

Much of EDM process control regarding knowledge is already available in the form of operator's skill and in the form of human's cognisance about principles of the EDM material removing process. Therefore we explored possibilities of exploitation of existing knowledge regarding this controlling problem. We realised three different variant forms of automatic adaptive control system. The differences between them were three different controlling strategies used in the deciding algorithm.

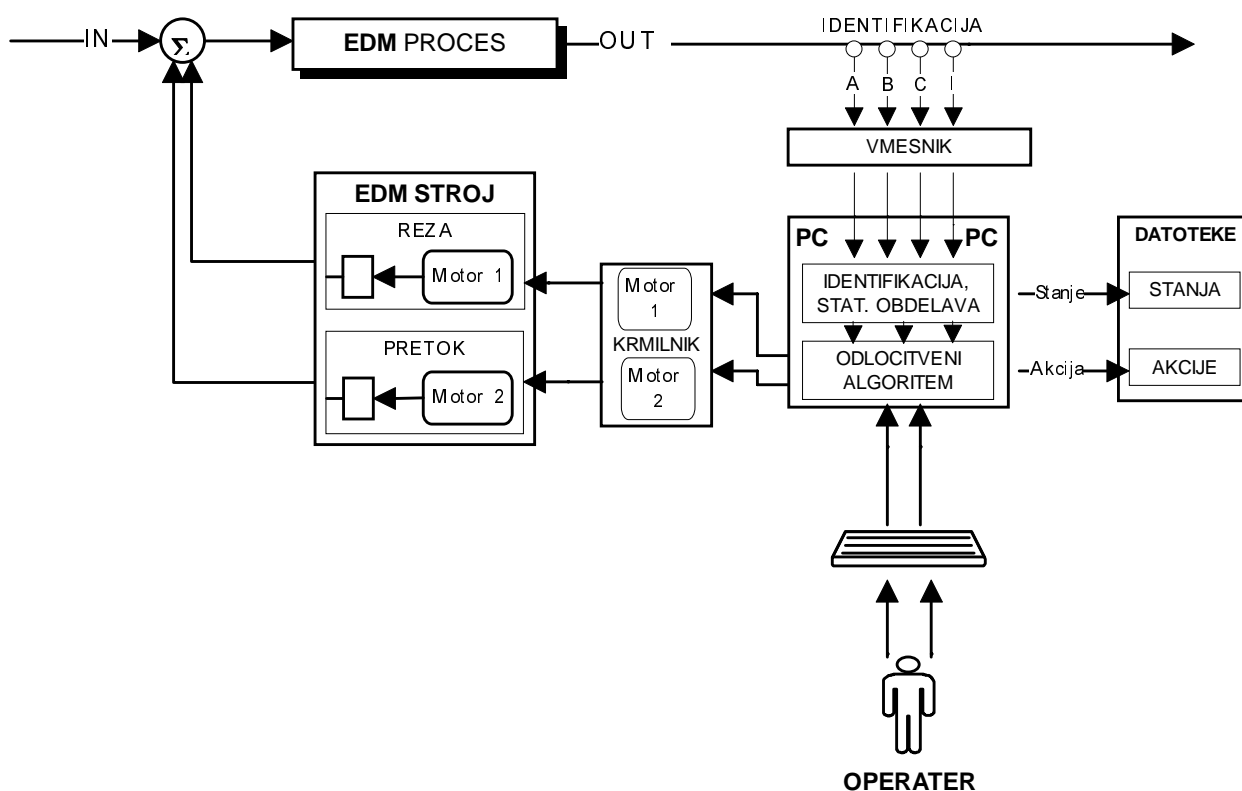
In order to establish the validity of realised control systems, all the three variants were tested by controlling a real and very hazardous machining case. Some qualitative estimations regarding the system's performances were reached and a direction of further implementations of knowledge gathering methods for EDM control was concluded.

UVOD

EDM postopek obdelave je zelo uveljavljen postopek izdelave predvsem utopov za preoblikovanje ter kalupov za tlačno litje. Ker je vrednost večine omenjenih obdelovancev znatna je pomembno, da je proces obdelave gravur zanesljiv, zlasti pri doseganju končne oblike in površine. Ta zahteva je s stališča EDM procesa problematična, saj je EDM proces naključen in nestabilen, zlasti pri finih režimih obdelave. Nestabilnosti se sicer lahko izognemo z izbiro procesnih parametrov, ki so manj efikasni. Obeh, stabilnosti in efikasnosti pa trajno ni mogoče zagotoviti, ker sta si vzajemno izključujoči. Če kljub temu želimo efikasno obdelavo, potem potrebujemo adaptivno krmiljenje, ki bo sicer nestabilen proces stalno nadziralo in ga ob izgubi ravnotežja pravočasno popravilo. Pri večini EDM strojev adaptivno krmiljenje procesa opravlja operater. Strategija adaptivnega krmiljenja je relativno kompleksna tako, da jo operater obvlada le po daljšem obdobju priučevanja in zbiranja lastnih izkušenj. Poleg operaterjeve večine lahko grobe poteze delovanja krmilnika povzamemo tudi iz poznavanja principov procesa odvzemanja z EDM. Osnovna inovacija raziskave je uporabiti obstoječe znanje o procesu, ne glede na obliko v kateri se nahaja. V obeh primerih je namreč znanje razpoložljivo v opisni, nenumerični in nesimbolični obliki. Zato je treba krmilnik zasnovati kot sistem, ki bo dovolj prožen, da se bo lahko prilagodil procesu, kot tudi človeku, njegovemu načinu razmišljanja in odločanja. Vse osnovne funkcije krmilnika (identifikacija, odločanje, krmiljenje) smo izvedli z računalnikom. Računalnik relativno dobro pokriva tako numerični svet identifikacije procesa, kot tudi za človeka značilno odločanje na podlagi kvalitativnih in verjetnostnih ocen. Ker določen razkorak med obema svetovoma še vedno obstaja smo za tvorjenje krmilnikove strategije uporabili tudi metode umetne inteligence oz. metodo induktivnega učenja iz primerov. Metoda FORS /Karaljič 1994/ namreč iz človekove demonstracije vodenja povzame pravilo, ki je izraženo z IF-THEN pravili, to je z obliko, ki je precej sorodna človekovemu načinu odločanja.

ZGRADBA KRMILNIKA

Vodilna zahteva za izvedbo krmilnika je bila ta, da naj se krmilnik zasnuje kot sistem, ki se bo lahko prilagodil procesu, kot tudi človeku, njegovemu načinu razmišljanja in odločanja. Osnovo krmilnika predstavlja osebni računalnik. Računalnik z vhodnimi in izhodnimi enotami zadovoljuje potrebam identifikacije procesa in povratnega krmiljenja stroja. Procesiranje numeričnih podatkov, komuniciranje z operaterjem in shranjevanje podatkov, ki opisujejo problem krmiljenja pa so osebnemu računalniku že naravne funkcije.



Slika 1: Shema zgradbe krmilnika.

Identifikacija procesa:

Računalnik preko I/O pretvornika periodično vzorči štiri identifikacijske veličine:

1. Delež prosih impulzov ' $A_{(t_i)}$ '
2. Delež delovnih impulzov ' $B_{(t_i)}$ '
3. Delež obločnih impulzov ' $C_{(t_i)}$ '
4. Srednja vrednost jakosti el. toka ' $I_{(t_i)}$ '

Iz dobljenih podatkov računalnik sproti izračunava srednje vrednosti in standardne devijacije vseh veličin na časovnem intervalu 3s in 20s. Izbira časovnega intervala je prilagojena človeškimi reakcijskim časom in načinu opazovanja procesa obdelave. Stanje sistema v nekem trenutku ' t_i ' je tako opisano z šesnajstimi atributi - štirimi statistikami vsake od štirih identifikacijskih veličin:

$$\text{Stanje}_{(t_n)} = \begin{bmatrix} \text{avg}(A_{(t_i)})^{20s} & \text{avg}(A_{(t_i)})^{3s} & \text{std}(A_{(t_i)})^{20s} & \text{std}(A_{(t_i)})^{3s} \\ \text{avg}(B_{(t_i)})^{20s} & \text{avg}(B_{(t_i)})^{3s} & \text{std}(B_{(t_i)})^{20s} & \text{std}(B_{(t_i)})^{3s} \\ \text{avg}(C_{(t_i)})^{20s} & \text{avg}(C_{(t_i)})^{3s} & \text{std}(C_{(t_i)})^{20s} & \text{std}(C_{(t_i)})^{3s} \\ \text{avg}(I_{(t_i)})^{20s} & \text{avg}(I_{(t_i)})^{3s} & \text{std}(I_{(t_i)})^{20s} & \text{std}(I_{(t_i)})^{3s} \end{bmatrix}$$

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

f frekvenca vzorjenja $\left[\frac{1}{s}\right]$
 x identifikacijska vrednost

Odločanje:

Glede na trenutno stanje procesa se odločitveni del algoritma odloči za krmilni ukrep - akcijo. Odločitveni del algoritma je sklop IF-THEN pravil in predstavlja strategijo vodenja. Atribut stanja procesa vedno nastopa v pogojnem delu IF-THEN pravila, medtem ko je akcija v posledičnem delu.

Krmiljenje procesnih parametrov:

Odločitev sprejeta v odločitvenem delu algoritma se v krmilnem delu algoritma prenese na izhodna vrata računalnika, kjer se preko pogonske enote koračnih motorjev in koračnih motorjev izvede kot mehanski premik na krmilnem pultu stroja, ki je sicer namenjen manualnim akcijam operaterja. Krmilimo dva procesna parametra: velikost delavne reže in pretok izpiranja. V ta namen imamo na razpolago štiri akcije:

- Povečanje reže
- Zmanjšanje reže
- Povečanje pretoka izpiranja
- Zmanjšanje pretoka izpiranja

Spremembe reže in pretoka so najuplívnejši mehanizmi za vodenje procesa EDM obdelave.

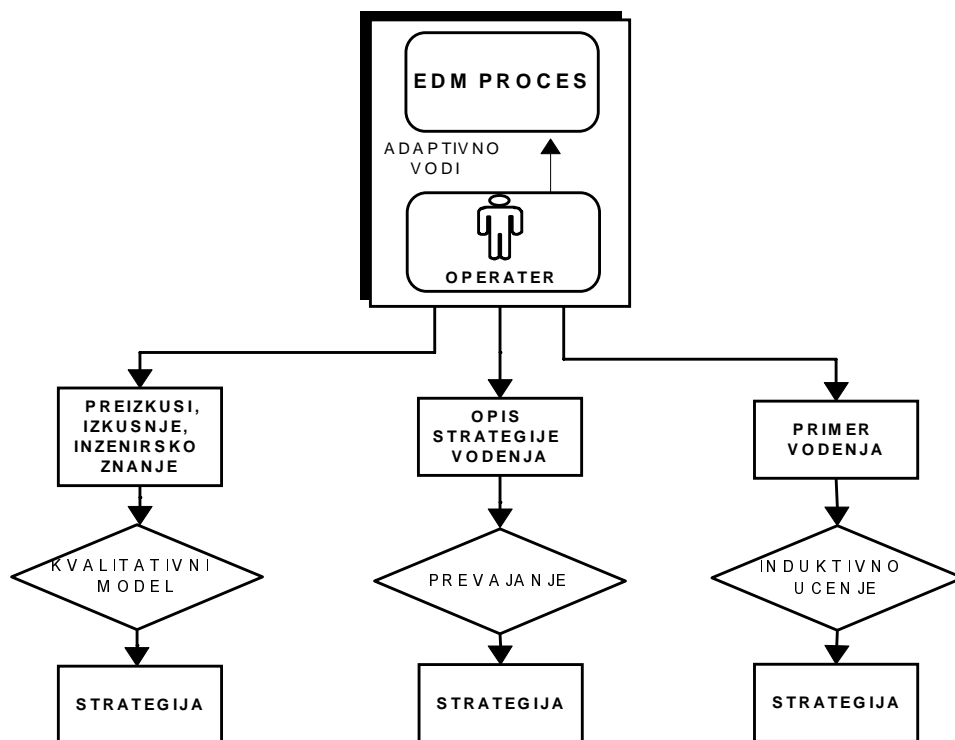
Pomožne funkcije krmilnika:

Poleg navedenih osnovnih funkcij krmiljenja nam tako izveden krmilnik nudi še naslednje dodatne možnosti:

- Možnost krmiljenja, ki ga izvaja operater mimo vgrajenega algoritma. Na ta način krmilnik izvaja krmilno akcijo operaterja kot prioriteto. Možnost pa se uporablja pri zelo specifičnih primerih obdelave, ki niso pokriti z vgrajeno strategijo vodenja.
- Prikaz identificiranih veličin in izvajanja avtomatičnega krmiljenja omogoča človekov nadzor nad delovanjem krmilnika, eventuelno izpopolnjevanje strategije vodenja in sploh vključuje človeka kot pomembnega nosilca tehnološkega znanja.
- Shranjevanje stanj procesa in avtomatično izvedenih akcij. Na ta način je omogočena naknadna analiza delovanja krmilnika in dograjevanje obstoječe strategije z novimi izkušnjami.
- Shranjevanje stanj procesa in operaterjevih akcij brez kakršnekoli avtomatične funkcije. Tak način delovanja je bil uporabljen za 'snemanje' operaterjevega vodenja. Posnetek je bil uporabljen za tvorjenje strategije vodenja z metodo induktivnega učenja na primerih.

PRISTOPI PRI ZAJEMANJU ZNANJA ZA VODENJE EDM PROCESA

Preizkusili smo tri različne pristope zajemanja znanja. Pri vseh je bil vir znanja človek, oz. človekova interpretacija strategije vodenja.



Slika 2: Različni viri zajemanja znanja.

Najpomembnejša ideja je izkoristiti znanje operaterja, ki že služi namenu adaptivnega krmiljenja EDM obdelave /Urbančič/. V ta namen smo izvedli dva krmilnika. Krmilnik zoperaterjevo interpretacijo strategije vodenja in krmilnik s strategijo dobljeno z metodami induktivnega učenja iz primerov /Filipič 1994/.

1. Operaterjeva interpretacija strategije vodenja

Najbolj direkten način izgradnje strategije je prevajanje operaterjevega verbalnega opisa strategije v obliko IF-THEN pravil.

Sledi opis strategije, ki nam ga je podal izkušen operater /Kralj/:

Če kazalec C impulzov niha že po rdečem polju (več kot 20%), potem režo malo povečaj. Režo lahko tako večkrat povečaš, vendar ne toliko, da tlak pade pod 1.5A . Če kazalec C impulzov še vedno niha po rdečem polju (več kot 20%), potem začni povečevati pretok izpiranja.

in ustrezen prevod v IF-THEN pravila:

Pravilo za pretok izpiranja:

if $\text{avg} \mathbb{I}_{(t_i)}^{3s} < 1.5$ *and* $\text{avg} \mathbb{C}_{(t_i)}^{20s} > 10$ *then* $\text{pretok} := \text{pretok} + 1$

Pravilo za velikost delovne reže:

if $\text{avg} \mathbb{I}_{(t_i)}^{3s} > 1.5$ *and* $\text{avg} \mathbb{C}_{(t_i)}^{20s} > 10$ *then* $\text{reža} := \text{reža} + 1$

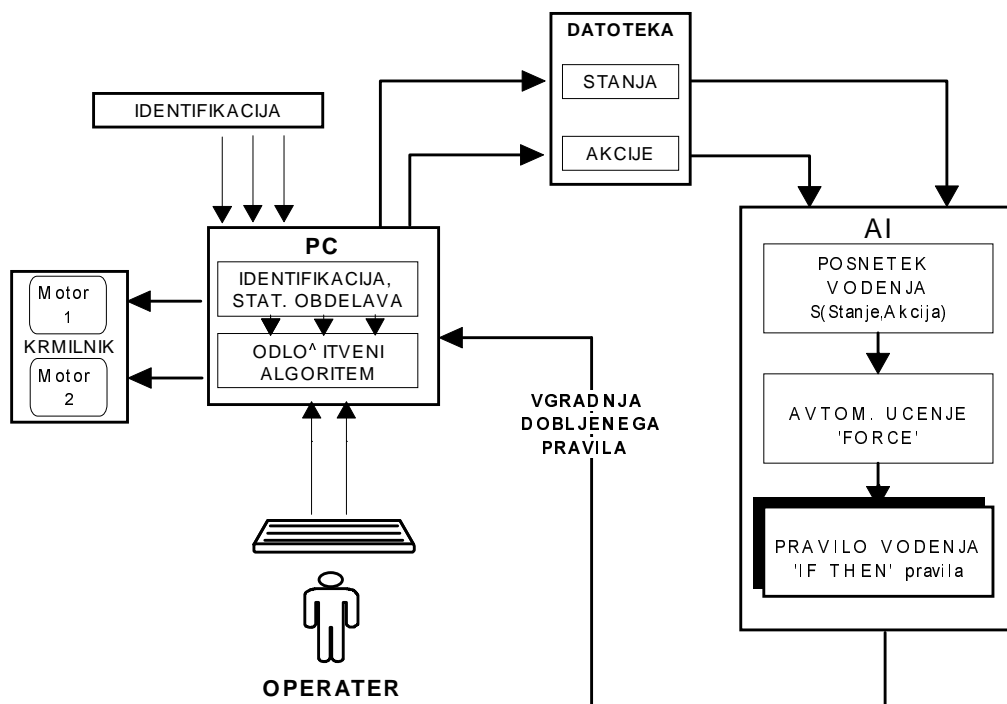
Pri tem postopku je očiten razkorak v izraznem jeziku operaterjevega opisa strategije in sklopa IF-THEN pravil. Operater namreč ne uporablja statistik (srednja vrednost in stand. devijacija) za vrednotenje procesa, zato se z njimi le skušamo približati atributom, ki jih operater dejansko uporablja. Slednji so izrazito kvalitativnega značaja in se jih numerično težko reproducira.

Poleg tega obstaja razkorak že med operaterjevim dejanskim izvajanjem krmiljenja in njegovim opisom krmiljenja /Urbančič/. Dejansko krmiljenje je relativno intuitivna in refleksna dejavnost, in zato čisto drugačne narave kot verbalno navodilo, ki je bolj eksplicitne narave.

Tem problemom smo se delno izognili z uporabo metode za induktivno učenje iz primerov.

2. Induktivno učenje strategije

Metode, ki deloma premostijo probleme interpretacije operaterjevega izvajanja vodenja in probleme prevajanja v simbolično obliko so metode induktivnega učenja. To so metode umetne inteligence, ki iz posnetka operaterjevega izvajanja tvorijo navodilo izraženo kot sklop IF-THEN pravil. Uporabili smo sistem 'FORS' /Karaljič 1991/. Izvedli smo eno uro trajajoči poskus obdelave v rizičnih okoliščinah obdelave tako, da je operater intenzivno adaptivno vodil proces. Med obdelavo smo cel čas zajemali stanje procesa in seveda operaterjeve ukrepe. Iz takega posnetka program 'FORS' poišče relacije med stanjem procesa in določeno operaterjevo akcijo.



Slika 3: Sistem za induktivno učenje strategije vodenja.

Rezultat obdelave operaterjevega zglada vodenja je sledeče pravilo:

Pravilo za pretok izpiranja:

```

if  $stdA_{(t_i)}^{3s} > 0.3$  then
begin
if  $stdA_{(t_i)}^{20s} > 2.5$  then
begin
if  $(avgA_{(t_i)}^{3s} < avgA_{(t_i)}^{20s})$  and
 $(stdI_{(t_i)}^{3s} < stdI_{(t_i)}^{20s})$  and
 $(stdB_{(t_i)}^{3s} < stdB_{(t_i)}^{20s})$  then  $pretok := pretok + 0.1$ 
else
begin
if  $avgB_{(t_i)}^{20s} < avgB_{(t_i)}^{3s}$  then  $pretok := pretok + 0.5$ ;
else  $pretok := pretok + 0.1$ 
end;
end;
end;
end;
    
```

Pravilo za velikost delovne reže:

```
if  $\text{std} \mathbb{I}_{(t_i)}^{20s} > 0.55$  then reža:=reža+0.3
  else
  begin
    if  $\text{avg} \mathbb{C}_{(t_i)}^{20s} > 12.7$  then reža:=reža+0.7
    else
    begin
      if  $\text{avg} \mathbb{B}_{(t_i)}^{3s} \leq 55.5$  then reža:=reža-0.2
      else reža:=reža-0.5
    end;
  end;
```

Pomembna prednost avtomatične strategije vodenja je razumljivost. Razumljivo strategijo je lažje nadzorovati, dograjevati in izpopolnjevati. Dobljeno pravilo sicer vodi proces, ni pa razumljivo, saj ne izraža bistvenih krmilnih ukrepov na ekspliciten način. Noben ukrep v tem pravilu ni drastičen, četudi EDM obdelava v mnogih trenutkih drastične ukrepe potrebuje. To kaže na dograditev pravila z eksplicitnim znanjem iz ostalih virov (operater, tehnolog).

3. Strategija povzeta iz znanja o principih procesa odzemanja z EDM

Grobe poteze delovanja krmilnika povzamemo tudi iz poznavanja principov procesa odzemanja z EDM. Osnovno dejstvo iz katerega izhaja strategija krmiljenja je nezaželjenost in destruktivno delovanje 'C' (obločnih) impulzov. Potem ko se v procesu začnejo pojavljati večji deleži 'C' impulzov moramo delavno režo čimprej očistiti produktov obdelave. Največji učinek dosežemo z povečanjem delovne reže, nekoliko manjši in podoben učinek pa dobimo z povečanjem pretoka izpiranja. Ta dva trenda krmiljenja reže in pretoka sta namenjena stabiliziranju procesa oz. varovanju pred poškodbami površine in sta direktno izražena v spodaj navedenih pravilih. Efektivizacija obdelave pa nastopi v vseh ostalih stanjih procesa in je dosežena z trendi krmiljenja pretoka in reže, ki so nasprotni onim uporabljenim pri stabilizacijskih ukrepih. Zajeti so v 'else' delih pravila.

Pravilo za pretok izpiranja:

```
if  $\text{avg} \mathbb{C}_{(t_i)}^{3s} > 7.5$  then pretok:=pretok+1
  else pretok:=pretok-0.5;
```

Pravilo za velikost delovne reže:

```
if  $\text{avg} \mathbb{C}_{(t_i)}^{3s} > 10$  then reža:=reža+1
  else reža:=reža-0.5
```

Glede na enostavnost pravila in njegovo jasnost se je tak krmilnik zelo dobro obnesel. Njegova prednost je predvsem v hitrosti odzivanja na razmere v procesu in v nenehni intenzifikaciji obdelave. Proces stalno vodi na meji med maksimalno intenzivnostjo in neobvladljivimi pogoji.

REZULTATI

Vse tri različice krmilnika so bile kvalitativno ocenjene s poizkusi obdelave v rizičnih pogojih. Uporabljena je bila standardna konfiguracija preizkusa. Elektroda iz elektrolitskega bakra valjaste oblike in premera 20mm. Obdelovanec je bil iz kaljenega orodnega jekla z brušeno čelno površino. Uporabljeno je bilo le zunanje izpiranje, kar otežuje doseganje stabilnih razmer obdelave. S ciljem zaostritve pogojev obdelave je bil izbran finejši režim obdelave. Trajanje periode el. signala je bilo 20 μ s, trajanje pavze med posameznim pulzom je 20% periode, nastavev tokovne stopnje je bila 4, prosta napetost pa 4 (180V).

Vsi trije krmilniki so vodili proces ne da bi prišlo do nepopravljive napake na površini obdelovanca, kar je pri uporabljenih pogojih obdelave že važen uspeh.

Naslednji kriterij je efikasnost obdelave. Najbolj efikasno sta obdelavo vodila krmilnika s strategijo dobljeno z sistemom FORS in s strategijo povzeto iz poznavanja principov odvzemanja. Medtem ko je strategija dobljena iz operaterjevega opisa vodenja neefikasno vodila obdelavo. Z naknadno analizo slednje smo ugotovili, da ne vsebuje mehanizma vodenja, ki bi zagotavljal intenzivnost obdelave.

Z opazovanjem delovanja krmilnika med obdelavo lahko ocenimo tudi stabilnost krmiljenja. Pri krmilniku z prevodom operaterjevega opisa strategije težko ocenjujemo delovanje po tem kriteriju, saj se je krmilnik umaknil iz rizičnih pogojev obdelave. Od ostalih dveh je najbolj stabilno vodil proces krmilnik s strategijo dobljeno iz znanja o principih odvzemanja. Zasluge za stabilnost vodenja so predvsem v hitrih in efikasnih reakcijah na nedovoljena stanja procesa. Iz nasprotnih razlogov zapažamo manjšo stabilnost vodenja krmilnika s strategijo dobljeno s sistemom FORS. Tu je vodenje zelo zvezno, pogrešamo pa drastične stabilizacijske ukrepe.

ZAKLJUČKI

Večina realnih procesov je tako kompleksnih, da se popolnega modela ne da zgraditi. Zato je pomembno, da se v ta namen izkoristi kar čimveč že obstoječega znanja o procesu. Največkrat je znanje razpoložljivo kot ekspertno znanje in inženirsko poznavanje tehnologije in fizikalnih principov procesa. Veliko že obstoječega znanja o procesih zavračamo zaradi oblike v kateri je razpoložljivo. Vendar se z jačanjem računalništva nudijo nove možnosti zapolnjevanja prepada med človekovo interpretacijo znanja in simbolično in numerično obliko znanja avtomatičnih sistemov. V ta namen se rojevajo tudi nove metode zajemanja znanja.

V okviru raziskave smo razdelali možnosti zajema znanja za vodenje EDM procesa iz različnih oblik človekovega poznavanja EDM procesa. Vsi pristopi so se izkazali uspešni. Za doseganje uveljavitve takega krmilnika v realnih okoliščinah obdelave pa je treba odpraviti pomankljivosti, ki so se pokazale v vseh izvedbah krmilnika. Tako kot je v generalnem razmišljanju ugotovljeno, da je smiselno izkoristiti vsakršno obliko že razpoložljivega znanja, je tudi nadaljnja pot razvoja krmilnika načrtana kot integracija strategij dobljenih iz različnih virov.

LITERATURA

Filipič B., Junkar M., I. Bratko, A. Karalič, An Application of Machine Learning to a Metal-Working Process, Proceedings of ITI-91 Cavtat, Croatia, 1991;

Filipič B., Junkar M., Od tehnološke baze podatkov do odločitvenega postopka za izbiro orodja v industrijskem obdelovalnem procesu, ERK 94, Portorož, B: 163-166;

Karalič A., First Order Regression, disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana 1995 (v pripravi);

Karalič A., Avtomatsko učenje regresijskih dreves iz nepopolnih podatkov, Magistrsko delo 1991;

Karalič A., Relational Regression: First Steps, delovno poročilo IJS DP-7001 1994;

Kralj V., diskusija o strategiji vodenja EDM procesa;

Urbančič T., Avtomatizirana sinteza znanja za vodenje sistemov, Doktorska disertacija;