

## Contribuții la elaborarea unui model matematic al procesului de eroziune electrică complexă

Lect.drd.ing. Tiberiu-Marius Karnyanszky  
Universitatea “Tibiscus” din Timișoara

ABSTRACT. The complete determination of the mathematical model of the complex electric erosion process is very complicated; the most obvious proof is that the model isn't created even many years of experiences are passed. A large number of experiences, with conclusive results, will offer the starting point to obtain a set of influence relations. The development of the mathematical models for this processing operation will improve the results of the process and a better acceptance of this unconventional method.

### 1 Eroziunea electrică complexă

Eroziunea electrică și electrochimică complexă (EEC) reprezintă suprapunerea, în timp și spațiu, în spațiul de lucru (SL), a prelucrării prin eroziune electrochimică și eroziune electrică.

Prelucrarea prin EEC se definește [Kar00] ca fiind procesul de dezvoltare simultană a dizolvării anodice (DA) și a descărcărilor electrice în impuls (DEI), în spațiul delimitat de obiectul de transfer (OT), conectat la negativul sursei de alimentare cu curent continuu, și obiectul de prelucrat (OP), conectat la anodul sursei de alimentare, în prezența mediului de lucru (ML).

Procesele fizico-chimice, mecanice, electrice etc. care au loc la prelucrarea prin EEC se desfășoară astfel (figura 1):

- din cauza prezenței câmpului electric  $E$  datorat conectării OP și OT la o sursă de curent continuu, în ML au loc procese anodice de decristalizare, transfer de sarcină, transport de substanță, reacții chimice etc. care degradează suprafața OP, plus că asigură depunerea unei pelicule pasive

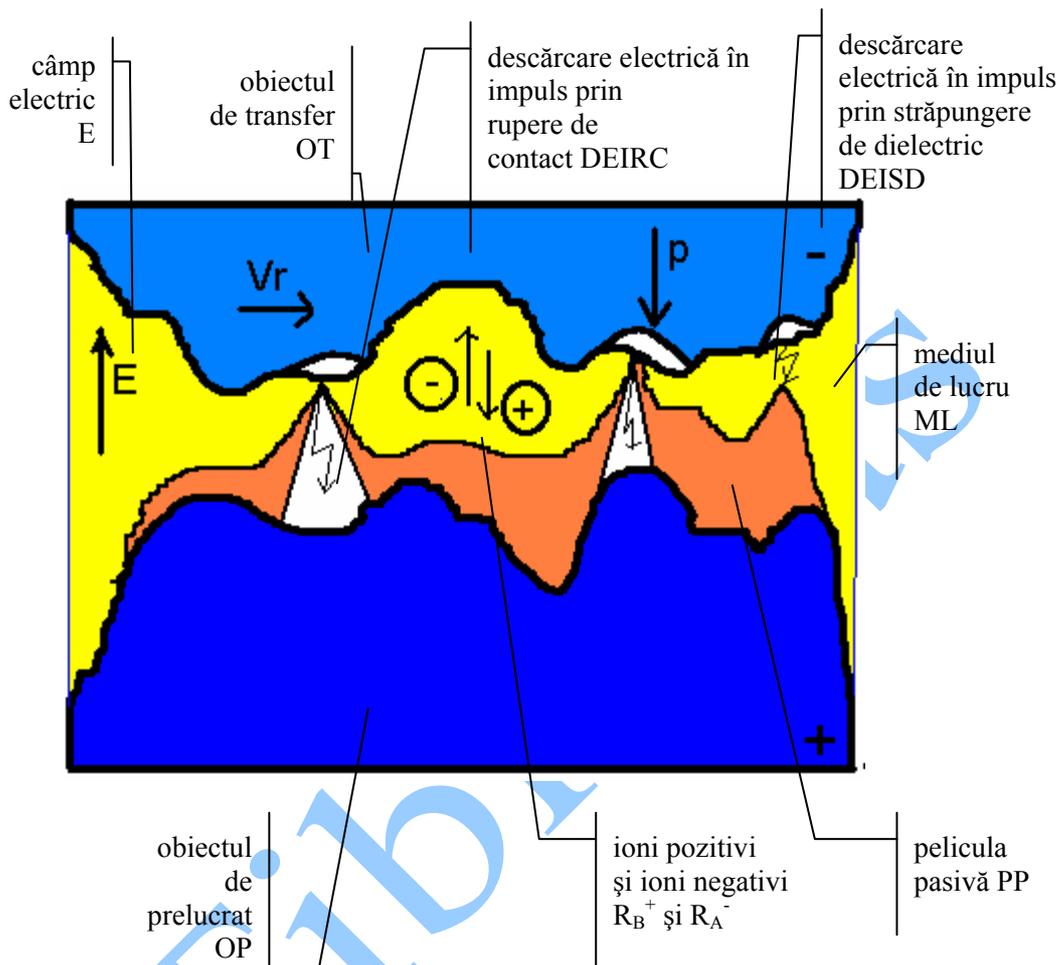


Figura 1. Schema de principiu a EEC

(PP) pe suprafața OP, cu o mare rezistență mecanică și bune proprietăți dielectrice;

- când PP atinge o anumită grosime, procesul de DA se oprește și are loc pasivizarea anodului;
- intervine acum deplasarea tangențială a OT față de OP, cu viteza  $v_r$  și apropierea celor două suprafețe datorită existenței presiunii de contact  $p$ ;
- prin existența acestor solicitări mecanice, PP este îndepărtată la nivelul microasperităților și sunt create condițiile pentru apariția DEI;

- DEI au loc datorită apropierii dintre cele două suprafețe, a existenței PP, a câmpului electric E și a existenței în ML a unei suspensii din produsele eroziunii  $R_a$  și  $R_b$ ;
- DEI se pot manifesta fie prin ruperea contactului deja stabilit (descărcări electrice în impuls prin rupere de contact, DEIRC), fie prin străpungerea dielectricului PP (descărcări electrice prin străpungerea dielectricului, DEISD);
- se ating astfel densități de curent de  $10^3 - 10^5$  A/cm<sup>2</sup>, cu durata de  $10^{-3} - 10^{-5}$  s, ceea ce duce la apariția unor fenomene termice specifice unor temperaturi de  $10^4 - 10^5$  K;
- aceste fenomene termice duc la topirea și vaporizarea explozivă a microasperităților de la suprafața OP, concomitent cu deteriorarea ML din cauza proceselor termice de descompunere și degradare;
- craterile nou apărute reiau procesul de DA și astfel întreg ciclul se repetă.

Așadar, se poate concluziona că procesul de EEC este o suprapunere a prelucrării prin eroziune electrică și prin eroziune electrochimică, cu depasivizare mecanică: prelevarea de substanță din OP se face prin dislocarea materialului ca urmare a DEI și a DA.

Cele două procese care concură la realizarea EEC sunt într-o anumită pondere relativă unul față de celălalt și anume:

- poate predomina DA, când puterea specifică indusă în SL este mică. Este avantajos deoarece precizia prelucrării este ridicată, rugozitatea suprafeței rezultate este mai mică. Dezavantajul care apare constă în productivitatea redusă a procesului de prelucrare;
- poate predomina DEI, când puterea specifică indusă în SL este mare. Este avantajos deoarece productivitatea este mare, ca rezultat al densității mari de curent, care favorizează o temperatură foarte ridicată în SL, acolo unde se ating punctual  $10^4 - 10^5$  K deci suprafața OP se topește și vaporizează exploziv. Același proces fizic duce însă și la dezavantajul unei precizii mici și rugozități mari.

Ca fenomen secundar are loc și erodarea OT, dar aceasta se întâmplă într-un procent mult mai mic și astfel cantitatea de substanță prelevată este mult mai mică.

Așa cum se poate observa din această scurtă prezentare, metodele de prelucrare prin EEC au avantaje majore, cum sunt [Kar00]:

- construcția simplă a OT, folosind tehnologii de fabricație și materiale simple și ieftine;

- posibilitatea prelucrării de OP cu proprietăți mecanice și fizice deosebite (duritate, rezistență mecanică, refractaritate etc.);
- coeficient de utilizare mare a materialului OP;
- sisteme tehnologice simple, automatizate, ce permit prelucrări optime în cele mai multe din operațiile de prelucrare dimensională.

Totuși, metoda are și unele dezavantaje, care însă în timp pot deveni minore, pe măsură ce utilizarea sa devine uzuală:

- fenomenele teoretice și practice nu sunt cunoscute complet, de aceea sunt puține mașini, utilizate în domenii relativ puține;
- utilajele tehnologice sunt scumpe din cauză că sunt puțin numeroase;
- consumă multă energie electrică și LL cu efecte secundare dăunătoare.

## 2 Parametri de intrare și de ieșire la prelucrarea prin EEC

*Caracteristicile tehnologice* sunt acele variabile care exprimă cantitativ și calitativ transformările pe care obiectul de prelucrat (OP) și obiectul de transfer (OT) le suferă în timpul procesului de prelucrare. Ele pot fi sintetizate ca în figura 2.

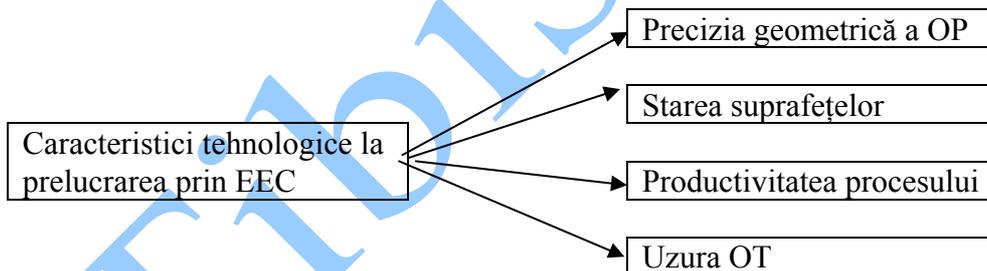


Figura 2. Caracteristicile tehnologice la prelucrarea prin EEC

Caracteristicile tehnologice finale depind de mărimea și modul de variație a elementelor de mai sus, influențele între acestea stabilind ponderea fenomenelor elementare și stabilitatea procesului eroziv.

Dar în timpul acestui proces apar și abateri ale parametrilor, în urma influenței anumitor factori, ceea ce va determina erori în rezultatul final al prelucrării.

Dacă procesul de prelucrare prin EEC încearcă să combine avantajele prelucrării prin eroziune electrică (precizie și calitate bune) și prin eroziune electrochimică (productivitate bună), în același timp procedeul preia și din dezavantajele celor două metode.

Modalitatea prelucrării		Productivitate maximă $Q_p$ [mm <sup>3</sup> /min]	Productivitate specifică [mm <sup>3</sup> /A·min]	Precizie maximă [mm]	Rugozitate $R_a$ minimă [μm]	Consum al OT
Așchiere	Degroșare	$10^5$	$10^4$	0,0100	6,30	Da
	Finisare	$10^3$	$10^3$	0,0010	0,08	Da
	Superfinisare	1	$10^2$	0,0001	0,02	Da
Eroziune	Electrică	$10^4$	$10^2$	0,0100	0,63	Da
	Cu plasmă termică	$10^5$	$10^3$	0,5000	25,00	Da
	Cu fascicul laser	10	10	0,0080	1,60	Nu
	Cu fascicul de electroni	$10^2$	10	0,0080	1,60	Nu
	Electrochimică	$10^5$	$10^2$	0,0500	0,32	Nu
	Chimică	10	-	0,0050	0,05	Nu
	Ultrasonică	$10^2$	$10^2$	0,0050	0,32	Da
	Electrică și electrochimică	$10^3$	1	0,0010	0,16	Da

Tabelul 3. Caracteristici tehnologice la prelucrarea prin eroziune

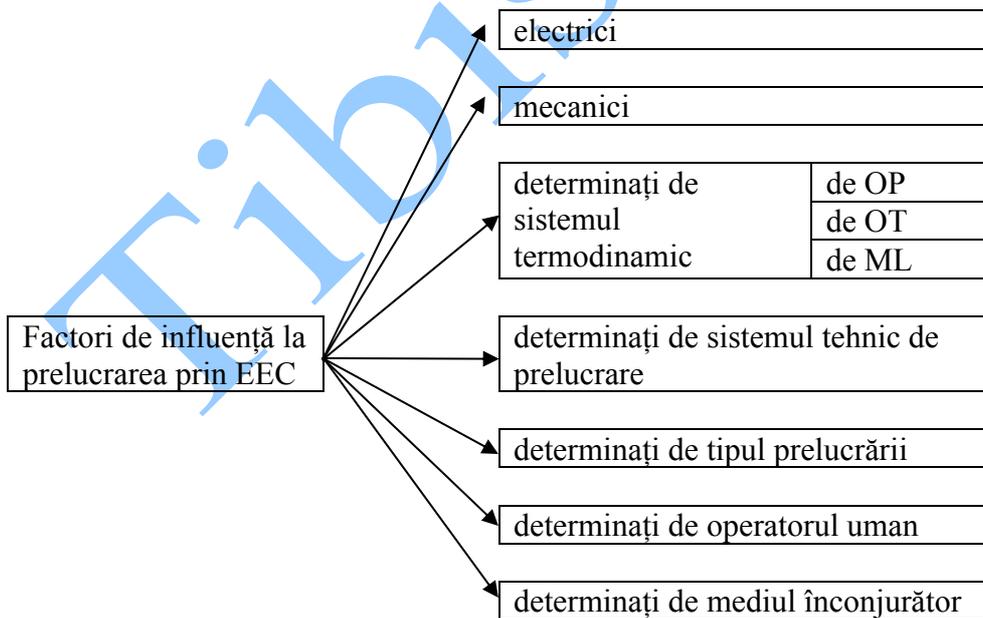


Figura 3. Factori de influență la prelucrarea prin EEC

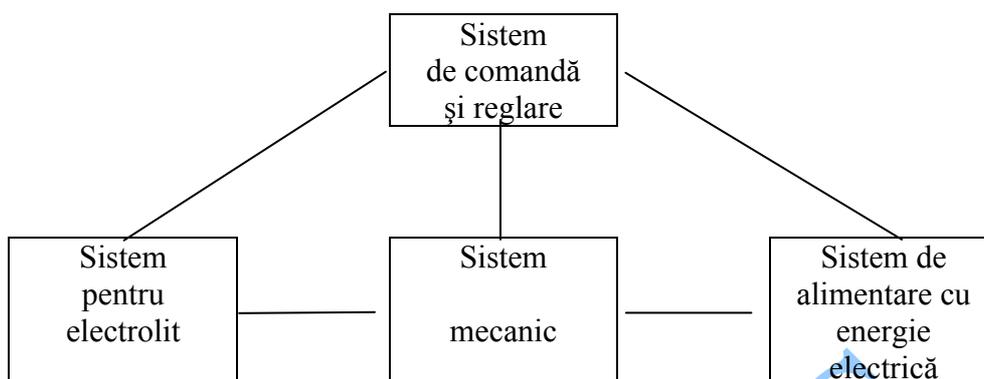


Figura 4. Subsistemele unui utilaj de prelucrare prin EEC

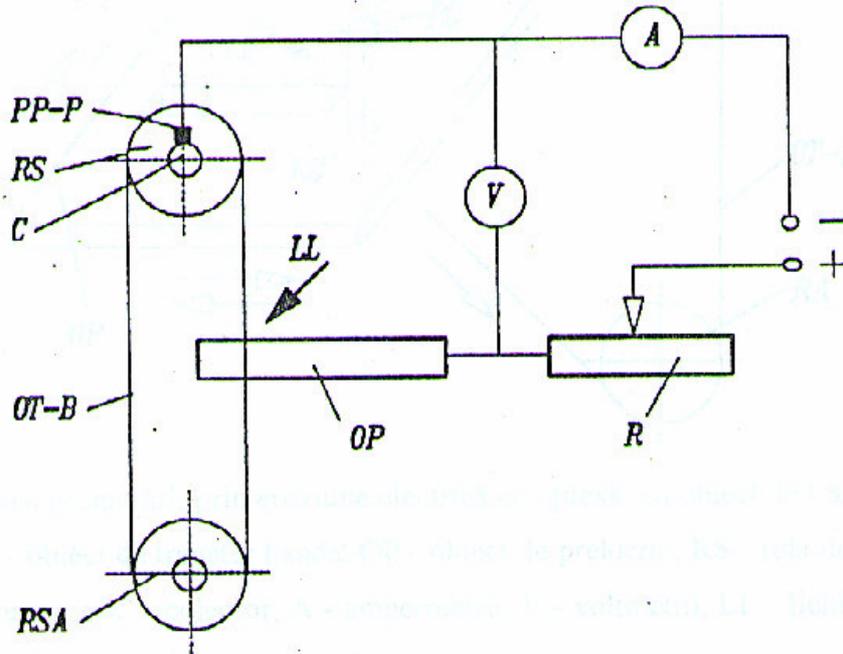
O comparație a caracteristicilor tehnologice cantitative și calitative ale diverselor procedee este prezentată în tabelul 3.

### 3 Utilaje pentru prelucrarea prin EEC

Ca orice sistem, utilajul de prelucrare prin EEC se compune din mai multe subsisteme care interacționează (figura 4):

- **sistemul de reglare și comandă**; asigură conducerea și interacțiunea între celelalte subsisteme;
- **sistemul mecanic**; depinde de operațiile pe care întregul utilaj trebuie să le execute de aceea există o gamă diversă de soluții constructive; oricare dintre ele asigură în principiu:
  - montarea OP și a OT;
  - cinematica necesară generării suprafețelor;
  - păstrarea constantă a interstițiului prelucrării;
  - realizarea avansului necesar prelucrării;
  - dirijarea lichidului de lucru (LL) în spațiul de lucru (SL);
  - evacuarea surplusului de LL, a produselor eroziunii și aerosolilor;
- **sistemul pentru electrolit**; depinde de varianta constructivă adoptată și asigură stocarea, curățirea și recircularea LL;
  - **sistemul de alimentare cu energie electrică**; constă dintr-un ansamblu de redresoare mono sau trifazate sau generatoare de curent continuu, combinate uneori cu rezistențe electrice sau inductivități; asigură energia electrică necesară:
    - în SL pentru constituirea agenților erozivi și a dezvoltării descărcărilor electrice în impuls (DEI);
    - celorlalte sisteme din compunerea utilajului.

Pentru prelucrarea cu OT bandă, OT este o bandă care prin deplasare cu anumită viteză produce o găurire a OP; deplasarea OT conduce la decuparea suprafeței dorite.

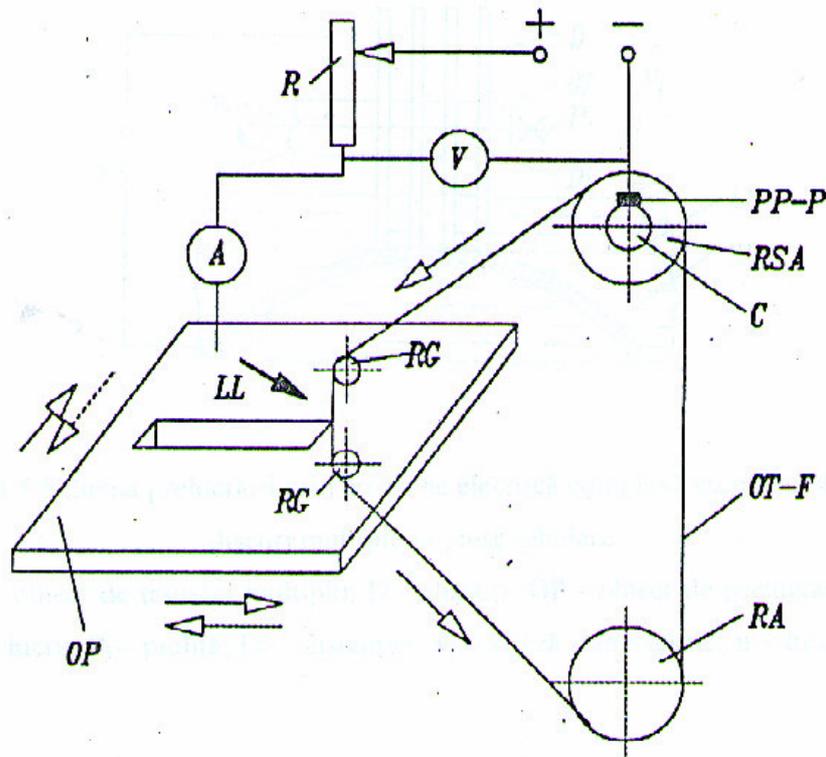


**Legendă:**

- A ampermetrul de măsurare a curentului de lucru;
- C colectorul motorului de antrenare;
- OT-B OT de tip bandă;
- PP-P sistemul portperie-perie;
- R rezistența variabilă de reglare a parametrilor de lucru;
- RG rolele de ghidare a OT;
- RS rola de sprijin;
- RSA rola de sprijin și antrenare;
- V voltmetrul de măsurare a tensiunii de lucru.

*Figura 5. Schema prelucrării prin EEC cu OT bandă*

Pentru prelucrarea cu OT filiform, OT este un fir cu diametru foarte mic, cu lungime cât mai mare posibilă, întins între rolele de ghidare RG, derulat continuu cu viteză constantă în SL de către ansamblul rolelor RSA-RS și cu posibilitatea de inversare a direcției când firul a ajuns la capăt. Altă variantă constructivă utilizează OT cu lungime mică, prins în buclă și derulat într-un singur sens.



**Legendă:**

OT-F OT de tip fir (filiform);  
RG rolele de ghidare

*Figura 6. Schema prelucrării prin EEC cu electrod fir*

La prelucrarea cu OT disc, OT este un disc care prin rotire cu anumită viteză (turație) produce o găurire a OP; deplasarea OT conduce la decuparea suprafeței dorite.

#### 4 Modelarea procesului de eroziune electrică complexă

Așa cum se prezintă și în literatura de specialitate [Her95, Kar01], având în vedere că numărul factorilor de care depind rezultatele prelucrării este foarte mare, și determinarea completă a unui model matematic este deosebit de complicată, dovadă timpul scurs de când se aplică această tehnologie de prelucrare și absența (deocamdată) a unui astfel de sistem. Totuși, un număr suficient de mare de experimente, cu date concludente, ar putea duce la crearea unui ansamblu de legi de influență.

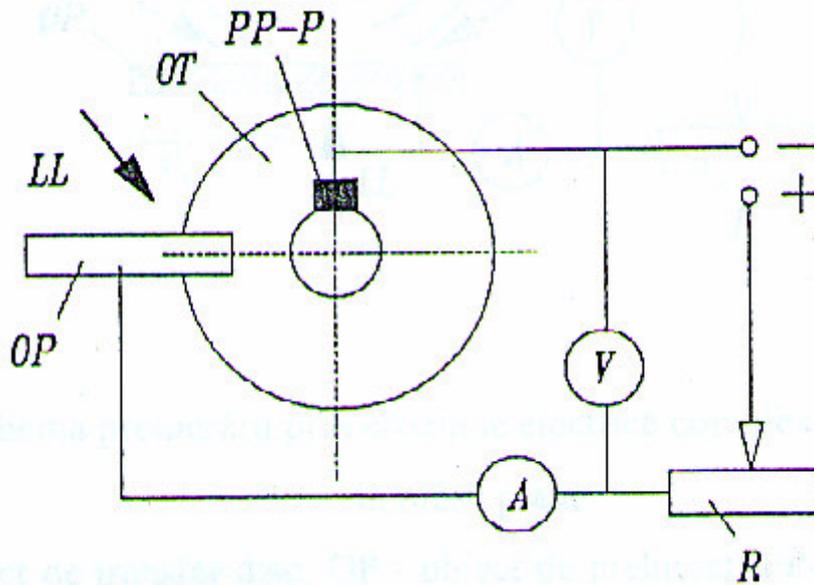


Figura 7. Schema prelucrării prin EEC cu electrod disc

În lucrarea [Her95] este prezentată ca metodă de stabilire a ordinii de influență a diversilor parametri asupra mărimilor de ieșire, metoda experimentului psihologic. Ea permite ierarhizarea factorilor independenți, eliminarea factorilor nesemnificativi și astfel reduce numărul total doar la factorii de bază, toate acestea folosind un experiment simplu, cu cheltuieli minime, fără consum de manoperă, materiale sau energie.

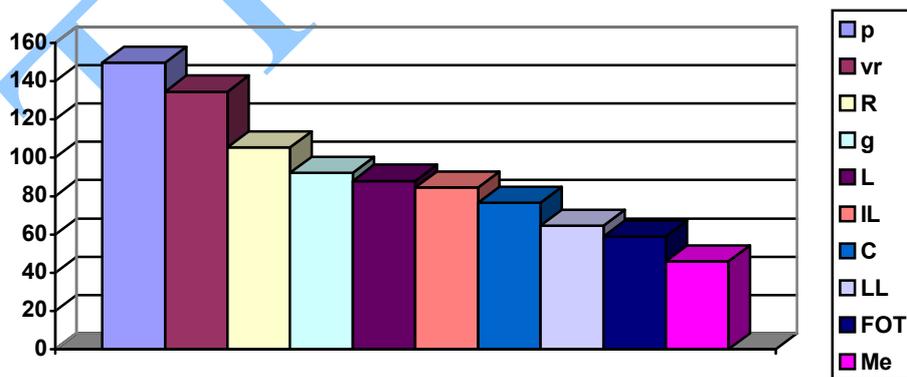


Figura 8. Dependența vitezei de avans de factorii de intrare

Astfel, în figura 8 este prezentată dependența vitezei de avans (viteza liniară de eroziune) de factorii de intrare, folosind abrevierile  $v_r$ =viteza de rotație,  $p$ =presiunea de lucru,  $L$ =componenta inductivă,  $C$ =componenta capacitivă,  $R$ =componenta rezistivă,  $LL$ =lichidul de lucru,  $IL$ =modul de introducere a  $LL$ ,  $Me$ =materialul OT,  $FOT$ =forma OT,  $g$ =grosimea OT.

Totuși, metoda este una teoretică și ea nu este neapărat cea mai relevantă pentru partea experimentală. Pe această cale, a experimentului, se obțin rezultate mult mai exacte și care pot duce la determinarea modelului matematic al procesului de prelucrare prin EEC.

De exemplu [Pop70], efectuând un număr de experimente privind debitarea unui OP de grosimi diferite, pentru a determina modul în care depinde viteza de eroziune de principalii parametri de intrare – tensiunea de alimentare și curentul, s-au stabilit rezultatele din tabelul 4.

În acest tabel,  $U$  respectiv  $I$  sunt tensiunea și curentul pe  $SL$ ;  $L$  este grosimea OP;  $\Delta V_e$  este variația vitezei de avans,  $\Delta U$  și  $\Delta I$  sunt variațiile tensiunii și curentului;  $C_{vi}$  și  $C_{vu}$  sunt funcțiile de transfer care arată dependențele:

$$C_{vi} = \frac{\Delta V_e}{\Delta I} \text{ la } U=\text{constant}$$

$$C_{vu} = \frac{\Delta V_e}{\Delta U} \text{ la } I=\text{constant}$$

și funcție de care se determină formulele finale:

$$V_e = C_i \cdot I^\alpha$$

$$V_e = A + C_{vu} \cdot U$$

ce reprezintă dependența vitezei de avans de tensiunea și curentul de lucru.

Cu datele din tabelul 4 se poate particulariza  $V_e$  determinând pe  $C_i$  și  $\alpha$  astfel:

L=15 mm	U=22V	$\alpha=1,77$	$C_i=0,0055$
	U=24V	$\alpha=1,63$	$C_i=0,0135$
	U=26V	$\alpha=1,63$	$C_i=0,0135$
	U=28V	$\alpha=1,63$	$C_i=0,0135$
L=25 mm	U=22V	$\alpha=1,05$	$C_i=0,0436$
	U=24V	$\alpha=1,09$	$C_i=0,039$
	U=26V	$\alpha=1,23$	$C_i=0,034$
	U=28V	$\alpha=1,07$	$C_i=0,150$
L=25 mm	U=24V	$\alpha=1,45$	$C_i=0,00245$
	U=26V	$\alpha=1,53$	$C_i=0,00218$
	U=28V	$\alpha=1,52$	$C_i=0,00275$

U și L	I [A]	$\Delta V_e$	$\Delta I$	$C_{vi} = \Delta V_e / \Delta I$
U = 22 V L = 15 mm	100	18	65	0,278
	160	38	95	0,40
	200	87	105	0,542
	240	85	140	0,61
U = 24 V L = 15 mm	100	23	70	0,35
	160	45	90	0,50
	200	68	110	0,62
	240	95	135	0,70
U = 26 V L = 15 mm	100	25	75	0,33
	160	54	100	0,54
	200	71	125	0,57
	240	100	130	0,77
U = 28 V L = 15 mm	100	32	85	0,375
	160	57	115	0,495
	200	79	115	0,685
	240	105	135	0,78
U = 22 V L = 25 mm	100	5	100	0,05
	170	8	160	0,05
	240	12	195	0,061
	300	15,5	240	0,064
U = 24 V L = 25 mm	100	6	100	0,06
	170	11	155	0,071
	240	15	205	0,073
	300	20	250	0,08
U = 26 V L = 25 mm	100	10	90	0,11
	170	20	140	0,145
	240	30	200	0,15
	300	39	240	0,16
U = 28 V L = 25 mm	100	20	90	0,22
	170	34	150	0,226
	240	42	182	0,231
	300	52	220	0,236
U = 24 V L = 50 mm	100	2,1	65	0,032
	160	4,2	85	0,048
	240	7,3	140	0,052
	300	10,4	175	0,059
U = 26 V L = 50 mm	100	25	50	0,05
	160	5,5	90	0,061
	240	9	140	0,064
	300	13,5	190	0,071
U = 28 V L = 50 mm	100	3	60	0,054
	160	6,5	95	0,068
	240	10	140	0,071
	300	16	200	0,08

Tabelul 4. Dependența vitezei de avans de U și I

## 5 Utilizarea MathCAD pentru interpolare

Pentru valorile care nu sunt cuprinse în tabelul 4, determinarea lui  $V_e$  funcție de  $I$  se poate face folosind de exemplu interpolarea. Una din metodele foarte ușoare se bazează pe aplicația MathCAD, care presupune parcurgerea următorilor pași:

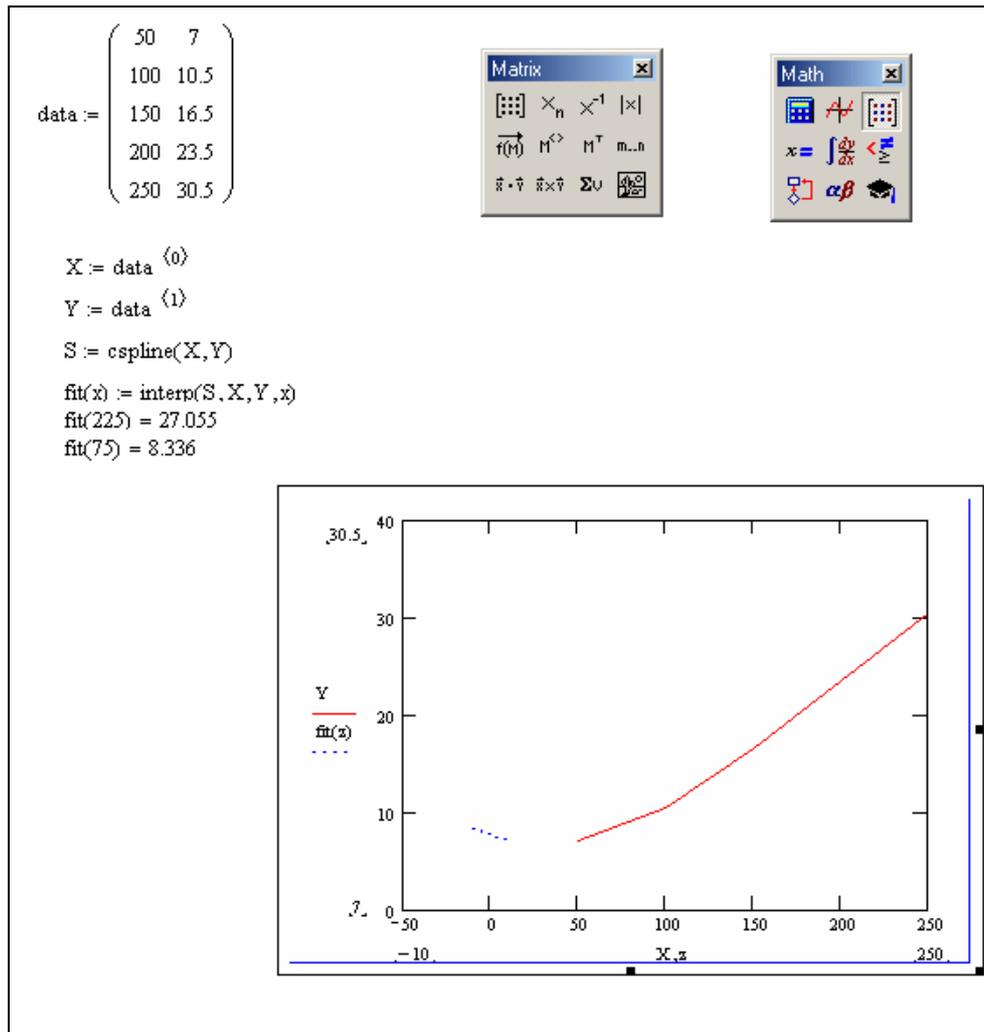


Figura 9. Interpolarea pentru obținerea valorilor funcției  $V_e$

- introducerea matricii cu  $n$  linii conținând pe prima coloană valorile cunoscute ale lui  $I$ , în ordine crescătoare, iar pe a doua coloană valorile corespunzătoare ale lui  $V_e$ ;

- determinarea parametrilor funcției de interpolare (de exemplu folosind interpolarea prin funcții spline [AND97]);
- calcularea valorii dorite într-un punct oarecare prin interpolare.

Un exemplu de utilizare este prezentat în figura 9 în care s-au ales valorile corespunzătoare lui  $U=26V$ ,  $L=25$  mm și pentru care s-au obținut prin interpolare valorile optime ale lui  $V_e$  pentru  $I=75A$  respectiv  $I=225A$ .

### Bibliografie

- [And97] **Gabriel Andrei** – *Metode numerice și algoritmi de modelare*, Editura EVRIKA, 1997
- [Her95] **Richard Ioan Emil Herman** - *Contribuții la optimizarea realizării fantelor prin eroziune electrică complexă. Teză de doctorat*, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1995
- [Kar00] **Tiberiu-Marius Karnyanszky** – *Domenii de aplicare a eroziunii electrice complexe. Referat doctorat nr. 1*, Universitatea Politehnica Timișoara, 2000
- [Kar01] **Tiberiu-Marius Karnyanszky, Aurel Nanu** – *A Study about the Complex Electric Erosion Processing Modelling*, Revista de Tehnologii Neconvenționale nr. 2/2001, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [Kar02] **Tiberiu-Marius Karnyanszky** – *Programe de utilizare optimală la prelucrarea prin eroziune electrică complexă. Referat doctorat nr. 3*, Universitatea Politehnica Timișoara, 2002
- [Pop70] **Vasile Popovici** - *Contribuții la studiul fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune electrică complexă. Teză de doctorat*, Institutul Politehnic Timișoara, 1970