

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘORA
FACULTATEA DE MECANICĂ

ing. Olariu Mircea Petru

OPTIMIZAREA TEHNOLOGICĂ LA
PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ
CU ELECTROD MASIV

teză de doctorat

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA BIBLIOTECA CENTRALĂ Nr. volum <u>620.532</u> După <u>366 Lit. A</u>

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

conducător științific
prof. dr. doc. șt. dhc. ing. Nanu Aurel Carol

1997

CUPRINS

1. INTRODUCERE	5
2. PRELUCRAREA DIMENSIONALĂ PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ.....	9
2.1. Procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv	11
2.2. Sistemul de acțiune tehnologică la prelucrarea prin eroziune electrică	13
2.3. Mărimi caracteristice ale procesului de prelucrare prin eroziune electrică	14
2.3.1. Factori primari ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică	15
2.3.1.1. Factori primari proveniți de la utilajul tehnologic	16
2.3.1.2. Factori primari proveniți de la elementele spațiului de lucru	25
2.3.2. Factori intermediari ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică	28
2.3.3. Factori finali ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică ..	31
2.4. Sinteză a cercetării experimentale din ultimii ani în domeniul eroziunii electrice cu electrod masiv	36
3. MODELAREA FENOMENELOR LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ	51
3.1. Premodelarea sistemului de prelucrare prin eroziune electrică	52
3.1.1. Premodelarea cu ajutorul metodei experimentului psihologic	53
3.1.2. Premodelarea cu ajutorul metodei bilanșului aleator	62

4	OPTIMIZAREA TEHNOLOGICĂ LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU ELECTROD MASIV
----------	---

<i>3.1.3. Premodelarea cu ajutorul metodei experimentului factorial</i>	63
3.2. Modelarea fizică a fenomenelor eroziunii electrice	70
3.3. Modelarea matematică a fenomenelor eroziunii electrice	74
<i>3.3.1. Modelarea matematică prin experimental clasic</i>	77
<i>3.3.2. Modelarea matematică prin experimentul activ</i>	79
4. OPTIMIZAREA PROCESELOR TEHNOLOGICE PE BAZA MODELĂRII MATEMATICE	110
4.1. Optimizarea pe baza modelelor de decizii multicriteriale multiobiectiv	111
<i>4.1.1. Verificarea analitică și experimentală a rezultatelor optimizării</i>	128
4.2. Optimizarea pe baza modelelor de decizii multicriteriale multiatribut ..	132
<i>4.2.1. Modele de decizii multiatribut fără informații</i>	136
<i>4.2.2. Modele de decizii multiatribut cu informații asupra criteriilor</i>	139
4.2.2.1. Modele cu informații exprimate prin nivele standard	140
4.2.2.2. Modele cu informații exprimate prin preferințe ordinale	141
4.2.2.3. Modele cu informații exprimate prin preferințe cardinale	144
4.2.2.4. Modele cu informații asupra criteriilor dependente	151
<i>4.2.3. Modele de decizii multiatribut cu informații asupra variantelor</i> ...	155
4.3. Determinarea variantei optime prin metoda agregării de clasamente ...	158
<i>4.3.1. Raționalitatea metodelor de agregare</i>	162
4.3.1.1. Raționalitatea metodelor de agregare tip Borda	163
4.3.1.2. Raționalitatea metodelor de agregare folosite de experimental psihologic	164
5. CONCLUZII	167
6. BIBLIOGRAFIE	173
7. ANEXE	186

1. INTRODUCERE

“**Optim** - cel mai bun sau foarte bun; **Optimizare** - alegerea și aplicarea soluției optime dintre mai multe soluții posibile” [22.] sunt două noțiuni care par a avea vârsta omenirii. Chiar dacă nu conștient, omul a încercat întotdeauna să găsească noi soluții unei probleme, care să fie mai bune decât cele vechi, existente, această tendință continuă de autodepășire fiind cheia progresului umanității.

Conceptul de “optimizare” nu este legat strict de tehnică, ci apare în orice domeniu de activitate umană. În sens mai restrâns, în domeniul tehnico-economic, problema optimizării se pune în momentul în care un produs poate fi realizat prin mai multe metode sau procedee. Procesul tehnologic optim este acel proces, din mulțimea proceselor tehnologice posibile, prin care se asigură obținerea produsului dorit, cu efort minim de consumuri de energie, forță de muncă, materiale și mijloace tehnice, cu efecte maxime de economicitate, calitate, tehnologicitate și siguranță în funcționare. În alegerea procesului tehnologic optim concurează două categorii de factori inițiali: invariabili - de scop, de program și de potențial, - care răspund la întrebările “ce?”, “cât?”, “până când?”, “cu ce?” și variabili - determinați de calea urmată, - care răspund la întrebarea “cum?”.

Simpla încercare de a răspunde la aceste întrebări poate da o imagine despre mărimea și dificultatea domeniului abordat. Încercând a îngusta domeniul, referindu-ne doar la eroziunea electrică cu electrod masiv și, ținând cont de multitudinea fenomenelor elementare

6	OPTIMIZAREA TEHNOLOGICĂ LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU ELECTROD MASIV
----------	---

ce se constituie în procesul eroziv, optimizarea procesului nu pare a fi o întreprindere mai puțin dificilă.

Dacă, din punct de vedere tehnic, "bun" poate fi declinat la superlativul relativ: "foarte bun", din punct de vedere matematic, el nu poate fi declinat decât la superlativul absolut: "cel mai bun". Aceasta înseamnă că, rezolvarea unei probleme de optimizare trebuie să conducă la o soluție, care nu este suficient să fie foarte bună, ci trebuie să fie cea mai bună dintre toate variantele posibile.

Orice problemă de optimizare, se rezolvă, la modul principal, parcurgând următoarele etape [13.], [53.], [79.], [121.], [133.], [134.]:

- culegerea informațiilor referitoare la procesul analizat;
- elaborarea modelului matematic;
- verificarea modelului matematic;
- determinarea soluției optime și aplicarea ei.

Această etapizare a stat la baza structurării tezei de doctorat. Astfel, după capitolul 1, care definește tema lucrării, în capitolul 2 este prezentat procedeul de prelucrare dimensională a materialelor metalice prin eroziune electrică cu electrod masiv. Procedeul este abordat ca un sistem de acțiune tehnologică, evidențiindu-se elementele intrare ale sistemului (factori independenți, parametrii procesului), precum și elementele ieșire (factori dependenți, funcții obiectiv, indicatori de performanță). În finalul capitolului, se face o sinteză a cercetării experimentale din ultimii ani, din domeniul studiat, exemplificându-se relațiile dintre elementele intrare și cele ieșire ale sistemului, în anumite cazuri concrete. Aceste interdependențe sunt prezentate sub formă grafică (curbe de variație, cu 1, 2 sau 3 parametri) sau sub formă analitică (ecuații polinomiale de gradul 1 sau mai mare).

Capitolul 3 are drept obiect, modelarea fenomenelor ce stau la baza eroziunii electrice. Numărul foarte mare de factori de influență, face necesară o etapă anterioară modelării propriu-zise: premodelarea, care stabilește factorii cu influență majoră în sistem. Odată selecționați acești factori, se urmărește influența pe care o au aceștia, asupra unor indicatori de performanță mai importanți. Modelarea matematică a eroziunii electrice este abordată, atât pe baza experimentului clasic (strategia Gauss - Seidel: "un factor, la un moment dat"), cât și pe baza experimentului activ (strategia Box - Wilson: "toți factorii, în fiecare moment").

Capitolul 4 tratează problema de fond a tezei: optimizarea. Aceasta se face în două situații distincte: pe baza modelelor de decizii multiobiectiv, când se "construiește" varianta optimă, dintr-o infinitate de variante teoretic posibile, ținând seama de un anumit obiectiv

urmărit, și, pe baza modelelor de decizii multiatribut, când se selectează varianta optimă, dintr-o mulțime finită de variante existente, ținând cont de mai multe criterii de apreciere a variantelor. Se discută conceptul de "raționalitate" și se urmărește în ce măsură, metodele de optimizare folosite sunt raționale. Se face o verificare practică a teoremei lui Arrow, care afirmă imposibilitatea existenței unor metode raționale de agregare.

Capitolul 5 este desemnat pentru prezentarea concluziilor finale, comparându-se rezultatele obținute cu diferitele metode de optimizare. De-asemenea, se subliniază contribuțiile originale ale autorului, atât în domeniul cercetării fundamentale, cât și în cel al cercetării aplicative. Se sintetizează un algoritm generalizat, pentru optimizarea eroziunii electrice cu electrod masiv.

Lista bibliografică este prezentată în capitolul 6. Ea cuprinde 144 de titluri (în limbile română, engleză, franceză, germană și rusă), 36 dintre ele fiind lucrări proprii ale autorului (16 redactate singur, iar 20, în colaborare).

Ultimul capitol, al 7-lea, prezintă, drept anexă, reprezentări grafice de diferite tipuri: histograme ale efectelor, suprafețe de răspuns cu doi factori de influență, curbe de nivel constant etc.

Teza de doctorat cuprinde 222 pagini, 250 figuri, 28 tabele și 207 relații matematice, structurate în cele 7 capitole. Redactarea computerizată s-a efectuat folosind programul *Word 6* [23.], [32.], iar reprezentările grafice, cu ajutorul unor programe specializate: *Quattro Pro* [36.], *MATLAB* [30.], [49.] și *STATGRAPHICS* [79.].

Autorul consideră această teză de doctorat ca o modestă contribuție în domeniul optimizării eroziunii electrice, conștient de faptul că lucrarea nu epuizează posibilitățile de optimizare a procesului electroeroziv, ci, mai degrabă, deschide câteva noi direcții de cercetare în domeniu.

Autorul aduce, pe această cale, cele mai sincere mulțumiri conducătorului științific, **prof. dr. doc. șt. dnc. ing. Aurel Nanu**, căruia îi datorează formarea sa, ca cercetător și cadru didactic. De-asemenea, aduce mulțumiri colectivului Catedrei Tehnologie mecanică din cadrul Facultății de Mecanică a Universității "Politehnica" din Timișoara, care l-a ajutat nu numai direct la elaborarea tezei, ci și indirect, degrevându-l de unele responsabilități, în perioada finală a redactării ei.

La sfârșit, dar nu în ultimul rând, autorul mulțumește familiei sale, care a știut să-l impulsioneze și să-l încurajeze, în dese momente de îndoială și incertitudine ivite pe

parcursul elaborării tezei și să-l menajeze în celelalte momente, când timpul dedicat lucrului era răpit din cel al familiei.

2. PRELUCRAREA DIMENSIONALĂ PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ

Tehnologiile clasice, convenționale au devenit inoperante în cazul prelucrării unor materiale cu proprietăți specifice excepționale, în cazul prelucrării unor suprafețe cu configurații geometrice deosebit de complexe sau în cazul prelucrărilor microdimensionale. Aceste situații au condus la apariția unor noi metode și procedee de prelucrare a materialelor metalice, cunoscute sub numele generic de *“tehnologii neconvenționale”*. Între aceste metode se numără prelucrarea dimensională prin eroziune, cu cel mai vechi și răspândit procedeu, eroziunea electrică.

Procesele erozive sunt definite ca procese de distrugere a integrității straturilor de suprafață ale obiectului supus prelucrării prin acțiuni determinate de un agent eroziv. Energia conținută de agentul eroziv (energie electrică, electromagnetică, chimică, electrochimică, termică sau mecanică) se transformă în energie de distrugere, care poate fi de natură chimică, termică sau mecanică (fig. 2.1.) [68.], [125.]. În funcție de natura predominantă a energiei distructive, mecanismul elementar de distrugere erozivă prezintă fenomene ce au la bază topirea, vaporizarea sau sublimarea unor microvolume de material, ruperi de material în straturile de suprafață, coroziune sau combinații ale acestora.

Zona de interacțiune OP-OT

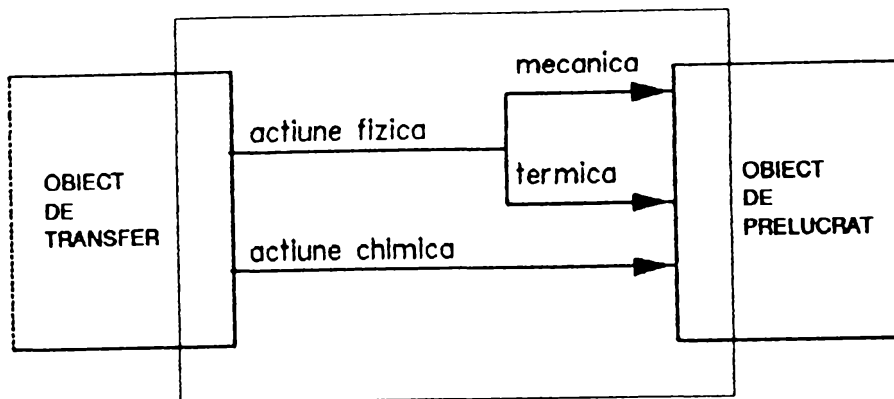


fig. 2.1. Zona de interacțiune dintre obiectul supus prelucrării și agentul eroziv

Clasificarea procedeeelor de prelucrare dimensională prin eroziune, după natura agentului eroziv, este prezentată în tab. 2.1.

Clasificarea procedeeelor de prelucrare prin eroziune

tab. 2.1.

nr. crt.	procedeeul de prelucrare dimensională prin eroziune	agentul eroziv
1.	eroziune electrică	descărcare electrică în impuls
2.	eroziune chimică	substanță chimică activă
3.	eroziune electrochimică	electrolit în câmp electric
4.	eroziune complexă	descărcare electrică și electrolit în câmp electric
5.	eroziune cu plasmă	arc sau jet de plasmă
6.	eroziune cu radiații	radiație corpusculară sau electromagnetică
7.	eroziune abrazivo-cavitațională	suspensie abrazivă și bulă cavitațională

Aceste procedee de prelucrare dimensională prin eroziune au următoarele caracteristici comune [64.], [68.]:

- influența proprietăților mecanice ale materialului obiectului de prelucrat este de importanță secundară;

- cinematica generării suprafețelor este relativ simplă;

- simultan cu modificarea formei obiectului de prelucrat au loc și modificări ale proprietăților materialului din straturile de suprafață ale obiectului de prelucrat;
- procedeele de prelucrare se pot ușor mecaniza și automatiza.

2.1. Procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv

Prelucrarea prin eroziune electrică este o metodă de prelucrare dimensională, la care îndepărtarea surplusului de material se face pe baza efectelor erozive ale descărcărilor electrice în impuls, amorsate în mod repetat între obiectul de prelucrat și un electrod de transfer al energiei [4.], [64.], [68.], [82.], [124.], [137.] (fig. 2.2.).

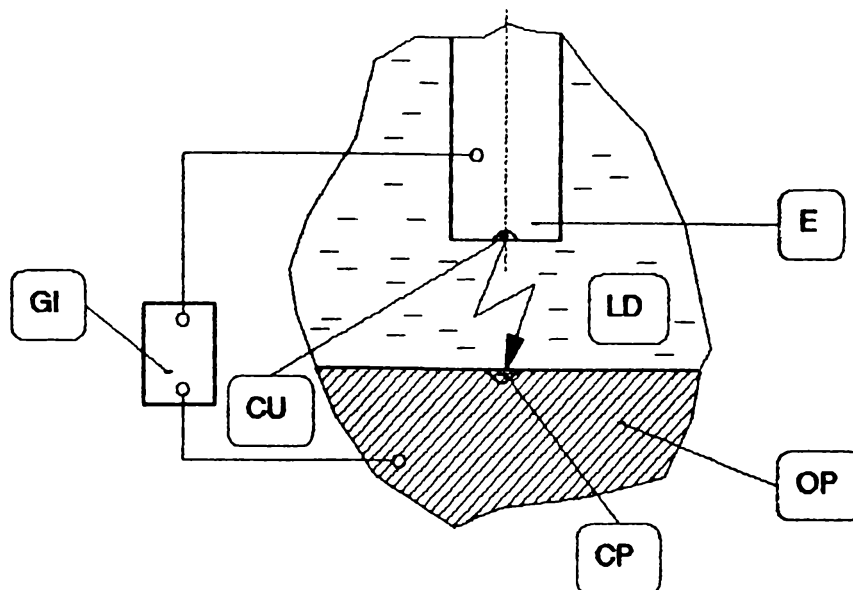


fig. 2.2. Schema de principiu a prelucrării prin eroziune electrică

Obiectul de prelucrat, OP și electrodul E, imersionați în lichidul dielectric LD, sunt alimentați de la un generator de impulsuri, GI, care este sursa de tensiune. Dacă intensitatea câmpului electric dintre electrozii E și OP este mai mare decât rigiditatea locală a dielectricului, apare o descărcare electrică între cei doi electrozi. Transformarea energiei electrice, prin dozarea ei, temporală și spațială, în energie de efect, are ca urmare formarea craterelor de prelevare, CP din OP, respectiv, a craterelor de uzare, CU, din E. Migrarea în timp și spațiu a acestor procese elementare de eroziune pe întreaga suprafață a OP, are ca efect prelucrarea suprafeței acestuia, prin îndepărtarea surplusului de material. În paralel, fenomene asemănătoare ce se desfășoară la suprafața E, conduc la uzarea lui.

O descărcare electrică trece prin 4 stadii succesive în timp:

- descărcare luminescentă, care se caracterizează prin cădere mare de tensiune între electrozi, curent mic și durată foarte redusă (10^{-9} s);
- descărcare în scântei, cu căderi de tensiune de ordinul sutelor de volți și durate de ordinul 10^{-6} s;
- descărcare în scântei - arc, cu tensiuni de ordinul zecilor de volți și durate de timp mai mici de 10^{-4} s;
- descărcare în arc, staționar sau nestaționar.

Pentru ca prelucrarea să fie posibilă este necesar a se îndeplini, simultan, mai multe condiții fizice:

- Energia electrică trebuie introdusă direct la suprafața OP. Pentru aceasta, este necesar ca materialele OP și E să fie electroconductoare.
- Energia electrică introdusă în zona de interacțiune OP - E, trebuie să fie dozată temporal, sub formă de impulsuri. Condiția este impusă de necesitatea localizării efectului eroziv și dirijării prelevării de material.
- Descărcările electrice în impuls trebuie să aibe un caracter polarizat. Scopul acestei condiții este ca îndepărtarea de material de pe suprafața OP să fie mult mai intensă decât cea de pe suprafața E. Fenomenul se poate dirija prin conectarea OP și E la polaritățile corespunzătoare (la timpi de impuls scurt, este preponderent curentul electronic, pe când la timp lung, componenta ionică a curentului este dominantă), utilizarea, ca electrozi, a unor materiale cu rezistență la eroziune ridicată, formarea pe suprafața E, a unei pelicule protectoare.

• Starea inițială a interstițiului dintre OP și E trebuie refăcută continuu, în vederea păstrării condițiilor disruptive. În acest scop, produselor eroziunii din interstițiul OP - E, trebuie să li se asigure evacuarea din zonă.

2.2. Sistemul de acțiune tehnologică la prelucrarea prin eroziune electrică

Prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod masiv, ca și oricare metodă sau procedeu de prelucrare dimensională a materialelor metalice, poate fi privită ca un sistem de acțiune tehnologică. Abordată sistemic [132.], [135.], eroziunea electrică prezintă cele trei categorii cunoscute de factori (fig. 2.3.):

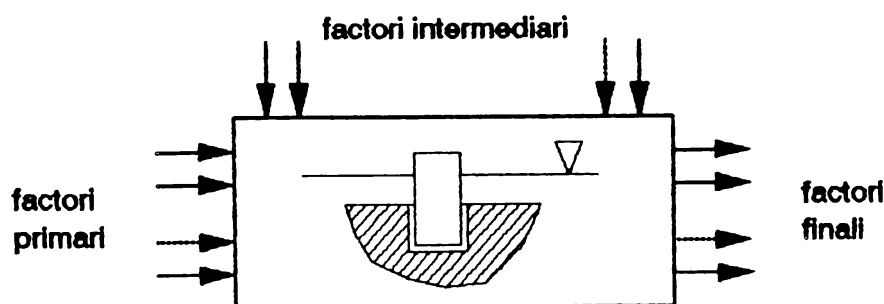


fig. 2.3. Eroziunea electrică - sistem de acțiune tehnologică

- factori primari (mărimi intrare), care reprezintă acțiunile mediului asupra sistemului;
- factori intermediari (mărimi de proces), care sunt reprezentați de transformarea propriu-zisă;
- factori finali (mărimi ieșire), care reprezintă răspunsul acțiunii asupra mediului, concretizați prin caracteristici tehnologice, tehnice și economice.

2.3. Mărimi caracteristice ale procesului de prelucrare prin eroziune electrică

Mărimile intrare în sistem sunt reprezentate de factorii de influență, considerați ca variabile independente. Factorii de influență au domenii de existență bine determinate, continue sau discrete. În primul caz, se vor selecta din mulțimea domeniului de existență, submulțimi de nivele discrete adecvate scopului urmărit.

Elementele mulțimii mărimilor intrare în sistem trebuie să satisfacă următoarele cerințe [79.]:

- să fie independente, adică să poată fi comandate la orice nivel al domeniului de existență, independent de nivelele celorlalți factori de influență;
- să fie compatibile, adică să permită realizarea oricăror combinații a nivelelor factorilor, în condiții de funcționare normală a sistemului;
- să fie controlabile, adică să poată fi măsurate, reglate și menținute la nivelele programate;
- să exercite o influență directă și univocă asupra stării comportamentului sistemului cercetat.

Elementele de ieșire din sistem sunt reprezentate de către funcțiile de răspuns. Și elementele acestei mulțimi trebuie să îndeplinească anumite cerințe [79.]:

- să caracterizeze cuprinzător esența sau eficiența sistemului cercetat, iar în cazul modificării acestuia în timp, trebuie să se modifice corespunzător și valorile funcțiilor de răspuns;
- să poată fi exprimate cantitativ, prin asocierea unui număr pentru toate stările sistemului cercetat, mulțimea valorilor funcției de răspuns, reprezentând domeniul ei de definiție, continuu sau discret;
- să aibe un caracter univoc, adică, unei stări a sistemului determinată de un set al valorilor factorilor independenți, să-i corespundă funcției de răspuns o singură și unică valoare;

- să aibe o semnificație fizică clară, să fie cât mai simplu și mai ușor de calculat din punct de vedere matematic;
- să poată fi determinate cu o precizie cât mai mare, superioară erorii de experimentare.

2.3.1. Factori primari ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică

Factorii primari ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv, pot fi repartizați în opt grupe (fig. 2.4.) [3.], [6.], [78.]:

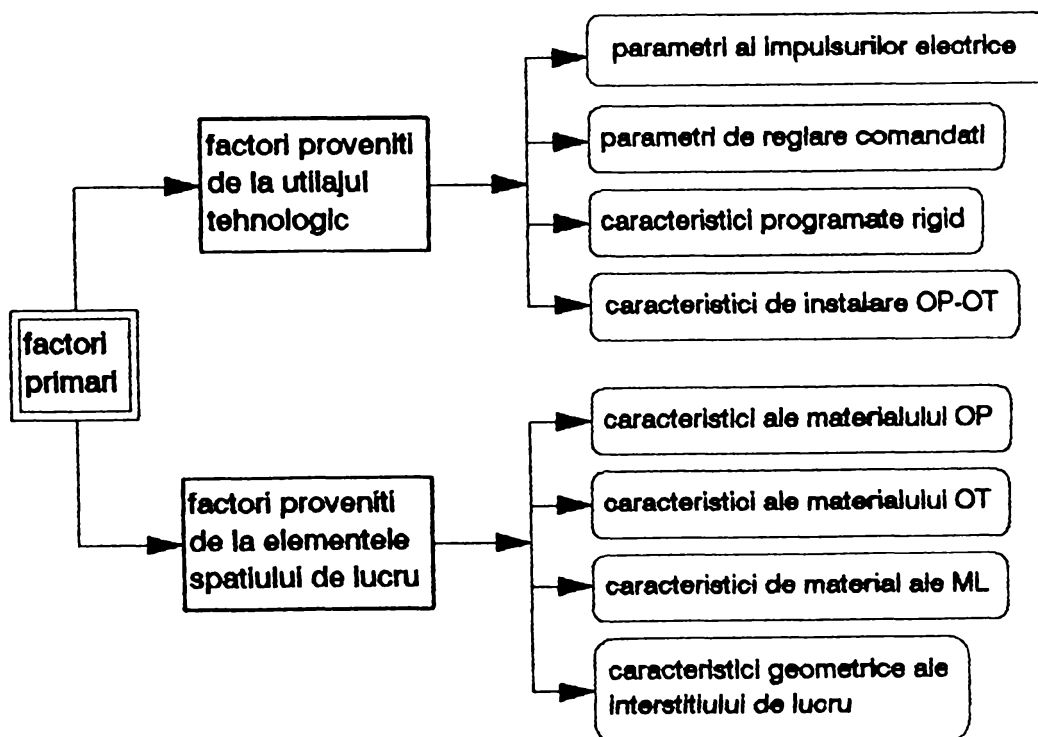


fig. 2.4. Factori primari ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică

- parametri ai impulsurilor electrice;
- parametri de reglare comandați de la utilajul tehnologic;

- caracteristici programate rigid la echipamentul de circulație a lichidului de lucru și cele de acționare suplimentară a electrodului, obiect de transfer al energiei;
- caracteristici de instalare obiect de prelucrat - electrod;
- caracteristici ale materialului obiectului de prelucrat;
- caracteristici ale materialului obiectului de transfer al energiei;
- caracteristici de material ale mediului de lucru;
- caracteristici geometrice ale interstițiului de lucru.

Primele patru grupe fac parte din categoria factorilor proveniți de la utilajul tehnologic, iar ultimele patru grupe fac parte din categoria factorilor proveniți de la elementele spațiului de lucru.

2.3.1.1. Factori primari proveniți de la utilajul tehnologic

Principala grupă a acestei categorii de factori primari o constituie parametrii electrici ai impulsurilor de tensiune și curent [2.].

Parametri ai impulsurilor electrice

Caracteristica dinamică a unei descărcări electrice în impuls, este prezentată în fig. 2.5. Parametrii electrici, conform notațiilor din fig. 2.5., sunt:

- tensiunea de mers în gol, U_0 [V], este tensiunea aplicată de generator pe spațiul dintre E și OP;
- tensiunea descărcării, U_d [V], este valoarea tensiunii, practic constantă, pe durata impulsului de curent;
- amplitudinea impulsului de curent, I_d [A];
- timpul de amorsare, t_a [μ s], este timpul scurs din momentul aplicării impulsului de tensiune, până în momentul stabilizării curentului. El este alcătuit din:
 - timpul de întârziere, t_i [μ s], este timpul scurs din momentul aplicării impulsului de tensiune, până în momentul apariției impulsului de curent. Are caracter aleator, pregătind condițiile străpungerii.

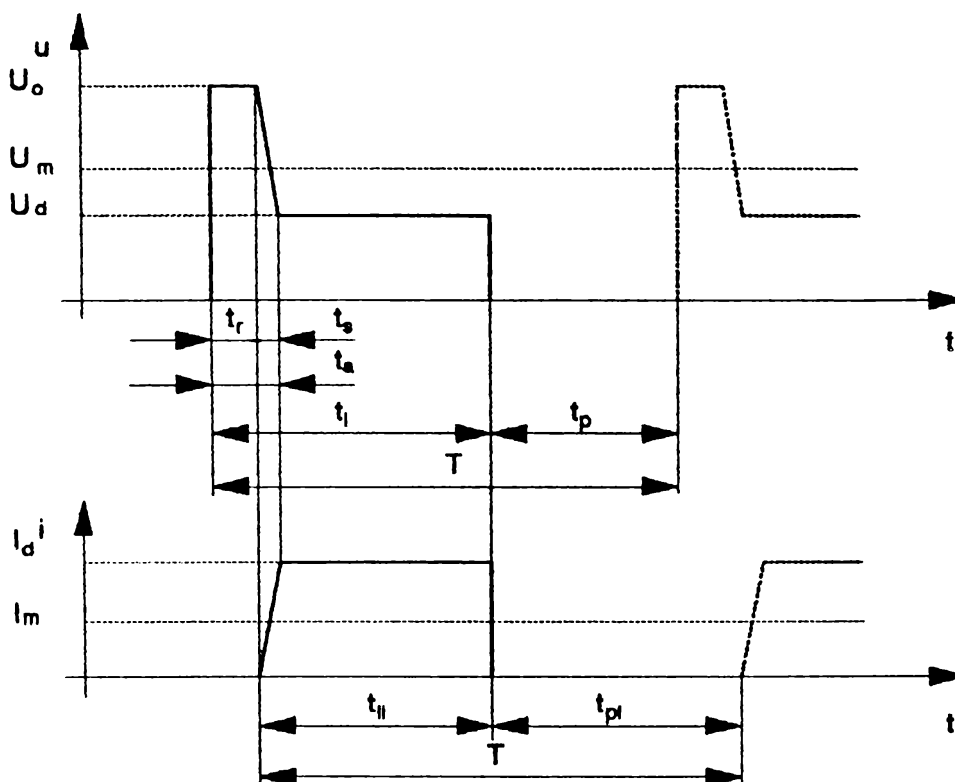


fig. 2.5. Caracteristica dinamică a unei descărcări electrice în impuls

• timpul de străpungere, t_s [μs], timp în care are loc scăderea tensiunii de la valoarea de mers în gol, la cea a descărcării, respectiv, în care are loc creșterea curentului, de la valoarea zero, la cea a descărcării;

- durata impulsului de tensiune, t_i [μs];
- durata impulsului de curent, t_{pi} [μs];
- durata pauzei dintre impulsurile de tensiune, t_p [μs];
- durata pauzei dintre impulsurile de curent, t_{pi} [μs];
- perioada impulsurilor, T [μs];

$$T = t_i + t_p = t_{pi} + t_{pi} \quad (2.1)$$

Se definesc:

- frecvența impulsurilor, f [Hz];

$$f = \frac{1}{T}; \quad (2.2)$$

- coeficientul de umplere a impulsurilor de tensiune, K [-]:

$$K = \frac{t_v}{T} = t_v \cdot f; \quad (2.3)$$

- coeficientul de umplere a impulsurilor decurent, K_i [-]:

$$K_i = \frac{t_u}{T} = t_u \cdot f; \quad (2.4)$$

- tensiunea medie pe spațiul de lucru, U_m [V]:

$$U_m = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt; \quad (2.5)$$

- curentul mediu prin interstițiu, I_m [A]:

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt; \quad (2.6)$$

unde $u(t)$ și $i(t)$ reprezintă legile de variație în timp a tensiunii și curentului în spațiul de lucru, pe durata unei perioade.

- energia unui impuls electric, W_m [J]:

$$W_m = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt. \quad (2.7)$$

Nu toate descărcările, însă, sunt descărcări normale, de lucru. Astfel pot să apară descărcări în gol, descărcări fictive, descărcări în scurtcircuit și descărcări în gaze (fig. 2.6. și fig. 2.7.):

- descărcarea normală (fig. 2.6.a), când intensitatea câmpului electric $E = U/d \geq E_s$, rigiditatea dielectrică a mediului de lucru. Aceste descărcări conduc la apariția impulsurilor de prelevare de material, dacă apar între OP și OT (fig. 2.7.a₁) sau la apariția impulsurilor de mărunțire dacă apar între OT și materialul prelevat anterior, staționat în interstițiu, în contact, de obicei, cu OP (fig. 2.7.a₂);

- descărcarea în gol (fig. 2.6.b), când intensitatea câmpului electric $E < E_s$, rigiditatea dielectrică a mediului de lucru. Impulsul de tensiune nu este însoțit de impuls de curent, care poate fi considerat, practic, nul, $I_g \approx 0$. Această situație poate să apară, fie din cauza interstițiului prea mare ($U/d_1 < E_s$; $d_1 > d$, fig. 2.7.b), fie din cauza tensiunii care nu atinge valoarea de amorsare a descărcării. În ambele cazuri, efectul este același, neapărând prelevare de material.

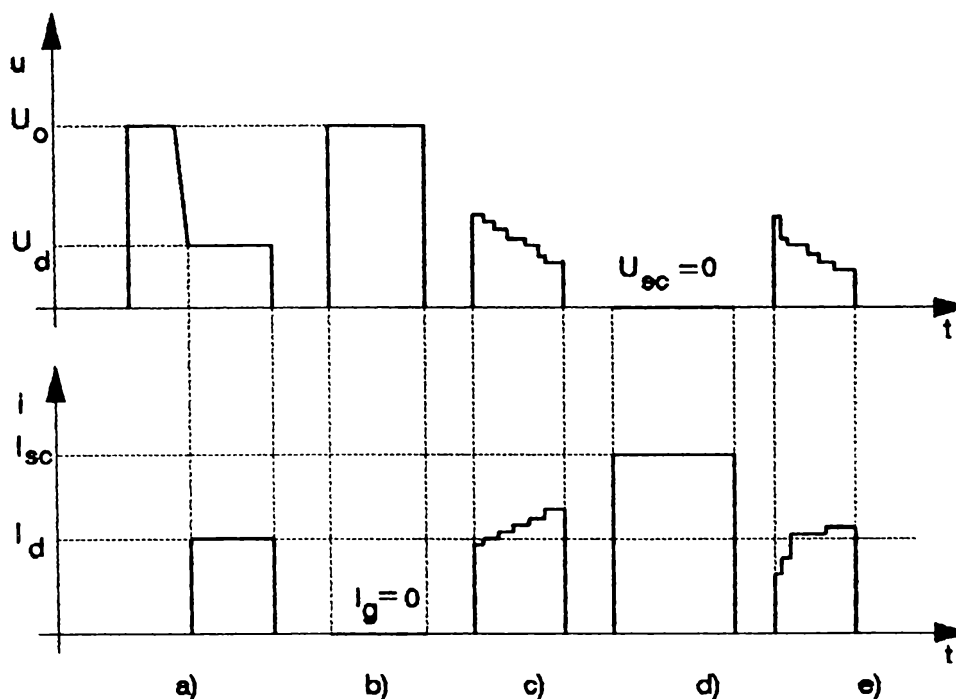


fig. 2.6. Caracteristici dinamice ale diferitelor tipuri de descărcări electrice în impuls

- descărcarea fictivă în mediul de lucru (fig. 2.6.c), care nu prezintă tensiune de amorsare distinctă. Apar curenți de conducție prin punți conductoare (fig. 2.7.c), care, cu toate valorile lor mari, sunt fără efect eroziv.

- descărcarea în scurtcircuit (fig. 2.6.d), la care valoarea curentului de scurtcircuit, I_{sc} , este mult mai mare decât cea necesară prelevării, iar tensiunea de scurtcircuit, poate fi considerată nulă: $U_{sc} \approx 0$. Scurtcircuitul apare la contactul dintre OP și OT, fie direct (fig. 2.7.d₁), fie prin intermediul particulelor prelevate, PP (fig. 2.7.d₂).

- descărcarea în gaz (fig. 2.6.e), în zone ale interstițiului ocupate cu gaz neevacuat (fig. 2.7.e). Descărcarea se apropie de cea caracteristică arcului staționar, efectele erozive fiind reduse.

Perfecționarea producției de utilaje, precum și adâncirea studiilor teoretice, au permis conceperea unor structuri ale impulsurilor diferite de cele clasice, dreptunghiulare (fig.2.8.).

La începutul unei descărcări electrice, intensitatea termică și, prin urmare, îndepărtarea de material, afectează mai mult anodul, deoarece predomină curentul electronic. Prin urmare,

impulsurile cu început rampă și palier constant (fig. 2.8.b) și cele cu început în trepte și palier constant (fig. 2.8.c), păstrează la un nivel scăzut valoarea începutului impulsului.

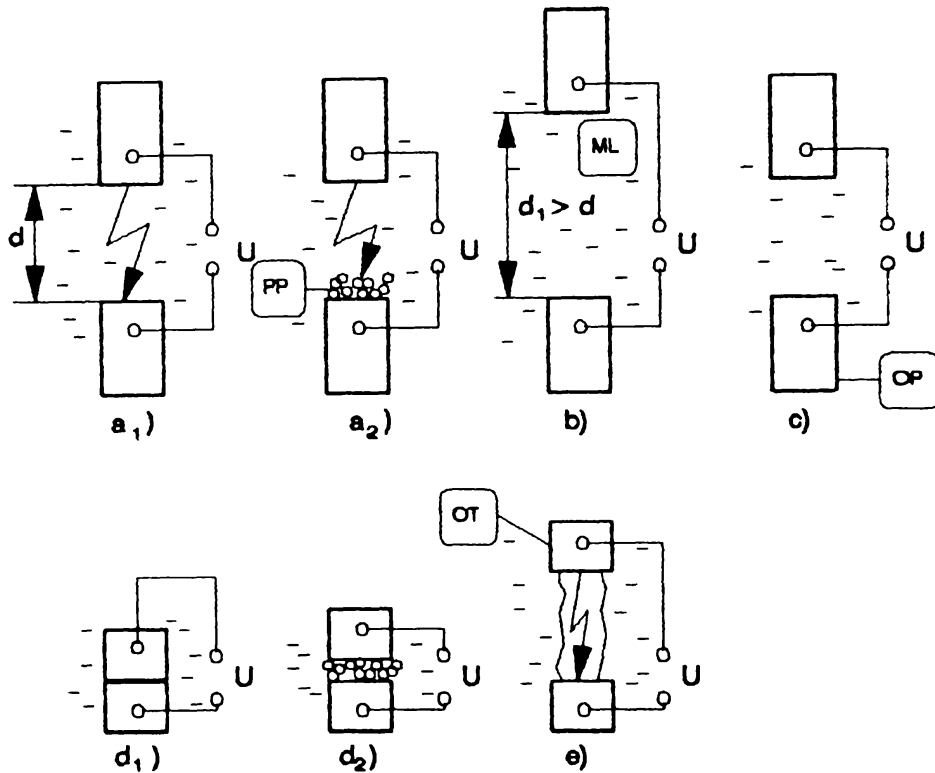


fig. 2.7. Tipuri de descărcări electrice în impuls

Pentru îmbunătățirea condițiilor de evacuare a microproduselor eroziunii din spațiul de lucru, palierul constant al impulsurilor cu început în trepte, se poate diviza în mai mulți dinți, sub formă de pieptene (fig. 2.8.d) [20.]. Același efect asupra evacuării produselor erodate în afara interstițiului tehnologic, îl au și trenurile de impulsuri de tensiune dreptunghiulare, care urmează, periodic, impulsurile de prelevare (fig. 2.9.) [78.].

Modificarea ponderii componentelor electronice și ionice ale curentului electric în bilanțul energetic, a stat la baza conceperii unei alte structuri a impulsului de curent: impulsuri bipolare (fig. 2.10.) [17.]. Aceste impulsuri constă dintr-un curent care schimbă polaritatea: la începutul fiecărei descărcări, o durată de timp t_1 , electrodul este catod, iar după aceea, pentru o durată $t_2 > t_1$, electrodul devine anod.

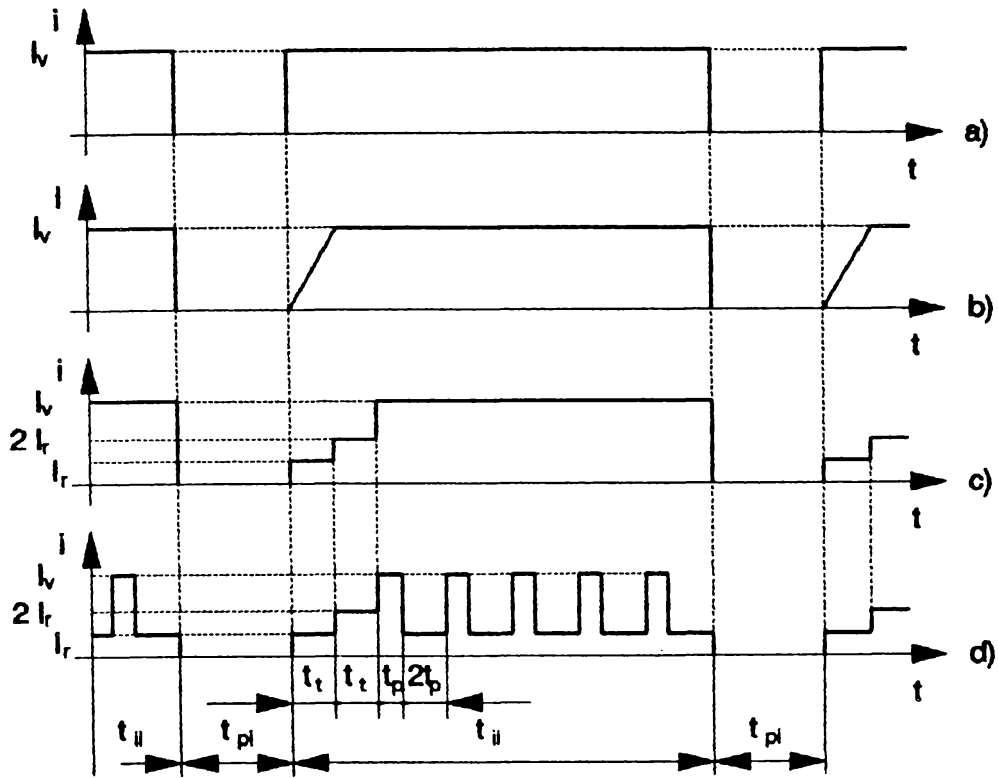


fig. 2.8. Variante de descărcări electrice în impuls

De altfel, efectul de polaritate impune alegerea, nu numai a formei impulsurilor și, implicit, a tipurilor de generatoare, ci și a duratei impulsurilor. Utilizând un generator de

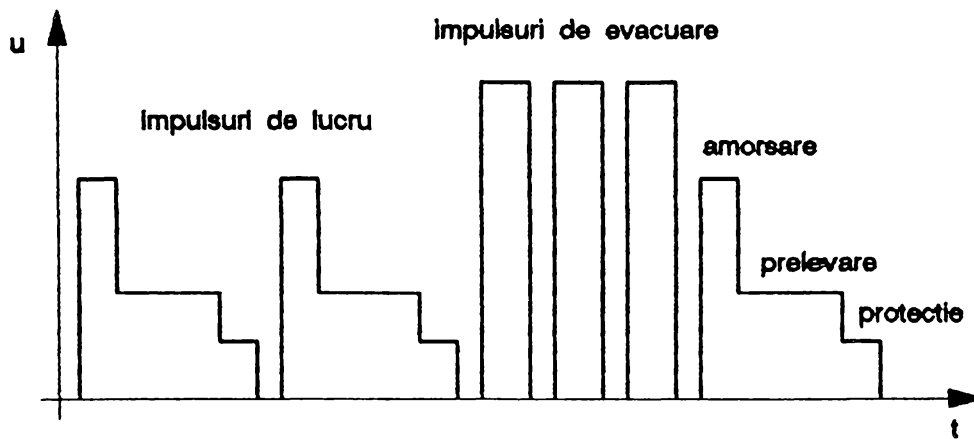


fig. 2.9. Structura cuadripuls a impulsurilor de tensiune

relaxare, care produce impulsuri cu durate foarte mici, se obișnuiește ca obiectul de prelucrat să fie anod, pe când la generatoarele de impulsuri controlate, care produc, de regulă, impulsuri cu durată mai mare, electrodul este anod.

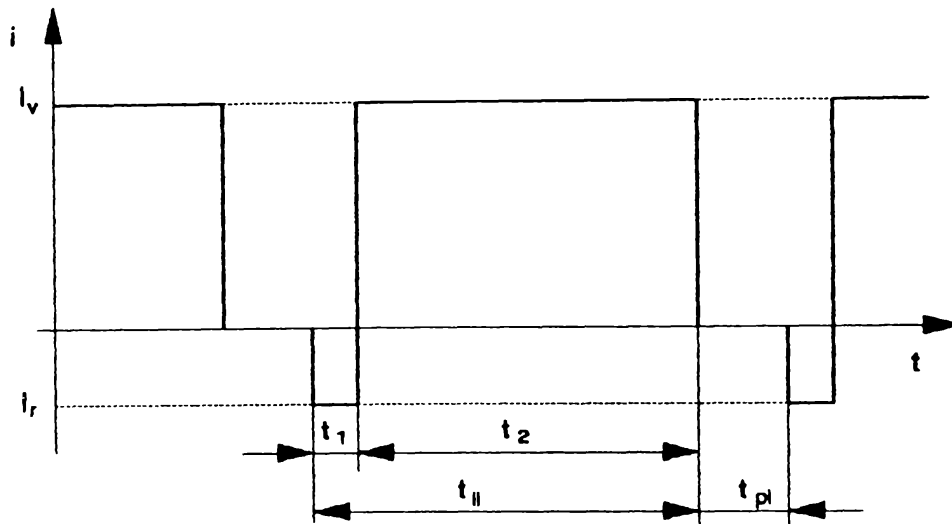


fig. 2.10. Impulsuri bipolare

Parametri de reglare comandați

Din această grupă fac parte două categorii de factori. Prima categorie este constituită din parametrii comandați ai regimului de prelucrare, de către generatorul de impulsuri. Din mulțimea parametrilor electrice prezentați anterior, sunt reglabili prin pupitrul de comandă al generatorului, tensiunea de mers în gol, U_0 , treapta de curent, I , durata impulsurilor de tensiune, t_1 și durata pauzei dintre impulsurile de tensiune, t_p .

O a doua categorie de parametri de reglare comandați este alcătuită de către cei ai sistemului de reglare automată a avansului, SRA. În timpul procesului eroziv, obiectul de prelucrat se prelevează, electrodul - OT se uzează, rezultând o creștere treptată a distanței dintre electrozi, deci o creștere a interstițiului, până la valori ce nu mai permit amorsarea unor noi descărcări. SRA are rolul de a asigura deplasarea relativă OP - OT, astfel încât mărimea interstițiului să fie menținută sub valoarea distanței disruptive. Există mai multe criterii de clasificare a SRA. Astfel, conform [31.], [50.], după criteriul funcției specifice pe care o realizează sistemul, se cunosc:

- SRA stabilizatoare;

- SRA de urmărire;
- SRA cu comandă program;
- SRA optimale;
- SRA extreme;
- SRA adaptive.

După criteriul privind structura elementelor de preluare a informațiilor și a elementului de execuție, se cunosc:

- SRA electromecanice, cu elemente de execuție solenoidale;
- SRA electromecanice, cu elemente de execuție motoare electrice pas cu pas;
- SRA electromecanice, cu elemente de execuție motoare electrice de curent continuu;
- SRA electrohidraulice [37.], [128.].

Fiecare dintre aceste SRA are mărimi caracteristice proprii, însă, indiferent de construcția lor, din punct de vedere a parametrilor de reglare comandați, interesează gama de reglare, sensibilitatea și viteza de reacție, precum și stabilitatea sistemului de avans [60.], [62.]. Din gama de reglare a parametrilor SRA, cel mai important element este viteza de avans v_a . Acest parametru poate lua orice valoare într-un interval prestabilit [v_0 , v_{max}]. Limita inferioară este $v_0 = 0$, iar limita superioară este necesar a se atinge, în două cazuri: pentru poziționarea relativă OP - OT, înaintea procesului eroziv propriu-zis și, în cazurile în care, datorită unor stări accidentale din proces, este necesară îndepărtarea relativă OP - OT. Valorile intermediare sunt necesare pentru a se asigura viteza liniară de eroziune în timpul procesului eroziv propriu-zis:

$$v_a = v_{OP} + v_{OT}. \quad (2.8.)$$

De obicei, din cauza dimensiunilor relativ mari, obiectul de prelucrat este fixat pe masa mașinii, $v_{OP} = 0$. În această situație, viteza de avans este obținută numai prin deplasarea electrodului - OT, $v_a = v_{OT}$.

Viteza de reacție sau rapiditatea de răspuns, se definește drept decalajul temporal dintre momentul aplicării semnalului urmărit - standard și momentul modificării poziției relative OP - OT. Este necesar ca acest decalaj, Δt , din bucla de proces - decizie - acțiune, să fie cât mai redus, asigurându-se, astfel, stabilitatea procesului [61.].

Prin stabilitatea SRA, se înțelege capacitatea sistemului de a asigura un regim staționar procesului, fie prin realizarea lui, fie prin readucerea lui în starea staționară, dacă au intervenit acțiuni perturbatoare. Într-un caz particular, SRA-I [50.], [59.], se definesc patru mărimi de reglare a SRA:

- *frecvența de reglare a sistemului de execuție, f_r [Hz];*
- *constanta de integrare a proceselor elementare de scurtcircuit, T_s [ms];*
- *durata de ștergere limitată a informației memorate, T_F [μ s];*
- *timpul de referință a duratei de întârziere la amorsarea descărcării, T_R [μ s].*

Caracteristici programate rigid la echipamente

O primă categorie de caracteristici programate rigid la echipamente, o constituie caracteristicile de acționare a electrozului - OT. Astfel, conform [65.], [78.], mișcarea de avans automat poate fi liniară (unidirecțională, bidirecțională [138.], [139.] și tridirecțională [40.], [73.]) sau circulară [44.], [58.]. În afara mișcării de avans automat, pentru generarea suprafeței, în unele cazuri, sunt necesare și alte mișcări relative OP - OT. Mișcările relative suplimentare pot fi:

- rotație în jurul axei proprii;
- translație circulară cu excentricitate fixă sau variabilă [46.], [48.];
- rotire orbitală cu axe paralele [29.] sau înclinate;
- translație unidirecțională [28.] sau bidirecțională.

Funcție de mișcările concrete pe care trebuie să le realizeze electrozului - OT (vibrări, rotații, relaxări etc.), la echipamentele de acționare suplimentară a electrozului, se programează diferiți parametri: *amplitudinea, A [mm] și frecvența vibrației f [Hz], turația, n [1/min] și excentricitatea rotirii, e [mm], durata relaxării, t [s] etc*

Cea de-a doua categorie de caracteristici programate la echipamente, o constituie caracteristicile de circulație a mediului de lucru. Eliminarea produselor eroziunii din interstițiul tehnologic, se face prin mediul de lucru. În unele cazuri, eliminarea naturală, prin undele de șoc create în timpul descărcărilor electrice, nu este suficientă, fiind necesare evacuări forțate ale microproduselor eroziunii: circulație forțată, absorbție continuă sau pulsatorie, injecție continuă sau pulsatorie [45.], [47.] etc. Modul de evacuare forțată are, în unele cazuri, influență asupra preciziei formei și dimensiunilor OP. Spre exemplu, la prelucrarea unui orificiu, cu utilizarea spălării prin injecție prin interiorul electrozului, apare o conicitate, care nu se mai regăsește la utilizarea spălării prin absorbție (fig. 2.11.).

În cazul spălării forțate a interstițiului, interesează, pe lângă modul de spălare și *debitul de lucru, Q_L [l/min], presiunea lichidului, p [Pa], frecvența de pulsație, ν [Hz]. O altă mărime, care influențează stabilitatea procesului, este temperatura lichidului, T [°C]. Menținerea constantă a temperaturii se afce cu ajutorul schimbătoarelor de căldură, montate în sistemul de circulație a lichidului dielectric.*

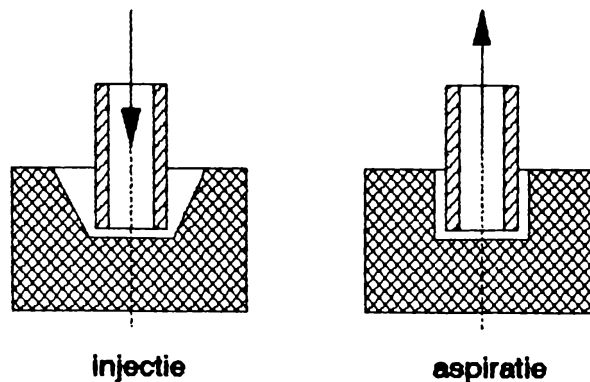


fig. 2.11. Tipuri de spălare a interstițiului tehnologic

Caracteristici de instalare OP - OT

Caracteristicile de instalare ale electrodului - OT în raport cu OP, au o influență hotărâtoare asupra mai multor indicatori de performanță, dar, în special, influențează precizia dimensională a OP. Este important ca erorile de instalare în plan orizontal, Δx [mm] și Δy [mm] [127.], precum și eroarea unghiulară de instalare, $\Delta\Phi$ [°], să fie cât mai mici posibil.

Aceleași probleme se pun și în cazul prelucrării cu electrod masiv rotitor. În acest caz, abaterile de poziționare a electrozilor, se manifestă prin intermediul *excentricității axei de simetrie a electrodului, față de axa sa de rotație*, e [mm] (fig. 2.12.) și a înclinării axei de rotație a electrodului față de direcția de avans (fig. 2.13.) [43.].

Pentru a elimina, într-o bună măsură, erorile ce apar, se poate utiliza o metodă, care, practic, constă dintr-o prelucrare de finisare a electrozilor (spre exemplu, strunjire), cu electrozii montați, deja, în dispozitiv [43.]. Erorile de instalare au repercursiuni asupra preciziei prelucrării, prin intermediul caracteristicilor geometrice ale interstițiului activ, pe care îl asimetrizează în raport cu direcția avansului.

2.3.1.2. Factori primari proveniți de la elementele spațiului de lucru

Cele trei elemente ale spațiului de lucru, OP, OT și ML influențează caracteristicile tehnologice, atât prin proprietățile lor intrinseci, cât și prin dispunerea lor relativă, ce determină geometria interstițiului.

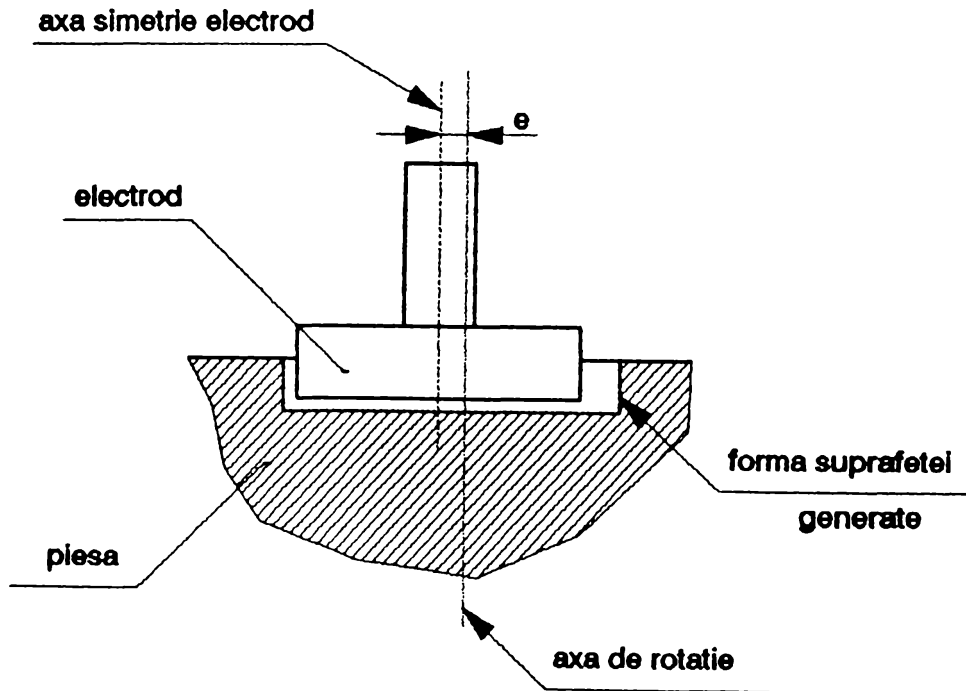


fig. 2.12. Excentricitate a electrodului în raport cu axa sa de rotație

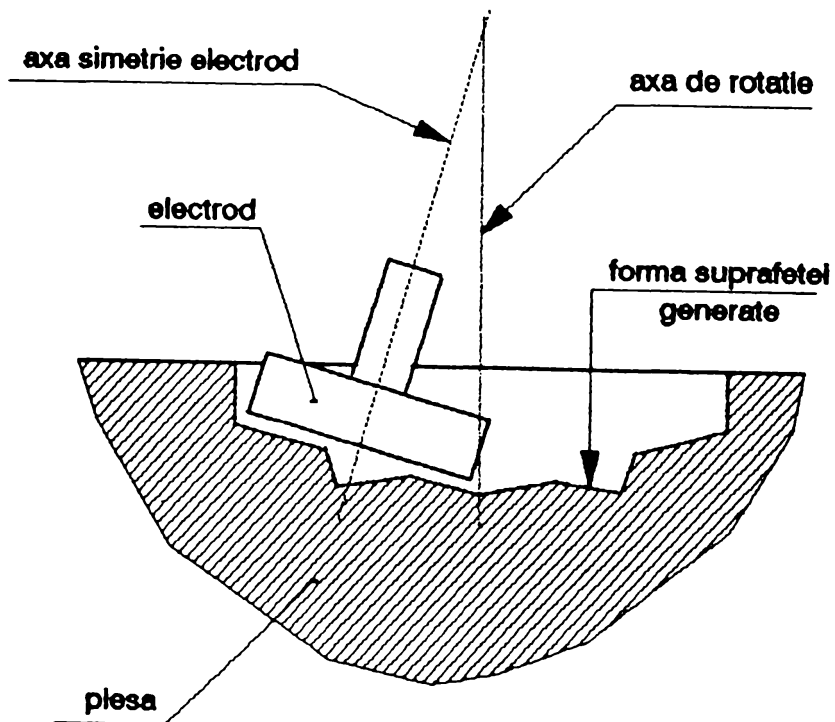


fig. 2.13. Înclinație a electrodului în raport cu axa sa de rotație

Caracteristici ale materialelor OP și OT

În privința celor doi electrozi, OP și OT, interesează, în primul rând, caracteristicile lor de material (proprietăți mecanice [119.], constante termofizice [5.], compoziție chimică [118.], structură [1.], [54.] și, în al doilea rând, caracteristicile geometrice ale suprafețelor active.

Întrucât, din multitudinea fenomenelor ce conduc la procesul fizic de prelevare de material, fenomenul termic se pare că este preponderent (Nekrasevitch, Bakuto, Zolotich, Zingerman, Van Dijck, Snoeys [27.], [64.]), o apreciere semnificativă a rezistenței la eroziune electrică a unui material metalic, se poate face cu ajutorul criteriului de stabilitate termică. Rezistența la eroziune electrică a unui material metalic, se definește ca fiind capacitatea acestuia de a-și păstra integritatea la acțiunea descărcărilor electrice, pe baza proprietăților sale intrinseci, indiferent de factorii geometrici ai spațiului de lucru și de influența proceselor secundare, care au loc în interstițiu. Pornindu-se de la timpul necesar topirii unor volume unitare de diferite materiale, în condiții identice, criteriul stabilității termice sau criteriul lui Palatnik, se calculează cu relația:

$$\pi = c\rho\lambda(T_i - T_0)^2, \quad (2.9.)$$

unde:

π - criteriul lui Palatnik [J^2/m^4s];

c - căldura specifică [$J/kg\cdot K$];

ρ - densitatea [kg/m^3];

λ - conductivitatea termică [$J/m\cdot s\cdot K$];

T_i - temperatura de topire [K];

T_0 - temperatura mediului ambiant [K].

Rezistența la eroziune electrică este direct proporțională cu criteriul lui Palatnik. Valorile mari ale criteriului π cresc rezistența la eroziune electrică (materiale recomandate pentru confecționarea OT), iar valorile mici, cresc prelucrabilitatea prin eroziune electrică (materiale recomandate a fi OP).

Caracteristici ale mediului de lucru

Mediul de lucru are o influență hotărâtoare în procesul eroziv [72.]: el este suportul descărcărilor electrice și asigură îndepărtarea produselor eroziunii din spațiul de lucru. Cele mai importante caracteristici de material ale dielectricului lichid sunt: *tensiunea superficială*,

σ [N/m], vâscozitatea dinamică, μ [Pa·s], concentrația în impurități, c [%], rigiditatea dielectrică, E_s [V/m], compoziția chimică.

Caracteristici geometrice ale interstițiului de lucru

Geometria interstițiului este determinată de dispunerea suprafețelor în interacțiune ale OP și OT. Spațiul creat între ele determină existența unui interstițiu activ, unde au loc descărcări electrice ce produc prelevarea și un interstițiu pasiv, prin care se elimină din spațiul de lucru produsele eroziunii [70.], [71.].

Grosimea interstițiului activ, δ [mm], se măsoară pe direcția de avans [67.], iar a celui pasiv, Δ [mm], pe direcții cu diferite unghiuri de înclinare față de direcția de avans. Suprafețele conjugate ale OP și OT, influențează procesul eroziv, atât prin arie, A_{OP} [mm²], A_{OT} [mm²], cât și prin rugozitate, R_{aOP} [μm], R_{aOT} [μm].

2.3.2. Factori intermediari ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică

Fenomenele fizico - chimice ce au loc în timpul descărcării electrice în impuls, conduc la apariția proceselor de prelucrare (prelevare și mărunțire) din OP și OT, proceselor de depunere (peliculizare) pe suprafețele OP și OT și de evacuare a produselor eroziunii, pe suportul material al ML.

Cum eroziunea electrică este, de fapt, rezultatul însumării proceselor elementare de prelucrare, privite din acest punct de vedere, procesele pot fi caracterizate prin mărimi caracteristice procesului elementar și mărimi statistice, care evidențiază distribuția spațială și temporală a proceselor elementare.

Energia electrică a impulsului de curent, W_i , se distribuie, cu un anumit randament, η , pe spațiul de lucru, între cele trei elemente ale sale:

$$W_i = \eta(W_{iP} + W_{iB} + W_{iM}), \quad (2.10.)$$

unde, W_{iP} , W_{iB} și W_{iM} reprezintă cota parte din energia impulsului primită de OP, OT și ML.

Ținând cont de acestea, se definesc următoarele mărimi:

- procentajul din energia impulsului, preluat de OP, w_{iP} [%]:

$$w_{iP} = \frac{W_{iP}}{W_i}; \quad (2.11.)$$

- procentajul din energia impulsului, preluat de OT, w_E [%]:

$$w_E = \frac{W_{tE}}{W_t}; \quad (2.12.)$$

- procentajul din energia impulsului, preluat de ML, w_{iM} [%]:

$$w_{iM} = \frac{W_{iM}}{W_t}; \quad (2.13.)$$

- volumul de material prelevat din OP de către un impuls, v_P [mm³];
- volumul de material prelevat din OT de către un impuls, v_E [mm³].

Cum impulsurile conduc la apariția fenomenului de descompunere a unor substanțe organice ale ML, prezintă interes volumele de deșuri solide, lichide și gazoase, provenite în timpul pirolizei:

- volumul de deșeu solid, v_S [mm³];
- volumul de deșeu lichid, v_L [mm³];
- volumul de deșeu gazos, v_G [mm³].

Trecând la mărimile statistice, se definesc procentajele relative medii, ale diferitelor tipuri de descărcări:

- procentajul de descărcări în gol, p_o [%]:

$$P_o = \frac{N_o}{N}; \quad (2.14.)$$

- procentajul de descărcări în scurtcircuit, p_k [%]:

$$P_k = \frac{N_k}{N}; \quad (2.15.)$$

- procentajul de descărcări fictive, p_f [%]:

$$P_f = \frac{N_f}{N}; \quad (2.16.)$$

- procentajul de descărcări în gaze, p_g [%]:

$$P_g = \frac{N_g}{N}; \quad (2.17.)$$

- procentajul de descărcări de mărunțire, p_m [%]:

$$P_m = \frac{N_m}{N}; \quad (2.18.)$$

**OPTIMIZAREA TEHNOLOGICĂ LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE
ELECTRICĂ CU ELECTROD MASIV**

unde N reprezintă numărul total al descărcărilor, iar N_o , N_k , N_f , N_g și N_m reprezintă numărul de descărcări din fiecare categorie.

Raportând numărul descărcărilor care au loc, N_{xy} , pe suprafața a cărei proiecție în planul normal pe direcția de avans are aria $\Delta A_t = \Delta X \Delta Y$, se definește *densitatea convențională medie locală a impulsurilor*, n_{loc} [$1/mm^2$]:

$$n_{loc} = \frac{N_{xy}}{\Delta X \Delta Y} \tag{2.19.}$$

Considerând repartizarea impulsurilor totale, pe diferitele categorii, în mod asemănător, se definesc:

- densitatea relativă medie locală a impulsurilor în gol, n_o [$1/mm^2$]:

$$n_o = \frac{N_{xy(o)}}{\Delta X \Delta Y}; \tag{2.20.}$$

- densitatea relativă medie locală a impulsurilor în scurtcircuit, n_k [$1/mm^2$]:

$$n_k = \frac{N_{xy(k)}}{\Delta X \Delta Y}; \tag{2.21.}$$

- densitatea relativă medie locală a impulsurilor fictive, n_f [$1/mm^2$]:

$$n_f = \frac{N_{xy(f)}}{\Delta X \Delta Y}; \tag{2.22.}$$

- densitatea relativă medie locală a impulsurilor în gol, n_g [$1/mm^2$]:

$$n_g = \frac{N_{xy(g)}}{\Delta X \Delta Y}; \tag{2.23.}$$

- densitatea relativă medie locală a impulsurilor de mărunțire, n_m [$1/mm^2$]:

$$n_m = \frac{N_{xy(m)}}{\Delta X \Delta Y} \tag{2.24.}$$

În anumite condiții de desfășurare a procesului din spațiul de lucru, se poate depune o peliculă protectoare de carbon, pe anod, cu aderență mai mică sau mai mare. Calitativ, prezintă interes compoziția chimică a stratului depus, precum și structura și caracteristicile ei fizico-chimice, iar cantitativ, interesează *grosimea medie a stratului depus*, h_d [mm] și *volumul de material depus*, V_d [mm^3].

Procesele de evacuare sunt influențate de următoarele mărimi:

- debitul de evacuare a deșeurilor solide din interstițiu, Q_{DS} [mm^3/min];
- debitul de evacuare a deșeurilor lichide din interstițiu, Q_{DL} [mm^3/min];
- debitul de evacuare a deșeurilor gazoase din interstițiu, Q_{DG} [mm^3/min].

Dintre deșeuri, cele solide au ponderea cea mai mare, în cazul lor, interesând:

- *compoziția granulometrică*, C_g [%];
- *granulația medie*, d_m [mm];
- *densitatea locală în interstițiu*, ρ_a [g/mm³];
- *lungimea parcursului liber*, l_i [mm].

Mărimile care caracterizează undele de șoc ce iau naștere în urma descărcărilor electrice, sunt:

- *prestunea undelor de șoc*, p_s [Pa];
- *viteza undelor de șoc*, v_s [m/s].

2.3.3. Factori finali ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică

Factorii finali, elemente ieșire ale sistemului de acțiune tehnologică, sunt, de fapt, caracteristicile tehnologice ale prelucrării, materializate prin diferiți indicatori de performanță. Dacă aceștia se referă la OP, indicatorii sunt caracteristici de prelucrare, iar dacă se referă la OT, indicatorii fac parte din categoria caracteristicilor de uzare.

Factorii finali din rândurile caracteristicilor de prelucrare se pot grupa în trei categorii: caracteristici de productivitate, caracteristici de precizie dimensională și caracteristici de calitate a suprafeței (fig 2.14.) [6.].

Cel mai des întrebuițat indicator de performanță, nu numai din categoria caracteristicilor de productivitate, ci din totalitatea factorilor finali, îl constituie *productivitatea prelucrării*, Q_p [mm³/min]. În cazul prelucrării prin eroziune electrică cu electrod masiv, Q_p se definește ca fiind *volumul de material îndepărtat din OP*, V_p [mm³], raportat la *durata totală a prelucrării*, T_p [min]:

$$Q_p = \frac{V_p}{T_p}. \quad (2.25.)$$

Alte caracteristici de productivitate, cu frecvențe de utilizare sau arii de răspândire mai restrânse, sunt:

- *lungimea convențională a prelucrării*, L_{pc} [mm];

- viteza medie convențională de prelucrare, v_{pc} [mm/min]:

$$v_{pc} = \frac{L_{pc}}{T_p}; \quad (2.26.)$$

- prelucrabilitatea relativă volumică, δ_p [%].

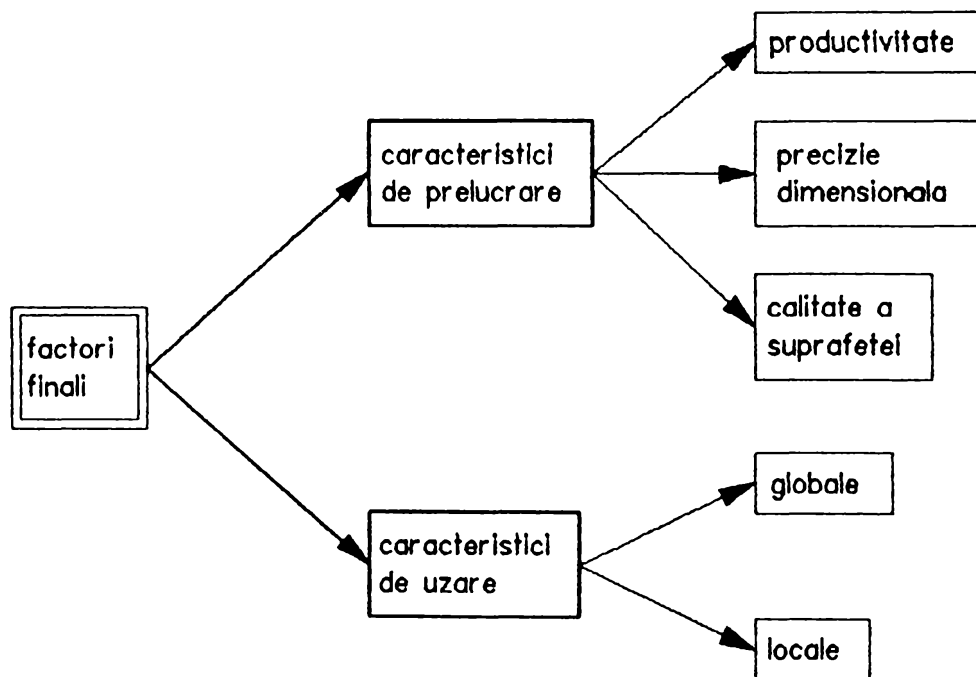


fig. 2.14. Clasificarea factorilor finali ai prelucrării prin eroziune electrică

O categorie aparte o constituie diferiții indicatori de productivitate specifică a prelucrării. În afara mai cunoscuților indicatori, *productivitatea specifică pe unitatea de curent*, Q_{p1} [mm³/min·A]:

$$Q_{p1} = \frac{Q_p}{I_m} \quad (2.27.)$$

și *productivitatea specifică pe unitatea de uzură relativă*, Q_{p2} [mm³/min·%]:

$$Q_{p2} = \frac{Q_p}{u_r}, \quad (2.28.)$$

pentru prima dată în literatura de specialitate, pe plan național și, probabil, și mondial, se definesc, în [81.], [83.], [84.], trei indicatori de performanță globali, IP_1 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}$], IP_2 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}$] și IP_3 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$]:

$$IP_1 = \frac{Q_p}{u_v \cdot R_a}, \quad (2.29.)$$

$$IP_2 = \frac{Q_p}{u_v \cdot R_a \cdot \varepsilon}, \quad (2.30.)$$

$$IP_3 = \frac{Q_p}{u_v \cdot R_a \cdot \varepsilon \cdot I_m}, \quad (2.31.)$$

unde I_m [A] este curentul mediu prin interstițiul de lucru, u_v [%] este uzura relativă volumică, R_a [μm] este abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate a suprafeței OP după prelucrare, iar ε [mm] este intervalul de încredere al mediei lungimii interstițiului tehnologic, calculat pentru o anumită probabilitate de încredere.

Elementul de originalitate, care conferă acestor indicatori de performanță o semnificație majoră în caracterizarea eficienței tehnologice globale a eroziunii electrice, o constituie raportarea efectului prelucrării, prelevarea de material din OP (V_p), la consumurile de manoperă (T_p), de material al OT (u_v) și de energie (I_m), precum și la calitatea suprafeței generate, exprimată prin precizia (ε) și rugozitatea (R_a) acesteia.

Caracteristicile de precizie dimensională sunt, în general, prezentate sub forma abaterilor diferitelor mărimi. Orice abatere este definită ca diferența dintre valoarea efectivă a mărimii elementului luat în discuție și valoarea ei nominală. Determinarea abaterilor la nivel macrogeometric, se face în funcție de abaterile locale. Astfel, se definesc:

- abaterea liniară locală, A_L [mm]:

$$A_L = L_o - L_N; \quad (2.32.)$$

- abaterea curburii locale, A_k [1/mm]:

$$A_k = K_o - K_N = \frac{1}{R_{k_o}} - \frac{1}{R_{k_N}}; \quad (2.33.)$$

- abaterea orientării locale, A_o [°]:

$$A_o = \Phi_o - \Phi_N, \quad (2.34.)$$

unde L este lungimea, K este curbura, R_k este raza de curbură, Φ este unghiul format de cu direcția de control, de obicei, cea a avansului, iar cu indicii "e" și "N", s-au notat mărimile efective, respectiv nominale, ale elementelor considerate.

Mărimea acestor abateri este determinată de eroarea totală de prelucrare, care cuprinde, atât erorile sistematice (constante sau cu variații după legi cunoscute), cât și cele întâmplătoare. Precizia dimensională este asigurată, dacă eroarea totală de prelucrare este mai mică decât toleranța prescrisă pentru dimensiunea considerată. Însumarea probabilistică a erorilor elementare, este cea mai exactă metodă de calcul al erorii totale. Conform [66.], eroarea totală, e_t , se calculează cu relația:

$$e_t = \sqrt{(k_1 e_1)^2 + (k_2 e_2)^2 + (k_3 e_3)^2 + (k_4 e_4)^2 + (k_5 e_5)^2}, \quad (2.35.)$$

unde k_j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$), reprezintă coeficienții de dispersie relativă a erorii considerate, iar e_1 este eroarea de instalare a perechii OP-OT, e_2 este eroarea datorată deformațiilor elastice ale sistemului considerat, e_3 este eroarea datorată variațiilor de temperatură, e_4 este eroarea datorată neuniformității interstițiului tehnologic dintre OP și OT și e_5 este eroarea datorată uzării OT. Dintre toate, cea mai importantă, dar și cea mai dificil de determinat este e_5 [69.].

Caracteristicile de calitate a suprafeței urmăresc două aspecte: microgeometria suprafeței [24.], [80.], [85.], [88.], [120.], [122.] și proprietățile stratului de suprafață [115.].

Rugozitatea se urmărește prin cele trei criterii clasice:

- abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate, R_a [μm];
- înălțimea maximă a microneregularităților, R_y [μm];
- înălțimea medie a microneregularităților, R_z [μm].

Pe lângă aceste trei caracteristici de rugozitate se mai pot urmări [74.], [82]:

- numărul de intersecții ale liniei medii cu profilul, n_o [1/mm];
- capacitatea portantă, $(t_R)_p$ [%], pentru diferite nivele de secționare, $p = 10\%$, 30% , 50% , 70% și 90% ;
- gradul de umplere, K_{PR} [-];
- unghiul de înclinare în raport cu linia medie, θ [°];
- pasul microneregularităților, S [μm].

În ceea ce privește aspectul fizic al calității suprafeței [74.], [75.], structura tipică, în straturile superioare ale unui metal prelucrat prin eroziune electrică [68.], [78.] este prezentată în fig. 2.15.

Se observă existența a trei straturi, care, dinspre exterior, spre interior, sunt:

- stratul alb, SA, de grosime H_A , constituit, în majoritate, din materialul OP, topit și resolidificat, după ce, în faza lichidă, au difuzat elemente provenite din OT și mediul de lucru dielectric;

- substratul alb, SSA, de grosime H_S , corespunzător unei zone influențate termic, prin transformări structurale în fază solidă;

- stratul de bază, SB, al metalului de prelucrat, neafectat de transformări.

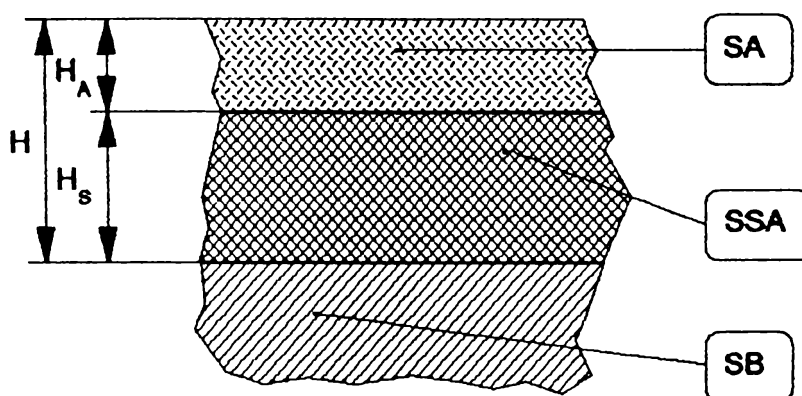


fig. 2.15. Structura straturilor superficiale ale unui oțel prelucrat prin eroziune electrică

Caracteristicile de uzare se definesc asemănător cu caracteristicile de productivitate, deosebirea constând în faptul că se referă la OT și nu la OP. Se definește *debitul uzării*, Q_B [mm^3/min], drept *volumul de material uzat din OT*, V_B [mm^3], raportat la *durata prelucrării*, T_p [min]:

$$Q_B = \frac{V_B}{T_p}. \quad (2.36.)$$

În mod analog, se definesc:

- *lungimea convențională de uzare*, L_{uc} [mm];
- *viteza medie convențională de uzare*, v_{ec} [mm/min]:

$$v_{ec} = \frac{L_{uc}}{T_p}; \quad (2.37.)$$

- *debitul specific al uzării*, Q_{Bs} [$\text{mm}^3/\text{min} \cdot \text{A}$]:

$$Q_{Bs} = \frac{Q_B}{I_m}. \quad (2.38.)$$

Un alt indicator de performanță foarte des urmărit, cu atribute ale caracteristicilor din ambele categorii, de productivitate și de uzare, este *uzura relativă volumică*, u_v [%], definită ca:

$$u_v = \frac{Q_B}{Q_p} \cdot 100. \quad (2.39.)$$

2.4. Sinteza a cercetării experimentale din ultimii ani în domeniul eroziunii electrice cu electrod masiv

Majoritatea rezultatelor publicate, până în prezent, în literatura de specialitate, are la bază strategia clasică de cercetare experimentală. În general, dependențele sunt redată sub formă de reprezentări grafice în curbe parametrice cu 1, 2, 3 sau 4 parametri. În cazuri mai rare, se prezintă dependențele algebric, sub forma unor ecuații de regresie.

În cele ce urmează, se va prezenta, sintetizat, influența principalilor parametri independenți asupra unor parametri dependenți, exprimați prin unele caracteristici tehnologice cantitative și calitative (productivitatea prelucrării, Q_p , uzura relativă volumică, u_v , rugozitatea, R_a , dar și altele). În fiecare reprezentare grafică, sunt prezentate valorile constante ale parametrilor care nu au fost variați, rezultând, astfel, o imagine cât mai clară a condițiilor de experimentare.

Amplitudinea impulsului de curent este reglabilă în trepte, prin nivelul de intensitate a curentului. Păstrând constanți ceilalți parametri, creșterea amplitudinii impulsului de curent, I_d , conduce la:

- creșterea productivității prelucrării, Q_p (fig. 2.16. - I_d , variabilă [78.], fig. 2.17. - I_d , parametru [123.]);
- creșterea uzurii relative volumice, u_v , la electrozi de cupru (fig. 2.18. - I_d , variabilă [78.], fig. 2.19. - I_d , parametru [89.]) și scăderea ușoară a ei, la electrozi de grafit (fig. 2.18.);
- creșterea valorii rugozității, R_a (fig. 2.20. [122.]);

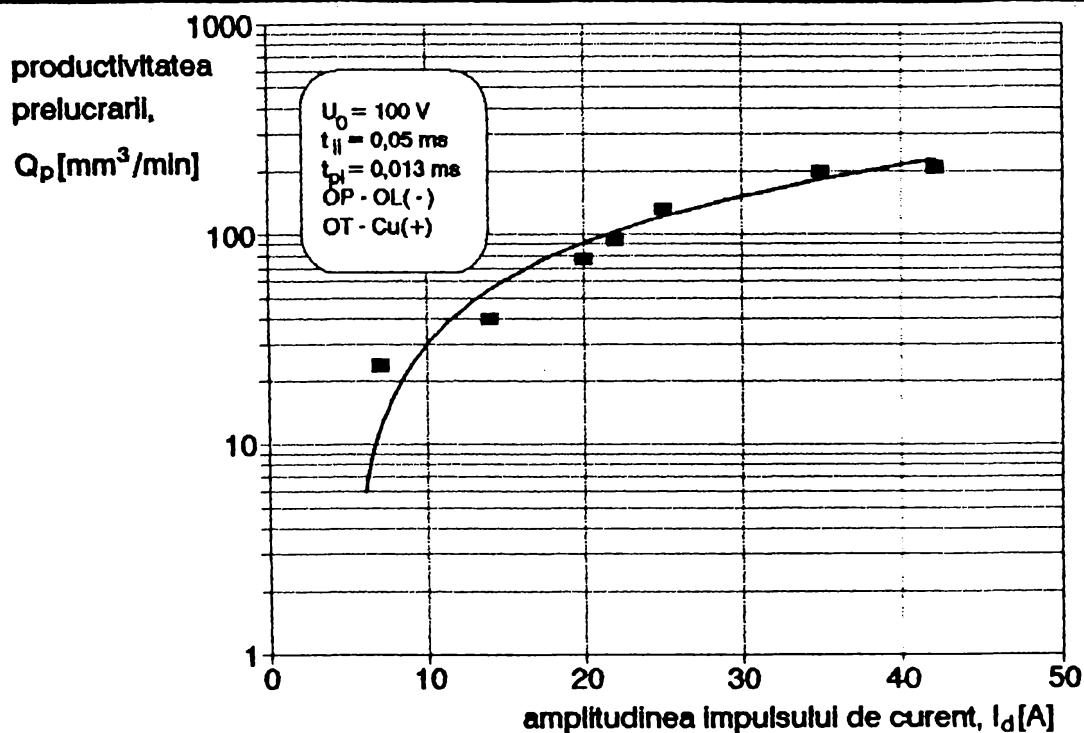


fig. 2.16. Influența amplitudinii impulsului de curent asupra productivității prelucrării

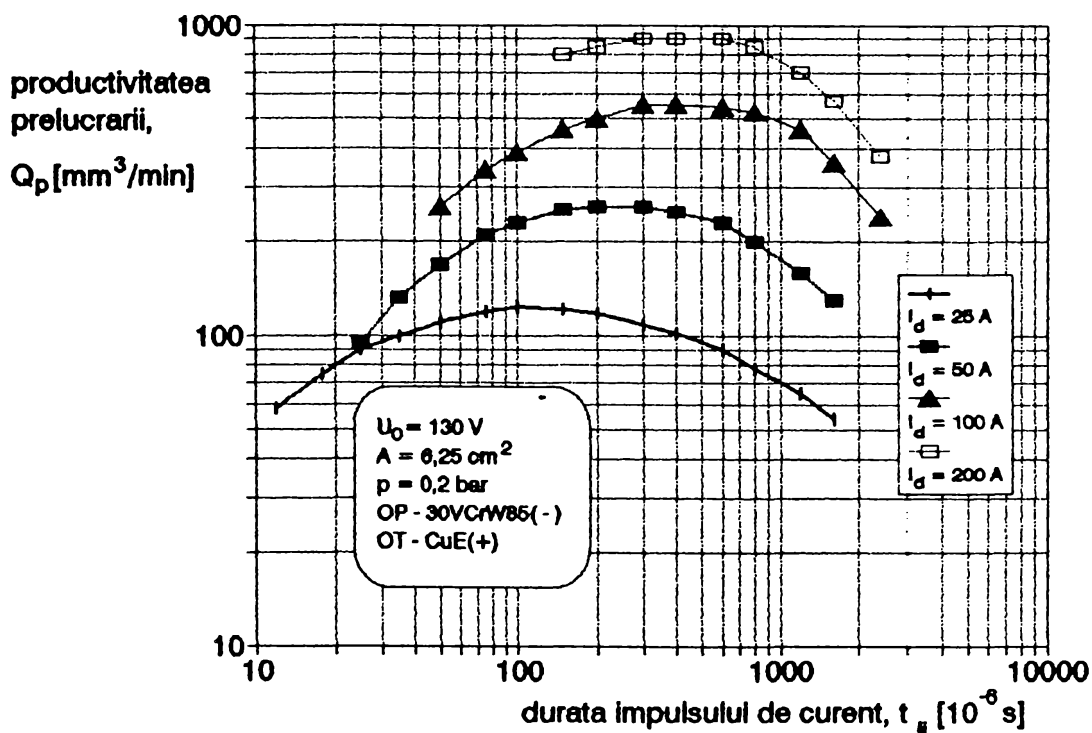


fig. 2.17. Influența duratei impulsului de curent și a amplitudinii impulsului de curent, asupra productivității prelucrării

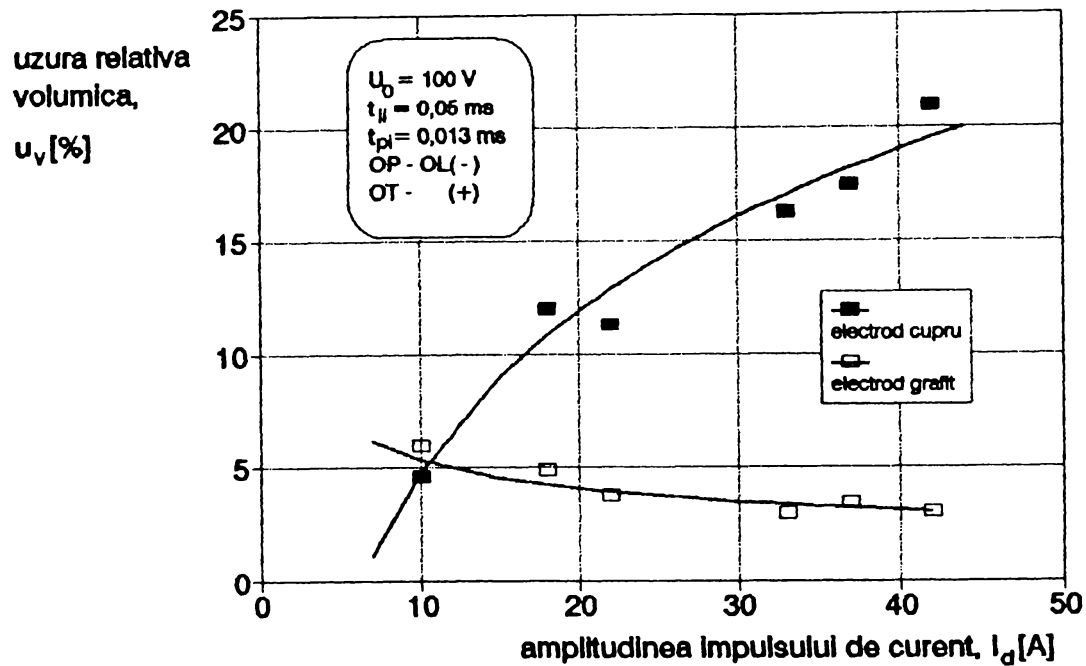


fig. 2. 18. Influența amplitudinii impulsului de curent și a naturii materialului electrodului, asupra uzurii relative volumice

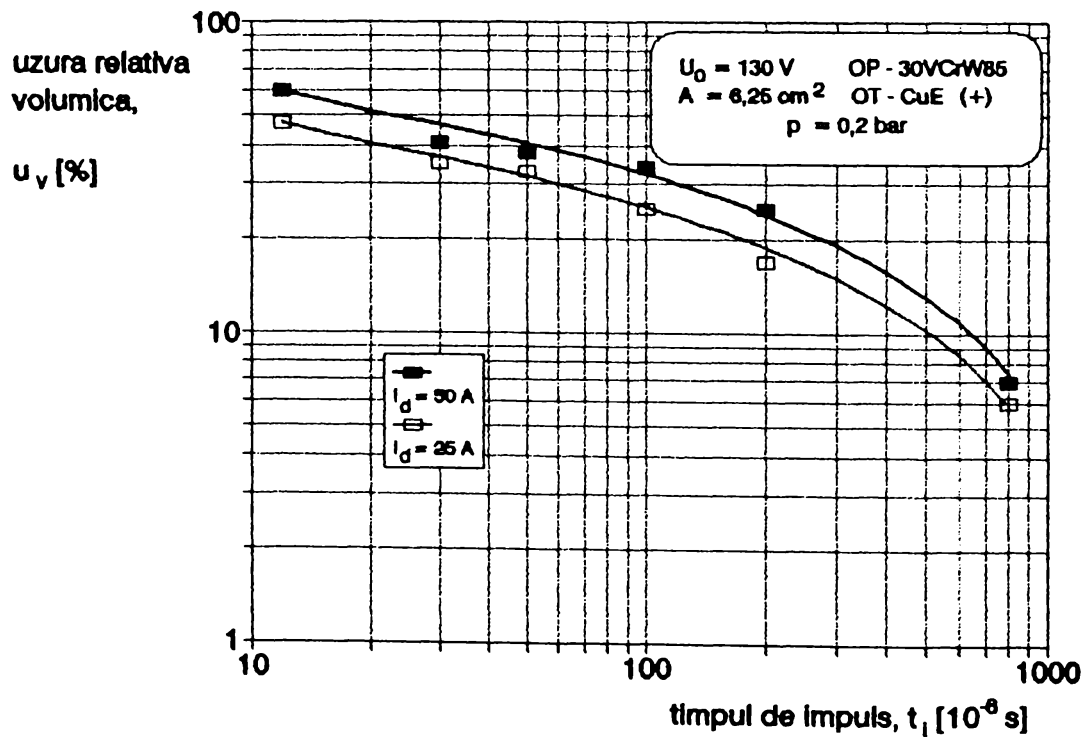


fig. 2.19. Influența timpului de impuls și a amplitudinii impulsului de curent, asupra uzurii relative volumice

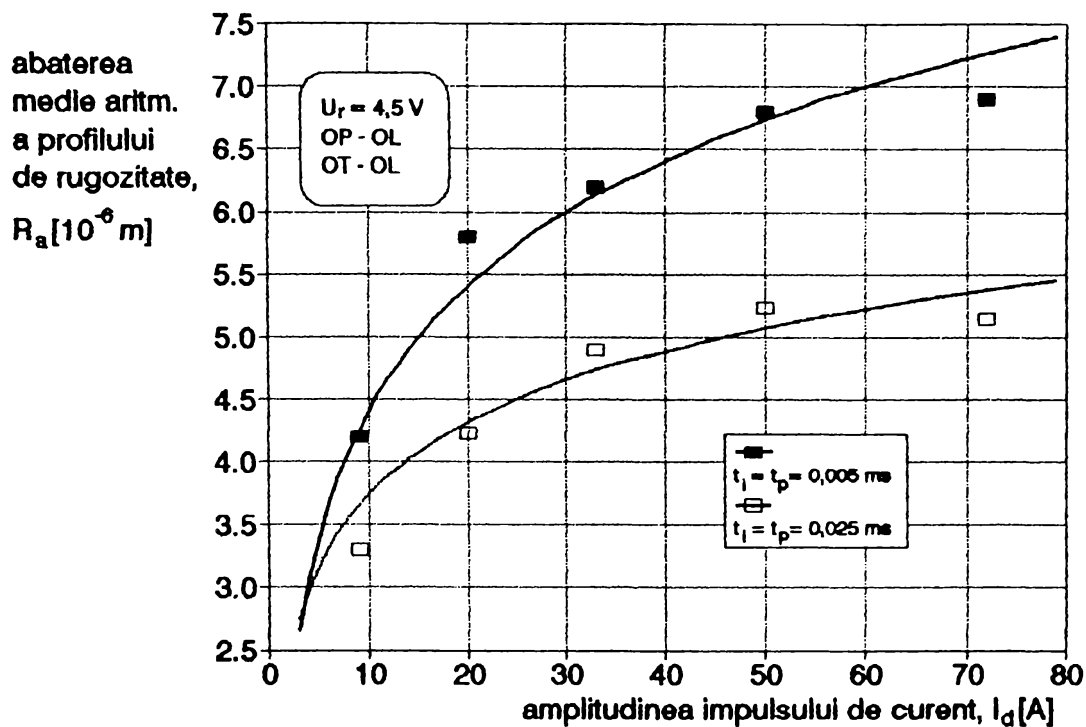


fig. 2.20. Influența amplitudinii impulsului de curent și a timpilor de impuls și de pauză, asupra abaterii medii aritmetice a profilului de rugozitate

- variații cu maxim ale productivitățile specifice, pe unitatea de curent, Q_{p1} (fig. 2.21. [83.]) și pe unitatea de uzură relativă volumică, Q_{p2} (fig. 2.22. [83.]);

Timpul de impuls (durata impulsului de curent), t_i , prezintă variații cu maxim ale productivității, Q_p (fig. 2.23. [89.]) și productivității specifice pe unitatea de curent, Q_{p1} (fig. 2.24. [77.]). Creșterea timpului de impuls conduce la scăderea uzurii relative volumice, u_v (fig. 2.25. - t_i , variabilă [89.]) și la creșterea rugozității, R_a (fig. 2.20. - t_i , parametru).

Timpul de pauză (durata pauzei dintre impulsurile de tensiune) este necesar deionizării punții conductoare a descărcării. În condițiile păstrării constante a celorlalți parametri, creșterea timpului de pauză, t_p , conduce la scăderea productivității prelucrării, Q_p (fig. 2.26. [78.]) și la creșterea ușoară a uzurii relative volumice, u_v (fig. 2.27. [78.]).

Tensiunea medie este o mărime ce poate fi modificată indirect prin reacție externă asupra avansului. Modificarea tensiunii medii, U_m , are drept consecințe:

- variații cu maxim ale productivității, Q_p (fig. 2.28. [78.]);

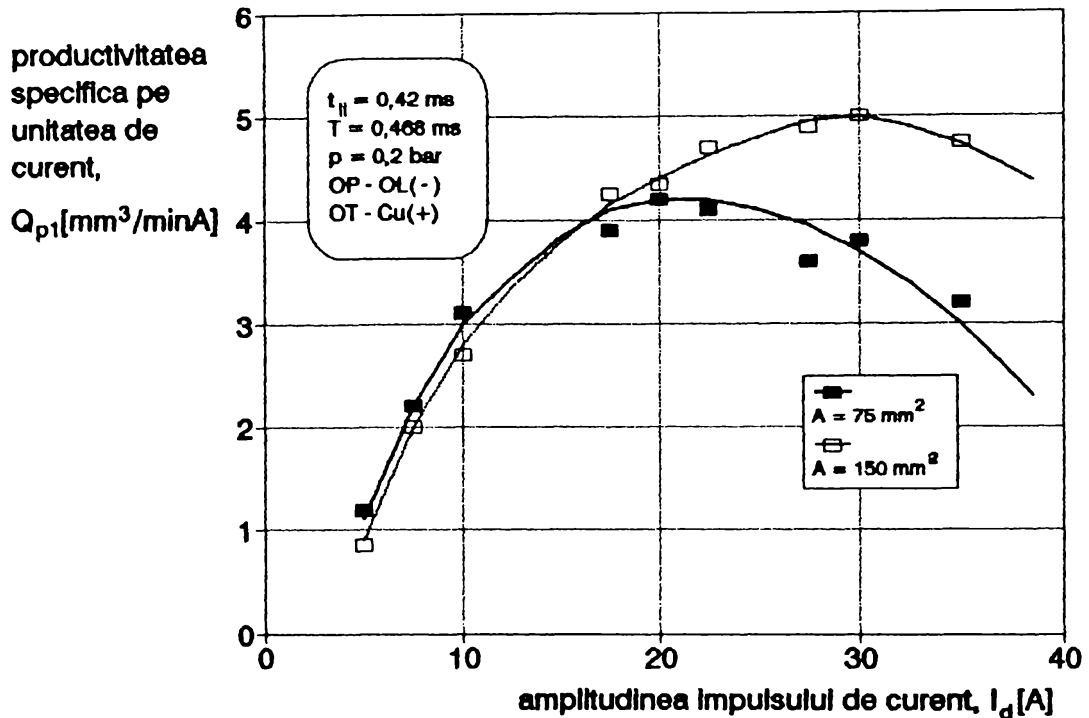


fig. 2.21. Influența amplitudinii impulsului de curent și a ariei secțiunii transversale a electrodului, asupra productivității specifice pe unitatea de curent

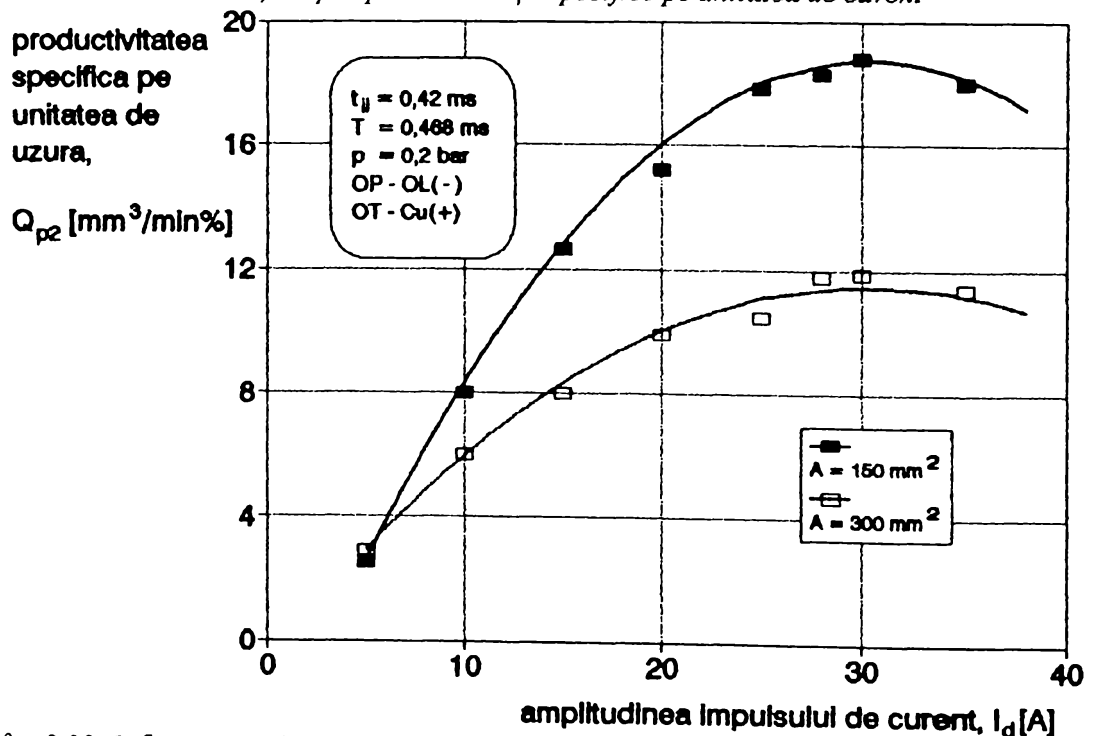


fig. 2.22. Influența amplitudinii impulsului de curent și a ariei secțiunii transversale a electrodului, asupra productivității specifice pe unitatea de uzură

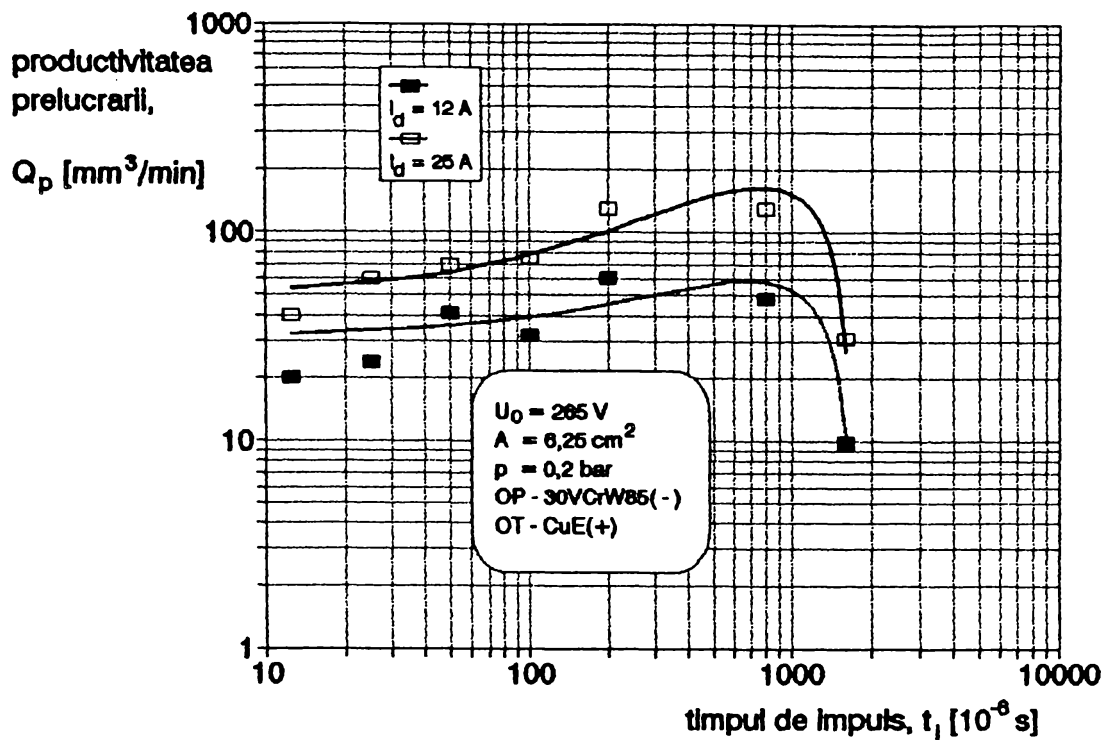


fig. 2.23. Influența timpului de impuls și a amplitudinii impulsului de curent, asupra productivității prelucrării

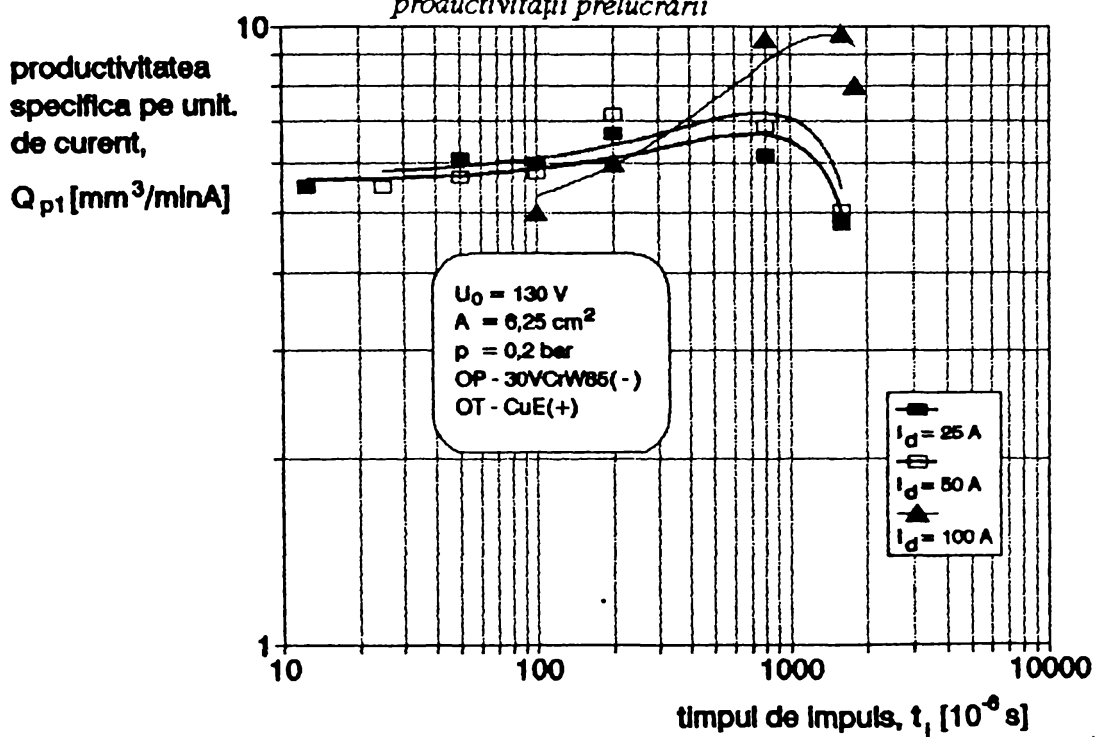


fig. 2.24. Influența timpului de impuls și a amplitudinii impulsului de curent, asupra productivității specifice pe unitatea de curent

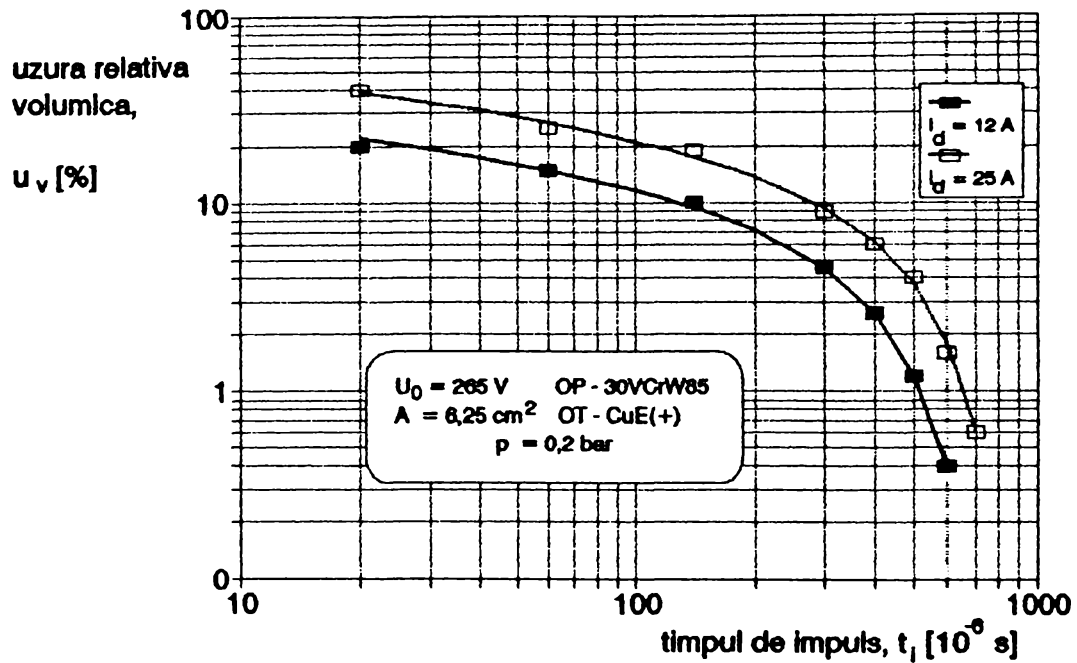


fig. 2.25. Influența timpului de impuls și a amplitudinii impulsului de curent, asupra uzurii relative volumice

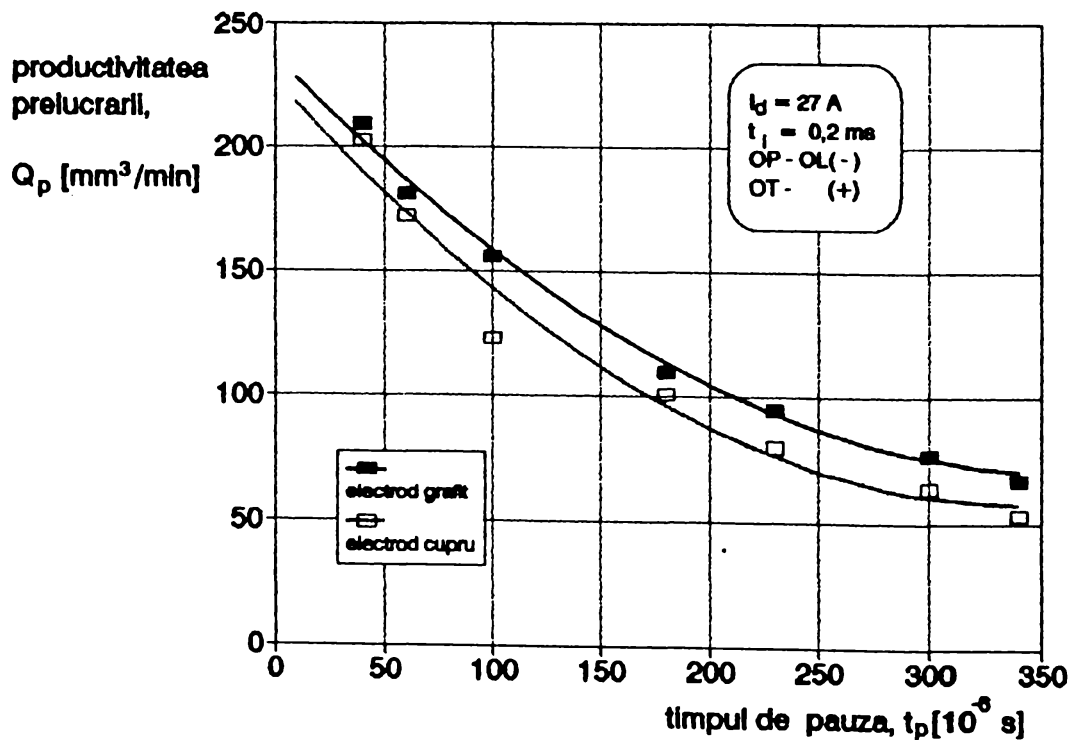


fig. 2.26. Influența timpului de pauză și a amplitudinii impulsului de curent, asupra productivității prelucrării

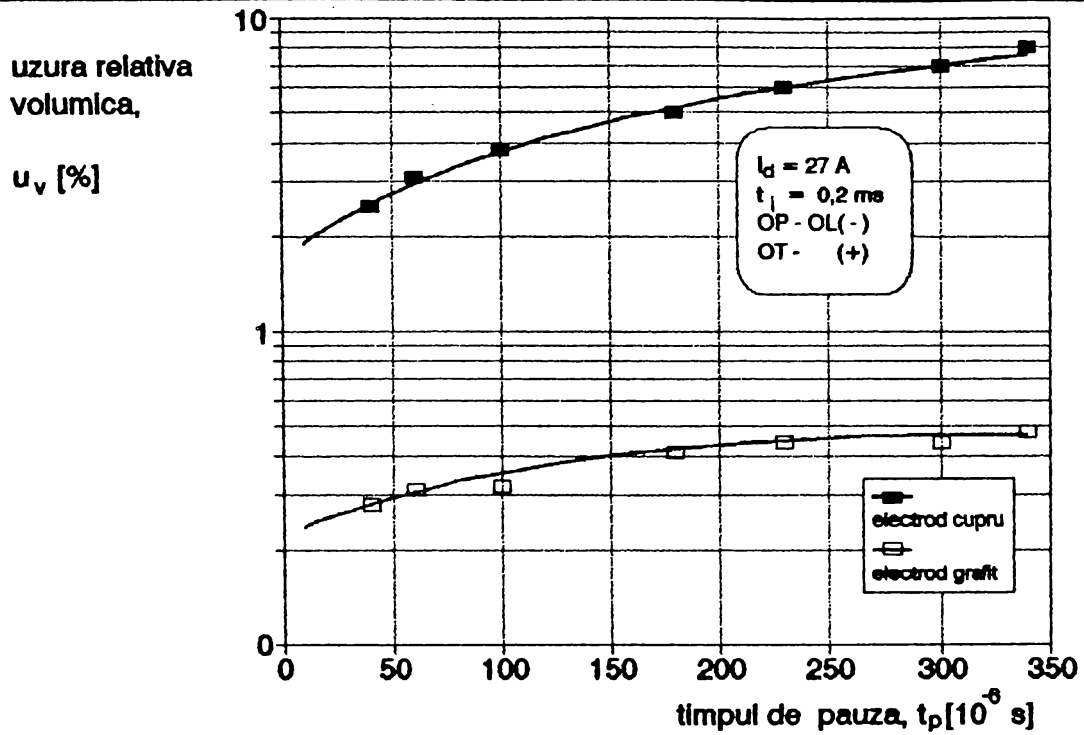


fig. 2.27. Influența timpului de pauză și a naturii materialului electrodului, asupra uzurii relative volumice

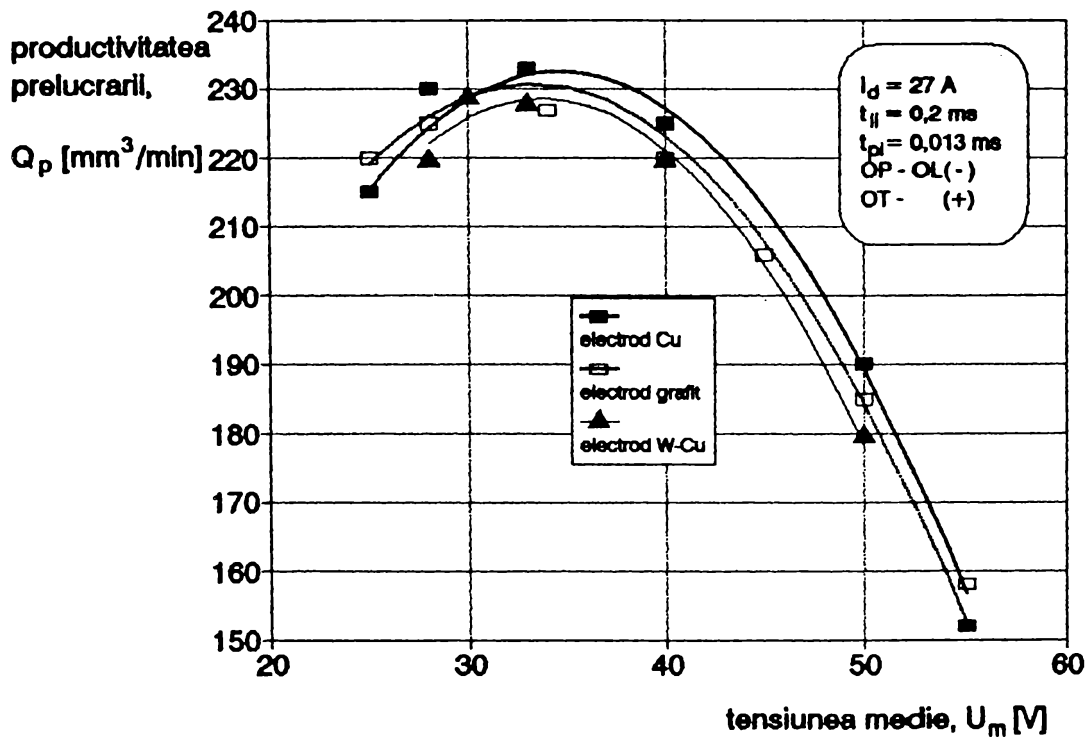


fig. 2.28. Influența tensiunii medii și a naturii materialului electrodului, asupra productivității prelucrării

- scăderea uzurii relative volumice, u_v , la electrozi de cupru, și, variații nesemnificative, la electrozi de grafit și de wolfram - cupru (fig. 2.29. [78.]).

Energia impulsului electric influențează toți indicatorii de performanță, în mod caracteristic celor trei elemente care o definesc, curent, tensiune și durata impulsului. Mărirea energiei impulsurilor electrice conduce la o creștere puternică a grosimii stratului alb, H_A și la o creștere mai puțin pronunțată a grosimii substratului alb, H_S (fig. 2.30. [115.]).

Polaritatea conectării, prin efectul de polaritate, determină repartiția energiei electrice între elementele substanțiale ale spațiului de lucru, și, prin aceasta, mărirea craterelor prelevate, care sunt în strânsă interdependență cu indicatorii de performanță. În fig. 2.31. [78.], se prezintă influența polarității conectării, asupra volumului mediu al craterelor de prelevare, V_{mc} , în cazul unor perechi de materiale OP - OT, Fe - Fe și Cu - Cu.

Forma impulsului de curent are o influență mai puțin pregnantă asupra productivității prelucrării și uzurii relative volumice, decât se dorea. Impulsurile dreptunghiulare și cele cu început trepte și palier constant, prezintă productivități, Q_p (fig. 2.32. [89.]) și uzuri relative volumice, u_v (fig. 2.33. [89.]), apropiate.

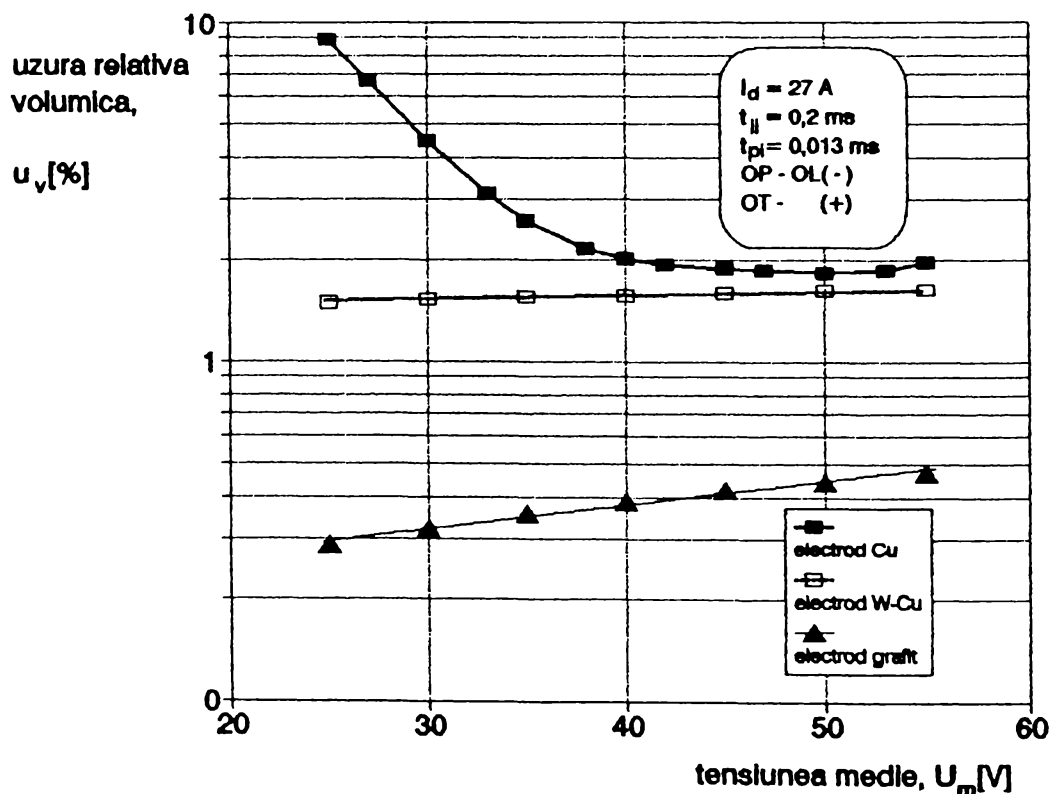


fig. 2.29. Influența tensiunii medii și a naturii materialului electrodului, asupra uzurii relative volumice

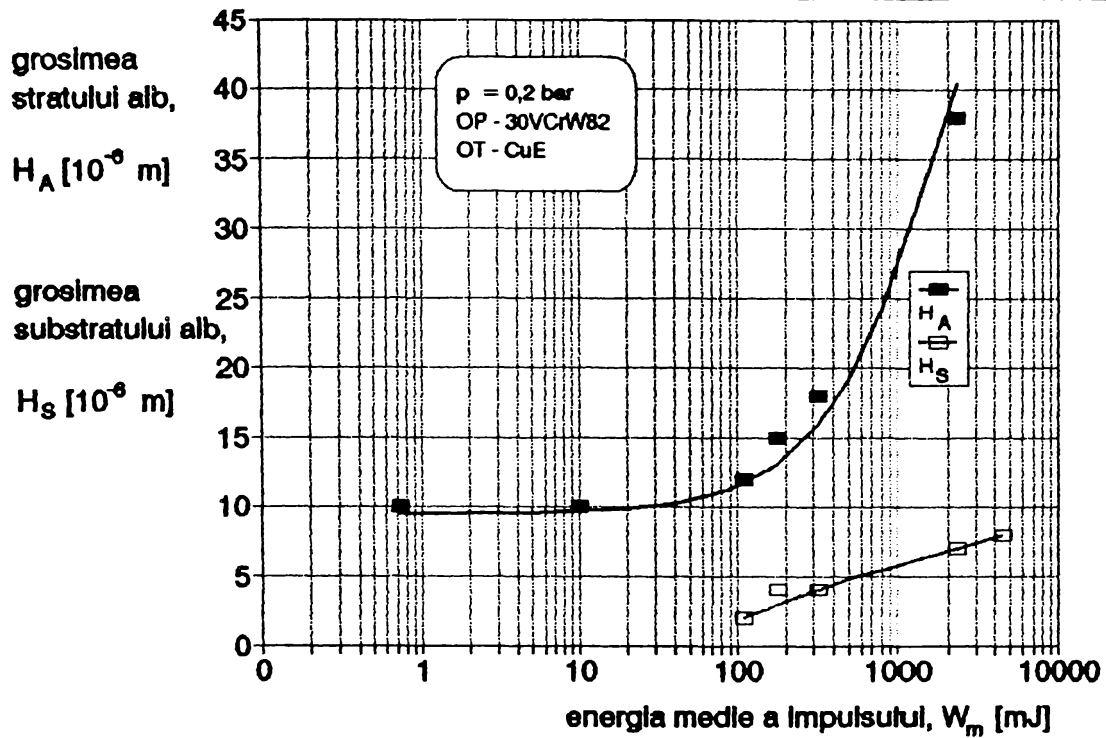


fig. 2.30. Influența energiei medii a impulsului, asupra grosimii stratului alb și a substratului alb

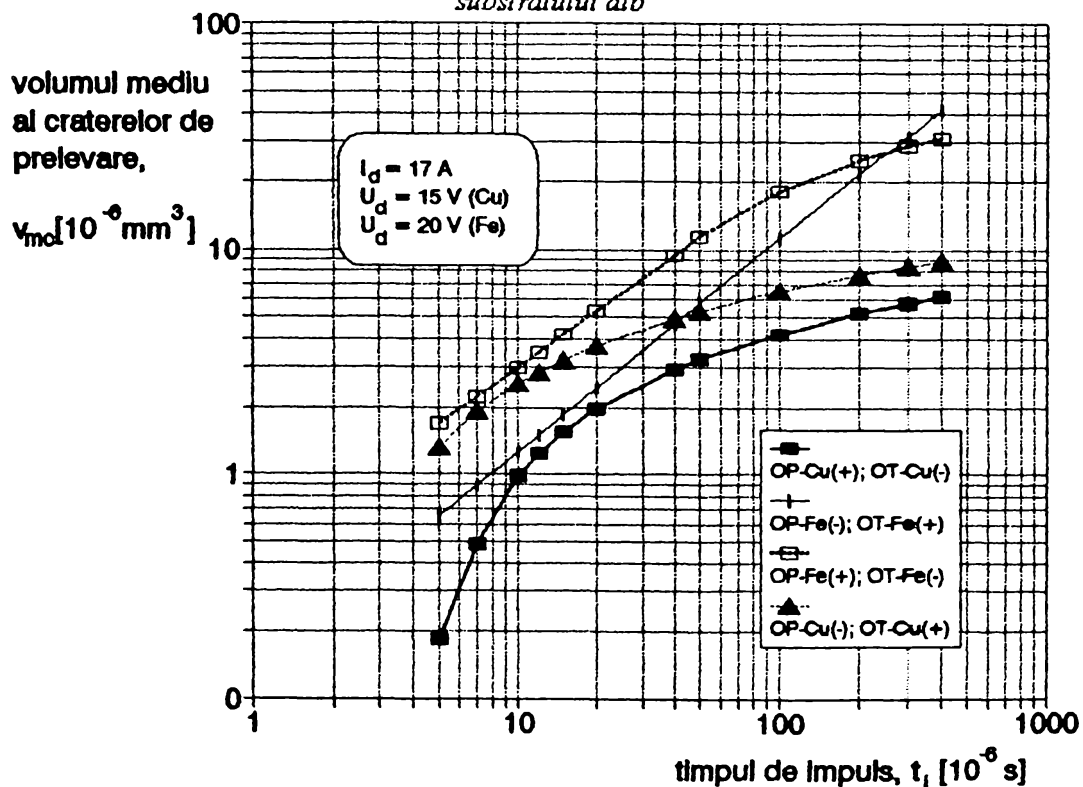


fig. 2.31. Influența timpului de impuls și a polarității perechii de electrozi, asupra volumului mediu al craterelor de prelevare

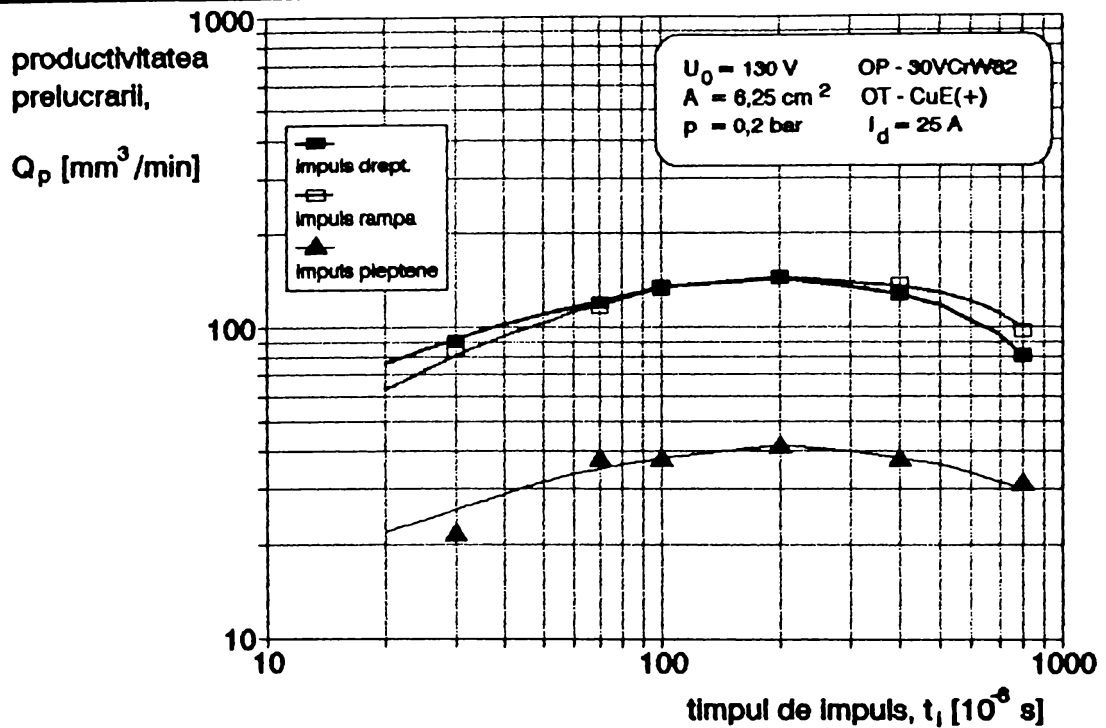


fig. 2.32. Influența timpului de impuls și a formei impulsurilor de curent, asupra productivității prelucrării

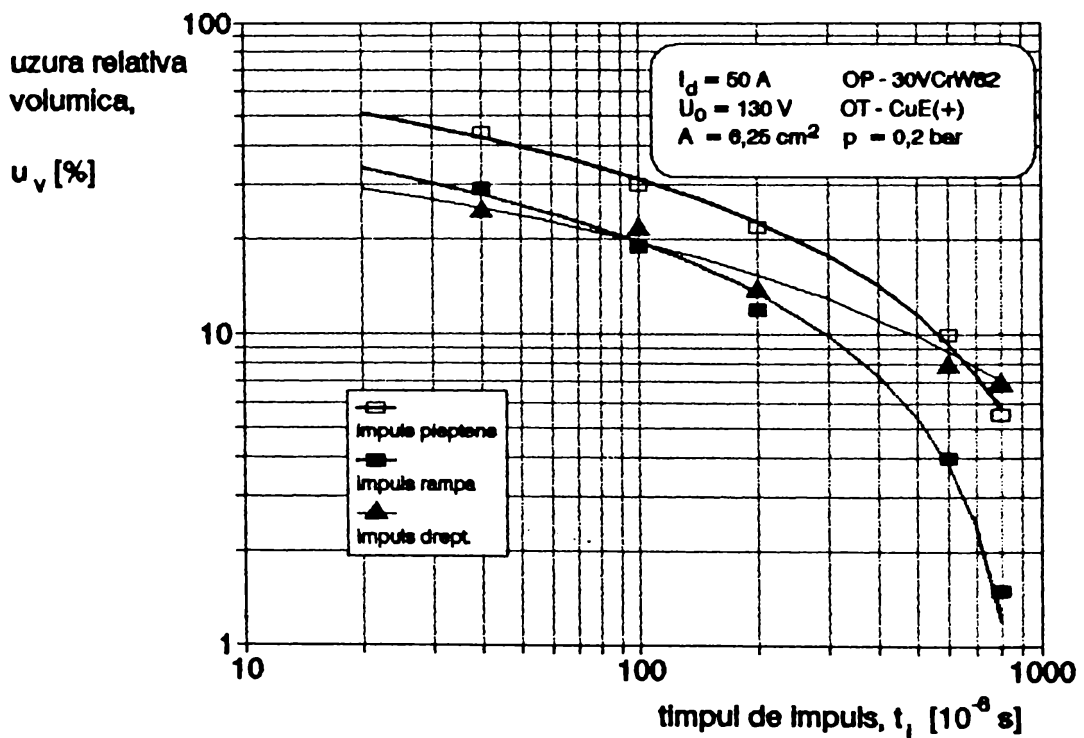


fig. 2.33. Influența timpului de impuls și a formei impulsurilor de curent, asupra uzurii relative volumice

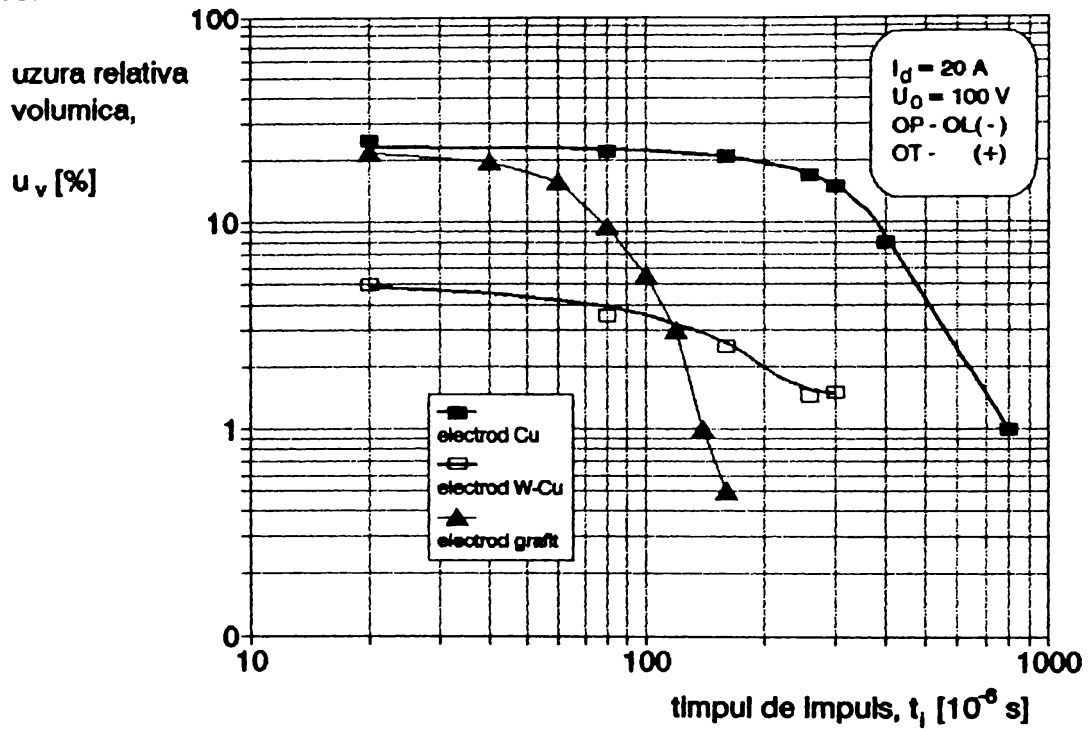


fig. 2.35. Influența timpului de impuls și a naturii materialului electrodului, asupra uzurii relative volumice

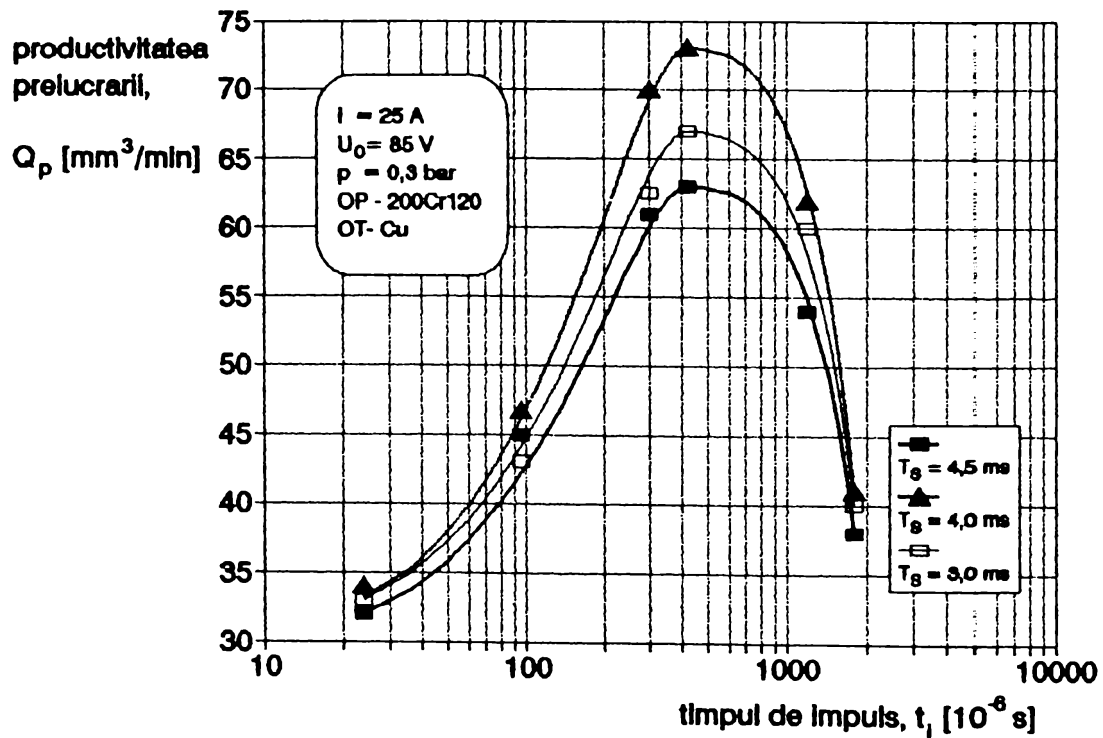


fig. 2.36. Influența timpului de impuls și a constantei de integrare a proceselor elementare de scurtcircuit, asupra productivității prelucrării

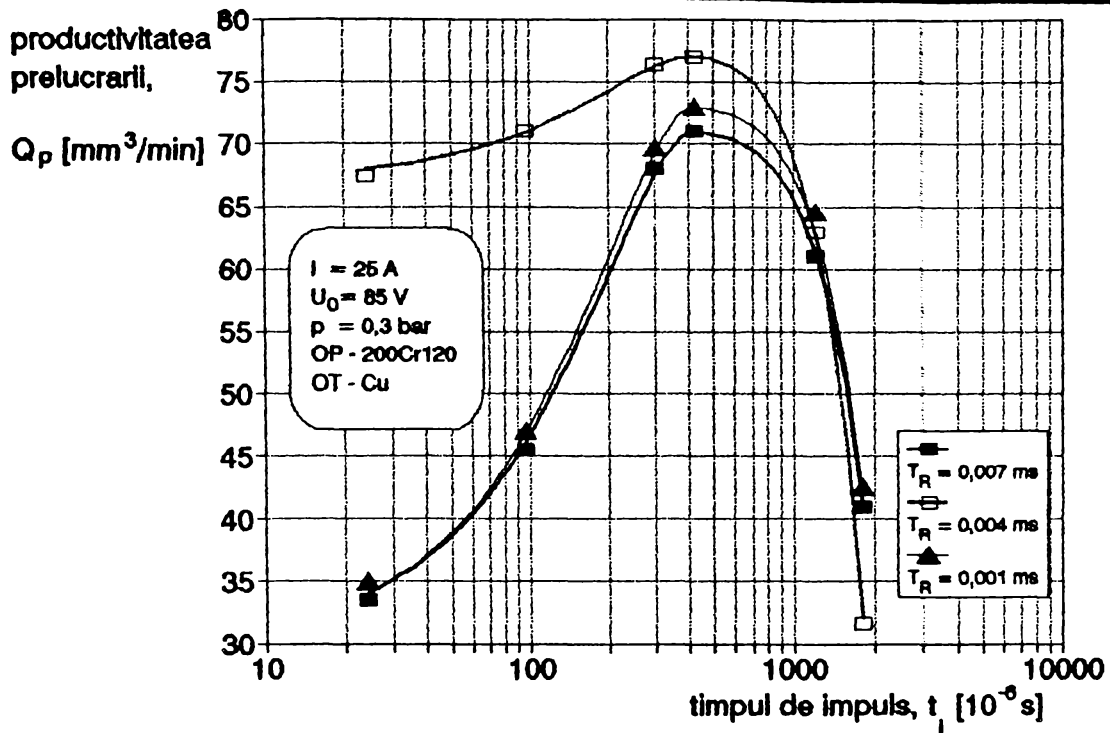


fig. 2.37. Influența timpului de impuls și a timpului de referință a duratei de întârziere la amorsarea descărcării, asupra productivității prelucrării

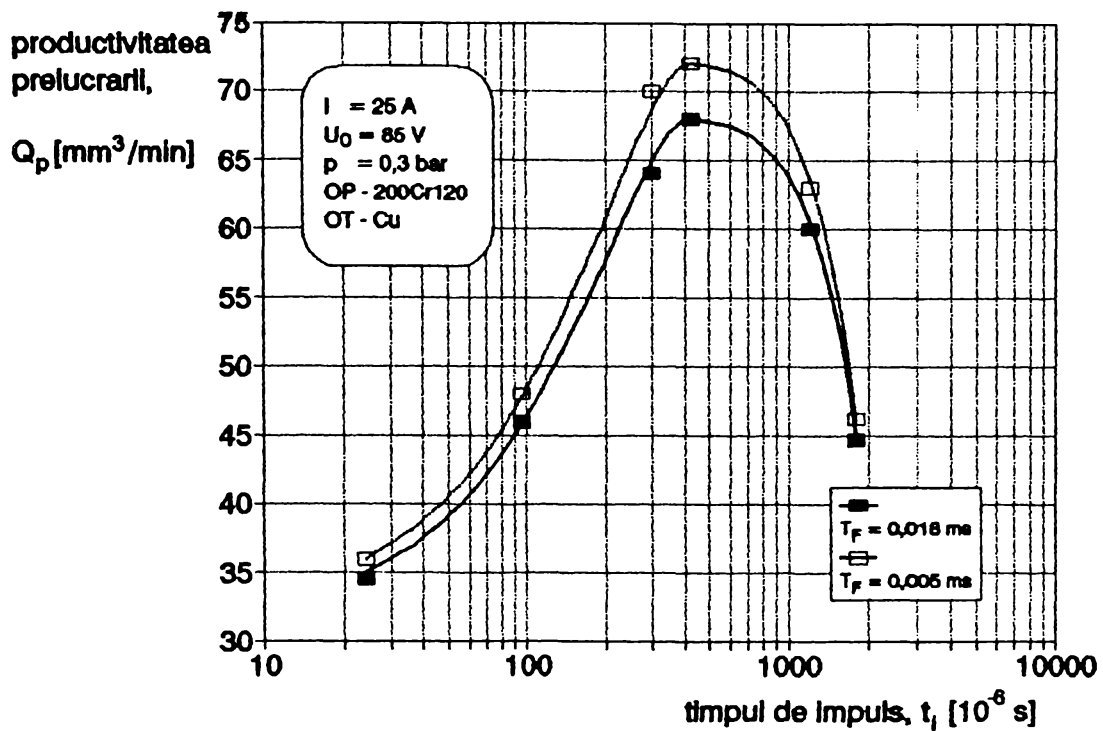


fig. 2.38. Influența timpului de impuls și a duratei de ștergere limitată a informației memorate, asupra productivității prelucrării

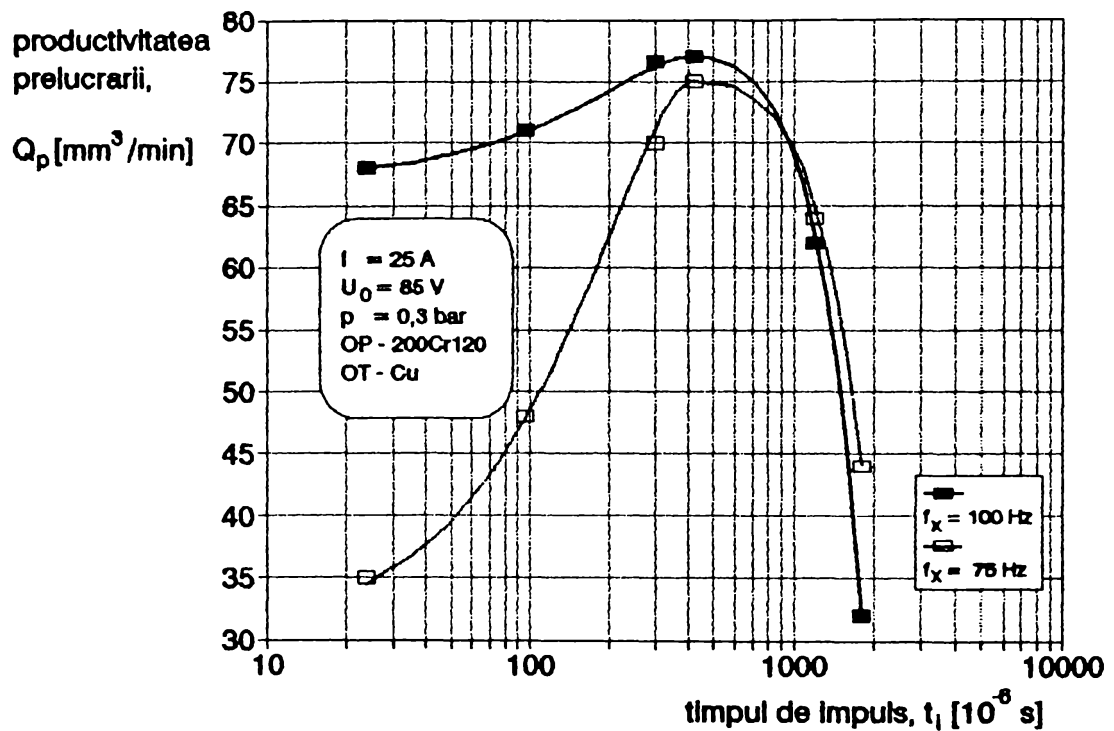


fig. 2.39. Influența timpului de impuls și a frecvenței de reglare a elementului de execuție, asupra productivității prelucrării

Cu toate că reprezintă numai aproximativ 10 %, din totalul mărimilor de intrare în sistem, parametrii impulsurilor electrice sunt foarte bine reprezentați în literatura de specialitate. Doi dintre acești parametri, care s-au dovedit a fi și foarte importanți, amplitudinea impulsului de curent, I_d și durata impulsurilor de curent, t_{is} , sunt cei mai des analizați factori de influență. În ceea ce privește mărimile de ieșire din sistem, cei mai studiați indicatori de performanță sunt productivitatea prelucrării, Q_p (în special), uzura relativă volumică, u_v și abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate, R_a .

3. MODELAREA FENOMENELOR LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ

Modelarea constă în studierea unui fenomen, prin înlocuirea originalului cu un model. Rezultatele experimentării pe model se transferă cantitativ asupra originalului. Pentru a ajunge la rezultatele dorite, experimentarea pe model trebuie să fie mai simplă și mai rapidă decât experimentarea pe original, în acest mod obținându-se situații mai puțin periculoase și mai economice.

Clasificarea modelelor este reprezentată în fig. 3.1.

Modelul material este modelul real, obiectul propriu-zis, care înlocuiește originalul pe parcursul experimentării. Modelul ideal sau modelul abstract este reprezentat de imaginea obiectului real în conștiința cercetătorului. În cele mai multe cazuri, mai întâi se formează imaginea obiectului pe baza schemei lui, ținând cont de reprezentarea sa fizică, apoi se realizează descrierea cantitativă, pe baza structurilor matematice. Nu întotdeauna modelul ideal se dezvoltă pornind de la modelul fizic la cel matematic, ci sunt situații când dezvoltarea are loc în sens invers.

Sunt multe cazuri când un fenomen tehnologic, datorită complexității lui, este bine să fie studiat, în situații diferite, cu modele diferite, atât matematice, cât și fizice, funcție de natura

problemei ce se dorește a se rezolva. Cele două tipuri de modele nu se exclud, ci se completează reciproc. În anumite situații, teoria oferă o formă generală a ecuațiilor ce descriu fenomenul, iar valorile concrete ale unor coeficienți, exponenți sau termeni se obțin pe cale

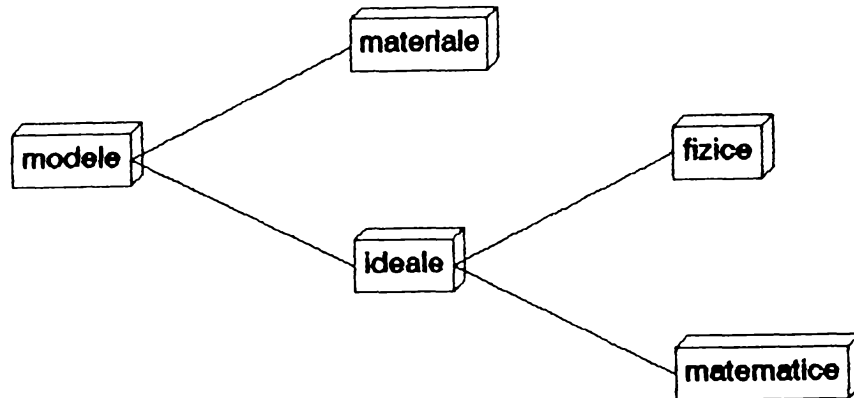


fig. 3.1. Clasificarea modelelor

experimentală. În general însă, modelarea se realizează pe cale statistică. Este și cazul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică, unde, stăpânirea teoretică incompletă a fenomenelor, suprapunerea parțială temporală și spațială, precum și desfășurarea lor cu viteze foarte mari, fac ca rezultatele să fie afectate de o anumită probabilitate.

3.1. Premodelarea sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică

Numărul foarte mare de factori de influență a procesului electroeroziv, datorat mulțimii fenomenelor elementare, face, practic, imposibilă construirea unui model fizico-matematic, care să ia în considerare toți parametrii. Apare necesitatea unei etape anterioare modelării propriu-zise, premodelarea, care abordează, pe baza informațiilor apriorice, mai multe aspecte:

- stabilirea variabilelor de stare și a parametrilor procesului;
- determinarea intervalelor de variație a parametrilor procesului;
- precizarea gradului de legătură între variabilele de stare și parametrii procesului.

Variabilele de stare (factori dependenți, mărimi ieșire, indicatori de performanță) se aleg astfel, încât să fie mărimi cantitative, măsură directă a eficienței procesului considerat și semnificative statistic.

Parametrii procesului (factori independenți, mărimi intrare) trebuie să fie reglabili, iar precizia în controlarea lor, să fie cunoscută și suficient de mare.

Între mărimile intrare și ieșire ale sistemului, trebuie să existe o legătură biunivocă, cu domenii de variație clar precizate ale celor două categorii de factori, iar combinații pe diferite trepte ale parametrilor să nu conducă la depășirea limitelor variabilelor de stare.

Problema centrală a oricărei premodelări este selectarea parametrilor care vor intra în modelul procesului. Pentru atingerea acestui scop, experimentatorul, pe baza propriei experiențe, alege factorii independenți, mărimi intrare în sistemul de prelucrare. În cazul eroziunii electrice cu electrod masiv, problema capătă dimensiuni neobișnuite, din cauza numărului foarte mare (peste 100 [6.], [106.]) de parametri ai procesului. Selectarea lor devine, în această situație, hotărâtoare. Există mai multe metode de preselecție a factorilor, cele mai des utilizate fiind metoda experimentului psihologic, metoda bilanțului aleator și metoda experimentului factorial, complet sau fracționat [52.], [102.].

3.1.1. Premodelarea cu ajutorul metodei experimentului psihologic

Organizarea unui experiment cu mulți parametri implică cheltuieli sporite de materiale, manoperă și energie. De pe aceste poziții, utilizarea metodei experimentului psihologic [15.], [16.], [51.], [56.], [90.], în țara noastră cunoscută sub numele de metoda corelației de rang [134.], [135.], aproape că se impune de la sine. Metoda prezintă marele avantaj că nu necesită organizarea efectivă a unui experiment, ci, preluând informații apriorice, prelucrează statistic părerile unor specialiști în domeniu.

Pentru atingerea scopului propus, este necesar a se parcurge mai multe etape:

• Organizatorul anchetei, pe baza experienței anterioare, stabilește care sunt parametrii și indicatorii urmăriți, întocmește formularele de anchetă și alege specialiștii care vor fi consultați. Specialiștii sunt solicitați să ordoneze factorii procesului, funcție de influența pe care o exercită asupra fiecărui indicator de performanță, atribuind un rang fiecărui factor, cei mai importanți primind primele numere din șirul de ordonare. În cazul în care nu pot fi ierarhizați, mai mulți factori pot primi același rang.

• Se însumează rangurile acordate fiecărui factor, de către toți specialiștii. Factorul cu suma cea mai mică este cel mai important, urmat, în ordine crescătoare a sumei rangurilor, de către ceilalți factori, rezultând, astfel, ordinea primară (naturală) a factorilor de influență.

• Se recurge la o corecție care ține cont de locul real pe care îl ocupă factorul în șirul de ordonare, în cazul în care unii specialiști au acordat același rang mai multor factori. Se însumează noile ranguri, obținându-se, în același mod, ordinea secundară (corectată) a factorilor de influență.

• Se ponderează opiniile specialiștilor, proporțional cu nivelul lor de pregătire profesională, experiența în domeniu, seriozitate față de anchetă. Coeficienții de pondere cu care sunt creditați specialiștii, se obțin printr-un punctaj asemănător celui din etapele anterioare, dar, de data aceasta, acordat specialiștilor, de către fiecare dintre ei.

• Se înmulțesc valorile corectate ale rangurilor cu coeficienții de pondere, obținându-se o nouă sumă de ranguri, care conduce la ordinea terțiară (ponderată) a factorilor de influență.

• Se verifică gradul de consens al specialiștilor, în ordonarea factorilor, comparând frecvențele reale de opinie, cu frecvența medie de opinie. Dacă se constată lipsa de consens al specialiștilor, se înlătură din anchetă acei specialiști, care sunt cei mai îndepărtați de opinia medie și se reparcurg etapele anterioare, luând în considerare numai opiniile specialiștilor rămași.

În România, în domeniul prelucrării prin eroziune electrică, pentru prima dată, metoda a fost folosită în [95].

În [91.], [94.], [95.], [98.], [103.], $m = 15$ specialiști S_i ($i = 1 \dots m$) au ordonat $n = 11$ factori de influență x_j ($j = 1 \dots n$) asupra a $p = 6$ indicatori de performanță y_k ($k = 1 \dots p$) (fig. 3.2.). În matricea de ordonare, prezentată în tab. 3.1., a_{ij} reprezintă rangul acordat de specialistul S_i , factorului x_j .

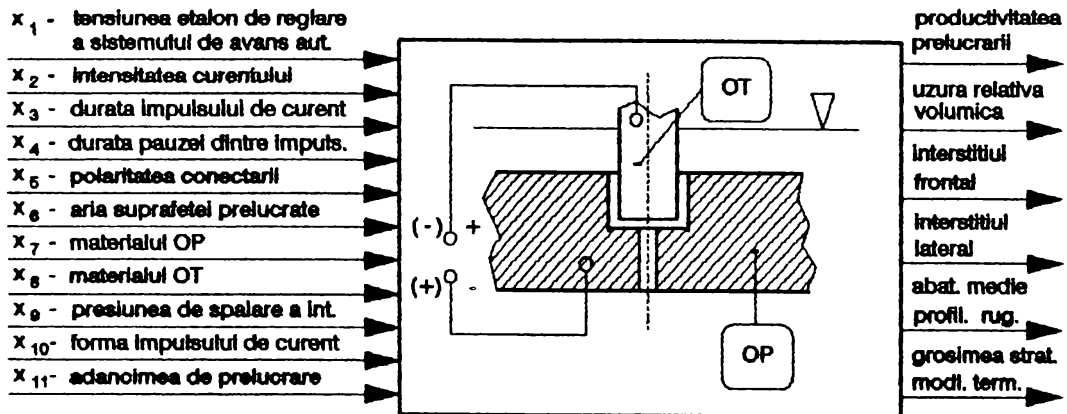


fig. 3.2. Factorii de influență și indicatorii de performanță analizați cu metoda experimentului psihologic

Matricea generalizată de ordonare a factorilor de influență

tab. 3.1.

specialistul	factorul de influență, x _j					
	x ₁	x ₂	...	x _j	...	x _n
S ₁	a ₁₁	a ₁₂	...	a _{1j}	...	a _{1n}
S ₂	a ₂₁	a ₂₂	...	a _{2j}	...	a _{2n}
...
S _i	a _{i1}	a _{i2}	...	a _{ij}	...	a _{in}
...
S _m	a _{m1}	a _{m2}	...	a _{mj}	...	a _{mn}
	∑a ₁	∑a ₂	...	∑a _j	...	∑a _n

Pentru a aprecia gradul de concordanță a părerilor specialiștilor, se calculează [51.] coeficientul de concordanță $W \in [0, 1]$:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^m d_i^2}{m^2(n^2 - n)} \quad (3.1.)$$

unde:

$$\sum_{i=1}^m d_i^2 = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m a_{ij} - a \right)^2 \quad (3.2.)$$

iar:

$$a = \frac{m(n+1)}{2}. \quad (3.3.)$$

Dacă opiniile specialiștilor sunt în concordanță, atunci $W = 1$, iar dacă opiniile lor sunt divergente, $W = 0$. Pragul de concordanță se poate calcula utilizându-se, fie distribuția Fischer, fie distribuția χ^2 . În cel de-al doilea caz, calculele sunt mai simple: dacă valoarea calculată χ_c^2 este mai mare decât cea tabelată χ_T^2 , atunci ipoteza concordanței opiniilor specialiștilor este confirmată.

Deci, dacă:

$$\chi_c^2 = m(n-1)W > \chi_T^2, \quad (3.4.)$$

opiniile specialiștilor au fost în consens.

În continuare, drept exemplificare, se prezintă în detaliu, toate etapele de ordonare a celor 11 factori de influență, x_j ($j = 1 \dots 11$), în cazul celui mai des întrebuințat indicator de performanță, productivitatea prelucrării, Q_p [95.]. Domeniile de variație a parametrilor reglabili sunt cele posibile de obținut pe mașina de prelucrat prin eroziune electrică ELER, echipată cu generatoare de impulsuri GEP. Cei $m = 15$ specialiști din domeniu consultați, sunt cadre didactice de la Facultatea de Mecanică a Universității "Politehnica" din Timișoara.

În tab. 3.2. sunt prezentate rangurile atribuite de specialiști celor 11 factori, cel mai important factor primind 1 punct, următorul, 2 puncte, ultimul primind 11 puncte. În finalul tabelului sunt însumate punctele acumulate de fiecare factor și este prezentată ordinea naturală a factorilor, θ_j^1 .

Datele primare corectate sunt prezentate în tab. 3.3., în finalul căruia sunt evidențiate noile punctaje, precum și ordinea corectată, θ_j^2 .

Coefficienții de pondere, δ_b , cu care sunt creditați specialiștii, sunt prezentați în tab. 3.4. Aplicând coeficienții δ_b valorilor a_j din tab. 3.3., se obțin noile valori, prezentate în tab. 3.5. Se observă că ordinele naturală, θ_j^1 , corectată, θ_j^2 și ponderată, θ_j^3 , în acest caz, nu se modifică.

Aplicând criteriul χ^2 , rezultă $\chi_c^2 = 76,6$, valoare mai mare decât $\chi_T^2 = 18,3$, pentru nivel de încredere $\alpha_1 = 0,05$ sau $\chi_T^2 = 23,3$, pentru $\alpha_2 = 0,01$. Deci, ipoteza concordanței opiniilor specialiștilor este confirmată, în ambele variante.

Matricea naturală de ordonare a factorilor de influență a productivității prelucrării

tab. 3.2.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
S_1	1	1	2	3	5	4	5	6	5	3	7
S_2	8	1	2	8	3	6	7	3	4	9	6
S_3	7	4	5	6	3	10	1	2	8	9	11
S_4	11	1	2	9	3	7	4	5	8	6	10
S_5	8	1	2	6	5	9	3	4	7	10	11
S_6	6	1	1	4	2	6	3	5	5	4	7
S_7	1	1	2	4	1	3	4	4	5	6	7
S_8	3	2	2	3	1	3	3	1	4	3	4
S_9	5	1	2	6	3	8	4	4	7	6	8
S_{10}	8	4	5	6	3	10	1	2	9	7	11
S_{11}	8	1	2	4	3	9	5	6	7	10	11
S_{12}	2	1	7	8	6	10	3	4	5	11	9
S_{13}	3	4	1	5	7	6	6	2	8	5	9
S_{14}	2	1	3	5	7	6	6	8	5	4	9
S_{15}	1	2	2	7	3	5	4	2	6	7	8
$\sum a_{ij}$	73	26	40	84	55	102	59	58	94	100	127
θ_j^1	6	1	2	7	3	10	5	4	8	9	11

Interpretarea rezultatelor pornește de la reprezentările grafice sub formă de histogramă. Pentru productivitatea prelucrării, ordinea importanței factorilor de influență este prezentată în histograma din fig. 3.3. Pentru restul funcțiilor de răspuns (uzura relativă volumică, interstițiul frontal, interstițiul lateral, abaterii medie aritmetică a profilului de rugozitate și grosimea stratului modificat termic), histogramele sunt prezentate în anexele din cap. 7. (fig. 7.1. ... fig. 7.5.). În toate histogramele, fiecare factor de influență își păstrează codificarea grafică.

Criteriul K permite gruparea factorilor în grupe de influență. Dacă, pentru un anumit număr de factori, valoarea calculată, K_C este mai mică decât valoarea tabelată, K_T , atunci, toți factorii din grup, au același grad de influență asupra indicatorului de performanță. În caz contrar, între acești factori există, cel puțin, unul care este de rang diferit de al celorlalți.

Aplicând acest criteriu, pentru primii șase factori de influență din finalul tab. 3.5. (x_2 , x_3 , x_5 , x_8 , x_7 , x_1), rezultă $K_{C1} = 0,58 < K_{T1} = 0,77$, aceasta însemnând că, factorii enumerați anterior sunt de același rang de influență. Cum pentru ceilalți cinci factori (x_4 , x_9 , x_{10} , x_6 , și x_{11}), $K_{C2} = 0,63 < K_{T2} = 0,89$, rezultă că, toți acești factori sunt de importanță secundară în procesul considerat.

Matricea corectată de ordonare a factorilor de influență a productivității prelucrării
tab. 3.3.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
S_1	1,5	1,5	3	4,5	8	6	8	10	8	4,5	11
S_2	9,5	1	2	9,5	3,5	7	8	3,5	5	11	6
S_3	7	4	5	6	3	10	1	2	8	9	11
S_4	11	1	2	9	3	7	4	5	8	6	10
S_5	8	1	2	6	5	9	3	4	7	10	11
S_6	9,5	1,5	1,5	3,5	3	9,5	4	7,5	7,5	5,5	11
S_7	2	2	4	7	2	5	7	7	9	10	11
S_8	7	3,5	3,5	7	1,5	7	7	1,5	10,5	7	10,5
S_9	6	1	2	7,5	3	10,5	4,5	4,5	9	7,5	10,5
S_{10}	8	4	5	6	3	10	1	2	9	7	11
S_{11}	8	1	2	4	3	9	5	6	7	10	11
S_{12}	2	1	7	8	6	10	3	4	5	11	9
S_{13}	3	4	1	5,5	9	7,5	7,5	2	10	5,5	11
S_{14}	2	1	3	5,5	9	7,5	7,5	10	5,5	4	11
S_{15}	1	3	3	9,5	5	7	6	3	8	9,5	11
Σa_j	85,5	30,5	46	100,5	67	122	76,5	72	116,5	117,5	156
θ_j^2	6	1	2	7	3	10	5	4	8	9	11

Ierarhiile celor 11 factori de influență (x_1 - tensiunea etalon de reglare a sistemului de avans automat, x_2 - intensitatea curentului, x_3 - durata impulsului de curent, x_4 - durata pauzei dintre impulsuri, x_5 - polaritatea conectării, x_6 - aria suprafeței prelucrate, x_7 - materialul OP, x_8 - materialul OT, x_9 - presiunea de spălare a interstițiului tehnologic, x_{10} - forma impulsului de curent, x_{11} - adâncimea de prelucrare), în cazul celor 6 indicatori de performanță luați în

S_1	S_1
S_2	1,78
S_3	2,00
S_4	1,53
S_5	1,98
S_6	1,83
S_7	1,63
S_8	1,55
S_9	1,59
S_{10}	1,49
S_{11}	1,44
S_{12}	1,21
S_{13}	1,00
S_{14}	1,17
S_{15}	1,16
S_{16}	1,14

Coefficienții de pondere cu care sunt creditați specialiștii experimentului psihologic

tab. 3.4.

considerare (y_1 - productivitatea prelucrării, y_2 - uzura relativă volumică, y_3 - interstițiul frontal, y_4 - interstițiul lateral, y_5 - abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate, y_6 - grosimea stratului modificat termic), sunt prezentate în tab. 3.6.

Tab. 3.6., împreună cu fig. 3.3. și fig. 7.1. ... fig. 7.5. evidențiază complexitatea fenomenelor ce se întâlnesc în eroziunea electrică. Studiind aceste reprezentări grafice, se constată următoarele aspecte:

- cu excepția unui factor (x_{11}), nici unul dintre factori nu își păstrează aceeași poziție în toate ierarhiile;
- factorul x_{11} (grosimea obiectului de prelucrat sau adâncimea de prelucrare) este pe ultimul loc în toate ierarhiile;
- factorul x_2 (curentul de lucru) este pe primul loc în 5 din cele 6 ierarhii;
- factorul x_3 (durata impulsului de curent) este pe poziții fruntașe în toate ierarhiile (4 locuri II și 2 locuri III);
- tendința de conservare a pozițiilor se observă la extreme (5 din 6, primul loc, 6 din 6, ultimul loc);
- cele mai mari salturi le fac x_1 (locul I, la y_5 și locul VI, la y_1) și x_9 (locul IV, la y_5 și y_6 și locul IX, la y_2);
- cele mai mici salturi le fac x_2 (locurile I și II), x_3 (locurile II și III) și x_6 (locurile IX și X);
- restul factorilor se situează în ierarhii ce diferă cu 2 trepte (x_8), 3 trepte (x_9 și x_{10}) și chiar 4 trepte (x_5 și x_7);
- în grupa factorilor de prim rang se regăsesc, în toate ierarhiile, doar factorii x_2 , x_3 și x_6 ;
- factorii x_4 , x_{10} și x_{11} sunt situați, în toate cazurile, în grupa factorilor de importanță secundară în proces.

Matricea ponderată de ordine a factorilor de influență a productivității prelucrării

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
S_1	2,67	2,67	5,34	8,01	14,24	10,68	14,24	17,8	14,24	8,01	19,58
S_2	19	2	4	19	7	14	16	7	10	22	12
S_3	10,71	6,12	7,65	9,18	4,59	15,3	1,53	3,06	12,24	13,77	16,83
S_4	21,78	1,98	3,96	17,82	5,94	13,86	7,92	9,9	15,84	11,88	19,8
S_5	14,64	1,83	3,66	10,98	9,15	16,47	5,49	7,32	12,81	18,3	20,13
S_6	15,485	2,445	2,445	8,965	4,89	15,485	6,52	12,225	12,225	8,965	17,93
S_7	3,1	3,1	6,2	10,85	3,1	7,75	10,85	10,85	13,95	15,5	17,05
S_8	11,13	5,565	5,565	11,13	2,385	11,13	11,13	2,385	16,695	11,13	16,605
S_9	8,94	1,49	2,98	11,175	4,47	15,645	6,705	6,705	13,41	11,175	15,645
S_{10}	11,52	5,76	7,2	8,64	4,32	14,4	1,44	2,88	12,96	10,08	15,84
S_{11}	9,68	1,21	2,42	4,84	3,63	10,89	6,05	7,26	8,47	12,1	13,31
S_{12}	2	1	7	8	6	10	3	4	5	11	9
S_{13}	3,51	4,68	1,17	6,435	10,53	8,775	8,775	2,34	11,7	6,435	12,87
S_{14}	2,32	1,16	3,48	6,38	10,44	8,7	8,7	11,6	6,38	4,64	12,76
S_{15}	1,14	3,42	3,42	10,83	5,7	7,98	6,84	3,42	9,12	10,83	12,54
Σa_{ij}	137,625	44,43	66,49	152,235	96,385	181,065	115,19	108,745	175,04	175,815	231,98
θ_j	6	1	2	7	3	10	5	4	8	9	11

tab. 3.5.

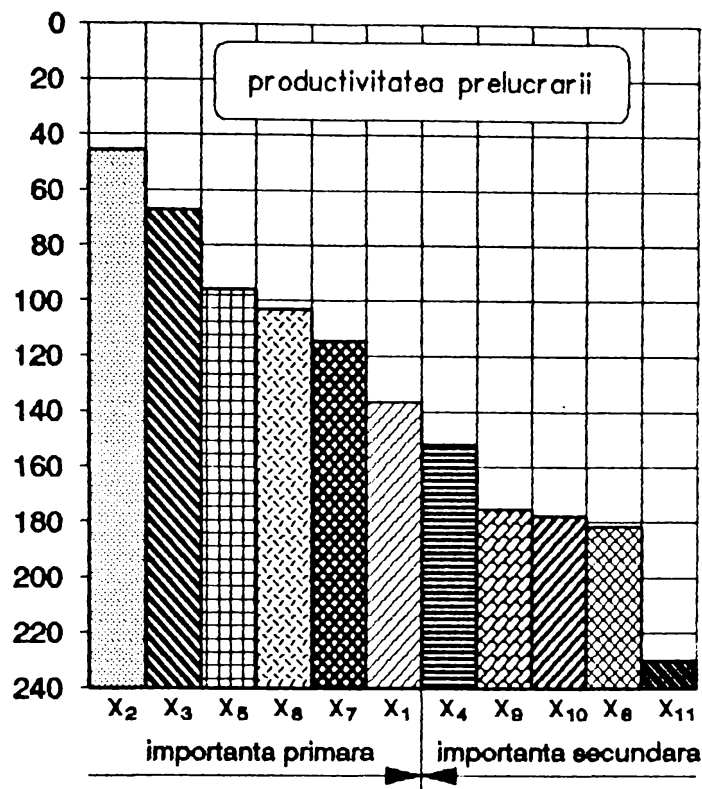


fig. 3.3. Ordinea factorilor de influență a productivității prelucrării

Ierarhiile factorilor de influență în cazul diferitelor funcții de răspuns urmărite

tab. 3.6.

indicatorul de performanță y_k	factorul de influență x_i										
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
y_1	6	1	2	7	3	10	5	4	8	9	11
y_2	5	1	2	7	3	10	6	4	9	8	11
y_3	5	1	2	10	3	9	4	6	8	7	11
y_4	5	1	2	9	4	10	3	6	8	7	11
y_5	1	2	3	8	7	9	5	6	4	10	11
y_6	2	1	3	8	6	10	7	5	4	9	11

3.1.2. Premodelarea cu ajutorul metodei bilanțului aleator

Metoda bilanțului aleator permite ierarhizarea factorilor de influență, funcție de amplitudinea efectului pe care îl au asupra variabilei de răspuns urmărită. Variabilele luate în discuție, pot fi, nu numai cantitative, ci și calitative.

Metodica de lucru presupune parcurgerea următoarelor etape [26.], [57.]:

a) stabilirea factorilor de influență a procesului, a unităților lor de măsură, precum și a domeniilor lor de variație;

b) determinarea numărului de nivele de variație a fiecărui factor, funcție de influența lor prezumată asupra procesului. Cu cât influența se presupune a fi mai mare, cu atât numărul nivelelor de variație poate fi mai mare;

c) dimensionarea experimentului, prin stabilirea numărului minim necesar de experiențe, drept cel mai mic multiplu comun al numărului de nivele ale tuturor factorilor de influență,

d) întocmirea matricei program a experimentului, introducând, în mod aleator, valorile nivelelor de variație ale tuturor factorilor și ținând cont de faptul că, fiecare nivel al factorului trebuie să intervină de același număr de ori;

e) efectuarea practică a experiențelor, randomizând ordinea de efectuare a lor și determinarea valorilor funcțiilor obiectiv urmărite;

f) determinarea valorilor medii ale funcției obiectiv pentru fiecare dintre nivelele de variație ale tuturor factorilor luați în considerare;

g) construirea diagramelor de dispersie ale funcției obiectiv și calcularea domeniilor de variație ale funcției obiectiv, pentru fiecare factor de influență;

h) determinarea factorului cu influența cea mai puternică, ca fiind factorul căruia îi corespunde domeniul de variație maxim;

i) eliminarea influenței factorului primar asupra funcției obiectiv prin adunarea algebrică a diferenței dintre valoarea medie generală pe experiment a funcției obiectiv și valoarea ei medie pentru fiecare nivel al factorului primar, la toate valorile funcției obiectiv afectate de nivelul respectiv al factorului de primă importanță;

j) reluarea iterativă a procedurii, cu noile valori ale funcției obiectiv și determinarea celui de-al doilea factor de influență, apoi celui de-al treilea și așa, în continuare, până la epuizarea tuturor factorilor.

Experimentul descris în [57.], s-a efectuat pe o mașină de prelucrat prin eroziune electrică cu electrod masiv ELER-01, echipată cu generatorul de impulsuri GEP-50 F. Materialul OP este carbura metalică de tip G 10, iar cel al OT, este cuprul electrolitic. Operația a fost tip copierea formei, iar durata de prelucrare la fiecare experiență a fost de 15 minute.

Cei cinci factori independenți luați în considerare, precum și nivelele pe care aceștia iau valori, sunt prezentați în tab. 3.7.

Factorii de influență a procesului analizați prin metoda bilanțului aleator

tab. 3.7.

nr. crt.	factorii de influență	simb.	unit. măs.	nr. niv.	valorile nivelelor
1.	amplitudinea impulsului de curent	I_d	A	3	6,25; 25; 50
2.	timpul de impuls	t_i	μs	6	4; 8; 24; 95; 190; 420
3.	timpul de pauză	t_p	μs	6	4; 8; 24; 95; 190; 420
4.	presiunea de injectare a lichidului	p	bar	3	0,1; 0,2; 0,3
5.	polaritatea conectării electrodului	pol	-	2	+; -

Aplicând metodica descrisă anterior, se evidențiază ierarhia celor 5 factori de influență a productivității prelucrării, ca fiind: timpul de impuls, amplitudinea impulsului de curent, timpul de pauză, polaritatea conectării și presiunea de injecție a lichidului dielectric prin interstițiul tehnologic.

3.1.3. Premodelarea cu ajutorul metodei experimentului factorial

Și această metodă permite ierarhizarea factorilor de influență a procesului, în plus evidențiind și ecuațiile de regresie dintre variabilele dependente și cele independente ale

procesului. Din acest motiv, spre deosebire de metoda bilanțului aleator, nu pot fi luate în discuție decât variabile independente cantitative.

Este necesar a se parcurge următoarea secvență experimentală:

a) dimensionarea experimentului, adică stabilirea volumului minim de experiențe necesar:

$$N = p^m, \quad (3.5.)$$

unde m reprezintă numărul variabilelor, iar p , numărul nivelelor pe care se reglează variabilele independente; de obicei $p = 2$;

b) stabilirea nivelului de bază, x_0 și a intervalului de variație a factorilor, în raport cu nivelul de bază, $\pm \Delta x$, având în vedere restricțiile de natură fenomenologică, tehnico-economică, condițiile concrete disponibile;

c) construirea matricei program a experimentului, în valori codificate, atribuind simbolul “-1”, valorii minime a factorului și simbolul “+1”, valorii maxime a lui. Numărul total de experiențe poate să cuprindă toate combinațiile posibile ale factorilor (experiment factorial complet) sau o parte bine determinată a lor (experiment factorial fracționat);

d) desfășurarea practică a experimentului propriu-zis, pe mai multe replici, cu efectuarea măsurătorilor necesare;

e) calcularea valorilor individuale, mediilor și dispersiilor, verificarea omogenității dispersiilor cu ajutorul unor criterii de normalitate;

f) calculul coeficienților de regresie, a intervalului de încredere, precum și a pragului de semnificație. Factorii ai căror coeficienți au valori mai mari decât valoarea pragului de semnificație, sunt semnificativi statistic, în condițiile date, în caz contrar, fiind nesemnificativi;

g) obținerea ecuației de regresie și verificarea adecvantei modelului folosit.

Spre exemplificare, sunt prezentate, în continuare, două experimente în vederea ierarhizării unor factori de influență, în cazul eroziunii electrice cu electrod masiv, un program factorial fracționat cu $N = 2^{6-2}$ experiențe [84.] și un program factorial complet cu $N = 2^4$ experiențe [41.], [42.].

În primul caz, au fost luați în considerare 6 factori:

- x_1 [mm²] - aria suprafeței prelucrate;
- x_2 [mm] - adâncimea de prelucrare;
- x_3 [bar] - presiunea de spălare a lichidului de lucru prin intersițiu;
- x_4 [A] - nivelul de intensitate a curentului;

- x_5 [μs] - durata impulsului de curent;
- x_6 [V] - tensiunea etalon de reglare a sistemului de avans automat.

Condițiile de lucru sunt prezentate în fig. 3.4. și în tab. 3.8.

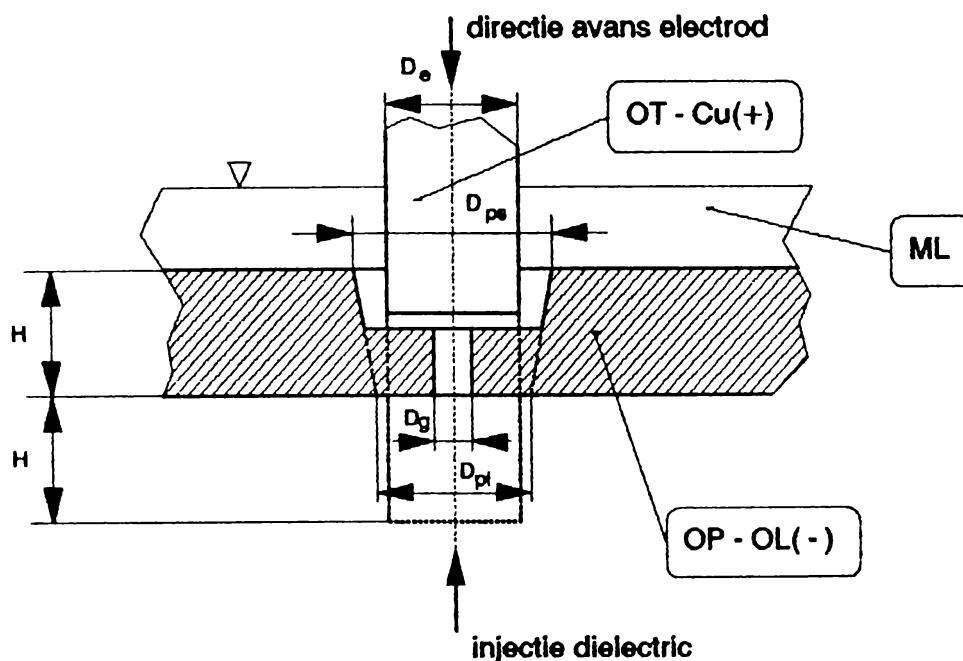


fig. 3.4. Operația de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv, suportul
experimentului factorial fracționat

Factorii de influență a procesului, analizați prin metoda experimentului factorial fracționat
tab. 3.8.

nivele	simbol	x_1 [mm^2]	x_2 [mm]	x_3 [bar]	x_4 [A]	x_5 [μs]	x_6 [V]
nivel de bază	x_0	225	7,5	0,3	15	117,5	2,75
interval de variație	Δx_i	75	2,5	0,1	5	42,5	0,25
nivel superior	+1	300	10	0,4	20	160	3
nivel inferior	-1	150	5	0,2	10	75	2,5

Matricea program, în care ordinea executării experiențelor a fost aleatoare, este prezentată în tab. 3.9.

Matricea program pentru experimentul factorial fracționat

tab. 3.9.

nr. crt.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1.	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2.	-1	+1	+1	-1	-1	-1
3.	+1	-1	-1	-1	+1	-1
4.	+1	+	+1	-1	+1	-1
5.	-1	-1	-1	+1	-1	+1
6.	-1	+1	+1	+1	-1	+1
7.	+1	-1	-1	+1	+1	+1
8.	+1	+1	+1	+1	+1	+1
9.	+1	+1	-1	+1	-1	-1
10.	+1	-1	+1	+1	-1	-1
11.	-1	+1	-1	+1	+1	-1
12.	-1	-1	+1	+1	+1	-1
13.	+1	+1	-1	-1	-1	+1
14.	+1	-1	+1	-1	-1	+1
15.	-1	+1	-1	-1	+1	+1
16.	-1	-1	+1	-1	+1	+1

Într-un set de lucrări [81.], [84.], [86.], [87.], [97.], [104.], [109.], [112.], am stabilit modul în care cei 6 parametri (A [mm^2] - aria suprafeței prelucrate; h [mm] - adâncimea de prelucrare; p [bar] - presiunea de spălare a lichidului de lucru prin interstițiu; I [A] - nivelul de intensitate a curentului; t [μs] - durata impulsului de curent; U_a [V] - tensiunea etalon de reglare a sistemului de avans automat) influențează 12 funcții de răspuns (Q_p [mm^3/min] - productivitatea prelucrării, Q_e [mm^3/min] - debitul uzării, u_v [%] - uzura relativă volumică, Q_{p1} [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\text{A}$] și Q_{p2} [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%$] - productivitatea specifică, pe unitatea de curent și, respectiv, pe unitatea de uzură relativă, IP_1 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}$], IP_2 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}$], IP_3 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$] - indicatori de performanță globali, R_a [μm] - abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate, s_L [μm] - mărimea interstițiului lateral, K [-] - conicitatea prelucrării și O_v [-] - ovalitatea orificiului circular), definiți în [87.].

În tab. 3.10. [63.], este prezentat modul în care fiecare factor influențează toți indicatorii de performanță urmăriți.

*Acțiunea factorilor de influență asupra indicatorilor de performanță, determinată prin
experimentul factorial fracționat*

tab.3.10.

nr. crt.	indicatorul de performanță, y_j [u. m.]	factorul de influență, x_i [u. m.]					
		A [mm ²]	h [mm]	p [bar]	I [A]	t_f [μs]	U_a [V]
1.	Q_p [mm ³ /min]	0	0	0	+	+	0
2.	Q_c [mm ³ /min]	-	0	0	+	-	-
3.	u_v [%]	-	0	+	+	-	-
4.	Q_{p1} [mm ³ /min·A]	+	0	-	-	+	0
5.	Q_{p2} [mm ³ /min·%]	0	0	0	+	-	0
6.	IP_1 [mm ³ /min·%·μm]	+	0	-	-	+	0
7.	IP_2 [mm ³ /min·%·μm·mm]	+	+	0	-	+	0
8.	IP_3 [mm ³ /min·%·μm·mm·A]	+	+	0	-	+	-
9.	R_s [μm]	0	-	0	+	+	0
10.	s_L [μm]	-	0	0	+	+	0
11.	K [-]	+	-	0	0	0	0
12.	O_v [-]	0	0	0	0	0	0

Factorii afectați de semnul "0", nu influențează statistic indicatorul de performanță analizat, iar cei prevăzuți cu semnele "+" sau "-" au o influență statistic semnificativă asupra indicatorului de performanță considerat. Semnul "+" arată că, odată cu creșterea valorii factorului, crește valoarea indicatorului, iar semnul "-", indică scăderea valorii indicatorului.

Analizând datele prezentate în tab. 3.10., se pot constata următoarele aspecte:

- nici unul dintre factori nu are o influență statistic semnificativă asupra tuturor celor 12 indicatori de performanță;

- fiecare factor influențează cel puțin 3 dintre cei 12 indicatori de performanță;

- factorii x_4 (nivelul de intensitate a curentului) și x_5 (durata impulsului de curent) sunt importanți la 10 din cei 12 indicatori de performanță;

- conicitatea este influențată numai de cei doi factori care o definesc geometric: x_1 (aria suprafeței prelucrate) și x_2 (adâncimea de prelucrare);

- ovalitatea nu este influențată de nici unul din cei 6 factori luați în considerare.

Prelucrarea dimensională cu electrod rotitor este suportul experimentului factorial complet. Au fost luați în considerare 4 factori:

- x_1 [mm^2] - aria suprafeței prelucrate;
- x_2 [A] - nivelul de intensitate a curentului;
- x_3 [μs] - durata impulsului de curent;
- x_4 [1/min] - turația electrodului.

Condițiile de lucru sunt prezentate în fig. 3.5. și tab. 3.11.

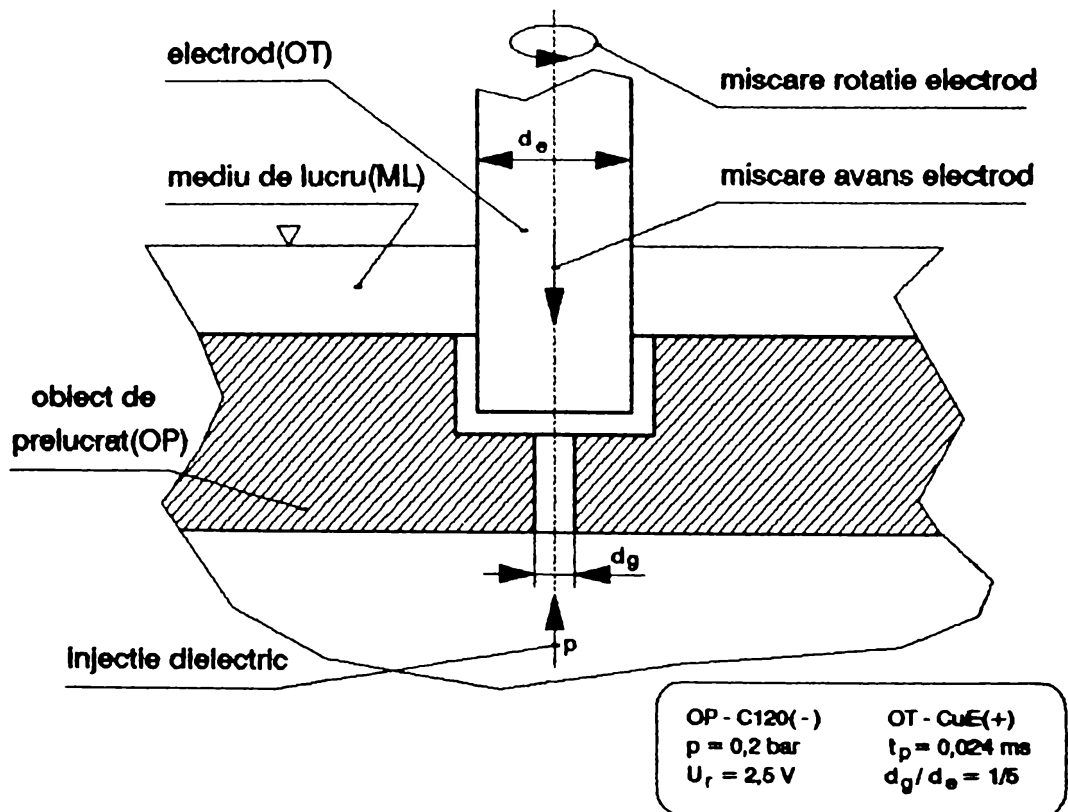


fig. 3.5. Operația de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv rotitor, suportul experimentului factorial complet

Funcțiile de răspuns urmărite au fost: productivitatea prelucrării, Q_p [mm^3/min], debitul uzării, Q_u [mm^3/min], uzura relativă volumică, u_v [%], productivitatea specifică pe unitatea de

curent, Q_{p1} [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\text{A}$], abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate, R_a [μm] și abaterea de la circularitatea profilului erodat în piesă, A_c [-].

Factorii de influență a procesului, analizați prin metoda experimentului factorial complet
tab. 3.11.

nivele	simbol	x_1 [mm^2]	x_2 [A]	x_3 [μs]	x_4 [1/min]
nivel de bază	x_0	225	18,75	142,5	25
interval de variație	Δx_i	75	6,25	47,5	25
nivel superior	+1	300	25	190	50
nivel inferior	-1	150	12,5	95	0

Parcurgând aceleași etape, ca și la experimentul factorial fracționat, s-a determinat modul în care indicatorii de performanță sunt influențați de către cei 4 parametri. Rezultatele sunt prezentate în tab. 3.12. Semnificațiile semnelor din tabel sunt aceleași cu cele prezentate la tab. 3.10.

Acțiunea factorilor de influență asupra indicatorilor de performanță, determinată prin experimentul factorial complet

tab.3.12.

nr. crt.	indicatorul de performanță, y_j [u. m.]	factorul de influență, x_i [u. m.]			
		A [mm^2]	I [A]	t_i [μs]	n [1/min]
1.	Q_p [mm^3/min]	+	+	+	+
2.	Q_e [mm^3/min]	-	+	-	-
3.	u_v [%]	-	+	-	-
4.	Q_{p1} [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\text{A}$]	-	+	+	0
5.	R_a [μm]	0	+	+	+
6.	A_c [-]	0	0	0	+

Analizând datele din tab. 3.12., se constată următoarele aspecte:

- toți cei 4 factori de influență, sunt statistic semnificativi, la 3 din cei 6 indicatori de performanță urmăriți;

- nivelul de intensitate a curentului, durata impulsului de curent și turația electrozudului, influențează hotărâtor 5 din 6 indicatori de performanță;

- abaterea de la circularitatea profilului erodat în piesă, este influențată semnificativ, doar de turația electrodului;

Cele trei metode de premodelare, experimentul psihologic, bilanțul aleator și experimentul factorial fracționat sau complet, confirmă o stare de fapt cunoscută: complexitatea și suprapunerea spațială și temporală a fenomenelor elementare electroerozive, mulțimea factorilor și influența hotărâtoare a interacțiunilor, imposibilitatea selectării unor factori cu influență de prim rang în toate situațiile.

Se impune deci, ca modelul experimental să se construiască în funcție de situația concretă, luând în considerare doar acei factori, care s-au dovedit a avea influență hotărâtoare asupra fiecărei variabile de stare. Dacă această recomandare este foarte corectă din punct de vedere teoretic, în practică, de multe ori, este imposibil a o respecta, din cauza eforturilor financiare deosebit de mari datorate conceperii de experimente diferite, pentru fiecare variabilă de stare în parte.

3.2. Modelarea fizică a fenomenelor eroziunii electrice

Asupra atribuirii sensului sintagmei “modelare fizică”, cercetătorii nu s-au pus, încă, de acord. Unii înțeleg prin modelare fizică, modelarea cu ajutorul modelului material, substituind modelul ideal cu cel fizic. Alți cercetători o apreciază ca o modelare a fenomenelor pe baza legilor fizicii, atribuindu-i zona “cercetării fundamentale”, spre deosebire de modelarea matematică, considerată ca o “cercetare aplicativă”. În cele ce urmează se consideră modelarea fizică ca fiind mai apropiată de al doilea sens, neputând fi separată net, însă, de modelarea matematică. În majoritatea cazurilor, cele două metode de modelare se întrepătrund, teoria conducând la relații generale, care se particularizează în cazuri concrete.

Complexitatea fenomenelor ce au loc la prelucrarea prin eroziune electrică, rapiditatea desfășurării lor și spațiul restrâns de manifestare au făcut ca cercetarea experimentală din

domeniu să întâmpine serioase dificultăți. Astfel, cu toată vechimea de decenii a procedului, încă nu există o teorie unitară, care să poată explica toate fenomenele procesului eroziv.

Există un număr destul de mare de teorii care încearcă să lămurească fenomenele fundamentale ale eroziunii electrice. Unele se completează reciproc, altele sunt contradictorii. Cele referitoare la prelevarea de material se pot clasifica în trei mari grupe [27.], [64.], [104.], [140.]:

- teorii electro-mecanice;
- teorii termo-mecanice;
- teorii electro-termice.

Teoriile din prima grupă explică mecanismul prelevării de material prin forțe ale câmpului electric. Câmpurile electrice dintre electrozi, deosebit de puternice ($E \approx 10^5$ N/C), determină existența unor forțe foarte mari. Cum, particulele elementare de la suprafața materialului, pot prelua o sarcină limitată, la depășirea rezistenței admisibile, acestea sunt smulse din material [141.].

Debitul de material prelevat din catod, se calculează cu relația:

$$Q_K = K \cdot t_i \cdot I_d^{\frac{3}{2}}, \quad (3.6.)$$

iar cel prelevat din anod, cu relația:

$$Q_A = K \cdot t_i \cdot I_d^{\frac{3}{2}}, \quad (3.7.)$$

unde t_i reprezintă durata impulsului de curent, I_d , curentul descărcării, iar K , o constantă de material. Aceasta se poate determina funcție de rezistența admisibilă a materialului, σ_a , cu relația:

$$K = \frac{0,44 \cdot 10^{-6}}{\sigma_a}. \quad (3.8.)$$

Relația din ec. (3.7.) nu a fost confirmată pentru toate materialele și este valabilă doar pentru durate ale impulsului $t_i \leq 1000 \mu s$. De-aseamenea, s-a constatat o comportare diferită a materialelor cu aceeași rezistență admisibilă, dar cu proprietăți magnetice diferite.

Conform teoriilor termo-mecanice, datorită gradientului mare de temperatură, ce apare la locul descărcării electrice, în material apar tensiuni ridicate, ce conduc la ruperea mecanică a cristalelelor sau a grupelor de cristale din electrozi.

Cei mai numeroși susținători sunt cei ai teoriilor termo-electrice cu privire la mecanismul prelevării de material. Funcție de modul în care se transformă energia electrică în

energie termică, aceste teorii se pot clasifica în două grupe: îndepărtarea de material se datorază efectului caloric al curentului electric și prelevarea de material are loc datorită transformării energiei cinetice a purtătorilor de sarcină electrică, în energie termică.

Cercetătorii Nekrasevitsch și Bakuto [76.] afirmă că prelevarea de material are loc datorită efectului Joule-Lenz al curentului electric. Transmiterea curentului se face punctiform, prin parcurgerea întregii suprafețe. Datorită densității de curent foarte mari și a duratei foarte mici a impulsului elementar, transmisia de căldură către electrozi poate fi neglijată, materialul topindu-se prin efect Joule-Lenz. Craterul format la o descărcare este determinat de suprapunerea mai multor cratere elementare.

Pentru un impuls dreptunghiular, cantitatea de material prelevat, se poate determina cu relația:

$$m = \beta \cdot A \cdot i_d^2 \cdot t_d, \quad (3.10.)$$

unde, i_d este curentul descărcării, t_d , durata descărcării, iar β și A , coeficienți ce depind de geometria craterului:

$$\beta = \frac{V_0}{S_0^2} \quad (3.11.)$$

și de proprietățile termice și electrice ale materialului electrodului:

$$A = \frac{0,25 \cdot \rho \cdot \lambda (1 + \lambda \cdot T_1)}{c(1 + \lambda \cdot T_1) \cdot \ln(1 + \lambda \cdot T_1) + \lambda \cdot S'} \quad (3.12.)$$

în care: S_0 - suprafața elementară; V_0 - volumul elementar; ρ - rezistivitatea electrică a materialului electrodului; λ - conductibilitatea termică a materialului electrodului; c - căldura specifică a materialului electrodului; T_1 - temperatura de topire a materialului electrodului.

Cu excepția materialelor feromagnetice și a grafitului, teoria se confirmă pentru restul materialelor.

Cercetătorii Zolotych [144.], Zingerman [143.] și Van Dijk [136.] neglijează efectul caloric al curentului electric și consideră că, prelevarea de material se face pe seama transformării energiei cinetice a sarcinilor electrice, în energie termică.

Prin introducerea unui bilanț simplificat al cantității de căldură produsă, în ecuația de tip Fourier, se obține:

$$\frac{d\theta}{dt} = a \cdot \nabla^2 \theta + \frac{W}{c \cdot \rho}, \quad (3.13.)$$

unde ∇ este operatorul Nabla, θ , temperatura, t , timpul, W , cantitatea de căldură produsă în unitatea de volum, ρ , densitatea, iar a , difuzivitatea termică, ce se determină cu relația:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \quad (3.14.)$$

în care c este căldura specifică, ρ , densitatea și λ , conductivitatea termică la materialului ce se încălzește.

Neglijând căldura transmisă prin radiație și convecție și luând în considerare unele ipoteze simplificatoare, se poate determina relația pentru câmpul termic din electrozi:

$$\theta(r, z, t) = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \int_0^{t_1} \frac{q}{4\pi \cdot a(t - t_1)^{\frac{3}{2}}} \cdot e^{-\frac{R^2}{4a(t-t_1)}} \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\rho \cdot dt, \quad (3.15.)$$

unde: θ - temperatura; q - intensitatea sursei de căldură; R - vectorul rază ($R^2 = x^2 + y^2 + z^2$); t - timpul; a - difuzivitatea termică; z - vectorul spațiu.

Izotermele pentru temperatura de topire a materialului se suprapun foarte bine peste forma spațială a craterului prelevat.

O și mai bună concordanță cu realitatea a fost obținută experimental, prin determinarea valorilor unor coeficienți și exponenți ce corectează relațiile teoretice deduse. Astfel, pentru determinarea diametrului craterului, se consideră că acesta este egal cu cel al coloanei de plasmă și se poate calcula cu relația:

$$d = K_1^{n_1} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot P_M^{n_2} \cdot t_d^{n_3}, \quad (3.16.)$$

unde K_1, K_2 sunt coeficienți ce țin de forma impulsului de curent,

$$K_3 = L \cdot s^{-n_3}, \quad (3.17.)$$

$$n_1 = M + 0,5 \cdot N, \quad (3.18.)$$

$$n_2 = M + 1,5 \cdot N, \quad (3.19.)$$

iar L, M, N sunt constante ce depind de natura dielectricului și de perechea de materiale ale electrodului și obiectului de prelucrat, s este interstițiul dintre electrod și obiectul de prelucrat, P_M , puterea maximă a descărcării, iar t_d , durata descărcării.

Constantele ecuației (3.16.) au fost determinate experimental pentru diferite materiale ale perechii obiect de prelucrat - electrod și pentru diferite lichide dielectrice.

3.3. Modelarea matematică a fenomenelor eroziunii electrice

Modelarea matematică se bazează pe descrierea cantitativă a procesului cu ajutorul structurilor matematice: ecuații, inecuații, tabele, grafice. Modelarea matematică nu trebuie să intre în competiție cu modelarea fizică. Nu se poate vorbi de superioritatea unei metode în raport cu cealaltă, ci de situații concrete, în care o metodă se dovedește a fi mai eficientă decât cealaltă sau de alte situații când este necesar ca amândouă să concure la obținerea rezultatelor dorite. În mod normal, modelarea matematică urmează celei fizice, dar sunt cazuri când o precede.

Această situație este valabilă și în cazul comparării metodelor abstracte cu cele reale. O modelare fizico-matematică, deci construirea unui model abstract, este preferată din punct de vedere al costurilor unui experiment, construirii unui model material. Nu întotdeauna, însă, este posibilă această alegere. Pe măsură ce procesele tehnologice cresc în complexitate, și modelul matematic devine tot mai complex. Cu toate că modelul matematic există, rezolvarea lui depășește posibilitățile cercetătorului sau, cazuri mai rare, chiar posibilitățile teoretice existente la un moment dat.

O clasificare a modelelor matematice [126.], [133.], este prezentată în fig. 3.6.

Modelul procedural reprezintă un grup de instrucțiuni care trebuie executate sau o strategie referitoare la efectuarea unor succesiuni de operații, într-o situație predestinată. Acest model nu ține seama de realitățile fizice și chimice dintre parametrii procesului, cuprinzând numai instrucțiuni de conducere a lui.

Modelul calculatoriu este, de fapt, modelul matematic propriu-zis. El este alcătuit din una sau mai multe ecuații ce leagă între ei parametrii procesului.

Modelul deductiv reprezintă un sistem de ecuații prin care se determină valorile curenți ale unei variabile nemăsurabile, prin valorile curenți ale altor variabile măsurabile.

Modelul predictiv constă dintr-un sistem de ecuații ce leagă variabilele dependente de cele independente. Se permite prevederea răspunsului procesului (mărimile ieșire din proces), la variația parametrilor independenți (mărimile intrare în proces). Acest tip de model este cel mai utilizat în optimizarea matematică a proceselor tehnologice.

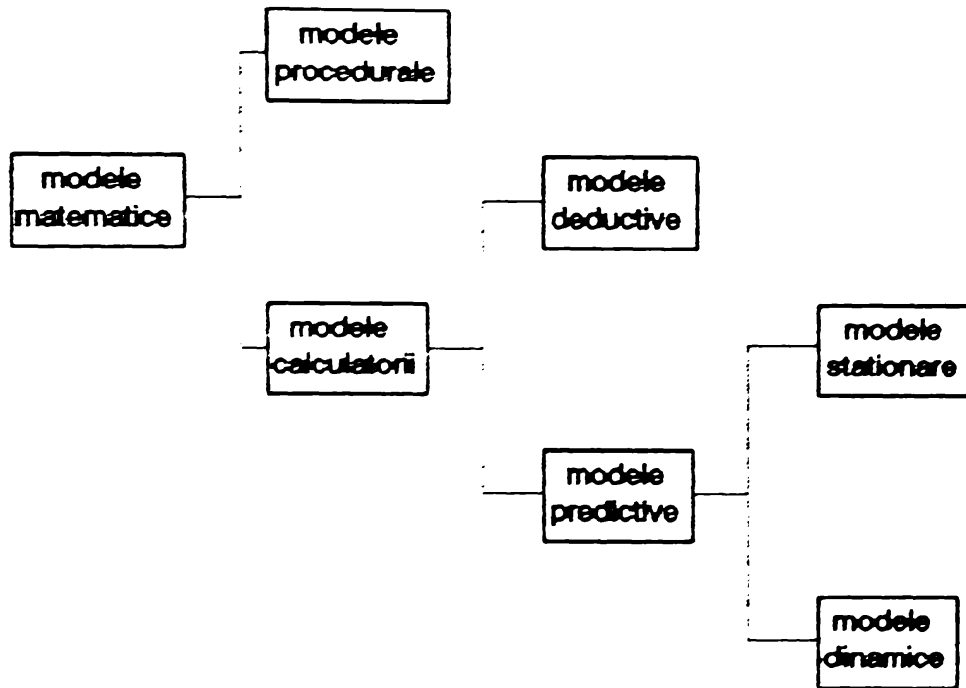


fig. 3.6. Clasificarea modelelor matematice

Modelul staionar este acel model calculational predictiv, in care ecuatiile de legatura intre marimi sunt valabile doar in regim staionar

Modelul dinamic este cel mai general model matematic posibil, ecuatiile de legatura dintre marimi fiind valabile in regim dinamic.

Fara nici un fel de indoiala ca, se poate afirma ca modelarea matematica este una dintre cele mai importante faze de cercetare experimentală a unui proces tehnologic. Obiectivele urmarite de cercetare experimentală sunt [55], [79]:

- studii și analiza sistematică a procesului cu ajutorul modelului, pentru obținerea de date mai complete și de mai bună calitate;
- evidențierea influenței factorilor asupra sistemului cercetat;
- verificarea ipotezelor referitoare la interacțiunile interne ale sistemului;
- perfecționarea și optimizarea sistemului;
- evidențierea și prevenirea instabilității;
- optimizarea sistemului în raport cu diferite criterii;
- evaluarea sistemului în timp și spațiu

Modelul matematic propus trebuie să înlocuiască un model real [13.], [53.]. Realitatea fizică indică o dependență:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3.20.)$$

a cărei formă ar trebui cunoscută. Dezvoltând această funcție, în serie Taylor, în jurul centrului experimentului de coordonate $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{m0})$, se obține:

$$\eta = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{m0}) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot x_i + \sum_{i < j} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \cdot x_i \cdot x_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \cdot x_i^2 \dots \quad (3.21.)$$

Întrucât derivatele parțiale din dezvoltarea funcției în serie Taylor nu pot fi calculate, deoarece funcția f nu este cunoscută, aceasta se înlocuiește cu expresia polinomială:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \dots \quad (3.22.)$$

sau dezvoltarea ei:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 + \dots + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \dots + \beta_{111} \cdot x_1^3 + \beta_{222} \cdot x_2^3 + \dots + \beta_{112} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + \beta_{122} \cdot x_1 \cdot x_2^2 + \dots \quad (3.23.)$$

Pe cale experimentală, coeficienții β nu pot fi determinați, decât aproximativ, din cauză că răspunsul experimental, y , diferă de cel real, η , prin eroarea experimentală, ε :

$$\eta = y + \varepsilon \quad (3.24.)$$

Polinomul de aproximare, y , va avea forma:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots \quad (3.25.)$$

sau dezvoltarea lui:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + \dots + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \dots + b_{111} \cdot x_1^3 + b_{222} \cdot x_2^3 + \dots + b_{112} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + b_{122} \cdot x_1 \cdot x_2^2 + \dots \quad (3.26.)$$

Coeficienții b , din ec. (3.25.) și ec. (3.26.), reprezintă estimările coeficienților β , din ec. (3.22.) și ec. (3.23.).

Determinarea estimărilor b , ale coeficienților β , se poate face prin metoda celor mai mici pătrate și prin metoda verosimilității maxime.

Metoda celor mai mici pătrate impune minimizarea sumei pătratelor abaterilor dintre valorile măsurate ale răspunsului y și valorile date de polinomul de aproximare din ec. (3.23.):

$$S = \sum_{i=1}^m (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_1 - \dots - \beta_{11} \cdot x_1^2 - \dots)^2 = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2. \quad (3.27.)$$

Coefficienții polinomului de aproximare se determină prin anularea derivatelor parțiale:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_i} = 0. \quad (3.28.)$$

La nivel de principiu, construirea unui model matematic se poate face prin experiment clasic și prin experiment activ. În ordinea apariției, ca strategie de cercetare experimentală, primul a fost experimentul clasic (strategia Gauss - Seidel).

3.3.1. Modelarea matematică prin experimentul clasic

Posibilitatea obținerii modelului matematic este condiționată de satisfacerea următoarelor condiții [133.], [134.]:

- Variabilele de ieșire se consideră mărimi aleatoare cu o lege de distribuție normală. Variabilele de intrare sunt considerate mărimi nealeatoare.

- Între variabilele de intrare nu există corelații.

- Dispersia variabilelor de ieșire nu trebuie să depindă de valoarea absolută a acestora.

- Valorile variabilei de ieșire nu trebuie influențate de proprietățile dinamice ale procesului studiat.

- Intervalul de variație a factorilor trebuie să fie mai mare decât eroarea de măsurare.

- Dispersiile reproductibilității în diferite puncte ale spațiului factorial trebuie să fie omogene.

Experimentul clasic, bazat pe strategia "un factor, la un moment dat", dezvoltă orice cercetare experimentală ca pe una unifactorială: se păstrează constanți toți factorii de influență, cu excepția unuia, care se modifică în domeniul lui de existență, determinându-se cea mai convenabilă valoare a funcției de răspuns. Apoi se mențin constanți, atât primul factor de influență, la valoarea optimă găsită, cât și ceilalți factori la alte valori și se variază cel de-al doilea factor de influență, obținându-se valoarea lui optimă. În continuare se procedează în mod asemănător cu toți ceilalți factori, pe rând.

Este, deci, de subliniat faptul că, indiferent de faza în care se găsește experimentatorul, doar un singur factor de influență se constituie în variabilă a polinomului de aproximare, ec. (3.26.) devenind:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + \dots + b_n \cdot x^n. \quad (3.29.)$$

Metoda celor mai mici pătrate conduce la rezolvarea sistemului de ecuații normale:

$$m \cdot b_0 + b_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i + b_2 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^2 + \dots + b_n \cdot \sum_{i=1}^m x_i^n = \sum_{i=1}^m y_i, \quad (3.30.)$$

$$b_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i + b_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^2 + b_2 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^3 + \dots + b_n \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} = \sum_{i=1}^m y_i \cdot x_i, \quad (3.31.)$$

$$b_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^n + b_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} + b_2 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{n+2} + \dots + b_n \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{2n} = \sum_{i=1}^m y_i \cdot x_i^n, \quad (3.32.)$$

În care $m > n + 1$, unde n reprezintă gradul polinomului algebric, iar m , numărul de experiențe și de variabile.

Dacă gradul polinomului din ec. (3.29.) este superior celui de ordin 2 ($n > 2$), sistemul devine practic inutilizabil, din cauza complexității calculelor și a erorilor ce apar. De aceea se recomandă scrierea polinomului din ec. (3.29.), sub forma polinoamelor ortogonale Cebășev.

Pentru polinoame de grad 2, ec. (3.29.) devine:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2. \quad (3.33.)$$

Estimațiile b , se obțin din sistemul de ecuații:

$$m \cdot b_0 + b_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i + b_2 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^2 = \sum_{i=1}^m y_i, \quad (3.34.)$$

$$b_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i + b_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^2 + b_2 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^3 = \sum_{i=1}^m y_i \cdot x_i, \quad (3.35.)$$

$$b_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^2 + b_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^3 + b_2 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^4 = \sum_{i=1}^m y_i \cdot x_i^2. \quad (3.36.)$$

Într-un experiment descris în [123.], se propune observarea influenței pe care o au doi factori (durata impulsului de curent și nivelul de intensitate a curentului) asupra celui mai des urmărit indicator de performanță, productivitatea prelucrării.

Conform strategiei clasice de experimentare, se menține constant, pe 4 nivele, un factor de influență (treapta de curent, I) și se variază celălalt (durata impulsului, t). Deci, ecuația $y =$

$f(x_1, x_2)$, unde $y = Q_p$, $x_1 = t_i$ și $x_2 = I$, se transformă în 4 ecuații parametrice $y = f(x)$, unde $x = t_i$, iar parametrul este I .

Cele 4 funcții polinomiale determinate sunt:

$$Q_p = 99,8607 + 0,0123 \cdot t_i - 0,28 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^2, \quad (3.37.)$$

pentru $I = 25 \text{ A}$ și $t_i = 12 \dots 1600 \mu\text{s}$,

$$Q_p = 177,5299 + 0,1993 \cdot t_i - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^2, \quad (3.38.)$$

pentru $I = 50 \text{ A}$ și $t_i = 25 \dots 1600 \mu\text{s}$,

$$Q_p = 384,6667 + 0,2736 \cdot t_i - 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^2, \quad (3.39.)$$

pentru $I = 100 \text{ A}$ și $t_i = 50 \dots 2400 \mu\text{s}$,

$$Q_p = 960,5179 + 0,0615 \cdot t_i - 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^2, \quad (3.40.)$$

pentru $I = 200 \text{ A}$ și $t_i = 150 \dots 2400 \mu\text{s}$.

3.3.2. Modelarea matematică prin experimentul activ

În cap. 3.1., consacrat premodelării sistemului de prelucrare prin eroziune electrică, am subliniat faptul că, datorită complexității fenomenelor erozive și caracterului lor difuz, atât temporal, cât și spațial, nu există nici un factor care să aibe o influență statistic semnificativă, asupra tuturor indicatorilor de performanță urmăriți. Pentru modelarea matematică propriu-zisă, ar trebui selectați doar acei factori, care au o influență semnificativă asupra fiecărui indicator de performanță în parte. Această opțiune, însă, ar implica o dificultate de nesurmontat: volumul deosebit de mare, de ordinul sutelor de experiențe, ce ar compune cele 12 experimente concepute pentru cei 12 indicatori de performanță urmăriți și, deci, cheltuieli imposibil de suportat privind manopera, energia și materialele.

Din aceste motive am fost nevoit să selectez aceiași factori de influență, pentru modelarea matematică a tuturor indicatorilor de performanță, chiar dacă premodelarea nu recomandă alegerea acelor factori. Ținând cont de datele din tab. 3.10. și abordând statistic problema, cei 4 factori de influență asupra cărora m-am oprit, sunt: aria secțiunii transversale a electrodului - A [mm^2], înălțimea (grosimea) de prelucrat - h [mm], nivelul de intensitate a curentului I [A] și durata impulsului de curent - t_i [μs].

Astfel au fost eliminați doi factori de influență, presiunea de spălare a interstițiului tehnologic, p [bar] și tensiunea etalon de reglare a sistemului de avans automat, U_a [V], care au influență statistic semnificativă, doar asupra a 3 indicatori de performanță, din cei 12 urmăriți.

Cu cei 4 factori de influență selecționați, s-a conceput un nou program, bazat pe experimentul factorial complet, cu $N = 4^2 = 16$ experiențe. Ținând cont de rezultatele preliminare obținute în cadrul premodelării, punctul central al experimentului s-a modificat, în ceea ce privește nivelul de intensitate a curentului și durata impulsului de curent, noile valori fiind $I_0 = 18,75$ A și $t_0 = 142,5$ μ s. Întrucât s-au folosit aceleași probe metalice pentru obiectul de prelucrat și aceleași electrozi, caracteristicile lor geometrice ($h_0 = 7,5$ mm și $A_0 = 225$ mm²) au rămas nemodificate. Presiunea de spălare a interstițiului tehnologic și tensiunea etalon de reglare a sistemului de avans automat, trecând din mulțimea variabilelor independente, în cea a constantelor care definesc condițiile de lucru, prezintă următoarele noi valori, constante la toate experiențele: $p = 0,2$ bar și $U_a = 2,5$ V. Restul condițiilor au rămas nemodificate, în raport cu experimentul definit prin fig. 3.4.

Noile valori ale factorilor de influență sunt prezentate, sintetizat, în tab. 3.13., iar matricea program a experimentului factorial complet, cu un număr redus de factori, în tab. 3.14.

Factorii de influență a procesului, analizați prin metoda experimentului factorial complet, redus dimensional

tab. 3.13.

nivele	simbol	x_1 [mm]	x_2 [μ s]	x_3 [A]	x_4 [mm ²]
nivel de bază	x_0	7,5	142,5	18,75	225
interval de variație	Δx_i	2,5	47,5	6,25	75
nivel superior	+1	10	190	25	300
nivel inferior	-1	5	95	12,5	150

Măsurătorile dimensiunilor liniare au fost făcute cu comparatorul cu precizie de 0,01 mm, iar cele privind rugozitatea, cu profilometrul-profilografal Kalibr. Valorile indicatorilor de performanță care nu au fost măsurate direct, s-au calculat pe baza relațiilor de definire a lor, prezentate în cap. 2.3.

Toate experiențele au fost replicate de 3 ori.

Matricea program, cu valori naturale, pentru experimentul factorial complet

tab. 3.14.

nr. crt.	h [mm]	t [μ s]	I [A]	A [mm ²]
1.	5	95	12,5	150
2.	10	95	12,5	150
3.	5	190	12,5	150
4.	10	190	12,5	150
5.	5	95	25	150
6.	10	95	25	150
7.	5	190	25	150
8.	10	190	25	150
9.	5	95	12,5	300
10.	10	95	12,5	300
11.	5	190	12,5	300
12.	10	190	12,5	300
13.	5	95	25	300
14.	10	95	25	300
15.	5	190	25	300
16.	10	190	25	300

Rezultatele obținute sunt sintetizate în tab. 3.15.

Pe baza metodologiei descrise de literatura de specialitate [15.], [16.], [18.], [19.], [21.], [25.], [51.], [53.], [79.], [133.], [134.], s-au analizat mai multe aspecte.

În primul rând, s-a urmărit influența tuturor factorilor, precum și a interacțiunilor dintre ei, asupra fiecărui indicator de performanță, cu ajutorul histogramelor efectelor, prezentate în fig. 3.7. ... fig. 3.18. (fig. 3.7. - Q_p ; fig. 3.8. - Q_e ; fig. 3.9. - u_v ; fig. 3.10. - q_A ; fig. 3.11. - q_B ; fig. 3.12. - IP_1 ; fig. 3.13. - IP_2 ; fig. 3.14. - IP_3 ; fig. 3.15. - R_a ; fig. 3.16. - s_L ; fig. 3.17. - K ; fig. 3.18. - O_v).

În histograme, factorii care depășesc pragul de semnificație, materializat prin linia întreruptă, se consideră a avea o influență statistic semnificativă asupra indicatorului de performanță în discuție. Factorii care nu ating acest prag, se pot neglija în modelarea

Valorile indicatorilor de performanță urmăriți de experimental factorial complet, rețea dimensională

tab. 3.15.

nr. crt.	Q_p	Q_e	u_r	q_A	q_u	IP_1	IP_2	IP_3	R_A	s_L	K	Q_v
	mm ³ /min	mm ³ /min	%	#	**	***	****	*****	μm	mm	-	-
1.	30,275	2,762	9,154	3,784	3,307	0,548	13,704	1,713	6,06	0,09	0,00467	0,02
2.	29,105	3,284	11,281	3,638	2,58	0,484	16,124	2,016	5,34	0,084	0,00233	0,01333
3.	30,439	1,315	4,318	3,151	7,049	1,023	51,205	5,301	6,91	0,101	0,00433	0,01333
4.	35,042	1,066	3,034	3,504	11,55	1,853	132,39	13,238	6,58	0,099	0,002	0,00267
5.	74,86	18,523	24,692	4,88	3,032	0,421	10,508	0,685	7,3	0,109	0,004	0,02
6.	80,595	21,014	26,037	5,04	3,095	0,472	13,894	0,869	6,56	0,117	0,00167	0,02
7.	92,623	14,419	15,571	4,552	5,948	0,564	12,818	0,63	10,61	0,134	0,003	0,02
8.	95,442	13,88	14,518	4,546	6,574	0,683	57,21	2,725	9,71	0,131	0,00167	0,00167
9.	28,657	2,314	8,099	3,582	3,538	0,628	9,807	1,226	5,72	0,08	0,00467	0,01333
10.	29,918	1,988	6,633	3,74	4,51	0,766	34,887	4,353	5,91	0,09	0,00167	0,01333
11.	35,562	0,771	2,295	3,356	15,495	2,381	40,7	3,841	6,2	0,092	0,00667	0,02
12.	34,076	1,107	3,263	3,408	10,443	1,77	147,46	14,748	6,25	0,088	0,002	0,01667
13.	89,671	21,023	23,411	5,61	3,83	0,48	107,437	6,722	8,19	0,099	0,005	0,002
14.	79,801	19,321	24,199	4,79	3,298	0,516	43,053	2,584	6,41	0,108	0,00267	0,02
15.	93,323	9,834	10,536	4,666	8,856	0,868	21,716	1,086	10,21	0,111	0,006	0,03
16.	95,894	11,301	11,785	4,877	8,137	0,978	23,3	1,185	8,55	0,115	0,003	0,02333

* mm³/min·A

** mm³/min·%

*** mm³/min·%·μm

**** mm³/min·%·μm·mm

***** mm³/min·%·μm·mm·A

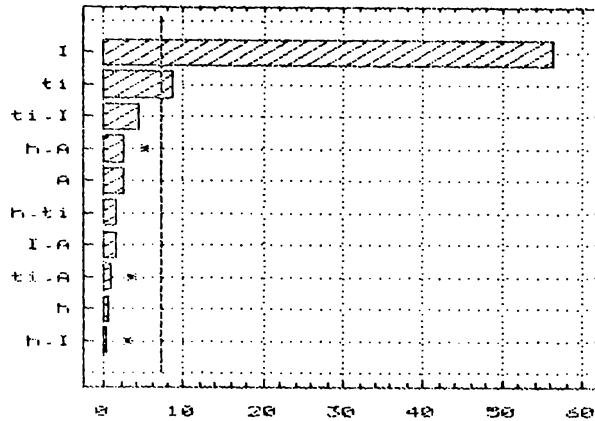


fig. 3.7. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță Q_p

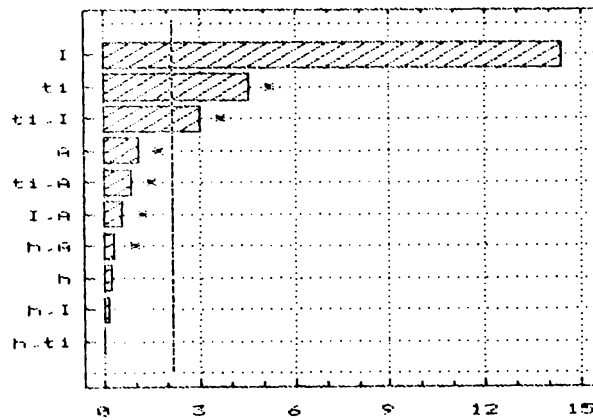


fig. 3.8. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță, Q_a

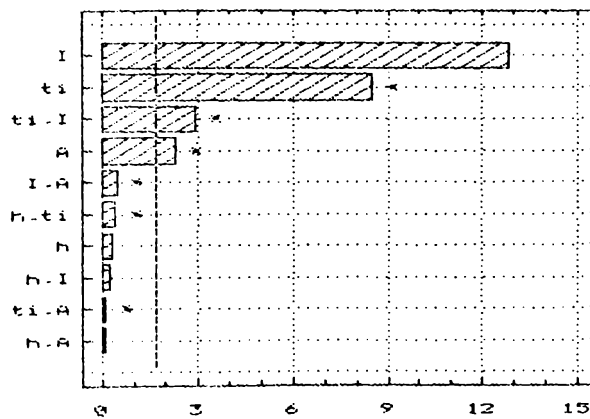
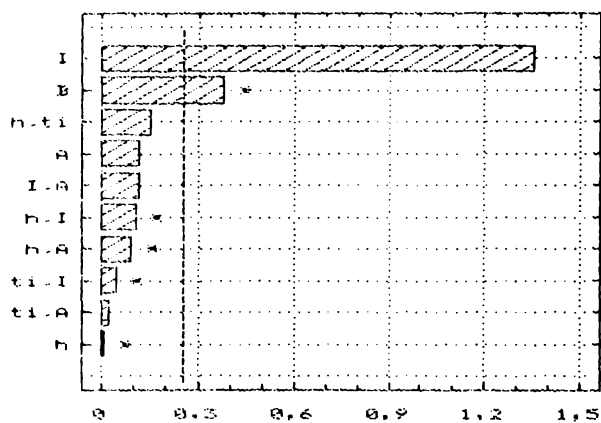
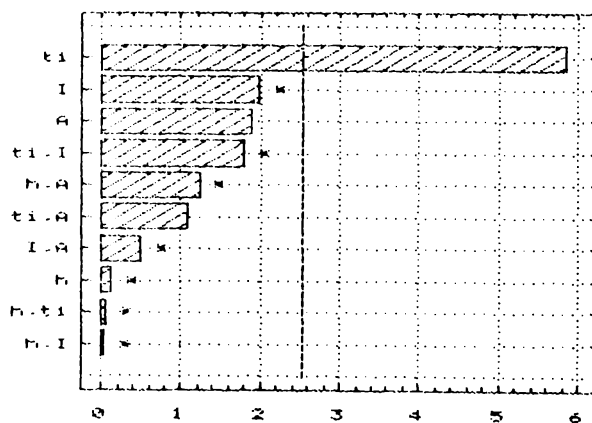
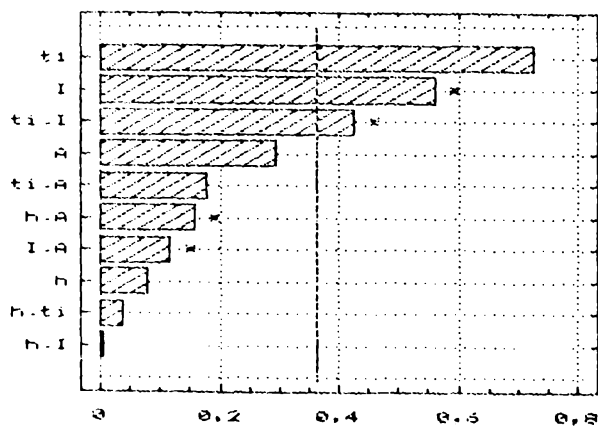


fig. 3.9. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță, u

fig. 3.10. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță q_A fig. 3.11. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță q_u fig. 3.12. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță IP_1

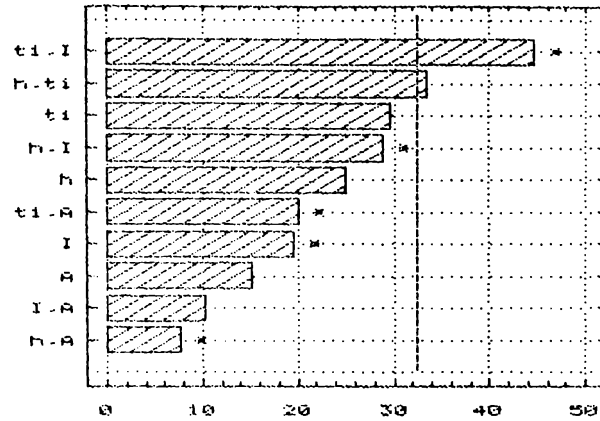


fig. 3.13. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță IP₁

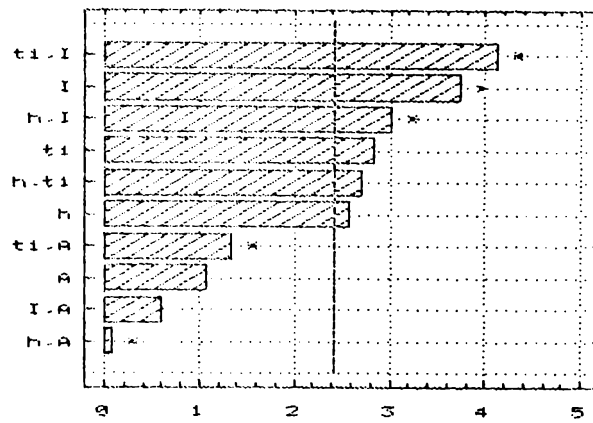


fig. 3.14. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță IP₃

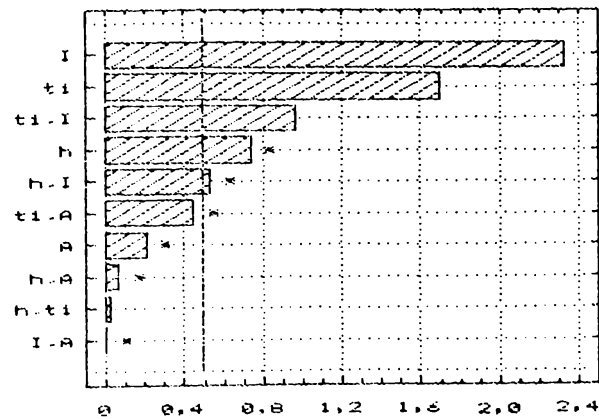
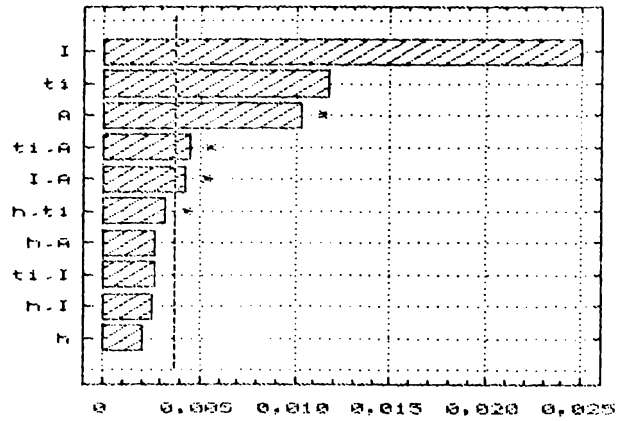
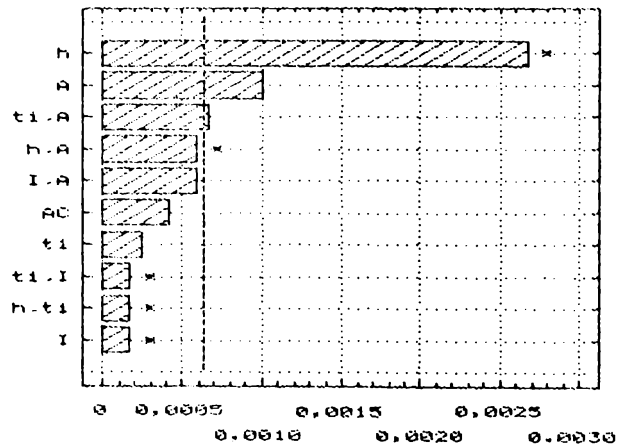
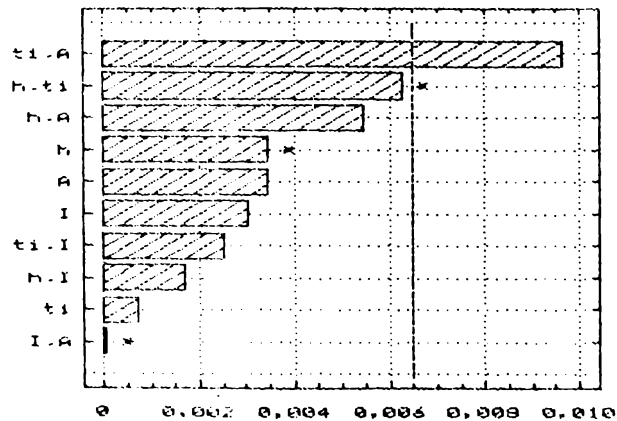


fig. 3.15. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță Ra

fig. 3.16. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță s_t fig. 3.17. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță K fig. 3.18. Histograma efectelor, în cazul indicatorului de performanță O_t

matematică, deoarece influența lor asupra fenomenelor este nesemnificativă, din punct de vedere statistic.

Studiind aceste histogramme se constată următoarele aspecte:

a) Fiecare indicator de performanță (funcție obiectiv) este influențat semnificativ de alte categorii de factori sau de interacțiuni. Astfel se constată următoarele influențe:

- Q_p - factorii t_i și I ;
- Q_e - factorii t_i și I , interacțiunea t_i - I ;
- u_v - factorii t_i , I și A , interacțiunea t_i - I ;
- q_A - factorii t_i și I ;
- q_u - factorul t_i ;
- IP_1 - factorii t_i și I , interacțiunea t_i - I ;
- IP_2 - interacțiunile h - t_i și t_i - I ;
- IP_3 - factorii h , t_i și I , interacțiunile h - t_i , h - I și t_i - I ;
- R_a - factorii h , t_i și I , interacțiunile h - I și t_i - I ;
- s_L - factorii h , t_i și I , interacțiunile t_i - A și I - A ;
- K - factorii h și A , interacțiunea t_i - A ;
- O_v - interacțiunea t_i - A .

b) Factorii care, frecvent, intervin hotărâtor în proces, sunt t_i (10 prezențe, din 12 posibile) și I (9 prezențe, din 12 posibile). Ceilalți doi factori, h și A , mai rar sunt considerați ca fiind factori de prim rang (h , 5 prezențe, iar A , 2 prezențe).

c) În ceea ce privește interacțiunile, cel mai frecvent influențează indicatorii de performanță, perechea t_i - I (de 6 ori), la polul opus situându-se perechea h - A , fără nici o prezență. Între aceste extreme, se situează perechile I - A (o dată), h - t_i și h - I (de două ori) și t_i - A (de trei ori).

d) S-a confirmat situația cunoscută din cap. 3.1., privind premodelarea experimentală a fenomenelor erozive, fiecare indicator de performanță având proprii săi factori de influență care intervin hotărâtor în proces.

În continuare, se studiază mai detaliat, influențele pe care le are fiecare pereche de factori asupra tuturor indicatorilor de performanță urmăriți. Pentru aceasta, se prezintă în următoarele reprezentări grafice, suprafețele de răspuns ale celor 12 funcții obiectiv, în raport cu toate perechile posibile de factori de influență.

Din cele 72 de suprafețe de răspuns studiate, prezentul capitol abordează doar pe cele la care perechea de factori de influență se constituie în interacțiuni semnificative asupra funcției în discuție.

Astfel, în acest capitol, sunt prezentate 14 suprafețe de răspuns: $Q_e = f(t_e, I)$ - fig. 3.19.; $u_v = f(t_e, I)$ - fig. 3.20.; $IP_1 = f(t_e, I)$ - fig. 3.21.; $IP_2 = f(h, t_e)$ - fig. 3.22.; $IP_2 = f(t_e, I)$ - fig. 3.23. $IP_3 = f(h, t_e)$ - fig. 3.24.; $IP_3 = f(h, I)$ - fig. 3.25.; $IP_3 = f(t_e, I)$ - fig. 3.26.; $R_a = f(h, I)$ - fig. 3.27.; $R_a = f(t_e, I)$ - fig. 3.28.; $s_L = f(t_e, A)$ - fig. 3.29.; $s_L = f(I, A)$ - fig. 3.30.; $K = f(t_e, I)$ - fig. 3.31.; $O_v = f(t_e, I)$ - fig. 3.32. Celelalte 58 de suprafețe de răspuns, cu interacțiuni nesemnificative de factori, sunt prezentate în anexele din cap. 7.

Secționând aceste suprafețe de răspuns cu plane paralele cu planul determinat de factorii de influență, se obțin reprezentările grafice sub forma curbelor de nivel constant. Curbele de nivel constant ale celor 14 suprafețe de răspuns, cu interacțiuni semnificative, sunt prezentate în fig. 3.33. ... fig. 3.46. [$Q_e - (t_e, I)$ - fig. 3.33.; $u_v - (t_e, I)$ - fig. 3.34.; $IP_1 - (t_e, I)$ - fig. 3.35.; $IP_2 - (h, t_e)$ - fig. 3.36.; $IP_2 - (t_e, I)$ - fig. 3.37.; $IP_3 - (h, t_e)$ - fig. 3.38.; $IP_3 - (h, I)$ - fig. 3.39.; $IP_3 - (t_e, I)$ - fig. 3.40.; $R_a - (h, I)$ - fig. 3.41.; $R_a - (t_e, I)$ - fig. 3.42.; $s_L - (t_e, A)$ - fig. 3.43.; $s_L - (I, A)$ - fig. 3.44.; $K - (t_e, I)$ - fig. 3.45.; $O_v - (t_e, I)$ - fig. 3.46.], iar cele ale celorlalte 58 suprafețe de răspuns, în anexele din cap. 7.

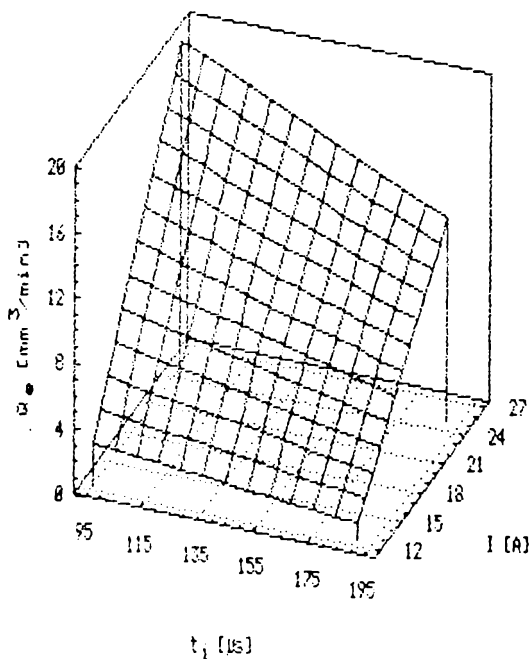


fig. 3.19. Suprafața de răspuns $Q_e = f(t_e, I)$

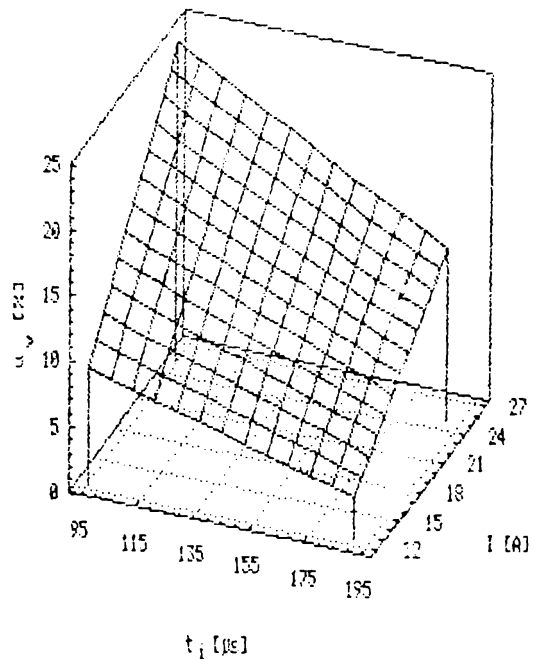


fig. 3.20. Suprafața de răspuns $u_v = f(t_e, I)$

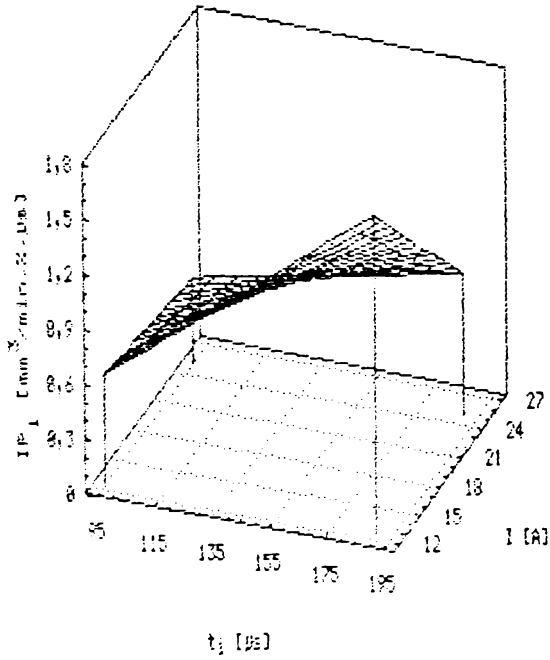


fig. 3.21. Suprafața de răspuns $IP_1 = f(t_1, I)$

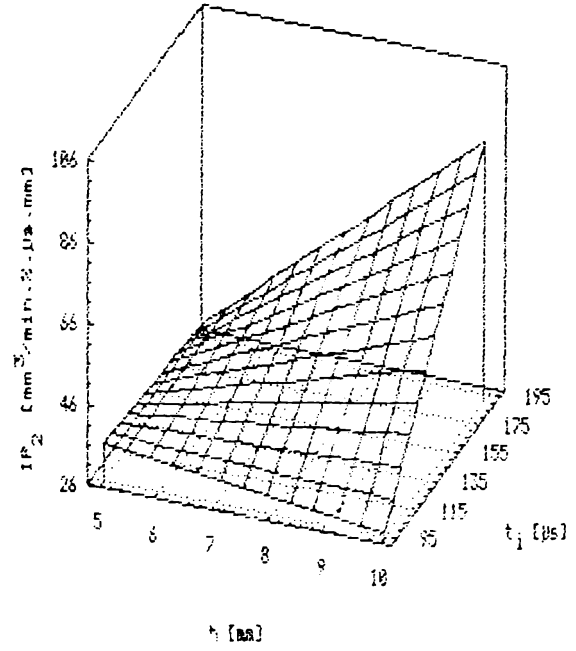


fig. 3.22. Suprafața de răspuns $IP_2 = f(h, t_1)$

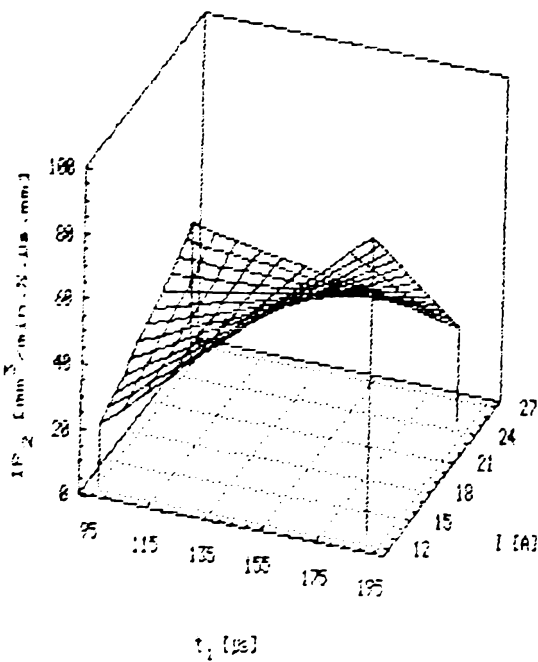


fig. 3.23. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(t_1, I)$

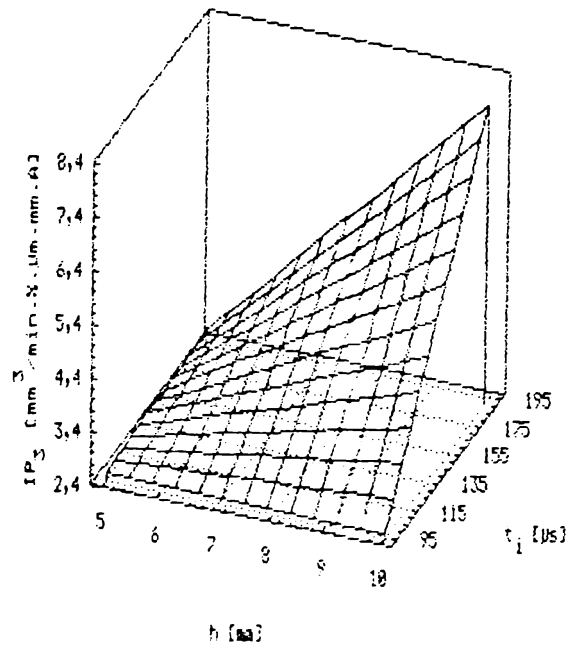
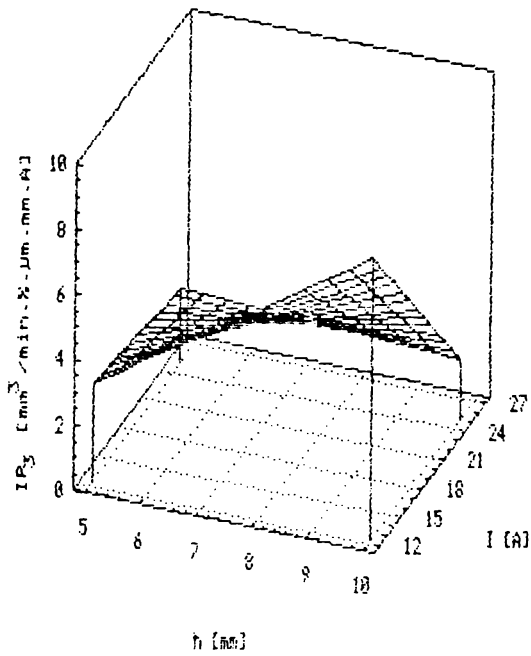
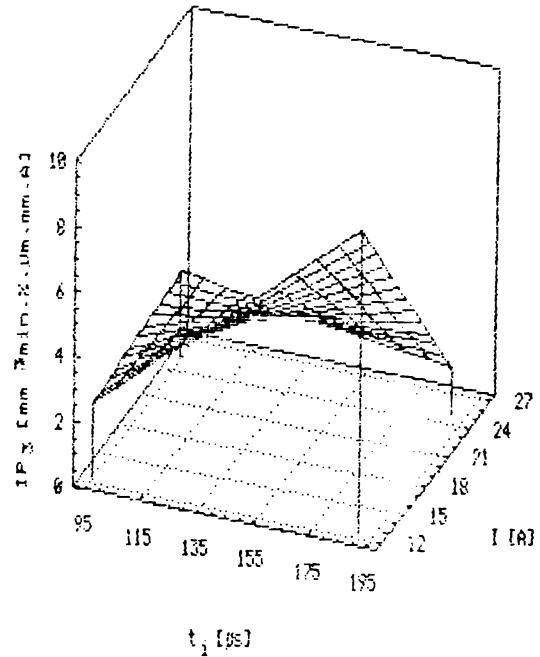
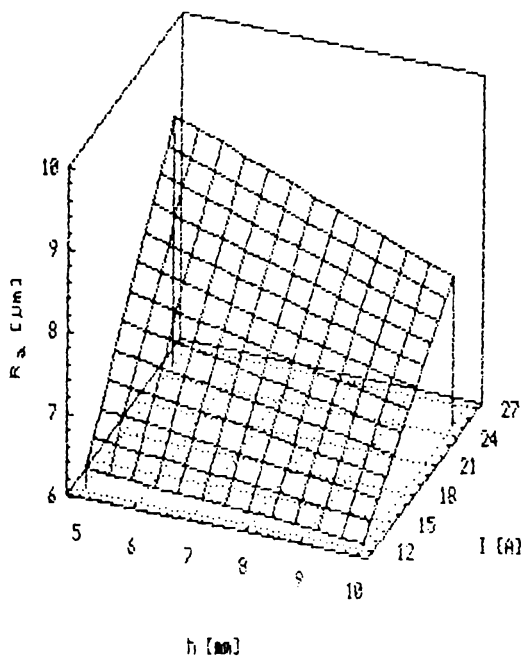
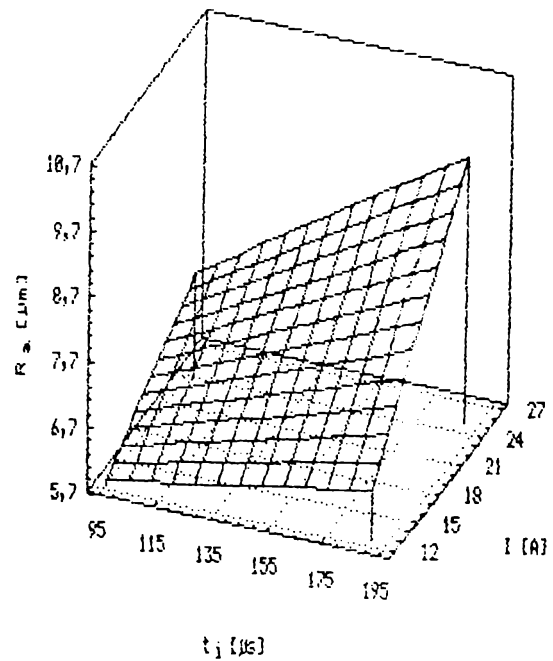


fig. 3.24. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(h, t_1)$

fig. 3.25. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(h, I)$ fig. 3.26. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(t_1, I)$ fig. 3.27. Suprafața de răspuns $R_a = f(h, I)$ fig. 3.28. Suprafața de răspuns $R_a = f(t_1, I)$

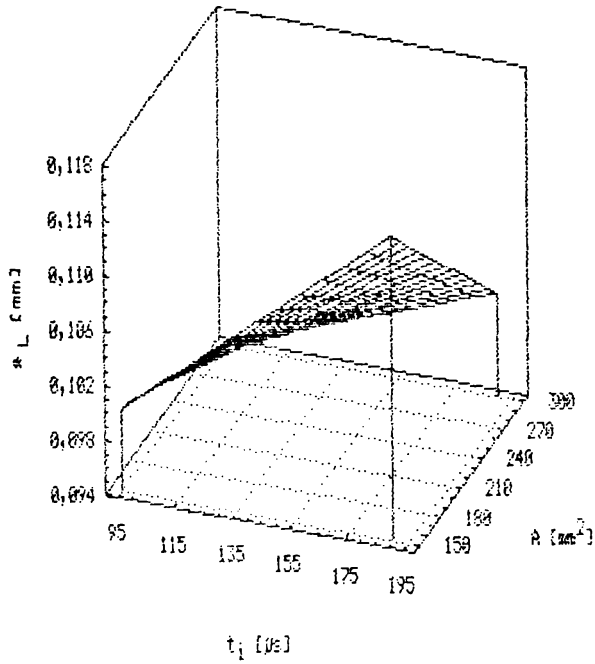


fig. 3.29. Suprafața de răspuns $s_L = f(t_i, A)$

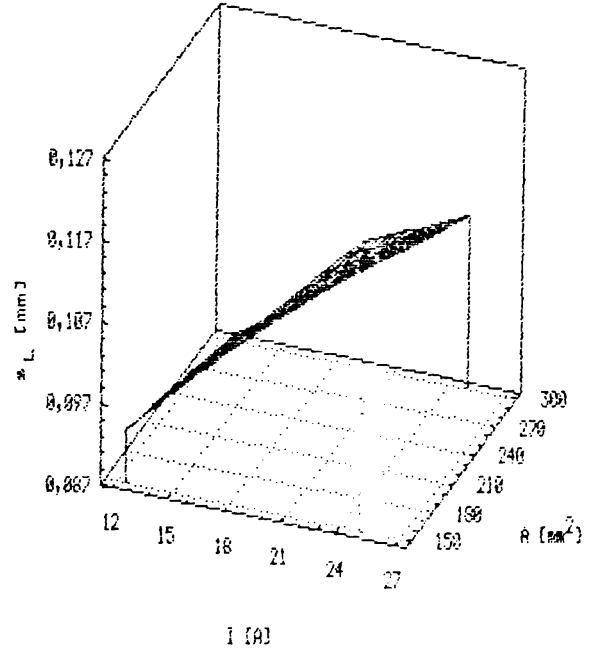


fig. 3.30. Suprafața de răspuns $s_L = f(I, A)$

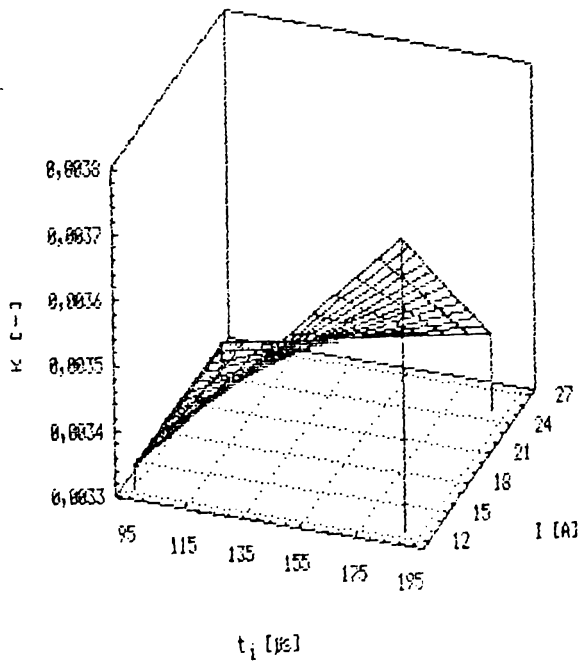


fig. 3.31. Suprafața de răspuns $K = f(t_i, I)$

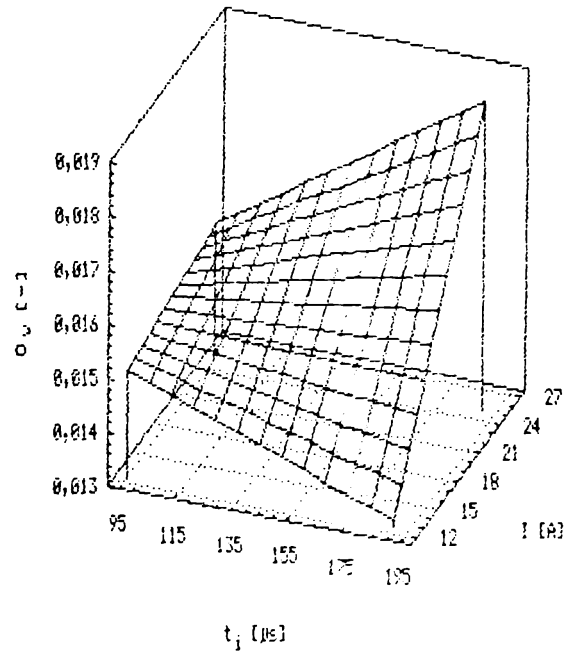


fig. 3.32. Suprafața de răspuns $O_v = f(t_i, I)$

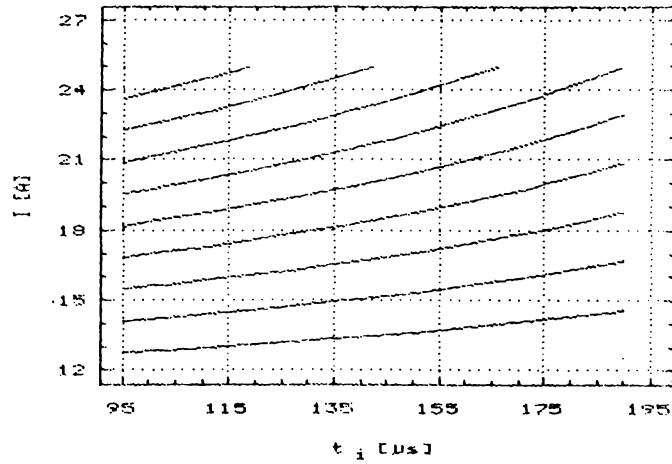


fig. 3.33. Curbe de nivel constant $Q_e - (t_1, I)$

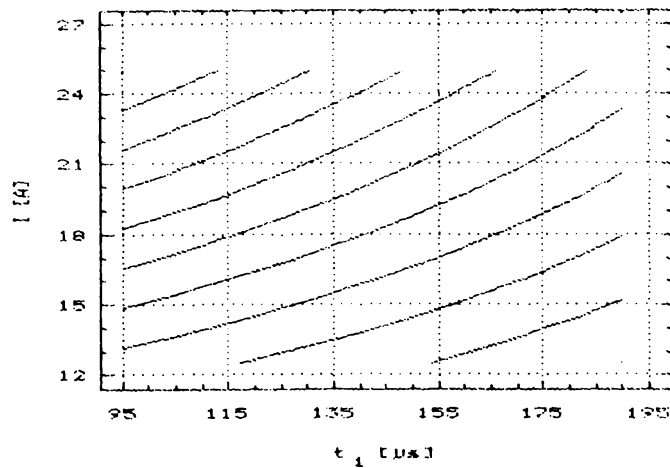


fig. 3.34. Curbe de nivel constant $u_v - (t_1, I)$

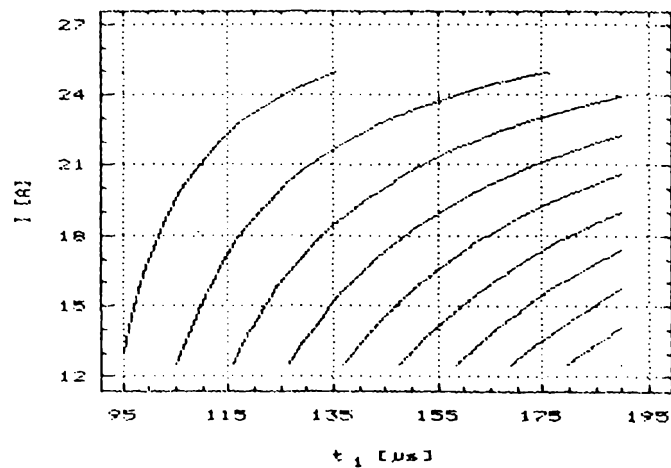


fig. 3.35. Curbe de nivel constant $IP_1 - (t_1, I)$

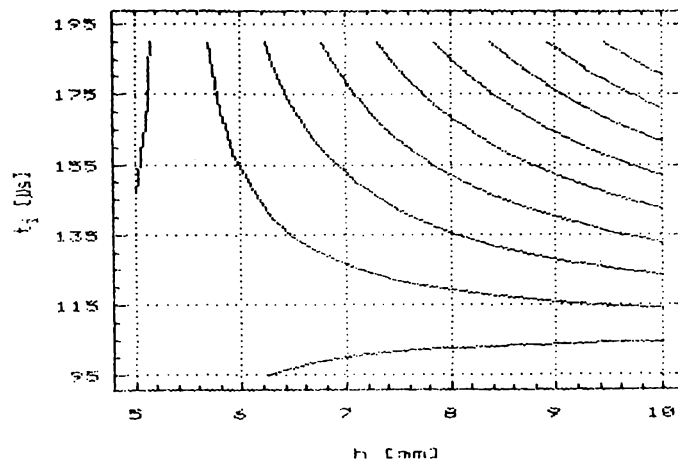


fig. 3.36. Curbe de nivel constant $IP_2 - (h, t_1)$

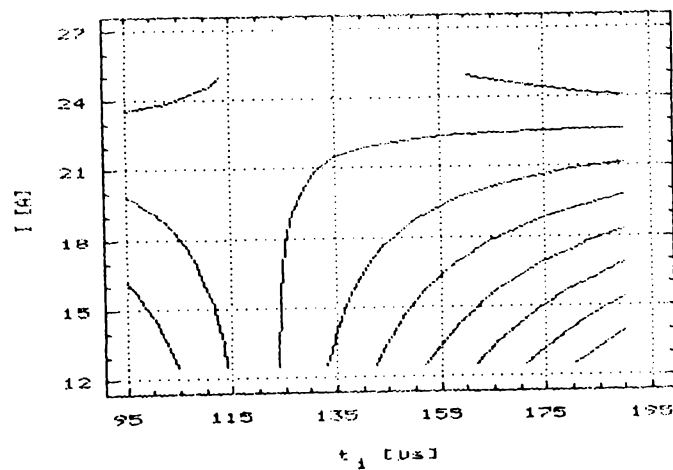


fig. 3.37. Curbe de nivel constant $IP_2 - (t_1, I)$

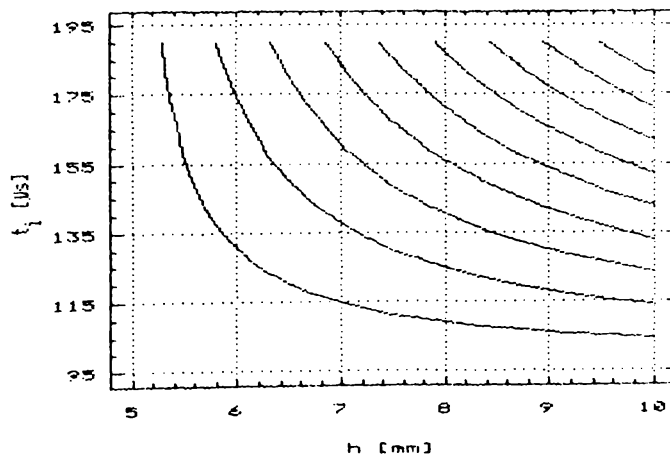
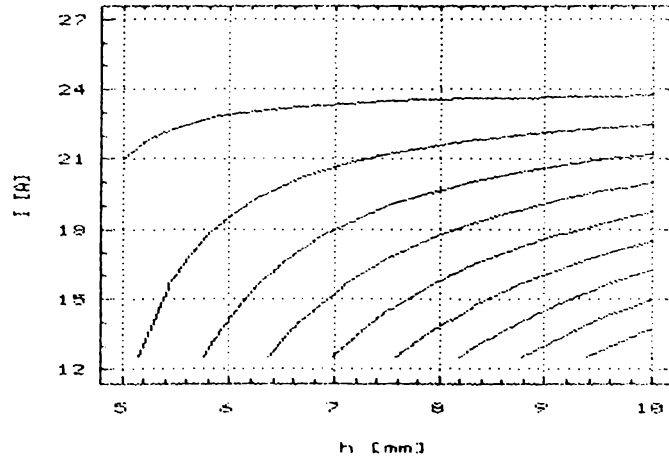
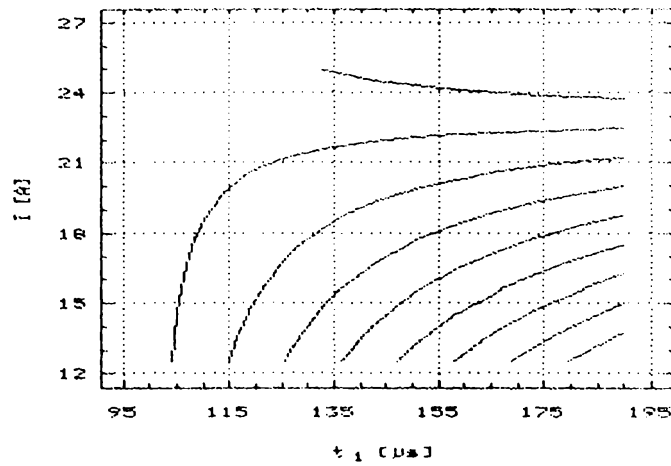
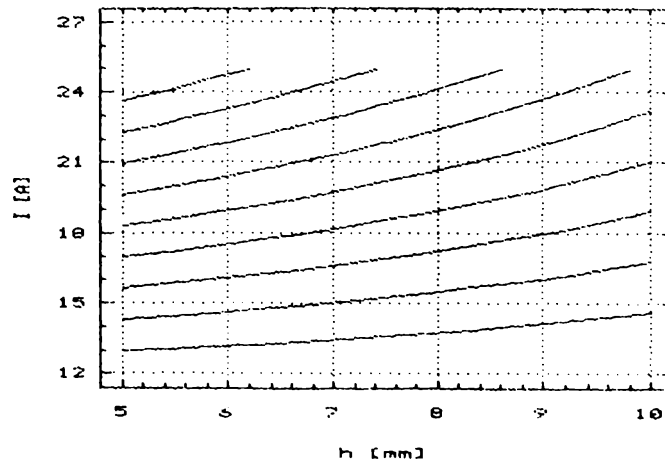


fig. 3.38. Curbe de nivel constant $IP_3 - (h, t_1)$

fig. 3.39. Curbe de nivel constant $IP_3 - (h, I)$ fig. 3.40. Curbe de nivel constant $IP_3 - (t_1, I)$ fig. 3.41. Curbe de nivel constant $R_a - (h, I)$

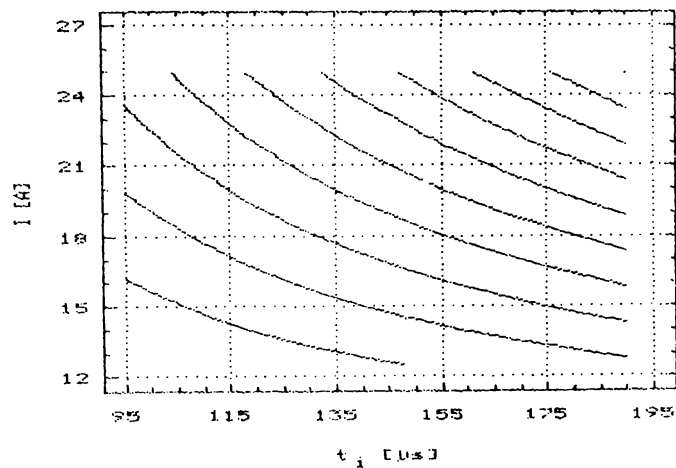


fig. 3.42. Curbe de nivel constant $R_a - (t_1, I)$

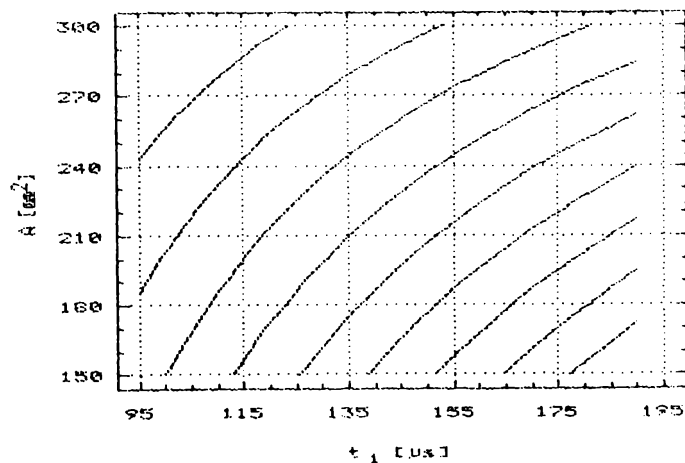


fig. 3.43. Curbe de nivel constant $s_L - (t_1, A)$

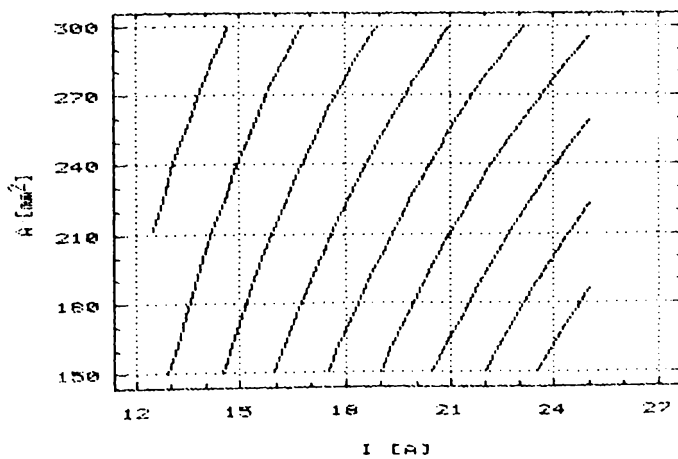
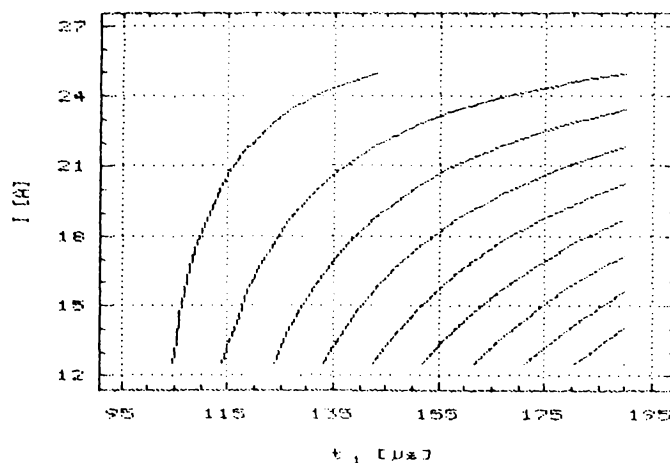
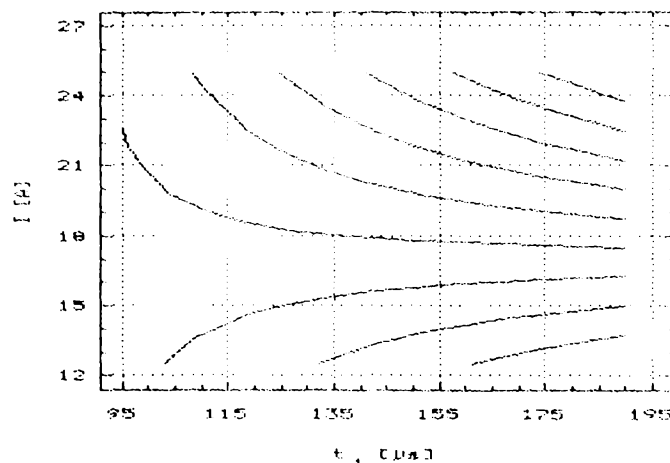


fig. 3.44. Curbe de nivel constant $s_L - (I, A)$

fig. 3.45. Curbe de nivel constant $K - (t_v, I)$ fig. 3.46. Curbe de nivel constant $O_v - (t_v, I)$

O funcție se numește “de maxim”, atunci când, mărimea pe care o reprezintă este cu atât mai bună, cu cât valoarea funcției este mai mare, iar ea este “de minim”, în situația în care mărimea reprezentată de funcție este cu atât mai bună, cu cât valoarea este mai mică.

Din cele 12 funcții de răspuns studiate, 6 sunt de maxim (Q_p , q_A , q_u , IP_1 , IP_2 și IP_3), iar celelalte 6 sunt de minim (Q_e , u_v , R_s , s_L , K , O_v). Două funcții dintre cele 6 de minim, suportă, însă, o discuție. Există situații când se urmărește ca R_s și s_L să nu aibe valori minime, ci, din contră, maxime. Spre exemplu, este cazul când se urmărește mărirea capacității portante a suprafețelor, caz în care, se dorește o valoare mare a rugozității.

O rapidă privire asupra suprafețelor de răspuns și a curbelor de nivel constant, conduce la o primă concluzie: în nici o situație, suprafețele de răspuns nu prezintă extreme: vârfuri sau

goluri. Deci, nici una dintre funcțiile obiectiv urmărite, nu atinge optimul: maximul sau minimul.

Acest aspect va fi discutat în capitolul următor, în continuare abordându-se problema din alt punct de vedere: determinarea coeficienților polinomului de aproximare, definit de ec. (3.25.) sau ec. (3.26.), pentru fiecare din cei 12 indicatori de performanță analizați. Neglijându-se interacțiunile superioare ordinului 2, polinomul de aproximare are expresia:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4. \quad (3.41.)$$

Coeficienții polinomului de aproximare sunt prezentați în tab. 3.16. și tab. 3.17. Cei semnificativi statistic, sunt evidențiați prin umbrirea celulei. În linia finală a tabelului este prezentată precizia de estimare a modelelor polinomiale, pe baza coeficientului de concordanță dintre valorile estimate și cele observate, R^2 , pentru un prag de semnificație $\alpha = 0,05$.

Analizând datele din cele două tabele, se observă că toate modelele polinomiale, cu excepția a două, (modelul pentru IP_2 , $R^2 = 89,61\%$ și modelul pentru O_v , $R^2 = 86,21\%$), prezintă o precizie de estimare foarte bună: $R^2 > 90\%$. Acest aspect este subliniat și de reprezentările grafice din fig. 3.47. ... fig. 3.58. (fig. 3.47. - Q_p ; fig. 3.48. - Q_c ; fig. 3.49. - u_v ; fig. 3.50. - q_A ; fig. 3.51. - q_w ; fig. 3.52. - IP_1 ; fig. 3.53. - IP_2 ; fig. 3.54. - IP_3 ; fig. 3.55. - R_s ; fig. 3.56. - s_L ; fig. 3.57. - K ; fig. 3.58. - O_v), care redau concordanța dintre valorile estimate și cele observate (măsurate sau calculate) ale funcțiilor de răspuns. Modelele polinomiale sunt cu atât mai precis calculate, cu cât punctele determinate de perechile valori estimate - valori observate, sunt mai apropiate de dreaptă. Pentru toate punctele situate pe dreaptă, valorile estimate sunt identice cu cele observate, iar precizia de estimare este de 100%.

În cazul celor două modele polinomiale, cu $R^2 < 90\%$, o încercare de creștere a preciziei de estimare se poate face prin introducerea unor interacțiuni de ordin superior. Astfel prin introducerea interacțiunilor de ordinul 3, modelul polinomial prezentat de ec. (3.41.), devine:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4. \quad (3.42.)$$

În această situație, pentru cele două funcții obiectiv, valorile estimațiilor coeficienților ecuațiilor de regresie sunt prezentate în tab. 3.18. Din tabel se observă că precizia de estimare a crescut considerabil. Într-adevăr, luând în considerare și interacțiunile de ordinul 3, în cazul IP_2 , $R^2 = 99,89\%$, iar în cazul O_v , $R^2 = 99,67\%$, situație ușor sesizabilă și din reprezentările

Valorile estimatilor coeficientilor polinoamelor de regresie pentru functiile obiectiv urmărite (partea I)

tab. 3.16.

nr. crt.	b_j	Q_p	Q_e	u_p	q_A	q_u	IP_1
1.	b_0	-24,8689	-24,7774	-7,02837	2,7695	-13,5089	-2,08094
2.	b_1	0,78005	0,12395	0,1063	0,0271	0,7649	0,0867
3.	b_2	-0,0657868	0,0745237	0,0181474	-0,00820789	0,0858658	0,0143526
4.	b_3	3,1397	1,9581	1,77906	0,11728	0,4023	0,08456
5.	b_4	0,0544267	0,026055	-0,006005	-0,0000466667	0,0252317	0,00392167
6.	b_{12}	0,00660579	0,0000157895	-0,00153368	0,000662105	-0,000235263	0,000151053
7.	b_{13}	-0,007812	0,005736	0,007936	-0,003488	-0,001132	0,000092
8.	b_{14}	-0,0065367	-0,000816667	0,000134667	-0,000253333	-0,00325567	-0,000421
9.	b_{23}	0,00740863	-0,005128	-0,00498358	-0,0000745263	-0,00302505	-0,000715158
10.	b_{24}	-0,000138649	-0,00011807	-0,00001298358	-0,00000305263	0,000152193	0,0000247193
11.	b_{34}	0,0015756	-0,000548	-0,000452	0,000122133	-0,000533467	-0,000124667
12.	R^2	99,46 %	98,89 %	98,96 %	96,68 %	91,24 %	91,47 %

 Q_p [mm^3/min]
 Q_e [mm^3/min]

 u_p [%]
 q_A [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\text{A}$]

 q_u [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%$]
 IP_1 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}$]

Valorile estimatilor coeficientilor polinoamelor de regresie pentru functiile obiectiv urmarite (partea a II-a)

tab. 3.17.

nr. crt.	b_j	IP_2	IP_3	R_a	s_L	K	O_v
1.	b_0	-289,275	-23,7184	2,42562	0,04225	0,00920813	0,0684637
2.	b_1	6,9069	0,73755	0,1955	-0,0008	-0,0003345	-0,0012165
3.	b_2	1,30318	0,117066	0,000631579	0,000281579	-0,000007921	-0,000178053
4.	b_3	13,6121	1,2701	0,0828	0,00176	-0,0002134	-0,0007658
5.	b_4	0,455403	0,02312	0,0086667	0,0000516667	-0,0000066	-0,00027775
6.	b_{12}	0,140789	0,0113484	0,000110526	-0,0000136842	-0,0000007	-0,0000264842
7.	b_{13}	-0,921548	-0,096136	-0,01708	0,00008	0,0000134	0,00005464
8.	b_{14}	-0,0208077	-0,000174667	-0,00017	0,00000733333	-0,0000015566	0,0000145533
9.	b_{23}	-0,0751918	-0,00695874	0,00162316	0,00000463158	-0,00000028	0,00000427789
10.	b_{24}	-0,00283019	-0,000186596	-0,0000626316	-0,000000631579	0,0000000935	0,00000135088
11.	b_{34}	0,0108967	0,000635733	-0,00000133333	-0,00000453333	0,00000062	-0,000000045333
12.	R^2	89,61 %	93,44 %	98,29 %	98,67 %	97,23 %	86,21 %

 IP_2 [$\text{mm}^3/\text{min} \cdot \% \cdot \mu\text{m} \cdot \text{mm}$]
 IP_3 [$\text{mm}^3/\text{min} \cdot \% \cdot \mu\text{m} \cdot \text{mm} \cdot \text{A}$]

 R_a [μm]
 s_L [mm]

K [-]
 O_v [-]

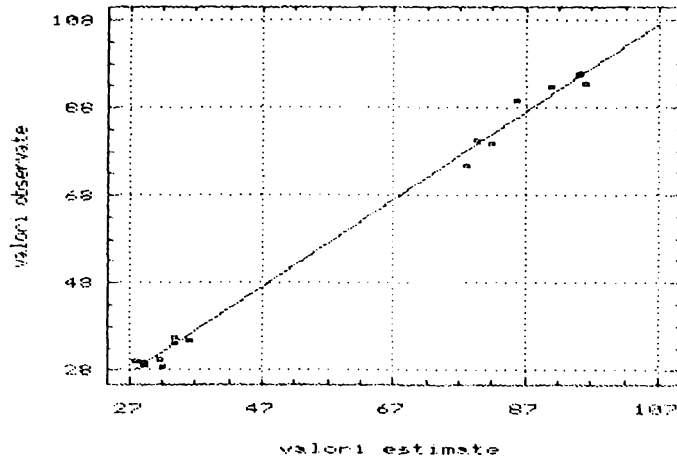


fig. 3.47. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv Q_p

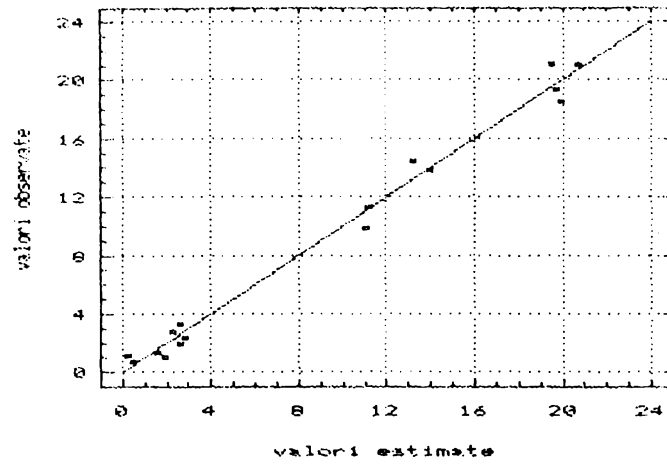


fig. 3.48. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv Q_a

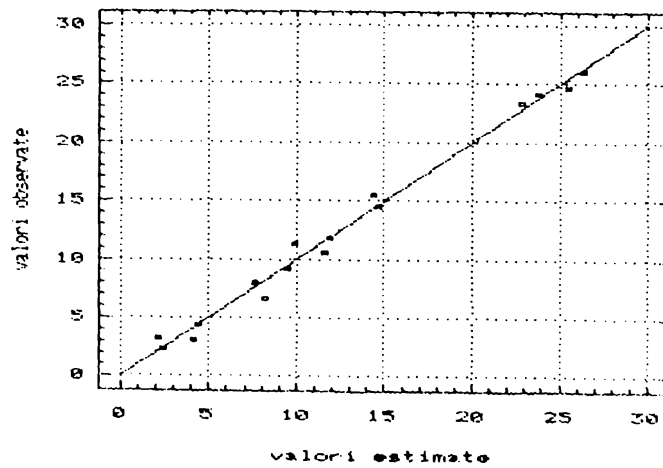


fig. 3.49. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv u

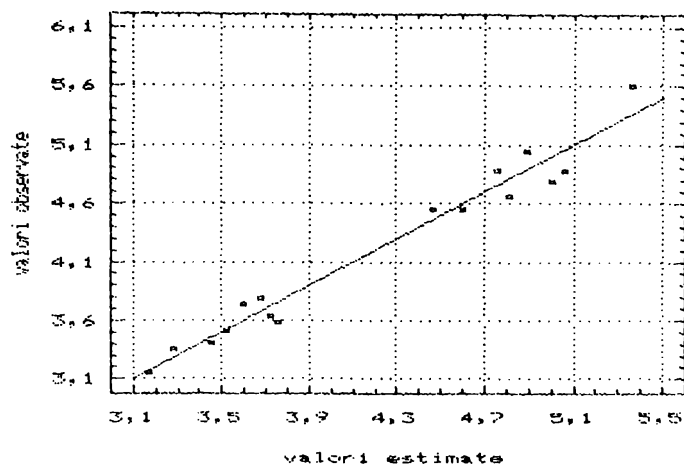


fig. 3.50. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv q_A

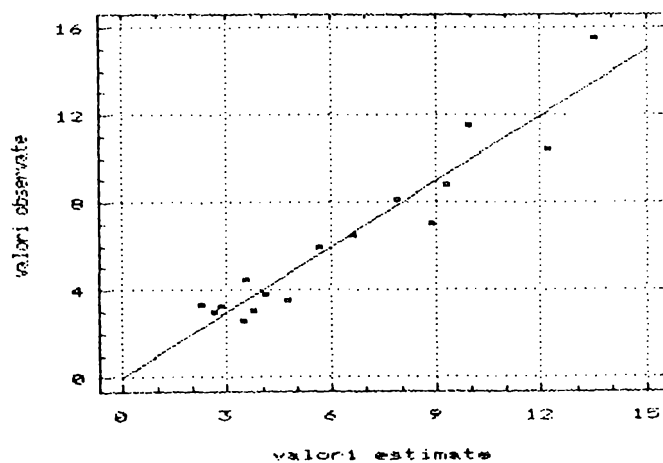


fig. 3.51. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv q_u

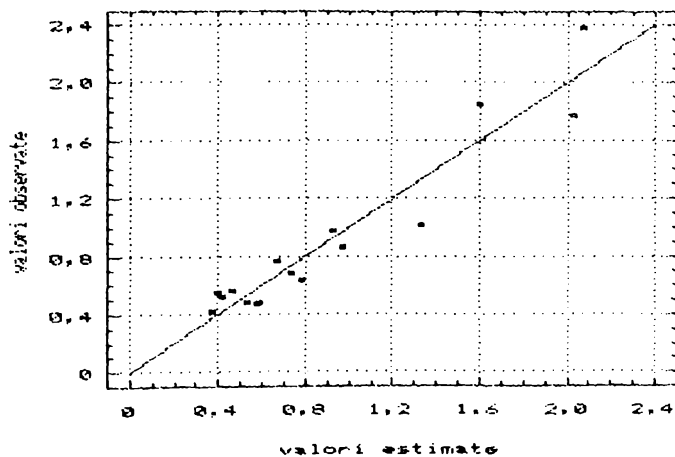
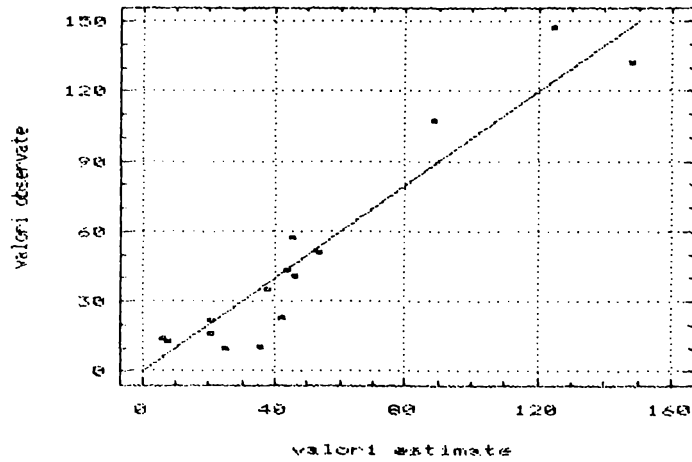
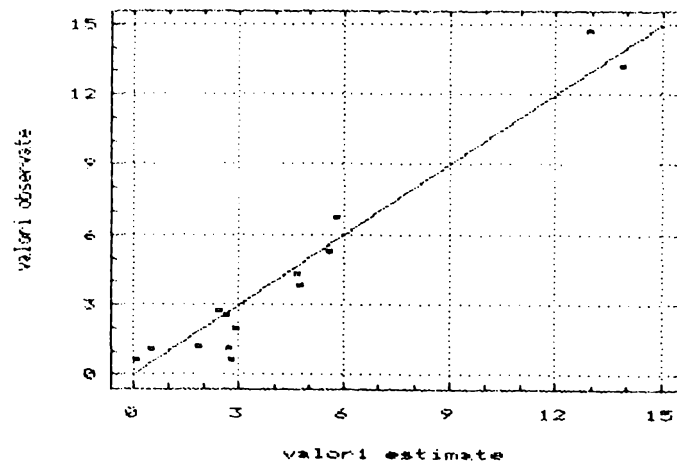
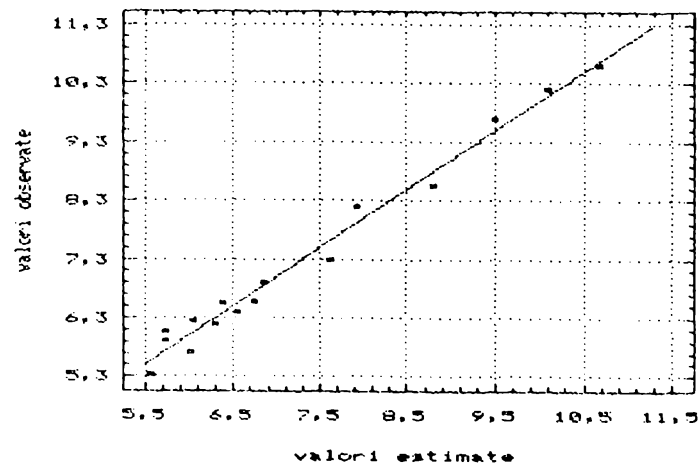


fig. 3.52. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv IP_1

fig. 3.53. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv IP_1 fig. 3.54. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv IP_3 fig. 3.55. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv R_a

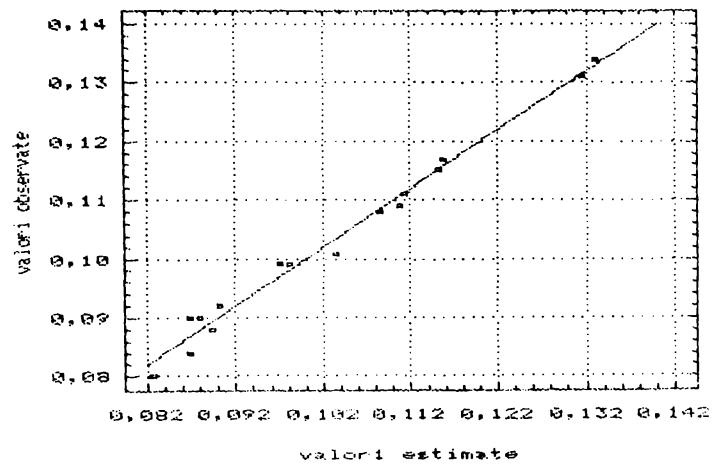


fig. 3.56. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv S_L

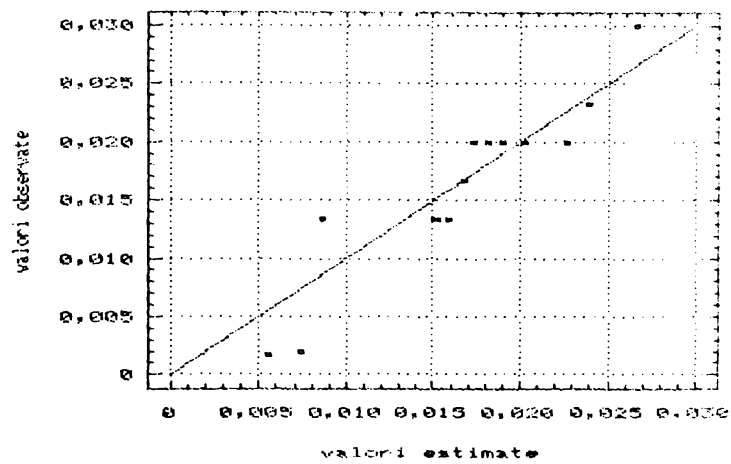


fig. 3.57. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv K

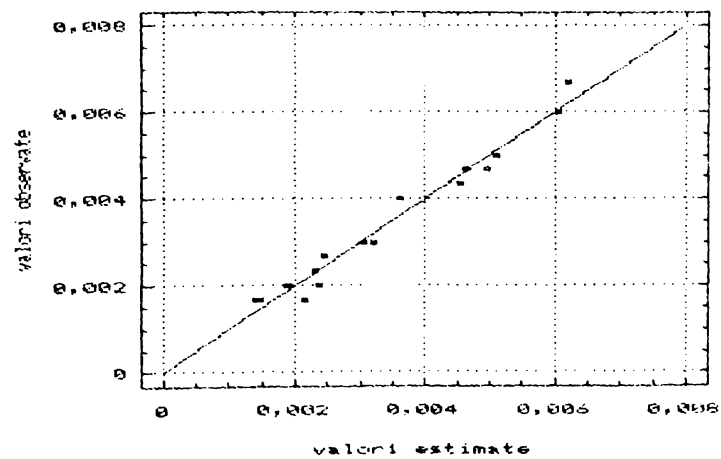


fig. 3.58. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv O ,

Valorile estimațiilor coeficienților polinoamelor de regresie pentru funcțiile obiectiv IP_2 și O_v , remodelate

tab. 3.18.

nr. crt.	b_{ijk}	IP_2	O_v
1.	b_0	259,51	0,0741675
2.	b_1	-34,5667	-0,00699
3.	b_2	-0,668214	-0,000403526
4.	b_3	-18,1726	-0,0005588
5.	b_4	-1,58201	-0,0000355
6.	b_{12}	0,181201	0,0000388211
7.	b_{13}	1,62586	0,00029488
8.	b_{14}	0,109968	0,000000475333
9.	b_{23}	0,0476061	0,0000127158
10.	b_{24}	0,00311307	0,00000475088
11.	b_{34}	0,130741	-0,0000152373
12.	b_{123}	-0,00450956	-0,00000300463
13.	b_{124}	0,000196189	-0,0000000398596
14.	b_{134}	-0,00846576	0,0000008352
15.	b_{234}	-0,00039545	0,0000000626526
16.	R^2	99,89 %	99,67 %

grafice din fig. 3.59. (pentru IP_2) și fig. 3.60. (pentru O_v), unde sunt redată concordanțele valorilor estimate, cu cele observate.

În cazul celor 10 funcții obiectiv ce prezintă polinoame de rang 2, s-a încercat o remodelare, luând în considerare doar elementele (factori și interacțiuni) semnificative. În situația în care, o funcție are, drept elemente semnificative, doar interacțiuni, pentru modelarea matematică este necesară și prezența factorilor care definesc interacțiunea. Spre exemplu, funcția K are coeficienți semnificativi, b_0 , b_1 , b_4 și b_{24} , deci, modelul polinomial ar trebui să prezinte doar factorii x_1 (h), x_4 (A) și interacțiunea x_2x_4 (tA), însă, interacțiunea x_2x_4 impune și prezența factorului x_2 (t). Pentru cele 10 funcții obiectiv (Q_p , Q_c , u_v , q_A , q_u , IP_1 , IP_3 , R_a , s_L și K), estimațiile coeficienților polinoamelor de rang 2, reduse, sunt prezentate în tab. 3.19. și tab. 3.20. Linia finală a tabelului cuprinde noile valori ale coeficientului de concordanță, R^2 .

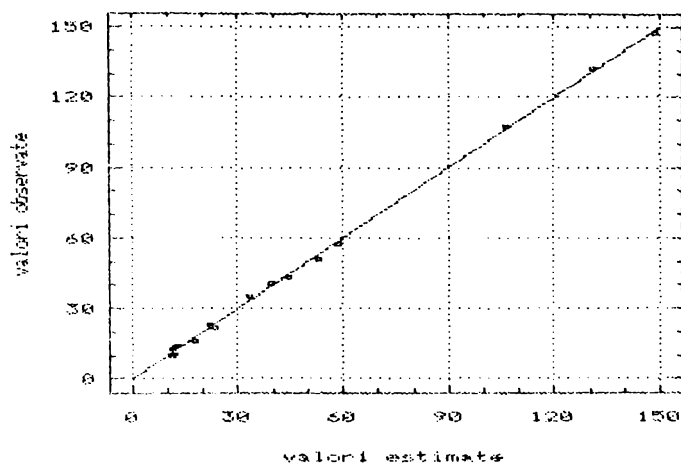


fig. 3.59. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv remodelate IP_2

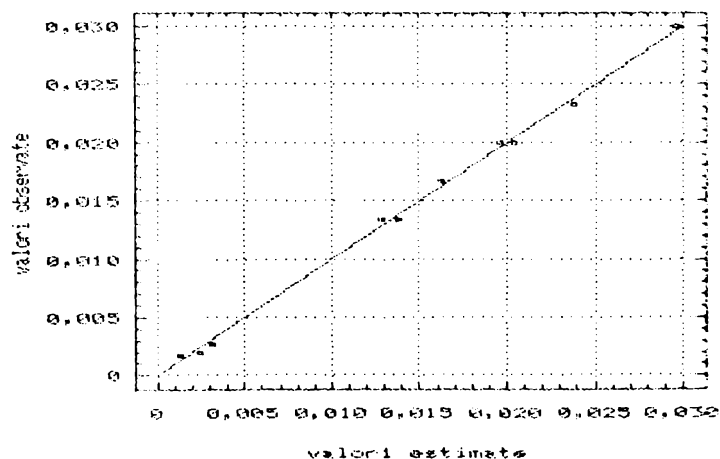


fig. 3.60. Concordanța modelului polinomial al funcției obiectiv remodelate O_7

Modelul matematic propus de datele din tabelul 3.16., pentru funcția obiectiv Q_p , luând în considerare pe toți cei 11 coeficienți este dat de ecuația:

$$Q_p = -24,8689 + 0,78005 \cdot h - 0,0657868 \cdot t_i + 3,1397 \cdot I + 0,0544267 \cdot A + \\ + 0,00660579 \cdot h \cdot t_i - 0,007812 \cdot h \cdot I - 0,0065367 \cdot h \cdot A + 0,00740863 \cdot t_i \cdot I - \\ - 0,000138649 \cdot t_i \cdot A + 0,0015756 \cdot I \cdot A \quad (3.43.)$$

și prezintă o precizie estimată de coeficientul de concordanță, $R^2 = 99,46\%$.

Dacă se iau în considerare doar cei trei coeficienți semnificativi, b_0 , b_2 și b_3 , eliminându-se efectele celorlalți factori de influență, noul model matematic, redus substanțial ca amploare, pentru aceeași funcție obiectiv, Q_p , are expresia:

$$Q_p = -37,5424 + 0,0914724 \cdot t_i + 4,49135 \cdot I, \quad (3.44.)$$

Valorile estimărilor coeficienților polinoamelor de regresie reduse dimensional (partea 1)

Tab. 3.19.

nr. crt.	b_j	Q_p	Q_e	U_v	Q_A	Q_M
1.	b_0	-37,5424	-19,3635	-3,908	2,73388	-2,45563
2.	b_1	—	—	—	—	—
3.	b_2	0,0914724	0,0480763	0,00372368	-0,00395263	0,061625
4.	b_3	4,49135	1,87782	1,73688	0,10798	—
5.	b_4	—	—	-0,01532	—	—
6.	b_{12}	—	—	—	—	—
7.	b_{13}	—	—	—	—	—
8.	b_{14}	—	—	—	—	—
9.	b_{23}	—	-0,005128	-0,00498358	—	—
10.	b_{24}	—	—	—	—	—
11.	b_{34}	—	—	—	—	—
12.	R^2	98,34 %	97,93 %	98,77 %	93,13 %	65,40 %

Observație: structura polinoamelor ecuațiilor de regresie, nu prevede termenii cuprinzând coeficienții marcați cu
semnul —

Valorile estimatilor coeficientilor polinoamelor de regresie reduce dimensional (partea a II-a)

tab. 3.20

nr. crt.	b_{ij}	IP_1	IP_3	R_a	st	K
1.	b_0	-1,25875	-18,5164	4,3025	0,023875	0,008581886
2.	b_1	—	0,69825	0,173	—	-0,000533256
3.	b_2	0,0210474	0,0750816	-0,0750816	0,000265789	-0,0000184211
4.	b_3	0,0572	1,41314	0,0825	0,00302	—
5.	b_4	—	—	—	0,000106667	-0,000006656
6.	b_{12}	—	0,0113484	—	—	—
7.	b_{13}	—	-0,096136	-0,01708	—	—
8.	b_{14}	—	—	—	—	—
9.	b_{23}	-0,000715158	-0,00695874	0,00162316	—	—
10.	b_{24}	—	—	—	-0,000000631579	0,0000000935088
11.	b_{34}	—	—	—	-0,00000453333	—
12.	R^2	78,91 %	88,74 %	95,93 %	94,91 %	87,69 %

Observație: structura polinoamelor ecuațiilor de regresie, nu prevede termenii cuprinzând coeficienți marcați cu
semnul —

cu o precizie estimată $R^2 = 98,34 \%$.

Prin urmare, pentru funcția obiectiv Q_p , modelul polinomial redus cu numai 3 termeni, față de modelul polinomial complet, cu 11 termeni, are o pierdere estimată de precizie de numai 1,12 %. Dacă această pierdere de precizie este compensată de simplitatea modelului redus, este la latitudinea decidentului.

În cele ce urmează, am considerat că $R^2 = 90 \%$ reprezintă pragul de precizie minimă, acceptat. În consecință, modele polinomiale reduse, de rang 2, vor prezenta, pe lângă Q_p , și funcțiile obiectiv Q_c ($R^2 = 97,93 \%$), u_v ($R^2 = 98,77 \%$), q_A ($R^2 = 93,13 \%$), R_a ($R^2 = 95,93 \%$) și s_L ($R^2 = 94,91 \%$):

$$Q_c = -19,3635 + 0,0480763 \cdot t_i + 1,87782 \cdot I - 0,005128 \cdot t_i \cdot I; \quad (3.45.)$$

$$u_v = -3,908 + 0,00372368 \cdot t_i + 1,73688 \cdot I - 0,01532 \cdot A - 0,00498358 \cdot t_i \cdot I; \quad (3.46.)$$

$$q_A = 2,73388 - 0,00395263 \cdot t_i + 0,10798 \cdot I; \quad (3.47.)$$

$$R_a = 4,3025 + 0,173 \cdot h - 0,0126316 \cdot t_i + 0,0825 \cdot I - 0,01708 \cdot h \cdot I + 0,00162316 \cdot t_i \cdot I; \quad (3.48.)$$

$$s_L = 0,023875 + 0,000265789 \cdot t_i + 0,00302 \cdot I + 0,000106667 \cdot A - 0,000000631579 \cdot t_i \cdot A - 0,00000453333 \cdot I \cdot A. \quad (3.49.)$$

Cum modelele reduse, pentru funcțiile obiectiv q_u ($R^2 = 65,40 \%$), IP_1 ($R^2 = 78,91 \%$), IP_3 ($R^2 = 88,74 \%$) și K ($R^2 = 87,69 \%$), nu ating pragul minim ($R^2 = 90 \%$), cele patru funcții în discuție vor fi reprezentate de modele polinomiale, tot de rang 2, dar complete, cuprinzând toți cei 11 termeni:

$$q_u = -13,5089 + 0,7649 \cdot h + 0,0858658 \cdot t_i + 0,4023 \cdot I + 0,0252317 \cdot A - 0,000235263 \cdot h \cdot t_i - 0,001132 \cdot h \cdot I - 0,00325567 \cdot h \cdot A - 0,00302505 \cdot t_i \cdot I + 0,000152193 \cdot t_i \cdot A - 0,000533467 \cdot I \cdot A; \quad (3.50.)$$

$$IP_1 = -2,08094 + 0,0867 \cdot h + 0,0143526 \cdot t_i + 0,08456 \cdot I + 0,00392167 \cdot A + 0,000151033 \cdot h \cdot t_i + 0,000092 \cdot h \cdot I - 0,000421 \cdot h \cdot A - 0,000715158 \cdot t_i \cdot I + 0,0000247193 \cdot t_i \cdot A - 0,000124667 \cdot I \cdot A; \quad (3.51.)$$

$$IP_3 = -23,7184 + 0,73755 \cdot h + 0,117066 \cdot t_i + 1,2701 \cdot I + 0,02312 \cdot A + 0,0133484 \cdot h \cdot t_i - 0,096136 \cdot h \cdot I - 0,000174667 \cdot h \cdot A - 0,00695874 \cdot t_i \cdot I - 0,000186596 \cdot t_i \cdot A + 0,000635733 \cdot I \cdot A; \quad (3.52.)$$

$$K = 0,0090813 - 0,0003345 \cdot h - 0,000007921 \cdot t_i - 0,0002134 \cdot I - 0,0000066 \cdot A - 0,0000007 \cdot h \cdot t_i + 0,0000134 \cdot h \cdot I - 0,0000015566 \cdot h \cdot A - 0,00000028 \cdot t_i \cdot I + 0,0000000935 \cdot t_i \cdot A - 0,00000062 \cdot I \cdot A. \quad (3.53.)$$

Celelalte două funcții obiectiv, IP_2 și O_v , sunt reprezentate de modelele polinomiale de rang 3 (interacțiuni de ordinul 2 și 3). Modelele polinomiale reduse fiind foarte departe de pragul minim de concordanță, $R^2 = 90\%$ (pentru IP_2 , $R^2 = 44,01\%$, iar pentru O_v , $R^2 = 44,19\%$), funcțiile obiectiv IP_2 și O_v vor fi approximate de modele polinomiale complete, de rang 3, cu toți cei 15 termeni:

$$\begin{aligned}
 IP_2 = & 259,51 - 34,5667 \cdot h - 0,668214 \cdot t_i - 18,1726 \cdot I - 1,58201 \cdot A + \\
 & + 0,181201 \cdot h \cdot t_i + 1,62586 \cdot h \cdot I + 0,109968 \cdot h \cdot A + 0,0476061 \cdot t_i \cdot I - \\
 & - 0,00311307 \cdot t_i \cdot A + 0,130741 \cdot I \cdot A - 0,00450956 \cdot h \cdot t_i \cdot I + \\
 & + 0,000196189 \cdot h \cdot t_i \cdot A - 0,000846576 \cdot h \cdot I \cdot A - 0,00039545 \cdot t_i \cdot I \cdot A;
 \end{aligned} \tag{3.54.}$$

$$\begin{aligned}
 O_v = & 0,0741675 - 0,006999 \cdot h - 0,000403526 \cdot t_i - 0,0005588 \cdot I + \\
 & + 0,0000355 \cdot A + 0,0000388211 \cdot h \cdot t_i + 0,00029488 \cdot h \cdot I + \\
 & + 0,00000457333 \cdot h \cdot A + 0,0000127158 \cdot t_i \cdot I + 0,000000475088 \cdot t_i \cdot A - \\
 & - 0,0000152373 \cdot I \cdot A - 0,00000300463 \cdot h \cdot t_i \cdot I - 0,0000000398596 \cdot h \cdot t_i \cdot A + \\
 & + 0,0000008352 \cdot h \cdot I \cdot A + 0,0000000626526 \cdot t_i \cdot I \cdot A.
 \end{aligned} \tag{3.55.}$$

Toate cele 12 modele polinomiale, definite de ec. (3.44.) ... ec. (3.55.), estimează destul de exact funcțiile obiectiv urmărite ($R^2 > 90\%$). Ele sunt, însă, valabile doar în spațiul multidimensional definit de domeniile de variație a celor 4 factori de influență și constituie punctul de plecare, în vederea optimizării procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv.

4. OPTIMIZAREA PROCESELOR TEHNOLOGICE PE BAZA MODELĂRII MATEMATICE

Optimizarea, dorință firească a omului spre perfecțiune, este “operația de studiere a unei probleme în urma căreia se obține un rezultat, care este cel mai bun, cel mai potrivit, cel mai indicat și în baza căruia se poate lua o decizie cu caracter tehnico-economic.” [133.].

Determinarea soluției optime este, de fapt, un proces de decizie. O decizie semnificativă, care să aibă în vedere cât mai multe aspecte, trebuie să țină cont de mai multe criterii de apreciere a variantelor luate în discuție. Din anumite puncte de vedere (după anumite criterii), o variantă este mai bună, din alte puncte de vedere (după alte criterii), o cu totul altă variantă poate fi preferată. Decizia luată, care conduce la soluția optimă, trebuie să țină cont, simultan, de toate criteriile de apreciere, deci, decizia trebuie să fie multicriterială.

Modelele de decizii multicriteriale abordează problema optimizării sub două aspecte, care imprimă și caracterul acestor modele:

- modele de decizii multicriteriale multiobiectiv, prin care se determină soluția optimă dintr-o infinitate de variante teoretic posibile [12.], [35.], [133.], [134.];

- modele de decizii multicriteriale multiatribut, prin care se alege soluția optimă, dintr-un număr finit de variante existente [8.], [9.], [11.], [14.], [114.], [117.].

Fiecare dintre modele are domenii specifice de aplicare, fiecare are o mulțime de metode, care construiesc diferiți algoritmi de determinare a soluției optime.

4.1. Optimizarea pe baza metodelor de decizii multicriteriale multiobiectiv

Capitolul precedent a subliniat faptul că, nici una dintre cele 12 funcții obiectiv studiate, nu a atins, în domeniul de definiție a variabilelor, valori extreme, fie minime, fie maxime, aceasta însemnând, de fapt, că optimul acestor funcții nu a fost atins. Cum optimizarea tuturor funcțiilor obiectiv (Q_p , Q_c , u_v , q_A , q_u , IP_1 , IP_2 , IP_3 , R_a , s_L , K și O_v), ar fi o întreprindere deosebit de laborioasă, în cele ce urmează m-am oprit doar asupra unei singure funcții: indicatorul de performanță global IP_3 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$].

Alegerea acestei funcții obiectiv, drept bază de discuții pentru optimizare, se datorează mai multor aspecte. O analiză detaliată a modului cum sunt influențate funcțiile de răspuns de către factorii independenți (fig. 4.1. și fig. 4.2. [81.]), a arătat că mărirea nivelului de intensitate a curentului, conduce la creșterea Q_p și q_A , dar creșterea R_a și u_v conduce, în același timp la scăderea, nedorită a indicatorilor globali IP_1 și IP_3 , mult mai importanți în procesul prelucrării prin eroziune electrică. Se poate, deci, afirma că, mărirea nivelului de intensitate a curentului are, în condițiile date, o influență preponderent negativă asupra performanțelor prelucrării. Mărirea duratei impulsurilor de curent, conduce la creșterea Q_p , IP_1 și IP_3 și la scăderea u_v , care sunt consecințe favorabile obiectivelor generale ale prelucrării, dar, concomitent, conduce la creșterea R_a și la scăderea q_u , care sunt consecințe mai puțin favorabile.

Aspectele relevate demonstrează că indicatorii de performanță tradiționali, Q_p , u_v , R_a reflectă incomplet procesul de prelucrare prin eroziune electrică. Încercările de ameliorare a acestor indicatori, conduc la o evoluție defavorabilă a indicatorilor globali IP_1 și IP_3 , care reflectă mai bine complexitatea fenomenelor de schimb de substanță și de energie în procesul electroeroziv.

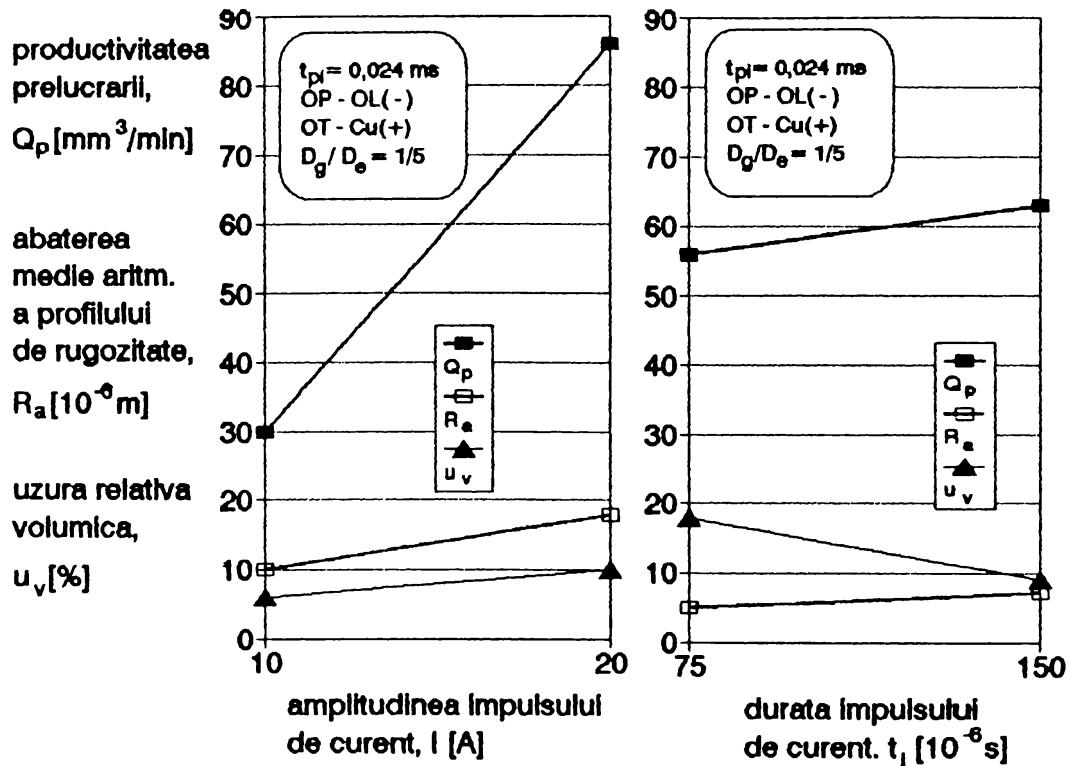


fig. 4.1. Tendințele de variație a funcțiilor Q_p , R_a și u_v , în raport cu I și t_i

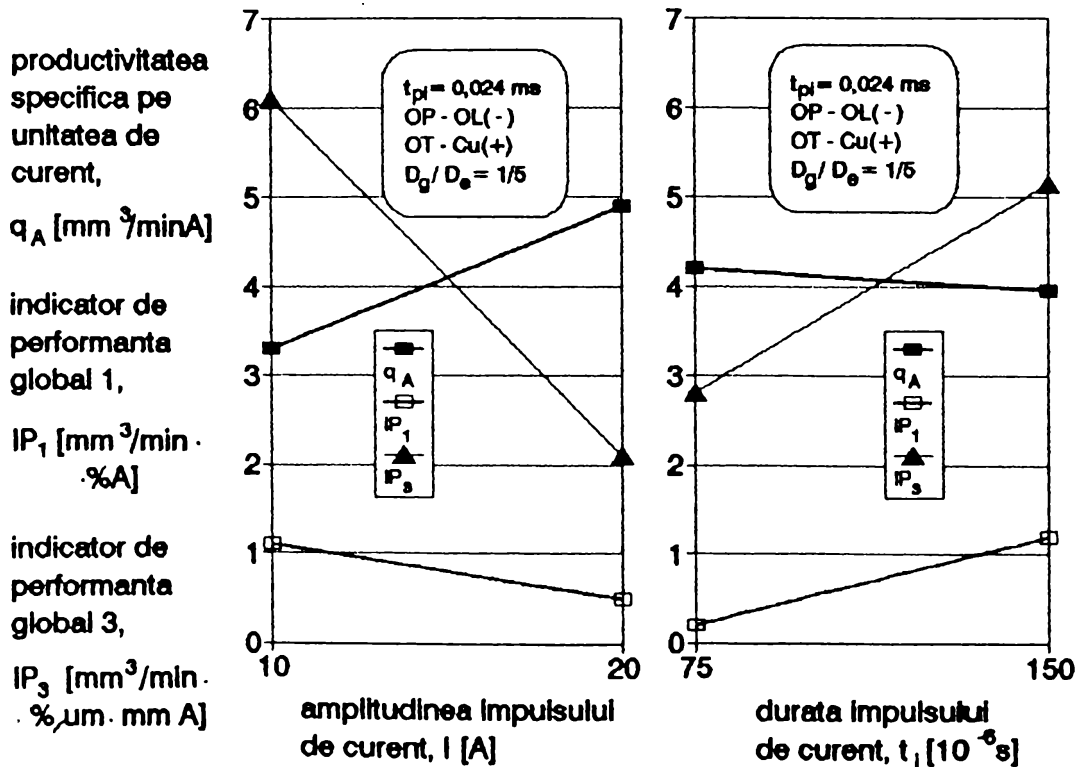


fig. 4.2. Tendințele de variație a funcțiilor q_A , IP_1 și IP_3 , în raport cu I și t_i

Întrucât indicatorul global IP_3 este o funcție de maxim, se vor determina acele valori sau domenii de variație ale factorilor, pentru care funcția are valori cât mai mari.

Pentru aceasta, mai întâi, este necesar a se urmări modul cum influențează, factorii, simultan, funcția obiectiv IP_3 . Tendințele de variație a funcției obiectiv, sunt reprezentate, sub formă grafică, de către cubul răspunsurilor, care estimează valorile funcției obiectiv, atunci când variabilele iau valorile extreme ale domeniului lor de definiție. Influențele asupra funcției IP_3 , exercitate de către grupe de trei factori, sunt redată în fig. 4.3. (h, t_1, I), fig. 4.4. (h, t_1, A), fig. 4.5. (h, I, A) și fig. 4.6. (t_1, I, A). Valorile din exteriorul cubului reprezintă limitele de variație a celor trei parametri, iar cele din interiorul cubului, valorile funcției obiectiv IP_3 , atunci când variabilele ating extremele domeniilor lor de definiție.

Analizând datele din fig. 4.3. se constată următoarele aspecte:

- creșterea adâncimii de prelucrare, de la 5 mm, la 10 mm (variație relativă $\Delta h_r = 100\%$), conduce la:

- creșterea IP_3 , de la $0,89 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $3,76 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = 322,47\%$), dacă $I = 12,5 \text{ A}$ și $t_1 = 95 \mu\text{s}$;

- creșterea IP_3 , de la $5,15 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $13,4 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = 160,19\%$), dacă $I = 12,5 \text{ A}$ și $t_1 = 190 \mu\text{s}$;

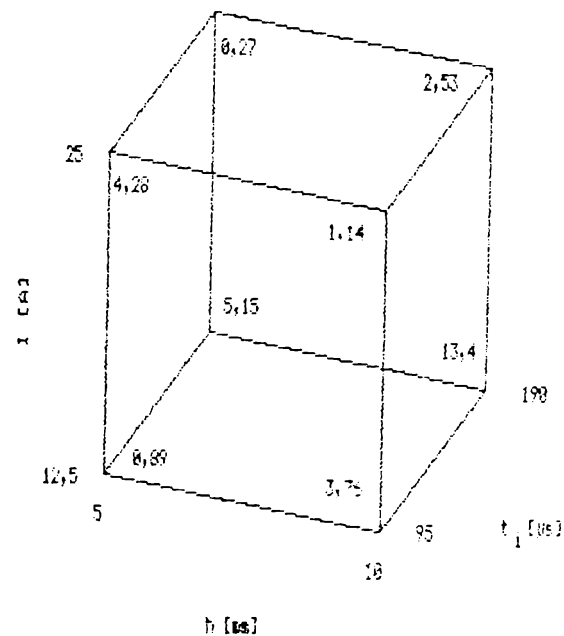
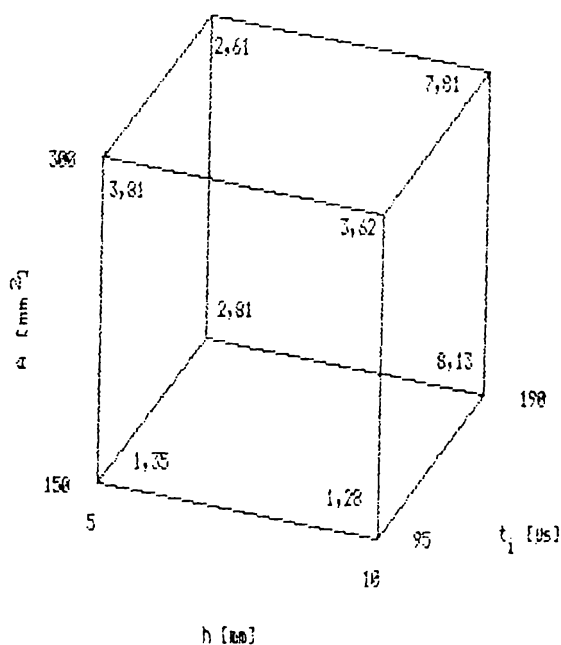


fig. 4.3. Cubul răspunsurilor $IP_3 = f(h, t_1, I)$

fig. 4.4. Cubul răspunsurilor $IP_3 = f(h, t_1, A)$

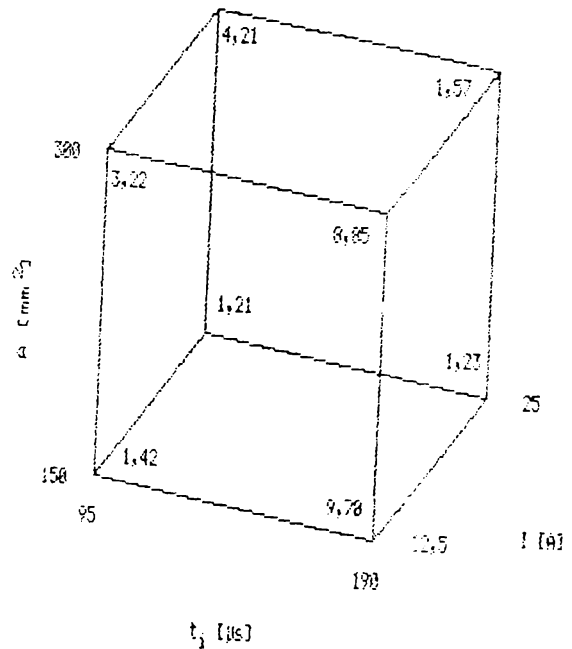
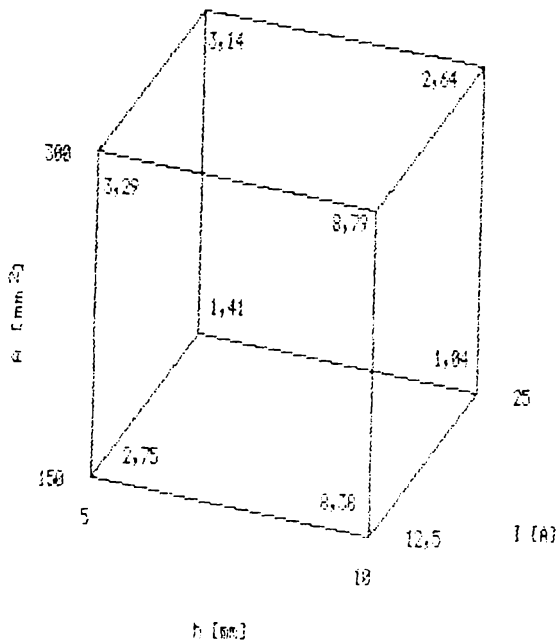


fig. 4.5. Cubul răspunsurilor $IP_3 = f(h, I, A)$ fig. 4.6. Cubul răspunsurilor $IP_3 = f(t_i, I, A)$

- scăderea IP_3 , de la $4,28 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $1,14 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = -73,36 \%$), dacă $I = 25 \text{ A}$ și $t_i = 95 \mu\text{s}$;
- creșterea IP_3 , de la $0,27 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $2,53 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = 837,03 \%$), dacă $I = 25 \text{ A}$ și $t_i = 190 \mu\text{s}$;
- creșterea duratei impulsului de curent, de la $95 \mu\text{s}$, la $190 \mu\text{s}$ (variație relativă $\Delta t_r = 100 \%$), conduce la:
 - creșterea IP_3 , de la $0,89 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $5,15 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = 478,65 \%$), dacă $I = 12,5 \text{ A}$ și $h = 5 \text{ mm}$;
 - creșterea IP_3 , de la $3,76 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $13,4 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = 256,38 \%$), dacă $I = 12,5 \text{ A}$ și $h = 10 \text{ mm}$;
 - scăderea IP_3 , de la $4,28 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $0,27 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = -93,69 \%$), dacă $I = 25 \text{ A}$ și $h = 5 \text{ mm}$;

- creșterea IP_3 , de la $1,14 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $2,53 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = 121,92 \%$), dacă $I = 25 \text{ A}$ și $h = 10 \text{ mm}$;

• creșterea amplitudinii impulsului de curent, de la $12,5 \text{ A}$, la 25 A (variație relativă $\Delta I_r = 100 \%$), conduce la:

- creșterea IP_3 , de la $0,89 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $4,28 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = 380,89 \%$), dacă $t_i = 95 \mu\text{s}$ și $h = 5 \text{ mm}$;

- scăderea IP_3 , de la $3,76 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $1,14 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = -229,82 \%$), dacă $t_i = 95 \mu\text{s}$ și $h = 10 \text{ mm}$;

- scăderea IP_3 , de la $5,15 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $0,27 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = -94,75 \%$), dacă $t_i = 190 \mu\text{s}$ și $h = 5 \text{ mm}$;

- scăderea IP_3 , de la $13,4 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$, la $2,53 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$ (variație relativă $\Delta IP_{3r} = -81,11 \%$), dacă $t_i = 190 \mu\text{s}$ și $h = 10 \text{ mm}$.

Valoarea cea mai mare a funcției obiectiv IP_3 ($13,4 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$), se găsește în colțul dreapta-spate-jos al cubului răspunsurilor, deci valorile parametrilor care conduc la optimizarea (maximizarea) funcției IP_3 , trebuie căutate în domeniul determinat de adâncimi de prelucrare mari, durate mari ale impulsului de curent și nivele scăzute de intensitate a curentului de lucru.

Urmând același raționament, pentru celelalte trei cuburi ale răspunsurilor, valorile maxime ale funcției IP_3 se găsesc în:

- colțul dreapta-spate-jos ($IP_3 = 8,13 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$), adică în domeniul determinat de adâncimi de prelucrare mari, durate mari ale impulsului de curent și arii mici ale suprafețelor prelucrate (fig. 4.4.);

- colțul dreapta-față-sus ($IP_3 = 8,79 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$), adică în domeniul determinat de adâncimi de prelucrare mari, nivele scăzute de intensitate a curentului de lucru și arii mari ale suprafețelor prelucrate (fig. 4.5.);

- colțul dreapta-față-jos ($IP_3 = 9,70 \text{ mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$), adică în domeniul determinat de durate mari ale impulsului de curent, nivele scăzute de intensitate a curentului de lucru și arii mici ale suprafeței prelucrate (fig. 4.6.).

Sintetizând cele patru grupe de informații, se poate afirma că indicatorul de performanță global IP_3 , are valori cu atât mai mari, cu cât adâncimea de prelucrare este mai mare, durata impulsului de curent este mai mare și, surprinzător, nivelul de intensitate a curentului de lucru este mai scăzut. În ceea ce privește aria suprafeței prelucrate, influența ei

asupra funcției IP_3 , nu este hotărâtoare: o creștere cu 100 % a ariei suprafeței prelucrate, conduce la o creștere cu 4,89 % (fig. 4.5.) sau o scădere cu 9,60 % (fig. 4.6.) a valorii IP_3 .

Aspecte asemănătoare se constată și în cazul studierii suprafețelor de răspuns, prezentate în fig. 3.24. ... fig. 3.26., respectiv în fig. 7.43. ... fig. 7.45., care reprezintă influența perechilor de factori asupra funcției obiectiv IP_3 . În domeniul adâncimilor mici de prelucrare, influența duratei impulsului de curent, asupra funcției IP_3 , este nesemnificativă, pe când în domeniul valorilor mari ale adâncimii de prelucrare, durata impulsului de curent are o influență direct proporțională, foarte puternică, asupra funcției IP_3 (fig. 3.24.). Suprafețele de răspuns determinate de perechile h, I și t, I , sunt de tip σ_a , prezentând mai multe maxime locale. Valorile cele mai ridicate ale funcției IP_3 , se regăsesc în cazul adâncimilor mari de prelucrare și nivelelor scăzute de intensitate a curentului de lucru (fig. 3.25.), respectiv, în cazul duratelor mari ale impulsurilor de curent, combinate cu valori mici ale curenților (fig. 3.26.).

În ceea ce privește influența ariei suprafeței prelucrate, se observă că, ea nu intervine hotărâtor în determinarea valorilor funcției IP_3 . O influență a ariei, cât de cât sesizabilă, asupra funcției IP_3 , se poate observa în domeniile valorilor mici ale adâncimii de prelucrare (fig. 7.43.) și ale duratei impulsului de curent (fig. 7.44.), domenii care, oricum, nu interesează din punctul de vedere al maximizării funcției obiectiv IP_3 .

La aceleași concluzii se ajunge studiind histograma efectelor pentru funcția obiectiv IP_3 , prezentată în fig. 3.14. Cea mai puternică influență asupra funcției IP_3 , o are interacțiunea t - I , urmată de factorul I . Influență semnificativă (materializată prin înălțimi ale dreptunghiurilor peste linia întreruptă) prezintă factorii t și h , precum și interacțiunile h - I și h - t . Restul interacțiunilor și factorul A nu au influență statistic semnificativă asupra indicatorului de performanță global IP_3 . Asteriscul situat în dreptul dreptunghiului, indică o influență invers proporțională a factorului sau a interacțiunii, asupra indicatorului. Astfel, creșterea valorică a funcției IP_3 , se obține prin creșterea valorilor factorilor h, t și A și scăderea valorii factorului I , concluzii, într-o totală concordanță cu cele rezultate din studierea cuburilor sau suprafețelor de răspuns.

Cum modelul polinomial, care aproximează funcția IP_3 , este liniar și precizia lui de estimare este bună ($R^2 > 90\%$), s-ar părea, în primă instanță, că modelul polinomial determinat descrie corect funcția și că ea nu atinge valori extreme. La o analiză mai atentă a rezultatelor, se poate observa, însă, că ecuația funcției obiectiv a fost construită pe baza valorilor determinate în punctele limită ale domeniilor de definiție ale fiecărei variabile.

Pentru a se aprecia curbura suprafeței de răspuns în zona centrală, de regulă, în plus față de determinările experimentale din punctele limită, se obișnuiește efectuarea, în centrul programului experimental, a unor măsurări replicare, având ca scop și determinarea reproductibilității măsurătorilor. Se compară între ele, valorile măsurate cu cele determinate cu ajutorul modelului găsit. Dacă între cele două categorii de valori există diferențe semnificative, rezultă o curbură accentuată a suprafeței de răspuns, situație în care se recomandă recurgerea la modele polinomiale de ordin superior. În caz contrar, modelul matematic polinomial de gradul I descrie adecvat suprafața de răspuns. În tab. 4.1. sunt redată comparativ valorile estimate ale celor 12 funcții, precum și media celor două valori observate în punctul central.

Valorile estimate și măsurate în punctul central, pentru cele 12 funcții obiectiv

tab. 4.1.

nr. crt.	funcția obiectiv	unitatea de măsură	valori estimate	valori observate	abatere relativă [%]
1.	Q_p	mm^3/min	59,68	63,723	6,77
2.	Q_e	mm^3/min	8,9645	6,3432	-29,24
3.	u_v	%	12,4266	7,8843	-36,55
4.	q_A	$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\text{A}$	4,1765	3,9804	-4,69
5.	q_u	$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%$	6,32762	12,5829	98,86
6.	IP_1	$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}$	0,902187	1,18843	31,72
7.	IP_2	$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}$	46,0089	40,2944	-12,42
8.	IP_3	$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\%\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$	3,93263	11,807	200,23
9.	R_a	μm	7,28187	7,75419	6,48
10.	s_L	μm	0,103	0,097	-5,82
11.	K	-	0,00345938	0,0015072	-56,43
12.	O_v	-	0,0156037	0,0155	-0,66

Ultima coloană a tab. 4.1. conține abaterea relativă a valorii măsurate față de cea estimată, definită ca o variație relativă procentuală. Se observă că, doar 3 (q_u , IP_3 și K) din cele 12 funcții obiectiv, prezintă abateri relative mai mari decât limita pe care am socotit-o ca fiind acceptabilă, 50 %.

De toate aceste observații s-a ținut cont în încercarea de optimizare a funcției obiectiv IP_3 , prin remodelare matematică, modelul matematic propus de această dată, nemi fiind liniar. Cum, în zona optimului (maximului), curbura suprafeței de răspuns este mult mai pronunțată, este necesară utilizarea unor polinoame de grad mai mare. Frecvent se utilizează polinoame de aproximare de gradul 2:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (4.1.)$$

care, în cazul a 4 factori de influență, vor avea forma:

$$\begin{aligned} y = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ & + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + \\ & + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2. \end{aligned} \quad (4.2.)$$

Este evident că, dacă funcția y admite un punct de extrem, atunci coordonatele acelui punct vor satisface ecuațiile ce conțin anularea derivatelor parțiale de ordinul I, în raport cu fiecare variabilă:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial y}{\partial x_2} = \frac{\partial y}{\partial x_3} = \frac{\partial y}{\partial x_4} = 0. \quad (4.3.)$$

Un experiment factorial complet, necesar modelării matematice, conține un număr de experiențe mult prea mare, dacă numărul factorilor este $k \geq 4$. Astfel, programul factorial complet EFC 3^k ar fi trebuit să conțină, în cazul celor 4 factori de influență, 81 de experiențe, ceea ce îl face foarte laborios și neeconomic. Metoda elaborată de Box și Wilson construiește un experiment cu un număr redus de experiențe [79.]:

$$N = N_m + N_0 + N_\alpha, \quad (4.4.)$$

unde N_m este numărul de experiențe din modelarea liniară prin program experiment factorial complet EFC 2^k sau experiment factorial fracționat EFF 2^{k-p} , N_0 este numărul de experiențe în centrul experimentului, iar N_α reprezintă numărul de experiențe distanțate cu α , față de centrul experimentului. Un astfel de program valorifică integral rezultatele cercetării din cadrul modelării liniare anterioare.

Plecând de la programul EFC 2^k (matricea de programare a experiențelor prezentată în tab. 3.14.), noul program pentru experimentul central compus va cuprinde un număr total de 26

($N_{ml} = 2^4 = 16$; $N_0 = 2$; $N_{\alpha} = 2 \cdot 4 = 8$; $N = 16 + 2 + 8 = 26$) de experiențe. Noua matrice program, cu valori naturale, este prezentată în tab. 4.2. Ultima coloană a tabelului prezintă valorile funcției obiectiv IP_3 .

Programul central compus, definit de tab. 4.2., a permis determinarea coeficienților de regresie din noua ecuație, cea de gradul 2. Astfel, în cazul concret al funcției obiectiv IP_3 , polinomul prezentat în ec. (4.2.), devine:

$$\begin{aligned} IP_3 = & -81,536 + 7,06977 \cdot h + 0,340902 \cdot t_i + 2,7564 \cdot I + 0,135001 \cdot A + \\ & + 0,0113484 \cdot h \cdot t_i - 0,096136 \cdot h \cdot I - 0,000174667 \cdot h \cdot A - 0,00695874 \cdot t_i \cdot I - \\ & - 0,000186596 \cdot t_i \cdot A + 0,000635733 \cdot I \cdot A - 0,434247 \cdot h^2 - 0,000754811 \cdot t_i^2 - \\ & - 0,0410955 \cdot I^2 - 0,00024763 \cdot A^2. \end{aligned} \quad (4.5.)$$

Cum, în acest caz, coeficientul de concordanță dintre valorile estimate și cele observate are o valoare mai mare decât pragul acceptat ($R^2 = 90,48 \% > 90 \%$), am considerat că ec. (4.5.) descrie adecvat suprafața reală de răspuns, situație demonstrată și de dreapta de concordanță, reprezentată în fig. 4.7.

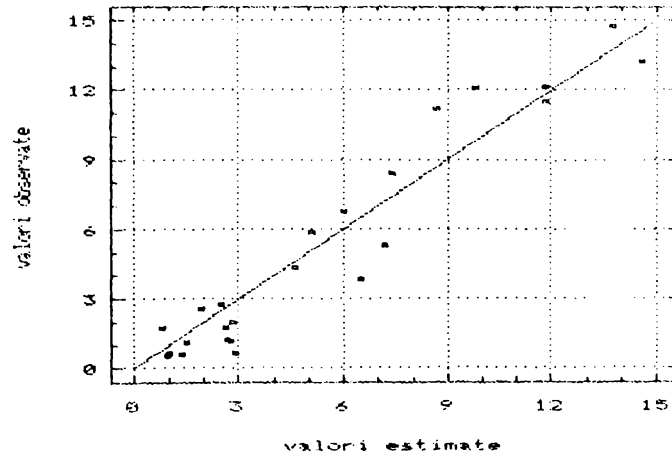


fig. 4.7. Concordanța modelului polinomial de gradul 2, pentru funcția obiectiv IP_3

Pentru a putea determina pe cale geometrică, optimul funcției IP_3 , este necesar ca, superspațiul pentadimensional (IP_3 , h , t_i , I și A), să fie divizat în spații euclidiene clasice, tridimensionale (IP_3 și câte doi factori de influență). Suprafețele de răspuns sunt redată în fig. 4.8. (IP_3 , h , t_i), fig. 4.10. (IP_3 , h , I), fig. 4.12. (IP_3 , h , A), fig. 4.14. (IP_3 , t_i , I), fig. 4.16. (IP_3 , t_i , A) și fig. 4.18. (IP_3 , I , A). Pentru o vizualizare mai clară, sub fiecare suprafață de răspuns, au fost redată, în fig. 4.9., fig. 4.11., fig. 4.13., fig. 4.15., fig. 4.17. și fig. 4.19., curbele de nivel

Matricea program pentru experimental central compus

tab. 4.2.

nr. crt	h [mm]	t _i [μs]	I [A]	A [mm ²]	IP ₃ [mm ³ /min·%·μm·mm·A]
1.	5	95	12,5	150	1,713
2.	10	95	12,5	150	2,016
3.	5	190	12,5	150	5,301
4.	10	190	12,5	150	13,328
5.	5	95	25	150	0,685
6.	10	95	25	150	0,869
7.	5	190	25	150	0,63
8.	10	190	25	150	2,725
9.	5	95	12,5	300	1,226
10.	10	95	12,5	300	4,353
11.	5	190	12,5	300	3,841
12.	10	190	12,5	300	14,748
13.	5	95	25	300	6,722
14.	10	95	25	300	2,584
15.	5	190	25	300	1,086
16.	10	190	25	300	1,185
17.	7,5	142,5	18,75	225	12,126
18.	7,5	142,5	18,75	225	11,488
19.	2,5	142,5	18,75	225	2,027
20.	12,5	142,5	18,75	225	1,711
21.	7,5	47,5	18,75	225	0,606
22.	7,5	237,5	18,75	225	11,22
23.	7,5	142,5	6,25	225	12,102
24.	7,5	142,5	31,25	225	0,506
25.	7,5	142,5	18,75	75	5,881
26.	7,5	142,5	18,75	375	8,426

constant, obținute prin secționarea suprafețelor de răspuns, cu plane paralelele cu planul determinat de factorii de influență.

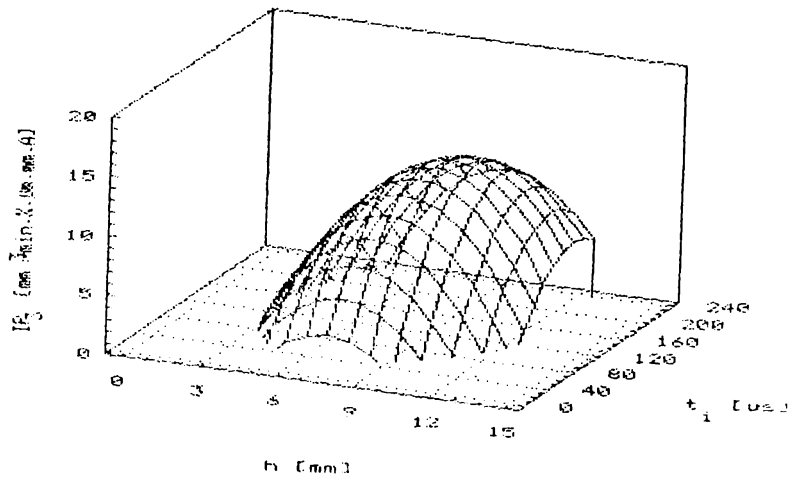


fig. 4.8. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(h, t_i)$ - model polinomial de grad 2

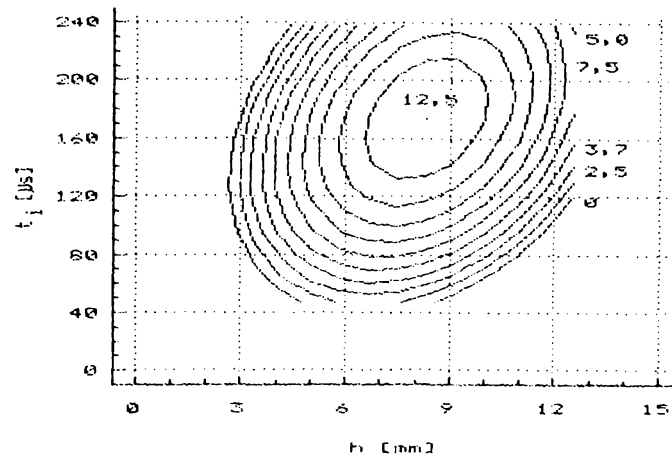


fig. 4.9. Curbe de nivel constant $IP_3 = f(h, t_i)$ - model polinomial de grad 2

Analizând datele din fig. 4.8. și fig. 4.9., se observă că, valoarea maximă a funcției obiectiv IP_3 , este situată în zona factorilor de influență, definită de valorile extreme 7 mm și 10 mm, pentru h , respectiv 140 μs și 210 μs , pentru t_i . Deci, pentru a maximiza funcția obiectiv IP_3 , este necesar ca $h_0 \in [7, 10]$ mm și $t_{i0} \in [140, 210]$ μs .

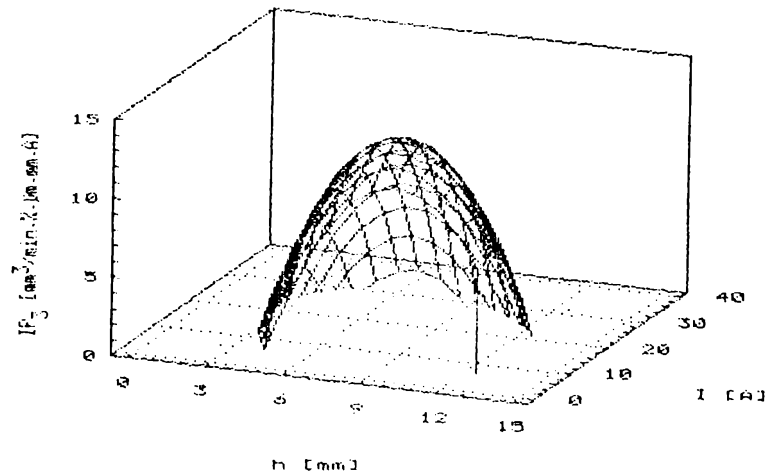


fig. 4.10. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(h, I)$ - model polinomial de grad 2

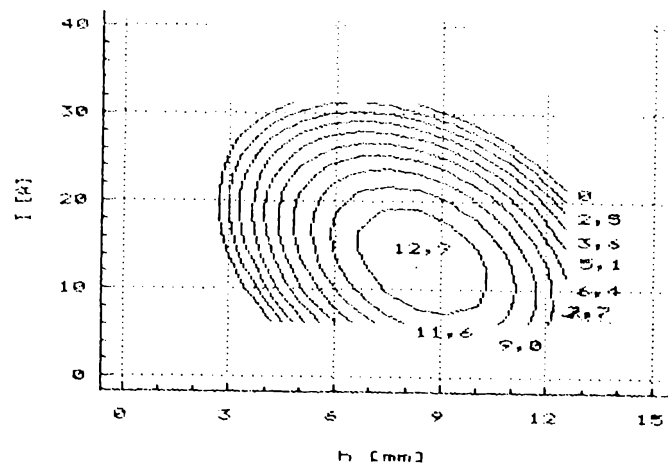


fig. 4.11. Curbe de nivel constant $IP_3 = f(h, I)$ - model polinomial de grad 2

Analizând în mod asemănător fig. 4.10. și fig. 4.11., se obțin intervalele care determină maximul funcției IP_3 , pentru perechea h și I : $h_0 \in [7, 10]$ mm și $I_0 \in [8, 20]$ A.

Din fig. 4.12. și fig. 4.13., rezultă domeniile de variație ale perechii $h - A$, pentru ca funcția obiectiv IP_3 să fie maximă: $h_0 \in [6, 10]$ mm și $A_0 \in [180, 300]$ mm².

Procedând la fel și în cazul ultimilor 3 perechi de factori se obțin următoarele domenii de variație: $t_0 \geq 160$ μ s și $I_0 \leq 16$ A (fig. 4.14. și 4.15.); $t_0 \in [130, 210]$ μ s și $A_0 \in [160, 300]$ mm² (fig. 4.16. și fig. 4.17.); $I_0 \in [9, 20]$ A și $A_0 \in [170, 300]$ mm² (fig. 4.18. și fig. 4.19.).

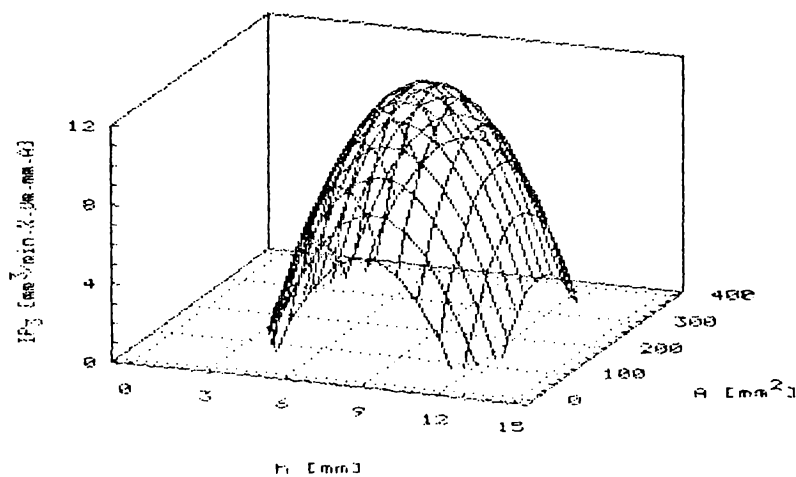


fig. 4.12. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(h, A)$ - model polinomial de grad 2

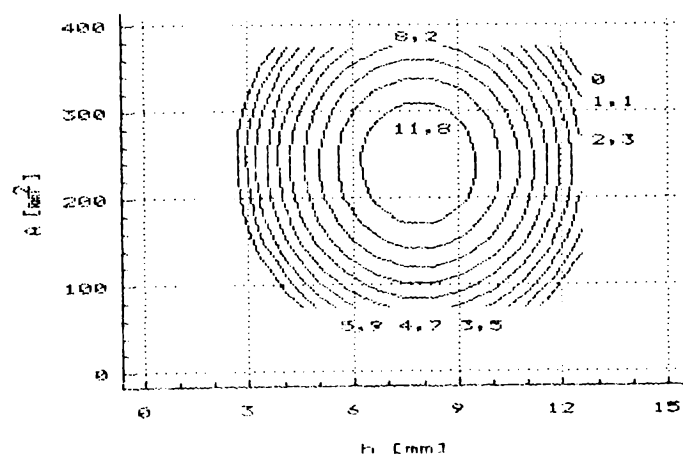


fig. 4.13. Curbe de nivel constant $IP_3 = f(h, A)$ - model polinomial de grad 2

Sintetizând cele șase grupe de restricții, se obține următoarea imagine:

- $h_0 \in [7, 10] \text{ mm}$; $h_0 \in [6, 10] \text{ mm}$; $h_0 \in [6, 10] \text{ mm} \Rightarrow h_0 \in [7, 10] \text{ mm}$;
- $t_{00} \in [140, 210] \mu\text{s}$; $t_{00} \geq 160 \mu\text{s}$; $t_{00} \in [130, 210] \mu\text{s} \Rightarrow t_{00} \in [160, 210] \mu\text{s}$;
- $I_0 \in [8, 20] \text{ A}$; $I_0 \leq 16 \text{ A}$; $I_0 \in [9, 20] \text{ A} \Rightarrow I_0 \in [9, 16] \text{ A}$;
- $A_0 \in [180, 300] \text{ mm}^2$; $A_0 \in [160, 300] \text{ mm}^2$; $A_0 \in [170, 300] \text{ mm}^2 \Rightarrow A_0 \in [180, 300] \text{ mm}^2$.

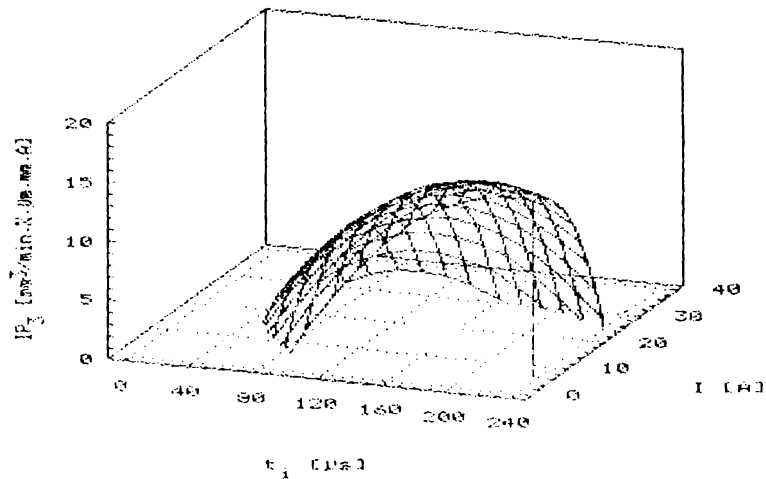


fig. 4.14. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(t_1, I)$ - model polinomial de grad 2

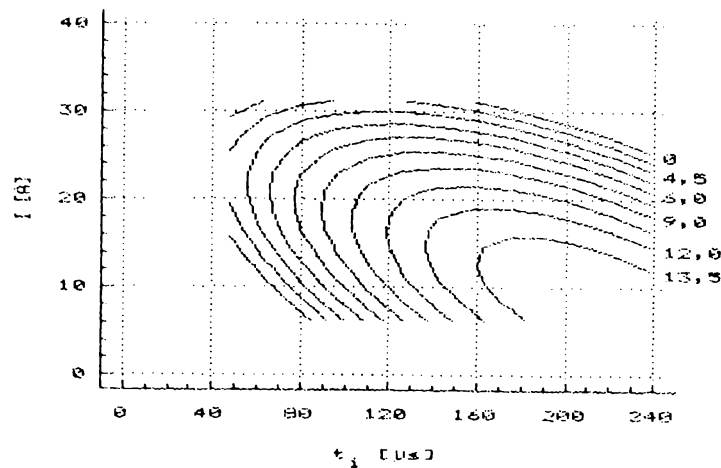


fig. 4.15. Curbe de nivel constant $IP_3 = f(t_1, I)$ - model polinomial de grad 2

Prin urmare, în cazul concret discutat, în situația în care se urmărește maximizarea indicatorului de performanță global IP_3 , se recomandă ca valorile factorilor de influență să fie situate în zonele determinate de intervalele: $h = 7 \dots 10$ mm, $t_1 = 160 \dots 210$ μ s, $I = 9 \dots 16$ A și $A = 180 \dots 300$ mm².

Dacă se iau în discuție doar parametrii impulsului electric, t_1 și I , evoluția alegerii domeniilor lor de variație, este prezentată în fig. 4.20.

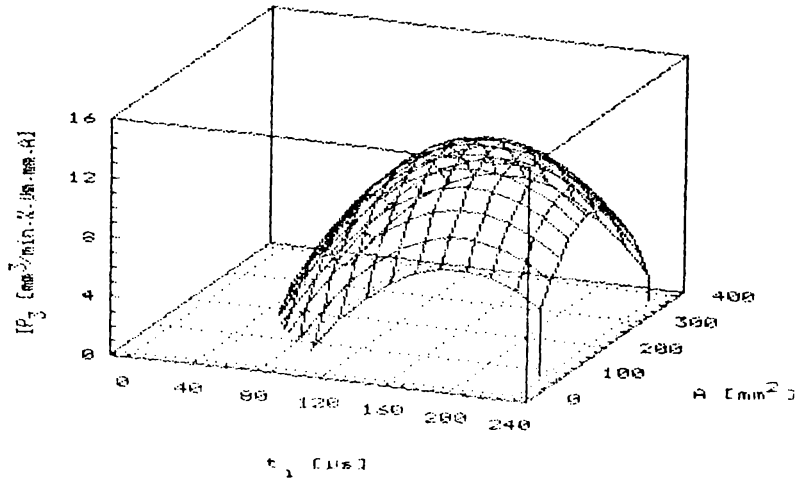


fig. 4.16. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(t_1, A)$ - model polinomial de grad 2

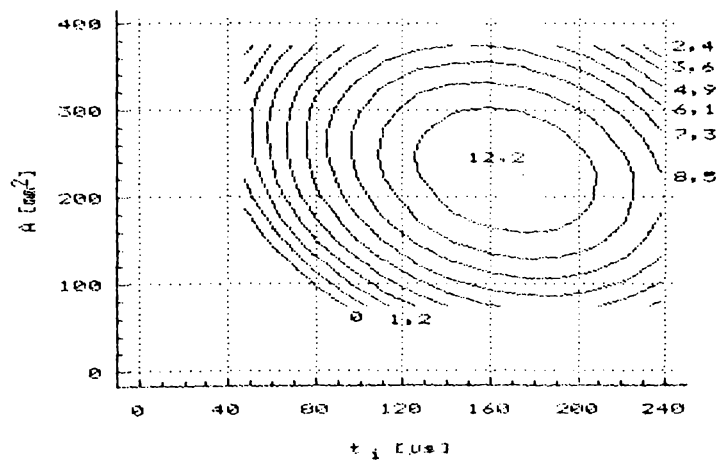


fig. 4.17. Curbe de nivel constant $IP_3 = f(t_1, A)$ - model polinomial de grad 2

Pe baza experienței anterioare s-au ales domeniile de variație ale celor doi parametri, $t_1 = 75 \dots 150 \mu s$ și $I = 10 \dots 20 A$, pentru faza premodelării (fig. 4.20. - linie subțire întreruptă), apoi, pentru faza modelării propriu-zise (fig. 4.20. - linie groasă întreruptă), domeniile de variație au fost ușor deplasate înspre valori mai mari, $t_1 = 95 \dots 190 \mu s$ și $I = 12,5 \dots 25 A$. Întrucât s-a dovedit că funcția obiectiv urmărită, indicatorul de performanță global IP_3

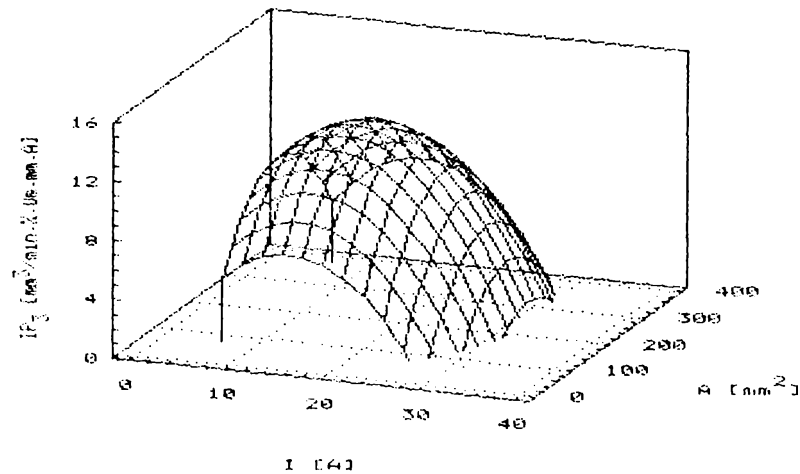


fig. 4.18. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(I, A)$ - model polinomial de grad 2

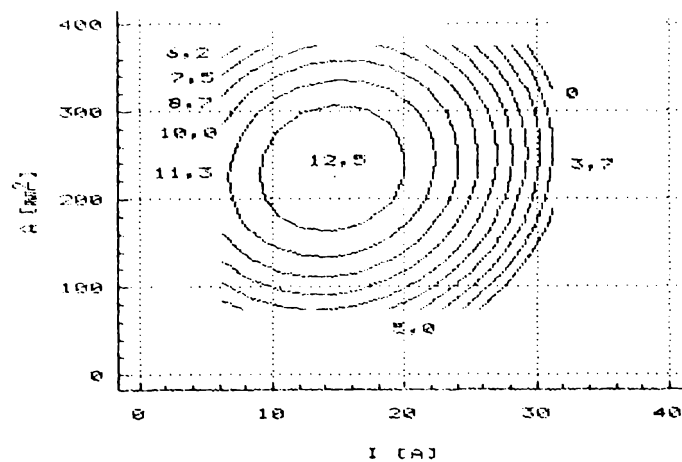


fig. 4.19. Curbe de nivel constant $IP_3 = f(I, A)$ - model polinomial de grad 2

nu a atins valori extreme în domeniul astfel definit, s-au extins domeniile de variație a celor doi parametri, în mod simetric, pentru fiecare în parte, $t_s = 47,5 \dots 237,5 \mu s$ și $I = 6,25 \dots 31,25$ A (fig. 4.20. - linie subțire continuă). În domeniul astfel extins, s-a putut determina domeniul de optim (fig. 4.20. - linie continuă groasă și suprafața hașurată), $t_s = 160 \dots 210 \mu s$ și $I = 9 \dots 16$ A, care asigură, pentru funcția obiectiv urmărită, optimul. Așa după cum s-a arătat în analiza efectuată la începutul acestui capitol, valorile care determină maximizarea funcției obiectiv

IP_3 , se găsesc în domeniul duratelor lungi de timp de impuls și al nivelelor scăzute de intensitate a curentului de lucru.

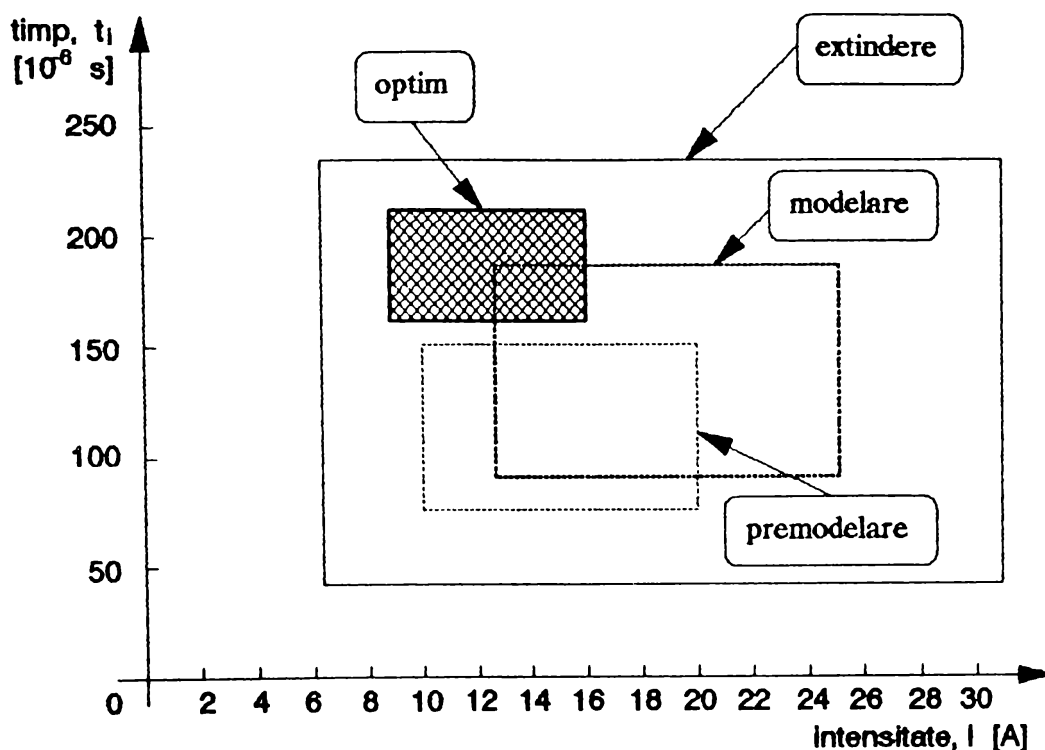


fig. 4.20. Domeniile de variație a duratei impulsului de curent și a intensității curentului

Din fig. 4.20. se observă că domeniul de optim este situat complet în afara domeniului din faza de premodelare și se suprapune doar în foarte mică măsură peste domeniul din faza modelării.

O analiză asemănătoare se poate face și în ceea ce privește domeniile de variație a caracteristicilor geometrice ale prelucrării, adâncimea de prelucrare, h și aria suprafeței prelucrate, A .

Din fig. 4.21. se poate observa că domeniile de variație a parametrilor geometrici, în faza premodelării și din cea a modelării propriu-zise, sunt identice. Această situație se datorează intenției experimentatorului de a folosi aceleași piese ca obiect de prelucrat, OP și aceleași electrozi, ca obiect de transfer al energiei, OT, în ideea diminuării cheltuielilor legate de fabricarea de noi piese și noi electrozi. Situația nu s-a mai putut repeta și în faza de optimizare a funcției obiectiv IP_3 , deoarece matricea program a experimentării, a impus extinderea în ambele sensuri a domeniilor de variație a celor două caracteristici geometrice.

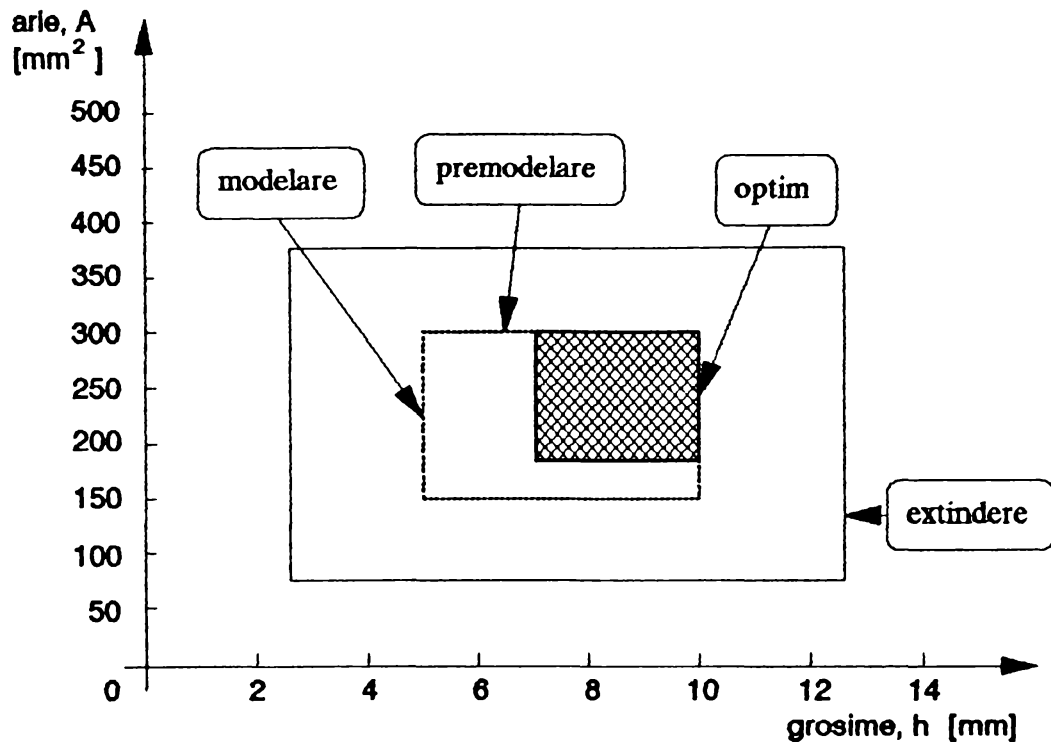


fig. 4.21. Domeniile de variație a adâncimii de prelucrare și a ariei suprafeței prelucrate

Cu toate acestea, în urma efectuării experimentului central compus, s-a dovedit faptul că, în ceea ce privește situația celor două caracteristici geometrice ale prelucrării, domeniul lor de optim este, de fapt, un subdomeniu al fazelor de premodelare și modelare, care la rândul lor, reprezintă un subdomeniu al extinderii.

4.1.1. Verificarea analitică și experimentală a rezultatelor optimizării

Odată determinate domeniile de variație a parametrilor care asigură maximizarea funcției obiectiv, se pune problema dacă, într-adevăr aceste valori conduc la optimizarea indicatorului de performanță global IP_3 . Pentru a avea confirmarea rezultatelor obținute în subcapitolul anterior, în cele ce urmează se va face, mai întâi, o verificare analitică și, apoi, o verificare experimentală a acestora.

Admițând că funcția obiectiv IP_3 admite un maxim, coordonatele acestuia trebuie să verifice condițiile exprimate de ec. (4.3.). Anulând, pe rând, derivatele parțiale în raport cu h , t_c , I și A , ale funcției IP_3 , definită prin ec. (4.5.), se obțin:

$$7,06977 + 0,0113484 \cdot t_c - 0,096136 \cdot I - 0,000174667 \cdot A - 0,868494 \cdot h = 0, \quad (4.6.)$$

$$0,340902 + 0,0113484 \cdot h - 0,00695874 \cdot I - 0,000186596 \cdot A - 0,001509622 \cdot t_c = 0, \quad (4.7.)$$

$$2,7564 - 0,096136 \cdot h - 0,00695874 \cdot t_c + 0,000635733 \cdot A - 0,082191 \cdot I = 0, \quad (4.8.)$$

$$0,135001 - 0,000174667 \cdot h - 0,000186596 \cdot t_c + 0,000635733 \cdot I - 0,00049526 \cdot A = 0, \quad (4.9.)$$

ecuații ce se constituie într-un sistem de 4 ecuații cu 4 necunoscute.

Rezolvând acest sistem, se obțin următoarele soluții: $h = 9,1487223$; $t_c = 202,09667$; $I = 14,359449$ și $A = 212,82403$.

Rotunjind valorile soluțiilor matematice, la valori posibil de obținut, constructiv și posibil de programat, tehnologic, se obține soluția problemei de optimizare propusă, determinarea valorilor factorilor de influență, astfel încât funcția obiectiv, indicatorul de performanță global IP_3 , să aibe valoarea maximă:

- $h_o = 9$ mm;
- $t_{c_o} = 200$ μ s;
- $I_o = 14$ A;
- $A_o = 210$ mm².

După cum se observă, aceste valori sunt cuprinse în domeniile optime, definite de fig. 4.20. și fig. 4.21.: $h_o = 9$ mm \in [7, 10] mm; $t_{c_o} = 200$ μ s \in [160, 210] μ s; $I_o = 14$ A \in [9, 16] A și $A_o = 210$ mm² \in [180, 300] mm².

Înlocuind aceste valori, în ec. (4.5.), se obține valoarea funcției IP_3 , ca fiind $IP_{3o} = 28,178$ mm³/min-% μ m \cdot mm \cdot A, valoare, într-adevăr maximă, față de celelalte valori obținute experimental, în punctele extreme ale domeniilor de definiție a variabilelor și în punctul central al experimentului.

Deci, din punct de vedere analitic, soluția problemei de optimizare este verificată: valorile determinate prin anularea derivatelor parțiale ale funcției obiectiv sunt cuprinse în domeniile de variație a factorilor, determinate experimental (prin secvența premodelare - modelare - extindere - optimizare), astfel încât funcția obiectiv să fie maximă.

Verificarea experimentală a soluției constă în programarea factorilor de influență cu valori cuprinse în domeniul de optim determinat și compararea valorilor astfel obținute, pentru funcția obiectiv IP_3 , cu valorile determinate anterior pe cale experimentală și cu cea obținută

pe cale analitică. Astfel, s-au selectat câte două valori pentru fiecare factor de influență, din domeniul de optim ($h_{o1} = 8$ mm, $h_{o2} = h_o = 9$ mm; $t_{o1} = 180$ μ s, $t_{o2} = t_o = 200$ μ s; $I_{o1} = 12$ A, $I_{o2} = I_o = 14$ A; $A_{o1} = A_o = 210$ mm², $A_{o2} = 270$ mm²), organizându-se un experiment care cuprinde toate combinațiile posibile ale celor 4 factori de influență. Una dintre valorile selectate este chiar valoarea care asigură, din punct de vedere analitic, maximum funcției obiectiv.

Matricea program a experimentului, precum și valorile funcției obiectiv IP_3 , în punctele din domeniul de maxim, sunt prezentate în tab. 4.3. Ordinea efectuării experiențelor a fost randomizată.

Matricea program pentru verificarea experimentală a punctului de optim al funcției IP_3
tab. 4.3.

nr. crt.	h [mm]	t _i [μ s]	I A	A mm ²	IP ₃ [mm ³ /min·%· μ m·mm·A]
1.	9	180	14	210	14,16
2.	8	180	12	210	19,036
3.	9	180	12	270	20,5
4.	9	200	12	210	16,698
5.	8	200	14	210	20,435
6.	9	180	14	270	17,891
7.	9	180	12	210	18,117
8.	8	200	12	210	16,133
9.	9	200	14	270	19,002
10.	8	200	12	270	19,938
11.	8	200	14	270	18,554
12.	8	180	12	270	19,214
13.	8	180	14	210	15,201
14.	9	200	12	270	19,804
15.	9	200	14	210	22,886
16.	8	180	14	270	17,123

Analizând datele din tab. 4.3. se constată aspectele prezentate în cele ce urmează.

Într-adevăr, cu o singură excepție, valorile funcției obiectiv IP_3 , determinate experimental cu mărimi ale factorilor de influență din domeniul de optim, sunt mai mari decât valorile aceleiași funcții, determinate cu mărimi ale factorilor de influență din domeniul inițial de variație. Acest lucru era de așteptat de-altfel, deoarece funcția obiectiv IP_3 este o funcție de maxim (valorile ei sunt cu atât mai bune cu cât sunt mai mari), iar domeniul de optim a fost determinat, atât analitic, cât și experimental.

Se confirmă faptul că cea mai mare valoare funcției obiectiv IP_3 a fost obținută în punctul de coordonate: $h_o = 9$ mm, $t_o = 180$ μ s, $I_o = 14$ A și $A_o = 210$ mm². Deoarece valorile funcției obiectiv se înscriu într-un domeniu relativ îngust (diferența relativă dintre cea mai mare valoare a funcției și cea mai mică valoare a ei, în domeniul de optim, este $\Delta IP_{3or} = 38,12$ %), este de așteptat ca suprafața de răspuns a funcției să nu prezinte o curbură foarte pronunțată în zona de optim.

Valorile funcției IP_3 , determinate experimental în zona optimului (tab. 4.3.), sunt consecvent mai mici decât valoarea maximă a funcției, determinată analitic, $IP_{3o} = 28,178$ mm³/min·%· μ m·mm·A. Posibile explicații ale acestei situații ar fi:

- A existat un decalaj foarte mare în timp (aprox. 8 luni), dintre momentul determinării zonei optimului și momentul verificării experimentale a datelor obținute. În acest timp, utilajul a fost folosit la alte experimentări, lichidul dielectric a suferit modificări față de starea inițială, iar generatorul de impulsuri a necesitat intervenții la partea electronică. Este, deci, foarte probabil că nu s-au putut crea situații de reproductibilitate a condițiilor de lucru, în cazul diferitelor experimente.

- Valoarea unui factor de influență (aria suprafeței prelucrate, A [mm²]), a fost determinată indirect, prin diametrul părții active a electrodului, d_e [mm]. Spre exemplu, o arie de 210 mm², impune un diametru, $d_e \approx 16,355913$ mm, iar aria de 270 mm², un diametru $d_e \approx 18,545863$ mm, valori care, evident, nu pot fi obținute practic.

- Valoarea funcției $IP_{3o} = 28,178$ mm³/min·%· μ m·mm·A, nu a fost determinată cu valorile matematice rezultate din sistemul de ecuații ($h = 9,1487223$; $t_i = 202,09667$; $I = 14,359449$ și $A = 212,82403$), ci cu valorile ce se pot obține constructiv sau tehnologic ($h_o = 9$ mm, $t_o = 180$ μ s, $I_o = 14$ A și $A_o = 210$ mm²).

- IP_3 fiind un indicator de performanță compus, rezultat din mai multe citiri ale aparatelor, măsurători și calcule efectuate, este posibil ca valorile sale reale să fie afectate de o anumită doză de incertitudine, determinată de o însumare statistică a erorilor specifice fiecărei faze.

4. 2. Optimizarea pe baza modelelor de decizii multiatribut

Alegerea variantei optime dintr-un număr finit de variante existente se face cu ajutorul modelelor de decizii multiatribut. În funcție de existența sau inexistența unor informații apriorice de care dispune decidentul în luarea hotărârii sale, deciziile multiatribut sunt de două categorii: cu informații și fără informații [7.], [34.].

În ceea ce privește modelele din prima categorie, informația de care dispune decidentul se poate referi la mulțimea variantelor luate în discuție sau la mulțimea criteriilor de apreciere a variantelor. Informația poate fi furnizată la diferite niveluri de complexitate.

Funcție de modul în care se obține varianta optimă, metodele de decizie multiatribut se clasifică în:

- metode directe, care obțin varianta optimă pe baza unei funcții definite pe mulțimea variantelor;

- metode indirecte, care determină o ierarhie a variantelor printr-un algoritim. Evident că, prima variantă din șirul de ordonare, reprezintă varianta optimă.

Indiferent de metoda de optimizare aleasă de decident, în etapa de predecizie este necesar a se face o selectare a mărimilor cu care se va lucra. În această etapă, decidentul alege variantele, le evaluează, elimină unele dintre acestea, adaugă altele noi, face experimentele, realizează măsurătorile, efectuează calculul. Rezultatul acestei etape este o listă de variante realizabile, de criterii de apreciere a variantelor și de cuantificări corespunzătoare.

Fie mulțimea finită de variante V_i ($i = 1 \dots m$):

$$V_i = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m\} \quad (4.10.)$$

și mulțimea finită de criterii C_j ($j = 1 \dots n$), cu ajutorul cărora se evaluează variantele:

$$C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_n\}. \quad (4.11.)$$

Se definesc vectorii a_j , ca rezultat al evaluării fiecărei variante V_i în raport cu fiecare criteriu C_j . Cu ajutorul acestori mărimi se construiește așa-numita matrice a consecințelor, A , în care vectorii a_j formează elementele matricii:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{r1} & a_{r2} & \dots & a_{rn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}. \quad (4.12.)$$

Matricea A se construiește având elementele a_{ij} aranjate pe linie după criteriul i , și pe coloană, după variante.

Există două categorii de criterii: de maxim, ale căror valori sunt cu atât mai bune, cu cât sunt mai mari și criterii de minim, ale căror valori sunt cu atât mai bune, cu cât sunt mai mici. Din alt punct de vedere, criteriile pot fi cantitative și calitative. Criteriile cantitative se exprimă prin numere și unități de măsură, pe când cele calitative, prin calificative. Pentru a se putea compara între ele diferitele criterii neomogene, este necesară omogenizarea lor, operație denumită "scalare". Cel mai des utilizat tip de scalare este așa-numita "normalizare", prin care matricea consecințelor, A , este transformată într-o nouă matrice, normalizată, R , cu elemente r_{ij} cuprinse în intervalul $(0, 1)$ sau intervalul $(0, 1]$. Se cunosc mai multe metode de normalizare, cele mai utilizate fiind:

- normalizarea vectorială, cu $r_{ij} \in (0, 1)$:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}, \quad (4.13.)$$

pentru criteriile de maxim și

$$r_{ij} = 1 - \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}, \quad (4.14.)$$

pentru criteriile de minim, respectiv

- normalizare liniară, cu $r_{ij} \in (0, 1]$:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{j_{\max}}}, \quad (4.15.)$$

pentru criteriile de maxim și

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{a_{ij}}}{\frac{1}{a_{ij_{\max}}}} = \frac{a_{ij_{\max}}}{a_{ij}}, \quad (4.16.)$$

pentru criteriile de minim.

Și criteriile calitative se pot omogeniza. Este necesară transformarea acestora în criterii cantitative, printr-o scalare ordinală. În general, pentru criteriile calitative, cu calificative pe cinci niveluri, se punctează în felul următor: foarte bun \leftrightarrow 9, bun \leftrightarrow 7, mediu \leftrightarrow 5, rău \leftrightarrow 3 și foarte rău \leftrightarrow 1. Utilizând relațiile din ec. (4.13.) și (4.14.) sau (4.15.) și (4.16.), noua matrice normalizată va avea forma:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{1j} & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{2j} & r_{2n} \\ \dots & \dots & & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & r_{ij} & r_{in} \\ \dots & & & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{mj} & r_{mn} \end{pmatrix}. \quad (4.17.)$$

Odată stabilită terminologia, în cele ce urmează se propune alegerea variantei optime, dintr-un număr de 4 variante de prelucrare a unui orificiu perforat, într-un disc de oțel, prin eroziune electrică cu electrod masiv. Condițiile de lucru sunt prezentate în fig. 4.22. și tab. 4.4.

Definiția variantelor de prelucrare a orificiului perforat

tab. 4.4.

variante V_i	regim de lucru	natură material electrod	mișcare electrod	tip de spălare a interstițiului
V_1	degroșare	cupru	liniară	injecție
V_2	degroșare + finisare	cupru	liniară	injecție
V_3	degroșare	oțel	liniară	liberă
V_4	degroșare	cupru	liniară + circulară	injecție

Cele 4 variante sunt evaluate în raport cu 6 criterii de apreciere:

- C_1 - durata prelucrării [min] - criteriu cantitativ de minim;
- C_2 - consumul energetic al instalației [10^5 J] - criteriu cantitativ de minim;

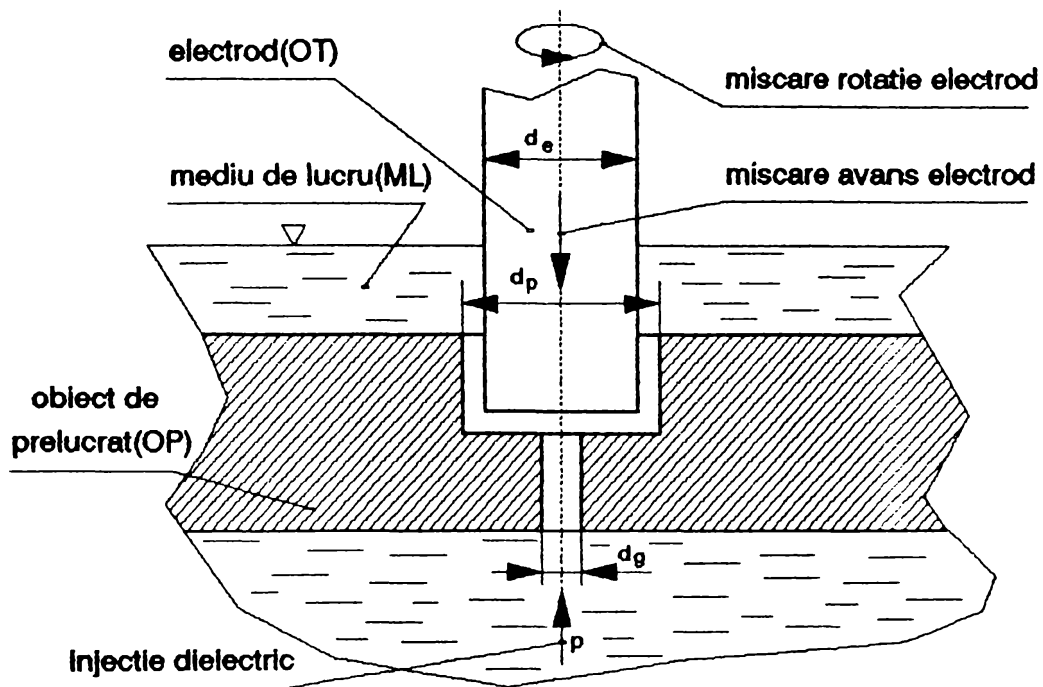


fig. 4.22. Schema de prelucrare prin eroziune electrică a orificiului perforat

- C_3 - investiția inițială [-] - criteriu calitativ de minim;
- C_4 - precizia dimensională a prelucrării [-] - criteriu calitativ de maxim;
- C_5 - abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate [μm] - criteriu cantitativ de minim;
- C_6 - stabilitatea procesului de prelucrare [-] - criteriu calitativ de maxim.

Matricea consecințelor a fost construită pe baza datelor cuprinse în [131.], completate de un set de programe experimentale [96.], [99.], [100.], [101.], [105.], [108.], [110.], [111.]:

$$A = \begin{pmatrix} 12,25 & 33,05 & \text{medie} & \text{medie} & 6,56 & \text{mare} \\ 20,33 & 38,88 & \text{medie} & \text{mare} & 3,21 & \text{mare} \\ 18,2 & 46,4 & \text{mica} & \text{medie} & 5,84 & \text{mica} \\ 11,75 & 32,08 & \text{medie} & \text{f.mare} & 7,17 & \text{mare} \end{pmatrix} \quad (4.18.)$$

Utilizând relațiile de scalare liniară din ec. (4.15.) și (4.16.), matricea normalizată va avea forma:

$$R = \begin{pmatrix} 0,96 & 0,97 & 0,6 & 0,56 & 0,49 & 1 \\ 0,58 & 0,83 & 0,6 & 0,78 & 1 & 1 \\ 0,65 & 0,69 & 1 & 0,56 & 0,55 & 0,43 \\ 1 & 1 & 0,43 & 1 & 0,45 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.19.)$$

Alegerea celei mai bune variante de perforare prin eroziune electrică cu electrod masiv se va face utilizând mai multe metode de optimizare [7.], [105.].

2.2.1. Modele de decizii multiatribut fără informații

Metodele de decizii multiatribut fără informații [105.], [111.], rezolvă problemele de optimizare în care decidentul nu se află în posesia unor informații referitoare la faptul că unele variante sunt preferate altora sau unele criterii sunt preferate altor criterii. Se cunosc patru astfel de metode: metoda dominanței, metoda maximin, metoda maximax, precum și procedura Hurwicz a ultimelor două.

Metoda dominanței

O variantă V_i este dominată, dacă există o altă variantă V_j și cel puțin un k , $k \in \{1, 2, \dots, n\}$, astfel încât $r_{ik} < r_{jk}$ și $r_{il} \leq r_{jl}$, pentru toți $l \neq k$. Pornind de la matricea consecințelor sau de la cea normalizată, se elimină toate variantele dominate. Mulțimea variantelor care rămân (variantele nedominate), constituie soluția problemei.

Din matricea (4.19.), se observă că nici una dintre variante nu este dominată de către celelalte. Spre exemplu, varianta V_1 domină varianta V_2 , în criteriile C_1 și C_2 , este egală cu V_2 în criteriile C_3 și C_6 și este dominată de către V_2 , în criteriile C_4 și C_5 .

Toate combinațiile posibile de perechi de variante conduc la aceeași concluzie. Prin urmare, utilizând metoda dominanței, soluția problemei de optimizare este constituită din mulțimea tuturor celor patru variante:

$$V_0 = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} \quad (4.20.)$$

Metoda maximin

Această metodă selectează drept soluție a problemei, acea variantă, care este cea mai bună, în raport cu criteriul în care evaluarea sa este cea mai nefavorabilă. Deci, varianta cea mai bună va fi:

$$V_0 = \left\{ V_i \left| \max_i \min_j (r_{ij}) \right. \right\}. \quad (4.21.)$$

Plecând de la matricea normalizată (4.19.), evaluările cele mai defavorabile, pentru fiecare criteriu sunt:

- pentru varianta V_1 : $r_{14} = 0,56$ (în criteriul C_4);
- pentru varianta V_2 : $r_{21} = 0,58$ (în criteriul C_1);
- pentru varianta V_3 : $r_{36} = 0,43$ (în criteriul C_6);
- pentru varianta V_4 : $r_{43} = 0,43$ (în criteriul C_3).

Prin urmare, $\max_i \min_j (r_{ij}) = r_{21} = 0,58$ și, deci, varianta optimă va fi:

$$V_0 = \{V_2\}. \quad (4.22.)$$

Metoda maximax

Varianta care are evaluarea cea mai favorabilă în criteriul cel mai bun, reprezintă soluția problemei, după această metodă. Deci, varianta optimă va fi:

$$V_0 = \left\{ V_i \left| \max_i \max_j (r_{ij}) \right. \right\}. \quad (4.23.)$$

Plecând tot de la matricea normalizată (4.19.), evaluările cu valoarea cea mai mare, pentru fiecare criteriu, sunt:

- pentru varianta V_1 : $r_{16} = 1$ (în criteriul C_6);
- pentru varianta V_2 : $r_{25} = r_{26} = 1$ (în criteriile C_5 și C_6);
- pentru varianta V_3 : $r_{33} = 1$ (în criteriul C_3);
- pentru varianta V_4 : $r_{41} = r_{42} = r_{44} = r_{46} = 1$ (în criteriile C_1, C_2, C_4 și C_6).

Prin urmare, în cazul considerat, această metodă nu elimină nici o variantă, toate cele patru variante reprezentând soluția problemei de optimizare:

$$V_0 = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}. \quad (4.24.)$$

Metoda Hurwicz

Această metodă selectează drept soluții ale problemei, cele care îndeplinesc condiția:

$$V_0 = \left\{ V_i \left| \max_j \left[\alpha \min(r_{ij}) + (1 - \alpha) \max_j(r_{ij}) \right] \right. \right\}, \quad (4.25.)$$

unde $\alpha \in [0, 1]$ este denumit coeficient de optimism, exprimând gradul de optimism al decidentului. Cu cât α este mai mare, mai apropiat de 1, cu atât optimismul decidentului este mai mare.

La limită, pentru un pesimist convins, $\alpha = 0$, ec. (4.25.) devine:

$$V_0 = \left\{ V_i \left| \max_j \left[0 \min(r_{ij}) + (1 - 0) \max_j(r_{ij}) \right] \right. \right\} = \left\{ V_i \left| \max_j \max(r_{ij}) \right. \right\}, \quad (4.26.)$$

iar, pentru un optimist incorijibil, $\alpha = 1$, ec. (4.25.) devine:

$$V_0 = \left\{ V_i \left| \max_j \left[1 \min(r_{ij}) + (1 - 1) \max_j(r_{ij}) \right] \right. \right\} = \left\{ V_i \left| \max_j \min(r_{ij}) \right. \right\}. \quad (4.27.)$$

Se observă că ec. (4.26.) și (4.27.) sunt identice cu ec. (4.23.) și (4.21.). Deci procedura Hurwicz cu grad maxim de optimism este, de fapt, metoda maximin, iar cea cu grad minim de optimism, este metoda maximax.

Întrucât, în situația dată, se întâlnește cazul particular că $\max_j(r_{ij}) = 1$ la toate variantele, indiferent de gradul de optimism, pentru $\alpha \in [0, 1]$, varianta optimă va fi:

$$V_0 = \{V_2\}, \quad (4.28.)$$

deci, identică cu varianta optimă determinată cu metoda maximin și obținută cu ec. (4.22.). În cazul $\alpha = 1$, varianta optimă este:

$$V_0 = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}, \quad (4.29.)$$

aceeași cu cea obținută cu metoda maximax, utilizând ec. (4.24.).

Ceea ce pare curios, este faptul că, pesimistul s-a hotărât în a selecta varianta V_2 drept variantă optimă, pe când optimistul nu se poate decide asupra celor patru variante, toate fiind socotite, în mod egal, variante optime.

4.2.2. Modele de decizii multiatribut cu informații asupra criteriilor

O clasificare [7.], [34.] a diferitelor metode multiatribut cu informații asupra criteriilor este prezentată în fig. 4.23.

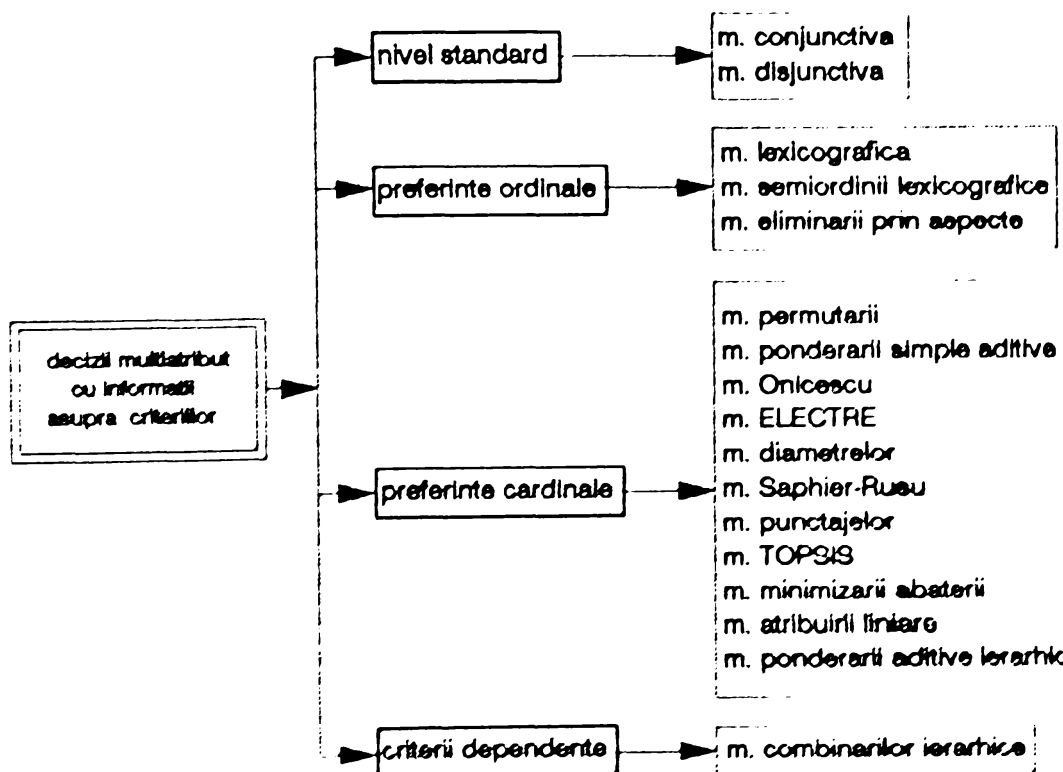


fig. 4.23. Clasificarea modelelor de decizii multiatribut cu informații asupra variantelor

Din fig. 4.23 se observă că informațiile asupra criteriilor pot fi furnizate la patru niveluri de complexitate:

informații furnizate sub forma nivelurilor standard,

informații furnizate sub forma preferințelor ordinale,

- informații furnizate sub forma preferințelor cardinale;
- informații furnizate sub forma ratelor marginale de substituire.

4.2.2.1. Modele cu informații exprimate prin niveluri standard

La aceste metode, [105.], [111.] decidentul nu are informații asupra variantelor, dar posedă informații asupra criteriilor, însă la un nivel foarte scăzut: doar la nivel standard. În rezolvarea problemei de optimizare, matricei consecințelor și matricei normalizate li se adaugă vectorul nivelurilor standard, v_s :

$$v_s = (v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0j}, \dots, v_{0n}). \quad (4.30.)$$

Metodele din această categorie elimină variantele care nu ating valorile standard, variantele rămase constituind soluția problemei.

Metoda conjunctivă

Considerând matricea consecințelor, A și vectorul valorilor standard, v_s , se elimină acele variante care au proprietatea:

$$a_{ij} < v_{0j}, \quad (4.31.)$$

cu $j = 1, 2, \dots, n$.

Fie vectorul standard:

$$v_s = (18,5;40;mediu;mediu;6,6;mediu). \quad (4.32.)$$

Singura variantă care atinge toate nivelurile standard, în toate criteriile, este V_1 . Varianta V_2 nu atinge valorile standard în criteriul C_1 , varianta V_3 , în criteriile C_2 și C_6 , iar varianta V_4 , în criteriile C_3 și C_5 . Prin urmare, varianta optimă este:

$$V_0 = \{V_1\}. \quad (4.33.)$$

Metoda disjunctivă

Această metodă selectează acele variante, pentru care există cel puțin un $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, astfel încât $a_{ij} \geq a_{0j}$, deci, acele variante, care, în toate criteriile, ating cel puțin un nivel

standard. Evident că, această metodă, în raport cu precedenta, impune drept variantă optimă, o soluție mai puțin pretențioasă, dacă vectorul standard rămâne nemodificat.

Fie, de această dată, vectorul standard:

$$v_s = (15,45; f.mica; mare; 4,8; mare). \quad (4.34.)$$

În această situație, se elimină varianta V_3 , deoarece nu atinge valorile standard în nici unul dintre criterii. Cele trei variante rămase constituie soluția problemei:

$$V_0 = \{V_1, V_2, V_4\}. \quad (4.35.)$$

4.2.2.2. Modele cu informații exprimate prin preferințe ordinale

Aceste metode [105.], [110.] presupun faptul că decidentul este în posesia unor informații privind criteriile, la un nivel superior metodelor din categoria anterioară: este cunoscută ordinea importanței criteriilor, fără a se cunoaște, însă, intensitatea preferințelor. Informația este furnizată sub forma unui vector, p_0 :

$$p_0 = (p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0j}, \dots, p_{0m}), \quad (4.36.)$$

unde $(p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0m})$ este o permutare a mulțimii $\{1, 2, \dots, m\}$. Componenta p_j exprimă locul pe care se găsește criteriul C_j , în raport cu preferința.

Metoda lexicografică

Fiind dați matricea consecințelor, A și vectorul de importanță ordinală, p_0 , se selectează mulțimea variantelor care satisfac la maximum cel mai important criteriu, C^1 :

$$V^1 = \left\{ V_i \mid a_i^* = \max_{1 \leq k \leq m} (a_k^*) \right\}. \quad (4.37.)$$

Dacă mulțimea V^1 are un singur element, acesta reprezintă soluția problemei. Dacă are mai multe elemente, se selectează, în continuare, dintre cele rămase, acele variante, care satisfac la maxim al doilea criteriu, în ordinea importanței, C^{**} :

$$V^2 = \left\{ V_i \in V^1 \mid a_i^{**} = \max_{k \in I} (a_k^{**}) \right\}. \quad (4.38.)$$

Astfel se continuă procedura, care se oprește în două situații:

- când mulțimea V^k are un singur element, care constituie soluția problemei;

• când se epuizează toate criteriile, în ordinea importanței lor, caz în care, elementele ultimei mulțimi, V^m , se constituie în soluția problemei.

Fie vectorul de importanță ordinală, p_0 :

$$p_0 = (2; 3; 1; 5; 4; 6), \quad (4.39.)$$

deci, ordinea importanței criteriilor este $C_3, C_1, C_2, C_5, C_4, C_6$, cel mai important criteriu fiind C_3 . Cum acest criteriu este un criteriu calitativ de minim, varianta care îl satisface la maxim este V_3 . Deci,

$$V^1 = \{V_3\}, \quad (4.40.)$$

iar cum mulțimea V^1 are un singur element, V_3 , aceasta reprezintă și soluția problemei:

$$V_0 = \{V_3\}. \quad (4.41.)$$

Metoda semiordinii lexicografice

Această metodă este o variantă a metodei lexicografice. Se presupune cunoscut un vector al variațiilor ne semnificative, ε :

$$\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_j, \dots, \varepsilon_m), \quad (4.42.)$$

unde ε_j este valoarea variației ne semnificative pentru criteriu C_j .

Se consideră ca echivalente în raport cu un anumit criteriu, variantele care diferă ne semnificativ în raport cu acesta. Și această metodă construiește, ca și metoda lexicografică, mulțimea de variante $V^1, V^2, \dots, V^k, \dots, V^n$, definirea lor fiind, însă, diferită:

$$V^1 = \{V_i \mid i \in I_1\}, \quad (4.43.)$$

unde

$$I_1 = \left\{ i \mid a_i^* = \max_j (a_j^*) \vee a_i^* - a_j^* < \varepsilon^* \right\}, \quad (4.44.)$$

ε^* fiind variația ne semnificativă a evaluării variantei V_i în raport cu cel mai important criteriu, C^* .

În mod asemănător se definește V^2 :

$$V^2 = \{V_i \in V^1 \mid i \in I_2\}, \quad (4.45.)$$

unde

$$I_2 = \left\{ j \mid a_i^{\bar{}} = \max_j (a_j^{\bar{}}) \vee a_i^{\bar{}} - a_j^{\bar{}} < \varepsilon^{\bar{}} \right\}, \quad (4.46.)$$

$\varepsilon^{\bar{}}$ fiind variația nesemnificativă a evaluării variantei V_i în raport cu cel de-al doilea criteriu, în ordinea importanței, $C^{\bar{}}$.

Se consideră matricea consecințelor, în care criteriile calitative au fost scalate liniar, A_s , echivalentă cu matricea consecințelor, A :

$$A_s = \begin{pmatrix} 12,25 & 33,05 & 5 & 5 & 6,56 & 7 \\ 20,33 & 38,88 & 5 & 7 & 3,21 & 7 \\ 18,2 & 46,4 & 3 & 5 & 5,84 & 3 \\ 11,75 & 32,08 & 7 & 9 & 7,17 & 7 \end{pmatrix}. \quad (4.47.)$$

Fie vectorul de importanță ordinală, p_0 , identic cu cel definit la metoda lexicografică prin ec. (4.39.) și vectorul variațiilor nesemnificative, ε :

$$\varepsilon = (6; 8; 3; 0; 2; 0). \quad (4.48.)$$

Cel mai important criteriu fiind criteriul calitativ de minim C_3 , varianta care îl satisface la maxim este V_3 , dar, întrucât diferențele evaluării variantelor V_1 și V_2 în raport cu criteriul C_3 sunt nesemnificative ($5 - 3 = 2 < 3$), prima selecție oferă variantele:

$$V^1 = \{V_1, V_2, V_3\}. \quad (4.49.)$$

Al doilea criteriu, în ordinea importanței, C_1 , este satisfăcut la maxim, dintre variantele rămase, de către varianta V_1 . Acesteia i se adaugă și varianta V_3 , deoarece diferența dintre evaluările variantelor V_3 și V_1 este nesemnificativă ($18,2 - 12,25 = 5,95 < 6$), pe când diferența dintre evaluările variantelor V_2 și V_1 , fiind semnificativă ($20,33 - 12,25 = 8,08 > 6$), elimină varianta V_2 :

$$V^2 = \{V_1, V_3\}. \quad (4.50.)$$

Al treilea criteriu ca importanță, C_2 , elimină varianta V_3 , deoarece diferența dintre evaluările variantelor în criteriul C_2 , este semnificativă ($46,4 - 33,05 = 13,35 > 8$):

$$V^3 = \{V_1\}. \quad (4.51.)$$

Întrucât, mulțimea V^3 conține un singur element, acesta va reprezenta soluția problemei:

$$V_0 = \{V_1\}. \quad (4.52.)$$

4.2.2.3. Modele cu informații exprimate prin preferințe cardinale

În această categorie de modele de decizie [100.], informațiile pe care le deține decidentul sunt exprimate nu numai prin preferințe ordinale, ci se cunoaște intensitatea acestor preferințe, sub formă cardinală. Importanța criteriilor este dată sub forma unui vector p :

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_m) \quad (4.53.)$$

cu $p_j \in [0, 1]$ și cel puțin un $p_j \neq 0$.

De obicei, elementele vectorului p se aleg de astfel încât:

$$\sum_{j=1}^m p_j = 1 \quad (4.54.)$$

Metodele acestei categorii de decizii se pot grupa în trei clase (fig. 4.24.):

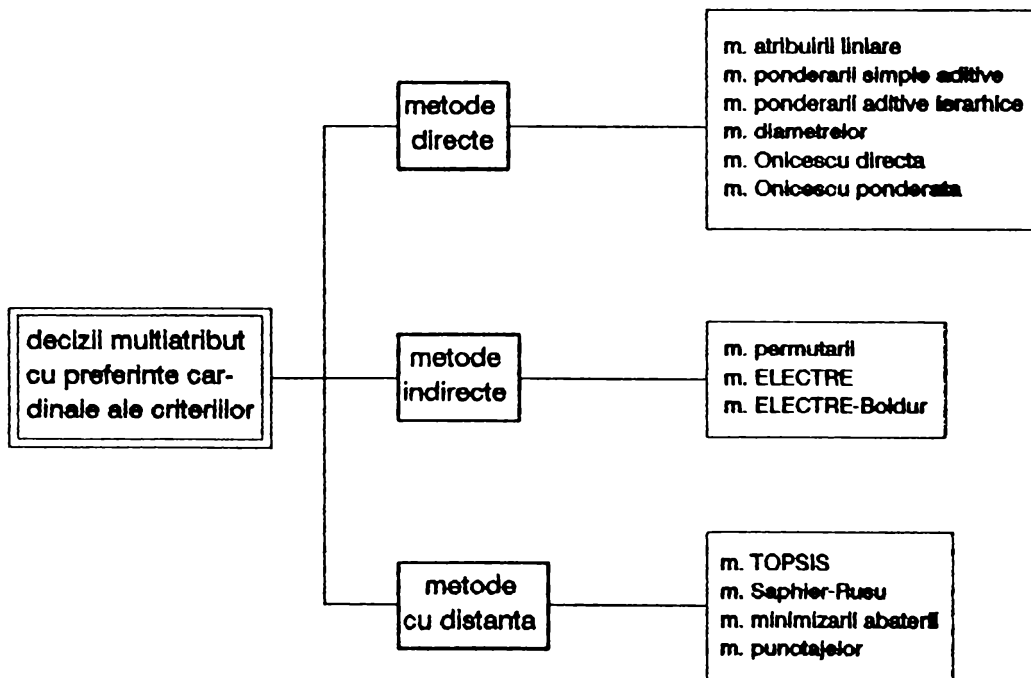


fig. 4.24. Clasificarea modelelor de decizii multiatribut cu preferințe cardinale ale criteriilor

a) metode directe [96.], [105.], care construiesc o funcție de utilitate, definită pe mulțimea variantelor, cu valori reale și care selectează drept variantă optimă, acea variantă, pentru care funcția de utilitate ia valoarea maximă. Astfel de metode sunt: metoda ponderării simple aditive, metoda ponderării aditive ierarhice, metoda diametrelor, metodele Onicescu etc;

b) metode indirecte, care determină o ierarhie a mulțimii variantelor, pe baza unui algoritm. Astfel de metode sunt metoda permutării [108.] și metodele Electre, cu diferitele versiuni ale acestora: Electre I, Electre II, Electre-Boldur etc;

c) metode ce utilizează distanțele în construirea ierarhiilor, care selectează varianta optimă, ca fiind cea mai apropiată de soluția ideală. Astfel de metode sunt: metoda minimizării abaterilor, metoda TOPSIS, metoda Saphier-Rusu, metoda punctajelor etc.

Metoda ponderării simple aditive

Se definește funcția $f: V \rightarrow R_+$, a cărei expresie analitică este [38.]:

$$f(V_i) = \frac{\sum_{j=1}^n p_j r_{ij}}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (4.55.)$$

Fie vectorul de importanță cardinală, p :

$$p = (0,25; 0,2; 0,3; 0,1; 0,1; 0,05). \quad (4.56.)$$

Considerând matricea normalizată, R (4.19.) și vectorul de importanță cardinală, p (4.56.), se construiește noua matrice ponderată, W , ale cărei elemente, w_{ij} , se obțin cu relația:

$$w_{ij} = p_j r_{ij}. \quad (4.57.)$$

Matricea ponderată, W , este:

$$W = \begin{pmatrix} 0,24 & 0,194 & 0,18 & 0,056 & 0,049 & 0,05 \\ 0,145 & 0,166 & 0,18 & 0,078 & 0,1 & 0,05 \\ 0,1625 & 0,138 & 0,3 & 0,056 & 0,055 & 0,0215 \\ 0,25 & 0,2 & 0,129 & 0,1 & 0,045 & 0,05 \end{pmatrix} \quad (4.58.)$$

Cu ajutorul relației dată de ec. (4.55.), se calculează valorile funcției $f(V_i)$: $f(V_1) = 0,769$; $f(V_2) = 0,719$; $f(V_3) = 0,733$ și $f(V_4) = 0,774$. Varianta optimă, indicată de cea mai mare valoare a funcției de utilitate, este:

$$V_0 = \{V_4\}. \quad (4.59.)$$

Metoda Onicescu directă

Pornind de la matricea consecințelor, A (4.18.), se construiește o nouă matrice, matricea locurilor, L, care ordonează variantele în raport cu criteriile:

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{m1} & l_{m2} & \dots & l_{mn} \end{pmatrix}. \quad (4.60.)$$

Apoi se construiește matricea C, cu elementele α_{ij} :

$$C = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \dots & \alpha_{mm} \end{pmatrix}, \quad (4.61.)$$

unde $\alpha_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$ reprezintă de câte ori varianta V, ocupă locul j.

Se construiește funcția de utilitate $f: V \rightarrow R_+$, a cărei expresie analitică are forma [114.]:

$$f(V_i) = \sum_{j=1}^m \left(\alpha_{ij} \cdot \frac{1}{2^m} \right). \quad (4.62.)$$

Această metodă socotește criteriile ca având importanță egală. Deci, vectorul p va fi:

$$p = (0,1(6); 0,1(6); 0,1(6); 0,1(6); 0,1(6); 0,1(6)). \quad (4.63.)$$

Construindu-se matricea locurilor, L:

$$L = \begin{pmatrix} V_4 & V_4 & V_3 & V_4 & V_2 & V_1, V_2, V_4 \\ V_1 & V_1 & V_1, V_2 & V_2 & V_3 & V_3 \\ V_3 & V_2 & V_4 & V_1, V_3 & V_1 & - \\ V_2 & V_3 & - & - & V_4 & - \end{pmatrix} \quad (4.64.)$$

și matricea C:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 1 \\ 4 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.65.)$$

se calculează valorile funcției de utilitate $f(V_i)$:

$$f(V_1) = 1 \cdot 2^{-1} + 3 \cdot 2^{-2} + 2 \cdot 2^{-3} + 0 \cdot 2^{-4} = 24/16;$$

$$f(V_2) = 2 \cdot 2^{-1} + 2 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3} + 1 \cdot 2^{-4} = 27/16;$$

$$f(V_3) = 1 \cdot 2^{-1} + 2 \cdot 2^{-2} + 2 \cdot 2^{-3} + 1 \cdot 2^{-4} = 21/16;$$

$$f(V_4) = 4 \cdot 2^{-1} + 0 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3} + 1 \cdot 2^{-4} = 35/16.$$

Prin urmare, varianta optimă, dată de valoarea maximă a funcției de utilitate, este:

$$V_0 = \{V_4\}. \quad (4.66.)$$

Metoda Onicescu ponderată

La această metodă se iau în considerare coeficienții de importanță atribuiți de vectorul de importanță cardinală, p (4.53.), iar funcția de utilitate $f: V \rightarrow R_+$, are expresia analitică [114.]:

$$f(V_i) = \sum_{j=1}^n p_j \frac{1}{2^{\text{loc}(V_i, C_j)}}, \quad (4.67.)$$

unde $\text{loc}(V_i, C_j)$ reprezintă locul ocupat de varianta V_i în criteriul C_j .

Considerându-se același vector de importanță cardinală p (4.56.), precum și relația (4.67.), se calculează valorile funcției de utilitate $f(V_i)$:

$$f(V_1) = 0,25 \cdot 2^{-2} + 0,2 \cdot 2^{-2} + 0,3 \cdot 2^{-2} + 0,1 \cdot 2^{-3} + 0,1 \cdot 2^{-3} + 0,05 \cdot 2^{-1} = 3,8/16;$$

$$f(V_2) = 0,25 \cdot 2^{-4} + 0,2 \cdot 2^{-3} + 0,3 \cdot 2^{-2} + 0,1 \cdot 2^{-2} + 0,1 \cdot 2^{-1} + 0,05 \cdot 2^{-1} = 3,45/16;$$

$$f(V_3) = 0,25 \cdot 2^{-3} + 0,2 \cdot 2^{-4} + 0,3 \cdot 2^{-1} + 0,1 \cdot 2^{-3} + 0,1 \cdot 2^{-2} + 0,05 \cdot 2^{-2} = 3,9/16;$$

$$f(V_4) = 0,25 \cdot 2^{-1} + 0,2 \cdot 2^{-1} + 0,3 \cdot 2^{-3} + 0,1 \cdot 2^{-1} + 0,1 \cdot 2^{-4} + 0,05 \cdot 2^{-1} = 5,5/16;$$

Întrucât $f(V_4) = 5,5/16$ are valoarea cea mai mare, varianta optimă va fi V_4 :

$$V_0 = \{V_4\}. \quad (4.68.)$$

Metoda permutării

Se pornește de la matricea consecințelor, A (4.12.) și de la vectorul de importanță cardinală, p (4.53.). Se determină mulțimea Q a permutărilor celor m variante. Numărul elementelor mulțimii permutărilor, Q , este $m!$. Pentru fiecare permutare Q , se determină matricea D :

$$D_i = \begin{pmatrix} d_{i,f_1} & d_{i,f_2} & d_{i,f_m} \\ d_{i,d_1} & d_{i,d_2} & d_{i,d_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{i,d_1} & d_{i,d_2} & d_{i,d_m} \end{pmatrix}, \quad (4.69.)$$

unde

$$d_{i,f_i} = \begin{cases} \sum_{j \in C_{k,i}} p_j |i_1 > i_k \\ 0 | i_1 = i_k \\ \sum_{j \in D_{k,i}} p_j | i_1 < i_k \end{cases} \quad (4.70.)$$

și

$$C_{i,f_i} = \{j | a_{ij} \geq a_{ik}; i_k, i_1 = 1, 2, \dots, m; i_k \neq i_1\}, \quad (4.71.)$$

$$D_{i,f_i} = \{j | a_{ij} \leq a_{ik}; i_k, i_1 = 1, 2, \dots, m; i_k \neq i_1\}. \quad (4.72.)$$

Apoi se calculează rangul permutării, R_i :

$$R_i = \sum_{j \in C_{k,i}} p_j - \sum_{j \in D_{k,i}} p_j, \quad (4.73.)$$

pentru $i = 1, 2, \dots, m!$

Ierarhia optimă corespunde permutării de rang maxim.

Fiind dați matricea consecințelor, A (4.18.) și vectorul de importanță cardinală, p (4.56.), cu cele 4 variante se pot forma $4! = 24$ permutări:

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{24}\}. \quad (4.74.)$$

Cele 24 de permutări sunt:

$$Q_1 = \{V_1, V_2, V_3, V_4\};$$

$$Q_9 = \{V_2, V_3, V_1, V_4\};$$

$$Q_{17} = \{V_3, V_4, V_1, V_2\};$$

$$Q_2 = \{V_1, V_2, V_4, V_3\};$$

$$Q_{10} = \{V_2, V_3, V_4, V_1\};$$

$$Q_{18} = \{V_3, V_4, V_2, V_1\};$$

$$Q_3 = \{V_1, V_3, V_2, V_4\};$$

$$Q_{11} = \{V_2, V_4, V_1, V_3\};$$

$$Q_{19} = \{V_4, V_1, V_2, V_3\};$$

$$Q_4 = \{V_1, V_3, V_4, V_2\};$$

$$Q_{12} = \{V_2, V_4, V_3, V_1\};$$

$$Q_{20} = \{V_4, V_1, V_3, V_2\};$$

$$Q_5 = \{V_1, V_4, V_2, V_3\};$$

$$Q_{13} = \{V_3, V_1, V_2, V_4\};$$

$$Q_{21} = \{V_4, V_2, V_1, V_3\};$$

$$Q_6 = \{V_1, V_4, V_3, V_2\};$$

$$Q_{14} = \{V_3, V_1, V_4, V_2\};$$

$$Q_{22} = \{V_4, V_2, V_3, V_1\};$$

$$Q_7 = \{V_2, V_1, V_3, V_4\};$$

$$Q_{15} = \{V_3, V_2, V_1, V_4\};$$

$$Q_{23} = \{V_4, V_3, V_1, V_2\};$$

$$Q_8 = \{V_2, V_1, V_4, V_3\};$$

$$Q_{16} = \{V_3, V_2, V_4, V_1\};$$

$$Q_{24} = \{V_4, V_3, V_2, V_1\}.$$

În continuare, algoritmul de calcul este prezentat detaliat doar pentru permutarea Q_1 , pentru restul, Q_2, Q_3, \dots, Q_{24} , procedându-se în mod similar.

Se construiește matricea D_1 :

$$D_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0,55 & 0,6 & 0,45 \\ 0,8 & 0 & 0,45 & 0,45 \\ 0,5 & 0,55 & 0 & 0,4 \\ 0,6 & 0,6 & 0,6 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.75.)$$

Rangul permutării Q_1 se calculează cu ajutorul ec. (4.73.), făcând diferența dintre suma elementelor superior triunghiulare matricei D_1 și suma elementelor inferior triunghiulare matricei D_1 : $R_1 = (0,55 + 0,6 + 0,45 + 0,45 + 0,45 + 0,4) - (0,8 + 0,5 + 0,55 + 0,6 + 0,6 + 0,6) = 2,9 - 3,65 = -0,75$.

Calculându-se și celelalte ranguri, ale tuturor permutărilor, se obține:

$R_1 = -0,75;$	$R_7 = -0,25;$	$R_{13} = -0,95;$	$R_{19} = 0,25;$
$R_2 = -0,35;$	$R_8 = 0,15;$	$R_{14} = -0,45;$	$R_{20} = 0,45;$
$R_3 = -0,55;$	$R_9 = -0,45;$	$R_{15} = -0,25;$	$R_{21} = 0,75;$
$R_4 = -0,25;$	$R_{10} = -0,15;$	$R_{16} = 0,05;$	$R_{22} = 0,95;$
$R_5 = -0,05;$	$R_{11} = 0,45;$	$R_{17} = -0,15;$	$R_{23} = 0,25;$
$R_6 = 0,15;$	$R_{12} = 0,25;$	$R_{18} = 0,35;$	$R_{24} = 0,75;$

Rangul maxim este $R_{22} = 0,95$, căruia îi corespunde permutarea $Q_{22} = (V_4, V_2, V_3, V_1)$.

Prin urmare, ierarhia variantelor este:

$$V_4 \succ V_2 \succ V_3 \succ V_1, \quad (4.76.)$$

iar varianta optimă, este prima variantă din șirul de ordonare:

$$V_0 = \{V_4\}. \quad (4.77.)$$

Metoda TOPSIS

Metoda TOPSIS (Technique for Orders Preferance by Similarity to Ideal Solution [33.]) se bazează pe faptul că varianta optimă trebuie să aibe distanța minimă față de soluția ideală. Se pleacă de la matricea ponderată, construită cu elementele w_{ij} (4.57.). Se determină soluția ideală, W^+ și, apoi, soluția ideală negativă, W^- , cu relațiile:

$$W^+ = (w_1^+, w_2^+, \dots, w_n^+) \quad (4.78.)$$

și

$$W^- = (w_1^-, w_2^-, \dots, w_n^-), \quad (4.79.)$$

unde:

$$w_j^* = \max_{1 \leq j \leq m} (w_j) \quad (4.80.)$$

și

$$w_j^- = \min_{1 \leq j \leq m} (w_j). \quad (4.81.)$$

Se calculează distanțele dintre soluții:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - w_j^*)^2} \quad (4.82.)$$

și

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - w_j^-)^2}, \quad (4.83.)$$

iar apoi, apropierea relativă față de soluția ideală:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*}. \quad (4.84.)$$

Din relație se observă că $C_i^* \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, m$.

O soluție este cu atât mai apropiată de soluția ideală, cu cât C_i^* este mai apropiat de 1.

Ierarhia variantelor este dată de ordinea descrescătoare a apropierilor relative, C_i^* .

Având construită matricea W (4.58.), se determină soluția ideală, W^* și soluția ideală negativă, W^- :

$$W^* = (0,25;0,2;0,3;0,1;0,1;0,05) \quad (4.85.)$$

$$W^- = (0,145;0,138;0,129;0,056;0,045;0,0215). \quad (4.86.)$$

Distanțele euclidiene sunt:

$$S_1^* = 0,1318; \quad S_3^* = 0,0928; \quad S_1^- = 0,1248; \quad S_3^- = 0,1721;$$

$$S_2^* = 0,1645; \quad S_4^* = 0,1796; \quad S_2^- = 0,0880; \quad S_4^- = 0,1237,$$

iar apropierea relativă au următoarele valori:

$$C_1^* = 0,474; \quad C_2^* = 0,348; \quad C_3^* = 0,649; \quad C_4^* = 0,424.$$

Deci, ierarhia variantelor este:

$$V_3 \succ V_1 \succ V_4 \succ V_2, \quad (4.87.)$$

varianta optimă fiind:

$$V_0 = \{V_3\}. \quad (4.88.)$$

4.2.2.4. Modele cu informații asupra criteriilor dependente

Aceste modele de decizii multiatribut sunt utilizabile în cazul în care informațiile de care dispune decidentul sunt furnizate la cel mai înalt nivel: între criterii există o relație de dependență, cunoscută de către decident, relație care poate fi exprimată sub diferite forme.

Metoda combinărilor ierarhice

Prin această metodă [38.] se reduce modelul în care sunt luate în considerare toate criteriile, la un model de dimensiuni mai reduse, în care sunt luate în considerare numai criteriile independente.

Presupunem că, în mulțimea criteriilor (4.11.) există o relație de dependență între criteriul C_1 și criteriul C_2 , exprimată în felul următor: pentru criteriul dependent, C_2 , se consideră o singură valoare, numită nivel de bază, iar pentru fiecare variantă se cunoaște evaluarea în criteriul independent, C_1 , pentru cazul în care criteriul C_2 este la nivelul de bază.

Se echivalează perechile (a_{1i}, a_{2i}) cu perechile (a'_{1i}, a^*) , unde $a^* \in \{a_{12}, a_{22}, \dots, a_{m2}\}$ este nivelul de bază al criteriului dependent C_2 .

Detaliind echivalarea pentru fiecare variantă, se poate scrie: $(a_{11}, a_{12}) \sim (a'_{11}, a^*)$, $(a_{21}, a_{22}) \sim (a'_{21}, a^*)$, $(a_{31}, a_{32}) \sim (a'_{31}, a^*)$, pentru primele trei variante, iar pentru ultima: $(a_{m1}, a_{m2}) \sim (a'_{m1}, a^*)$. Perechile de valori (a_{1i}, a_{2i}) determină o serie de puncte A_i , iar perechile (a'_{1i}, a^*) , o serie de puncte A'_i , $i = 1, 2, \dots, m$. Perechile A_i și A'_i sunt situate pe un număr m de curbe, numite curbe de indiferență, deoarece, punctele aparținând unei astfel de curbe, sunt echivalente din punctul de vedere al decidentului. Punctele A'_1, A'_2, \dots, A'_m se numesc rate marginale de substituție.

Prin reducerea modelului inițial cu criteriul dependent C_2 , noul model redus va prezenta matricea evaluărilor de forma A' :

$$A' = \begin{pmatrix} a'_{11} & a_{13} & a_{1n} \\ a'_{21} & a_{23} & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a'_{m1} & a_{m3} & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.89.)$$

În continuare se poate aplica oricare dintre metodele de decizii multicriteriale multiatribut descrise în secțiunile anterioare.

Pentru cazul dat, să considerăm că există următoarele dependențe între criterii: consumul energetic al prelucrării, C_2 este o funcție liniară de durata prelucrării, C_1 și precizia prelucrării, C_4 este invers proporțională cu volumul investiției inițiale, C_3 .

Se consideră drept nivel de bază al criteriului dependent C_2 , valoarea de $38,88 \cdot 10^5$ J. Atunci, noile evaluări în criteriul C_1 , determină echivalențele:

- $V_1: A_1 \leftrightarrow (12,25; 33,05) \sim (10,45; 38,88) \leftrightarrow A'_1;$
- $V_2: A_2 \leftrightarrow (20,33; 38,88) \sim (20,33; 38,88) \leftrightarrow A'_2;$
- $V_3: A_3 \leftrightarrow (18,2; 46,4) \sim (21,8; 38,88) \leftrightarrow A'_3;$
- $V_4: A_4 \leftrightarrow (11,75; 32,08) \sim (9,72; 38,88) \leftrightarrow A'_4.$

Cu perechile de puncte (A_1, A'_1) , (A_2, A'_2) , (A_3, A'_3) și (A_4, A'_4) , se construiesc curbele de indiferență, prezentate în fig. 4.25.

Din fig. 4.25. se observă că toate punctele A'_i sunt situate la aceeași valoare a consumului energetic (nivelul de bază, $38,88 \cdot 10^5$ J), iar punctul A_2 este identic cu punctul A'_2 , deoarece nivelul de bază al consumului energetic a fost evaluat de către varianta V_2 .

În ceea ce privește criteriul calitativ de maxim, precizia prelucrării, C_4 , se consideră nivelul de bază ca fiind calificativul "medie". Noile evaluări în criteriul C_3 , determină echivalențele:

- $V_1: A_1 \leftrightarrow (\text{medie}, \text{medie}) \sim (\text{medie}, \text{medie}) \leftrightarrow A'_1;$
- $V_2: A_2 \leftrightarrow (\text{medie}, \text{medie}) \sim (\text{mare}, \text{medie}) \leftrightarrow A'_2;$
- $V_3: A_3 \leftrightarrow (\text{mică}, \text{medie}) \sim (\text{mică}, \text{medie}) \leftrightarrow A'_3;$
- $V_4: A_4 \leftrightarrow (\text{mare}, \text{f. mare}) \sim (\text{f. mare}, \text{medie}) \leftrightarrow A'_4.$

Curbele de indiferență sunt prezentate în fig. 4.26.

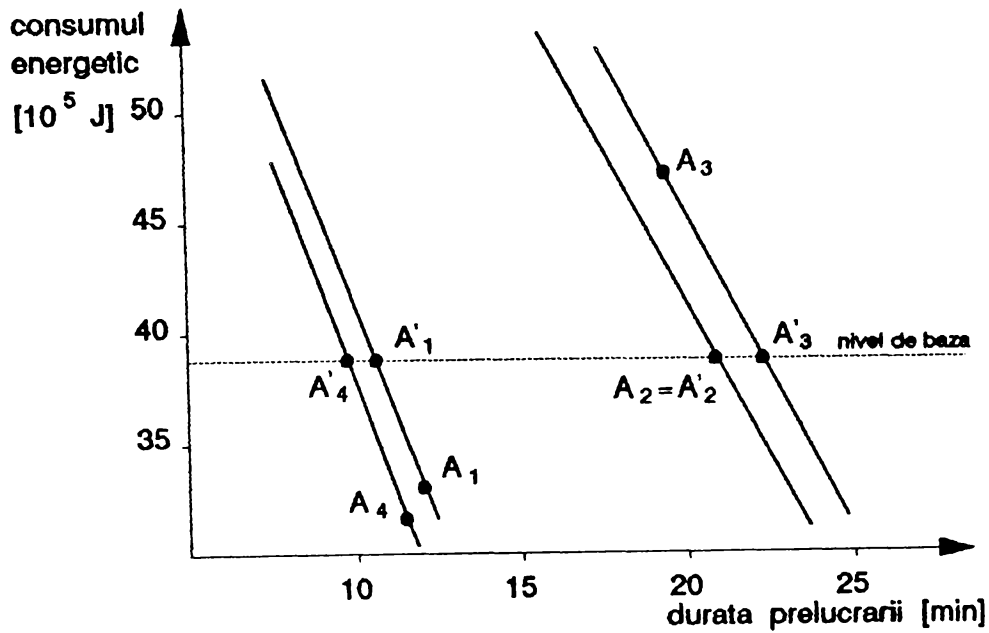


fig. 4.25. Curbele de indiferență în cazul dependenței consumului energetic de durata prelucrării

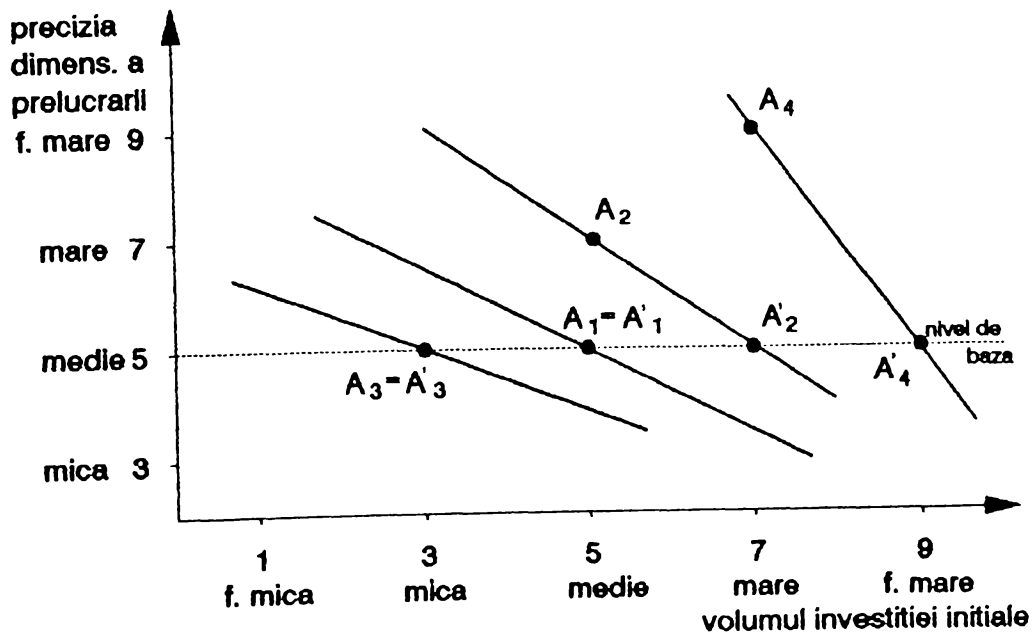


fig. 4.26. Curbele de indiferență în cazul dependenței preciziei prelucrării de volumul investiției inițiale

Și în această situație se observă că, ratele marginale de substituire, punctele A'_1 , A'_2 , A'_3 și A'_4 , sunt situate pe aceeași dreaptă, reprezentând nivelul de bază. Întrucât nivelul de bază ales, calificativul "medie", prezintă această evaluare în variantele V_1 și V_3 , punctele A_1 și A_3 se confundă cu punctele A'_1 și A'_3 .

Eliminând cele două criterii dependente, C_2 și C_4 , cu criteriile independente rămase, C_1 , C_3 , C_5 , și C_6 , se construiește noua matrice redusă, A' :

$$A' = \begin{pmatrix} 10,45 & \text{medie} & 6,56 & \text{mare} \\ 20,33 & \text{mare} & 3,21 & \text{mare} \\ 21,8 & \text{mica} & 5,84 & \text{mica} \\ 9,72 & \text{f.mare} & 7,17 & \text{mare} \end{pmatrix}, \quad (4.90.)$$

iar noua matrice normalizată redusă va fi:

$$R' = \begin{pmatrix} 0,93 & 0,6 & 0,49 & 1 \\ 0,47 & 0,43 & 1 & 1 \\ 0,44 & 1 & 0,55 & 0,43 \\ 1 & 0,33 & 0,45 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.91.)$$

Cum matricea redusă este de dimensiuni mai mici, $m \times p$ ($p = n - n'$, n' - numărul criteriilor dependente), aplicarea oricăreia dintre metodele descrise anterior, se face cu mai multă ușurință.

Problema care se pune este în ce măsură metodele aplicate după reducerea dimensiunilor matricei consecințelor, conduc la aceleași rezultate ca și cele obținute înaintea reducerii dimensiunilor ei.

Păstrând aceleași condiții impuse în capitolele anterioare, se obțin următoarele variante optime, determinate cu diferitele metode de decizii multiatribut:

- metoda dominanței: $V_0 = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$;
- metoda maximin: $V_0 = \{V_1\}$;
- metoda maximin: $V_0 = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$;
- metoda conjunctivă: $V_0 = \{V_1\}$;
- metoda disjunctivă: $V_0 = \{V_1, V_2, V_4\}$;
- metoda lexicografică: $V_0 = \{V_3\}$;
- metoda semiordinii lexicografice: $V_0 = \{V_1\}$.

În discuție au fost luate în considerare metodele fără informații asupra criteriilor, iar dintre cele cu informații, doar cele furnizate la nivel scăzut: nivel standard și preferințe ordinale. După cum se observă, doar metoda maximin oferă altă soluție: V_2 , înainte de reducere și V_1 , după reducere. Celelalte metode oferă soluții identice în cele două situații.

4.2.3. Modele de decizii multiatribut cu informații asupra variantelor

Aceste metode se aplică atunci când decidentul posedă informații asupra perechilor de variante, exprimate fie prin preferințe, fie prin distanțe față de soluția ideală (fig. 4.27).

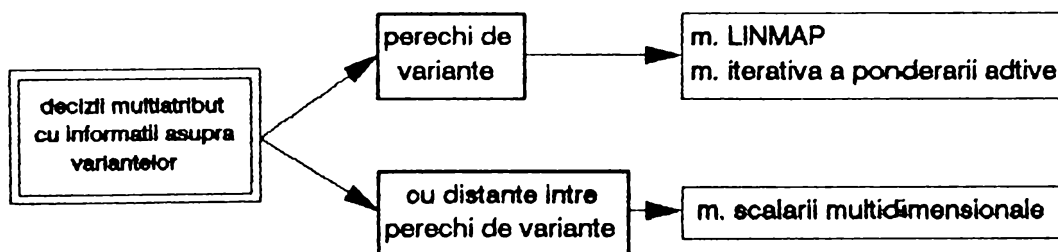


fig. 4.27. Clasificarea modelelor de decizii multiatribut cu informații asupra variantelor

O astfel de metodă, cu atribute din ambele categorii, este metoda LINMAP.

Metoda LINMAP

Metoda LINMAP (Linear Programming Techniques for Multidimensional Analysis of Preference [129.]) presupune că decidentul cunoaște soluția ideală $V_0 = \{a_1^0, a_2^0, \dots, a_n^0\}$. O variantă V_i , poate fi caracterizată pe baza distanței față de soluția ideală:

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n p_j (a_{ij} - a_j^0)^2}, \quad (4.92.)$$

unde a_{ij} sunt elementele matricei consecințelor, A , p_j reprezintă ponderile criteriilor C_j , iar $i = 1, 2, \dots, m$.

Fie $\omega = \{(k, l)\}$, mulțimea perechilor ordonate (k, l) și $\Omega = \{(V_k, V_l), (k, l) \in \omega\}$, mulțimea de perechi de variante, în care varianta V_k este preferată variantei V_l . Notându-se, $d_i^2 = S_i$, problema care se pune este de a determina soluția (P^*, V^*) , pentru care condiția (4.92.) este încălcată cât mai puțin posibil.

Se notează:

$$(S_l - S_k)^- = \begin{cases} 0 & | S_l \geq S_k \\ S_k - S_l & | S_l < S_k \end{cases} = \max\{0, (S_k - S_l)\}. \quad (4.93.)$$

Se urmărește determinarea (P^*, V^*) , astfel ca

$$B = \sum_{(V_l, V_k) \in \Omega} (S_l - S_k)^-, \quad (4.94.)$$

să fie minim.

Notându-se:

$$(S_l - S_k)^+ = \begin{cases} S_l - S_k & | S_l \geq S_k \\ 0 & | S_l < S_k \end{cases}, \quad (4.95.)$$

$$G = \sum_{(V_l, V_k) \in \Omega} (S_l - S_k)^+ \quad (4.96.)$$

și

$$G - B = h, \quad (4.97.)$$

(P^*, V^*) se obține ca soluție a următorului model de programare liniară:

$$\min B = \sum_{(V_l, V_k) \in \Omega} \max\{0, (S_k - S_l)\}, \quad (4.98.)$$

în condițiile:

$$\sum_{(V_l, V_k) \in \Omega} (S_l - S_k) = h. \quad (4.99.)$$

Înlocuind S_l și S_k din relația (4.93.) și notând:

$$y_j = p_j \cdot a_j^*, \quad (4.100.)$$

se obține modelul final:

$$\min \sum_{(V_l, V_k) \in \Omega} z_{lk}, \quad (4.101.)$$

în condițiile:

$$\sum_{j=1}^n p_j (a_b^2 - a_{b'}^2) - 2 \sum_{j=1}^n y_j (a_b - a_{b'}) + z_{21} \geq 0, \quad (4.102.)$$

$$\sum_{j=1}^n p_j \sum_{(V_i, V_j) \in \Omega} (a_b^2 - a_{b'}^2) - 2 \sum_{j=1}^n y_j \sum_{(V_i, V_j) \in \Omega} (a_b - a_{b'}) = h, \quad (4.103.)$$

$$p_j \geq 0, \quad (4.104.)$$

$$z_{21} \geq 0. \quad (4.105.)$$

Rezolvarea sistemului conduce la determinarea necunoscutelor z_{21} , p_j și y_j , apoi a soluției ideale V^* și a coeficienților p_j^* . Se alege drept variantă optimă, varianta V_i , care are distanța euclidiană S_i cea mai mică față de soluția ideală, V^* . Se disting următoarele cazuri, pentru soluția modelului de programare:

- dacă $p_j^* > 0$, atunci, $a_j^* = y_j^* / p_j^*$;
- dacă $p_j^* = 0$ și $y_j^* = 0$, atunci, $a_j^* = 0$;
- dacă $p_j^* = 0$ și $y_j^* > 0$, atunci, $a_j^* \rightarrow +\infty$;
- dacă $p_j^* = 0$ și $y_j^* < 0$, atunci, $a_j^* \rightarrow -\infty$.

Pornind de la matricea A_6 (4.47.), se consideră mulțimea:

$$\Omega = \{(V_2, V_1), (V_3, V_1), (V_1, V_4), (V_2, V_3), (V_4, V_2), (V_3, V_4)\}. \quad (4.106.)$$

Pentru perechea (V_2, V_1) , se obține prima restricție a modelului:

$$\sum_{j=1}^6 p_j (a_{1j}^2 - a_{2j}^2) - 2 \sum_{j=1}^6 y_j (a_{1j} - a_{2j}) + z_{21} \geq 0, \quad (4.107.)$$

adică: $p_1(20,33^2 - 12,25^2) + p_2(38,88^2 - 33,05^2) + p_3(5^2 - 5^2) + p_4(7^2 - 5^2) + p_5(3,21^2 - 6,56^2) +$
 $+ p_6(7^2 - 7^2) - 2y_1(20,33 - 12,55) - 2y_2(38,88 - 33,05) - 2y_3(5 - 5) - 2y_4(7 - 5) - 2y_5(3,21 - 6,56) -$
 $- 2y_6(7 - 7) + z_{21} \geq 0$ sau $263,2464p_1 + 419,3519p_2 + 24p_4 - 32,7295p_5 - 15,56y_1 - 11,66y_2 -$
 $- 4y_4 + 6,7y_5 + z_{21} \geq 0.$

În mod asemănător se procedează și pentru celelalte perechi de variante, obținându-se modelul:

$$\min(z_{21} + z_{31} + z_{14} + z_{23} + z_{42} + z_{34}), \quad (4.108.)$$

în condițiile:

$$\bullet 263,2464p_1 + 419,3519p_2 + 24p_4 - 32,7295p_5 - 15,56y_1 - 11,66y_2 - 4y_4 + 6,7y_5 + z_{21} \geq 0;$$

$$\bullet -181,1775p_1 - 1060,6575p_2 + 16p_3 + 8,928p_5 + 40p_6 + 11,9y_1 + 26,7y_2 - 4y_3 - 1,44y_5 - 8y_6 + z_{31} \geq 0;$$

$$\bullet -12p_1 - 63,1761p_2 + 24p_3 + 56p_4 + 8,3753p_5 + y_1 + 1,94y_2 - 4y_3 - 8y_4 - 1,22y_5 + z_{14} \geq 0;$$

$$\bullet -82,0689p_1 + 641,3056p_2 - 16p_3 - 24p_4 + 23,8015p_5 - 40p_6 + 4,26y_1 - 15,04y_2 + 4y_3 + 4y_4 - 5,26y_5 + 8y_6 + z_{23} \geq 0;$$

$$\bullet 275,2464p_1 + 482,528p_2 - 24p_3 - 32p_4 - 41,1048p_5 - 17,16y_1 - 13,6y_2 + 4y_3 + 4y_4 + 7,92y_5 + z_{42} \geq 0;$$

$$\bullet -193,1775p_1 - 1123,8336p_2 + 40p_3 + 56p_4 + 17,3033p_5 + 40p_6 + 12,9y_1 + 28,64y_2 - 8y_3 - 8y_4 - 2,66y_5 - 8y_6 + z_{34} \geq 0;$$

$$\bullet p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6 \geq 0;$$

$$\bullet z_{21}, z_{31}, z_{14}, z_{23}, z_{42}, z_{34} \geq 0.$$

Rezolvarea modelului matematic, pe baza programării liniare [130.], [142.], conduce la soluția problemei, varianta optimă, ca fiind varianta V_4 .

4.3. Determinarea variantei optime prin metoda agregării de clasamente

După cum s-a văzut în cap. 4.2., pentru alegerea variantei optime de realizare a unui orificiu perforat într-un disc de oțel, dintr-o mulțime de 4 variante de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv, s-au folosit mai multe metode. Acestea au fost: metoda dominanței (DOM), metoda maximin (MIN), metoda maximax (MAX), metoda conjunctivă (CON), metoda disjunctivă (DIS), metoda lexicografică (LEX), metoda semiordinii lexicografice

(SOL), metoda ponderării simple aditive (PSA), metoda Onicescu directă (OND), metoda Onicescu ponderată (ONP), metoda permutării (PER), metoda TOPSIS (TOP).

Rezultatele obținute cu ajutorul acestor metode sunt prezentate în tab. 4.5. [93.].

Ierarhiile variantelor și varianta optimă, obținute cu diferite metode de optimizare
tab. 4.5.

nr. crt.	metoda de optimizare	ierarhia variantelor	varianta optimă
1.	DOM	$V_1 \sim V_2 \sim V_3 \sim V_4$	V_1, V_2, V_3, V_4
2.	MIN	$V_2 \succ V_1 \succ (V_3 \sim V_4)$	V_2
3.	MAX	$V_1 \sim V_2 \sim V_3 \sim V_4$	V_1, V_2, V_3, V_4
4.	CON	$V_1 \succ (V_2 \sim V_3 \sim V_4)$	V_1
5.	DIS	$(V_1 \sim V_2 \sim V_4) \succ V_3$	V_1, V_2, V_4
6.	LEX	$V_3 \succ (V_1 \sim V_2 \sim V_4)$	V_3
7.	SOL	$V_1 \succ V_3 \succ V_2 \succ V_4$	V_1
8.	PSA	$V_4 \succ V_1 \succ V_3 \succ V_2$	V_4
9.	OND	$V_4 \succ V_2 \succ V_1 \succ V_3$	V_4
10.	ONP	$V_4 \succ V_3 \succ V_1 \succ V_2$	V_4
11.	PER	$V_4 \succ V_2 \succ V_3 \succ V_1$	V_4
12.	TOP	$V_3 \succ V_1 \succ V_4 \succ V_2$	V_3

Fiecare dintre aceste metode a produs propria ei ierarhie, oferind clasamente care diferă mai mult sau mai puțin între ele. Se pune, deci, problema luării în considerare, simultan, a tuturor ierarhiilor oferite de fiecare metodă în parte, obținându-se un “clasament al clasamentelor”, pe baza unei ierarhii de sinteză. Ierarhia de sinteză se obține prin diferite metode de agregare a clasamentelor [92.].

În cele ce urmează, se prezintă diferite metode de stabilire a ierarhiei de sinteză [110.], pornind de la cele 12 ierarhii individuale.

Metoda votului simplu

Această metodă ia în considerare doar prima poziție din ierarhiile individuale, nesocotind celelalte poziții. Pe primul loc se situează varianta care întrunește cele mai multe poziții “1” în ierarhiile individuale. În cazul în care mai multe variante se situează pe primul

loc, punctul acordat se împarte în mod egal variantelor aflate la egalitate. Aplicând acest algoritm de calcul, varianta V_1 primește 2,83 puncte (1 p. CON + 1 p. SML + 0,33 p. DIS + 0,25 p. DOM + 0,25 p. MAX), varianta V_2 , 1,83 puncte (1 p. MIN + 0,33 p. DIS + 0,25 p. DOM + 0,25 p. MAX), varianta V_3 , 2,5 puncte (1 p. LEX + 1 p. TOP + 0,25 p. DOM + 0,25 p. MAX), iar varianta V_4 , 4,83 puncte (1 p. PSA + 1 p. OND + 1 p. ONP + 1 p. PER + 0,33 p. DIS + 0,25 p. DOM + 0,25 p. MAX). Prin urmare, ierarhia de sinteză, propusă de metoda votului simplu (MVS), este:

$$V_4 \succ V_1 \succ V_3 \succ V_2. \quad (4.109.)$$

Metoda Borda directă

Metoda acordă $n, n - 1, \dots, 2, 1$ puncte, locurilor 1, 2, ..., $n - 1, n$, din ierarhiile de plecare. Se însumează punctele obținute de fiecare variantă și se ordonează variantele după punctajul descrescător obținut de fiecare dintre ele. În ordinea metodelor din tab. 4.4., variantele în discuție vor primi următoarele punctaje:

- $V_1: 2,5 + 3 + 2,5 + 4 + 3 + 2 + 4 + 3 + 2 + 2 + 1 + 3 = 32;$
- $V_2: 2,5 + 4 + 2,5 + 2 + 3 + 2 + 2 + 1 + 3 + 1 + 3 + 1 = 27;$
- $V_3: 2,5 + 1,5 + 2,5 + 2 + 1 + 4 + 3 + 2 + 1 + 3 + 2 + 4 = 28,5;$
- $V_4: 2,5 + 1,5 + 2,5 + 2 + 3 + 2 + 1 + 4 + 4 + 4 + 4 + 2 = 32,5.$

Deci, clasamentul obținut prin metoda Borda directă (MBD) de agregare este:

$$V_4 \succ V_1 \succ V_3 \succ V_2. \quad (4.110.)$$

Metoda Borda inversă

Metoda Borda inversă (MBI) este asemănătoare cu metoda Borda directă, deosebirea constând în faptul că locurilor 1, 2, ..., n , li se acordă $1/1, 1/2, \dots, 1/n$ puncte. În consecință, punctajele variantelor, în aceeași ordine a metodelor din tab. 4.4., este:

- $V_1: 1/2,5 + 1/2 + 1/2,5 + 1/1 + 1/2 + 1/3 + 1/1 + 1/2 + 1/3 + 1/3 + 1/4 + 1/2 = 847/140;$
- $V_2: 1/2,5 + 1/1 + 1/2,5 + 1/3 + 1/2 + 1/3 + 1/3 + 1/4 + 1/2 + 1/4 + 1/2 + 1/4 = 707/140;$
- $V_3: 1/2,5 + 1/3,5 + 1/2,5 + 1/3 + 1/4 + 1/1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/2 + 1/3 + 1/1 = 782/140;$

• V_4 : $1/2,5 + 1/3,5 + 1/2,5 + 1/3 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/1 + 1/1 + 1/1 + 1/1 + 1/3 = 957/140$.

Ierarhia propusă de această metodă este:

$$V_4 \succ V_1 \succ V_3 \succ V_2. \quad (4.111.)$$

Metoda simplei majorități

Metoda presupune compararea unor perechi posibile de variante și prelungirea relațiilor obținute, prin tranzitivitate, la ierarhia finală. Această proprietate de tranzitivitate a relațiilor de preferință între variante, poate să conducă la rezultate curioase. Un prim aspect paradoxal îl constituie faptul că, metoda poate conduce la rezultate diferite, funcție de modul de alcătuire a perechilor de comparat.

Dacă se compară variantele în perechile (V_4, V_1) , (V_1, V_3) și (V_3, V_2) , se obține:

• (V_4, V_1) : 4 - 4 (4), adică V_4 este preferat lui V_1 în 4 metode, V_1 este preferat lui V_4 în 4 metode și 4 metode conduc la relația $V_4 \sim V_1$;

• (V_1, V_3) : 5 - 5 (2), adică V_1 este preferat lui V_3 în 5 metode, V_3 este preferat lui V_1 în 5 metode și 2 metode conduc la relația $V_1 \sim V_3$;

• (V_3, V_2) : 5 - 4 (3), adică V_3 este preferat lui V_2 în 5 metode, V_2 este preferat lui V_3 în 4 metode și 3 metode conduc la relația $V_3 \sim V_2$.

Aplicând proprietatea de tranzitivitate, relațiile de preferință $V_4 \sim V_1$, $V_1 \sim V_3$ și $V_3 \succ V_2$, conduc la ierarhia agregată:

$$(V_4 \sim V_1 \sim V_3) \succ V_2. \quad (4.112.)$$

Dacă se compară variantele în perechile (V_4, V_3) , (V_3, V_1) și (V_1, V_2) , se obține:

• (V_4, V_3) : 5 - 3 (4);

• (V_3, V_1) : 5 - 5 (2);

• (V_1, V_2) : 5 - 3 (4).

Relațiile de preferință $V_4 \succ V_3$, $V_3 \sim V_1$ și $V_1 \succ V_2$, conduc la ierarhia agregată:

$$V_4 \succ (V_1 \sim V_3) \succ V_2, \quad (4.113.)$$

alta decât cea din ec. (4.112.). Deci, aceeași metodă de agregare produce ierarhii de sinteză diferite.

Comparând rezultatele obținute cu aceste 4 metode de agregare, se constată că la 3 dintre ele (MVS, MBD și MBI) ordinea finală este aceeași, diferind de cea de-a patra

(MSM). Metoda votului simplu ignorează parțial informațiile oferite de ierarhiile de plecare: ea nu urmărește decât variantele de vârf, celelalte variante, indiferent de locul ocupat, sunt complet neglijate. Din această cauză, era de așteptat ca această metodă să conducă, eventual, la un clasament agregat diferit de cele oferite de celelalte metode, cu egalizarea mai multor variante. Se pare, însă, că numărul relativ mare de ierarhii de plecare luate în discuție, precum și neomogenitatea lor, au făcut ca și această metodă să fie în consens cu celelalte.

4.3.1. Raționalitatea metodelor de agregare

O problemă dificilă, care apare și care merită discutată, este măsura în care aceste metode de determinare a variantei optime, sunt raționale. O primă dificultate apărută constă în însăși definirea conceptului de “raționalitate”. Pe de o parte, tot ce produce rațiunea umană este rațional. Prin urmare și metodele discutate, fiind produse ale minții omenești, sunt raționale. Pe de altă parte, rațional înseamnă “... care se face cu respectarea unor principii sistematice, metodice”, fiind “... mai presus de experiență și anterior acesteia” [22.]. În [39.] se afirmă că raționalitatea este “...un concept pentru care nu există o definiție unică, riguroasă și pur logică și pentru care este improbabil că se va găsi o definiție care să corespundă tuturor sau cel puțin celor mai multe dintre intuițiile curente.”. În cele ce urmează, conceptului de “rațional” i se va impune un înțeles bine determinat, stabilit de un minim de condiții pe care trebuie să le îndeplinească orice metodă, pentru a putea fi socotită ca fiind rațională.

Astfel privite lucrurile, din cele 17 condiții de raționalitate (1. relevanță, 2. optimalitate Pareto, 3. independență, 4. absența “dictatorului”, 5. stabilitate slabă, 6. consecvență, 7. inversabilitate, 8. stabilitate, 9. independență de ordine, 10. sinceritate, 11. rezonabilitate, 12. sensibilitate, 13. loialitate, 14. maleabilitate, 15. sensibilitate slabă, 16. creditate, 17. anticatastrofism [116.]), K Arrow consideră ca minimală cerință de raționalitate, îndeplinirea primelor patru condiții [10.].

Condiția 1 (relevanța) afirmă că ierarhia de sinteză corespunde unei relații de surclasare tranzitive. Dacă în ierarhia de sinteză există relația $x_i \geq x_j$, pentru i și j precizați și dacă x_i avansează în toate ierarhiile inițiale, atunci și în ierarhia finală se păstrează relația $x_i \geq$

x_j . Această condiție se exprimă prin tranzitivitate: dacă $x_i \geq x_j$ și $x_j \geq x_k$, atunci, $x_i \geq x_k$. Condiția pare cât se poate de firescă, dar, în unele cazuri, este încălcată ("paradoxul lui Condorcet").

Condiția 2 (optimalitatea Pareto) susține că, dacă, în toate ierarhiile inițiale, $x_i \geq x_j$, atunci și în ierarhia finală $x_i \geq x_j$.

Condiția 3 (independența) face următoarea precizare: ordinea finală a doi factori, x_i și x_j , depinde numai de relația dintre x_i și x_j și nu depinde de prezența sau absența altor factori x_k . Această condiție, care, și ea, este foarte naturală, este cel mai adesea încălcată, de către diferitele metode de agregare.

Condiția 4 (absența "dictatorului") precizează faptul că ierarhia de sinteză nu este una impusă dinainte, ea nu este neapărat una anume dintre cele inițiale.

Cu toată naturalețea acestor condiții, surprinzător, teorema lui Arrow face următoarea afirmație: "Nu există nici o metodă de agregare care să satisfacă, simultan, toate cele patru condiții minimale de raționalitate, pentru toate cazurile în care apar cel puțin 3 factori și cel puțin 2 ierarhii de plecare." sau, formulată la modul general, "Dându-se anumite cerințe minimale de raționalitate, este imposibil de construit o metodă de agregare, care să nu conducă la aspecte paradoxale."

4.3.1.1. Raționalitatea metodelor de agregare tip Borda

Întrucât, în capitolul anterior, metoda votului simplu (MVS), metoda Borda directă (MBD) și metoda Borda inversă (MBI), au oferit același clasament agregat, analiza ce urmează, este valabilă pentru toate cele trei metode de agregare [113].

Verificarea primei condiții de raționalitate se face pornind de la relațiile dintre variantele grupate în toate perechile posibile.

În tab. 4.6., sunt prezentate "scorurile" relațiilor de preferință dintre variantele V_i și V_j . S-au luat în considerare doar relațiile de forma $V_i > V_j$ sau $V_i < V_j$, cele de forma $V_i \sim V_j$, nefiind numărate.

tab. 4.6.

V_1	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1		5 - 3	6 - 4	4 - 4
V_2	3 - 5		4 - 5	2 - 5
V_3	4 - 6	5 - 4		3 - 5
V_4	4 - 4	5 - 2	5 - 3	

Din tabel se observă că toate relațiile $V_i \geq V_j$ și $V_j \geq V_k$, conduc la relația $V_i \geq V_k$, condiția 1 fiind, astfel, îndeplinită.

Condiția de optimalitate nu poate fi verificată, deoarece nici o relație de forma $V_i \geq V_j$ nu este valabilă în toate ierarhiile de plecare.

Cea mai contraversată condiție de raționalitate, cea de independență, nu este îndeplinită. În relația dintre V_4 și V_1 , scorul este 4 - 4, deci $V_4 \sim V_1$, pe când în ierarhia de sinteză $V_4 \succ V_1$. Deci, în confruntarea directă, variantele V_4 și V_1 sunt echivalente ($V_4 \sim V_1$), dar în prezența altor variante, V_2 și V_3 , V_4 este preferat lui V_1 ($V_4 \succ V_1$). Aceeași situație se întâlnește și în confruntarea $V_1 - V_3$: directă, $V_1 \sim V_3$, sinteză, $V_1 \succ V_3$.

În ceea ce privește ultima condiție, se constată că ordinea agregată este aceeași cu ordinea propusă de metoda ponderării simple aditive (PSA). Această ierarhie nu a fost, însă, impusă de metoda amintită, metoda nefiind dictatorială, ci este doar o coincidență între cele două ierarhii.

În concluzie, se poate afirma că teorema de imposibilitate a lui Arrow a fost confirmată prin exemplul considerat, deoarece nici una dintre cele trei metode de agregare (MVS, MBD și MBI), nu a satisfăcut, simultan, cele patru condiții minimale de raționalitate.

4.3.1.2. Raționalitatea metodei de agregare folosită de experimentul psihologic

Experimentul psihologic folosește tot o metodă de tip Borda, pentru agregarea părerilor specialiștilor, acordând 1,2, ..., n puncte, locurilor 1,2, ..., n și ordonând factorii de influență în ordinea descrescătoare a punctajelor obținute [15.], [16.].

În [95.], S, ($i = 1 \dots m$; $m = 15$) specialiști din domeniul eroziunii electrice, au ierarhizat x_j ($j = 1 \dots n$; $n = 11$) factori de influență a celui mai des utilizat indicator de performanță, productivitatea prelucrării, Q_p [mm^3/min]. Semnificațiile celor n factori de

influență au fost prezentate în cap. 3.1.1. Răspunsurile specialiștilor sunt prezentate sub forma celor 15 ierarhii de plecare:

- S₁: (x₁ ~ x₂) > x₃ > (x₄ ~ x₁₀) > x₆ > (x₅ ~ x₇ ~ x₉) > x₈ > x₁₁;
- S₂: x₂ > x₃ > (x₅ ~ x₈) > x₉ > x₁₁ > x₆ > x₇ > (x₁ ~ x₄) > x₁₀;
- S₃: x₇ > x₈ > x₅ > x₂ > x₃ > x₄ > x₁ > x₉ > x₁₀ > x₅ > x₁₁;
- S₄: x₂ > x₃ > x₅ > x₇ > x₈ > x₁₀ > x₆ > x₉ > x₄ > x₁₁ > x₁;
- S₅: x₂ > x₃ > x₇ > x₈ > x₅ > x₄ > x₉ > x₁ > x₆ > x₁₀ > x₁₁;
- S₆: (x₂ ~ x₃) > x₅ > x₇ > (x₄ ~ x₁₀) > (x₅ ~ x₉) > (x₁ ~ x₆) > x₁₁;
- S₇: (x₁ ~ x₂ ~ x₅) > x₃ > x₆ > (x₄ ~ x₇ ~ x₈) > x₉ > x₁₀ > x₁₁;
- S₈: (x₅ ~ x₈) > (x₂ ~ x₃) > (x₁ ~ x₄ ~ x₆ ~ x₇ ~ x₁₀) > (x₉ ~ x₁₁);
- S₉: x₂ > x₃ > x₅ > (x₇ ~ x₈) > x₁ > (x₄ ~ x₁₀) > x₉ > (x₆ ~ x₁₁);
- S₁₀: x₇ > x₈ > x₅ > x₂ > x₃ > x₄ > x₁₀ > x₁ > x₉ > x₆ > x₁₁;
- S₁₁: x₂ > x₃ > x₅ > x₄ > x₇ > x₈ > x₉ > x₁ > x₆ > x₁₀ > x₁₁;
- S₁₂: x₂ > x₁ > x₇ > x₈ > x₉ > x₅ > x₃ > x₄ > x₁₁ > x₆ > x₁₀;
- S₁₃: x₃ > x₈ > x₁ > x₂ > (x₄ ~ x₁₀) > (x₆ ~ x₇) > x₅ > x₉ > x₁₁;
- S₁₄: x₂ > x₁ > x₃ > x₁₀ > (x₄ ~ x₉) > (x₆ ~ x₇) > x₅ > x₈ > x₁₁;
- S₁₅: x₁ > (x₂ ~ x₃ ~ x₈) > x₅ > x₇ > x₆ > x₉ > (x₄ ~ x₁₀) > x₁₁.

Aplicând metoda Borda directă de agregare a celor 15 ierarhii de pornire, se obține următoarea ordine de sinteză:

- S: x₂ > x₃ > x₅ > x₈ > x₇ > x₁ > x₄ > x₉ > x₁₀ > x₆ > x₁₁.

Verificarea condițiilor de raționalitate, se face pornind de la datele înscrise în tab. 4.7., unde sunt prezentate relațiile de preferință dintre factorii x_i și x_j. Și în acest tabel, ca și în tab. 4.6., s-au prezentat doar relațiile de forma x_i > x_j sau x_i < x_j, nefigurând cele de forma x_i ~ x_j.

Din tabel se observă că, toate relațiile posibile de forma x_i > x_j și x_j > x_i, conduc la relația x_i > x_j, condiția de relevanță fiind, astfel, îndeplinită.

În ceea ce privește condiția de optimalitate, se observă că, în toate ierarhiile de plecare sunt valabile următoarele relații de preferință: x₂ > x₄, x₂ > x₆, x₂ > x₉, x₂ > x₁₀, x₂ > x₁₁, x₃ > x₄, x₃ > x₆, x₃ > x₁₀, x₃ > x₁₁, x₅ > x₁₁, x₈ > x₁₁ și x₉ > x₁₁. Cum și în ierarhia finală se regăsesc aceste relații, înseamnă că și această condiție este îndeplinită.

Relațiile de preferință privind factorii de influență a productivității prelucrării

tab. 4.7.

x_j	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
x_1		2-11	5-10	7-6	5-9	11-2	6-8	5-10	10-5	11-3	13-2
x_2	11-2		11-1	15-0	10-4	15-0	13-2	10-4	15-0	15-0	15-0
x_3	10-5	1-11		15-0	10-5	15-0	12-3	10-4	14-1	15-0	15-0
x_4	6-7	0-15	0-15		3-12	10-4	4-9	4-10	10-4	7-2	14-1
x_5	9-5	4-10	5-10	12-3		12-3	8-6	7-6	12-2	12-3	15-0
x_6	2-11	0-15	0-15	4-10	3-12		3-9	3-12	6-9	6-8	12-2
x_7	8-6	2-13	3-12	9-4	6-8	9-3		9-4	11-3	11-3	14-1
x_8	10-5	4-10	4-10	10-4	6-7	12-3	4-9		12-2	12-3	15-0
x_9	5-10	0-15	1-14	4-10	2-12	9-6	3-11	2-12		7-8	14-0
x_{10}	3-11	0-15	0-15	2-7	3-12	8-6	3-11	3-12	8-7		13-2
x_{11}	2-13	0-15	0-15	1-14	0-15	2-12	1-14	0-15	0-14	2-13	

Cea mai controversată condiție, condiția de independență, parcă anume pentru a sublinia semnul de întrebare sub care este pusă, nu este îndeplinită. Pentru exemplificare s-au luat în considerare numai perechile de factori succesivi, din ierarhia finală, perechi la care probabilitatea apariției paradoxului este mai mare. "Scorurile" acestor relații sunt (între paranteze s-au prezentat relațiile de tipul $x_i \sim x_j$): $x_2 - x_3$: 11 - 3 (1); $x_3 - x_5$: 10 - 5 (0); $x_5 - x_8$: 7 - 6 (2); $x_8 - x_7$: 4 - 9 (2); $x_7 - x_1$: 8 - 6 (1); $x_1 - x_4$: 7 - 6 (2); $x_4 - x_9$: 10 - 4 (1); $x_9 - x_{10}$: 7 - 8 (0); $x_{10} - x_6$: 8 - 6 (1); $x_6 - x_{11}$: 12 - 2 (1). În ierarhiile primare, x_7 este preferat lui x_8 , cu scorul de 9 - 4, deci, $x_7 \succ x_8$, pe când în ierarhia finală, $x_8 \succ x_7$. Aceeași situație se constată și în cazul perechii de factori x_9 și x_{10} : în ierarhia finală $x_9 \succ x_{10}$, iar în ierarhiile primare, x_{10} este preferatul specialiștilor cu scorul de 8 - 7.

Ultima condiție este evident îndeplinită, deoarece se observă că nici una dintre ierarhiile de plecare nu coincide cu ierarhia finală. Deci, absența "dictatorului" este certă.

În concluzie, se poate afirma că și această metodă de agregare tip Borda, ilustrează convingător teorema de imposibilitate a lui Arrow, numai trei din cele patru condiții minimale de raționalitate fiind îndeplinite [107].

5. CONCLUZII

Cu toate că este una dintre cele mai noi metode de prelucrare dimensională a materialelor, eroziunea, datorită multiplelor sale avantaje, cunoaște o dezvoltare din ce în ce mai puternică, mai ales în domeniul tehnologic de vârf (prelucrarea unor materiale cu proprietăți excepționale, prelucrări microdimensionale, prelucrarea unor piese cu o configurație geometrică deosebit de complexă).

Eroziunea electrică, cel mai vechi și cel mai studiat procedeu al metodei erozive, nu și-a dezvoltat încă, întregul potențial. Datorită mulțimii și complexității aspectelor ce caracterizează eroziunea electrică, cercetătorii din domeniu nu s-au pus de acord în privința fenomenelor fundamentale aferente diferitelor mecanisme de prelevare de material, rămânând, astfel, destule "pete albe" pe harta cunoașterii procedurii.

O astfel de pată este constituită de zona cercetării privind optimizarea proceselor de prelucrare, în pofida faptului că aparatul matematic există și că, mai ales, a dat bune rezultate în alte domenii (chimie, metalurgie, așchiere etc.).

De pe aceste poziții, prezenta lucrare se dorește a fi o modestă contribuție a autorului ei, la optimizarea proceselor tehnologice, în cazul prelucrării dimensionale a materialelor metalice, prin eroziune electrică cu electrod masiv. Pentru rezolvarea problemei a fost necesară o abordare sistemică a problemei, considerând eroziunea electrică ca un sistem de acțiune tehnologică. Numărul mare de fenomene elementare ce se constituie în procesul eroziv,

a impus un număr impresionant de elemente intrare (factori de influență, parametri) și ieșire (indicatori de performanță, funcții obiectiv) ale sistemului.

Prima fază a optimizării a constat în identificarea, selectarea și clasificarea elementelor sistemului. Astfel, s-a putut trage o primă concluzie: cu toate că ponderea numerică a parametrilor regimului electric nu depășește 11 %, literatura de specialitate le acordă o atenție deosebită, peste 80 % din totalul bibliografiei studiate abordând acest aspect.

Întrucât o modelare matematică care să ia în considerare un număr atât de mare de factori este, practic, imposibilă, și-a impus prezența o fază anterioară modelării propriu-zise, premodelarea. În acest scop, factorii de influență și domeniile lor de variație, precum și indicatorii de performanță urmăriți au fost aleși pe baza experienței anterioare și pe baza datelor existente în literatura de specialitate. Această etapă a optimizării a condus la o a doua concluzie importantă: nu se poate vorbi, a priori, de importanța factorilor de influență, fiecare factor trebuie judecat în contextul concret al situației. Într-un caz, un factor poate avea o influență hotărâtoare în proces, în alt caz, același factor poate juca un rol total nesemnificativ. Totuși, abordând statistic problema (mod de abordare caracteristic sistemelor tehnologice complexe, cum este eroziunea electrică), se constată prezența frecventă, în rândurile factorilor de primă importanță, a doi parametri ai regimului electric, nivelul de intensitate a curentului și durata impulsului de curent. Acești factori, de fapt, determină energia introdusă în spațiul de lucru, mărime cu puternice influențe asupra multor indicatori de performanță.

În afara clasicii indicatori de performanță, pentru prima oară în literatura de specialitate, autorul, în colaborare, a propus definirea unor indicatori de performanță globali, complecși, care reflectă mai bine schimbul de energie și de substanță în procesul eroziv. Încercările de ameliorare a indicatorilor clasici, conduc la înrăutățirea valorilor celor globali, mai semnificativi. Faptul că acești indicatori de performanță nu au fost adoptați pe scară largă de cercetătorii din domeniul eroziunii electrice, are o dublă explicație: una subiectivă, legată de inerție și conservatorim și una obiectivă, legată de dificultatea intuirii sensului fizic al unui astfel de indicator, foarte complex.

Aceste aspecte au fost demonstrate de toate cele trei metode de premodelare utilizate: experimentul psihologic, experimentul factorial și bilanțul aleator. Prima dintre ele, cunoscută în țara noastră și sub numele de metoda corelației de rang, are convingătoare avantaje legate de faptul că nu necesită organizarea unui experiment în sens real, ci doar a unui, bazat pe

cunoștințele acumulate de specialiști din domeniu. *În mod cert, pe plan național și, probabil pe plan mondial, metoda experimentului psihologic a fost pentru prima dată aplicată eroziunii electrice de către autorul acestei lucrări.*

În etapa modelării, s-a constatat că modelele matematice, sub forma unor ecuații polinomiale de gradul 1 și de rang 1 sau 2, sunt adecvate, pentru 9 dintre cele 12 funcții obiectiv urmărite, concordanța dintre valorile estimate și cele observate (măsurate și calculate) depășind pragul considerat de către autor ca acceptabil, $R^2 = 90\%$. Cum adecvanța modelelor de grad 1, implică suprafețe de răspuns ale funcțiilor, fără zone extreme (maxim sau minim), rezultă că optimul acestor funcții nu a fost atins. Apare, astfel, necesitatea abordării unei noi etape, optimizarea funcțiilor obiectiv urmărite, care, din punct de vedere matematic, înseamnă determinarea valorilor factorilor de influență a funcției obiectiv, astfel încât, aceasta să aibe valoare extremă, minimă sau maximă, după caz.

Întrucât optimizarea tuturor celor 12 funcții obiectiv implică un volum de experimentări ce depășește, în actualele condiții, posibilitățile unui singur cercetător, autorul lucrării s-a limitat la o singură funcție, cel mai complex indicator de performanță, IP_3 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$]. Acesta raportează efectul util al prelucrării, prelevarea de material, la consumurile de manoperă, de material și de energie, precum și la calitatea suprafeței prelucrate, exprimată prin precizia și rugozitatea acesteia.

În urma experimentărilor efectuate și a prelucrării statistice a datelor obținute, s-au determinat domeniile de variație a factorilor de influență, care asigură optimul funcției IP_3 . *Rezultatele optimizării au fost verificate analitic, confirmându-se în totalitate și experimental, confirmându-se parțial.*

S-a constatat practic, că nu se poate pune problema optimizării simultane a tuturor funcțiilor obiectiv urmărite. Încercările de îmbunătățire a unor indicatori de performanță, conduc, invariabil, la înrăutățirea valorilor altora. Din acest motiv, beneficiarul operației trebuie să hotărască care este obiectivul prelucrării și, în măsura în care rezultatele optimizării diferiților indicatori sunt contradictorii, este nevoit să sacrifice optimul unuia sau altuia dintre ei.

În urma experienței practice acumulate (12 programe de experimentare și peste 200 de experiențe, unele chiar replicate de două sau trei ori), autorul propune o schema bloc de optimizare a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu electrod masiv. Schema bloc, prezentată în fig. 5.1., cu unele ajustări specifice, poate fi utilizată și în alte domenii de prelucrare dimensională

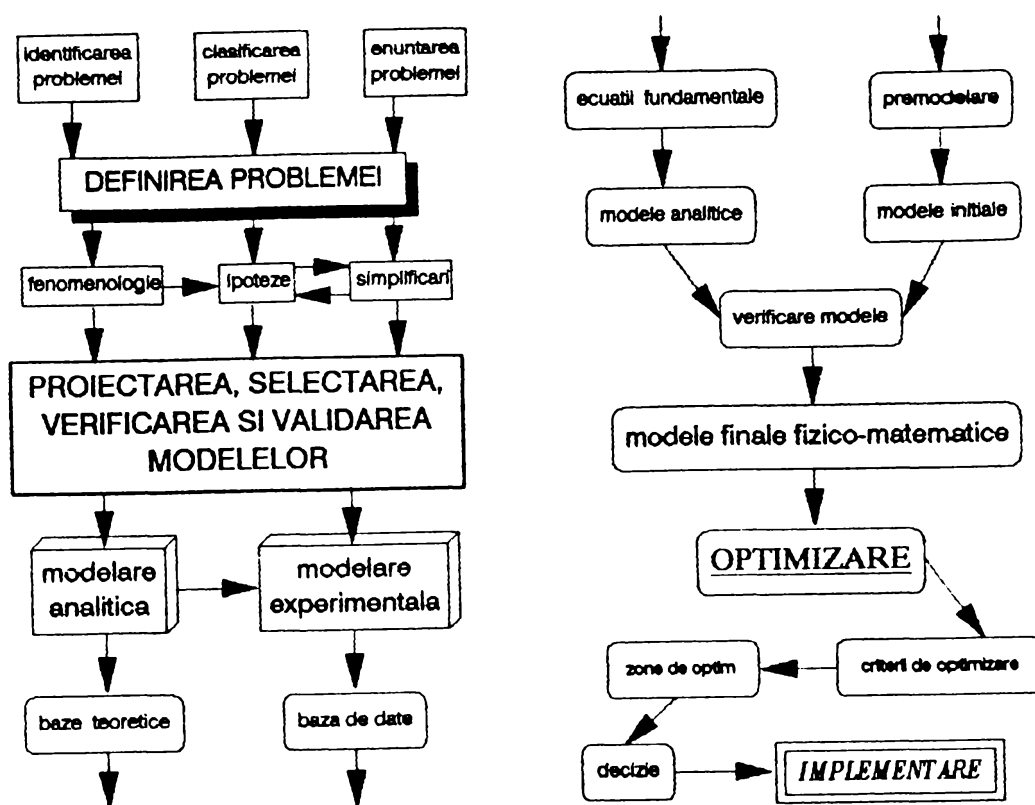


fig. 5.1. Schema bloc privind optimizarea prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu electrod masiv

În situația în care se pune problema alegerii celei mai bune variante, dintr-o mulțime finită de variante existente, algoritmul optimizării cunoaște modificări substanțiale. Întrucât variantele sunt evaluate cu ajutorul unei alte mulțimi finite de criterii de apreciere, optimizarea se transformă într-o problemă de decizie multiatribut multicriterială. În urma aplicării a 15 metode de alegere a variantei optime, dintr-un set de 4 variante de perforare prin eroziune electrică a unui disc de oțel, evaluate prin prisma a 6 criterii de apreciere, s-au constatat câteva aspecte semnificative.

Metodele folosite, nu numai că au propus, pe rând, drept variantă optimă, toate cele 4 variante luate în discuție, ci, chiar combinații ale acestora. Mai mult chiar, cele 15 metode de optimizare au propus 11 ierarhii diferite ale variantelor. Se remarcă, așadar, marea varietate de soluții ale aceleiași probleme de optimizare, situație datorată intervenției hotărâtoare a factorului subiectiv, personalitatea decidentului. Cu toate că, fiecare metodă stabilește un algoritmul clar de determinare a variantei optime, este foarte probabil ca, la aceeași problemă să

se oferă soluții diferite, în cazul în care problema este rezolvată, independent, de mai mulți decidenți. Se poate afirma că toate metodele de decizii multiatribut au domenii specifice de aplicare, prezintă unele avantaje sau facilități de lucru, dar au și unele neajunsuri, care nu pot fi ocolite.

De pe aceste poziții, se poate sublinia faptul că, abordarea problemei de optimizare, trebuie făcută cu multă precauție. Profesionalitatea, experiența, perseverența și chiar inspirația decidentului, într-un cuvânt personalitatea lui, sunt elemente care se suprapun peste cadrul rigid al matematicii, contribuind la atingerea scopului propus.

* * *

Elaborarea acestei teze a prilejuit autorului mai multe contribuții originale în studiul optimizării prelucrării dimensionale a materialelor metalice prin eroziune electrică cu electrod masiv. Dintre acestea se amintesc:

- în domeniul cercetării fundamentale:
 - identificarea, inventarierea și clasificarea factorilor de influență - mărimi întare în sistemul de acțiune tehnologică (parțial);
 - identificarea, inventarierea și clasificarea indicatorilor de performanță - mărimi ieșire din sistemul de acțiune tehnologică (parțial);
 - definirea indicatorilor de performanță globali, de tip productivitate specifică, IP_1 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}$], IP_2 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}$] și IP_3 [$\text{mm}^3/\text{min}\cdot\% \cdot \mu\text{m}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}$] (în colaborare);
 - modelarea matematică a 12 funcții obiectiv (indicatori de performanță), prin modele polinomiale de grad 1 și de rang 1 și 2 (interacțiuni de ordin 1 și 2);
 - modelarea matematică (model matematic de grad 2 și rang 2), prin extinderea domeniilor de variație a factorilor de influență, a funcției obiectiv IP_3 , în vederea optimizării ei;
 - alcătuirea unei scheme bloc ce permite construirea unor algoritmi de cercetare și prelucrare a datelor în vederea optimizării unor funcții obiectiv;
- în domeniul cercetării aplicative:
 - utilizarea experimentului psihologic în premodelarea matematică a funcțiilor obiectiv, în vederea ierarhizării factorilor de influență, cu scopul eliminării factorilor ne semnificativi și concentrării atenției asupra celor semnificativi;
 - confirmarea, pe trei căi diferite, a corectitudinii selectării factorilor de influență în vederea modelării matematice;

- organizarea unui complex de programe experimentale, bazate pe strategii moderne de cercetare (Box - Wilson), în vederea optimizării unor funcții obiectiv urmărite;
- verificarea experimentală și analitică a rezultatelor privind optimizarea funcției IP_3 .

* * *

Rezultatele cercetărilor prilejuite de elaborarea tezei, au fost parțial valorificate, printr-un număr de 32 lucrări (13, ca unic autor, iar 19, în calitate de coautor) comunicate și publicate la diferite manifestări științifice din țară și străinătate sau în diverse publicații științifice (reviste, buletine). De-asemena, ideile originale au fost protejate printr-un brevet de invenție (RO 98656/1990), un certificat de inovație (234/1989), o cerere de brevet de invenție și una de certificat de inovație.

* * *

Autorul este conștient de faptul că, prezenta lucrare nu a putut aborda exhaustiv problema optimizării tehnologice la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod masiv. Câteva dintre aceste probleme, conștientizate de autor, dar, din diferite motive, neabordate în teză, sunt:

- modelarea matematică a mai mult decât cele 12 funcții obiectiv studiate de autor;
- optimizarea și altor funcții decât a indicatorului de performanță global, IP_3 ;
- utilizarea și a altor metode de optimizare (metoda simplex, metoda gradientului), decât cea folosită de autor;
- utilizarea și a altor metode de decizii multicriteriale multiatribut (metoda eliminării prin aspecte, metoda diametrelor, metoda ELECTRE, metoda minimizării abaterii etc.);
- elaborarea și a altor modele matematice decât a cele polinomiale de diferite grade.

Fără nici un fel de îndoială că, în afara acestor aspecte, pe care autorul le-a trecut în revistă, mai există și multe altele nesemnificate.

* * *

Dacă metoda tehnologică reprezintă modul principial, teoretic de cunoaștere a unui proces, iar procedeul tehnologic reprezintă modul concret, practic de realizare a procesului, atunci, fiind permisă această "licență tehnologică", prezenta lucrare are meritul de a transforma optimizarea prelucrării dimensionale a materialelor metalice, prin eroziune electrică cu electrod masiv, din metodă, în procedeu.

6. BIBLIOGRAFIE

1. Achimescu, Nicolae, *Influența fazelor refractare disperse asupra rezistenței la eroziune electrică a materialelor de electrod*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

2. Achimescu, Nicolae, Olariu, Mircea, *Asupra domeniului de corelare a duratei impulsului cu timpul de pauză la prelucrarea prin eroziune electrică*, A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, vol. A+B, Timișoara, 1993

3. Achimescu, Nicolae, *Studiul procesului de generare a formelor spațiale la prelucrarea prin eroziune electrică - aspecte geometrice și substanțiale*, teză de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1983

4. Achimescu, Nicolae, *Tehnologia materialelor*, vol. II, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1987

5. Achimescu, N., Moldovanu, Emilia, Suciu, V., Olariu, M., *Structura și stabilitatea la eroziune electrică a electrozilor din cupru sinterizat*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

6. Achimescu, N., *Sistemul de acțiune tehnologică la prelucrarea prin eroziune electrică*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

7. Andrașiu, M., Baclu, Aurora, Pascu, Ana, Pușcaș, Elena, Tașnați, Al., *Metode de decizii multicriteriale*, Editura Tehnică, București, 1986

8. Andraşiu, M., Calude, C., Păun, Gh., *Extinderi ale problemei deciziilor multicriteriale*, Revista de statistică, nr. 11, 1980
9. Andraşiu, M., Calude, C., Păun, Gh., *Posibilităţi de agregare a deciziilor multicriteriale*, Revista Studii şi cercetări matematice, nr. 2, 1984
10. Arrow, K., *Social Choise and Individuals Values*, John Wiley Publ., New York, 1983
11. Baci, A., Pascu, A., *Decizii multicriteriale, decizii fuzzy*, Al VII-lea Simpozion de informatică şi conducere, Cluj-Napoca, 1981
12. Baci, A., Pascu, A., Puşcaş, E., *Soluţii nedominate în problema deciziilor multicriteriale multiobiectiv*, Modelarea cibernetică a proceselor de producţie, vol. I, A. S. E., Bucureşti, 1984
13. Balaban, Cornelia, *Strategia experimentării şi analiza datelor experimentale*, Editura Academiei Române, Bucureşti, 1993
14. Boldur, Gh., *Asupra deciziilor multicriteriale*, Revista Studii şi cercetări de calcul economic şi cibernetică economică, nr. 4, 1980
15. Бондарь, А. Г., Статюха, Г. А., *Планирование эксперимента в химической технологии*, Издательского объединения "Вища школа", Киев, 1976
16. Бондарь, А. Г., Статюха, Г. А., Потяженко, И. А., *Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии*, Издательского объединения "Вища школа", Киев, 1980
17. Brauner, W., *Controlled, Bipolar Pulses in the Electro-Discharge Machining*, Anals of the C. I. R. P., vol 3/2, 1973
18. Bucur, C. M., *Metode numerice*, Editura Facla, Timişoara, 1973
19. Buracu, Mihail, Vodă, Viorel Gh., *Tehnici moderne în controlul statistic al calităţii*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1989
20. *** *Cartea maşinii de prelucrat prin eroziune electrică ELER-01, GEP 50 F*, Electrotimiş, Timişoara, 1978
21. Cicală, Eugen Florin, *Optimizarea proceselor de tăiere conturată cu laser a metalelor*, teză de doctorat, Universitatea "Politehnica", Timişoara, 1997
22. *** *Dicţionarul explicativ al limbii române*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, Bucureşti, 1975
23. Dima, Gabriel, Dima, Mihai, *Tehnoredactare computerizată în Word 6*, Editura Teora, Bucureşti, 1996

24. **Dragomir, Emil**, *Cercetări cu privire la optimizarea prelucrării prin eroziune electrică a carburilor metalice*, Referat 3 pentru teza de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1978
25. **Dragomir, Emil**, *Modelarea matematică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure tip G 60 în regim de degroșare*, A II-a Conferință națională "Echipamente și tehnologii noi în industria constructoare de mașini", Craiova, 1987
26. **Dragomir, Emil**, *Program de calcul privind ordonarea parametrilor procesului de prelucrare prin eroziune electrică după amplitudinea efectului produs*, Sesiunea "Creația tehnică și fiabilitatea în construcția de mașini", Ediția a V-a, Iași, 1985
27. **Dragomir, Emil**, *Studiul prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică a carburilor metalice*, referat 2 pentru teza de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1978
28. **Gavrilaș, Ionel, Ștefăniță, Enache, Opran, Constantin, Teodorescu, Marius, Zaharia, Narcis, Rusnac, Marian**, *Cercetări privind prelucrarea orificiilor prin electroeroziune folosind vibrarea forțată a electrodului sculă*, Simpozion "Tehnomus '87", Suceava, 1987
29. **Gavrilaș, I., Opran, C., Teodorescu, M.**, *Prelucrarea cavităților prin eroziune cu electrod orbital*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983
30. **Ghinea, M., Fireșteanu, V.**, *MATLAB - calcul numeric, grafică, aplicații*, Editura Teora, București, 1995
31. *** *Guide pratique d'usinage par étincelage*, Ateliers des Charmilles S. A., Geneve, 1975
32. **Holmes, Ron, Elden, Nelson**, *Word 6 pentru Windows în 463 imagini*, Editura Teora, București, 1995
33. **Hwang, C. L., Yoon, K.**, *Multiple Attribute Decision Making*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981
34. **Ijiri, Y.**, *Management Goals and Accounting for Control*, North Holland Publishing, Amsterdam, 1965
35. **Kornbluth, J. S.**, *Ranking with Multiple Objectives*, Springer Verlag, New York, 1978
36. **Kraynak, Joe**, *Quattro Pro 6*, Editura Teora, București, 1995

37. *** *Machines d'usinage par étincelage Charmilles D 420 et D 420 ISOCUT*, Ateliers des Charmilles S. A., Geneve, 1980
38. Mac Crimmon, K. R., *Decision Making Among Multiple Attribute Alternatives, A Survey and Consolidated Approach*, RAND Memorandum RM-4823-ARPA, Santa Monica, California, 1968
39. Margalit, A., Bar-Hiller, M., *The Gideon Paradox or Choose Irrationally It's the Rational Way to Choose*, Das 7. Internationale Kongreß von der Logik, Methodologie und Philosophie der Wissenschaft, Salzburg, 1983
40. Marinceu, Dimitrie Marius Gheorghe, Olariu, Mircea Petru, Slavici, Titus, Mighiu, Constantin, *Dispozitiv de prelucrat prin electroeroziune, brevet de invenție RO 98656*, Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci, București, 1989
41. Marinceu, Dimitrie, *Modelarea statistică a principalilor indicatori de performanță cantitativi la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod masiv*, A II-a Conferință națională "Echipamente și tehnologii noi în industria constructoare de mașini", Craiova, 1987
42. Marinceu, Dimitrie, Slavici, Titus, Mighiu, Constantin, *Modelarea statistică a principalilor indicatori de performanță calitativi la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod masiv*, A II-a Conferință națională "Echipamente și tehnologii noi în industria constructoare de mașini", Craiova, 1987
43. Marinceu, D., *Metodă de înlăturare a abaterilor de poziționare a electrozilor la prelucrarea prin electroeroziune cu electrod masiv*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983
44. Marinceu, D., *Rezultate ale încercărilor experimentale de prelucrare prin electroeroziune cu electrod masiv ale oțelului VCW 85*, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice "Activitatea de cercetare și proiectare în sprijinul producției", Arad, 1985
45. Marinescu, Nicolae Ion, Marinescu, Radu Dumitru, *Aspecte privind curgerea dielectricului la prelucrarea prin electroeroziune a suprafețelor cu profile de revoluție*, Acta Universitatis Cibiniensis, Seria Tehnică, vol. XVI, Sibiu, 1995
46. Marinescu, Nicolae Ion, Marinescu, Radu Dumitru, *Contribuții privind concepția unor echipamente pentru filetarea interioară prin electroeroziune*, Acta Universitatis Cibiniensis, Seria Tehnică, vol. XVI, Sibiu, 1995
47. Marinescu, Nicolae Ion, Marinescu, Radu Dumitru, Cristea, Radu, *Contribuții privind analiza curgerii dielectricului la prelucrarea prin electroeroziune a suprafețelor de*

revoluție, A VII-a Conferință internațională de inginerie managerială și tehnologică "Tehno '95", partea a III-a, Timișoara, 1995

48. Marinescu, Nicolae Ion, Nanu, Dan, Marinescu, Radu Dumitru, Al Gathian, Moh'd, *Unele aspecte privind tehnologia de filetare extertoadă electroerozivă*, A VII-a Conferință internațională de inginerie managerială și tehnologică "Tehno '95", partea a III-a, Timișoara, 1995

49. *** *MATLAB - User Guide*, The Math Works Inc., Natick, 1992

50. Mărcușanu, Aurel, *Sistem de avans automat cu motor pas cu pas la mașinile de prelucrat prin eroziune electrică*, teză de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1986

51. Мельников, С. В., Алешкин, В. Р., Рошин, П. М., *Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов*, "Колос", Ленинград, 1980

52. Micșa, Petru, Olariu, Mircea, *Metode statistice de evidențiere a factorilor semnificativi la prelucrarea prin eroziune electrică*, Sesiunea de comunicări pentru tineret "Universul tehnic și viitorul în construcția de mașini", Timișoara, 1988

53. Mihail, R., *Introducere în strategia experimentării, cu aplicații din tehnologia chimică*, Editura științifică și enciclopedică, București, 1976

54. Mihăilă, I., *Contribuții privind obținerea prin galvanoplastie a electrozilor pentru prelucrări prin electroeroziune*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

55. Montgomery, Douglas C., *Design and Analysis of Experiments*, 3 edition, John Wiley & Sons, New York, Chicester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1991

56. Налимов, В. В., Чернова, Н. А., *Статистические методы планирования экстремальных экспериментов*, Наука, Москва, 1965

57. Nanu, A., Dragomir, E., Achimescu, N., *Stabilirea ordinii de influență a parametrilor reglabili asupra productivității prelucrării prin eroziune electrică a carburilor metalice de tip G-10*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

58. Nanu, A., Marinceu, D., Reviczky, A., *Rezultate ale încercărilor experimentale de prelucrare prin electroeroziune cu electrod rotativ ale oțelului C 120*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

59. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A., *Conducerea automată a avansului la maşinile de prelucrat prin eroziune electrică*, A II-a Conferinţă naţională "Echipamente şi tehnologii noi în industria constructoare de maşini", Craiova, 1987
60. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A., *Implementarea elementelor componente în structura sistemului de reglare automată la maşina de prelucrare prin electroeroziune ERC-1*, A IV-a Conferinţă naţională de tehnologii neconvenţionale, Timişoara, 1983
61. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A., *Testarea rapidităţii de răspuns la maşinile de prelucrat prin eroziune electrică*, A II-a Conferinţă naţională "Echipamente şi tehnologii noi în industria constructoare de maşini", Craiova, 1987
62. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A., *Variantă de sistem de reglare automată a avansului la prelucrarea prin eroziune electrică*, A IV-a Conferinţă naţională de tehnologii neconvenţionale, Timişoara, 1983
63. Nanu, A., Olariu, M., *Asupra importanţei factorilor de influenţă în procesul electroeroziv*, Zilele academice timişene, ediţia a V-a, Timişoara, 1997
64. Nanu, Aurel, Nanu, Dan, *Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic*, Editura Facla, Timişoara, 1981
65. Nanu, Aurel, Popa, H., Achimescu, N., Nichici, Al., *Criterii de selecţie a procedeelor de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv*, A IV-a Conferinţă naţională de tehnologii neconvenţionale, Timişoara, 1983
66. Nanu, Aurel, Popa, H., *Precizia prelucrării electroerozive cu copierea formei*, Simpozion "Tehnologiile neconvenţionale, mijloc de ridicare a eficienţei tehnico-economice în construcţia de maşini", Timişoara, 1986
67. Nanu, Aurel, Popovici, I., *Cu privire la influenţa mărimii interstiţiului asupra eficienţei prelucrării prin eroziune electrică*, A IV-a Conferinţă naţională de tehnologii neconvenţionale, Timişoara, 1983
68. Nanu, Aurel, *Tehnologia materialelor*, Editura Didactică şi pedagogică, Bucureşti, 1977
69. Nanu, Dan, Diaconescu, Constantin, Roşca, Liviu, *Aspecte privind influenţa câmpului electric din interstiţiu asupra evoluţiei formei electrodului sculă, la prelucrarea prin eroziune electrică*, A V-a Conferinţă naţională de tehnologii neconvenţionale în prelucrarea materialelor, Timişoara, 1989

70. Nanu, Dan, Oprean, Constantin, Țițu, Mihai, *Analiza mișcării purtătorilor de sarcină electrică în perioada descărcărilor la prelucrarea prin eroziune electrică în câmp magnetic*, Revista de tehnologii neconvenționale, nr. 1/97, Timișoara, 1997

71. Nanu, Dan, Țițu, Mihai, Roșca, Nicolae, *Aspecte privind modelarea matematică a mișcării particulelor în interstițiul eroziv la prelucrarea prin eroziune electrică în câmp magnetic*, Acta Universitatis Cibisiensis, Seria Tehnică, vol. XVI, Sibiu, 1995

72. Nanu, D., *Considerații asupra funcțiilor sistemului de lichid dielectric al mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică*, Revista Construcția de mașini, nr. 2, București, 1976

73. Nanu, D., Dușe, D., Oprean, C-tin, Cristiu, M., *Mașini de prelucrare prin eroziune electrică cu avans modulat pe direcțiile X, Y, Z*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

74. Nanu, D., Urdaș, V., *Studiul microscopic al zonei influențate termic la prelucrarea prin eroziune electrică în câmp magnetic cu electrozi-sculă din oțel*, A III-a Conferință de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1978

75. Nanu, D., Urdaș, V., *Aspecte ale influenței câmpului magnetic asupra microstructurii zonei influențate termic la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrozi-sculă din cupru*, Sesiunea științifică a Institutului Politehnic, Cluj-Napoca, 1978

76. Nekrasevitch, I. G., Bakuto, I. A., *Study of Electro-Erosion Phenomena on the Surface of a Double Layer Electrode*, Elek. Obrab. Mat., No 3, 1965

77. Nichici, Al., Achimescu, N., Popovici, I., Dragomir, E., Mărcușanu, A., Olariu, M., Marinceu, D., Reviczky, A., Herman, R., Gavrilă, F., *Aspecte energetice ale prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică*, Simpozion "Tehnologiile neconvenționale, mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini", Timișoara, 1986

78. Nichici, Alexandru, Achimescu, Nicolae, Popovici, Vasile, Poșta, Horia, Nica, Mihai, Paulescu, Gheorghe, *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*, Editura Facla, Timișoara, 1983

79. Nichici, Alexandru, Cicală, Eugen, Mee, Robert, *Prelucrarea datelor experimentale, Curs și aplicații*, Universitatea "Politehnica", Timișoara, 1996

80. Nichici, Alexandru, Mehedinteanu, Mărgărit, *Dinamica generării microgeometriei suprafeșelor prelucrate prin eroziune electrică*, Simpozion "Tehnopus '87", Suceava, 1987

81. Nichici, Alexandru, Olariu, Mircea, Marinceu, Dimitrie, Oprea, Mihai, *Indici de performanță al prelucrării prin eroziune electrică*, Sesiunea "Creația tehnică și fiabilitatea în construcția de mașini", Ediția a V-a, Iași, 1985
82. Nichici, Alexandru, *Tehnologia materialelor*, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1979
83. Nichici, Al., Oprea, Mihai, Olariu, Mircea, *Les valeurs optimales du courant de travail a l'usinage par électro-érosion*, A V-a Conferință de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1986
84. Nichici, Al., Oprea, M., Olariu, M., Marinceu, D., *Modele statistique des processus technologiques d'usinage par érosion électrique a électrode massive*. Buletinul științific și tehnic al Institutului Politehnic "Traian Vuia", Tomul 32(48), Fascicola 1-2, Timișoara, 1987
85. Nichici, Al., Paulescu, Gh., Potroviță, N., *Contribuții la studiul rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983
86. Nichici, A., Marinceu, D., Olariu, M., Potroviță, N., *Modelarea statistică a indicatorilor de performanță cantitativi la prelucrarea prin eroziune electrică pe mașini ELER*, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice "Activitatea de cercetare și proiectare în sprijinul producției", Arad, 1985
87. Nichici, A., Olariu, M., Oprea, M., Marinceu, D., *Evaluarea statistică a unor indicatori de performanță calitativi la prelucrarea prin eroziune electrică pe mașini de tip ELER*, Sesiunea științifică a Facultății de Electrotehnică, Iași, 1986
88. Nichici, A., Paulescu, Gh., Potroviță, N., *Analiza comparativă a microgeometriei suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică și rectificare*, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice "Activitatea de cercetare și proiectare în sprijinul producției", Arad, 1985
89. Nichici, A., Popovici, I., Achimescu, N., Dragomir, E., Mărcușanu, A., Olariu, M., Marinceu, D., Reviczky, A., Oprea, M., Slavici, T., *Influența formei impulsurilor de curent asupra prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică*, Simpozion "Tehnologiile neconvenționale, mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini", Timișoara, 1986
90. Новик, Ф. С., Арсов, Я. Б., *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов*, Машиностроение, Москва, Техника, София, 1980

91. Olariu, M., *Die Bestimmung der Einflußfaktoren auf die Qualität der Oberflächen, die durch elektrische Erosion erhalten wurden, mit der Methode des psychologischen Experiments*, Buletinul științific și tehnic al Universității Tehnice, Tomul 39(53), Fascicola 1-2, Timișoara, 1994

92. Olariu, Mircea, *Alegerea variantei optime de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv cu metoda agregării de clasamente*, Acta Universitatis Cibiniensis, Seria Tehnică, vol. XVI, Sibiu, 1995

93. Olariu, Mircea, Botea, Traian, Herman, Richard, Oprea, Mihai, *Metode de decizii multicriteriale utilizate în optimizarea eroziunii electrice cu electrod masiv*, A III-a Conferință științifică internațională "Mașini și tehnologii moderne", vol. 2, Cugir, 1995

94. Olariu, Mircea, *Determinarea prin metoda experimentului psihologic a factorilor de influență a calității suprafețelor obținute prin eroziune electrică*, A XI-a Sesiune de comunicări științifice și referate, Constanța, 1988

95. Olariu, Mircea, *Evidențierea factorilor semnificativi la prelucrarea prin eroziune electrică prin metoda experimentului psihologic*, A II-a Conferință națională "Echipe și tehnologii noi în industria constructoare de mașini", Craiova, 1987

96. Olariu, Mircea, Herman, Richard, *Stabilirea variantei optime de prelucrare prin eroziune electrică cu ajutorul metodelor directe de decizii multiatribut cu preferințe cardinale ale criteriilor*, Prima Conferință Națională "Optimizarea proiectării și a tehnologiilor de prelucrare în construcția de mașini - OPROTEH '95", vol. II, TSMT-1, Bacău, 1995

97. Olariu, Mircea, Marinceu, Dimitrie, Potroviță, Nicolae, Ghiță, Mihal, *Evaluarea statistică a mărimii interstițiului lateral la prelucrarea prin eroziune electrică*, A XI-a Sesiune de comunicări tehnico-științifice, Brăila, 1985

98. Olariu, Mircea, *Modelarea statistică a interstițiului tehnologic prin metoda experimentului psihologic la prelucrarea prin eroziune electrică*, Simpozion "Tehnomus '87", Suceava, 1987

99. Olariu, Mircea, *Modele de decizii multiatribut cu preferințe ordinale ale criteriilor utilizate la optimizarea eroziunii electrice cu electrod masiv*, Zilele academice timișene, ediția a IV-a, Timișoara, 1995

100. Olariu, Mircea, Oprea, Mihai, *Modelle von Multiattribut-Entscheidungen mit Präferenzen von Kardinalzahltyp, die bei der Optimierung des funkenerosiven Abtragens angewandt werden*, Buletinul științific, Seria Mecanică, Tom 40(54), Timișoara, 1995

101. Olariu, Mircea, *Optimizarea eroziunii electrice cu electrod masiv cu ajutorul informațiilor sub forma ratelor marginale de substituire*, Conferința internațională de comunicări științifice "Tehnologii moderne în construcția de mașini TMCM '96", vol. III, Iași, 1996

102. Olariu, Mircea, *Ordonarea factorilor de influență a productivității prelucrării prin eroziune electrică prin metoda agregării de clasamente*, Sesiunea de comunicări științifice a Universității "Aurel Vlaicu", vol. II, Arad, 1994

103. Olariu, Mircea, *Ordonarea factorilor de influență a rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică cu ajutorul metodei corelației de rang*, Zilele academice timișene, ediția a III-a, Timișoara, 1993

104. Olariu, Mircea Petru, *Modelarea fizico-matematică a fenomenelor din prelucrarea prin eroziune electrică*, referat 2 pentru teza de doctorat, Universitatea Tehnică, Timișoara, 1994

105. Olariu, Mircea Petru, *Optimizarea globală a procesului de prelucrare prin eroziune electrică*, referat 3 pentru teza de doctorat, Universitatea Tehnică, Timișoara, 1994

106. Olariu, Mircea Petru, *Stadiul actual al optimizării prelucrării dimensionale prin eroziune electrică*, referat 1 pentru teza de doctorat, Universitatea Tehnică, Timișoara, 1993

107. Olariu, Mircea, *Raționalitatea metodei de agregare folosită de experimentul psihologic în ierarhizarea factorilor prelucrării prin eroziune electrică*, Revista de tehnologii neconvenționale, nr. 1/97, Timișoara, 1997

108. Olariu, Mircea, *Stabilirea variantei optime de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv, cu ajutorul metodei permutării*, A VII-a Conferință internațională de inginerie managerială și tehnologică "Tehno '95", partea a III-a, Timișoara, 1995

109. Olariu, M., Marinceu, D., Ghiță, M., *Factori de influență a mărimii interstițiului tehnologic lateral la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod masiv*, Analele Universității din Oradea, Fascicula mecanică, Secția: Tehnologii în construcția de mașini, Oradea, 1994

110. Olariu, M., *Modele de decizii multiatribut cu informații asupra criteriilor dependente, utilizate la optimizarea eroziunii electrice cu electrod masiv*, Sesiunea anuală a Universității, Oradea, 1995

111. Olariu, M., *Optimizarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod masiv prin metode de decizii multiatribut*, Analele Universității din Oradea, Fascicola mecanică Secția: Tehnologii în construcția de mașini, Oradea, 1994.

112. Olariu, M. P., Oprea, M. C., *Die mathematische Modellierung der Indikatoren der Bearbeitungsgenauigkeit durch Funkenerosion mit massiven Elektroden*, Международная научно-техническая конференция "Точность автоматизированных производств", Пенза, Россия, 1997

113. Olariu, M., Vasilescu, M., *Verificarea raționalității metodelor de agregare folosite la optimizarea eroziunii electrice*. Analele Universității din Oradea, Fascicola mecanică, Secțiunea: 1. Tehnologii clasice și moderne, 2. Mașini, utilaje și echipamente tehnologice, Oradea, 1997

114. Onicesu, O., *Procedee de estimare comparativă a unor obiecte purtătoare de mai multe caracteristici*, Revista de statistică, nr. 4, 1970

115. Oprea, Mihai, Herman, Richard, Olariu, Mircea, *Aspecte privind stratul modificat structural la prelucrarea oțelurilor de scule prin eroziune electrică*, A II-a Conferință națională "Echipamente și tehnologii noi în industria constructoare de mașini", Craiova, 1987

116. Păun, Gheorghe, *Paradoxurile clasamentelor*, Editura științifică și enciclopedică, București, 1987

117. Păun, Gh., Tașnadi, Al., *Asupra unor metode de decizie multicriterială*, Revista de statistică, nr. 10, 1977

118. Petrescu, Valentin, *Cercetări privind prelucrarea prin eroziune electrică a carburilor metalice*, A VII-a Conferință internațională de inginerie managerială și tehnologică "Tehno '95", partea a III-a, Timișoara, 1995

119. Petrescu, Valentin, *Considerații asupra prelucrării carburilor metalice de tip C 60 prin eroziune electrică*, A VII-a Conferință internațională de inginerie managerială și tehnologică "Tehno '95", partea a III-a, Timișoara, 1995

120. Petrescu, Valentin, *Influența parametrilor prelucrării prin eroziune electrică a oțelului austenitic manganos asupra rugozității suprafeței*, A VII-a Conferință internațională de inginerie managerială și tehnologică "Tehno '95", partea a III-a, Timișoara, 1995

121. Popescu, Iulian, *Optimizarea procesului de așchiere*, Editura Scrisul românesc, Craiova, 1987

122. Popovici, I., *Influența parametrilor de lucru asupra rugozității suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

123. Popovici, I., Mărcușanu, A., *Interpretarea tehnologică și matematică a curbelor de productivitate - treaptă de curent la prelucrarea prin eroziune electrică pe mașina ELER-01*, Simpozion "Tehnomus '87", Suceava, 1987

124. Pumnea, C., Ioniță, N., Șontea, S., *Tehnologii din industria metalurgică și prelucrătoare*, Editura Didactică și pedagogică, București, 1979

125. Roșca, Liviu-Ion, *Contribuții tehnologice și manageriale privind prelucrarea suprafețelor prin eroziune electrică cu rupere de contact*, teză de doctorat, Universitatea "Politehnica", Timișoara, 1996

126. Savas, E. S., *Conducerea cu calculatoare a proceselor tehnologice*, Editura Tehnică, București, 1969

127. Simu, D., Gheorghitoiu, D., Bompa, D., *Echipament de poziționare pentru mașina de prelucrat prin electroeroziune cu electrod masiv EP-1*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

128. Soită, D., *Reprezentarea funcțional-structurală a unui sistem de avans automat*, Analele Universității din Oradea, Fascicula mecanică, Secțiunea: Tehnologia construcțiilor de mașini, Oradea, 1994

129. Srinivasan, V., Shocker, A. D., *Estimating the Weights for Multiple Attributes in a Composite Criterion Using Pairwise Judgements*, Psychometrika, vol. 38, nr. 4, 1973

130. Stanciu-Minasian, I. M., *Programarea stochastică cu mai multe funcții obiectiv*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1980

131. *** *Studii și cercetări privind elaborarea unor norme interne de testare tehnologică a mașinilor de tip ELER*, Contract de cercetare nr. 73/85, beneficiar Electrotimiș Timișoara, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1985

132. Șoaita Dumitru, Obaciu, Gheorghe, *Abordarea sistemică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică*, Conferința internațională de comunicări științifice "Tehnologii moderne în construcția de mașini TMCM '96", vol. III, Iași, 1996

133. Taloi, D., Bratu, C., Florian, E., Berceanu, E., *Optimizarea proceselor metalurgice*, Editura didactică și pedagogică, București, 1983

134. Taloi, Dragoș, *Optimizarea proceselor tehnologice, aplicații în metalurgie*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1987

135. **Tăroată, A.**, *Punct de vedere asupra abordării sistemice a proceselor tehnologice electroerozive*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983

136. **Van Dijck, F., Crookall, I. R., Heuvelman, C. J., Snoyes, R.**, *Some Results of Physical Research in E. D. M., I S. E. M.*, Wien, 1974

137. **Voicu, M., Gladcov, P., Amza, Gh., Szel, P., Drimer, D., Iova, R.**, *Tehnologia materialelor*, Editura Didactică și pedagogică, București, 1981

138. **Warter, Iulian, Slătineanu, Laurențiu**, *Aspecte privind prelucrarea prin electroeroziune cu electrod masiv a suprafețelor polimorfe*, A VII-a Conferință internațională de inginerie managerială și tehnologică "Tehno '95", partea a III-a, Timișoara, 1995

139. **Warter, Iulian, Slătineanu, Laurențiu**, *Prelucrarea suprafețelor polimorfe prin electroeroziune cu electrod masiv*, Conferința internațională de comunicări științifice "Tehnologii moderne în construcția de mașini TCM '96", vol III, Iași, 1996

140. **Wertheim, R.**, *Untersuchung der energetischen Vorgänge bei der funkenerosiven Bearbeitung als Grundlage für eine Verbesserung des Prozessablaufs*, Dissertation, Aachen, 1975

141. **Williams, W. W.**, *Non Traditional Machining Processes*, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1967

142. **Zidăroiu, C.**, *Programarea liniară*, Editura Tehnică, București, 1981

143. **Zingerman, A. S.**, *Regarding the Problem of the Volume of Molten Metal During Electrical Erosion*, Soviet Physics-Solid, no. 1, 1959

144. **Zolotych, B. N.**, *Phänomenologische Theorie der funkenerosiven Massbearbeitung*, I. S. E. M., Wien, 1974

7. ANEXE

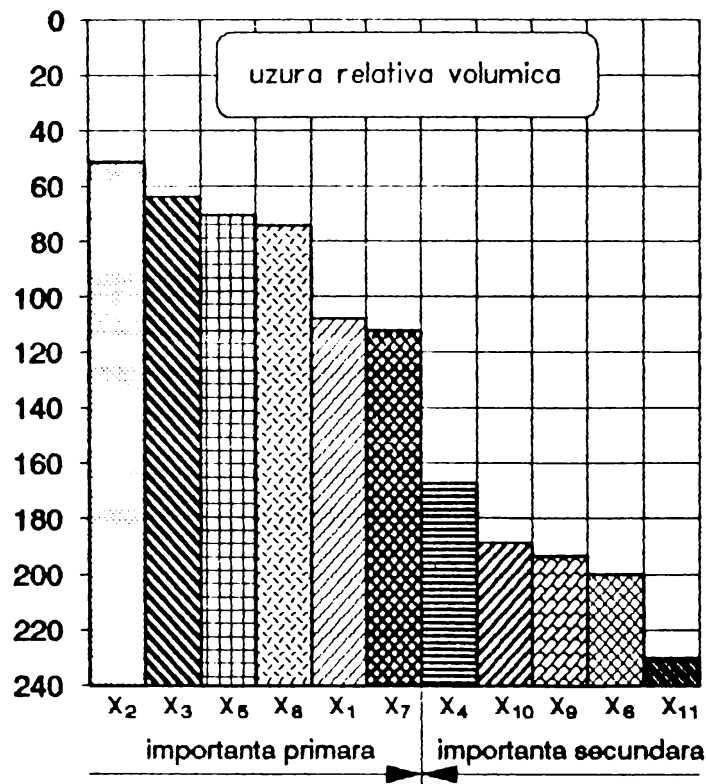


fig. 7.1. Ordinea factorilor de influență a uzurii relative volumice

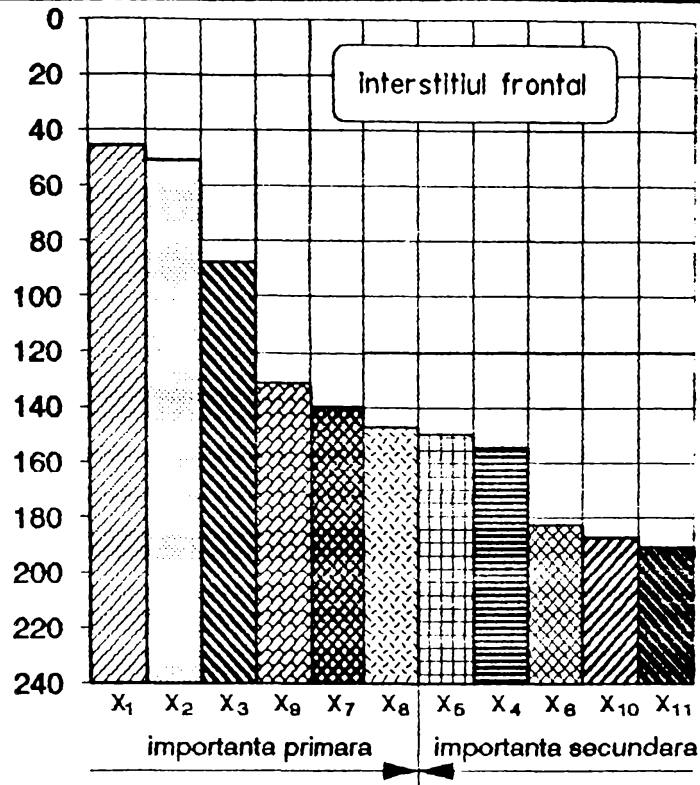


fig. 7.2. Ordinea factorilor de influență a mărimii interstiului frontal

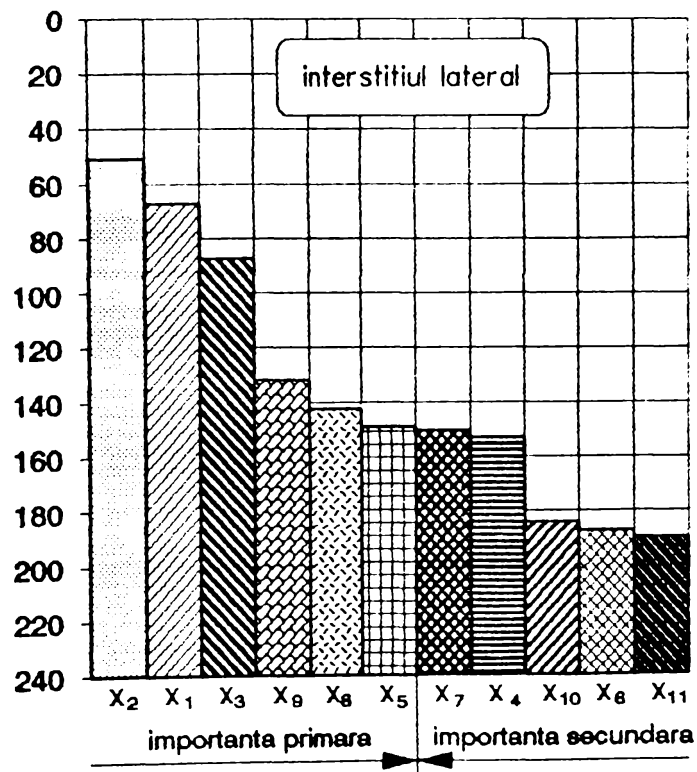


fig. 7.3. Ordinea factorilor de influență a mărimii interstiului lateral

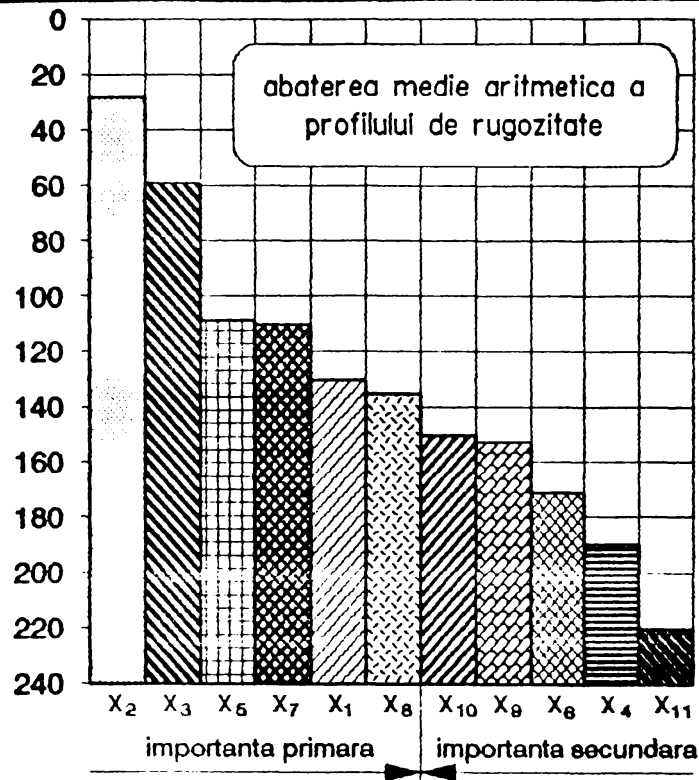


fig. 7.4. Ordinea factorilor de influență a abaterii medii aritmetice a profilului de rugozitate

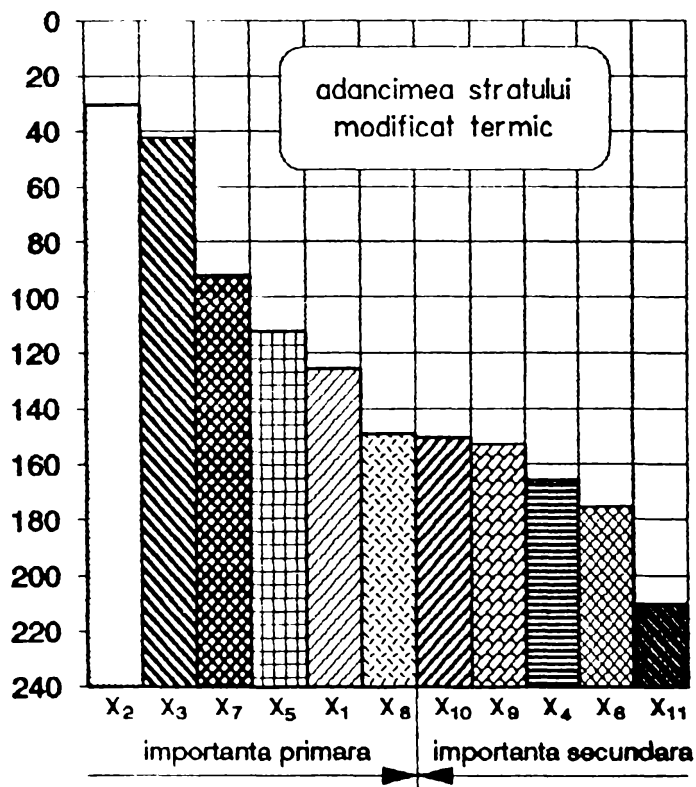


fig. 7.5. Ordinea factorilor de influență a grosimii stratului modificat termic

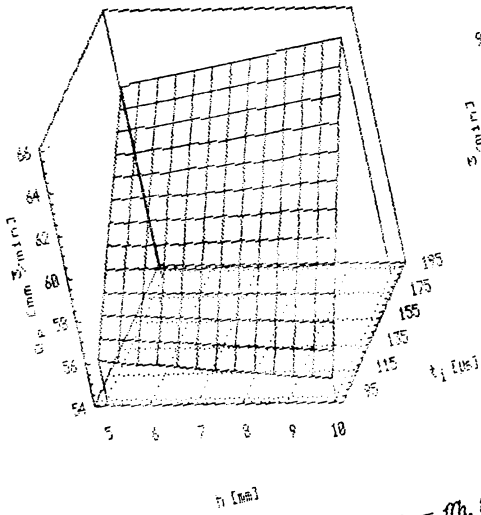


fig. 7.6. Suprafața de răspuns $Q_p = f(h, t_i)$

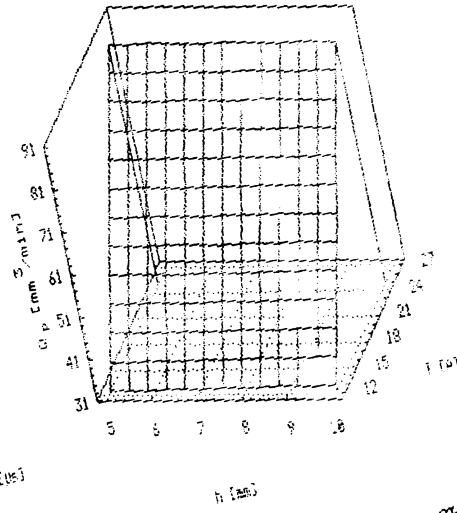


fig. 7.7. Suprafața de răspuns $Q_p = f(h, I)$

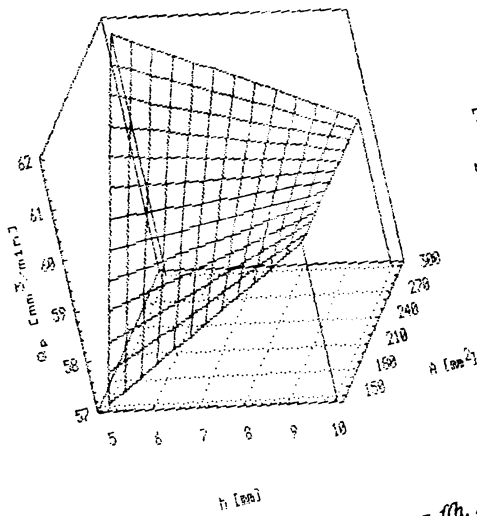


fig. 7.8. Suprafața de răspuns $Q_p = f(h, A)$

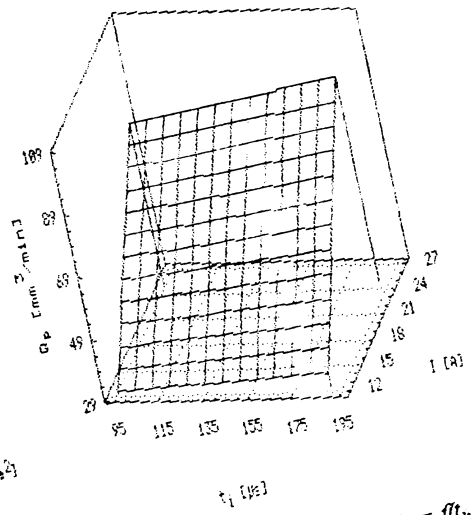


fig. 7.9. Suprafața de răspuns $Q_p = f(t_i, I)$

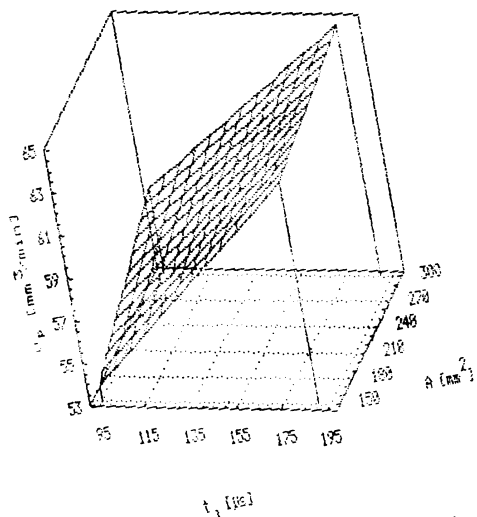


fig. 7.10. Suprafața de răspuns $Q_p = f(t, A)$

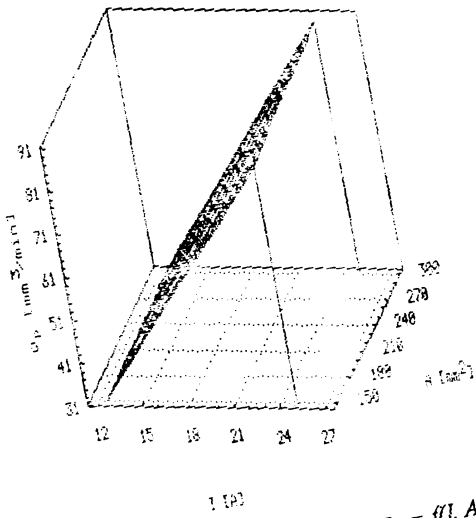


fig. 7.11. Suprafața de răspuns $Q_p = f(I, A)$

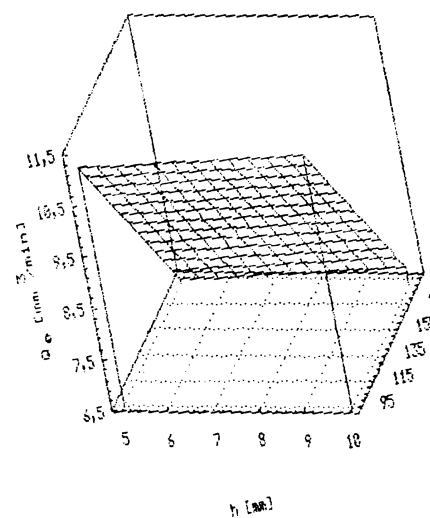


fig. 7.12. Suprafața de răspuns $Q_p = f(h, t)$

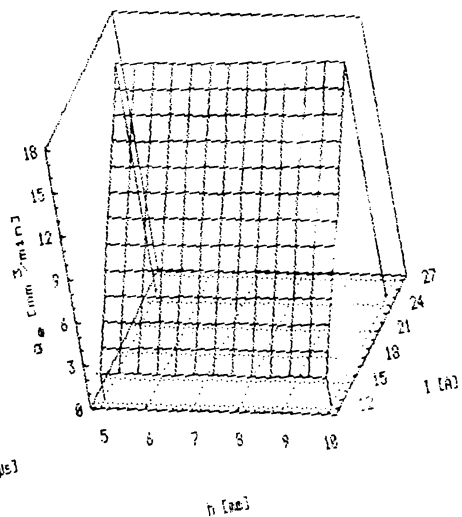


fig. 7.13. Suprafața de răspuns $Q_p = f(h, I)$

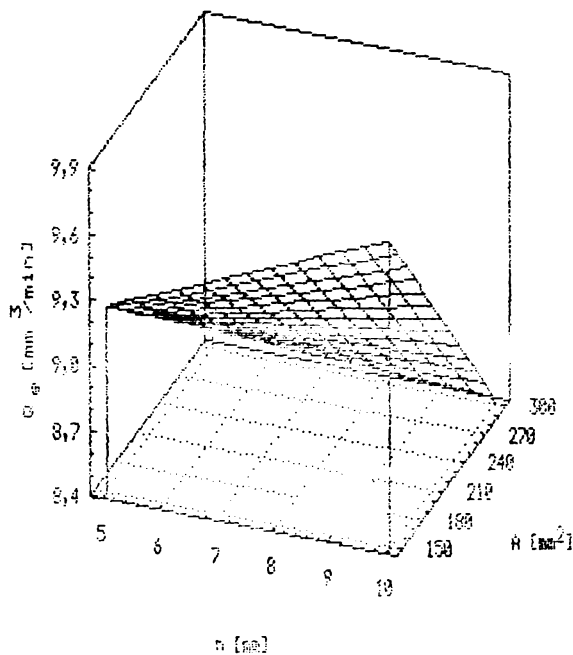


fig. 7.14. Suprafața de răspuns $Q_s = f(h, A)$

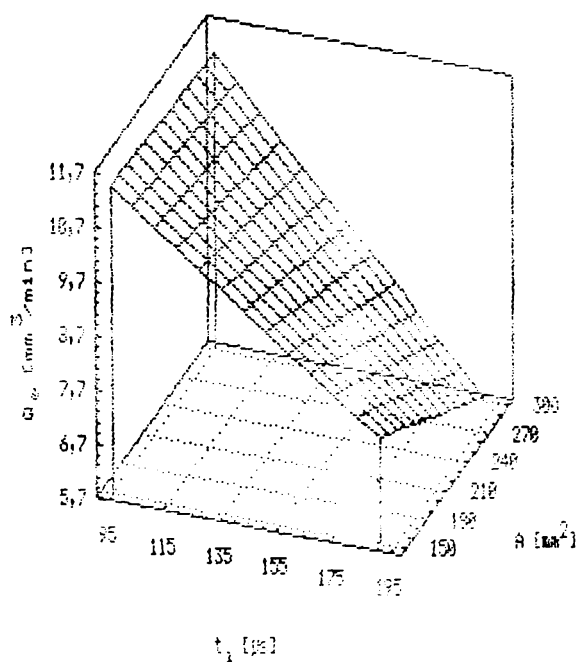


fig. 7.15. Suprafața de răspuns $Q_s = f(t_1, A)$

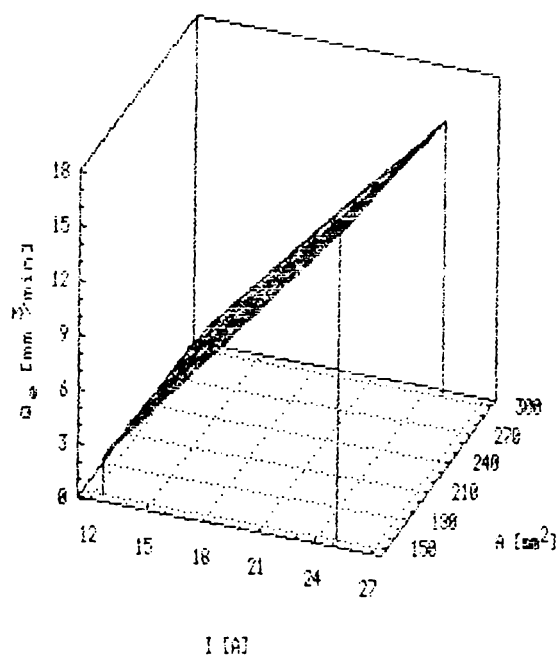


fig. 7.16. Suprafața de răspuns $Q_s = f(l, A)$

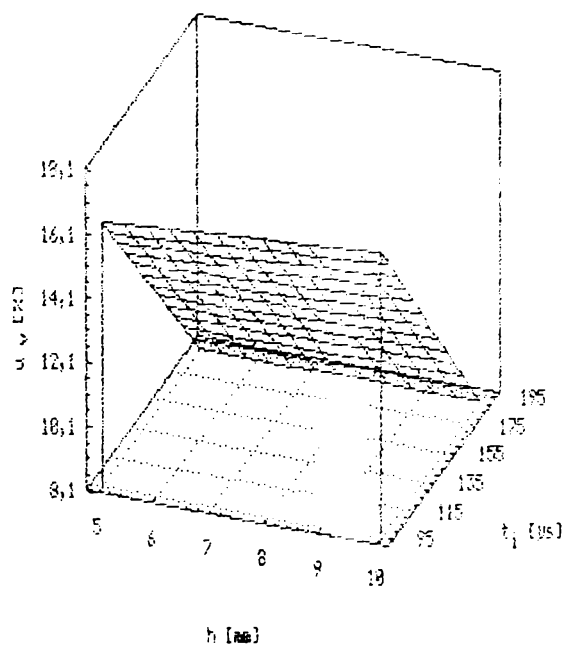


fig. 7.17. Suprafața de răspuns $u_s = f(h, t_1)$

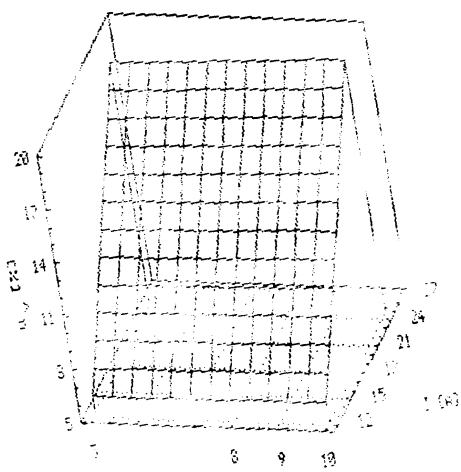


fig. 7.18. Suprafața de răspuns $u_v = f(h, I)$

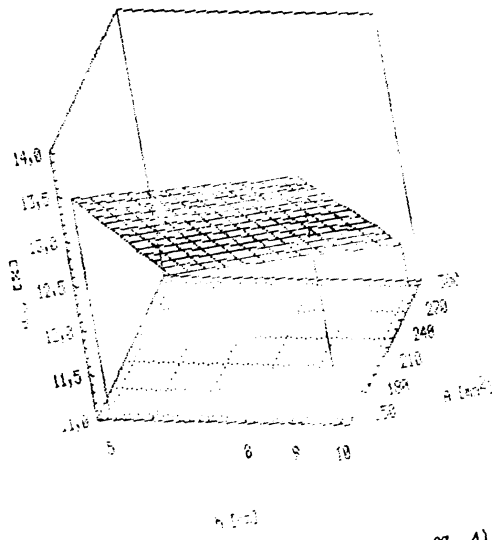


fig. 7.19. Suprafața de răspuns $u_v = f(h, A)$

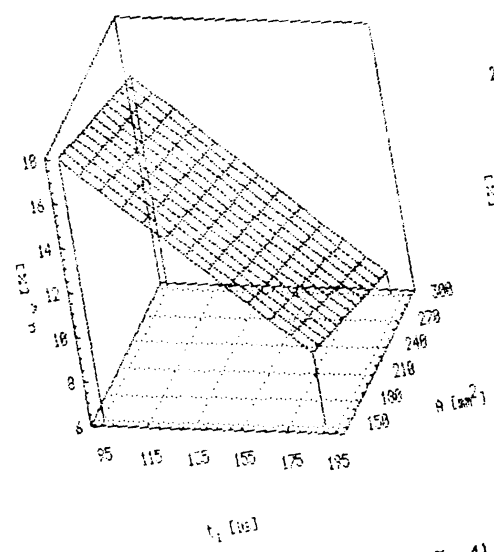


fig. 7.20. Suprafața de răspuns $u_v = f(t_e, A)$

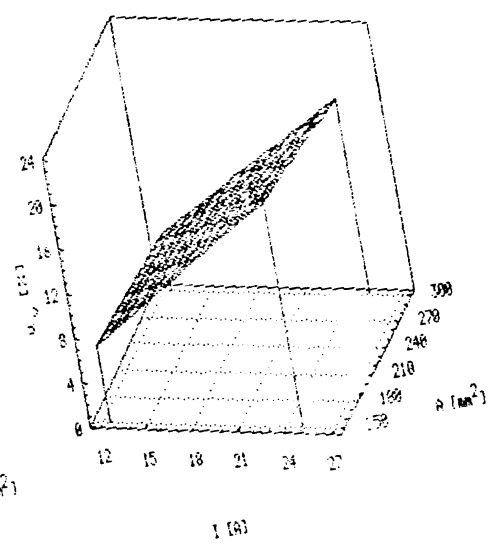


fig. 7.21. Suprafața de răspuns $u_v = f(I, A)$

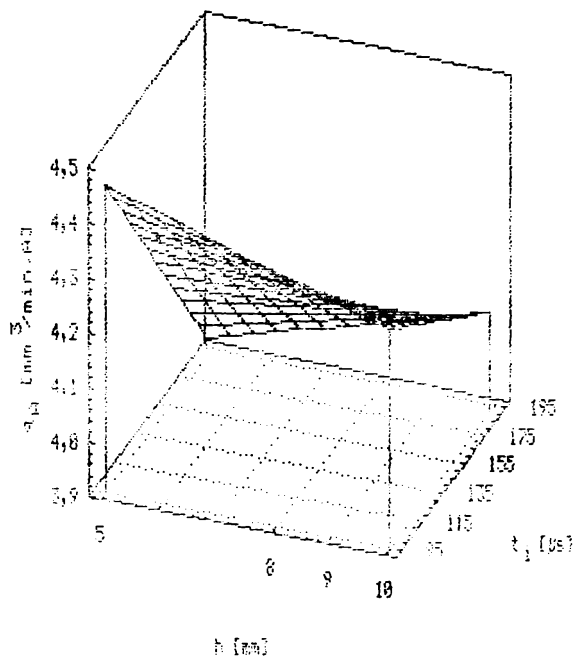


fig. 7.22. Suprafața de răspuns $q_A = f(h, t_1)$

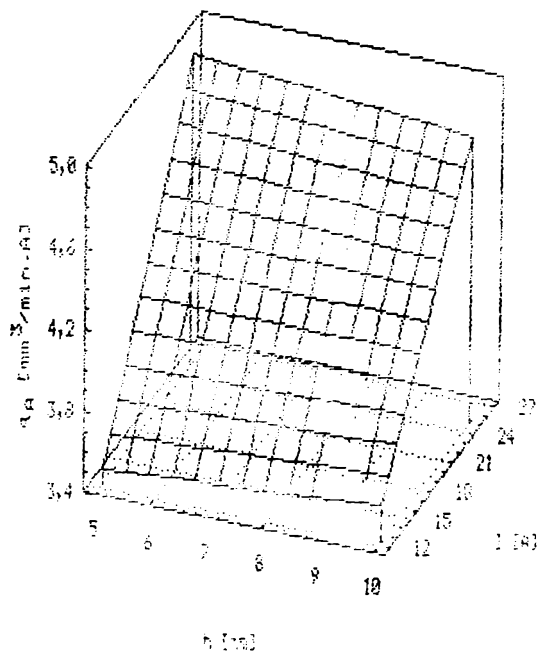


fig. 7.23. Suprafața de răspuns $q_A = f(h, l)$

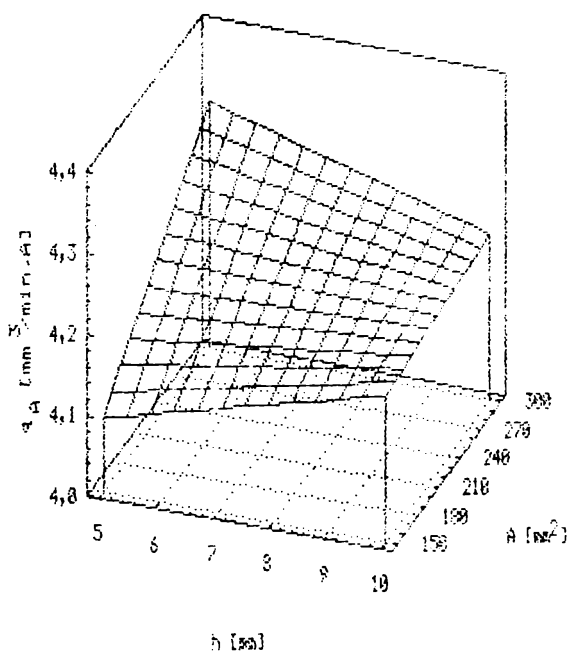


fig. 7.24. Suprafața de răspuns $q_A = f(h, A)$

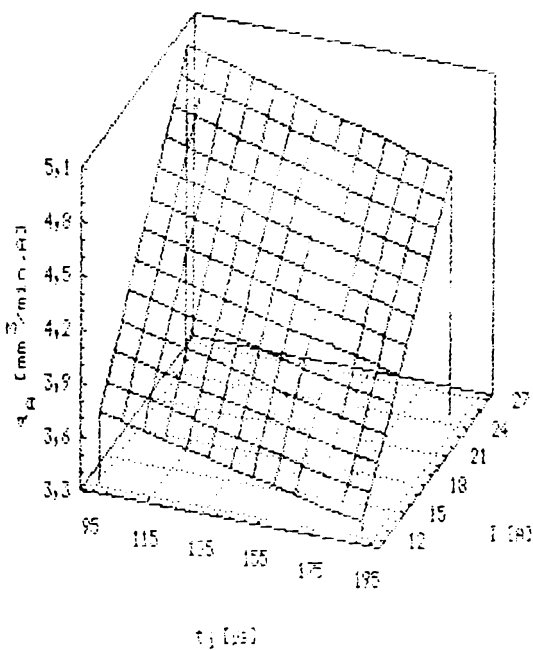


fig. 7.25. Suprafața de răspuns $q_A = f(t_1, l)$

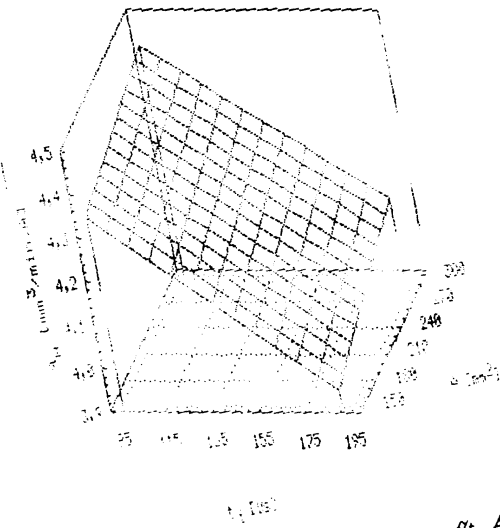


fig. 7.26. Suprafața de răspuns $q_A = f(t_e, A)$

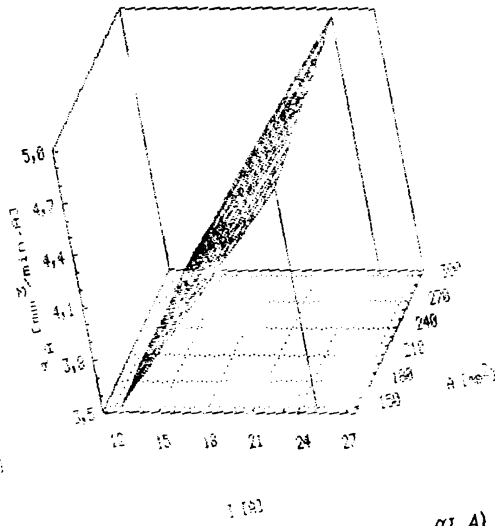


fig. 7.27. Suprafața de răspuns $q_A = f(I, A)$

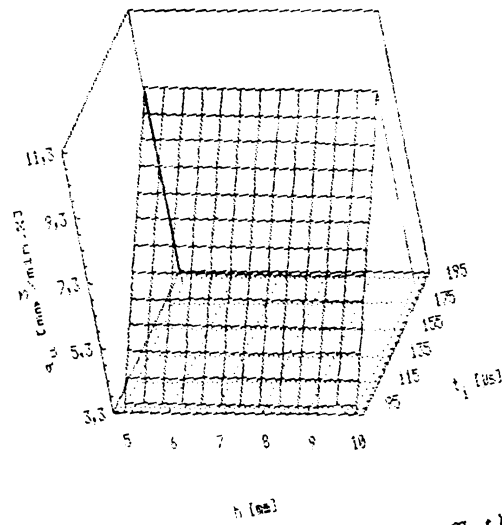


fig. 7.28. Suprafața de răspuns $q_u = f(h, t_e)$

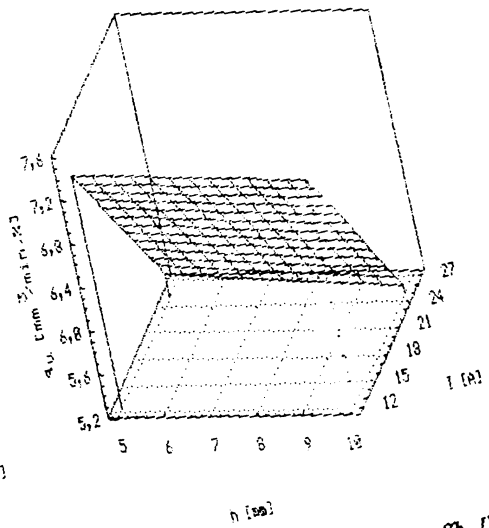


fig. 7.29. Suprafața de răspuns $q_u = f(h, I)$

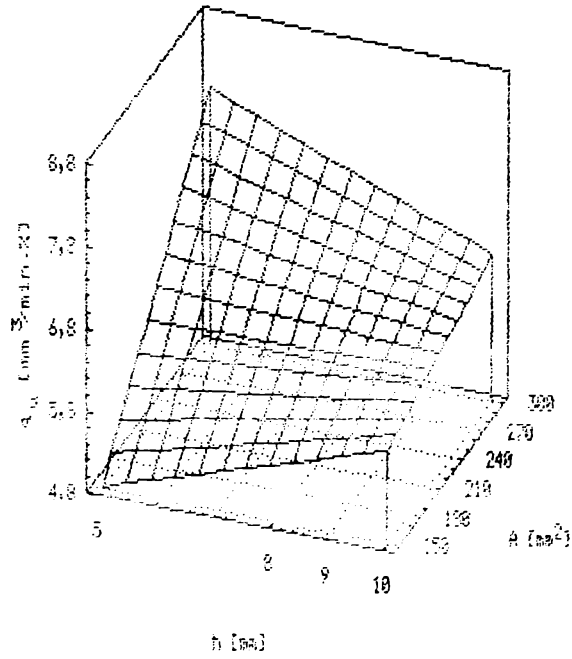


fig. 7.30. Suprafața de răspuns $q_u = f(h, A)$

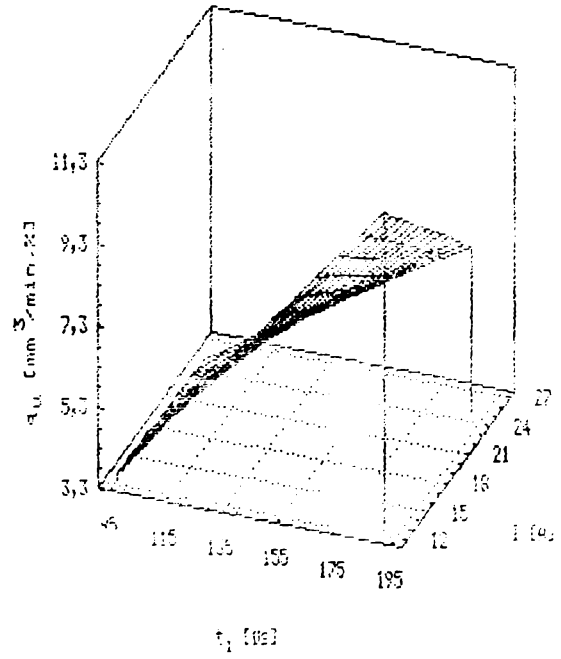


fig. 7.31. Suprafața de răspuns $q_u = f(t_1, A)$

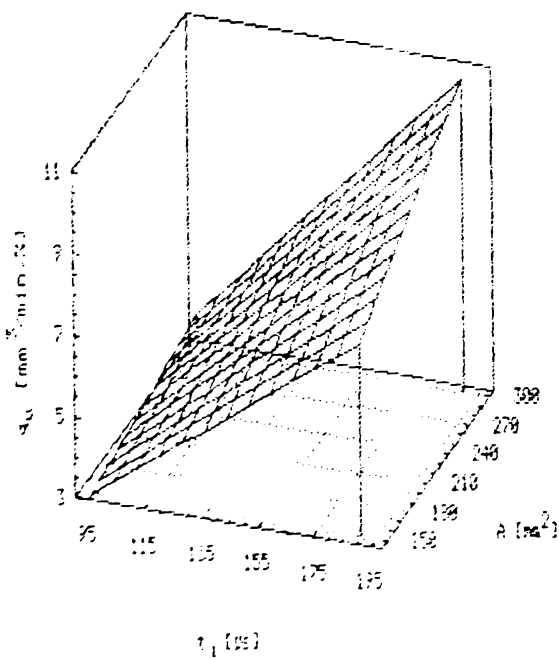


fig. 7.32. Suprafața de răspuns $q_u = f(t_1, A)$

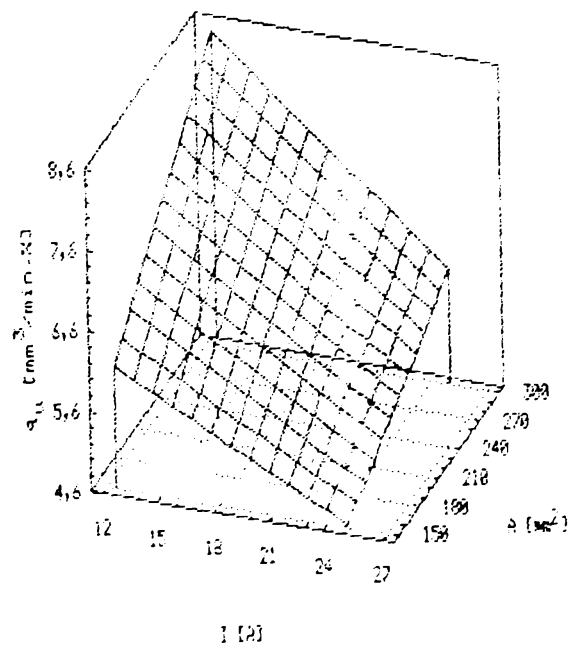


fig. 7.33. Suprafața de răspuns $q_u = f(t_1, A)$

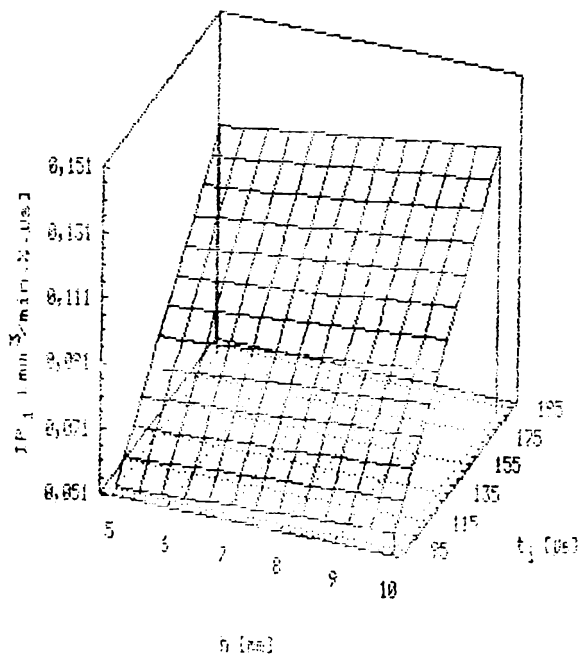


fig. 7.34. Suprafața de răspuns $IP_1 = f(h, t_1)$

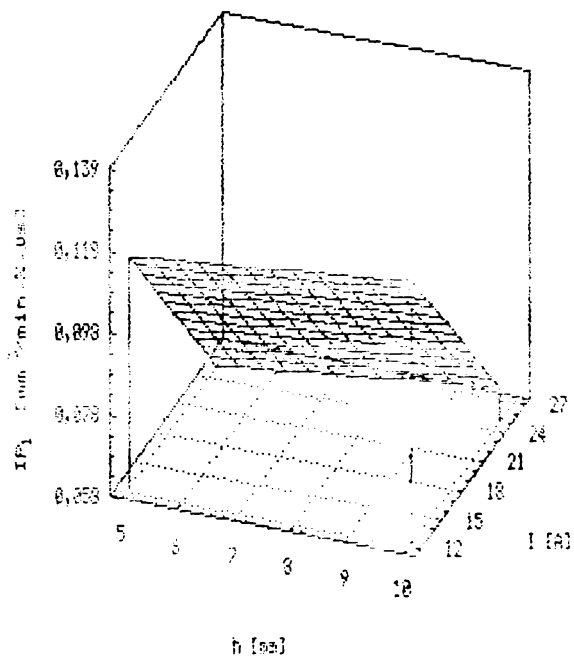


fig. 7.35. Suprafața de răspuns $IP_1 = f(h, I)$

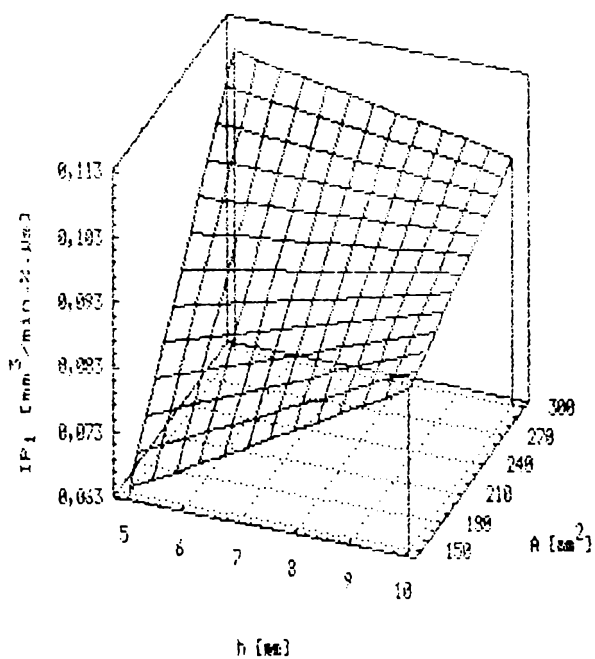


fig. 7.36. Suprafața de răspuns $IP_1 = f(h, A)$

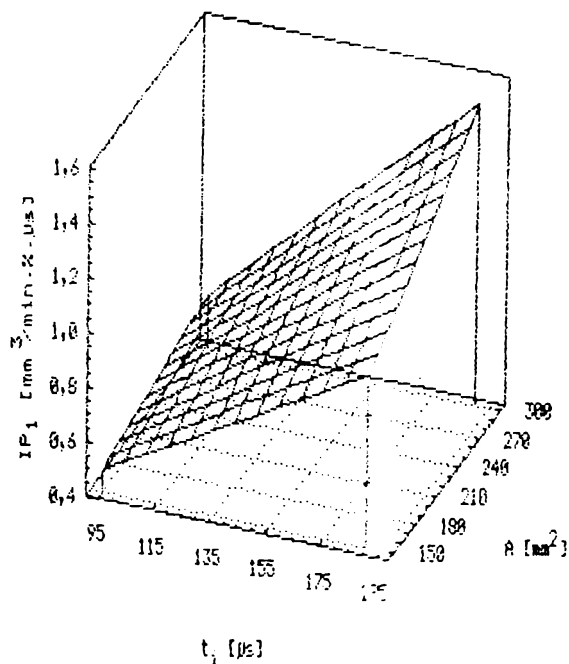


fig. 7.37. Suprafața de răspuns $IP_1 = f(t_1, A)$

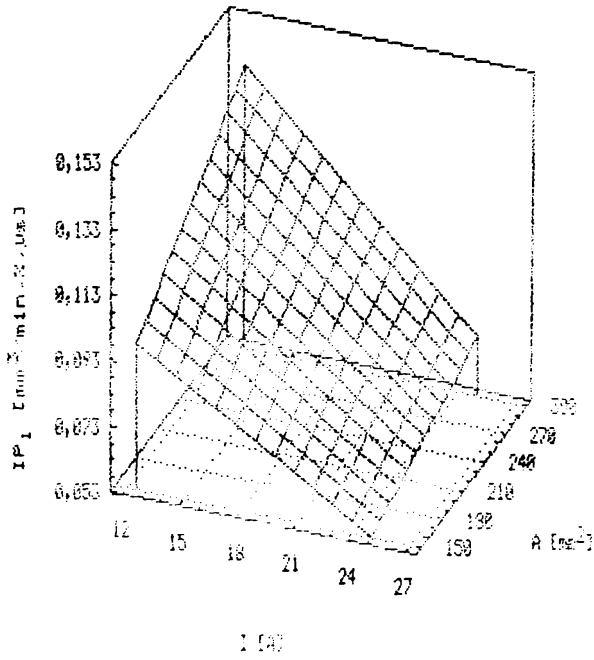


fig. 7.38. Suprafața de răspuns $IP_1 = f(I, A)$

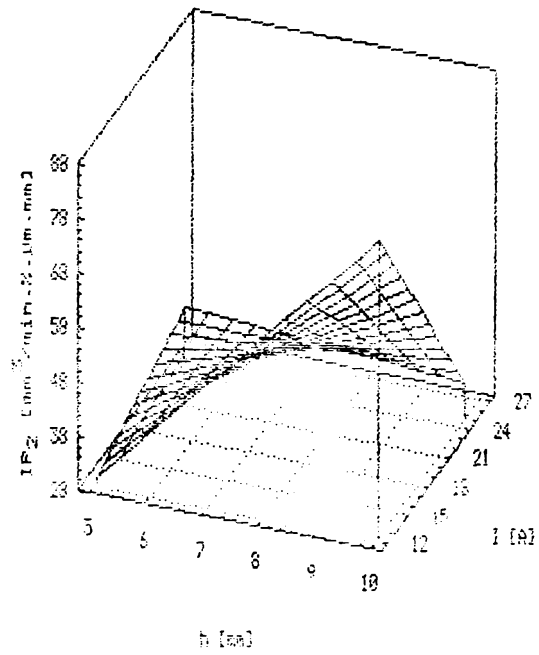


fig. 7.39. Suprafața de răspuns $IP_2 = f(h, I)$

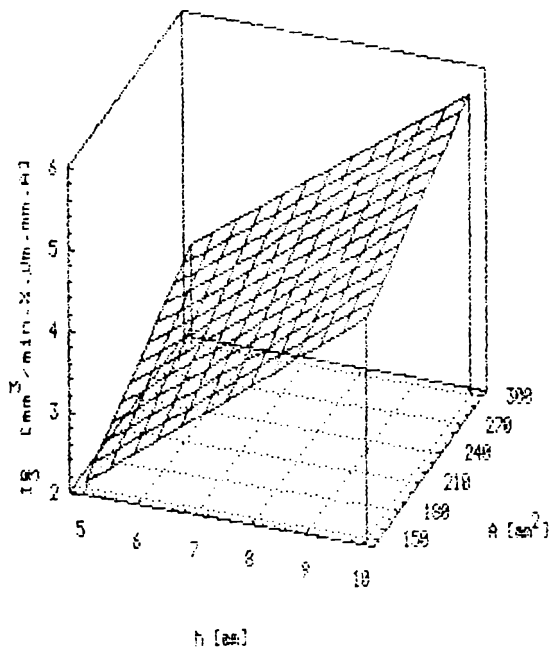


fig. 7.40. Suprafața de răspuns $IP_2 = f(h, A)$

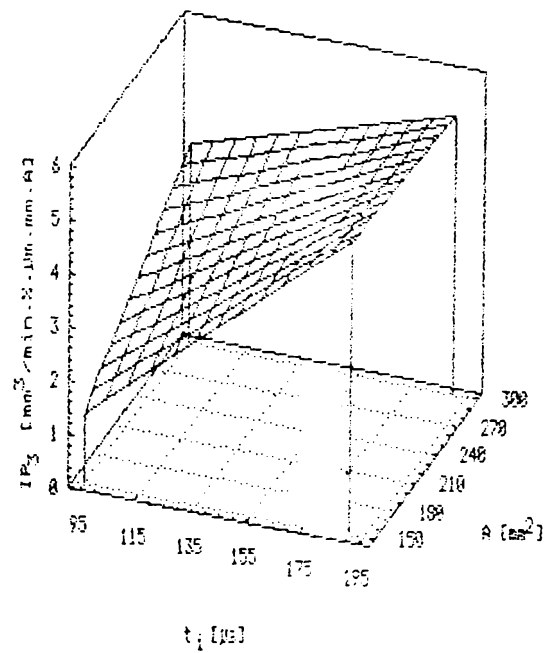


fig. 7.41. Suprafața de răspuns $IP_2 = f(t, A)$

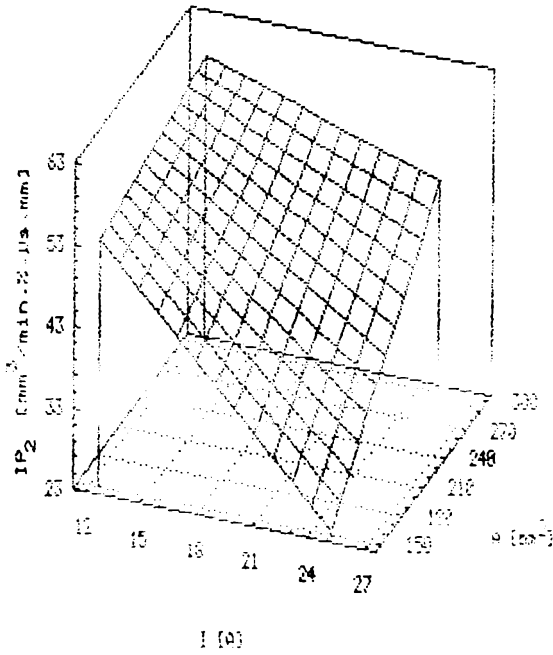


fig. 7.42. Suprafața de răspuns $IP_2 = f(I, A)$

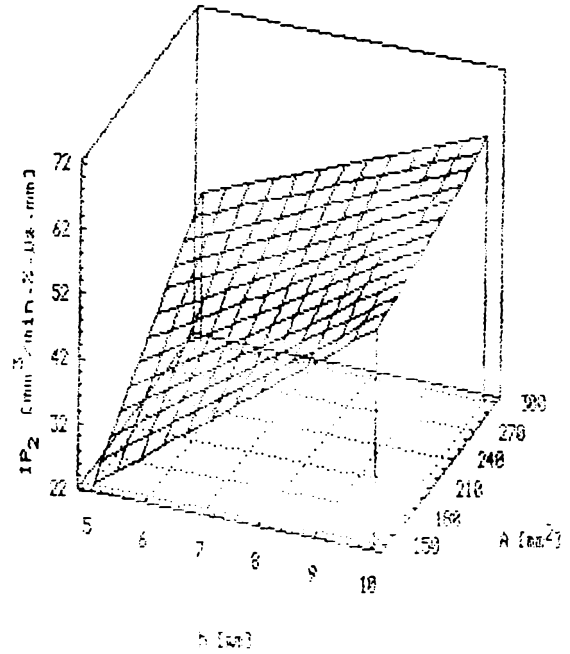


fig. 7.43. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(h, A)$

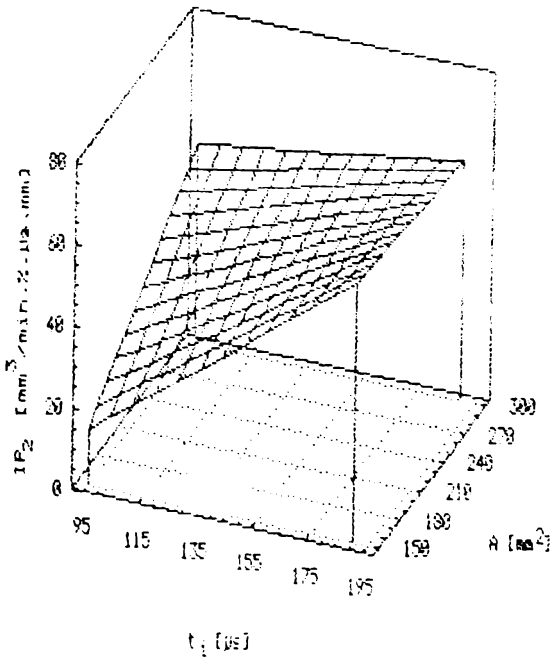


fig. 7.44. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(t_1, A)$

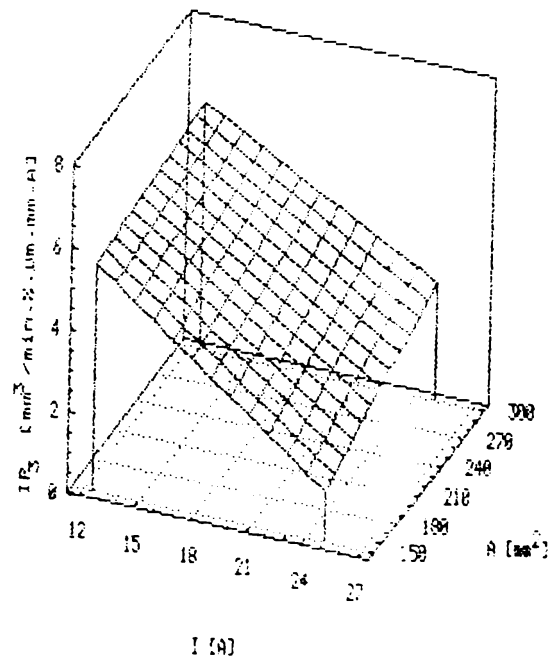


fig. 7.45. Suprafața de răspuns $IP_3 = f(I, A)$

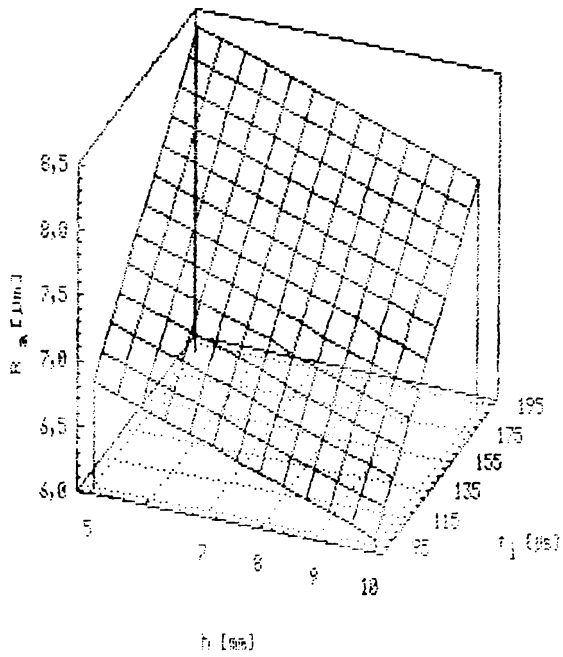


fig. 7.46. Suprafața de răspuns $R_a = f(h, t_i)$

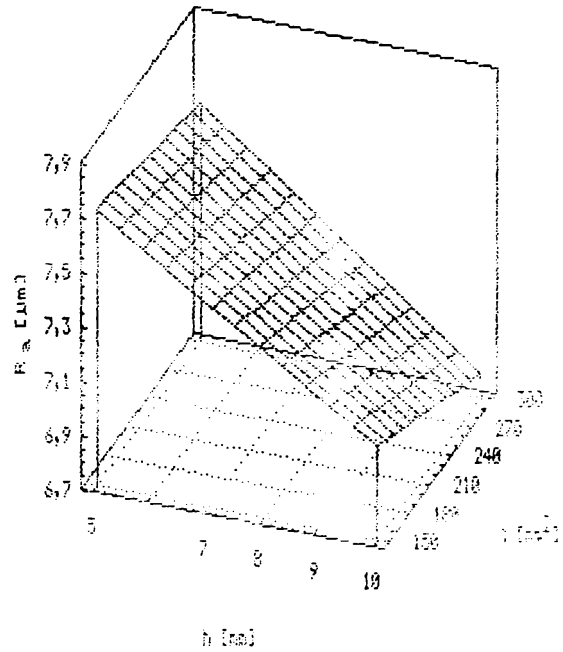


fig. 7.47. Suprafața de răspuns $R_a = f(h, A)$

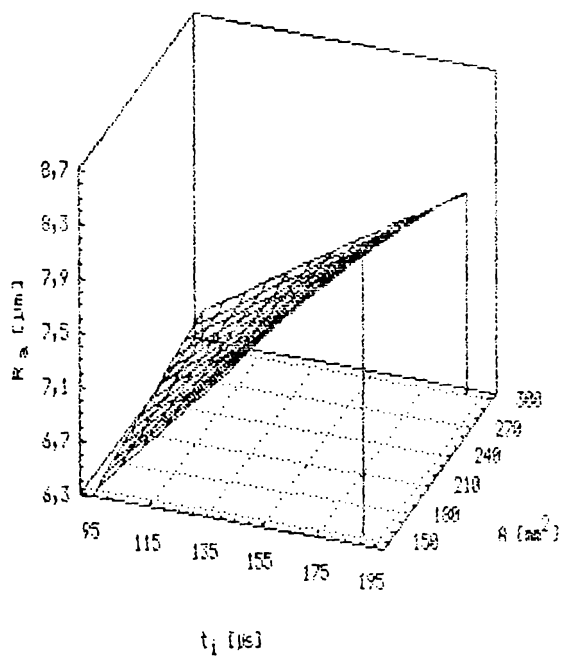


fig. 7.48. Suprafața de răspuns $R_a = f(t_i, A)$

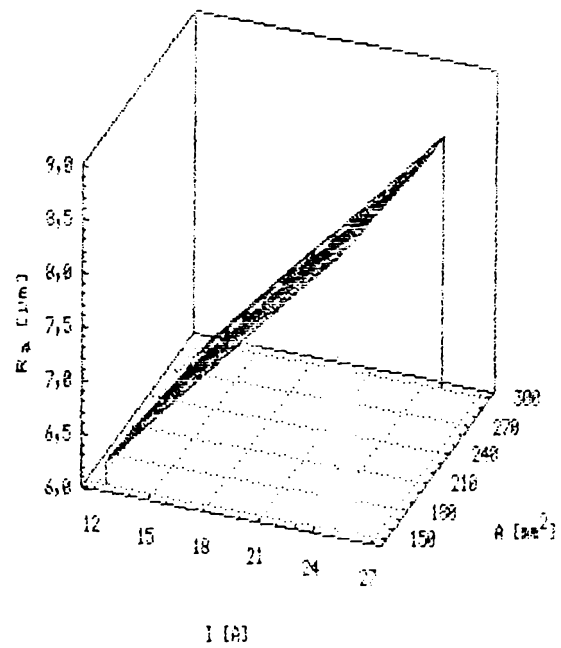


fig. 7.49. Suprafața de răspuns $R_a = f(I, A)$

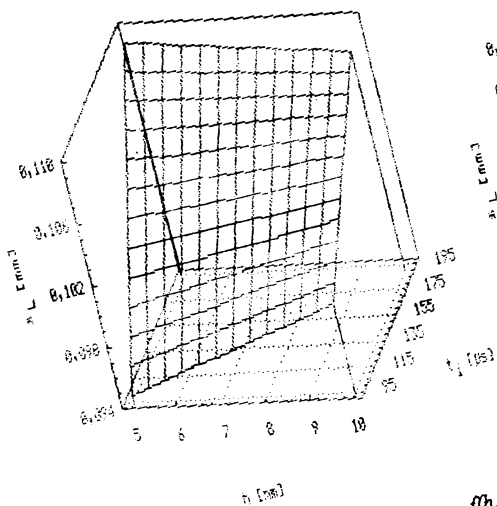


fig. 7.50. Suprafața de răspuns $s_L = f(h, t_1)$

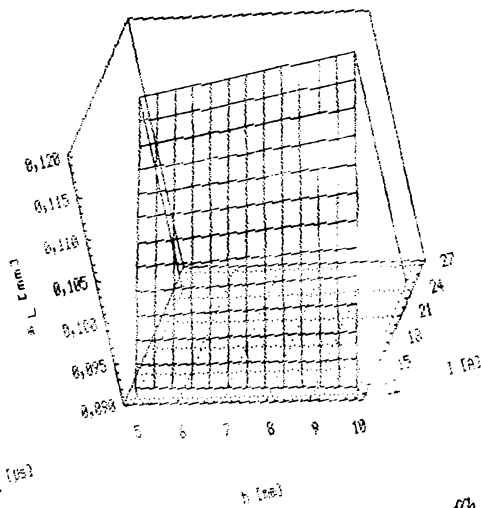


fig. 7.51. Suprafața de răspuns $s_L = f(h, I)$

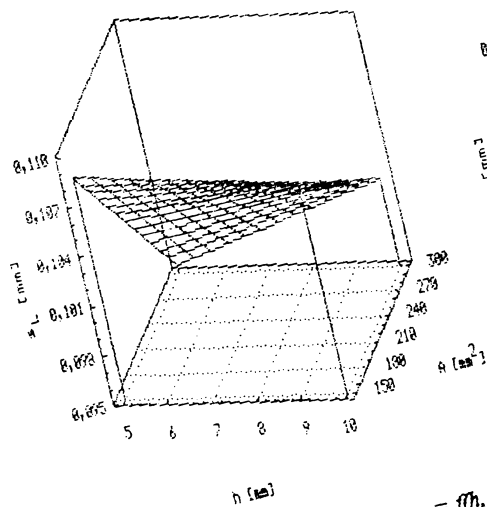


fig. 7.52. Suprafața de răspuns $s_L = f(h, A)$

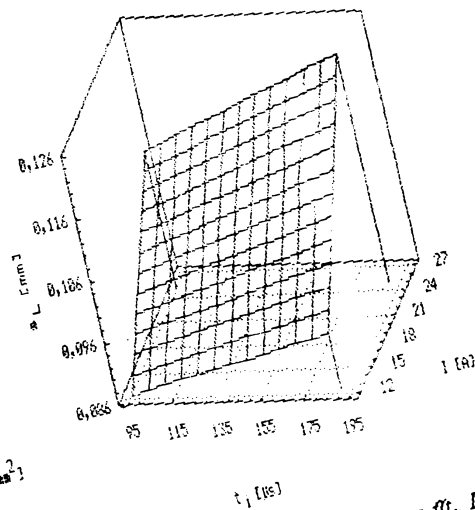


fig. 7.53. Suprafața de răspuns $s_L = f(t_1, I)$

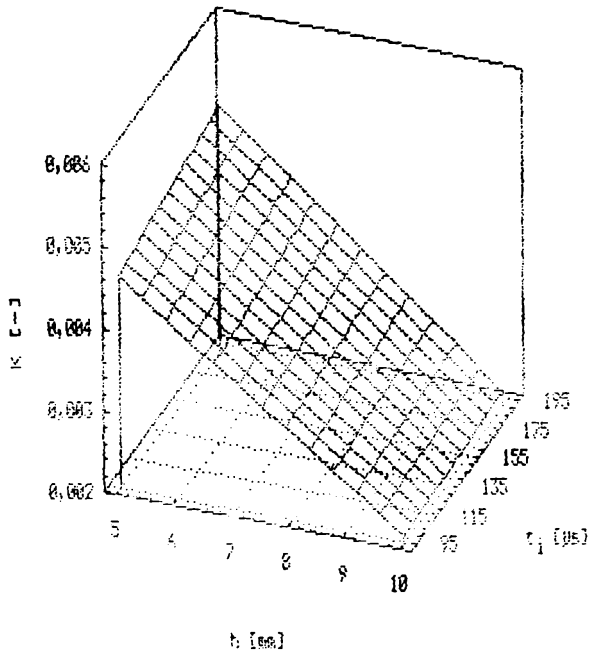


fig. 7.54. Suprafața de răspuns $K = f(h, t_i)$

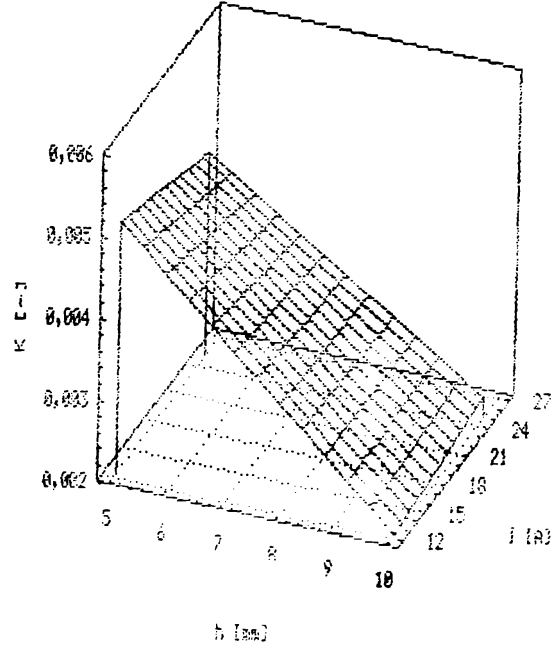


fig. 7.55. Suprafața de răspuns $K = f(h, I)$

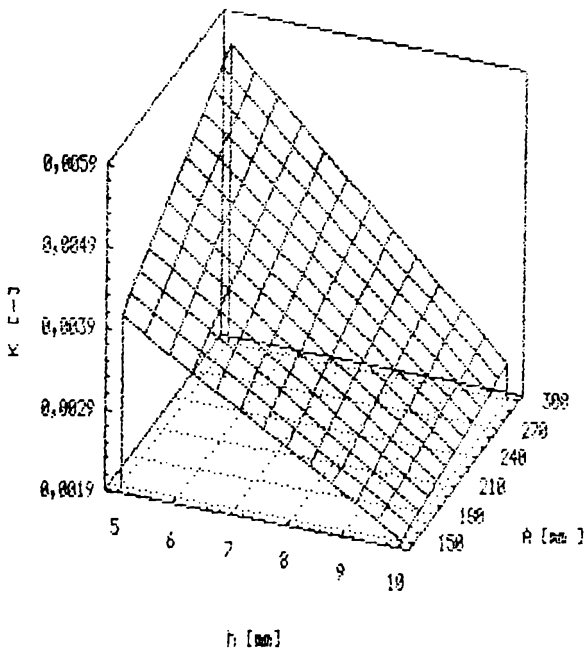


fig. 7.56. Suprafața de răspuns $K = f(h, A)$

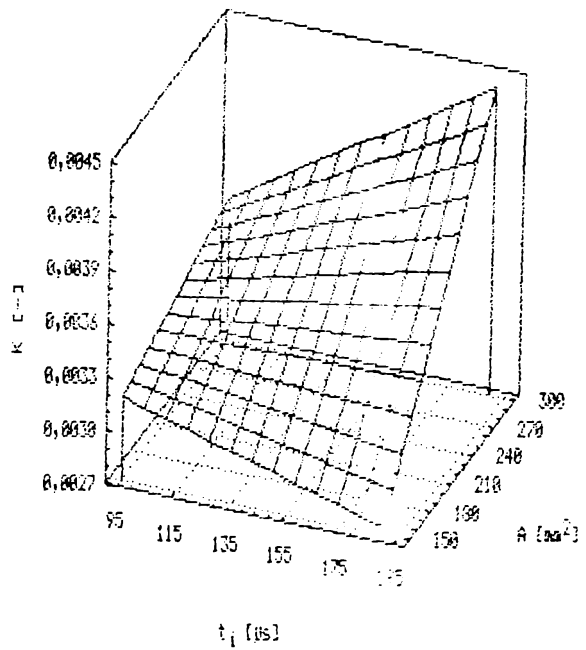


fig. 7.57. Suprafața de răspuns $K = f(t_i, A)$

202 OPTIMIZAREA TEHNOLOGICĂ LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU ELECTROD MASIV

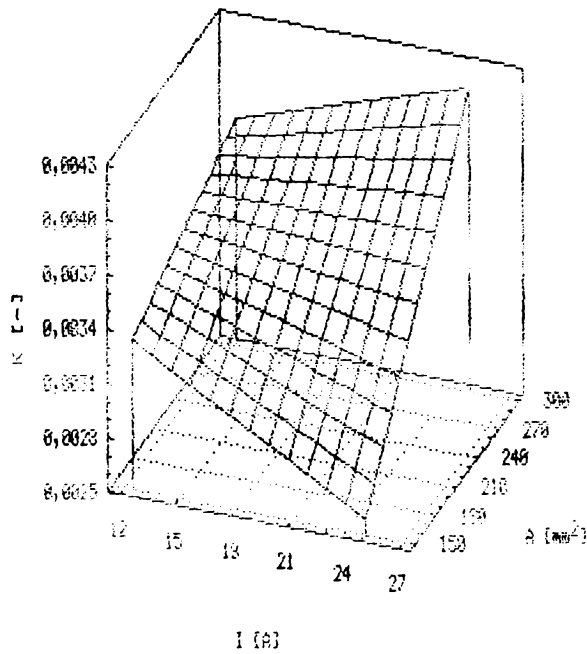


fig. 7.58. Suprafața de răspuns $K = f(I, A)$

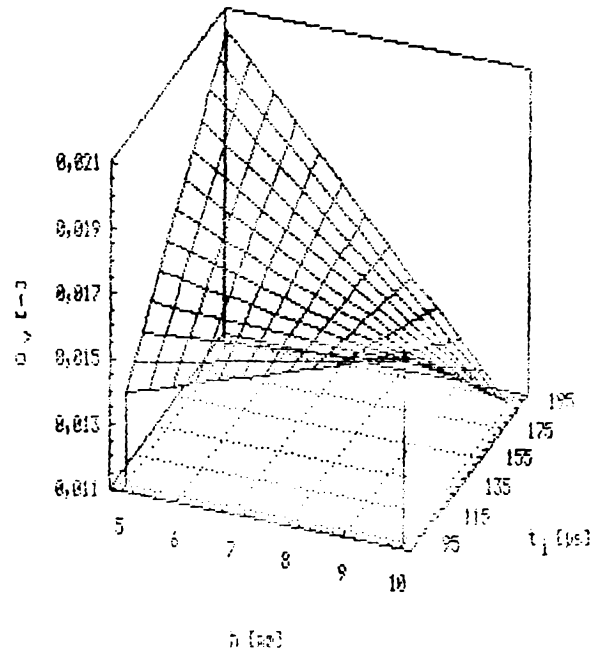


fig. 7.59. Suprafața de răspuns $O_v = f(h, t)$

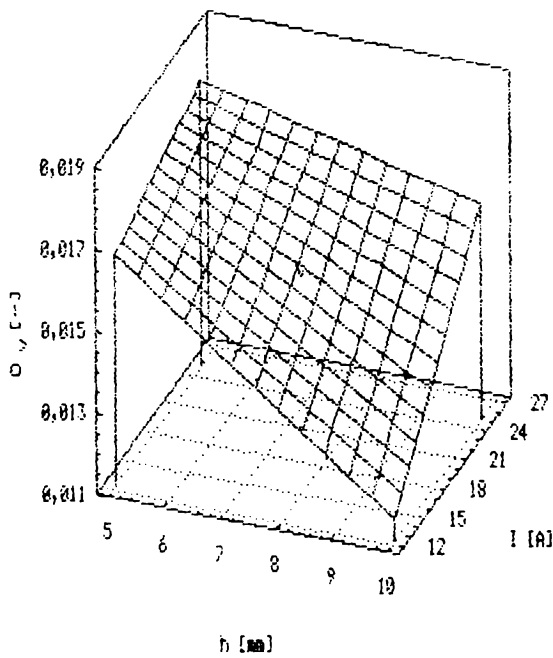


fig. 7.60. Suprafața de răspuns $O_v = f(h, I)$

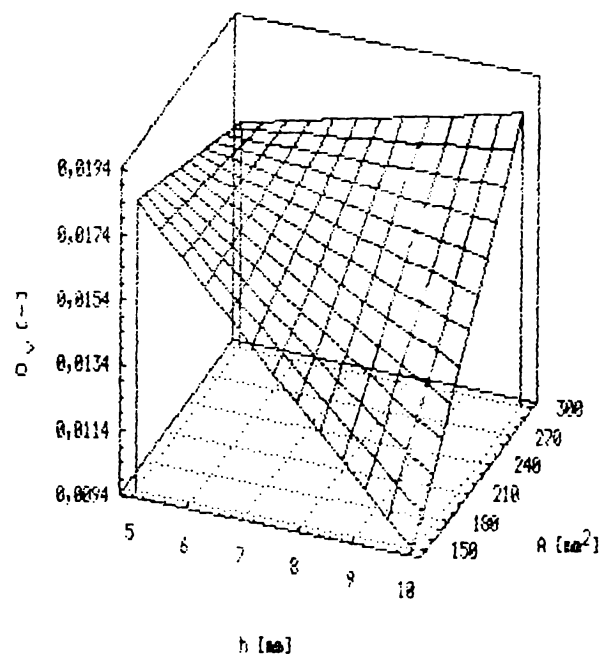


fig. 7.61. Suprafața de răspuns $O_v = f(h, A)$

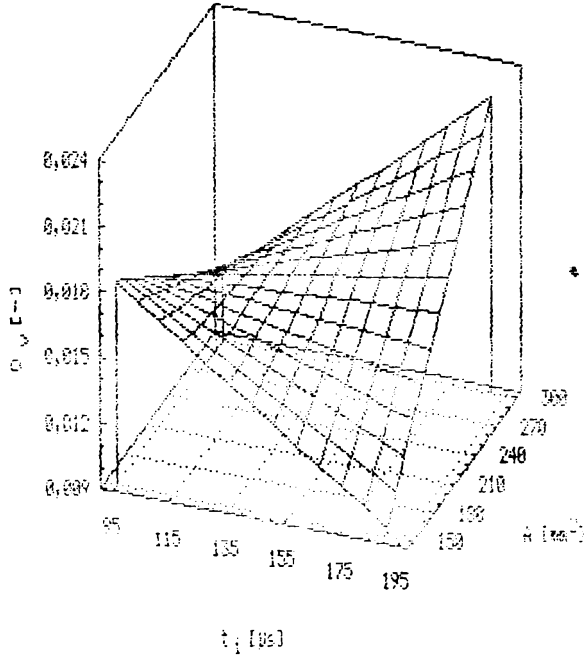


fig. 7.62. Suprafața de răspuns $O_v = f(t_i, A)$

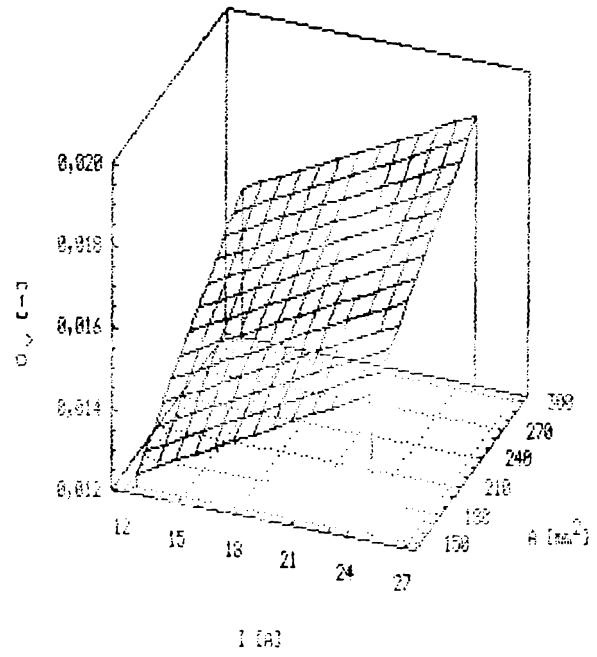


fig. 7.63. Suprafața de răspuns $O_v = f(I, A)$

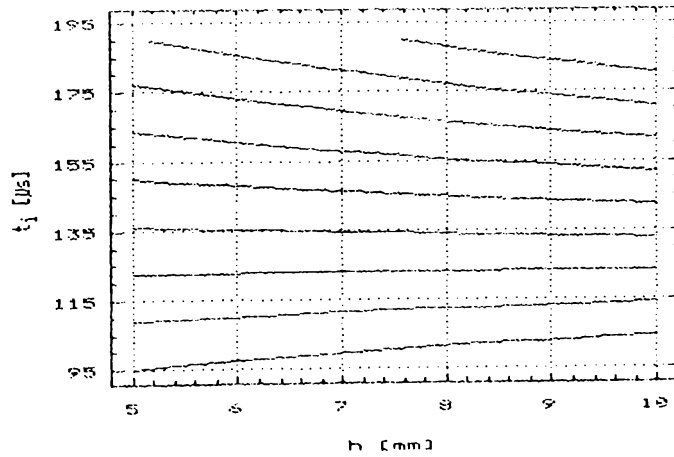
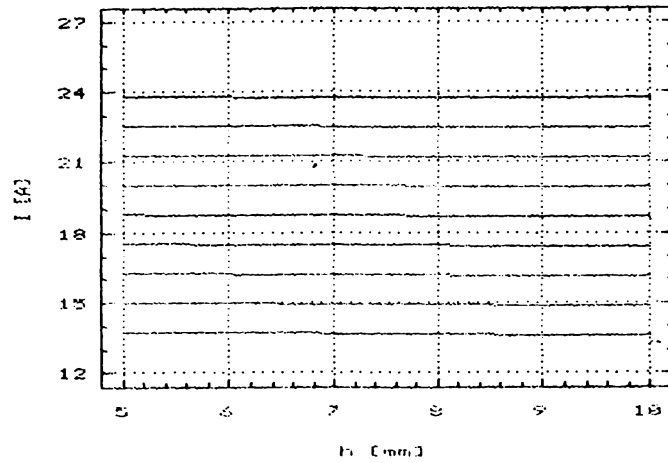
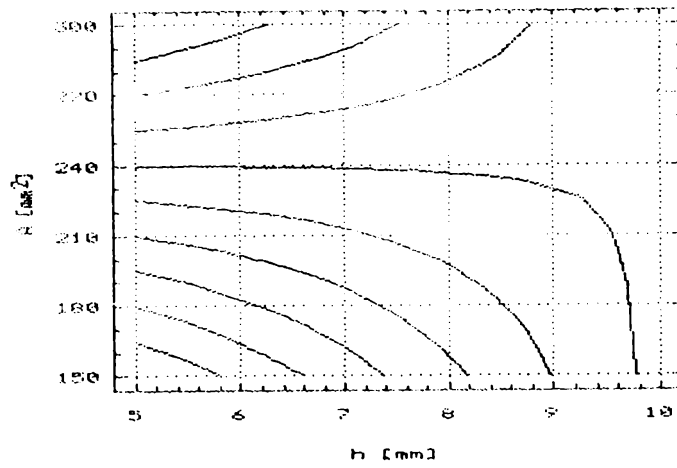
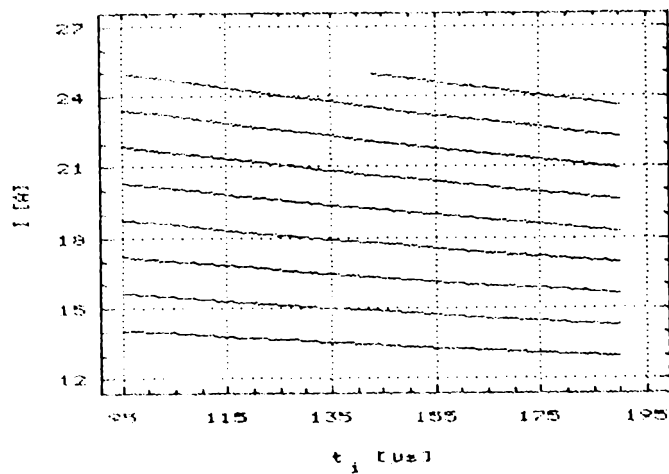


fig. 7.64. Curbe de nivel constant $Q_p - (h, t_i)$

fig. 7.65. Curbe de nivel constant Q_p - (h, I)fig. 7.66. Curbe de nivel constant Q_p - (h, A)fig. 7.67. Curbe de nivel constant Q_p - (t₁, I)

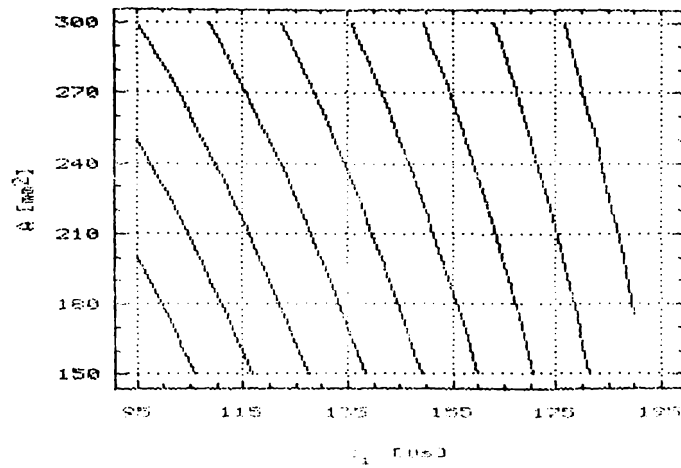


fig. 7.68. Curbe de nivel constant Q_p - (t_1, A)

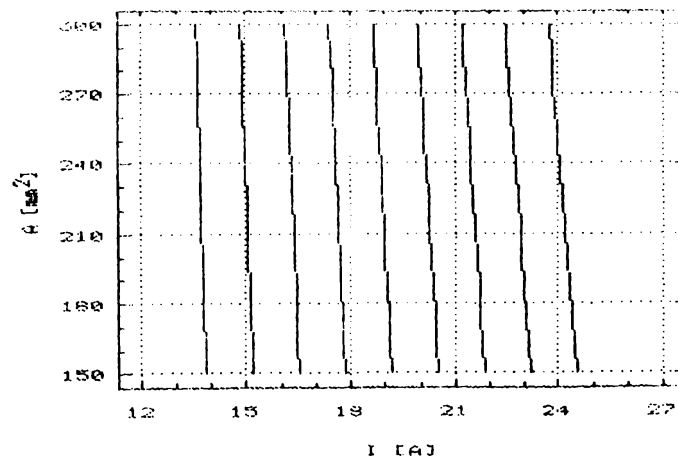


fig. 7.69. Curbe de nivel constant Q_p - (I, A)

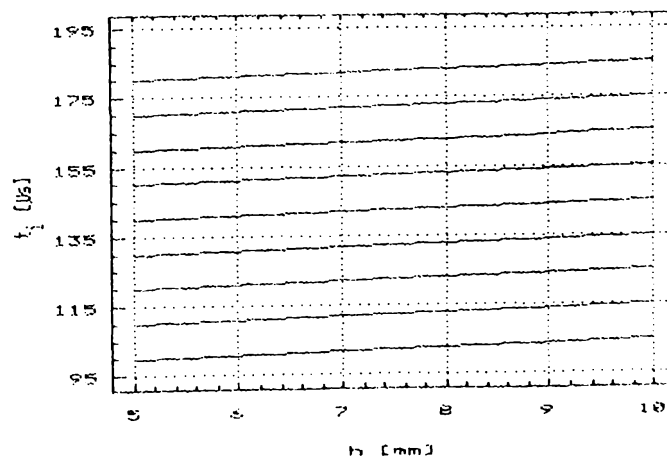
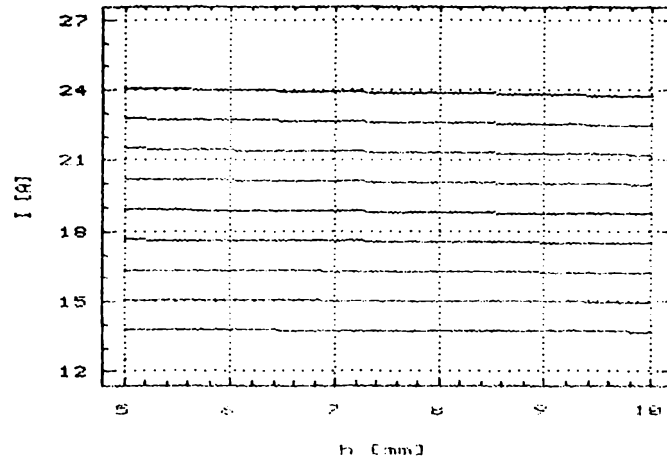
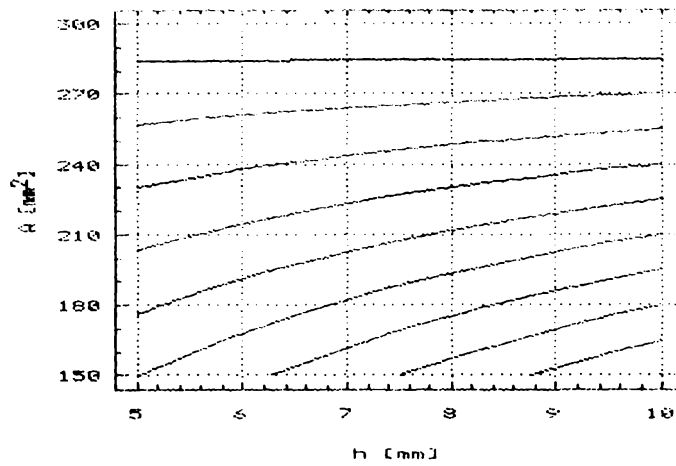
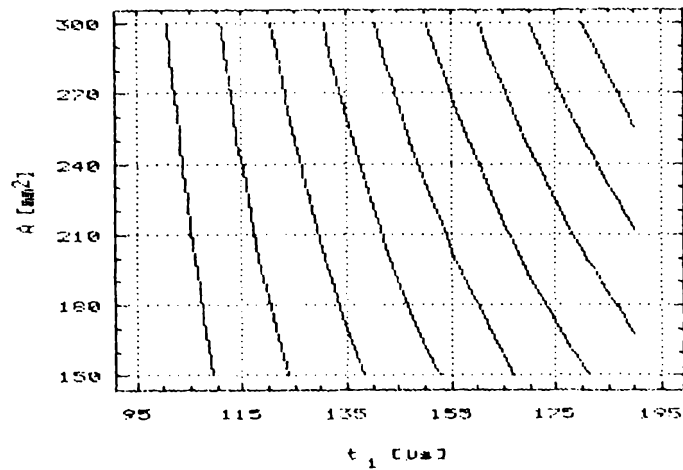


fig. 7.70. Curbe de nivel constant Q_e - (h, t_1)

fig. 7.71. Curbe de nivel constant $Q_e - (h, I)$ fig. 7.72. Curbe de nivel constant $Q_e - (h, A)$ fig. 7.73. Curbe de nivel constant $Q_e - (t_1, A)$

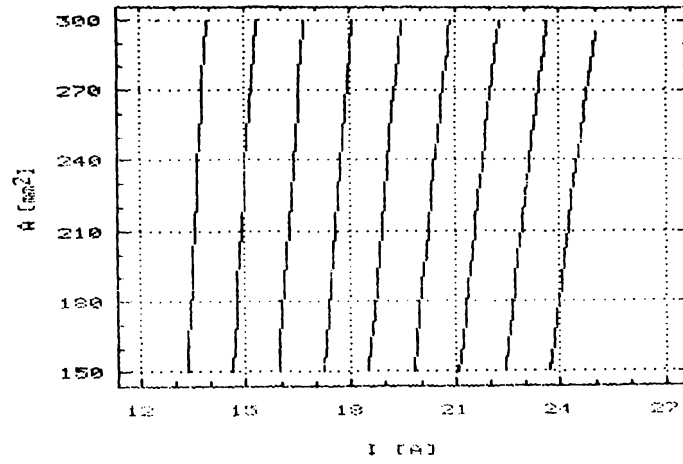


fig. 7.74. Curbe de nivel constant Q_c - (I, A)

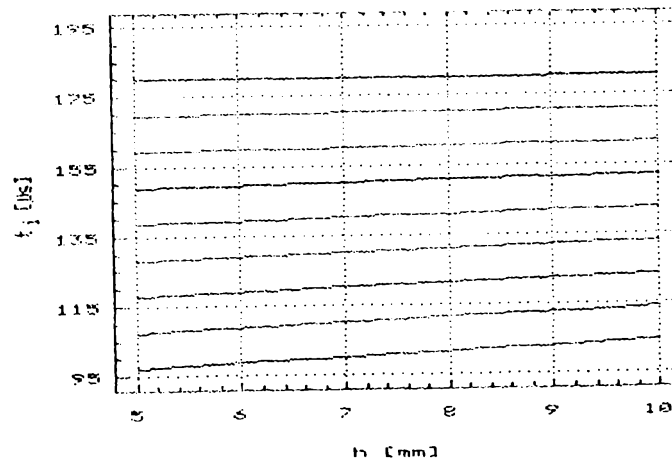


fig. 7.75. Curbe de nivel constant u_v - (h, t_1)

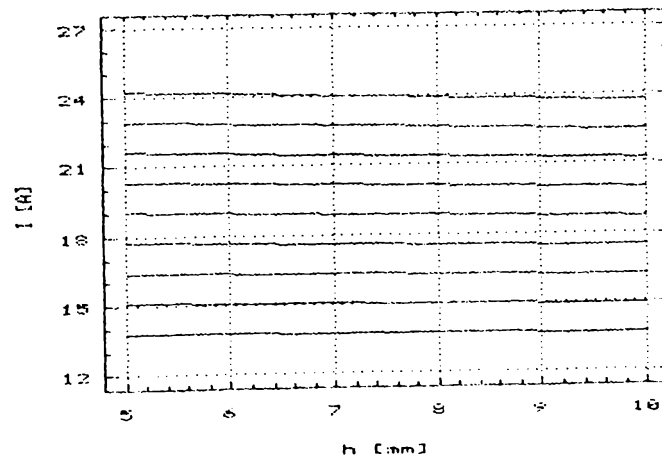


fig. 7.76. Curbe de nivel constant u_v - (h, I)

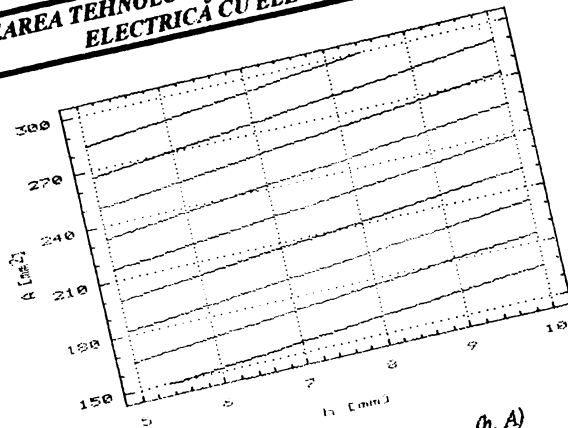


fig. 7.77. Curbe de nivel constant u_v - (h, A)

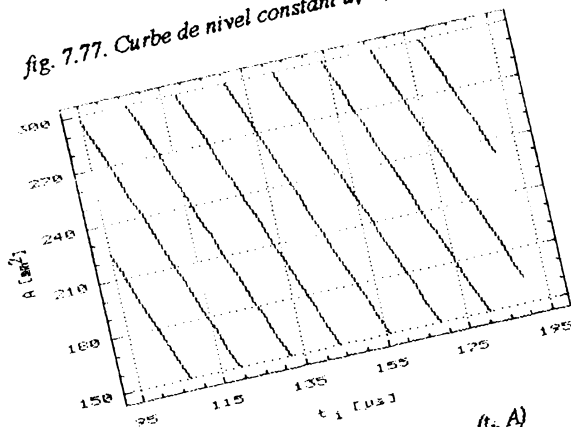


fig. 7.78. Curbe de nivel constant u_v - (t₁, A)

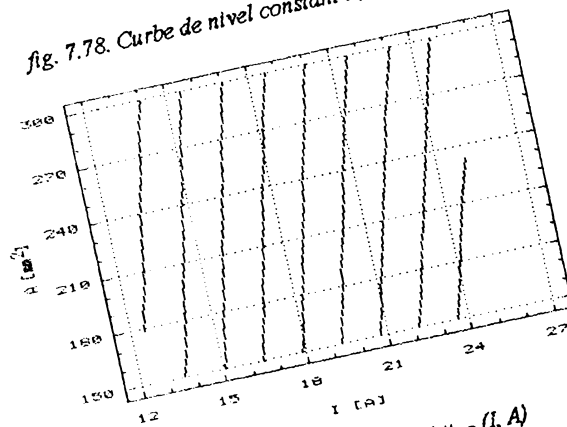


fig. 7.79. Curbe de nivel constant u_v - (I, A)

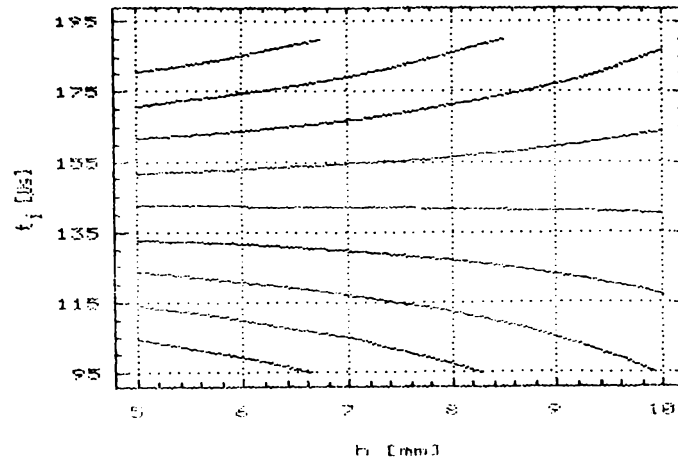


fig. 7.80. Curbe de nivel constant $q_A - (h, t_1)$

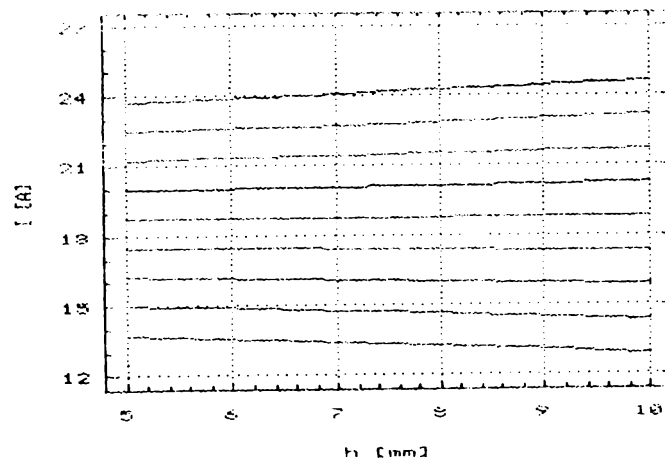


fig. 7.81. Curbe de nivel constant $q_A - (h, t)$

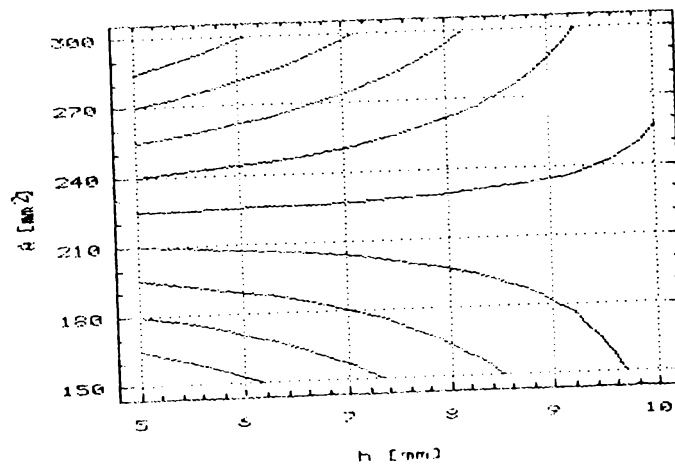
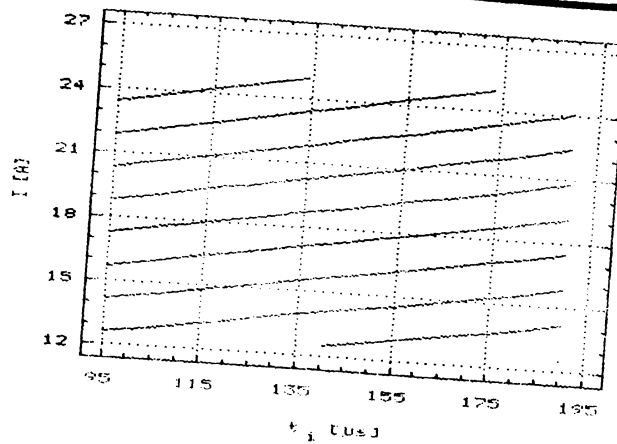
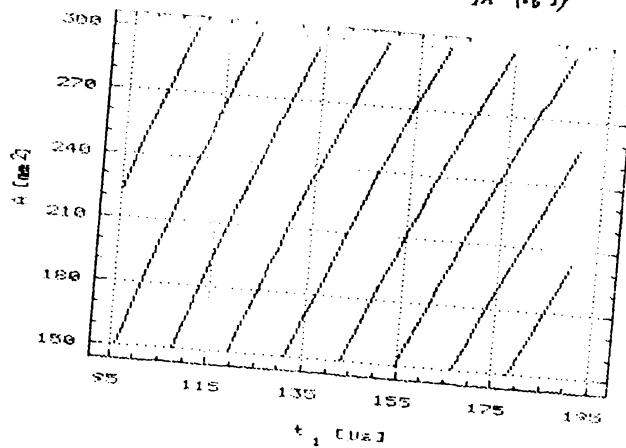
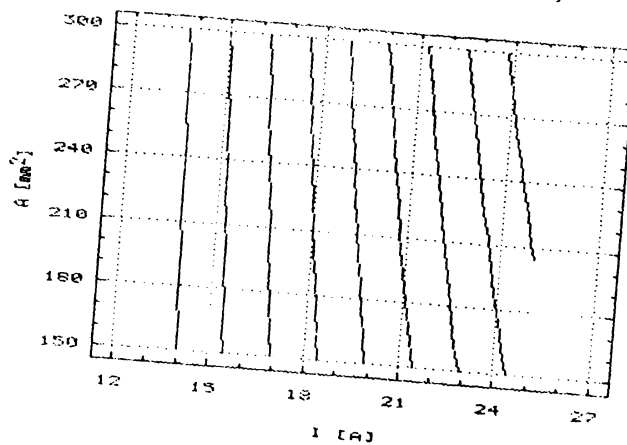


fig. 7.82. Curbe de nivel constant $q_A - (h, A)$

fig. 7.83. Curbe de nivel constant $q_A - (t_1, I)$ fig. 7.84. Curbe de nivel constant $q_A - (t_1, A)$ fig. 7.85. Curbe de nivel constant $q_A - (I, A)$

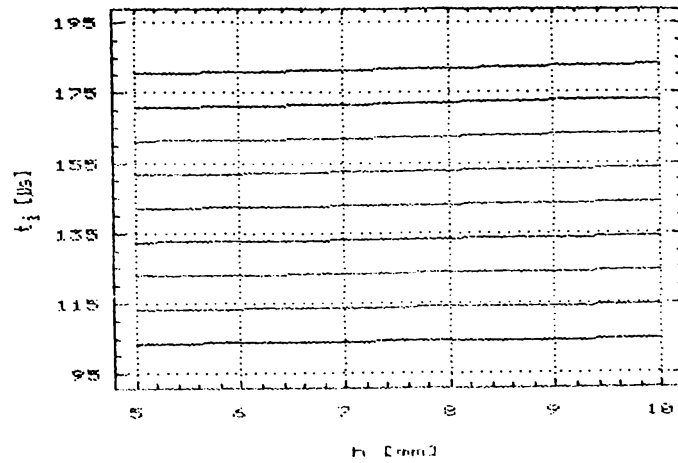


fig. 7.86. Curbe de nivel constant $q_u - (h, t_i)$

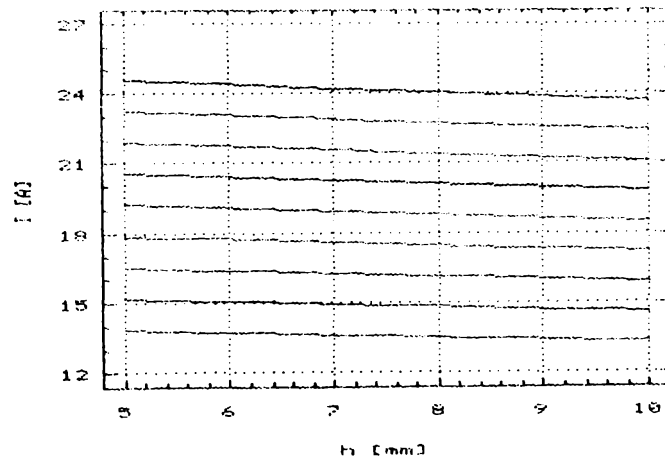


fig. 7.87. Curbe de nivel constant $q_u - (h, l)$

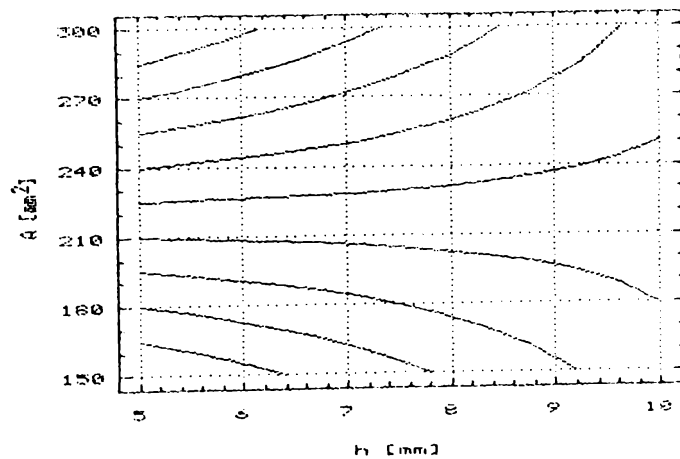
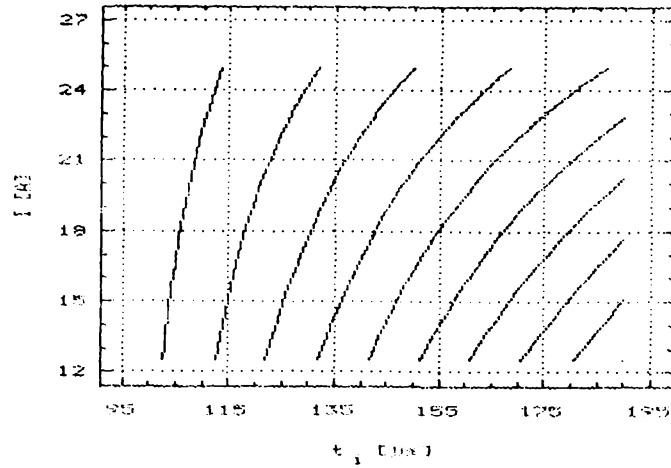
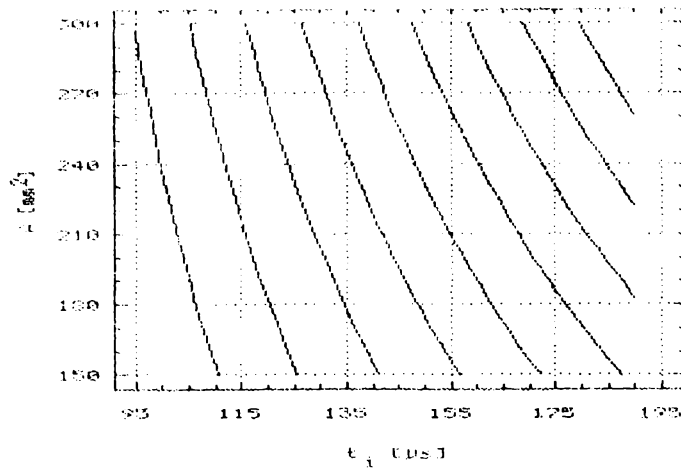
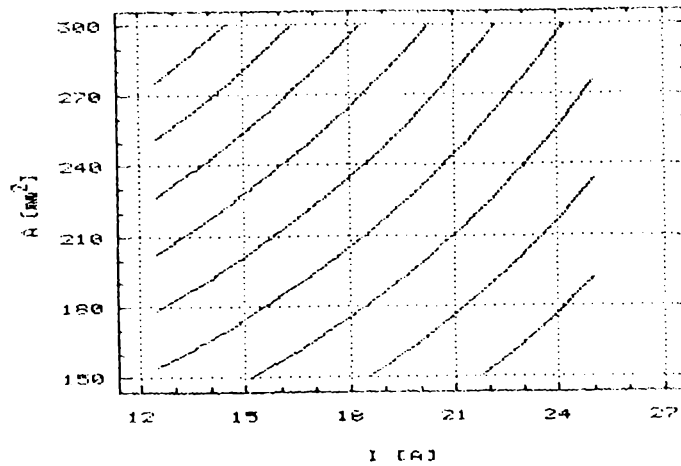


fig. 7.88. Curbe de nivel constant $q_u - (h, A)$

fig. 7.89. Curbe de nivel constant $q_u - (t_1, I)$ fig. 7.90. Curbe de nivel constant $q_u - (t_1, A)$ fig. 7.91. Curbe de nivel constant $q_u - (I, A)$

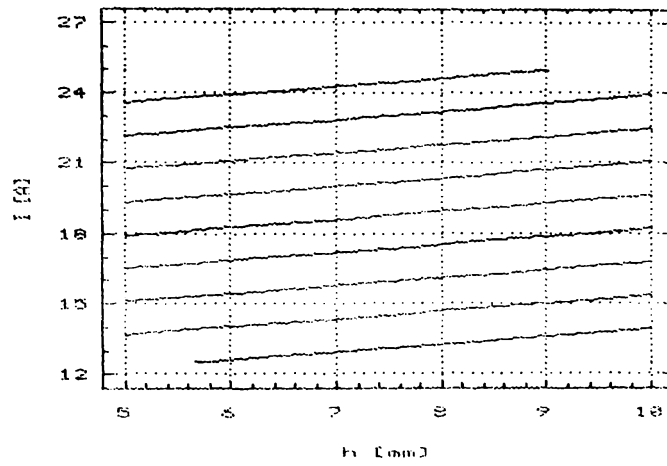


fig. 7.92. Curbe de nivel constant $IP_1 - (h, t)$

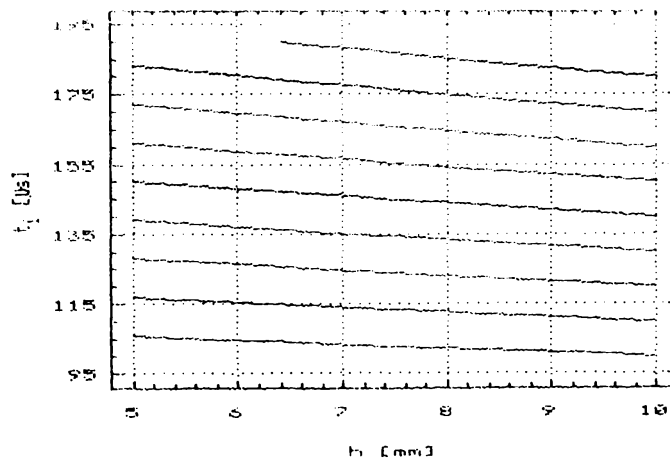


fig. 7.93. Curbe de nivel constant $IP_1 - (h, I)$

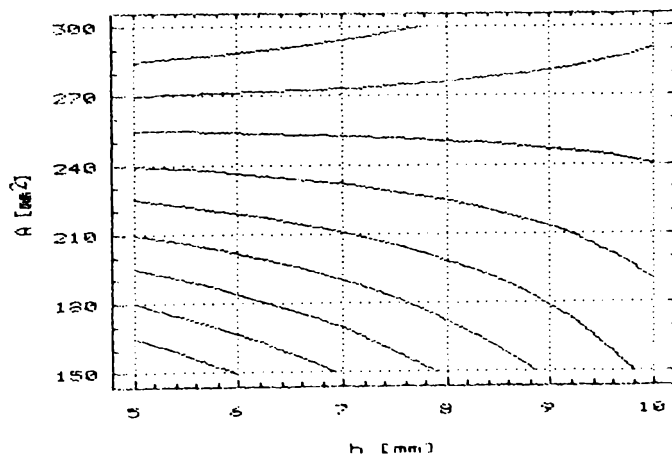
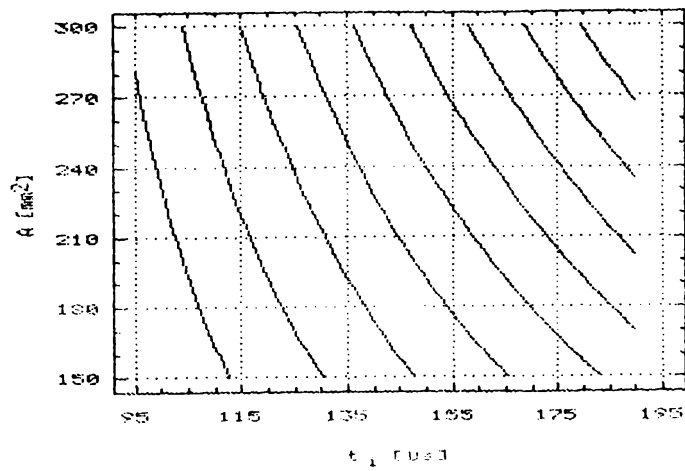
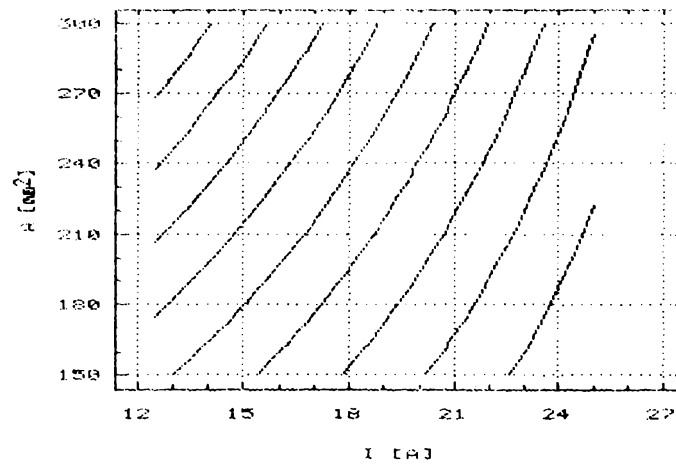
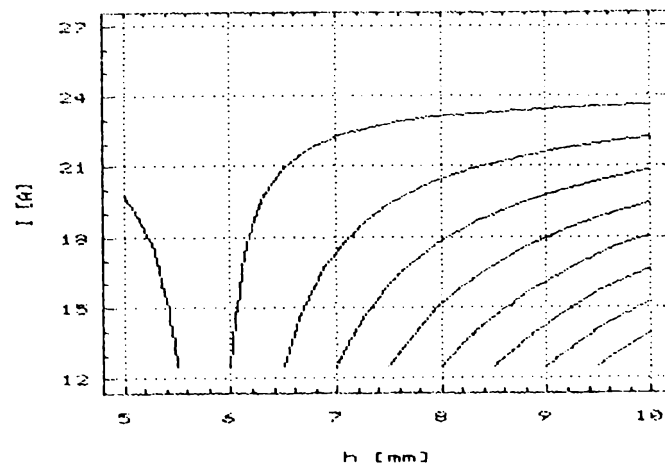


fig. 7.94. Curbe de nivel constant $IP_1 - (h, A)$

fig. 7.95. Curbe de nivel constant $IP_1 - (t_1, A)$ fig. 7.96. Curbe de nivel constant $IP_1 - (I, A)$ fig. 7.97. Curbe de nivel constant $IP_2 - (h, I)$

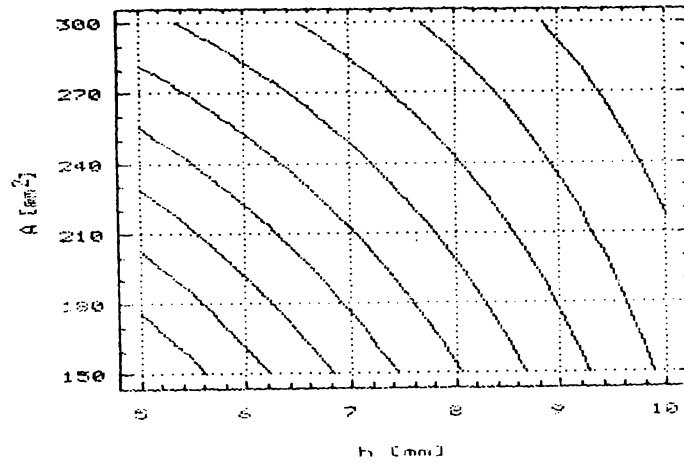


fig. 7.98. Curbe de nivel constant $IP_2 - (h, A)$

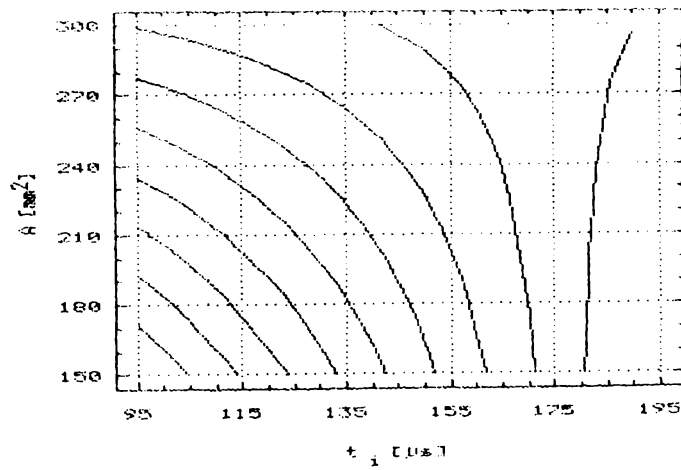


fig. 7.99. Curbe de nivel constant $IP_2 - (t_0, A)$

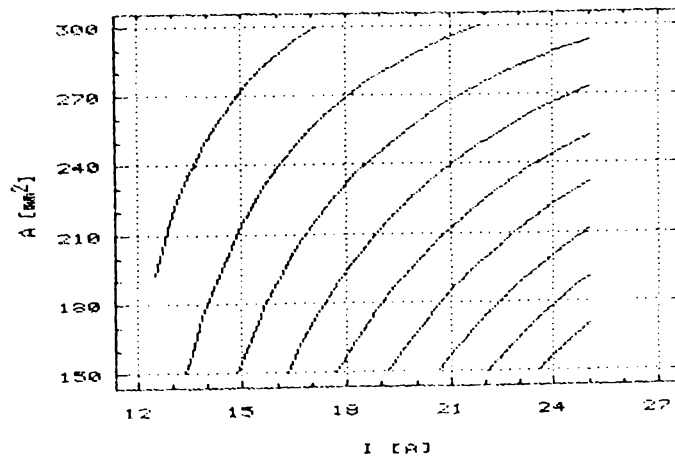
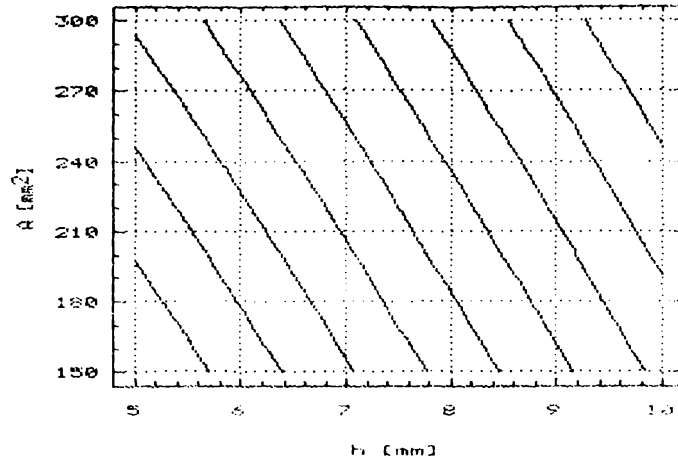
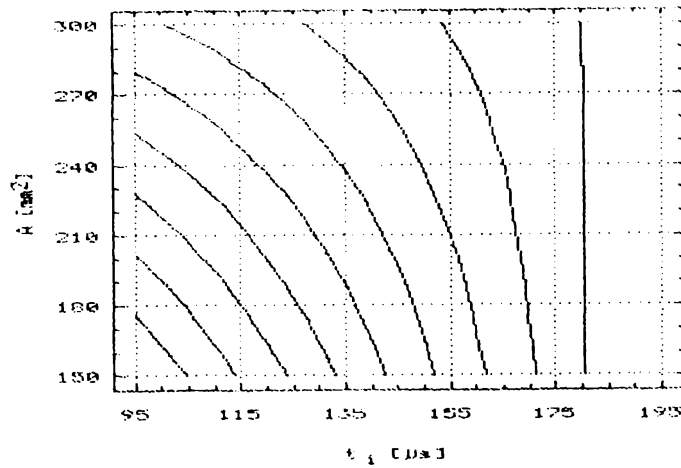
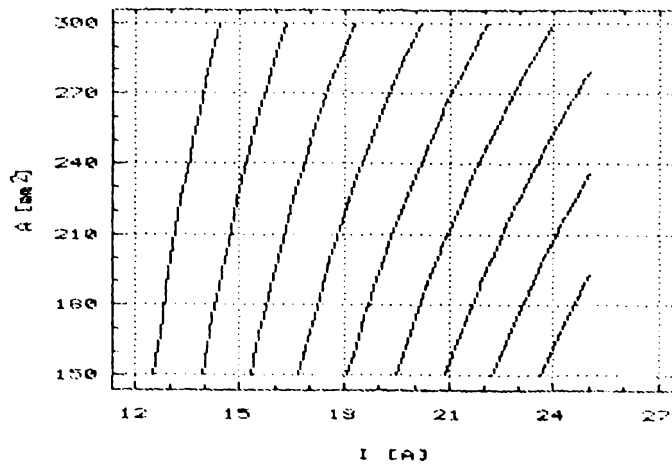


fig. 7.100. Curbe de nivel constant $IP_2 - (I, A)$

fig. 7.101. Curbe de nivel constant IP_3 - (h, A)fig. 7.102. Curbe de nivel constant IP_3 - (t_s , A)fig. 7.103. Curbe de nivel constant IP_3 - (I, A)

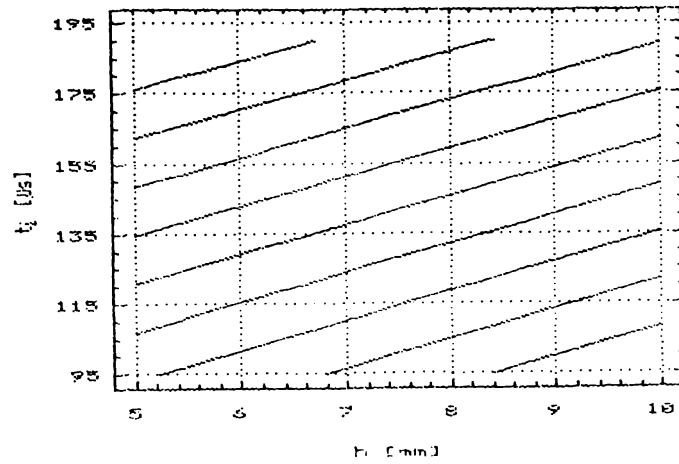


fig. 7.104. Curbe de nivel constant $R_a - (h, t_1)$

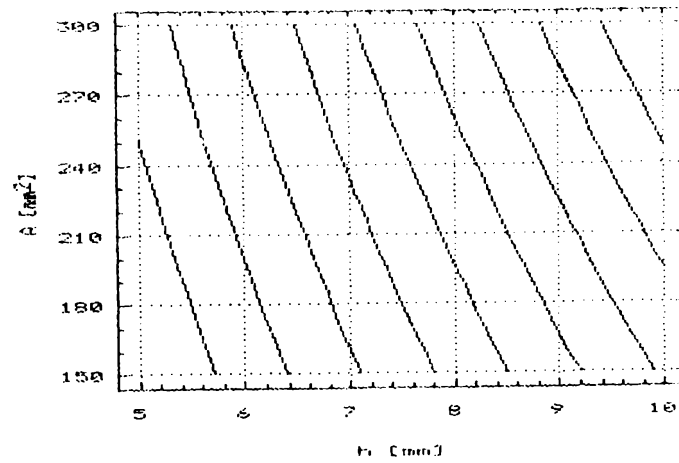


fig. 7.105. Curbe de nivel constant $R_a - (h, A)$

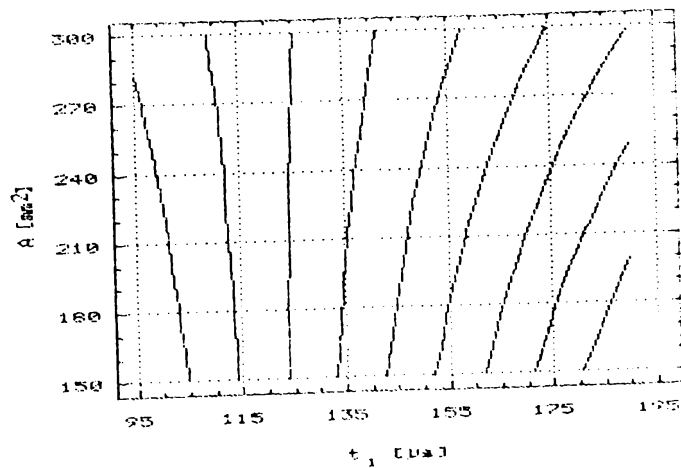


fig. 7.106. Curbe de nivel constant $R_a - (t_1, A)$

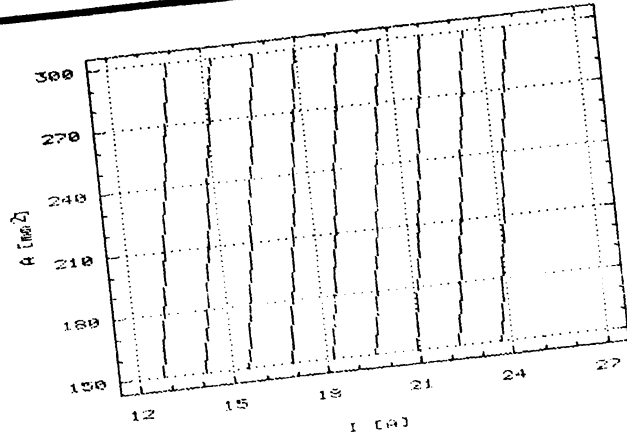


fig. 7.107. Curbe de nivel constant $R_a - (I, A)$

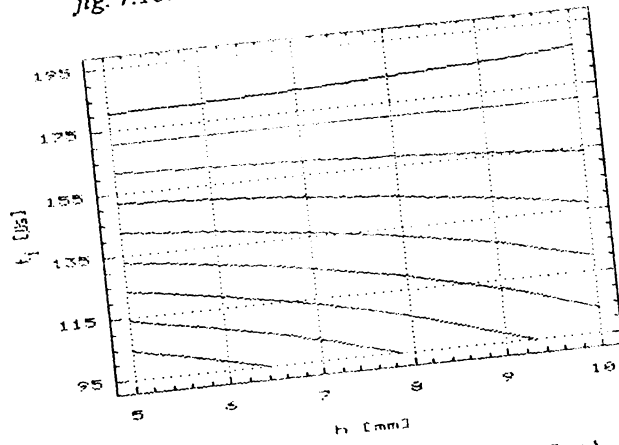


fig. 7.108. Curbe de nivel constant $S_L - (h, t_i)$

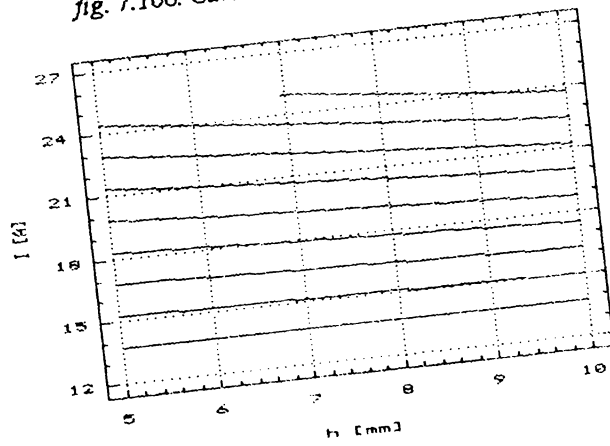


fig. 7.109. Curbe de nivel constant $S_L - (h, I)$

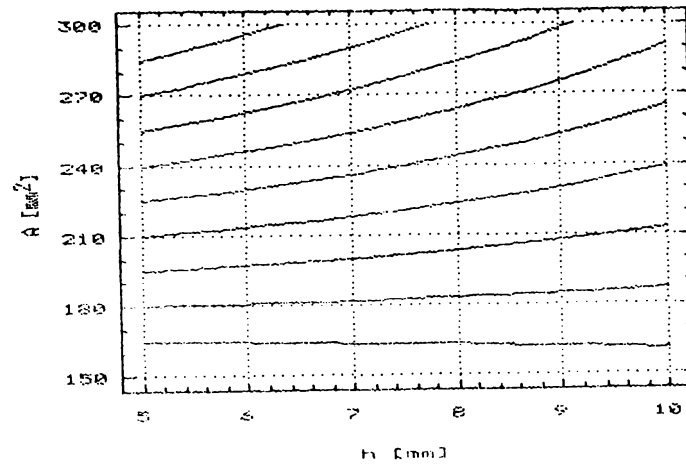


fig. 7.110. Curbe de nivel constant $s_L - (h, A)$

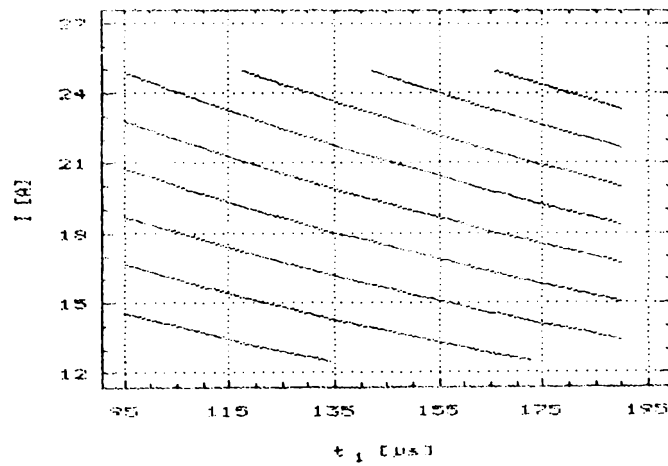


fig. 7.111. Curbe de nivel constant $s_L - (t_i, I)$

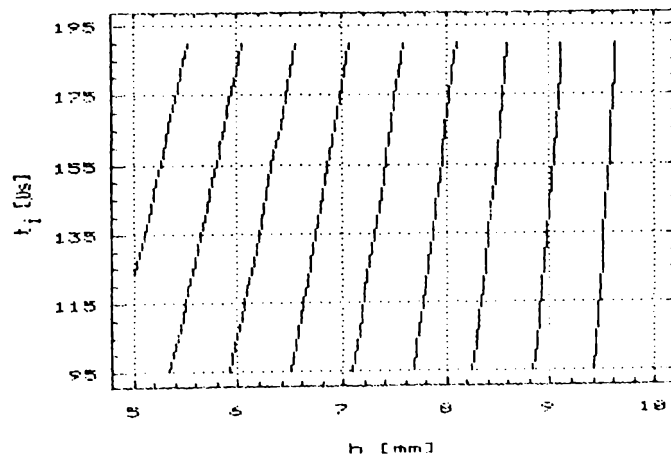


fig. 7.112. Curbe de nivel constant $K - (h, t_i)$

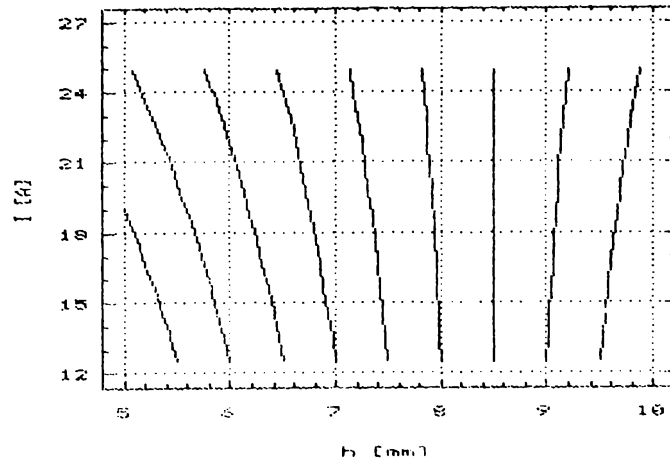


fig. 7.113. Curbe de nivel constant K - (h , I)

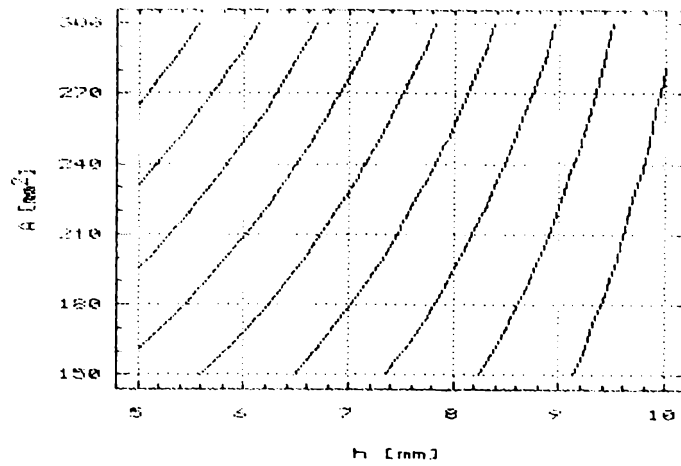


fig. 7.114. Curbe de nivel constant K - (h , A)

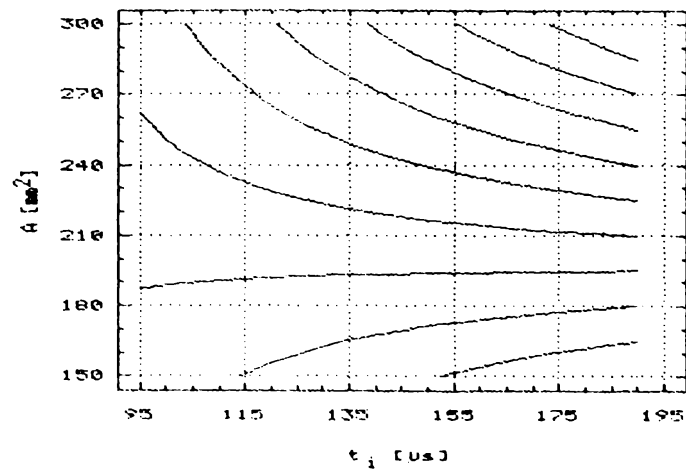


fig. 7.115. Curbe de nivel constant K - (t_i , A)

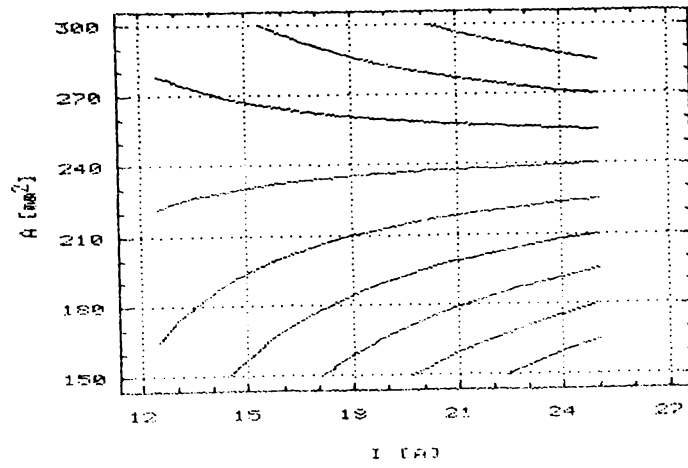


fig. 7.116. Curbe de nivel constant K - (I, A)

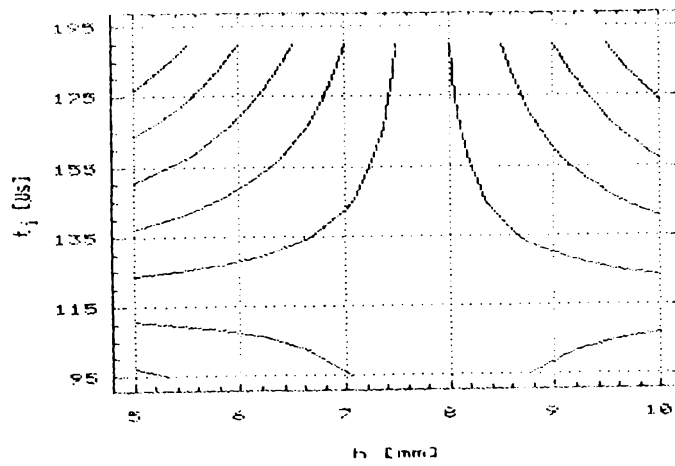


fig. 7.117. Curbe de nivel constant O_v - (h, t_v)

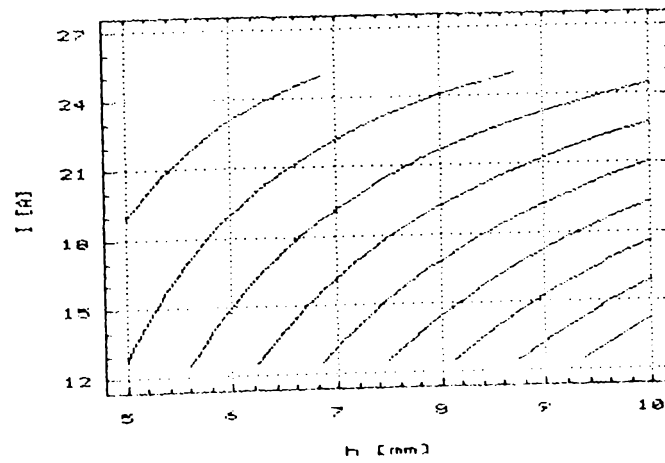
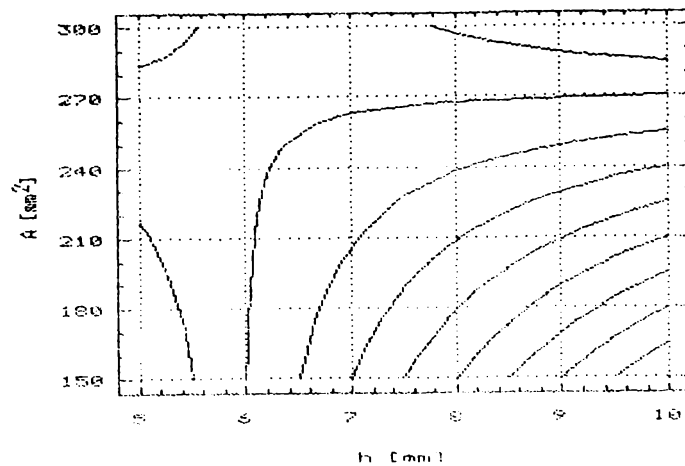
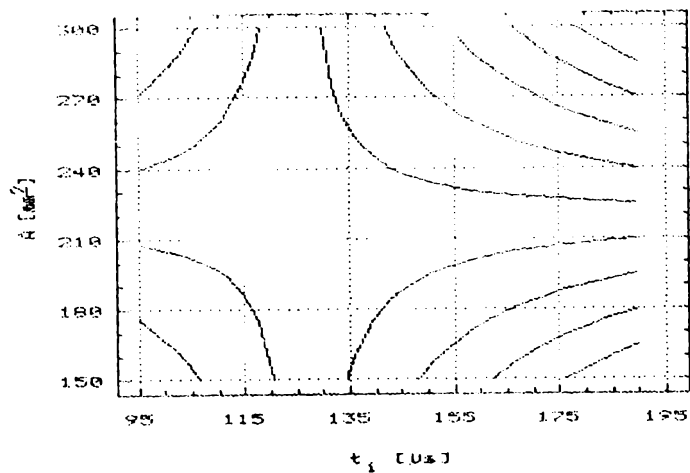
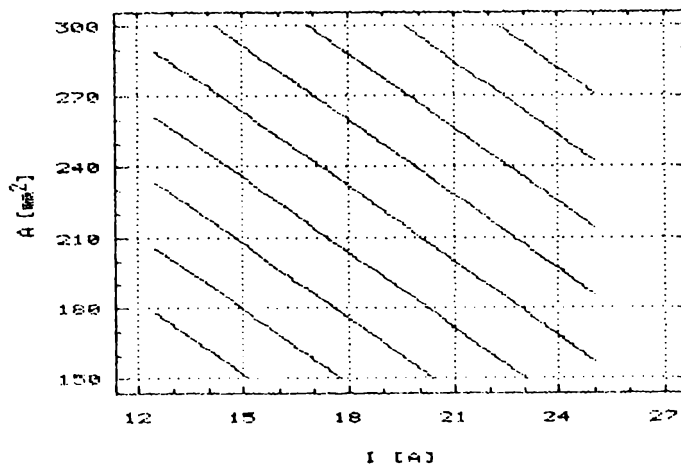


fig. 7.118. Curbe de nivel constant O_v - (h, I)

fig. 7.119. Curbe de nivel constant $O_v - (h, A)$ fig. 7.120. Curbe de nivel constant $O_v - (t_s, A)$ fig. 7.121. Curbe de nivel constant $O_v - (I, A)$