

Ing. TIBERIU-MARIUS KARNYANSZKY

CONTRIBUȚII LA CONDUCEREA
AUTOMATĂ A PRELUCRĂRII
DIMENSIONALE PRIN
EROZIUNE ELECTRICĂ COMPLEXĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC
Prof.univ.dr.doc.șt.ing.dhc. AUREL NANU

642. 454
369 E

2004

CUPRINS

Lista abrevierilor	5
Introducere	10
Capitolul 1.	
Prelucrarea dimensională	13
Capitolul 2.	
Eroziunea electrică complexă	20
2.1. Noțiuni generale	20
2.2. Caracteristici tehnologice	23
2.2.1. Precizia geometrică	23
2.2.2. Starea suprafeței	26
2.2.3. Productivitatea prelucrării	28
2.2.4. Uzura obiectului de transfer	29
2.2.5. Costuri	30
2.3. Parametri și factori de influență	30
2.3.1. Factori de influență de natură electrică	31
2.3.2. Factori de influență de natură mecanică	36
2.3.3. Factori de influență determinați de obiectul de transfer	38
2.3.4. Factori de influență determinați de obiectul de prelucrat	41
2.3.5. Factori de influență determinați de mediul de lucru	41
2.3.6. Factori de influență determinați de sistemul tehnic	43
2.3.7. Factori de influență determinați de tipul prelucrării	45
2.3.8. Factori de influență determinați de operatorul uman	46
2.3.9. Factori de influență determinați de mediul înconjurător	46
2.3.10. Concluzii privind factorii de influență la prelucrarea prin eroziune electrică complexă	46
2.4. Prelucrarea prin eroziune electrică complexă comparativ cu alte procedee de prelucrare prin eroziune	49
2.5. Utilajul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică complexă	49
2.5.1. Structura generală a unui utilaj de prelucrare prin eroziune electrică complexă	50
2.5.2. Tipuri de operații de prelucrare prin eroziune electrică complexă	51
2.5.3. Aspecte tehnologice privind prelucrarea prin eroziune electrică complexă ..	52
Capitolul 3.	
Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea electrică complexă	53
3.1. Stadiul actual al cercetărilor teoretice	53
3.2. Stadiul actual al cercetărilor experimentale. Rezultate practice	60
3.2.1. Productivitatea prelucrării. Timpul de prelucrare	60
3.2.2. Calitatea suprafeței	62
3.2.3. Alte rezultate	63
3.2.4. Parametri tehnologici necesari	64

3.3. Modele matematice determinate	65
3.3.1. Productivitatea prelucrării	65
3.3.2. Durata prelucrării	70
3.3.3. Uzura radială a obiectului de transfer	71
3.3.4. Uzura relativă	72
3.4. Stadiul actual al soluțiilor constructive	72
3.4.1. Mașina de debitat MEC-75	77
3.4.2. Mașina de prelucrat fante longitudinale	78
3.4.3. Mașina de debitat țevi	79
Capitolul 4.	
Contribuții la modelarea matematică a procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică complexă	81
4.1. Modele matematice ale experimentelor efectuate	84
4.1.1. Experimente	84
4.1.2. Modele matematice	89
4.2. Verificarea modelelor experimentelor efectuate	91
4.3. Optimizarea experimentelor efectuate	93
4.4. Alte modele matematice	94
4.4.1. Funcții de o variabilă	94
4.4.2. Funcții de două variabile	100
Capitolul 5.	
Sistem informatic pentru optimizarea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică complexă	114
5.1. Algoritmi de planificare a experimentelor	116
5.2. Algoritmi de prelucrare a datelor experimentale	119
5.2.1. Analiza dispersională cu un factor	122
5.2.2. Analiza dispersională cu doi factori independenți	127
5.2.3. Analiza dispersională cu doi factori dependenți	130
5.3. Algoritmi de modelare	135
5.3.1. Modelarea funcțiilor de o singură variabilă	135
5.3.2. Modelarea funcțiilor de mai multe variabile	149
5.4. Algoritmi de simulare	156
5.4.1. Metoda reducerii domeniului admisibil la funcțiile de o variabilă	157
5.4.2. Metoda reducerii domeniului admisibil la funcțiile de două variabile	159
5.5. Algoritmi de optimizare	161
5.5.1. Programarea liniară. Algoritmul simplex	162
5.5.2. Programarea neliniară. Algoritmul Rosen	172
5.6. Utilizarea bazelor de date în prelucrarea tehnologică	180
5.7. Sistem informatic de optimizare a prelucrării dimensionale	182
5.8. Conducerea off-line/on-line a procesului folosind sistemul informatic	206
5.8.1. Comanda off-line	207
5.8.2. Comanda on-line	207
5.8.3. Reglarea automată a funcționării mașinii de debitat	209
Concluzii	215
Bibliografie	218

LISTA ABREVIERILOR

$a_0, a_1, \dots, a_{11}, a_{12}, \dots$	-coeficienți		contraelectromotoare la mers în gol
a, a'	-limita stânga a intervalului de definiție a funcției	C_{ed}	-costul energiei directe
A	-ampermetru	C_m	-factorul cuplului de rotație
	-arbore portsculă	C_{md}	-cheltuieli cu materiale directe
	-cameră a servovalvei	C_{rd}	-costul salariilor directe
	-factor de intrare	C_{EE}	-costul energiei electrice
	-matricea coeficienților în programarea liniară	C_{EEM}	-costul specific al energiei electrice
AC	-acționarea consolei	C_{LL}	-costul LL
A/N	-(convertor) analogic-numeric	C_{LLM}	-costul specific al LL
A_i	-valoare a factorului de intrare	C_{OT}	-costul OT
	-abaterea inferioară	C_{OTM}	-costul specific al OT
A_s	-abaterea superioară	C_{SDV}	-cota pentru SDV-uri
b, b'	-limita dreapta a intervalului de definiție a funcției	C_0	-valoarea criteriului Cochran
b_1, b_2, \dots	-termeni liberi	d	-limita dreapta a intervalului de definiție a funcției
B	-batiu	D	-determinant al matricei
	-bază în programarea liniară	DA	-disc OT într-un sistem cu OT multiplu
	-cameră a servovalvei	DC	-dizolvare anodică
	-factor de intrare	DEI	-dispozitiv de comandă
B_i	-valoare a factorului de intrare	DEIRC	-descărcare electrică în impuls
c	-limita stânga a intervalului de definiție a funcției	DEISD	-descărcare electrică în impuls cu rupere de contact
c_1, c_2, \dots	-coeficienții funcției obiectiv		-descărcare electrică în impuls prin străpungerea dielectricului
C	-capacitatea din circuitul electric de alimentare a SL	D_i	-distanțier
	-cheltuieli medii la prelucrarea prin eroziune	DR	-dispozitiv de rotire și divizare
	-colector	E	-intensitatea câmpului electric dintre OP și OT
	-consolă	EC	-element comparator
C_v	-cuvă pentru LL	ECA	-element comparator-amplificator
CL	-capul de lucru	EE	-element de execuție
CLeg	-conducte de legătură	EEC	-eroziune electrică complexă
C^B	-coeficienții bazei în programarea liniară	EM	-element de măsurare
C_{cd}	-costul combustibilului direct	ET	-element traducător
C_d	-costul desfacerii, transportului, publicității	f	-numărul total de grade de libertate
C_{des}	-costul deșeurilor recuperabile		-funcție obiectiv
C_e	-factorul tensiunii		

f_i	-numărul gradelor de libertate ale experimentului i	m_{DA}	-masa de material îndepărtat din OP prin DA
f_{EP}	-frecvența DEI	m_{EP}	-masa craterelor elementare în OP
F	-fantă	m_{ET}	-masa craterelor elementare în OT
F, F_A, F_B, F_{AB}	-valoarea testului Fischer	m_{OP}	-masa de material prelevat din OP
FOT	-forma OT	m_{OP1}	-masa OP înainte de prelucrare
g	-grosimea OT	m_{OP2}	-masa OP după prelucrare
GC	-ghidajul consolei	m_{OT}	-masa de material uzat din OT
GD^2	-moment de inerție a motorului	m_{OT1}	-masa OT înainte de prelucrare
H_s	-grosimea (adâncimea) stratului modificat termic	m_{OT2}	-masa OT după prelucrare
HM_A, HM_{MM}	-cilindru hidraulic	M	-coeficient de penalizare
HM_{CL}, HM_{MF}	-hidromotor		-modulul soluției de silicat de sodiu
i	-curentul din schema electrică echivalentă a ansamblului sursă-SL		-motor de curent continuu
	-raport de transmisie		-motor de curent alternativ
i_c	-curent de comandă	MA	-motor de avans
i_{ref}	-curent de referință	MAOT	-motor de antrenare a OT
I	-intensitatea curentului electric	MB	-menghină mobilă
IL	-modul de introducere a LL în SL	MC	-masa cuvei
I_m	-valoarea medie a intensității curentului electric	Me	-materialul din care este confecționat OT
I_n	-matricea unitate de ordin n	MF	-menghină fixă
	-curent nominal	MH	-motor hidraulic
j	-densitate de curent	ML	-mediu de lucru
k	-numărul de experimente		-microlimitatoare
K	-contactor		-mișcare de poziționare longitudinală
K_{EE}	-coeficient care depinde de condițiile de prelucrare	MLP	-mișcare de poziționare orizontală a CL
K_{LL}	-coeficient care depinde de timpul între două schimbări ale LL	MPP	-mișcare de rotație de poziționare
K_{OT}	-coeficient de preluare în costul OT a altor cheltuieli	MSP	-mecanism șurub-piuliță
$K_1, K_3, K_5, K_6, K_{DC}, K_{EE}, K_{EM}, K_{MSP}, K_P, K_{RM}$	-constante	M_{CC}	-motor de curent continuu
K_e	-constantă electrică	M_1	-rotor
L	-inductivitate	M_2	-motor de curent continuu
	-lunetă	$n, n_x, n_x', n_r, n_\alpha$	-turația OT
LL	-lichid de lucru	n_i	-numărul de replici ale experimentului i
m	-numărul factorilor de influență	n_n	-turație nominală a motorului
	-semnal electric de comandă	n_{ref}	-turația de referință a OT
		N	-numărul de combinații la experimentul activ
		N/A	-(convertor) numeric-

N_p	analogic -energia consumată de procesul de prelucrare prin EEC		electrică -mecanism șurub-piuliță -parte reală -rezistență
N_{LL}	-energia consumată cu circulația LL	Rz	-rezervor pentru LL
N_{OT}	-energia consumată cu mișcarea OT	RA	-rolă de antrenare
N_1, N_2, \dots	-numărul de valori ale factorului de influență 1, 2, ...	RE	-regulator electronic
OP	-obiectul de prelucrat	RG	-role de ghidare a OT
OT	-obiectul de transfer	RM	-reductor -reductor melcat
OT-B	-OT de tip bandă	RS	-role de sprijin
OT-D	-OT de tip disc	RSA	-role de sprijin și antrenare
OT-F	-OT de tip fir	R_a	-rugozitatea suprafeței OP definită prin abaterea profilului
p	-presiunea de contact între OP și OT	R_i	-rezistență variabilă
P	-pasul șurubului -pompă centrifugă -puterea introdusă în SL -proces	R_{max}	-adâncimea maximă a neregularităților
PC	-perii colectoare	R_r	-rezistență rotorică
PP	-peliculă pasivantă	R_s	-rezistența suplimentară -cheltuieli de regie ale secției
PP-P	-sistem portperie-perie	R_t	-cheltuieli de regie ale întreprinderii
$P(x)$	-polinom de interpolare	R_z	-înălțimea neregularităților la suprafața OP
$P_m(x)$	-polinom de interpolare de grad m	R_{A+}	-ioni pozitivi în ML
q_{OP}	-productivitatea specifică a prelevării (exprimată volumic)	R_{B-}	-ioni negativi în ML
q_{OP}^m	-productivitatea specifică a prelevării (exprimată masic)	R_L	-rezervor LL
q_{OT}	-debitul specific al uzării (exprimat volumic)	R_{SL}	-rezistența electrică a SL
q_{OT}^m	-debitul specific al uzării (exprimat masic)	R_1, R_2	-robineți
Q	-parte imaginară	s_c	-comanda mișcării de avans circular
Q_A, Q_B	-debite pentru camerele servovalvei	s_t	-comanda mișcării de avans transversal
Q_{LL}	-volumul de LL consumat în timpul prelucrării	s_i	-grosimea interstițiului lateral
Q_{OP}	-productivitatea (volumică) a prelucrării	$s_1 \dots s_{20}$	-coeficienți de ponderare la experimentul psihologic
Q_{OP}^m	-productivitatea masică a prelucrării	S	-fază la alimentarea electrică
Q_{OT}	-debitul volumic al uzurii OT	SAE	-sorb pentru LL
Q_{OT}^m	-debitul masic al uzurii OT	SAOT	-suprafața de contact între OP și OT
r	-număr de replici	SBAC	-abaterea medie pătratică
R	-fază la alimentarea	SC	-sistem de alimentare cu energie electrică
			-sistemul de acționare a OT
			-suport basculant pentru acționarea curelei
			-sursă de curent

SCC	-sursă de curent continuu		longitudinal
SELL	sistem de evacuare a lichidului de lucru	V_m V_r	-viteza medie de avans -viteza relativă între OP și OT
SL	-spațiu de lucru -sanie longitudinală	V_t	-viteza de avans transversal
SRA	-sistem de reglare automată -sistem de reglare a avansului	V_u V	-uzura relativă volumică -voltmetru de măsurare a tensiunii de lucru
ST	-sanie transversală	V_g	-variație globală
$S^2, S_g^2, S_A^2, S_{AB}^2, S_B^2, S_1^2, S_2^2$	-dispersii de selecție	V_A	-volumul asperităților -variația factorului A
S_{con}^2	-dispersie de concordanță	V_{AB}	-variația interfactori A, B
S_i^2	-dispersia de selecție a experimentului i	V_B V_{DA}	-variația factorului B -volumul de material îndepărtat din OP prin DA
t	-valoarea testului Student		-volumul craterelor elementare în OP
t_d	-timpul de debitare	V_{EP}	-volumul mediu de material din OT uzat la fiecare DEI
t_p	-timpul de prelucrare	V_{ET}	-volumul de material prelevat din OP
t_o	-durata impulsului		-volumul de material prelevat din OT
T	-fază la alimentarea electrică -constantă de timp electrică	V_{OP}	-variație datorată factorilor întâmplători
T_m	-constantă de timp electromecanic	V_{OT}	-variație datorată factorilor sistematici
TC	-transmisie cu curea trapezoidală	V_1	-factor de influență
TG	-tahogenerator	V_2	-soluție de pornire
u	-tensiunea din schema electrică echivalentă a ansamblului sursă-SL -variabile de intrare în sistem	x x^0 X^B	-termenii liberi ai bazei în programarea liniară
u_c	-tensiune de comandă	y	-parametru tehnologic
u_r	-tensiune de reacție		-variabile de ieșire din sistem
U	-tensiune electrică -regulator de tensiune -dispozitiv de fixare a OP	y_i	-parametru tehnologic -valoarea medie a parametrului tehnologic i
UC	-unitate centrală a calculatorului	y_{ij}	-valoarea replicii j a experimentului i
U_g	-tensiunea de mers în gol		-valoarea experimentului în care primul factor de influență are valoarea i iar al doilea are valoarea j
U_l	-tensiune de lucru		-valoarea replicii v a experimentului în care primul factor de influență are valoarea i iar al doilea are valoarea j
U_n	-tensiune nominală a motorului		-funcții de transfer
U_r	-uzura radială a OT		-zona influențată termic
U_{ref}	-tensiune de referință	Y_{ijv}	
U_s	-căderea de tensiune pe SL		
U_{z_r}	-uzura relativă procentuală		
U_o	-tensiune de mers în gol		
v	-replică a unui experiment -avans	$Y_d, Y_{DC}, Y_{EE}, Y_{EM}, Y_{MSP}, Y_P, Y_{RM}$	
v_e	-viteza de avans		
v_l	-viteza de avans	ZIT	

$\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$	-constante	ρ	-densitate
ε	-semnal de eroare		-rezistența specifică a materialului OP
Δi	-diferență de curent	ρ_{OP}	-densitatea materialului OP
Δn	-diferență de turație	ρ_{OT}	-densitatea materialului OT
ΔU	-diferență de tensiune	Σ	-element sumator
Y_s	-densitatea LL		
χ^2	-valoarea testului χ^2		

INTRODUCERE

Dezvoltarea continuă a științei și tehnicii, avântul extraordinar al cercetării științifice în toate domeniile de activitate, au dus, în timp, la apariția multor metode și procedee de rezolvare a problemelor practic-aplicative pe care nevoia omenirii de a avea mereu ceva mai nou, mai bun, le-a pus în fața specialiștilor.

Între aceste metode, o parte sunt clasice, **tradiționale**, intrate de mult timp în exploatare, atât în țară cât și în străinătate. Pe lângă acestea există și alte metode, numite **tehnologii neconvenționale**. O astfel de tehnologie este definită ca fiind neclasică (netradițională), care nu se folosește în mod curent, având un caracter nou al procedeei tehnologice față de procedeele utilizate deja ([Cal81]). De cele mai multe ori, începuturile aplicării acestor metode sunt legate de industrii de vârf cum sunt cea militară, aeronautică sau spațială ([Flo78, PB99]).

O altă definiție a termenului de tehnologie netradițională este legată de aplicarea ei practică și astfel se consideră a fi neconvenționale acele tehnologii bazate, în esență, pe mărirea energiei disponibile la nivelul zonei de prelucrare pentru a facilita prelucrarea printr-o metodă clasică sau pe adoptarea unor principii noi, fundamental diferite de cele clasice ([NNP71, PB99, Sla00]).

Limitele metodelor clasice de prelucrare provin din condițiile impuse de modul de transmitere a energiei de prelucrare prin intermediul contactului mecanic dintre OP și OT ([NNP71]):

- necesitatea ca materialul OT să fie mai dur decât cel al OP;
- rigiditatea OT și OP să fie adecvată forțelor mecanice care apar în timpul prelucrării;
- OP să nu prezinte exclusiv rupere fragilă;
- OT să poată parcurge suprafața OP treptat, în fâșii și straturi succesive, dacă operația este una de așchiere etc.

Apariția în practica industrială a unor materiale cu caracteristici mecanice superioare, simultan cu cerințele efectuării unor prelucrări pretențioase (precizie, calitatea suprafeței) au condus la dezvoltarea unor procedee de prelucrare dimensională prin metode altele decât cele clasice, altfel spus – prin procedee neconvenționale. Ele sunt aplicabile acolo unde metodele tradiționale devin nesatisfăcătoare din punct de vedere economic sau chiar imposibil de aplicat ([B+86b, Dra93, Her95, HFM93, HLM92, HVB93, Lan86, LHM91, LMH91, Mar89, MHF93, MLH91, Nag98, Nan97, NNP71, N+89, OH86, Pop83a, PB99, RL96, Sla00]):

- pentru prelucrarea unor piese din materiale cu proprietăți excepționale (duritate, fragilitate, refractare, rezistente la coroziune etc., vezi tabelul 1.2 în capitolul 1);
- pentru prelucrarea cu parametri de lucru aflați la limită: viteze foarte mici (microni/secundă), temperaturi foarte mici (aproape de 0 K) sau foarte mari (zeci de mii de Kelvin), presiuni și puteri foarte mici sau foarte mari;
- prelucrări la dimensiuni foarte mici (miniaturizare) sau foarte mari (gigantizare);
- prelucrări ce impun precizie și rugozitate foarte stricte;
- suprafețe de prelucrat cu configurații complexe, greu sau imposibil de obținut pe altă cale.

Evoluția acestor tehnologii este de cele mai multe ori rapidă și este urmată de introducerea noilor realizări în producție, urmând diversitatea mereu crescândă a noilor materiale folosite în construcțiile de mașini ([Flo98]).

Acestea au dus la cercetări teoretice și în România, începute în anii 1950 la Institutul Politehnic din Timișoara de către profesorii Aurel Nanu și Gheorghe Savii.

Aplicațiile practice bazate pe prelucrările prin tehnologii neconvenționale au apărut imediat, dovadă fiind colaborarea Universităților (Politehnice) din Timișoara, Brașov, București și Sibiu cu Institutul de Cercetări pentru Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Institutul de Cercetări pentru Proiectări Electrotehnice, Institutul de Fizică și Tehnologia Aparatelor cu Radiații, Institutul de Sudură și Încercări Materiale, Centrul de Cercetări în Tehnologii Neconvenționale, concretizate prin introducerea în fabricație la Intreprinderea Electrotimiș, Intreprinderea Mecanică Timișoara și Electrotehnica București a unor mașini care folosesc prelucrarea prin tehnologii neconvenționale ([Nan83, RGM83]).

În anul 1975 Ministerul Educației și Învățământului a înființat la Timișoara, la Catedra de Tehnologie Mecanică „Centrul de cercetări în tehnologii neconvenționale” sub conducerea prof.dr.doc.șt.ing. Aurel Nanu, care a strâns laolaltă un număr mare de cercetători științifici și doctoranzi în domeniu. Rezultatele de excepție obținute de acest centru a determinat Academia Română să înființeze în 1984 la Timișoara „Comisia de cercetări în tehnologii neconvenționale” sub președinția prof.dr.doc.șt.ing. Aurel Nanu, pentru coordonarea cercetărilor naționale în domeniu și amplificarea lor.

La cea de-a VII-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale din octombrie 1993 s-a hotărât constituirea „Asociației Române pentru Tehnologii Neconvenționale” al cărei președinte este distinsul profesor Aurel Nanu. Asociația editează, începând cu anul 1997, „Revista de tehnologii neconvenționale” cuprinzând rezultatele cercetării științifice a specialiștilor în domeniu.

În cadrul acestor cercetări, prezenta lucrare de doctorat dorește să reunească toate rezultatele experimentale obținute până în acest moment și să permită optimizarea procesului de debitare prin EEC folosind pentru aceasta modelarea și simularea matematică legate de informațiile existente și de dorința utilizatorului de a cunoaște regimul de funcționare care asigură un timp minim de prelucrare în condițiile unei calități date a suprafeței după debitare.

Lucrarea este structurată în 6 capitole, desfășurate pe 232 pagini, conținând 24 tabele, 183 figuri și 22 algoritmi de calcul; toate acestea au fost obținute prin parcurgerea a 246 referințe bibliografice dintre care 31 aparțin autorului.

În **primul capitol** este prezentat cadrul general al prelucrărilor dimensionale și locul ocupat de EEC în cadrul diferitelor tehnici de prelucrare prin eroziune.

În **capitolul 2** este analizat fenomenul de EEC prin prisma cunoștințelor fundamentale acumulate în literatura de specialitate, apoi prin cea a parametrilor tehnologici și a factorilor determinanți ai prelucrării.

Acești factori au fost determinați și aranjați în ordinea importanței de către cercetările efectuate deja, rezultatele experimentale permițând atât tragerea unor concluzii generale cât și elaborarea unor modele matematice, în anumite cazuri particulare. Acestea sunt prezentate în **capitolul 3**, împreună cu scheme ale unor utilajelor care au fost testate, experimentate și introduse în practică, conținând atât mașini de prelucrare cât și module de conducere automată.

În **capitolul 4** sunt prezentate rezultatele experimentale obținute de autor în determinarea dependențelor între timpul de debitare prin EEC și calitatea suprafeței după prelucrare, și parametrii de intrare: electrici, mecanici etc. În baza acestor cercetări au fost elaborate mai multe modele matematice folosind dependențe liniare și neliniare, funcții de unul sau mai mulți parametri și metodele de optimizare aferente.

Lucrarea continuă cu prezentarea în **capitolul 5** a modului de concepere și implementare a unei baze de date care să conțină rezultatele experimentale și care permite optimizarea debitării prin EEC în condițiile în care există informații despre materialul care se dorește a se prelucra.

Capitolul 6 este destinat prezentării concluziilor și conține principalele contribuții originale ale autorului în domeniul cercetării fundamentale, experimentale și aplicative.

Autorul dorește să exprime încă o dată întreaga sa grațitudine față de conducătorul științific, prof.dr.doc.șt.ing.d.h.c. AUREL NANU, membru de onoare al Academiei de Științe Tehnice din România, pentru competența, ajutorul și înțelegerea manifestate de-a lungul anilor necesari întocmirii lucrării. Mulțumirile autorului se adresează tuturor colegilor din Catedra de Tehnologie Mecanică a Universității „Politehnica” din Timișoara, în special prof.dr.ing. Richard Herman și colegilor din catedra de Informatică a Facultății de Calculatoare și Informatică Aplicată din Universitatea „Tibiscus” Timișoara, în special conf.dr. Lucian Luca, pentru ajutorul dat în documentare sau cercetări experimentale.

Timișoara,
mai 2004

ing. Tiberiu Marius Karnyanszky

Capitolul 1. PRELUCRAREA DIMENSIONALĂ

Prelucrarea dimensională are o pondere însemnată în construcția de mașini deoarece obiectele produse prin turnare, deformare plastică, așchiere etc. își obțin suprafața reală printr-unul din aceste procedee. Prelucrarea dimensională se poate **clasifica** astfel ([Her99a, HK00a, Kar00a, Nan89]):

- **metode care nu modifică masa obiectului de prelucrat:**
 - metode de formare a OP:
 - turnarea, prin modificarea stării de agregare a OP (topire-solidificare);
 - deformarea plastică, prin modificarea energiei interne a OP;
 - agregarea pulberilor, prin modificarea energiei interne a OP;
 - metode de îmbinare nedemontabilă a mai multor OP:
 - sudarea;
 - nituirea;
 - lipirea;
 - asamblarea cu șurub;
 - deformarea plastică;
- **metode care îndepărtează masă din OP:**
 - metode cu separare de masă mare:
 - ruperea cu încovoiere, prin distrugerea locală a coeziunii corpului solid;
 - străpungerea, prin distrugerea locală a coeziunii corpului solid;
 - tăierea cu tășuri asociate, prin distrugerea locală a coeziunii corpului solid;
 - metode cu separare de masă mică;
 - așchiera, prin distrugerea locală a coeziunii corpului solid;
 - eroziunea, prin distrugerea locală a coeziunii corpului solid;
- **metode care adaugă masă la OP:**
 - metode de încărcare a OP cu un strat de adaos:
 - depunere chimică sau electrochimică, prin restabilirea coeziunii după o reacție chimică, în prezența sau în absența unui câmp electric exterior;
 - agregare de pulberi, prin modificarea energiei interne a corpului solid;
 - pulverizarea în stare de vapori, prin stabilirea coeziunii după modificarea stării de agregare (condensare-solidificare);
 - topire sau pulverizare în stare lichidă, prin stabilirea coeziunii după modificarea stării de agregare (condensare-solidificare);
 - metode de îmbinare nedemontabilă a mai multor OP:
 - topire sau pulverizare în stare lichidă, prin stabilirea coeziunii după modificarea stării de agregare (condensare-solidificare);
 - adeziune, prin atracție moleculară.

În mod corespunzător, mașinile care efectuează aceste operațiuni se pot clasifica astfel ([VBV80]):

- **după procedeul de prelucrare folosit:**
 - mașini de strunjit;
 - mașini de frezat;
 - mașini de găurit;
 - mașini de rectificat;
 - mașini de mortezat;
 - mașini de rabotat etc.;

- **după felul operației care se execută:**
 - mașini de filetat;
 - mașini de prelucrat canale de pană;
 - mașini de danturat etc.;
- **după gradul de automatizare:**
 - mașini cu comandă manuală;
 - mașini cu comandă semiautomată;
 - mașini cu comandă automată;
- **după dimensiune sau gabarit:**
 - mașini mici;
 - mașini mijlocii;
 - mașini grele;
 - mașini foarte grele;
- **după precizia de prelucrare:**
 - mașini cu precizie normală;
 - mașini cu precizie ridicată;
- **după gradul de universalitate:**
 - mașini universale;
 - mașini specializate;
 - mașini speciale.

În tehnologia construcțiilor de mașini, prelucrarea prin eroziune se poate aplica, funcție de procesele fizico-chimice și fizico-mecanice care au loc la suprafața OP, așa cum se prezintă în tabelul 1.1.

Aceste procese duc la transformări structurale, a stării de agregare sau mecanice (așa cum se poate observa din col. 1 a tabelului 1.1).

Fiind un procedeu atât de des întâlnit în construcția de mașini, vom detalia în continuare prelucrarea dimensională. Această detaliere se **justifică** din cauza:

- configurației complexe a OP;
- limitării rigidității sculei și a OP în prelucrarea microscopică;
- lipsei altor procedee la prelucrarea materialelor cu proprietăți specifice excepționale.

Eroziunea este definită ([N+83, RL96]) ca fiind procesul de distrugere a integrității structurilor de suprafață ale OP, prin acțiunea unui agent eroziv, ca în figura 1.1.

Din figură se poate observa că declanșarea proceselor de eroziune se poate face în anumite condiții de lucru (mărimea energiei distructive, repartitia ei în timp și spațiu) care să ducă la ruperea legăturilor între particulele din straturile superficiale ale OP.

Energia distructivă se poate obține pe mai multe căi, de aceea prelucrarea prin eroziune se poate clasifica (din punct de vedere al purtătorului energiei distructive) așa cum se prezintă în figura 1.2.

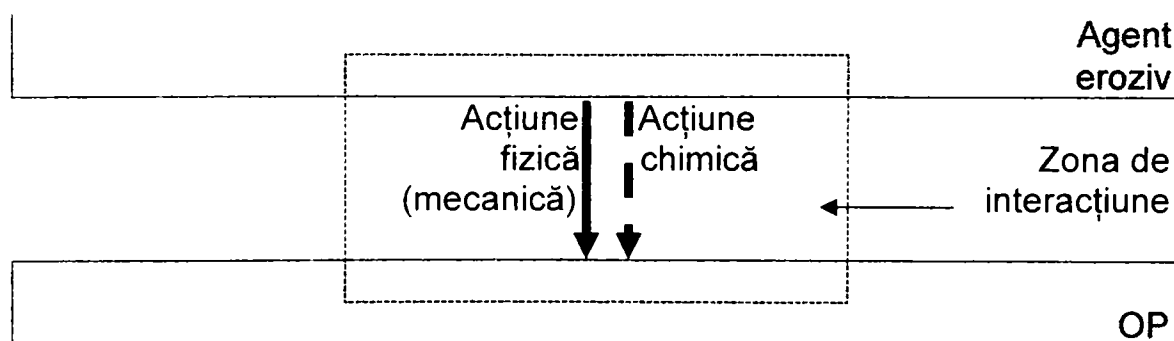


Figura 1.1. Interacțiunea dintre agentul eroziv și OP ([Her99a, Kar00a, Lan86, Nan97, NNP71])

Tabelul 1.1. Fenomene caracteristice prelucrării prin eroziune ([Her99a, Kar00a, N+83])

Metode tehnologice		Eroziune electrică	Eroziune cu plasmă	Eroziune cu fascicul laser	Eroziune cu fascicul de electroni	Eroziune electrochimică	Eroziune chimică	Eroziune ultrasonice	Eroziune electrică complexă
Stare solidă	-termică	√	√	√	√				√
	-chimică	√	√	√					√
	-mecanică							√	
Modificarea stării de agregare	-încălzire	√	√	√	√				√
	-topire	√	√	√	√				√
	-vaporizare	√	√	√	√				√
	-condensare	√	√	√	√				√
Ruperea Legăturilor inter-atomice	-termic	√	√	√	√				√
	-chimic					√	√		
	-mecanic							√	

Cercetările de specialitate arată ([MMC95]) că pe măsură ce trece timpul, tehnologiile convenționale se apropie, încet dar sigur, de limita lor de aplicabilitate; cercetările neconvenționale în schimb, datorită caracterului lor de noutate, sunt în plin avânt și va urma creșterea utilizării în practică (figura 1.3).

Metodele de prelucrare prin EEC au **avantaje** majore, cum sunt ([Her95, HL93, HFM93, HLM91, Kar00a, KN01, KN03a, LMH91, S+86]):

- construcția simplă a OT, folosind tehnologii de fabricație și materiale simple și ieftine;
- posibilitatea prelucrării de OP cu proprietăți mecanice și fizice deosebite (duritate, rezistență mecanică, temperatură de topire, refractaritate etc.) utilizate de exemplu pentru construcția sculelor așchietoare (oțeluri carbon ca OSC7, OSC8, ..., slab aliate VM18, CW20, înalt aliate C120, VMoC120, rapide Rp1, Rp2, Rp3, ..., etc. [HV92, M+90, N+83, SGP83]);
- coeficient de utilizare mare a materialului OP;
- posibilitatea executării unor operații milimetrice (fante [Her89, Her93a, HF93c, HLM91, H+93, N+83, N+89], microgăuri [PB99]);
- posibilitatea efectuării unor prelucrări care nu necesită alte operații ulterioare ([S+86], [HH99]);
- posibilitatea utilizării OT la mai multe cicluri succesive fără operații asupra suprafeței acesteia (cum ar fi reascuțirea);
- lipsa (sau prezența foarte redusă) modificărilor în zona de influență termică ([B+86b, LHM91, S+86]);
- sisteme tehnologice simple, automatizate, ce permit prelucrări optime în cele mai multe din operațiile de prelucrare dimensională;
- productivitate a prelucrării mai mare de 2-5 ori decât la metodele clasice, în condițiile unor costuri ale utilajelor de 1-3 ori mai mare dar a unui consum de energie redus la jumătate ([Nag98]) și a unei calități sporite a produsului rezultat ([HML91, N+83]).

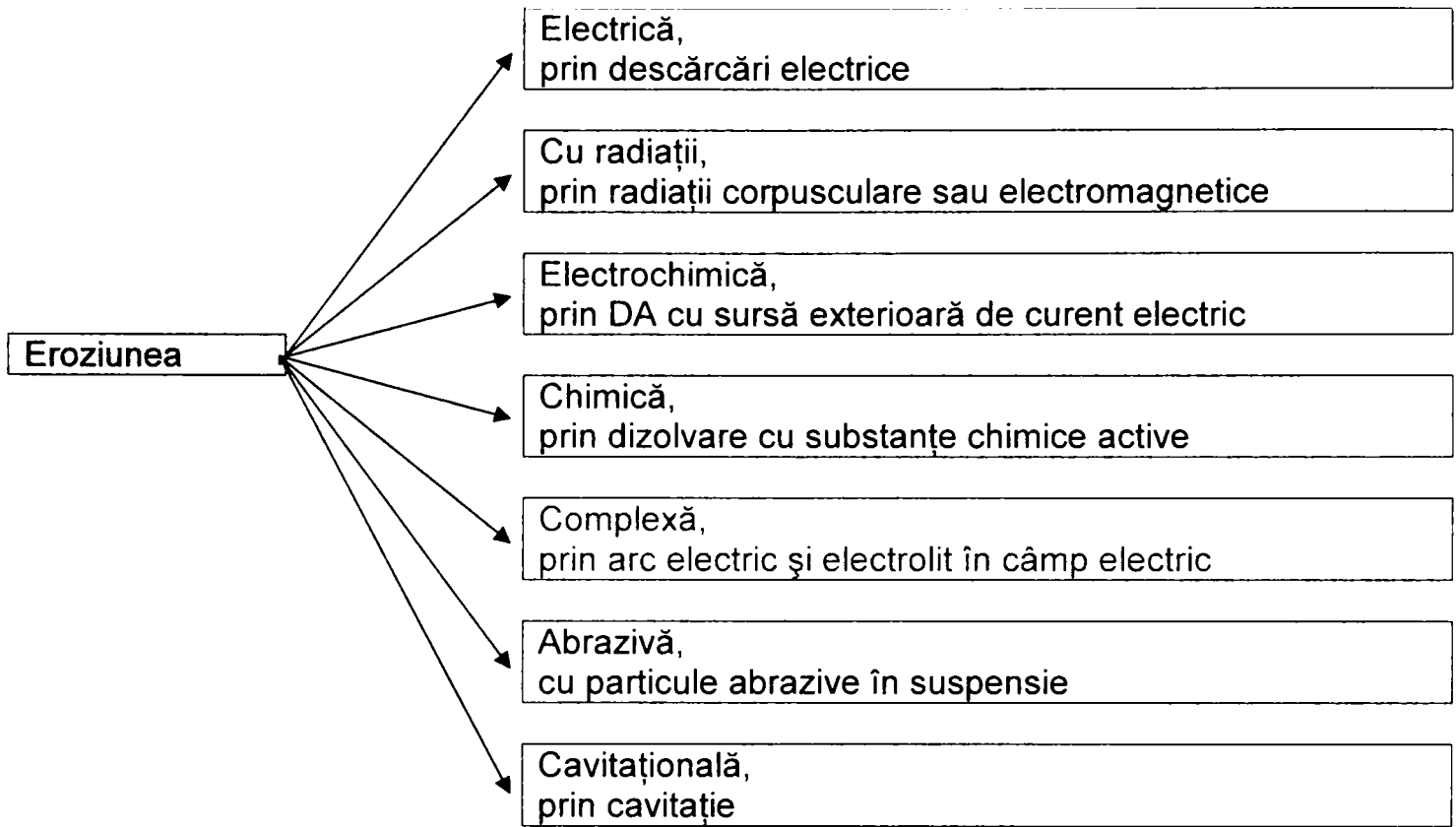


Figura 1.2. Clasificarea metodelor de prelucrare prin eroziune după purtătorul energiei distructive ([Kar00a], prelucrare după [Her99a, Nan83, Nan97])

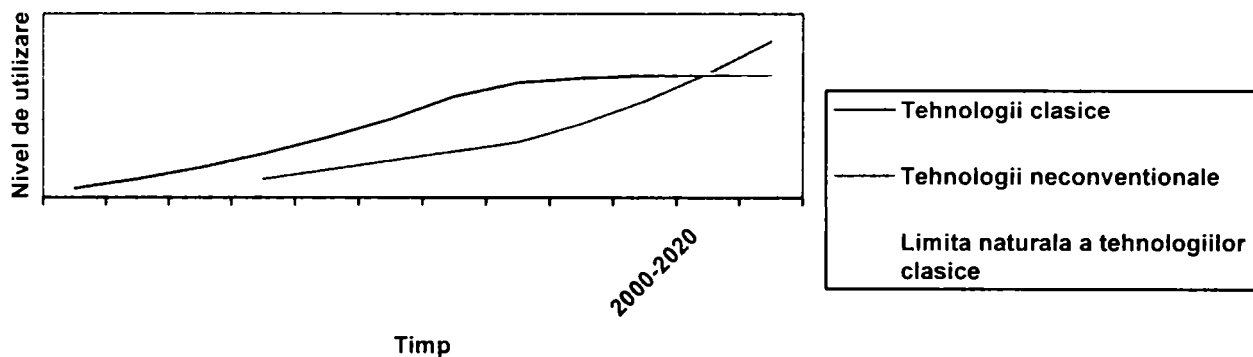


Figura 1.3. Evoluția tehnologiilor convenționale și neconvenționale (după [MMC95])

Totuși, metoda are și unele **dezavantaje**, care însă în timp pot deveni minore, pe măsură ce utilizarea EEC devine uzuală ([Her95, HL93, HFM93, HLM91, Kar00a]):

- fenomenele teoretice și practice nu sunt cunoscute complet, de aceea sunt puține mașini, utilizate în domenii restrânse (de exemplu, în 1989, pe plan mondial circa 2-6% din mașinile de prelucrare foloseau tehnologiile neconvenționale, în timp ce în România ponderea era de max 1%, [Mar89]);
- se poate aplica numai materialelor care au conductibilitate electrică;
- accesul dificil în SL a LL la unele operații;
- utilajele tehnologice sunt scumpe din cauză că sunt puțin numeroase;
- consumă multă energie electrică și LL cu efecte secundare dăunătoare;
- absența unei baze de date cu toate cercetările efectuate;
- numărul redus de cercetări asupra fenomenelor elementare care compun procesul.

Printre metodele de prelucrare dimensională prin eroziune, cele mai importante sunt prezentate în tabelele 1.3 și 1.4. Posibilitățile tehnologice ale principalelor procedee de prelucrare prin eroziune, pentru operația de debitare, grupate după natura materialului, sunt prezentate în tabelul 1.5.

Tabelul 1.2. Caracteristici fizice ale unor materiale dure ([Her70])

Material		Temperatura de topire [°C]	Material		Temperatura de topire [°C]
Metale	W	3.380	Oxizi	MgO	2.800
	Ta	3.000		Zr ₂ O ₂	2.690
	Mo	2.620		MgO-Al ₂ O ₃	2.140
	Nb	2.470		Al ₂ O ₃	2.050
	V	1.900	Boruri	TiB ₂	2.900
	Cr	1.875		TaB ₂	3.150
	Ti	1.638		W ₂ B	2.770
Carburi	TaC	3.780	Siliciuri	MoB ₂	2.100
	NbC	3.500		TaSi ₂	2.200
	TiC	3.160		WSi ₂	2.160
	WC	2.600		CrSi ₂	1.550
	Csi	2.200		MoSi ₂	2.050
Nitruri	TaN	2.090			
	TiN	2.950			
	NbN	2.300			

Tabelul 1.3. Clasificarea procedeelelor de prelucrare prin eroziune după compunerea sistemului eroziv ([Dra93, N+83, RL96])

Procedeu eroziv	Energie primară	OT	ML	Agent eroziv			
				Natură	Geometrie	Energia de efect dominant	Ațiunea în SL
Electric	Electrică	Electrod	Lichid dielectric	Descărcare electrică	Punte	Termică	Punctiformă Pulsat
Electro-chimic	Electrică	Electrod	Lichid electrolitic	Electrolit în camp electric	Punte	Electro-chimică	De suprafață Continuu
Chimic	Chimică	Mască protectoare	Electrolit	Mediu chimic activ	Jet	Chimică	De suprafață Continuu
Complex	Electrică	Electrod	Lichid electrolit	Descărcare electrică și/sau electrolit în camp electric	Punte	Termică și/sau electrochimică	De suprafață Pulsat/continuu
Plasmă termică	Electrică	Duză plasmatron	Gaz	Plasmă termică	Jet, termică Punte	Termică	De suprafață Continuu
Fascicul de electroni	Electrică	Catod cu emisie termoelectronică	Atmosferă vidată	Fascicul de electroni	Jet	Termică	Punctiform Pulsat
Fascicul laser	Electrică	Generator laser	Gaz	Fascicul de fotoni	Jet	Termică	Punctiform Pulsat/continuu
Abrazivă ultrasonică	Electrică	Sonotrod	Apă	Suspensie de particule abrazive	Punte	Mecanică	De suprafață Pulsat

642.454
369 E

Tabelul 1.4. Clasificarea procedeelor de prelucrare prin eroziune după caracteristicile generale ([N+83, Sla00])

Procedeu eroziv	Tensiune U [V]	Curent I [A]	Putere P [W]	Productivitate Q_{OP} [mm ³ /min]	Precizie dimensională maximă [mm]	Rugozitatea suprafeței R_a [μm]	Grosimea stratului modificat termic H_s [mm]
Electric	40-300	0,1-100	0,1-8	10 ⁴	0,001	≥0,05	0,02
Electrochimic	6-20	10-50000	<300	10 ⁵	0,0025	≥0,05	nu există
Chimic	-	-	-	10	0,0025	≥0,05	nu există
Complex	<40	<1000	<20	10 ⁴	0,001	≥0,16	0,1-0,2
Plasmă termică	100	<400	<50	10 ⁵	0,25	≥1,6	0,5-7
Fascicul de electroni	5000-175000	0,03-1	0,15-2	10 ³ -10 ⁶	0,008	≥0,08	0,005-1
Fascicul laser	-	-	0,2-2	10	0,008	≥0,2	0,005-1
Abrazivă	-	-	<10	10 ²	0,0001	≥0,001	0,003-0,01
Ultrasonică	-	-	<2,5	10 ²	0,0025	≥0,1	<0,05

Tabelul 1.5. Aplicabilitatea procedeelor de prelucrare prin eroziune la debitare ([N+83])

Procedeu eroziv	Debitare rectilinie				Debitare după un contur oarecare			
	Metale	Carburi metalice	Nemetale		Metale	Carburi metalice	Nemetale	
			ceramice	macro-moleculare			ceramice	macro-moleculare
Electric	+	+			+	+		
Electrochimic	+				+			
Chimic	+				+			
Complex	+	+						
Plasmă termică	+				+			
Fascicul de electroni	+	+			+	+		
Fascicul laser	+		+	+	+		+	+
Abraziv	+	+	+	+			+	+

Tabelul 1.6. Nivelul cheltuielilor de realizare a proceselor de prelucrare prin eroziune ([N+83])

Destinație	Electric	Electrochimic	Chimic	Complex	Plasmă termică	Fascicul de electroni	Fascicul laser	Abraziv
Investiții	mici	FOARTE MARI	mijlocii	mici	foarte mici	mari	mijlocii	mici
Echipament	MARI	mijlocii	mici	mici	mici	mici	mici	mici
Înlocuire OT	mijlocii	foarte mici	foarte mici	foarte mici	foarte mici	FOARTE MARI	MARI	mijlocii
Consum de energie	mici	mijlocii	mici	mici	foarte mici	mici	mici	mici
Cheltuieli TOTAL	mijlociu	mijlociu	mic	mic	foarte mic	mic	mic	mic

Cheltuielile medii necesare realizării unor procese de prelucrare prin eroziune, la nivel estimativ, sunt prezentate în tabelul 1.6. Acest cost se poate determina după formula ([Nan89]):

$$C = \left\{ \sum [C_{md} + C_{cd} + C_{cd} - C_{dex} + C_{rd} \cdot (1 + R_x)] + C_{STD} \right\} \cdot (1 + R_t) + C_d \quad (1.1)$$

în care suma se face pentru fiecare secție a întreprinderii.

Capitolul 2. EROZIUNEA ELECTRICĂ COMPLEXĂ

2.1. NOȚIUNI GENERALE

Eroziunea electrică și electrochimică complexă¹ reprezintă suprapunerea, în timp și spațiu, în SL, a prelucrării prin eroziune electrochimică și eroziune electrică [Her99a, Her99c, HF93c, HH03, HV92, HLM88, HLM92, HOM86, IP81, Kar00a, KN03a, KKB52, LMH91, Nag98, N+83, N+89, PPG93, RL96, Sav71, Sla00, Tur99, Zla97].

Prelucrarea prin EEC se definește [Her95, Her98, Her99a, HL93, HV92, HLM99a, Kar00a, KN01, KN03a, Lan86, LH98, Nan77] ca fiind procesul de dezvoltare simultană a DA și a DEI, în spațiul delimitat de OT, conectat la polul negativ al sursei de alimentare cu curent continuu, și OP, conectat la polul pozitiv al sursei de alimentare, în prezența ML.

Procesele fizico-chimice, mecanice, electrice etc. care au loc la prelucrarea prin EEC se desfășoară astfel ([Her99a, HF93c, HLM99a, Kar00a, Pop83a], figura 2.1):

- din cauza prezenței câmpului electric datorat conectării OP și OT la o sursă de curent continuu, în ML au loc procese anodice de decristalizare, transfer de sarcină, transport de substanță, reacții chimice etc. care degradează suprafața OP și asigură depunerea unei PP pe suprafața OP, cu o mare rezistență mecanică și bune proprietăți dielectrice; această PP este urmarea unei serii de reacții fizico-chimice dezvoltate pe fondul temperaturii extrem de înalte a materialului în zona DEI ([H+98]);
- când PP atinge o anumită grosime are loc pasivizarea anodului;
- intervine acum deplasarea tangențială a OT față de OP, cu v_r și apropierea celor două suprafețe datorită existenței presiunii p ;
- prin existența acestor solicitări mecanice, PP este îndepărtată la nivelul microasperităților și sunt create condițiile pentru apariția DEI (faptul că se depune PP care mai apoi este îndepărtată pe cale mecanică a dus la denumirea de procedeu anodo-mecanic [Sla00]);
- DEI au loc datorită apropierii dintre cele două suprafețe, a existenței PP, a câmpului electric de intensitate E și a existenței în ML a unei suspensii din produsele eroziunii;
- DEI se pot manifesta fie prin ruperea contactului deja stabilit (DEIRC), fie prin străpungerea dielectricului PP (DEISD);
- se ating astfel densități de curent de $10^3 - 10^5$ A/cm², cu durata de $10^{-3} - 10^{-5}$ s, ceea ce duce la apariția unor fenomene termice specifice unor temperaturi de $10^4 - 10^5$ K; simultan se produce o undă de șoc datorată acestor descărcări electrice care topește și vaporizează elementele găsite în SL ([MHF93]);
- aceste fenomene termice duc la topirea și vaporizarea explozivă a microasperităților de la suprafața OP, urmate imediat de răcire ca urmare a ML concomitent cu deteriorarea ML din cauza proceselor termice de descompunere și degradare;
- craterele nou apărute reiau procesul de DA și astfel întreg ciclul se repetă.

¹ mai poartă denumirea de **prelucrare anodo-mecanică** ([GM76, GV52]). Denumirea aparține lui V.N. Gusev (considerat primul cercetător al fenomenului-1926) și colaboratorilor săi E.A. Drozd și I.I. Bogorod și datează din 1948. În limba engleză se numește **electrochemical discharge machining** ([Sla00]).

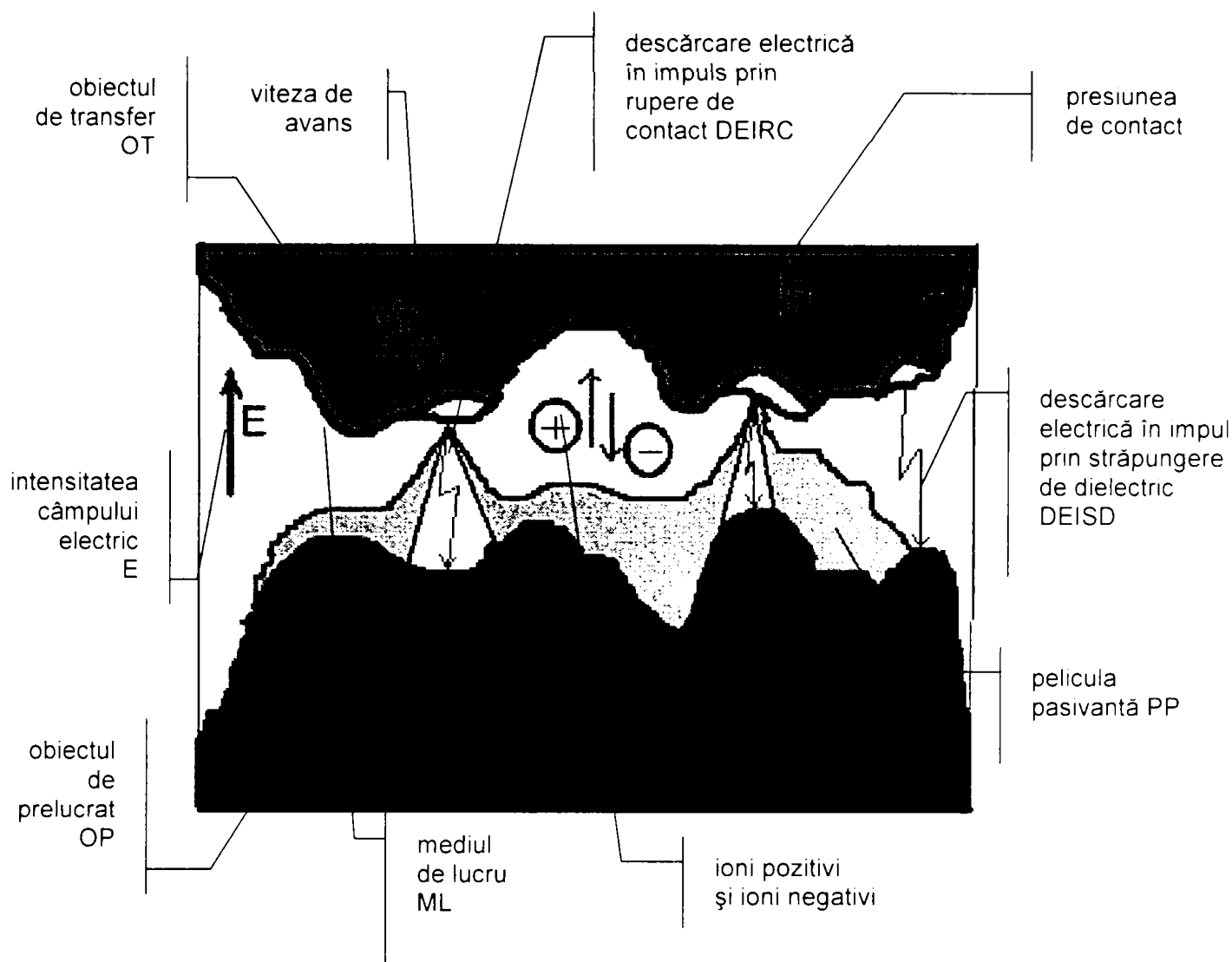


Figura 2.1. Schema de principiu a EEC ([Her92, Her95, Her98, Her99a, HH03, HL93, HV92, HF93c, KN01, Lan86, NK01, Nan77, N+89, Pop70, Zla97])

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

Cele două procese care concură la realizarea EEC (figura 2.2) sunt într-o anumită pondere relativă unul față de celălalt și anume ([Her95, Kar00a, Lan86, LH98, N+83, Pop71, Zla97]):

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

Fenomenul electrochimic (DA) are o pondere mică în procesul global de eroziune dar el are un rol important în refacerea PP și menținerea stabilității prelucrării, dacă procesul se desfășoară în condiții normale de lucru ([MLH91, PPG93]).

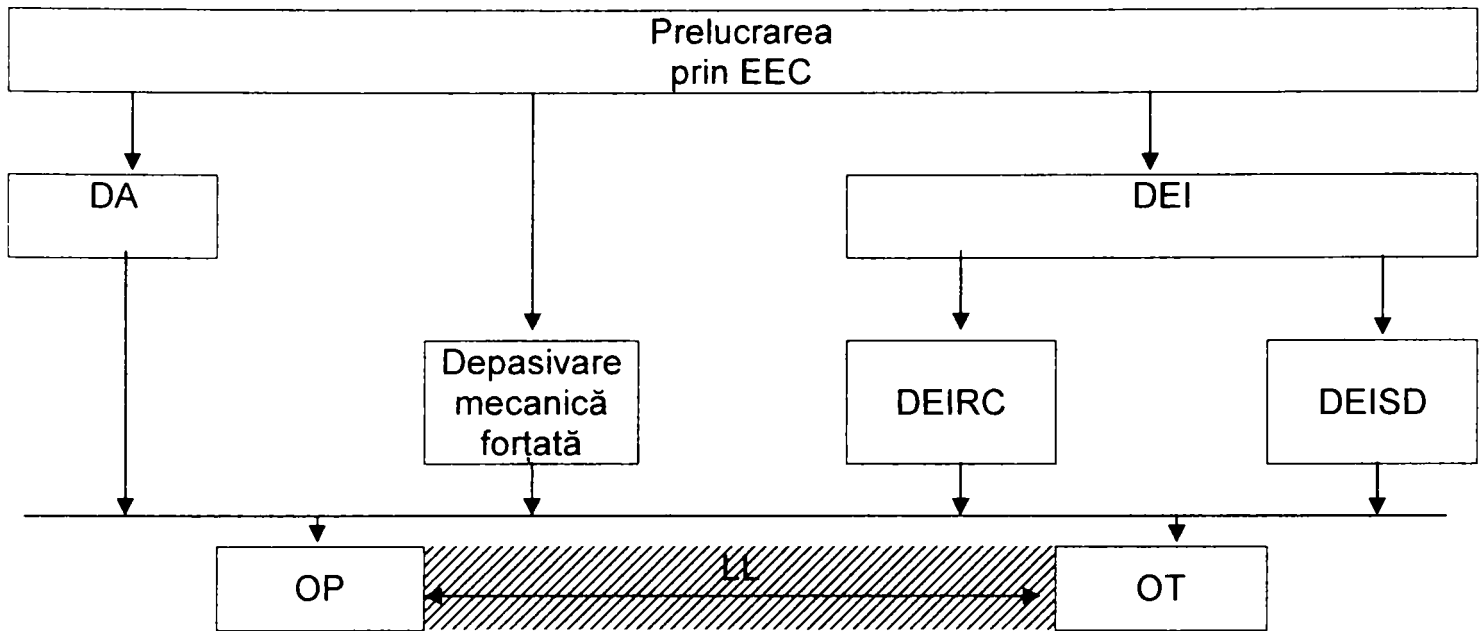


Figura 2.2. Fluxuri fundamentale în prelucrarea prin EEC ([HH03])

Ca fenomen secundar are loc și erodarea OT, dar aceasta se întâmplă într-un procent mult mai mic și astfel cantitatea de substanță prelevată este mult redusă; pe de altă parte, materialul din care se fabrică OT este comun și cheltuielile cu înlocuirea sunt foarte mici.

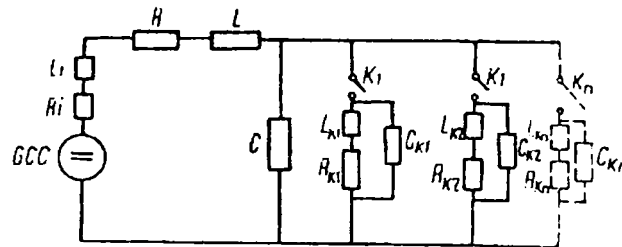


Figura 2.3. Schema electrică echivalentă totală a ansamblului sursă-SL ([Nan77])

Schema electrică echivalentă totală a prelucrării prin EEC este prezentată în figura 2.3. Conform acesteia, pornind de la ecuația diferențială generală a unui circuit RLC:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int idt \quad (2.1)$$

se poate scrie expresia tensiunii u din schema echivalentă:

$$u = R_i(i) \cdot i(t) + L_i \frac{di}{dt} + \frac{1}{c_i(t)} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2.2)$$

în care:

$$R_i = R_1 + R + R_{SL} \approx R_{SL} \quad (2.3)$$

$$R_{SL} = f(t) \quad (2.4)$$

$$C_i = C + \sum C_{Ki} \quad (2.5)$$

$$C_{KI} = f(t) \quad (2.6)$$

$$C_t = f(t) \quad (2.7)$$

de unde:

$$u \cong R_{sl}(t) \cdot i(t) + L_t \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_t(t)} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2.8)$$

Relația de mai sus arată că, la un z constant al circuitului, $i = f(u)$, adică, la un u mare rezultă i mare și invers. Cum productivitatea procesului de prelucrare depinde mai ales de densitatea de curent j , care la rândul său este funcție de i pentru aceeași suprafață activă a SL, rezultă că la i mare (respectiv u mare) se obține Q_{OP} mare iar la i mic (u mic) se obține Q_{OP} mică.

Principalele domenii de aplicare a prelucrării prin EEC sunt prezentate în tabelul 2.1.

2.2. CARACTERISTICI TEHNOLOGICE

Caracteristicile tehnologice sunt acele variabile care exprimă cantitativ și calitativ transformările pe care OP și OT le suferă în timpul procesului de prelucrare ([Her99b]) adică:

- precizia OP;
- starea suprafeței OP;
- productivitatea procesului de prelucrare Q_{OP} ;
- uzura OT.

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

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

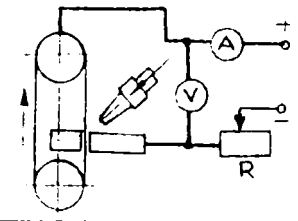
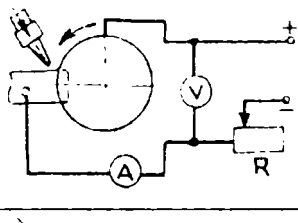
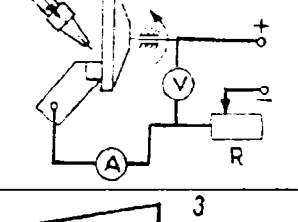
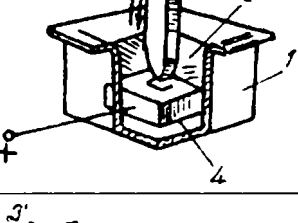
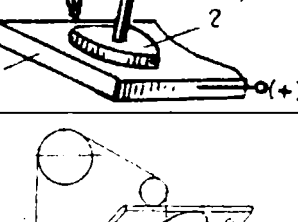
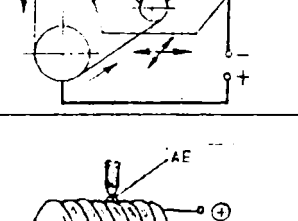
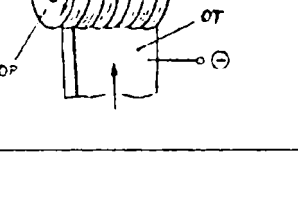
2.2.1. Precizia geometrică

Precizia geometrică este gradul de apropiere a dimensiunilor, formei geometrice și poziției reciproce a suprafețelor prelucrate, față de valorile lor nominale indicate în desen ([Bag97, P+92]).

Caracteristicile de precizie geometrică sunt ([Bag97, Her95, Her99a, Kar00a, KN03a, NLH97]):

- **precizia dimensională** a OP;
- **precizia formei geometrice** a OP;
- **precizia poziției reciproce** a unor elemente geometrice în raport cu anumite baze de referință.

Tabelul 2.1. Principalele domenii de aplicare a prelucrării prin EEC ([Kar00a, Lan86, Nan77, Zla97])

Schema de principiu	Denumirea operației	Exemple de aplicare
	-tăiere (șlăbitare, retezare) cu bandă	-materiale dure, oțeluri refractare, oțeluri călite etc.
	-tăiere (șlăbitare, retezare) cu disc -prelucrări profilate (disc profilat)	-tăierea barelor din oțel și aliaje speciale -prelucrarea cu sabloane plane sau OT profilate -prelucrarea fantelor
	-ascuțire scule așchietoare -rectificare plană sau profilat	-ascuțirea sculelor așchietoare (cuțite, freze din plăcuțe sau aliaje dure) -rectificarea suprafețelor din aliaje dure și extradure
	-prelucrarea cavitațiilor -găurire	-prelucrarea matrițelor pentru presat -prelucrarea ștanțelor -se aplică la materiale feroase, aliaje dure și aliaje speciale
	-rectificare p'ănă	-rectificarea pieselor p'ane cu suprafețe mari -se aplică la aliaje dure și extradure
	-tăiere (șlăbitare, retezare) filiform	-tăierea profilurilor profil complex ale pieselor plane din aliaje dure și extradure
	-profilarea corpurilor de revoluție	-obținerea unui anumit profil al suprafeței -realizarea de piese cu configurații geometrice complexe

Dimensiunea ([Bag97]) este un număr care exprimă în unitatea de măsură aleasă, valoarea numerică a elementelor măsurabile ale piesei (lungime, diametru, unghi etc.).

Există *dimensiunea efectivă* a piesei, obținută prin măsurare și *dimensiunea nominală* (ideală, teoretică), trecută pe desen. Dimensiunile extreme admise între care trebuie să se găsească dimensiunea efectivă se numesc *dimensiuni limită*; ele pot fi *dimensiune maximă*, adică cea mai mare admisă, respectiv *dimensiune minimă*, adică cea mai mică admisă. Diferența dintre ele se numește *câmp de toleranță*.

În timpul procesului de prelucrare se dorește apropierea cât mai mare dintre cele două dimensiuni.

Abateră ([Bag97]) este diferența algebrică între o dimensiune efectivă maximă și dimensiunea nominală corespunzătoare. Abaterile permise sunt date de *dimensiunile limită*, încadrate între o *abatere superioară* (A_s) și *abaterea inferioară* (A_i), definite ca diferența algebrică între dimensiunea maximă (minimă) și dimensiunea nominală corespunzătoare.

Precizia dimensională este asigurată atunci când dimensiunea efectivă a OP se încadrează în câmpul de toleranță prescris și este cu atât mai mare cu cât acest câmp este mai mic.

Prin asamblarea dimensiunilor nominale ale piesei, trecute pe desen, se obține o *formă geometrică nominală (ideală, teoretică)* ([Her99a, Kar00a]), stabilită în etapa de proiectare. Similar, există *forma efectivă*, cea obținută în urma procesului de prelucrare. Între cele două forme există *abateri*, care pot fi de următoarele **tipuri**:

- **abateri de formă a suprafețelor**, determinate prin examinarea preciziei suprafeței piesei și anume:
 - nerectilinitatea**:
 - muchiei**, când o latură a suprafeței nu este dreaptă;
 - suprafeței**, când suprafața nu este dreaptă;
 - neplanitatea**:
 - concavitatea**, când suprafața este concavă;
 - convexitatea**, când suprafața este convexă;
 - forma oarecare**, când suprafața nu este dreaptă dar nu are una din abaterile de mai sus;
- **abateri de formă a profilului**, determinate prin examinarea unei secțiuni prin piesă:
 - în secțiune transversală**:
 - ovalitatea**, când secțiunea nu este circulară ci are două diametre diferite și aproximativ perpendiculare;
 - poligonalitatea**, când secțiunea este poligonală cu contur format din arce de cerc sau fețe plane;
 - forma oarecare**, când secțiunea nu are una din abaterile de mai sus;
 - în secțiune longitudinală**:
 - conicitatea**, când secțiunea are diametrele externe diferite;
 - paralelismul**, când secțiunea are fețele paralele;
 - conicitatea inversă**, când secțiunea are fețele conice dar invers față de model;
 - dubla concavitate**, când secțiunea prezintă ambele fețe concave;
 - dubla convexitate**, când secțiunea prezintă ambele fețe convexe;
 - forma curbă**, când secțiunea are fețele de formă curbă și nu liniară;
 - forma oarecare**, când secțiunea nu are una din abaterile anterioare.

Pozițiile reciproce ale diferitelor elemente geometrice care compun OP, așa cum sunt ele redată pe desen, în raport cu anumite baze de referință, alcătuiesc *pozițiile nominale (ideale, teoretice)*. Ele pot fi afectate de abateri de la poziție, alcătuind în realitate *pozițiile efective*.

Abateră limită de poziție este valoarea maximă admisă, în modul, a abaterii poziției efective față de poziția nominală.

Abateră de la poziția nominală (în cazul unei drepte sau unei axe) este distanța maximă între dreapta (axa) adiacentă și poziția nominală a drepte (axei).

După cum elementele geometrice și bazele de referință pot fi suprafețe, axe sau plane de referință, se pot defini următoarele **abateri**:

- **de la coaxialitate și concentricitate**, când axele (suprafețele, planele) generatoare sau de simetrie nu sunt identice;

- **de la simetrie**, când axele nu sunt simetrice;
- **de la intersectare**, când axele nu se intersectează corespunzător;
- **de la paralelism**, când axele nu sunt paralele;
- **de la perpendicularitate**, când axele nu sunt perpendiculare;
- **de la înclinare**, când axele sunt înclinate necorespunzător.

Printre cauzele care influențează precizia prelucrării, care nu depind de parametrii tehnologici, se pot enumera ([Dra71]):

- erorile mașinii prezente chiar la mersul în gol;
- deformațiile termice ale mașinii, OP sau OT;
- deformațiile elastice ale sistemului tehnologic mașină-OT-OP;
- erorile de așezare și fixare a OP;
- gradul de atenție a operatorului uman.

2.2.2. Starea suprafeței

Starea suprafeței OP, în urma procesului tehnologic, poate fi definită prin caracteristici care se referă la starea geometrică și la starea fizico-chimică a suprafeței ([Kar00a, KN03a, Nan77]):

- **starea geometrică** a suprafeței exprimă abaterile geometrice ale piesei reale față de piesa geometrică, din documentația de execuție. Pot fi:
 - ondulație;
 - rugozitate;
- **starea fizico-chimică** a suprafeței exprimă proprietățile fizice, chimice și mecanice ale unei pelicule din stratul superficial, față de restul materialului. Pot fi:
 - stratul superficial modificat termic** pe o anumită grosime (adâncime) caracterizat prin:
 - modificări la compoziția chimică;
 - modificări la structura metalografică;
 - deformarea plastică**, în urma modificărilor la mărimea și distribuția tensiunilor interne;
 - rezistența la uzare și coroziune**.

Abaterile de formă geometrică se mai numesc *abateri de ordinul 1* ([Bag97]) și au fost prezentate anterior.

Ondulațiile se mai numesc *abateri de ordinul 2* și reprezintă ansamblul neregularităților periodice al căror pas este de câteva ori mai mare decât adâncimea lor ([Bag97]). Ele au aspectul unor valuri care se succed periodic și apar din cauza neuniformității procesului de prelucrare, unor vibrații în sistemul tehnologic etc. Când valurile nu sunt periodice, ele nu constituie ondulații ci abateri de la forma geometrică a suprafeței.

Rugozitatea reprezintă urmele rămase pe suprafața OP în urma procesului tehnologic și se compune din abateri de ordinul 3 și abateri de ordinul 4. Ele sunt microneregularități care depind de cinematica procesului de prelucrare și au un caracter periodic, fiind compuse din striatii sau rizuri și din smulgeri, urme lăsate de OT.

Rugozitatea este exprimată cantitativ prin următorii **indicatori**:

- *abaterea profilului* R_a definită ca valoarea medie a ordonatelor profilului efectiv față de linia medie a profilului real ([Bag97, Lan86, RL96]);
- *înălțimea neregularităților* R_z definită ca distanța medie dintre cele mai înalte 5 puncte de vârf și cele mai joase 5 puncte de fund ale profilului real ([Bag97, Lan86, RL96]);

Tabelul 2.2. Valori informative ale rugozității suprafeței
funcție de procedeul tehnologic de prelucrare ([Bag97, Her99a, Kar00a])

Denumirea procedeului tehnologic	Valori medii ale rugozității R_a [μm]														
	0,006	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100
Adâncire															
Alezare															
Ambutisare															
Broșare															
Curățire cu jet															
Curățire în tamburi															
Electrochimie															
Electroeroziune															
Extrudare															
Frezare circulară															
Frezare frontală															
Găurire															
Honuire cu cursa lungă															
Honuire cu cursa scurtă															
Lărgire															
Lepuire de polizare															
Lepuire plană															
Lepuire rotundă															
Matritare															
Mortezare															
Pilire															
Polizare															
Rabotare															
Răzuire															
Rectificare frontală plană															
Rectificare longitudinală rotundă															
Rectificare plană cu periferia pietrei															
Rectificare plană rotundă															
Rectificare rotundă cu avans în adâncime															
Retezare															
Roluire plană															
Stampare															
Strunjire longitudinală															
Strunjire plană															
Superfinisare															
Tăiere															
Tăiere cu flacără															
Turnare de precizie															
Turnare în cochilă															
Turnare în formă coajă															
Turnare în formă de nisip															
Turnare sub presiune															

- *adâncimea maximă a neregularităților* R_{max} definită ca fiind cea mai mare distanță între profilul real și linia medie. Dacă pentru piesele singulare rugozitatea nu are o importanță deosebită, pentru piesele asamblate, unde suprafețele vin în contact, ea este importantă din cauza rezistenței la uzură a suprafețelor, rezistența la oboseală, la coroziune, durabilității, aspectului, menținerea raportului dimensiunilor de contact între limitele admise la asamblare, preciziei dimensionale etc. ([Bag97]).

Câteva valori orientative ale rugozității unei piese, obținute prin diferite procedee de prelucrare, sunt prezentate în tabelul 2.2.

Grosimea stratului superficial modificat termic este o modificare a proprietăților fizico-chimice ale stratului superficial, în urma procesului tehnologic.

Compoziția chimică și structura metalografică a stratului superficial modificat termic pot fi alterate, în timpul procesului de prelucrare, față de aceleași caracteristici ale materialului de bază, din cauza câmpului termic rezultat.

Deformarea plastică a stratului superficial este o modificare a suprafeței OP, în urma solicitărilor mecanice și ciclului termic și se însoțește de obicei cu creșterea microdurității stratului superficial, ca urmare a ecruisării. Deformarea se datorează apariției unor tensiuni interne, care diferă de mărimea și distribuția existente inițial în OP.

Rezistența la uzare se modifică în urma procesului tehnologic de prelucrare, în corelație cu apariția și mărimea fisurilor în stratul superficial.

Printre cauzele care influențează calitatea suprafeței prelucrate, care nu depind de parametri tehnologici, se pot enumera ([Dra71]):

- geometria OT;
- calitatea materialului OT;
- rigiditatea sistemului tehnologic mașină-OT-OP.

2.2.3. Productivitatea prelucrării

Caracteristicile de productivitate arată transformările produse asupra OP în timpul procesului tehnologic și se exprimă printr-un număr de **indicatori** ([Her95, Her99a, HHB03, Kar00a, KN03a, Lan86, NLH97]):

- **volumul prelevării totale:** reprezintă volumul total de material prelevat din OP:

$$V_{OP} = (V_{EP} + V_{DA}) \cdot f_{EP} \cdot t_p = \frac{m_{OP1} - m_{OP2}}{\rho_{OP}} \quad [\text{mm}^3] \quad (2.1)$$

- **masa totală prelevată:** reprezintă masa totală de material prelevată din OP:

$$m_{OP} = (m_{EP} + m_{DA}) \cdot f_{EP} \cdot t_p = (m_{OP1} - m_{OP2}) \quad [\text{g}] \quad (2.2)$$

- **productivitatea volumică a prelevării (debitul volumic al prelevării):** reprezintă volumul de material prelevat în unitatea de timp:

$$Q_{OP} = \frac{V_{OP}}{t_p} = (V_{EP} + V_{DA}) \cdot f_{EP} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (2.3)$$

- **productivitatea masică a prelevării (debitul masic al prelevării):** reprezintă masa de material prelevat în unitatea de timp:

$$Q_{OP}^m = \frac{m_{OP}}{t_p} = (m_{EP} + m_{DA}) \cdot f_{EP} \text{ [g/min]} \quad (2.4)$$

- **productivitatea specifică a prelevării:** reprezintă eficacitatea energetică a prelevării:

$$q_{OP} = \frac{Q_{OP}}{I_m} \text{ [mm}^3\text{/A}\cdot\text{min]} \quad (2.5)$$

$$q_{OP}^m = \frac{Q_{OP}^m}{I_m} \text{ [g/A}\cdot\text{min]} \quad (2.6)$$

- **viteza medie de avans** v_m [m/s]: reprezintă viteza medie cu care are loc mișcarea de avans;
- **timpul de prelucrare** t_p [min sau s]: reprezintă durata de desfășurare a procesului de prelucrare.

2.2.4. Uzura obiectului de transfer

Caracteristicile de uzură a OT arată transformările produse asupra OT în timpul procesului tehnologic și se exprimă printr-un număr de **indicatori** ([Her99a, HHB03, Kar00a, Lan86, NLH97]), definiți similar cu cei aplicați asupra OP:

- **volumul uzării totale:** reprezintă volumul de material uzat prelevat din OT:

$$V_{OT} = V_{ET} \cdot f_{EP} \cdot t_p = \frac{m_{OT1} - m_{OT2}}{\rho_{OT}} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (2.7)$$

- **masa totală uzată:** reprezintă masa totală de material uzat prelevată din OT:

$$m_{OT} = m_{ET} \cdot f_{EP} \cdot t_p = m_{OT1} - m_{OT2} \text{ [g]} \quad (2.8)$$

- **debitul volumic al uzării:** reprezintă volumul de material uzat prelevat din OT:

$$Q_{OT} = \frac{V_{OT}}{t_p} = V_{ET} \cdot f_{EP} \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (2.9)$$

- **debitul masic al uzării:** reprezintă masa de material uzat prelevat din OT:

$$Q_{OT}^m = \frac{m_{OT}}{t_p} = m_{ET} \cdot f_{EP} \text{ [g/min]} \quad (2.10)$$

- **debitul specific al uzării:** reprezintă volumul/masa de material uzat îndepărtat din OT în unitatea de timp sub acțiunea unui curent mediu de 1 A:

$$q_{OT} = \frac{Q_{OT}}{I_m} [\text{mm}^3/\text{A}\cdot\text{min}] \quad (2.11)$$

$$q_{OT}^m = \frac{Q_{OT}^m}{I_m} [\text{g}/\text{A}\cdot\text{min}] \quad (2.12)$$

- **uzura relativă volumică:** reprezintă volumul procentual de material uzat din OT pentru prelevarea unității de volum din OP:

$$v_u = \frac{V_{OT}}{V_{OP}} \cdot 100 = \frac{Q_{OT}}{Q_{OP}} \cdot 100 [\%] \quad (2.13)$$

2.2.5. Costuri

Caracteristicile de costuri aplicate procesului de EEC arată cheltuielile efectuate cu ocazia prelucrării OP și se exprimă printr-un număr de **indicatori** ([HHB03]):

- **costul OT:** reprezintă cheltuielile cu OT folosit în timpul prelucrării:

$$C_{OT} = K_{OT} \cdot Q_{OT} \cdot C_{OTM} [\text{lei}/\text{min}] \quad (2.14)$$

unde:

K_{OT} reprezintă un coeficient de preluare în costul OT a altor cheltuieli

C_{OTM} reprezintă costul specific al materialului OT [lei/mm^3]

- **costul LL:** reprezintă cheltuielile cu LL folosit în timpul prelucrării:

$$C_{LL} = K_{LL} \cdot Q_{LL} \cdot C_{LLM} [\text{lei}/\text{min}] \quad (2.15)$$

unde:

K_{LL} reprezintă un coeficient care depinde de timpul între două schimbări ale LL

Q_{LL} reprezintă volumul de LL consumat în timpul prelucrării [l/min]

C_{LLM} reprezintă costul specific al materialului LL [lei/l]

- **costul energiei:** reprezintă cheltuielile cu energia electrică folosită în timpul prelucrării:

$$C_{EE} = K_{EE} \cdot (N_{OT} + N_{LL} + N_p) \cdot C_{EEM} [\text{lei}/\text{min}] \quad (2.16)$$

unde:

K_{EE} reprezintă un coeficient care depinde de condițiile de prelucrare

N_{OT} reprezintă energia consumată cu mișcarea OT [kW]

N_{LL} reprezintă energia consumată cu circulația LL [kW]

N_p reprezintă energia consumată de proces [kW]

C_{EEM} reprezintă costul specific al energie [lei/kW]

2.3. PARAMETRI ȘI FACTORI DE INFLUENȚĂ

Procesul de prelucrare prin EEC este influențat de un număr mare de **parametri și factori**, acționând în strânsă interdependență și influențându-se reciproc pentru a realiza

stabilitatea procesului de prelucrare și stabilirea caracteristicilor tehnologice finale ([Her95, Her99a, Her99b, IP81, Kar00a, KN03a, Lan86, NLH97, Sav71]).

Mărimile care caracterizează procesul de prelucrare, impuse acestuia și având valori constante, reprezintă *parametri de proces*.

Mărimile care participă la dezvoltarea fenomenelor fundamentale ale mecanismului EEC și contribuie la definirea caracteristicilor tehnologice, reprezintă *factori*.

Factorii care influențează procesul de prelucrare prin EEC se pot **grupa** astfel ([Her03, Her99a, Kar00a, KN01, KN03a, NLH97]):

- electrici;
- mecanici;
- determinați de sistemul termodinamic:
 - de OP;
 - de OT;
 - de ML;
- determinați de sistemul tehnic de prelucrare;
- determinați de tipul prelucrării;
- determinați de operatorul uman;
- determinați de mediul înconjurător.

2.3.1. Factori de influență de natură electrică

Tensiunea electrică U

Este factorul care determină stabilitatea procesului de prelucrare și este cel mai des utilizat în conducerea sistemelor de reglaj automat.

Valorile uzuale ale tensiunii U sunt între 10–30 V, reglarea efectuându-se prin modificarea naturii circuitului electric sau prin sursa de alimentare.

La aceste valori ale tensiunii, în sistemul termodinamic se dezvoltă atât procese de DA cât și de DEI. La **depășirea tensiunii** maxime, între OT și OP devine posibilă descărcarea electrică cvasistaționară cu arc electric, ceea ce duce la instabilitatea procesului de prelucrare, cu rezultat final negativ pentru caracteristicile tehnologice ([Her95, Kar00a, KH00a, N+83, Pop83b]):

- scăderea productivității;
- scăderea preciziei de prelucrare;
- creșterea rugozității;
- creșterea zonei influențată termic;
- creșterea uzurii OT.

Tensiunea electrică U este influențată de ([Her99a, Kar00a, KH00a]):

- natura circuitului electric;
- materialul OP și OT;
- presiunea din SL;
- sursa de alimentare;

și, la rândul său, influențează stabilitatea procesului și următorii parametri tehnologici:

- productivitatea prelucrării Q_{OP} ;
- precizia de prelucrare;
- rugozitatea suprafeței OT;
- zona influențată termic;
- uzura OT.

De exemplu, influența tensiunii U asupra productivității prelevării de material Q_{OP} , în cazul debitării cu OT disc, este prezentată în figura 2.4. Se observă creșterea productivității direct proporțional cu creșterea tensiunii.

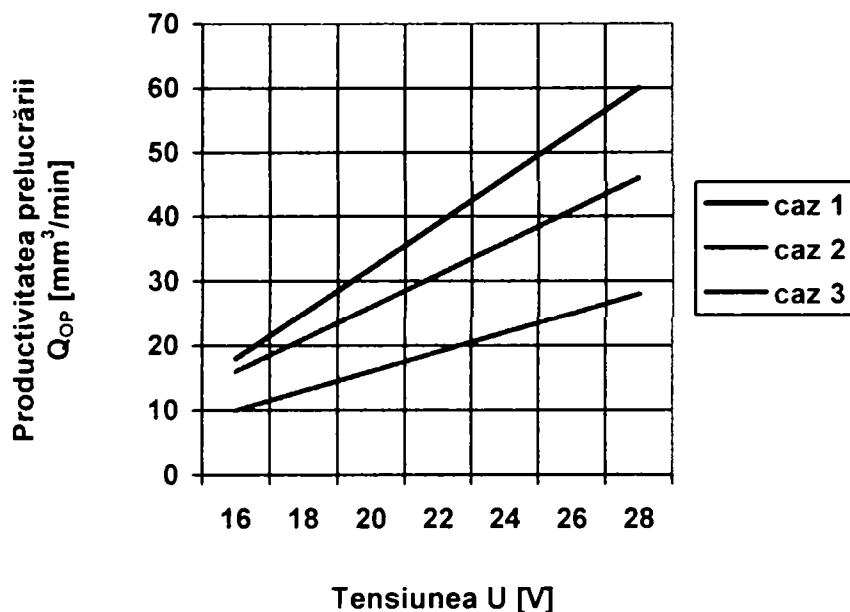


Figura 2.4. Influența tensiunii U asupra productivității prelucrării Q_{OP} , unde $j_{caz1}=35 \text{ A/cm}^2$, $j_{caz2}=25 \text{ A/cm}^2$, $j_{caz3}=15 \text{ A/cm}^2$ ([Her99a, Kar00a, KH00a, N+83, Pop83b])

Intensitatea curentului electric I

Alături de tensiune, intensitatea curentului electric I este un factor determinant al procesului de prelucrare prin EEC.

Intensitatea curentului depinde de caracteristica externă a sursei de alimentare, care este relativ rigidă și determină ca, la creșterea intensității, tensiunea să aibă o scădere nesemnificativă.

Creșterea intensității I se datorează creșterii presiunii în SL, urmată de:

- creșterea numărului de DEI astfel încât un curent mai mare să fie distribuit în mai multe DEI simultane. În acest caz, puterea descărcării pe fiecare impuls rămâne constantă și deci rugozitatea OP nu are de suferit;
- numărul de DEI rămâne constant, caz în care puterea descărcării individuale crește, ceea ce duce la obținerea unor cratere mai mari (ca diametru și adâncime) și deci la alterarea rezultatelor prelucrării. Este posibilitatea care s-a dovedit corectă pe baza rezultatelor cercetării experimentale.

De exemplu, influența I asupra Q_{OP} , în cazul realizării fantelor, este prezentată în figura 2.5. Se observă creșterea Q_{OP} direct proporțional cu creșterea I . Rezultatul favorabil al creșterii Q_{OP} este însă compensat de alterarea altor caracteristici tehnologice, așa cum se prezintă în figura 2.6 din care se observă creșterea abaterii și înălțimii profilului, direct proporțional cu creșterea I .

Din aceste grafice se constată că pentru a obține o Q_{OP} mai mare (și o calitate mai scăzută) se preferă prelucrarea cu jet. Invers, dacă se dorește o suprafață de calitate (dar cu o Q_{OP} mai scăzută) se va apela la prelucrarea prin imersie.

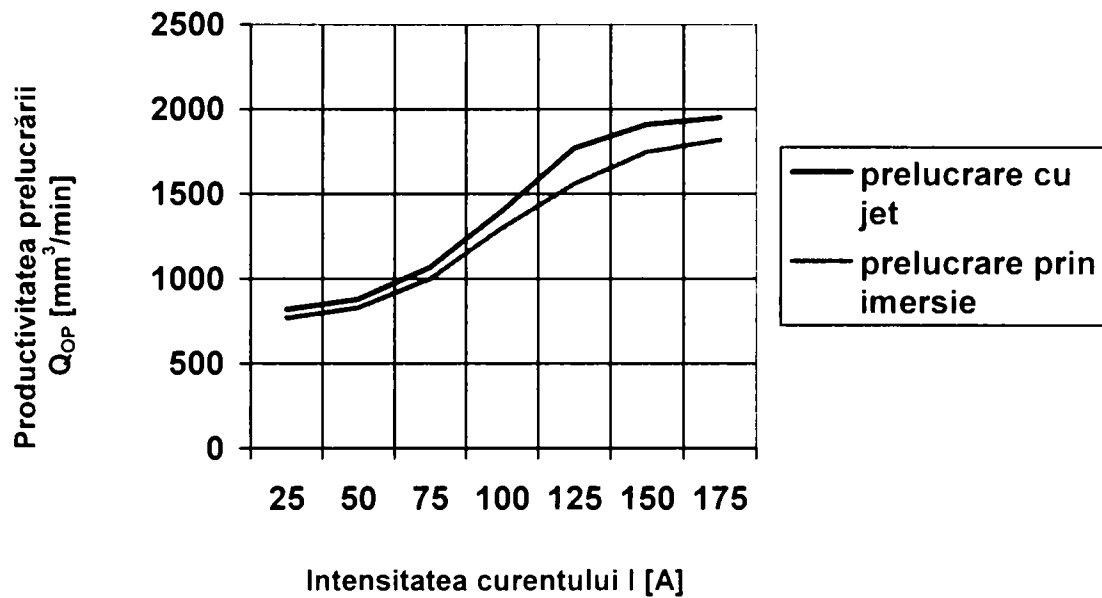


Figura 2.5. Influența intensității curentului electric I asupra productivității prelucrării Q_{OP} ([Her95, Her99a, Kar00a, KH00a, KN03a, Pop83b])

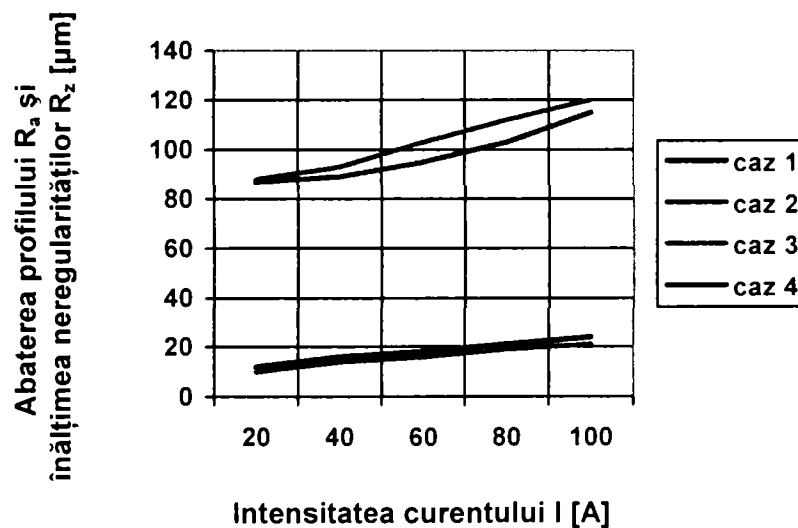


Figura 2.6. Influența intensității curentului electric I asupra abaterii R_a și înălțimii neregularităților R_z unde cazul 1 corespunde lui R_a la prelucrarea prin jet, cazul 2 lui R_a la prelucrarea prin imersie, cazul 3 lui R_z la prelucrarea prin jet iar cazul 4 lui R_z la prelucrarea prin imersie ([Her95, Her99a, Kar00a])

Intensitatea curentului electric I este influențată de:

- tipul sursei de alimentare;
 - modul de spălare a LL;
 - tipul prelucrării;
 - structura circuitului electric;
 - presiunea între OP și OT;
 - OP și OT,
- și, la rândul său, influențează parametrii tehnologici:
- productivitatea procesului;
 - calitatea suprafeței prelucrate;
 - rugozitatea suprafeței OP.

Densitatea de curent j

Este un factor important la prelucrarea prin EEC și reprezintă intensitatea curentului electric I [A] ce străbate unitatea de suprafață de contact S [cm²] între OT și OP:

$$j = \frac{I}{S} \text{ [A/cm}^2\text{]} \quad (2.17)$$

În strânsă legătură cu I , densitatea de curent j reglează ponderea proceselor elementare, fundamentale, din SL ([GM76, Her95, HO95, Kar00a, KH00a, N+83, Pop83b]):

- când j este **scăzută**, predomină fenomenul electrochimic. DEI sunt reduse (iar dacă și U este scăzută, ele chiar nu se pot forma) și se obține un rezultat al prelucrării foarte bun din punct de vedere al parametrilor geometrici și de stare a suprafețelor dar Q_{OP} este scăzută.
- când j este **mare**, DEI sunt cele care asigură prelevarea de material, prin efect termic, ceea ce crește Q_{OP} dar scad caracteristicile de calitate (parametrii geometrici și de stare a suprafeței).
- când j este **foarte mare**, prelevarea de material devine necontrolată, apar scurtcircuiturile (dacă U este mică) sau descărcările electrice în arc staționar (dacă U este mare), ceea ce prin efectul termic menționat anterior duce la degradarea OT și OP prin modificare de masă și volum.

De exemplu, influența j asupra Q_{OP} , în cazul debitării prin EEC, este prezentată în figura 2.7.

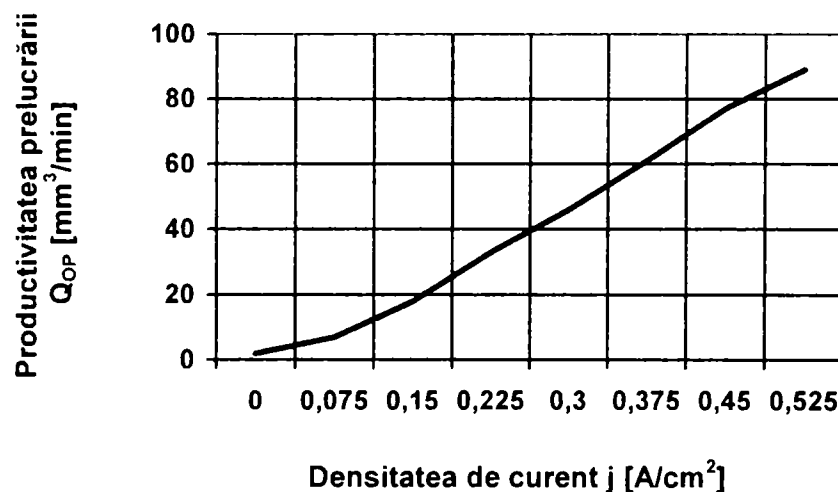


Figura 2.7. Influența densității de curent j asupra productivității prelucrării Q_{OP} ([Her99a, Kar00a, KH00a, N+83, Pop83b])

Densitatea de curent j depinde de următorii factori ([Her99a, Kar00a]):

- tipul sursei de alimentare și structura circuitului electric;
 - tensiunea U ;
 - intensitatea curentului I ,
- și influențează, prin ponderea proceselor fundamentale în SL, parametrii tehnologici:
- productivitatea prelucrării;
 - calitatea suprafețelor (caracteristicile geometrice și de stare a suprafeței).

Structura circuitului electric

Este un factor de influență asupra prelucrării prin EEC deoarece provoacă modificări în dinamica desfășurării fenomenelor fundamentale în SL, care determină durata, succesiunea și ponderea acestora ([Lan86]). Prin determinarea respectivă se obțin efecte asupra energiei vehiculate, OT și OP.

Curentul electric **determină** modificări asupra anumitor caracteristici tehnologice cum sunt uzura OT și grosimea stratului superficial modificat termic. Ele depind de condițiile locale din SL, de temperatura locală generată de DEI, de caracteristicile celor două materiale.

Astfel, pentru **circuitele inductive** (L) se constată că se obține o creștere a Q_{OP} simultan cu scăderea grosimii stratului modificat termic și scăderea R_a . Acest rezultat se datorează faptului că sursa livrează în SL energie scăzută și constantă în timp. Ca și în alte situații când U este mică, Q_{OP} este mai redusă în schimb se îmbunătățesc caracteristicile geometrice și de stare a suprafețelor ([Kar00a, N+83]). Acest tip de circuit se utilizează la semifinisări.

Dacă circuitul este **capacitiv** (C) atunci caracteristicile tehnologice se înrăutățesc, Q_{OP} este scăzută, stratul modificat termic are o grosime mică, R_a este necorespunzătoare din cauza frecvenței mari a microfisurilor și posibilității existenței de distrugerii volumice ([Kar00a, Nan77, N+83]).

Circuitele **rezistive** (R) (surse de c.c. acumulate electrice) sunt și ele nerentabile, deoarece orice rezistență suplimentară întârzie fenomenele fundamentale și consumă energie inutil. Totuși o rezistență minimă este obligatorie pentru a asigura protecția sursei în caz de scurtcircuit și pentru a forma mărimea de referință și funcția de transfer pentru sistemele automate de avans ([Kar00a]). Aceste circuite asigură o Q_{OP} mică dar calitatea suprafeței prelucrate și precizia dimensională sunt ridicate ([Nan77]). Se utilizează pentru operații de finisare.

Circuitele R+L (surse de c.c. generatoare și redresoare) productivitatea este mai mare decât la circuitele R, la o calitate a suprafeței și o precizie acceptabile.

Astfel, dependentă de compunerea celor trei parametri (R, L, C), structura circuitului electric influențează productivitatea prelucrării și ponderea proceselor fundamentale în SL și prin aceasta următoarele caracteristici ale prelucrării ([Her99a, Kar00a]):

- durata proceselor și succesiunea fenomenelor în SL;
- rugozitatea suprafeței OP;
- stratul modificat termic;
- uzura OT.

Puterea indusă în SL

P [W] este un factor de influență de natură electrică ce își definește implicația prin cele două elemente din care este compus: U și I. Așadar, la creșterea P se observă creșterea Q_{OP} (scăderea t_p) până când se atinge un prag peste care procesul devine instabil din cauza j prea mari care conduce la apariția arcului electric (figura 2.8, [HO95, H+95]).

P are o influență puternică și asupra uzurii OT, în sensul că la putere mică, uzura este mare deoarece efectul abraziv este extrem de pronunțat, iar la puteri prea mari DEI se transformă în arc electric. O reprezentare a dependenței uzurii OT de puterea P este dată în figura 2.9.

Puterea indusă în SL este utilizată, pe de o parte, pentru componenta de DA iar pe de altă parte pentru DEI (cu formele sale de manifestare DEIRC și DEISD) ([Her03]).

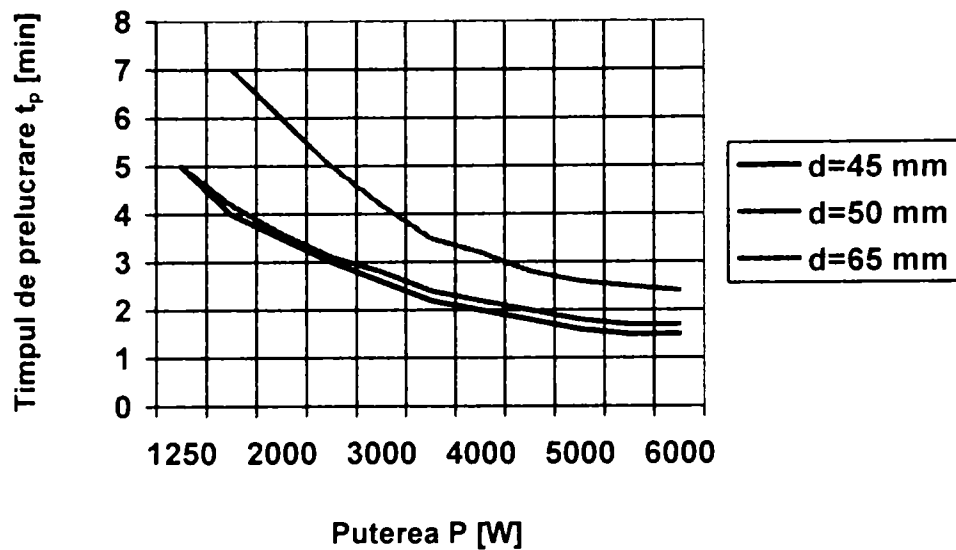


Figura 2.8. Influența puterii induse în SL asupra timpului de debitare t_p ([HO95])

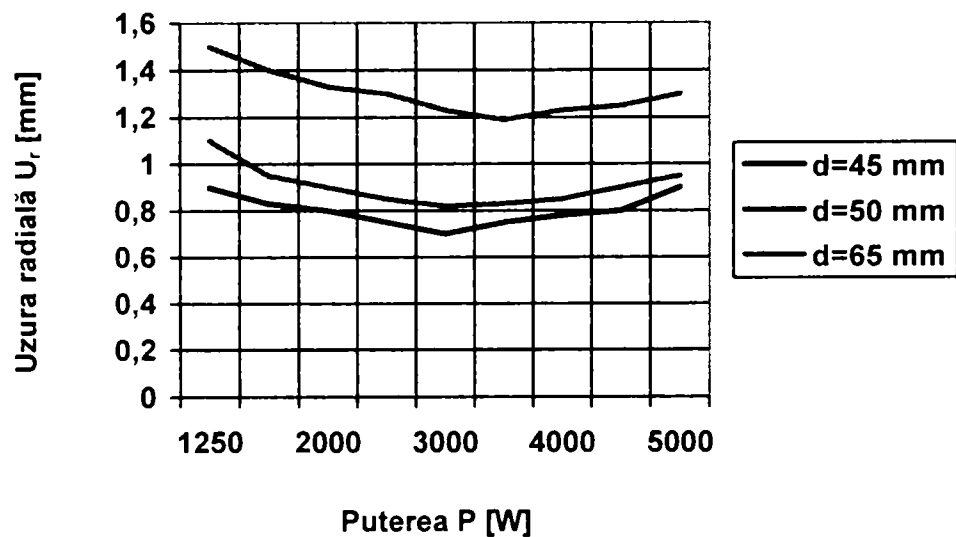


Figura 2.9. Influența puterii induse în SL asupra uzurii OT ([H+95])

2.3.2. Factori de influență de natură mecanică

Presiunea

Presiunea p [daN/cm^2] este cel mai important factor mecanic la prelucrarea prin EEC deoarece determină numărul și mărimea secțiunii punților de contact la nivelul microasperităților între OP și OT ([Her99a, Kar00a, KH00b, Lan83b, N+83]).

Așa cum s-a prezentat la factorii de influență de natură electrică, aceștia (și în special I) sunt influențați de p . **Valorile optime** ale p , aplicate în practica uzuală, sunt de $1-3 \text{ daN}/\text{cm}^2$. La aceste valori, procesul tehnologic de prelevare de material se desfășoară prin intermediul DEIRC, existente într-un număr optim și cu o suprafață însumată care nu depășește o valoare optimă, ceea ce crește eficiența prelucrării ([Sim97]). Dacă p crește, suprafața de contact însumată crește, au loc scurtcircuite între OP și OT la nivelul unora din microsuprafețele de contact, se strică raportul între PP formată și cea îndepărtată și astfel procesul de prelucrare devine instabil.

De exemplu, influența p asupra Q_{OP} este prezentată în figura 2.10.

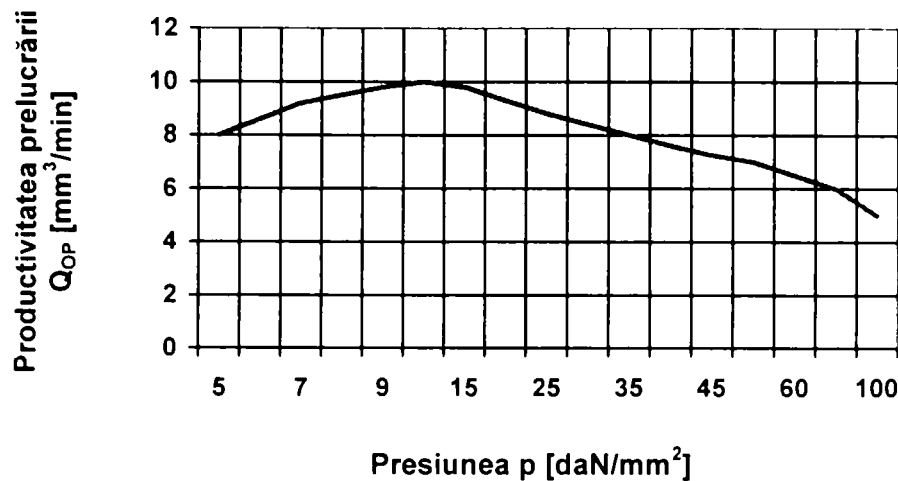


Figura 2.10. Influența presiunii p asupra productivității prelucrării Q_{OP} ([Her99a, Kar00a, N+83, Pop83b, Sav71])

Presiunea p între OP și OT influențează următoarele caracteristici ale procesului de prelucrare prin EEC:

- curentul de lucru;
 - densitatea de curent;
 - numărul și secțiunea punților de contact,
- și prin acestea determină productivitatea și stabilitatea procesului ([Her99a, Kar00a, KH00b]).

Viteza relativă

Este un factor de influență care stabilește unele caracteristici tehnologice deoarece imprimă DEI caracterul de impuls, prin aceea că determină și limitează puterea P din SL, forma, durata, energia și frecvența DEI ([Her95, Kar00a, KH00b]).

Valorile uzuale ale v_r sunt între 5–25 m/s, cu un optim la 20 m/s.

Când v_r **scade** sub minim, crește durata microcontactelor ceea ce duce la creșterea P din SL, la amplificarea efectului termic și deci scăderea rezultatelor, inclusiv a Q_{OP} ; îndepărtarea PP se face prea repede alterând procesul ([GV52]).

Când viteza v_r este **optimă**, scade durata microcontactelor dar crește numărul acestora în unitatea de timp, ceea ce crește Q_{OP} în detrimentul R_a și modificărilor termice din stratul de suprafață ([Sim97]).

Dacă v_r **crește** peste maximumul admis, procesul de formare a PP se înrăutățește, apar vibrații mecanice care alterează microcontactele electrice, dispar DEI, accesul LL în SL este îngreunat și Q_{OP} scade din cauza instabilității procesului tehnologic ([Kar00a, N+83]).

De exemplu, influența v_r asupra Q_{OP} și R_a este prezentată în figura 2.11 și 2.12. Influența v_r asupra parametrilor de stare și caracteristicilor tehnologice este următoarea:

- asupra puterii electrice vehiculate în SL;
- asupra DEI, cărora le determină modul de formare, durata, frecvența și energia;
- asupra accesului LL în ML și evacuării produselor eroziunii;
- asupra productivității procesului, rugozității suprafeței OP și ZIT;
- asupra stabilității procesului.

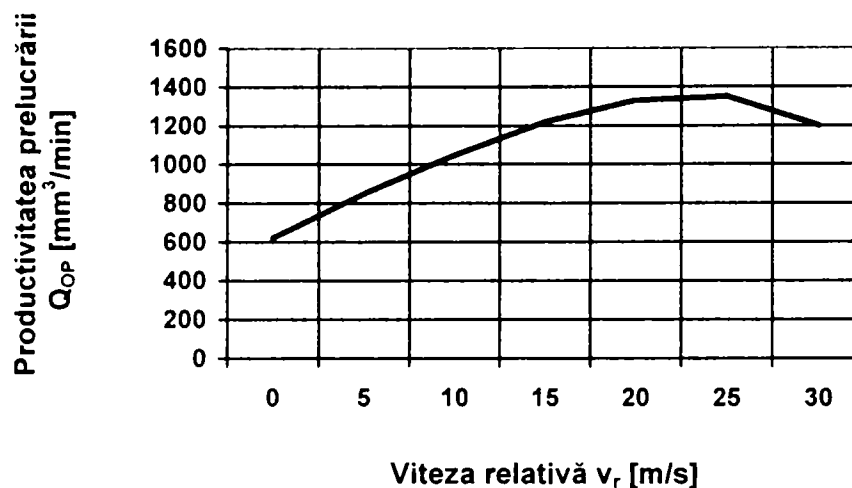


Figura 2.11. Influența vitezei relative asupra productivității prelucrării Q_{OP} la $U=20$ V și $j=40$ A/cm^2 ([Her99a, IP81, Kar00a, KH00b, N+83])

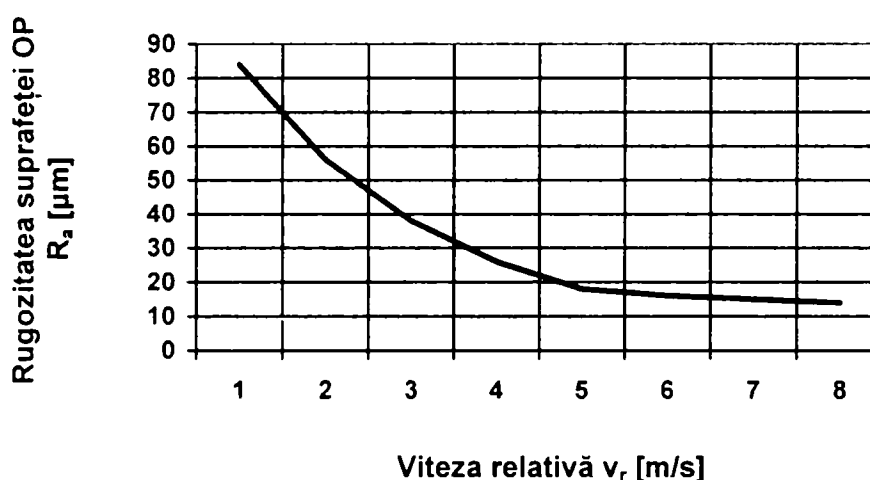


Figura 2.12. Influența vitezei relative asupra rugozității suprafeței OP la $U=20$ V și $j=40$ A/cm^2 ([IP81])

2.3.3. Factori de influență determinați de obiectul de transfer

Ca și în cazul celorlalți factori de influență, OT depinde de alți parametri de proces și influențează caracteristicile tehnologice și parametrii de stare a procesului. De exemplu, dependența densității de curent respectiv a vitezei de avans, de secțiunea OT, este prezentată în figurile 2.13 și 2.14.

Materialul obiectului de transfer

Aproape întotdeauna alegerea materialului din care este fabricat OT se face din considerente de cost. Cel mai adesea, OT este din **oțel** (productivitate ridicată la un cost optim), fără însă ca parametrii de stare să fie maximi.

Pentru caracteristici tehnologice deosebite, oțelul nu mai este cel mai corespunzător și se preferă cuprul, alama, fonta, dar costul suplimentar nu justifică întotdeauna performanțele obținute.

Forma obiectului de transfer

Se utilizează una din formele ([HK00b, HF93a, HF93c, HFM93, HML91, HVB93, N+83]):

- **disc** (cel mai frecvent), pentru debitare, fante de orice fel, la materiale greu prelucrabile, aliaje speciale, carburi metalice; are numeroase avantaje (+) (figura 2.15, [HVB93]):
 - +robustețea în exploatare a OT disc;
 - +simplitatea constructivă a utilajului de prelucrare;
 - +posibilitatea efectuării de operații diferite cu schimbări mici la utilajul de prelucrare;

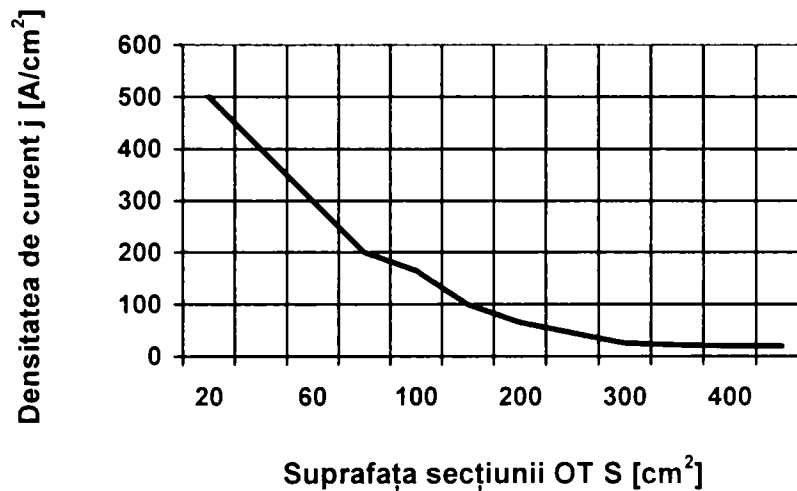


Figura 2.13. Dependența densității de curent de suprafața secțiunii OT ([GM76])

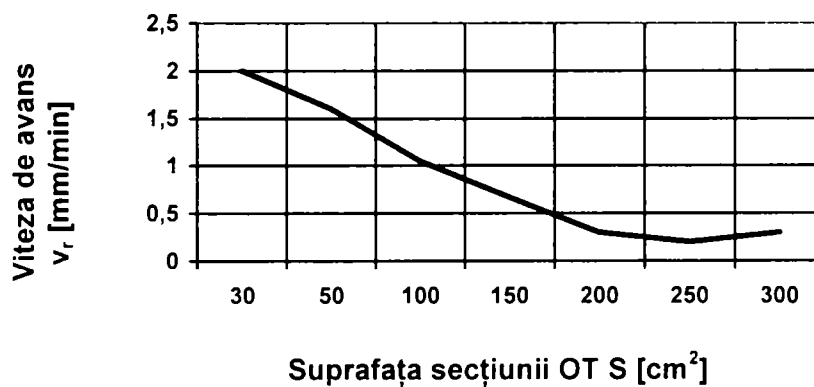


Figura 2.14. Dependența vitezei de avans de suprafața secțiunii OT ([GM76])

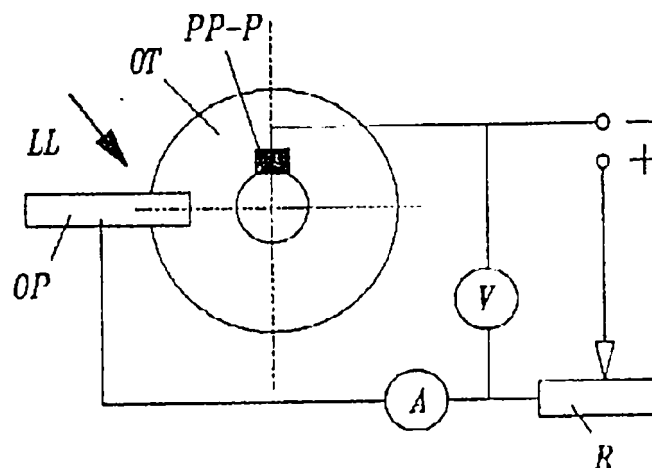


Figura 2.15. Schema prelucrării cu OT disc ([Her92, Her99a, HF93a, HF93c, HML91, Kar00a, Pop70])

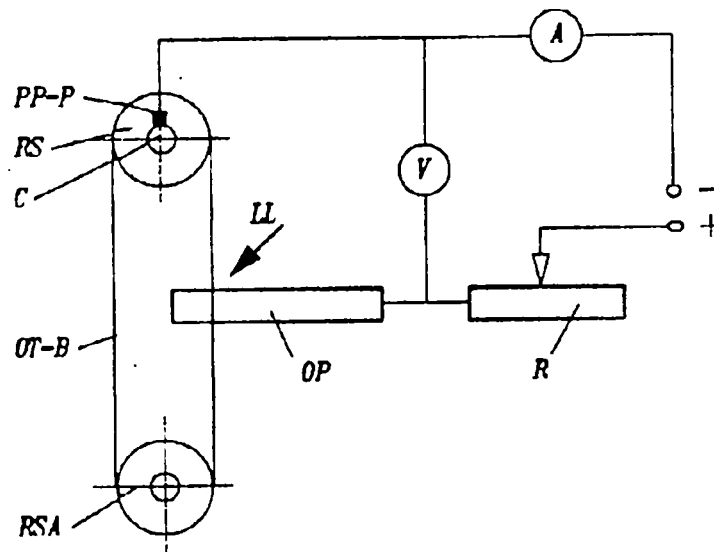


Figura 2.16. Schema prelucrării cu OT bandă ([Her92, Her99a, HF93a, HF93c, HVB93, Kar00a, Pop70])

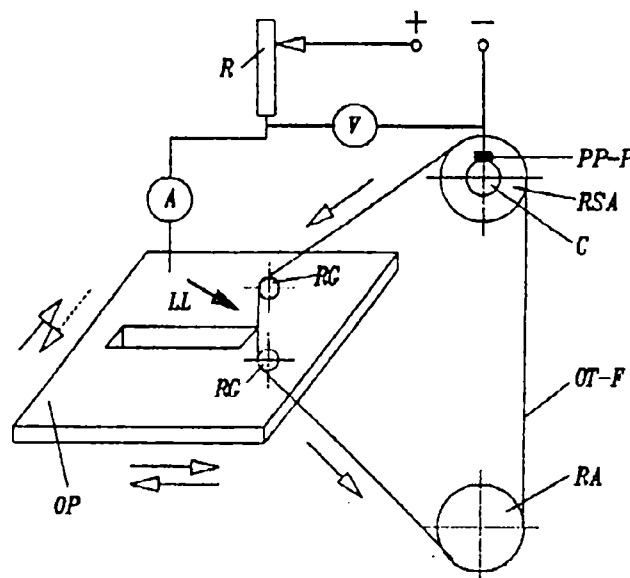


Figura 2.17. Schema prelucrării cu OT fir ([Her92, Her99a, HF93a, Kar00a])

- **bandă**, pentru debitare, fante laterale, la carburi metalice, oțeluri refractare, oțeluri călite; are avantaje (+) dar și dezavantaje (-) (figura 2.16, [HVB93]):
 - +păstrarea constantă a v_r pe timpul debitării;
 - +preț de cost foarte scăzut al OT;
 - +coeficient de utilizare a materialului OT foarte mare;
 - folosirea benzii este îngreunată de grosimea relativ mare a benzii (0,5-2 mm) care la trecerea prin/peste mecanismele de ghidare se poate rupe;
 - dificultatea asamblării capetelor benzii unde apar solicitări foarte mari;
 - necesitatea curățirii permanente a benzii și ghidajelor de particulele din LL;
 - posibilitatea debitării doar de materiale cu grosime mai mică decât spațiul liber între rolele de ghidare;
- **fir** (foarte rar, având printre altele inconvenientul că necesită o gaură de pornire, figura 2.17), pentru debitare, decupare dar mai ales pentru fante laterale, în special la materiale extradure.

Dimensiunile obiectului de transfer

Depind de OP și de tipul prelucrării.

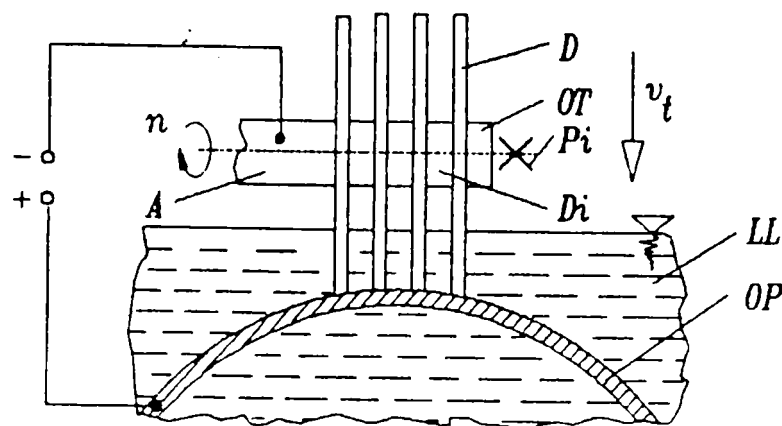


Figura 2.18. Schema de utilizare simultană a mai multor OT ([Her95, HF93c, HLM91])

Numărul de obiecte de transfer folosite simultan

La unele operații (prelucrarea fantelor, [HF93c, HLM91]) este posibil a se utiliza mai mult de un singur OT, dispuse în paralel (figura 2.28) și funcționând în imersie pentru a face cât mai simplă soluția constructivă de acces a LL în SL.

2.3.4. Factori de influență determinați de obiectul de prelucrat

Acești factori sunt asemănători (și în corelație) cu cei prezentați la OT în paragraful anterior.

Astfel, condițiile de desfășurare a procesului de prelucrare depind de forma și dimensiunile OP. Proprietățile fizico-chimice ale acestuia (compoziție chimică, densitate, structură metalografică) influențează condițiile de prelucrare.

Rezultatul cel mai bun se atinge atunci când se poate obține o productivitate maximă și caracteristici geometrice și de stare a suprafețelor de calitate. Pentru aceasta, trebuie ales un optim al ansamblului materialelor OT–OP. Astfel se poate obține o mărire a stabilității procesului de prelucrare, o dirijare și optimizare a caracteristicilor tehnologice și deci o rentabilitate mai mare, ceea ce permite prelucrarea a diferite metale și aliaje, dar cu productivitate de erodare diferită.

2.3.5. Factori de influență determinați de mediul de lucru

Caracteristicile mediului de lucru

LL se utilizează în procesul tehnologic de EEC pentru a putea genera pelicule vâscoase sau solide care să nu permită scurtcircuitul între electrozi.

Capacitatea de formare a PP depinde de vâscozitatea LL, de greutatea sa specifică, conținutul de particule coloidale, moleculare sau în suspensie. De aceea, cerințele impuse LL sunt ([GM76, Her95, N+83]):

- să aibă conductibilitate electrică și să asigure dizolvarea unui volum mare de material din OP cu cheltuieli minime;
- să aibă bune proprietăți anticorozive;

- să aibă bune proprietăți de dizolvare a materialului OP și să-și păstreze aceste proprietăți un timp cât mai mare;
- să fie ieftin și ușor de procurat.

Uzual se folosesc soluțiile de silicat de sodiu solubile, suspensiile de caolin sau diferiți oxizi în apă (silicat de natriu și kaliu [IP81]).

Dintre aceste ML, cel mai adesea este folosit **silicatul solubil de sodiu** $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$. Acesta este o soluție având:

- densitate:

$$\rho = 1,1 - 1,25 \text{ g/cm}^3 \quad (2.18)$$

- modul:

$$M = \frac{Na_2O}{nSiO_2} = 2.8 - 3.2 \quad (2.19)$$

care se poate îmbunătăți cu azotat de sodiu.

Modul de spălare a spațiului de lucru de către lichidul de lucru

Atunci când am prezentat influența I asupra Q_{OP} și calității suprafețelor obținute s-a arătat că rezultatele depind de modul în care SL este spălat de către LL și anume ([Her95]):

- **prin jet**, când zona de contact OT-OP este stropită de către LL (figura 2.19); are avantaje (+) și dezavantaje (-):
 - +cantitate mică a LL în majoritatea cazurilor de prelucrare;
 - +lipsa sistemelor de etanșare a SL;
 - +utilizarea unei pompe de debit de putere mică;
 - în unele cazuri accesul LL în SL este dificil de realizat;
 - la prelucrarea suprafețelor mari cantitatea de LL de care este nevoie este și ea mare;
 - necesitatea unui sistem de ventilație pentru evacuarea aerosolilor;
- **prin imersie**, când OP și o parte a OT sunt scufundate într-o baie (cuvă) ce conține LL (figura 2.20); avantajele (+) și dezavantajele (-) metodei sunt:
 - +calitate superioară a perametrilor prelucrării;
 - +incintă de lucru simplă;
 - +stabilitate mai mare a procesului eroziv;
 - necesitatea existenței a două pompe pentru LL, una de umplere a cuvei și una pentru reciclarea LL;
 - sistem complicat de construcție și etanșare a cuvei dacă OP are gabarit mare sau forme complexe;
 - volum mare de LL și cuvă pe măsură.

Între cele două posibilități de lucru există diferențe atât din punct de vedere al mărimii, etanșeității și volumului SL (și deci al volumului LL) și al utilajelor conexe necesare. Acestea sunt prezentate în tabelul 2.3 din care se observă că prelucrarea cu jet presupune cantități mai mici de LL folosind astfel rezervoare de dimensiune mai mică și deci pompe mai puține și cu debit scăzut. Aceasta însă simultan cu un sistem de etanșare și ventilație care poate deveni uneori complicat, mai ales atunci când debitele LL sunt mari din cauza prelucrării de suprafețe extinse; în același timp sistemul de dirijare a LL poate deveni pretențios.

Avantajoasă poate fi metoda prelucrării prin imersie din punct de vedere al sistemului pentru ML și al sistemelor de ventilație. În acest caz însă, cantitatea mare de LL existentă în SL necesită pompe puternice pentru umplerea cuvei și recircularea LL;

volumul mare de LL impune și rezervoare de capacitate mare și sisteme de etanșare corespunzătoare mărimii SL cu avantajul lipsei emanațiilor de aerosoli. La debitare, metoda duce la scăderea timpului de debitare aproape la jumătate, precizia dimensională și calitatea suprafeței se îmbunătățesc; scade consumul energetic deci și costurile operației ([HLM92, HOM86, OH86]).

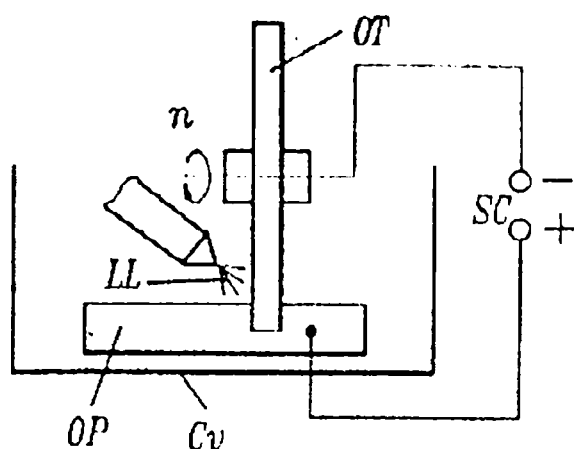


Figura 2.19. Schema prelucrării prin EEC cu jet ([Her95, Her99a, Kar00a])

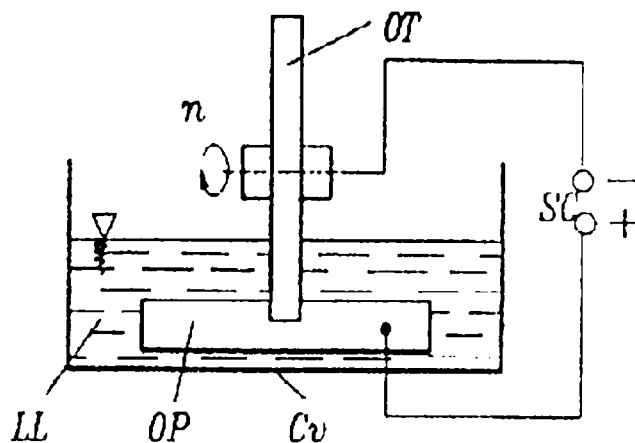


Figura 2.20. Schema prelucrării prin EEC prin imersie ([Her95, Her99a, Kar00a])

Tabelul 2.3. Modul de introducere a LL în SL ca factor de influență la prelucrarea prin EEC (unde + reprezintă un avantaj iar - un dezavantaj; prelucrare după [Her99a], [Kar00a])

Factor influențat	Spălarea cu jet	Spălarea prin imersie
Cantitatea LL utilizată	+	-
Volumele rezervoarelor de stocare	+	-
Numărul și gabaritul pompelor	+	-
Complexitatea sistemelor de etanșare	+	-
Complexitatea sistemelor pentru LL	-	+
Sistemul de ventilație	-	+
Stabilitatea procedurii	+	+
Cost	+	-
Calitatea suprafețelor prelucrate	+	-

Dacă se utilizează prelucrarea cu jet, LL este adus în interstițiu la valori ale presiunii p de 1-2 daN/cm² ([Nag98]).

Ambele sisteme necesită curățirea electrolitului și limitarea temperaturii maxime la valori care să nu depășească 70°C ([GM76]).

2.3.6. Factori de influență determinați de sistemul tehnic

Sistemul de comandă și reglare

Acest ansamblu asigură realizarea deplasării relative a OT și OP, pe direcția și sensul de prelucrare, și a presiunii p . Valorile uzuale ale acestor doi factori sunt $v_r=5-25$ m/s și $p=1-3$ daN/cm².

Se pot utiliza trei metode de **acționare a avansului OT** și anume:

- acționarea gravitațională;
- acționarea manuală sau mecanică, rigidă sau elastică;
- acționarea automată, prin controlul forței de reacțiune sau al parametrilor electrici.

Alegerea uneia din metode este dictată de calitatea rezultatului, de complexitatea procesului, de costul operațiunii. Astfel, pentru mașinile de complexitate redusă, acționarea gravitațională și manuală/mecanică sunt coroborate cu utilizarea operatorului uman. Metoda acționării automate se utilizează când prelucrarea este complexă și presupune reglarea avansului funcție de anumiți parametri electrici ai prelucrării: căderea de tensiune pe SL U_s [V], intensitatea curentului prin interstițiul de lucru I [A], densitatea de curent prin interstițiu j [A/mm²].

Sistemul mecanic

Acest ansamblu se folosește la instalarea OP și OT și asigurarea lor; la urmărirea cinematicii și presiunii necesare generării suprafețelor; realizarea avansului; dirijarea corespunzătoare a LL; evacuarea surplusului de LL și a produselor rezultate.

Realizarea concretă a sistemului mecanic ține cont de operațiile pe care trebuie executate, de gabaritul OP, de materialul din care acesta este confecționat ([BD73]).

Sistemul pentru electrolit

Acest ansamblu asigură stocarea, accesul în SL, curățirea și recircularea LL.

Așa cum s-a prezentat la paragraful 2.3.5, se poate utiliza un anumit sistem pentru electrolit, folosind un anumit mod de spălare a SL din cele două variante tehnologice, anume spălarea cu jet sau prin imersie. Funcție de avantajele și dezavantajele fiecărei variante, se poate alege modul de spălare care să determine o anumită mărime și structură a sistemului pentru electrolit.

Sistemul de alimentare cu energie electrică

Sistemul de alimentare cu energie electrică la prelucrarea prin EEC **se compune** din ([Kar00a]):

- **sistemul direct de alimentare**, utilizat pentru alimentarea cu energie electrică a SL unde se constituie agenții erozivi și se dezvoltă procesele elementare de eroziune;
- **sistemul indirect de alimentare**, utilizat pentru alimentarea celorlalte sisteme din cadrul utilajului de prelucrare.

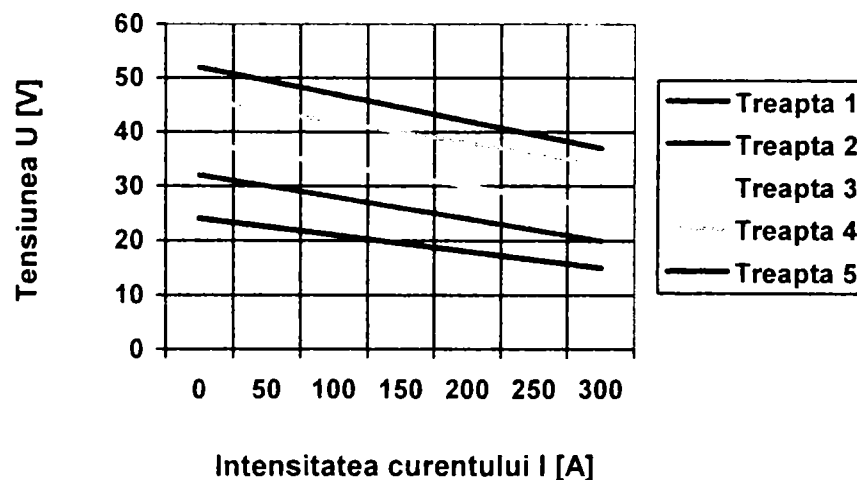


Figura 2.21. Caracteristicile externe ale sursei de curent tip RSC 400 ([IP81])

Alegerea unui anumit regim electric de funcționare se face prin menținerea constantă a tensiunii U , de către sistemul de avans automat, selectând o anumită treaptă de regim. În același timp cu tensiunea, și intensitatea curentului trebuie corelată prin stabilirea caracteristicilor exterioare globale la borne. Sursa trebuie să aibă o caracteristică externă rigidă sau ușor descrescătoare pentru a compensa consumul energetic în SL (figura 2.21).

Alegerea unui anumit sistem de alimentare cu energie electrică este funcție de anumiți parametri de proces ([Her99a, Kar00a]):

- presiunea între electrozi;
 - curentul de lucru (densitatea de curent);
 - viteza relativă;
 - puterea electrică indusă în SL;
 - OP și OT;
 - modul de spălare a SL;
 - sistemul pentru electrolit;
 - sistemul mecanic,
- și influențează parametrii de stare și caracteristicile tehnologice:
- ponderea proceselor fundamentale în SL;
 - stabilitatea procesului;
 - productivitatea prelucrării;
 - gabaritul și costul utilajului.

2.3.7. Factori determinați de tipul prelucrării

Particularizând procesul general de prelucrare prin EEC la generarea suprafețelor, aceasta reprezintă materializarea în cadrul prelucrării a unor linii generatoare și directoare în mișcare relativă, urmare a unor elemente de generare sau combinații ale acestora.

Printre posibilitățile practice de utilizare se pot enumera ([Kar00a, Lan86, LMG04]):

- directoarea cinematică ca **traietorie a unui punct**;
- directoarea cinematică ca **înfășurătoare a unei curbe cinematice**.

Alegerea unei anumite scheme de generare este funcție de anumiți parametri de proces ([Her99a, Kar00a]):

- precizia de realizare;
 - funcționarea mecanismelor;
 - amplitudinea vibrațiilor;
 - variația de temperatură în timpul prelucrării;
 - regimul de lucru;
 - perechea de materiale OP-OT;
 - proprietățile ML,
- și influențează caracteristicile tehnologice:
- precizia prelucrării;
 - limitarea timpului de lucru;
 - uzura OT;
 - rentabilitatea procesului;
 - durata de viață a OT;
 - precizia formei geometrice.

2.3.8. Factori de influență determinați de operatorul uman

Procesul tehnologic de prelucrare prin EEC necesită prezența operatorului uman. Aceasta înseamnă o influențare a construcției utilajului, fiind necesare dispozitive de protecție a operatorului și dispozitive de evacuare a substanțelor nocive care ar putea afecta sănătatea operatorului.

Printre aceste măsuri sunt cuprinse cele legate de tehnica securității muncii, care pentru prelucrarea prin EEC presupun ([Nag98]):

- montarea de covoare de cauciuc sau grătare de lemn pe care să lucreze operatorul;
- purtarea de mănuși protectoare și folosirea de alifii pentru a preîntâmpina reacții alergice cauzate de LL;
- legarea mașinii la pământ;
- montarea unor capace care să închidă SL;
- fixarea corespunzătoare a OT;
- montarea de instalații de ventilare locală pentru evacuarea noxelor.

2.3.9. Factori de influență determinați de mediul înconjurător

Procesul de prelucrare prin EEC nu se desfășoară izolat, ci într-un anumit context și anumită localizare în spațiu. Astfel, el intră în relație cu mediul înconjurător. Despre această relație s-au făcut referiri în cursul acestui capitol, unde s-a văzut că LL influențează alegerea unui anumit dispozitiv de prelucrare ([Kar00a]).

De exemplu, prezența LL în timpul prelucrării și necesitatea păstrării sale între operațiile de prelucrare impune sisteme de etanșare a SL, complicate și costisitoare, pentru a împiedica pierderea LL în mediul înconjurător. Tot aceste sisteme asigură și protecția mediului față de produsele derivate rezultate din proces, care prin sistemele de evacuare, recirculare și neutralizare a LL și reziduurilor afectează compunerea dispozitivului de prelucrare.

2.3.10. Concluzii privind factorii de influență la prelucrarea prin eroziune electrică complexă

În cursul acestui paragraf au fost prezentați diferiți factori care influențează prelucrarea prin EEC, grupați în funcție de natura lor.

S-a putut astfel observa foarte clar că acești factori acționează în strânsă interdependență, că ei se influențează reciproc, că de aceea pot fi grupați în **factori de influență determinanți** pentru alți factori și **factori de influență determinați** la rândul lor de alții. Această complexitate a factorilor și influențele lor reciproce demonstrează caracterul de proces complex al EEC și este o explicație pentru greutățile pe care le întâmpină înțelegerea deplină a fenomenelor care au loc.

În concluzie, datorită caracterului deosebit al procesului de prelucrare prin EEC, fenomenele fundamentale desfășurate în SL depind de o întreagă gamă de parametri și factori acționând în același timp și într-o interdependență dinamică ([Kar00a], figura 2.22).

Funcție de variația acestor parametri și factori, sunt influențate, la rândul lor, rezultatele prelucrării ([Lan86]), și anume:

Figura 2.22. Interdependența factorilor de influență la prelucrarea prin EEC (Kardona)

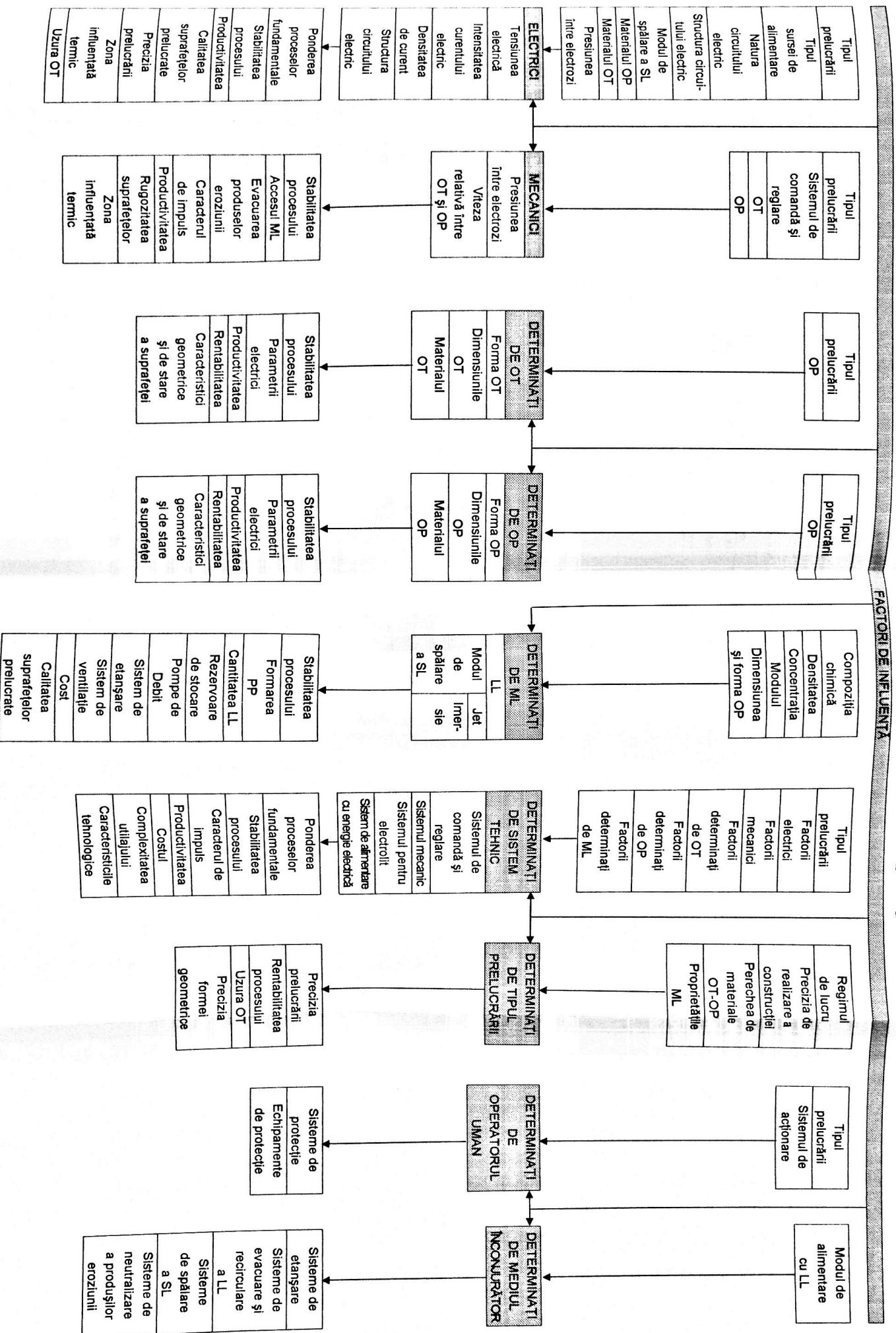
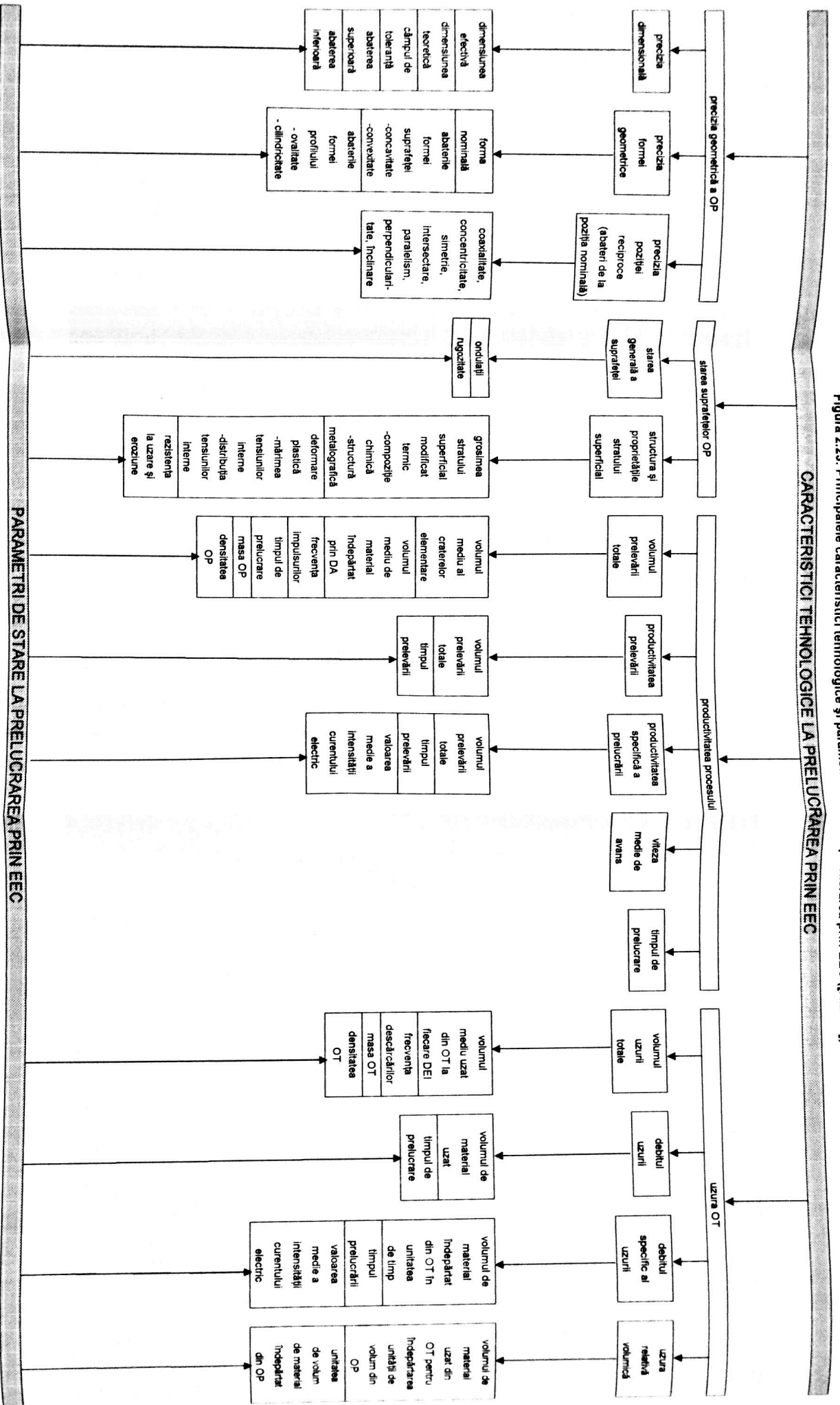


Figura 2.23. Principalele caracteristici tehnologice și parametri de stare la prelucrarea prin EEC ([Kardoa])



- efectul eroziv global;
- ponderea proceselor elementare;
- stabilitatea procesului de prelucrare;
- caracteristicile tehnologice globale.

În concluzie, principalele procese care au loc la prelucrarea prin EEC se desfășoară în interiorul sistemului termodinamic limitat de OP, OT și ML. Principalele caracteristici ale prelucrării prin EEC sunt cele prezentate în figura 2.23.

2.4. PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ COMPLEXĂ COMPARATIV CU ALTE PROCEDEE DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE

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

O comparație a caracteristicilor tehnologice cantitative și calitative ale diverselor procedee este prezentată în tabelul 2.4 iar caracteristicile specifice prelucrării prin EEC sunt prezentate în tabelul 2.5.

Tabelul 2.4. Caracteristici tehnologice la prelucrarea prin eroziune ([Her99a, GM91, Kar00a])

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

2.5. UTILAJUL TEHNOLOGIC PE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ COMPLEXĂ

Un sistem tehnologic pe prelucrare este un ansamblu compus din mai multe elemente de echipament tehnologic, în scopul realizării unei operații de prelucrare, printr-un anumit procedeu de prelucrare.

Tabelul 2.5. Indicatori tehnologici medii la prelucrarea prin EEC ([N+83])

Operația	Tensiune U [V]	Densitate de curent j [A/cm ²]	Presiune p [daN/cm ²]	Viteză de avans v _r [m/s]	Consum specific de energie [kW/cm ²]	Productivitate Q _{OP} [mm ³ /min]	Clasă de precizie STAS 8101-89	Rugozitate R _a [μm]
Debitare OT disc	20-24	300-700	1,5-2,5	15-20	3,0-5,0	400-500	6-7	50,0-12,5
Debitare OT bandă	20-30	100-500	1,0-2,0	15-25	2,0-4,0	500-600	6-7	50,0-12,5
Profilare	15-20	80-200	2,0-2,5	5-10	4,0-5,0	600-700	4-5	3,2-0,8
Degroșare	16-20	80-150	1,5-2,0	20-25	2,0-3,0	100-200	1-2	3,2-1,6
Finisare	12-16	30-70	0,5-1,0	20-25	0,5-1,0	50-100	1	0,8-0,2
Supra-finisare	8-10	5-10	0,5-1,0	15-20	0,5-1,0	30-50	1	0,4-0,1
Netezire	4-6	3-5	0,2-0,5	10-15	0,2-0,3	6-10	1	0,2-0,1

Noțiunea de *utilaj de prelucrare prin eroziune electrică complexă* se referă la un sistem de prelucrare care utilizează metoda EEC pentru obținerea rezultatului dorit asupra OP ([Kar00a]).

Utilajul de prelucrare trebuie să asigure îndeplinirea următoarelor **condiții**:

- să poată genera forma finală a OP;
- să permită reglarea parametrilor de proces la valorile optime;
- să poată prelua solicitările mecanice, termice etc. care apar.

Utilajul de prelucrare are următoarele **caracteristici**:

- tehnologice, care include viteze, presiuni, dimensiuni etc.;
- de precizie, care include limitele de eroare admise;
- termice, care privesc efectele calorice care se manifestă;
- statice și dinamice, care include răspunsul utilajului la diverse solicitări.

2.5.1. Structura generală a unui utilaj de prelucrare prin eroziune electrică complexă

Utilajele de prelucrare se pot **clasifica** astfel ([Kar00a]):

- **după tipul operației tehnologice**:
 - mașini de debitat;
 - mașini de ascuțit;
 - mașini de profilat;
 - mașini de realizat fante;
- **după forma constructivă a OT**:
 - mașini cu disc;
 - mașini cu bandă;
 - mașini cu fir;
- **după tipul avansului**:
 - mașini cu avans manual;
 - mașini cu avans mecanic constant;
 - mașini cu avans automat:
 - electromecanic;

- mecanic;
- hidraulic;
- pneumatic;
- **după destinație:**
 - mașini universale;
 - mașini specializate.

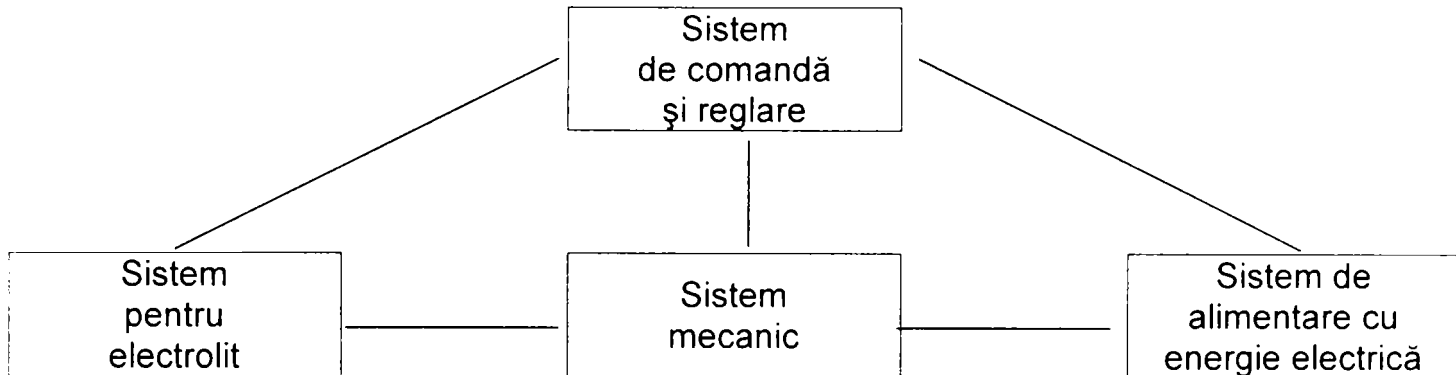


Figura 2.24. Subsistemele unui utilaj de prelucrare prin EEC ([Her92, Her98, Her99a, Kar00a, Kar01, Kar02, KN03b, Lan86])

Ca orice sistem, utilajul de prelucrare prin EEC se **compune** din mai multe subsisteme care interacționează (figura 2.24):

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

2.5.2. Tipuri de operații de prelucrare prin eroziune electrică complexă

Ca în orice domeniu de activitate, aplicarea practică a uneia sau alteia din metodologiile de lucru depinde de o multitudine de factori, alegerea ținând cont de rezultatul la care trebuie ajuns.

Principalele utilizări ale prelucrării prin EEC sunt:

- tăierea (debitarea, retezarea) cu bandă sau cu disc;
- prelucrările profilate (cu disc profilat);
- ascuțirea sculelor așchietoare;
- rectificarea plană sau profilată;
- prelucrarea cavităților;
- decuparea cu electrod filiform;
- profilarea corpurilor de revoluție.

2.5.3. Aspecte tehnologice privind prelucrarea prin eroziune electrică complexă

Când se are în vedere elaborarea procesului tehnologic de prelucrare prin EEC, trebuie avute în vedere următoarele elemente ([Kar00a]):

- caracteristicile constructive și dimensionale ale piesei care trebuie prelucrată;
- materialul din care este confecționat OP;
- condițiile impuse privind precizia dimensională și de formă;
- rugozitatea suprafețelor prelucrate;
- utilajul tehnologic de prelucrare disponibil.

Odată analizate aceste elemente, se poate elabora procesul tehnologic care rezolvă prelucrarea dorită, ceea ce impune stabilirea următoarelor ([Kar00a]):

- stabilirea concretă a utilajului tehnologic;
- stabilirea variantei de sistem de alimentare cu LL;
- stabilirea densității de curent necesare;
- stabilirea curentului de prelucrare și a tensiunii optime în SL;
- stabilirea naturii circuitului electric de alimentare și a valorilor parametrilor electrici R și L;
- stabilirea materialului OT, a modului de obținere, preciziei geometrice, preciziei dimensionale;
- stabilirea vitezei relative OP-OT;
- stabilirea presiunii între OP și OT.

Ca la orice sistem complex, varianta obținută din proiectarea sistemului tehnologic trebuie verificată prin încercări experimentale și la nevoie corectată funcție de rezultatele acestor încercări.

Capitolul 3.

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA ELECTRICĂ COMPLEXĂ

3.1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR TEORETICE

Din punct de vedere al prelucrării tehnologice, sistemul se consideră compus din următoarele subsisteme:

- obiectul de prelucrat OP;
- obiectul de transfer OT;
- mediul de lucru ML.

Ca pentru orice sistem, și acestuia i se pot evidenția următoarele legi care să conducă spre obținerea unor rezultate optime în urma prelucrării:

- orice decizie este cu atât mai bună cu cât ea se bazează pe observarea evoluției sistemului pe un timp cât mai îndelungat, în orice caz cât mai apropiat de momentul luării deciziei;
- când luarea deciziei se bazează pe o observație din ce în ce mai veche, importanța acestei observații este din ce în ce mai scăzută;
- orice decizie se ia pe baza cauzelor dar și a efectelor;
- orice sistem va funcționa corect, între limitele acceptate, numai dacă acea cauză externă care poate duce la proasta funcționare nu depășește anumite limite (valorice și de durată).

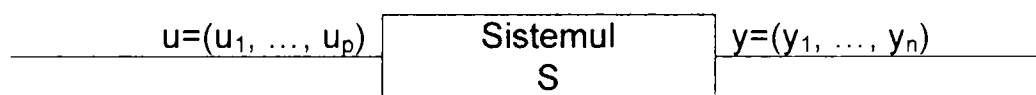


Figura 3.1. Sistemul de prelucrare prin eroziune electrică complexă
([GR93, Her98, Kar01, Kar02, NK01])

Fiind aici vorba de un proces de prelucrare complexă, putem considera sistemul ca fiind descris de mărimile de cauză (intrări) u_1, u_2, \dots, u_p și mărimile de efect (ieșiri) y_1, y_2, \dots, y_n :

$$u=(u_1, u_2, \dots, u_p) \quad (3.1)$$

$$y=(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (3.2)$$

de unde u și y sunt denumite generic *variabile de intrare* respectiv *de ieșire* iar schema unui astfel de sistem este prezentată în figura 3.1.

Principalii factori de influență (mărimi de cauză u) sunt [Kar00a, Kar02, NK01]:

- mărimi electrice: tensiunea U , intensitatea curentului I , densitatea de curent j , structura circuitului;
- mărimi mecanice: presiunea p și viteza relativă între electrozi v_r ;
- mărimi care depind de OT: forma, dimensiunile, materialul;
- mărimi care depind de OP: forma, dimensiunile, materialul;
- mărimi care depind de ML: tipul și modul de spălare;

- mărimi care depind de sistemul tehnic: sistemul de comandă și reglare, sistemul mecanic, sistemul pentru electrolit, sistemul de alimentare electrică;
- mărimi care depind de tipul prelucrării;
- mărimi care depind de operatorul uman;
- mărimi care depind de mediul înconjurător.

Principalele mărimi de efect γ (caracteristici tehnologice) sunt:

- stabilitatea procesului;
- productivitatea prelevării;
- rentabilitatea prelucrării;
- costul prelucrării;
- calitatea suprafeței rezultate;
- precizia prelucrării;
- uzura OT.

Așa cum se prezintă și în [NHO93, Ros97], având în vedere că numărul factorilor de influență este foarte mare, și determinarea completă a unui model matematic este deosebit de complicată, dovadă timpul scurs de când se aplică această tehnologie de prelucrare și absența (deocamdată) a unui astfel de sistem. Totuși, un număr suficient de mare de experimente, cu date concludente, ar putea duce la crearea unui ansamblu de legi de influență.

[Her93b, Her95, HFO93, HML93a, HML93b, HMM93a, Kar02, NHO93] prezintă ca metodă de stabilire a ordinii de influență a diversilor parametri asupra mărimilor de ieșire, **metoda experimentului psihologic**. Ea permite ierarhizarea factorilor independenți, eliminarea factorilor neesențiali și astfel reduce numărul total doar la factorii de bază, toate acestea folosind un experiment simplu, cu cheltuieli minime, fără consum de manoperă, materiale sau energie.

La aplicarea acestei metode s-a utilizat un chestionar, distribuit unui număr de 20 specialiști în problema analizată, cadre didactice la Facultatea de Mecanică din Universitatea „Politehnica” din Timișoara, prin care se cerea o ierarhizare a influenței pe care principalele mărimi de intrare independente:

- p [bar], presiunea între OP și OT;
- v_r [m/min], viteza relativă dintre OP și OT;
- R [Ω], rezistența din circuitul electric de alimentare a SL;
- L [H], inductivitatea din circuitul electric de alimentare a SL;
- C [F], capacitatea din circuitul electric de alimentare a SL;
- LL, natura mediului lichid de lucru, respectiv compoziția chimică, densitatea, modulul etc.;
- IL, modul de introducere a lichidului de lucru, respectiv imersie sau jet;
- Me, materialul din care este confecționat OT;
- FOT, forma OT, respectiv disc, bandă sau fir;
- g [mm], grosimea OT,

le au asupra mărimilor de ieșire, adică a principalilor indicatori de performanță:

- Q_{OP} [mm³/min], productivitatea prelucrării, definită ca volumul de material prelevat din OP în unitatea de timp;
- Q_{OT} [mm³/min], debitul uzării, definit ca volumul de material consumat din OT în unitatea de timp;
- R_a [μ m], calitatea suprafeței exprimată prin rugozitate ca abatere medie aritmetică a profilului real față de linia mijlocie;
- H_s [μ m], adâncimea stratului modificat termic în urma efectului termic al descărcărilor electrice în impuls;

- s_l [mm], interstițiul lateral, definit ca distanța dintre OT și marginea suprafeței prelucrate;
- v_e [mm/min], viteza de avans.

În completarea chestionarului, fiecare specialist indică importanța pe care o acordă fiecărei mărimi de intrare în influențarea mărimii de ieșire, punctajul fiind între 1 punct (parametrul cel mai important) și 10 puncte (parametrul cel mai puțin important). Dacă mai mulți parametri sunt considerați la fel de importanți, aceștia primesc punctaj egal, urmând ca reșezarea punctajului între limitele 1 și 10 să se facă prin program.

Dacă însă se ține mai mult cont de factorul uman, în sensul că punctajele acordate de specialiști să fie ponderate funcție de nivelul de pregătire profesională, de experiența în domeniu, de seriozitatea și interesul față de anchetă, rezultatele de mai sus se pot modifica. Astfel, se pot considera coeficienții de ponderare de mai jos:

S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	S ₁₇	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₀
2,00	1,83	1,82	1,69	1,69	1,56	1,39	1,28	1,27	1,27	1,12	1,60	1,81	1,04	1,04	1,07	1,04	1,00	1,02	1,00

Rezultatele obținute sunt prezentate în figurile 3.2 la 3.7 (toate aceste figuri sunt obținute prin prelucrare pe calculator [Kar02]) și anume:

- histograma din figura 3.2, se poate observa că influența cea mai mare asupra Q_{OP} o are presiunea p între OP și OT iar cea mai mică influență materialul din care este confecționat OT (confirmat și în [HML93b]);
- figura 3.3 conține importanța mărimilor de intrare asupra Q_{OT} : se observă că depinde cel mai mult de presiunea p iar cea mai mică influență o are forma OT (confirmat și în [HML93a]);
- figura 3.4 conține importanța mărimilor de intrare asupra R_a : se observă că depinde cel mai mult de viteza v_r între OP și OT iar cea mai mică influență o are grosimea g a OT (confirmat și în [HFO93]);
- figura 3.5 conține importanța mărimilor de intrare asupra H_s : se observă că acesta depinde cel mai mult de presiunea p și de viteza relativă v_r între OP și OT, iar cea mai mică influență o are grosimea g a OT (confirmat și în [HF93b]);

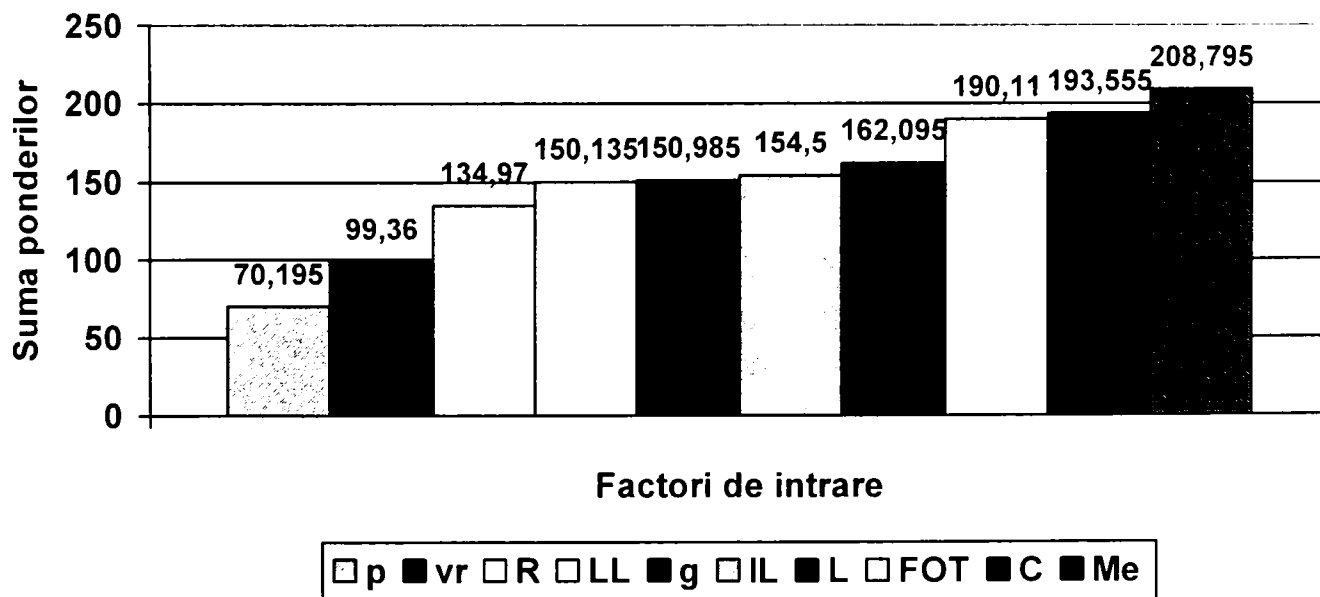
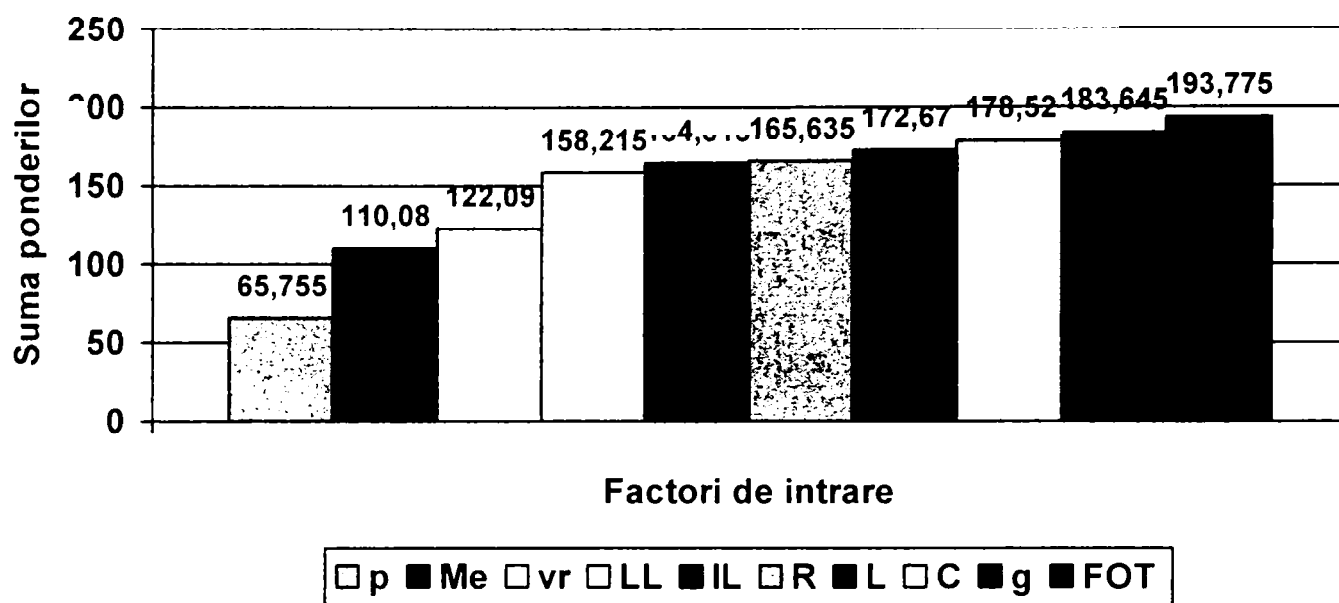
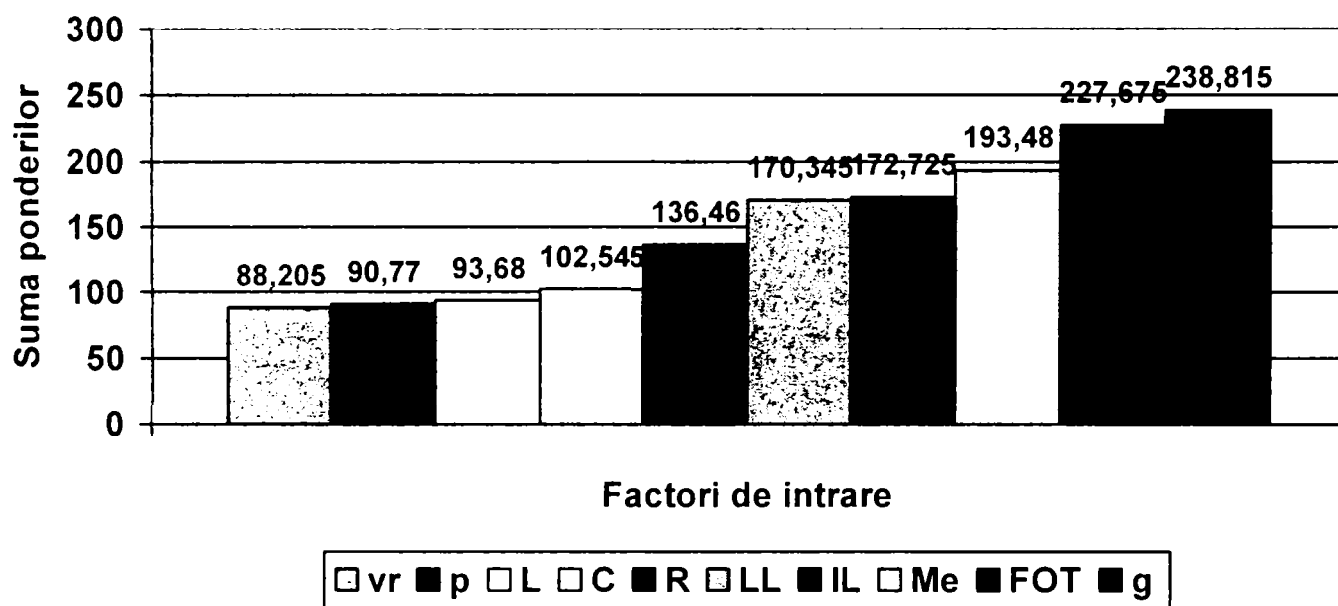


Figura 3.2. Ordonarea mărimilor de intrare care influențează productivitatea prelucrării Q_{OP}


 Figura 3.3. Ordonarea mărimilor de intrare care influențează debitul uzurii Q_{OT}

 Figura 3.4. Ordonarea mărimilor de intrare care influențează rugozitatea suprafeței R_a

- figura 3.6 conține importanța mărimilor de intrare asupra s_i : se observă că acesta depinde cel mai mult de presiunea p între OP și OT iar cea mai mică influență o are materialul din care este confecționat OT (confirmat și în [HMM93a]);
- figura 3.7 conține importanța mărimilor de intrare asupra v_e : se observă că depinde cel mai mult de presiunea p între OP și OT iar cea mai mică influență o are grosimea g a OT (confirmat și în [Her93b]).

Rezultatele obținute în urma acestui experiment au fost supuse mai apoi unor procedee și tehnici din statistica matematică, menite să determine corectitudinea și consensul informațiilor conținute.

Pentru a se verifica gradul de consens, adică a se stabili dacă există sau nu abateri semnificative între părerile specialiștilor participanți la studiu, s-a utilizat criteriul χ^2 care a condus la concluzia că pentru toate cele șase caracteristici tehnologice concordanța de opinii este confirmată ([Her95]).

În continuare s-a aplicat criteriul L prin intermediul căruia s-a căutat a se stabili care sunt parametrii care au obținut punctaje asemănătoare și din această cauză pot fi considerați ca fiind de același rang de influență. În urma aplicării metodei precizate, concluzia finală a experimentului statistic a fost următoarea:

- pentru Q_{OP} , toți factorii analizați sunt factori primari;
- pentru Q_{OT} , toți factorii analizați sunt factori primari;
- pentru R_a , în afară de g ceilalți factori sunt primari;
- pentru H_s , în afară de g ceilalți factori sunt primari;
- pentru s_l , toți factorii analizați sunt factori primari;
- pentru v_e , în afară de Me ceilalți factori sunt primari.

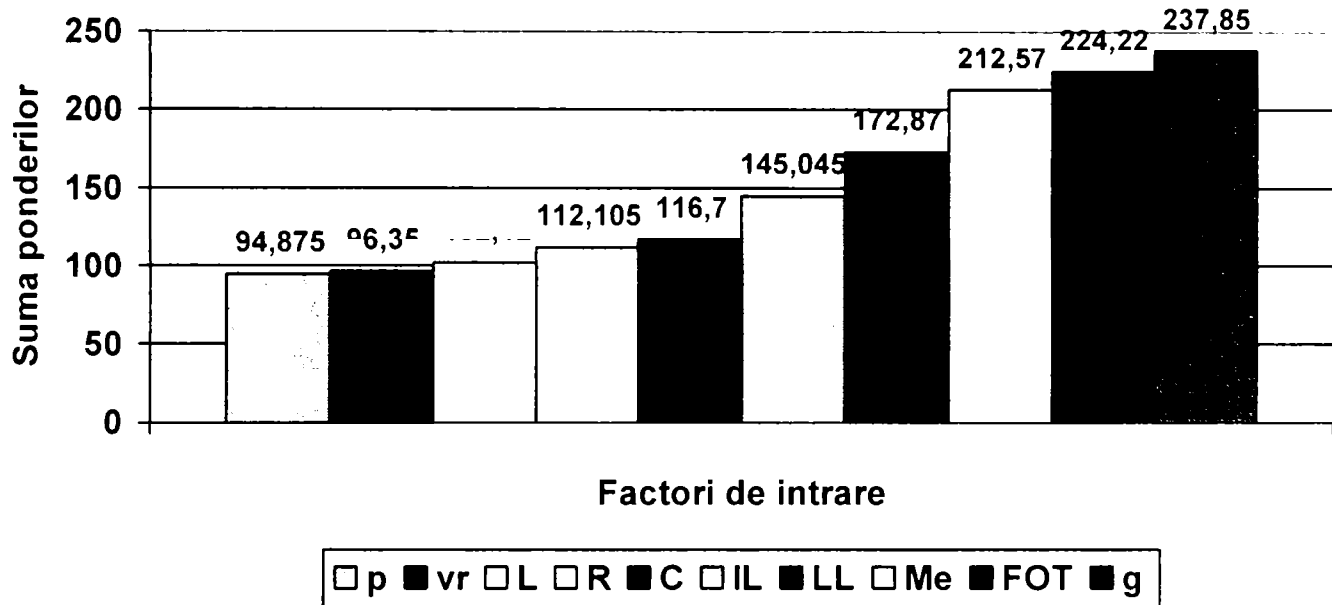


Figura 3.5. Ordonarea mărimilor de intrare care influențează adâncimea stratului modificat termic H_s

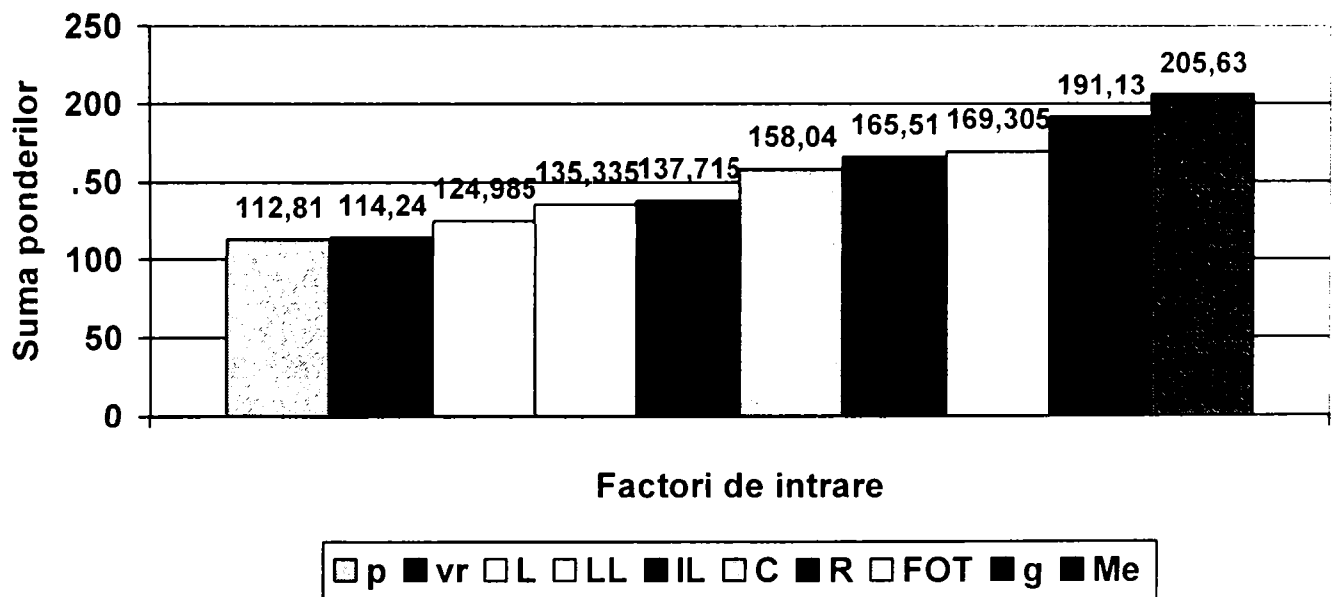


Figura 3.6. Ordonarea mărimilor de intrare care influențează interstițiul lateral s_l

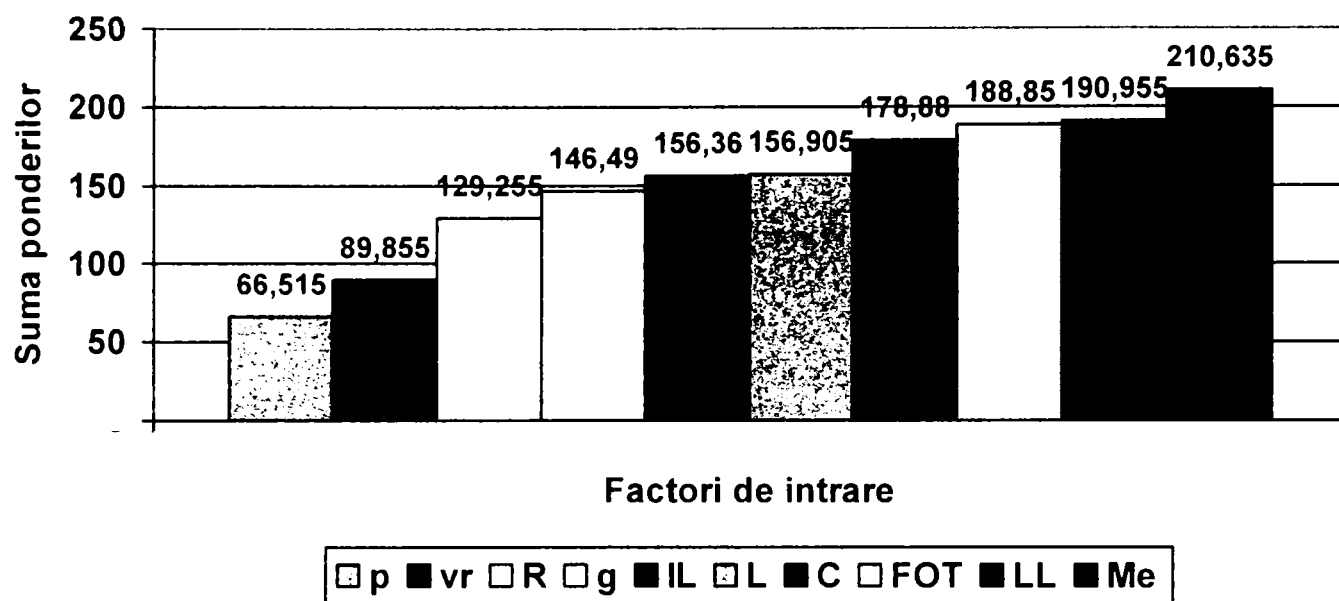


Figura 3.7. Ordonarea mărimilor de intrare care influențează viteza de avans v_e .

În ansamblu, se observă că, prin această metodă de ordonare a parametrilor (mărimilor, factorilor) de intrare, cea mai mare importanță și influență asupra rezultatelor prelucrării o are presiunea p între OP și OT, apoi viteza relativă v_r între cele două obiecte și mărimea rezistenței electrice R din circuitul de alimentare.

Dintre factorii care influențează rezultatele prelucrării, în metoda de mai sus, lipsesc doi dintre factorii importanți și anume tensiunea U și curentul I pe SL. Deși aceștia sunt factorii prin intermediul cărora se face cel mai ușor conducerea unui sistem de prelucrare prin EEC, lipsa acestora din experimentul teoretic indicat se explică prin aceea că ceilalți factori analizați influențează rezultatul final tocmai prin modificarea U sau I (sau densitatea de curent j). Ceilalți 10 factori analizați sunt independenți între ei, astfel încât introducerea suplimentară a acestor 2 factori ar fi modificat caracterul de independență a mărimilor de intrare și atunci rezultatul testului nu ar fi fost realist.

[Her95] arată că pentru conducerea procesului, cei mai importanți factori sunt tensiunea de lucru U și curentul din spațiul de lucru I . Factorii analizați în experimentul din [Her95] influențează prelucrarea prin modificarea tensiunii și curentului. Cel mai important factor din proces este presiunea p între OP și OT, urmată de viteza relativă v_r dintre OT și OP, ceilalți factori urmând în diferite secvențe funcție de criteriul de optimizare urmărit, așa cum se va prezenta în continuare.

În [Ola97] este indicată o metodă de verificare a concluziilor experimentului psihologic, prin aplicarea metodei Borda directă și a condițiilor de raționalitate Arrow.

- **Productivitatea prelucrării Q_{OP}**

Dacă se urmărește optimizarea Q_{OP} , aceasta este influențată în primul rând de presiunea p , ceea ce se explică prin aceea că presiunea determină aria de contact și deci densitatea de curent în spațiul de lucru.

Următorul factor de influență este viteza relativă v_r între OT și OP, explicabil prin aceea că impune caracterul de impuls al descărcării electrice, stabilind durata de existență a DEI și astfel determină cât din energia descărcării se regăsește în prelevarea de material din OP.

Al treilea factor este rezistența R a circuitului electric de alimentare care limitează efectele negative ale scurtcircuitelor accidentale dintre OP și OT și stabilirea curentului optim de prelucrare.

Urmează apoi LL (care stabilește proprietățile PP), grosimea g a OT (asigură concentrarea energiei de prelucrare), modul de introducere a LL în SL (determină procesele ce au loc) și inductivitatea L din circuit.

Pe ultimele locuri se situează forma OT, capacitatea C din circuit și materialul Me din care este fabricat OT.

- **Debitul uzurii Q_{OT}**

Dacă se urmărește optimizarea Q_{OT} , acesta este influențat în primul rând de presiunea p , ceea ce se explică prin aceea că presiunea determină forța de frecare între OP și OT deci abrazarea OT; în plus, frecarea contribuie la distribuția energiei DEI.

Pe locurile 2-3 se situează materialul din care este construit OT (normal, duritatea sa va influența uzura-aceasta va conduce la utilizarea de OT rezistente la uzură acolo unde operația tehnologică necesită precizie dimensională mare) și respectiv viteza relativă între OP și OT (viteza prea mică va duce la prea multă PP care accentuează efectul abraziv; viteza prea mare conduce la pericolul de rupere a OT).

Următorii factori au influență asemănătoare și ei sunt LL și modul de introducere a sa în SL, caracteristicile electrice ale circuitului date prin R , L și C și în fine grosimea OT.

- **Rugozitatea suprafeței prelucrate R_a**

La optimizarea R_a , cea mai mare influență o are un grup de patru parametri compus din viteza v_r (influențează distribuția energiei în DEI), presiunea de contact p (influențează energia DEI), L și C din circuitul de lucru (influențează numărul de DEI).

Urmează ca importanță rezistența R din circuitul de alimentare, care asigură limitarea energiei maxime din circuit și previne mărirea densității de curent j peste limita admisă, ceea ce ar duce la destabilizarea procesului cu efecte grave la suprafața OP.

Următorii factori au influență asemănătoare și ei sunt lichidul de lucru LL și modul de introducere în SL (accesul corect al LL asigură calitatea suprafeței OP).

În fine, urmează caracteristicile materialului OT și forma OT, funcție de care se poate regla cel mai puțin R_a .

- **Adâncimea stratului modificat termic H_s**

Acest parametru este controlat în special de factorii de intrare care determină energia și distribuția energiei în DEI, adică de p , v_r , L , R , C .

Urmează modul de spălare IL și calitățile LL, factori care intervin întotdeauna când este vorba de calitatea suprafeței prelucrate prin EEC.

Pe ultimele locuri la factorii primari se situează materialul OT și forma OT.

- **Mărirea interstițiului lateral s_l**

Dacă se dorește optimizarea s_l , trebuie ținut cont că studiul arată că opt dintre factori au influență foarte asemănătoare (p , v_r , L , LL, IL, C , R , FOT) și de aceea în stabilirea tehnologiei de prelucrare trebuie ținut cont de ansamblul acestor parametri.

- **Viteza de avans v_e**

Optimizarea v_e se poate face în primul rând prin presiunea p și viteza relativă v_r între OP și OT. Concluzia este evidentă, căci acești doi factori asigură și controlul productivității prelucrării și deci viteza cu care are loc eroziunea.

Următorii patru factori au o influență aproximativ egală, aceștia fiind rezistența din circuitul de alimentare R (ea limitează puterea în SL), g (asigură suprafața necesară EEC), IL (asigură continuitatea corectă a procesului) și L (prin netezirea impulsurilor de curent).

Pe ultimele locuri se situează capacitatea C , forma OT și caracteristicile LL.

Cea mai bună confirmare a rezultatelor testului (teoretic) prezentat detaliat în [Her95] se face prin testele practice. Un număr mare de experimente, ale căror rezultate să fie înregistrate și prelucrate conform celor prezentate în [KN01, NK01], pot oferi

informații în baza cărora să fie sau nu confirmate presupunerile din testul teoretic. Un astfel de experiment se face în următoarele 2 etape ([Her95, Her98]):

- premodelarea, adică obținerea informațiilor din experimente;
- modelarea, adică interpretarea rezultatelor și deducerea modelului matematic.

3.2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE. REZULTATE PRACTICE

Experimentele efectuate în decursul timpului, unele dintre ele publicate în lucrări de specialitate, au conturat un număr de concluzii privind dependența parametrilor de ieșire de cei de intrare la procesul de prelucrare (în particular, de debitare) prin EEC.

Scopul principal al efectuării experimentelor este obținerea de date și informații despre modul de desfășurare a procesului de EEC. Pentru aceasta, este în primul rând nevoie a se stabili care sunt parametrii și variabilele de stare care se pot obține din experimente și care vor intra în structura modelului matematic al procesului.

La alegerea variabilelor de stare se au în vedere următoarele condiții ([Her95]):

- să poată fi măsurate;
- să intervină în eficiența procesului;
- să aibă o dispersie cât mai mică în timpul experimentului.

Parametrii care se aleg trebuie să respecte condițiile ([Her95]):

- să fie reglabili;
- să se poată măsura cu o precizie cunoscută.

După alegerea acestor date de intrare și ieșire se poate trece la efectuarea experimentărilor. Rezultatele acestor experimente sunt prezentate în continuare.

3.2.1. Productivitatea prelucrării. Timpul de prelucrare

Productivitatea prelucrării poate fi măsurată prin intermediul cantității de material care este erodat din OP. În [IP81] se prezintă o formulă pentru determinarea **masei totale de material erodată din OP** și anume:

$$m_{OP} = j \cdot S \cdot \left\{ K_1 + K_3 \cdot \frac{1 + \alpha_2 \cdot \gamma_s^2 \cdot \left[p + \left(\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{\gamma_s} \right) \right]^2}{t_i \cdot C \cdot t_0} \right\} \cdot (K_5 \cdot E^2 + K_6 \cdot \rho \cdot V_a) \text{ [g]} \quad (3.3)$$

Rezultatele experimentale privind influența factorilor de intrare asupra Q_{OP} arată că:

- Q_{OP} poate ajunge până la 10-12 000 mm³/min ([RL96, Sla00]);
- Q_{OP} crește la creșterea curentului de lucru ([IP81, Lan86, L+83b]), tensiunii de lucru ([L+83b]) respectiv a puterii introduse în SL ([HLM99b, IP81, LMH91]);
- Q_{OP} crește la introducerea în circuitul de alimentare a unei capacități C în paralel pe SL ([IP81, LMH92a, Pop70]);

- Q_{OP} scade la densități mari de curent (realizate prin I și p mari) din cauza trecerii descărcărilor electrice de la faza de DEI la cea de arc electric, la circuitele rezistive ([NL86]);
- Q_{OP} crește la introducerea în circuitul de alimentare a L sau a combinațiilor $L+C$, la aceleași densități de curent j ([Lan83a, Lan86, LHM91, NL83b, NL86, Pop70, Pop71]);
- Q_{OP} crește la introducerea în circuitul de alimentare a L , chiar la viteze mici ($v_r=6$ m/s), ceea ce recomandă această combinație la prelucrarea de OP cu mase mari aflate în mișcare de rotație cum ar fi prelucrarea corpurilor de revoluție ([NL86]);
- Q_{OP} crește la debitarea OP care execută o mișcare de rotație deoarece se facilitează accesul LL în SL ([HL93, HML91, HVB93, SGP83]);
- Q_{OP} este mai mare la utilizarea OT din fontă cenușie (creșterea cea mai mare) și Cu față de OT din OL la aceeași v_r și aceeași j , la debitarea carburilor metalice ([Lan83b, NL83a]);
- Q_{OP} este mai mare la utilizarea OT bandă decât OT disc ([Her95]);
- Q_{OP} crește la creșterea v_r în circuitele cu L ([NL83b]);
- Q_{OP} nu este influențată de modul de spălare cu LL adică jet sau imersie ([HOM86]);
- Q_{OP} crește la creșterea secțiunii OP, la aceeași putere indusă în SL ([LMH91]);
- Q_{OP} este mai mare la OP cu secțiune dreptunghiulară decât la cele cu secțiune circulară, dacă se păstrează $j=\text{constant}$; Q_{OP} este mai mare la OP cu secțiune circulară decât la cele dreptunghiulare dacă prelucrarea se face cu $I=\text{constant}$ ([Pop70]).

Rezultatele experimentale privind influența factorilor de intrare asupra t_p arată că:

- introducerea unei C poate duce la scăderea t_p cu circa 33% ([IP81]);
- t_p scade la creșterea U ([CBH93, HV92]), la creșterea I ([IP81]) respectiv la creșterea P introdusă în SL ([HLM88, IP81]);
- t_p scade la introducerea unei R_s la debitarea barelor de diametre mici (cca 50 mm) dar crește în aceleași condiții la barele mari (100 mm) ([HV92]);
- t_p crește la introducerea în circuit a unei L ([IP81, LHM91]);
- t_p scade la introducerea unei C conectate în paralel cu SL ([IP81]);
- dacă OT este din Cu atunci t_p este mai scurt decât pentru OT din OL ([IP81]);
- dacă sursa de alimentare este un redresor trifazat, t_p scade cu circa 15% față de utilizarea redresorului monofazat ([IP81]);
- t_p scade la creșterea I în condițiile menținerii constante a U ([L+83a]);
- t_p scade la debitarea OP cu diametre mari (peste 60 mm) dacă OP este rotit ([HML91, LH89]);
- t_p scade (aproape la jumătate) dacă debitarea se face prin imersie în loc de jet ([HLM92]).

În lucrarea [IP81] sunt prezentate, în urma cercetărilor efectuate, două nomograme care permit efectuarea de determinări aproximative ale t_p sau Q_{OP} funcție de materialul OP, diametrul OP și I , la OT din OL37 cu grosimea de 1 mm și viteză periferică în jur de 10 m/s (figura 3.8, figura 3.9).

De exemplu, în cazul figurii 3.8, nomograma permite determinarea lui t_p și Q_{OP} astfel [IP81]:

-exemplul nr. 1: pentru OP din oțel C120, diametru 23 mm, și $I=150$ A, timpul de debitare se citește de pe linia ce unește diametrul cu curentul și este de circa 0,82 min; corespunzător Q_{OP} este de aproape 600 mm³/min;

-exemplul nr. 2: pentru aceleași condiții dar OP cu diametrul de 40 mm, $t_p=1,45$ min iar $Q_{OP}=600$ mm³/min; se observă că Q_{OP} nu s-a modificat fapt datorat rămânerii constante a condițiilor de lucru;

-exemplul nr. 3: similar, pentru un diametru al OP de 90 mm se obține $t_p=6$ min.

Pentru oțeluri inoxidabile se poate folosi nomograma din figura 3.9, de unde, pentru un curent de 100 A și OP din 7NiCr180 se determină că ([IP81]) $t_p=2,5$ min; 2,2 min; 1,8 min dacă OP are diametrul de 40, 30 și 25 mm.

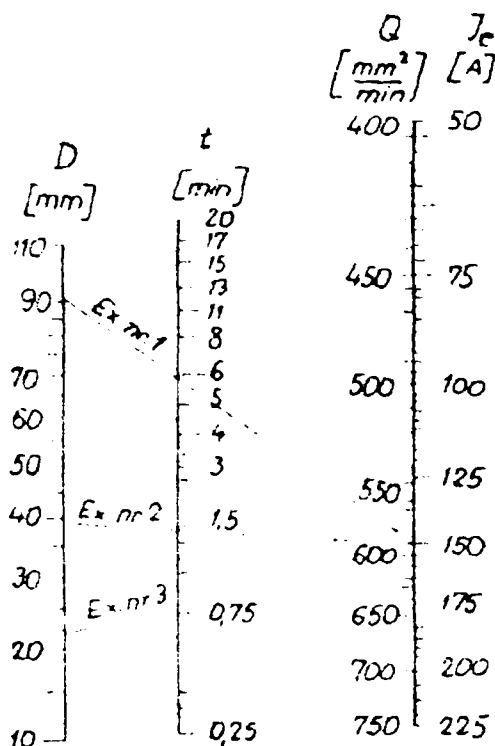


Figura 3.8. Nomogramă pentru determinarea t_p și Q_{OP} în cazul debitării oțelurilor rapide și de scule

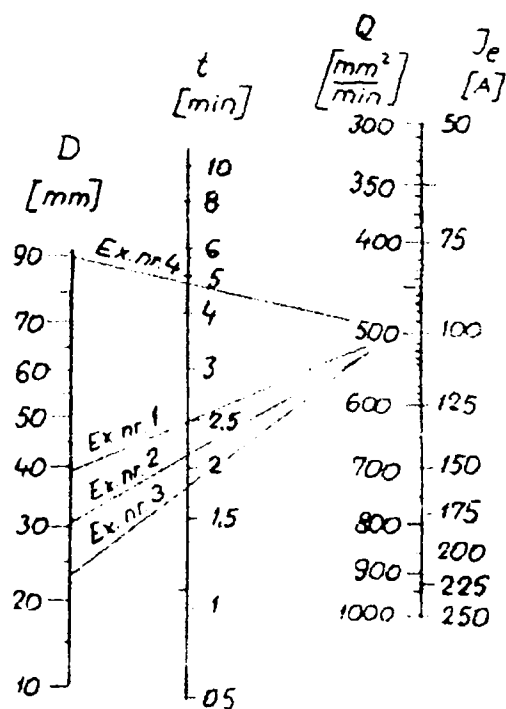


Figura 3.9. Nomogramă pentru determinarea t_p și Q_{OP} în cazul debitării oțelurilor inoxidabile

3.2.2. Calitatea suprafeței

Rezultatele experimentale privind influența factorilor de intrare asupra R_a arată că:

- poate ajunge până la 12,5-50 μm la debitarea cu OT disc ([Sla00]). Ea este mai redusă (1,6 μm conform [RL96]) dacă se utilizează U mai scăzute (6-15V); când viteza este mai mare pot apare microfisuri în stratul superficial;
- R_a este influențată negativ de existența în circuit a C ([IP81, Lan83a, Lan86, LMH92a, NL83b, Pop70, Pop71]);
- scade odată cu creșterea L ([IP81, Lan83a, Lan86, LHM91, LMH92b, Pop70, Pop71]);
- suprafețele cu R_a maximă se obțin pentru circuite numai cu R; suprafețe cu R_a medie se obțin pentru circuite L+C iar R_a este optimă (minimă) când circuitul de alimentare conține numai L ([Lan83a, NL86, PPO86]); această scădere la introducerea în circuitul de alimentare a L, chiar la viteze mici (6 m/s), recomandă folosirea L la prelucrarea de OP cu mase mari aflate în mișcare de rotație-prelucrarea corpurilor de revoluție ([Lan86, NL86]);
- R_a crește cu creșterea j la circuitele cu R ([NL86]);

- R_a este convenabilă la utilizarea OT din fontă cenușie (scăderea cea mai mare) și cupru față de OT din OL, la aceeași v_r și aceeași j , la debitarea carburilor metalice ([Lan83b, NL83a]);
- R_a este mai redusă la tăierea oțelului manganos cu OT din OL decât cu OT din cupru ([S+04]);
- R_a scade cu creșterea v_r și a j ([Lan86]), mai ales în circuitele cu L ([NL83b]);
- R_a scade la creșterea p ([Sav71]);
- R_a scade la debitarea prin imersie ([HLM92, OH86]);
- R_a crește ușor la debitarea OP cu diametre mari (peste 50 mm) dacă acestea sunt rotite în jurul axei ([LH89]);
- R_a este constantă când se lucrează cu j =constant atât la piesele dreptunghiulare cât și la cele rotunde; este constantă la I =constant numai la piesele dreptunghiulare ([Pop70]).

3.2.3. Alte rezultate

Alte rezultate experimentale:

- la I mari procesul de debitare devine instabil; acest lucru se poate evita prin introducerea unor L ([IP81]);
- uzura OT disc scade la introducerea în circuit a unei L ([IP81]);
- ZIT crește cu mărirea I ([IP81]);
- ZIT este influențată favorabil de introducerea în circuit a unor L și negativ de C ([IP81, LMH92a]);
- uzura OT crește odată cu creșterea p , fără însă a mări Q_{OP} ([IP81]);
- creșterea vitezei periferice a OT disc peste o anumită limită (20 m/s) destabilizează procesul de debitare din cauza pulverizării LL la prelucrarea cu jet ([IP81]);
- uzura OT disc din cupru este mai mică decât uzura OT disc din oțel ([IP81]);
- uzura OT crește la creșterea I ([OP81]);
- uzura relativă a OT scade la creșterea P induse în SL ([HLM99b]);
- uzura OT scade la utilizarea L și crește la utilizarea C ([IP81]);
- pentru OP cu diametre peste 100 mm este de preferat ca acestea să fie rotite pentru a scădea t_p și a mări posibilitatea de acces a LL în SL; în același timp rotirea permite utilizarea unor OT cu diametru mic (sub 400 mm) chiar dacă OP are diametru mare ([IP81, HL93, HML91]);
- pentru OP țevă este necesară introducerea unor duze pentru LL în interiorul țevii ([IP81]);
- la tăierea oțelurilor aliate, compoziția chimică a materialului din ZIT este cu atât mai omogenă cu cât I sunt mai mari ([IP81]);
- uzura OT poate ajunge până la 1-10% pentru OT din Cu și 15-30% pentru OT din OL;
- pentru debitarea prin EEC a barelor, caracteristic este faptul că la cele cu secțiune constantă (pătrat, dreptunghi, circular etc.) v_t poate fi menținută cvasiconstantă (pe anumită perioadă), față de barele cu secțiune variabilă la care v_t trebuie reglată funcție de aria secțiunii.

3.2.4. Parametri tehnologici necesari

Alte concluzii trase în urma experimentelor efectuate vizează valorile necesare pentru parametrii de intrare funcție de tipul operației de prelucrare și materialul OP sau OT. Astfel, pentru debitarea prin EEC sunt necesari parametrii tehnologici din tabelele 3.1. la 3.5.

Tabelul 3.1. Regimuri de lucru la debitarea prin EEC ([GM76, IP81, Nag98, N+83])

Diametrul profilului OP [mm]	Intensitatea curentului I [A]	Tensiunea U [V]	Presiunea p [daN/cm ²]
10-20	20-40	20-22	0,5-1,0
20-40	40-80		
40-80	80-125		
80-125	125-200	22-24	1,0-1,5
125-150	200-275	24-26	

Tabelul 3.2. Dimensiunile OT disc la debitarea prin EEC ([GM76, IP81, Nag98, N+83])

Diametrul profilului OP [mm]	Diametrul discului OT [mm]	Grosimea discului OT [mm]
<30	200	0,5
30-100	200-400	0,8-1,0
100-200	400-700	1,0-1,5

Tabelul 3.3. Debitul pompei de alimentare cu LL la debitarea prin EEC ([IP81, N+83])

Diametrul profilului OP [mm]	Debitul pompei [l/min]
<100	20
peste 100	25-30

Tabelul 3.4. Regimuri de lucru utilizate la debitarea pieselor din carburi metalice ([Nag98, N+83])

Materialul OP	Dimensiunea OP [mm]	Diametrul OT [mm]	Tensiunea U [V]	Intensitatea I [A]	Productivitatea Q _{OP} [mm ³ /min]
P01	30 x 20 x 10	160	18-22	20-30	45-50
P10	30 x 20 x 10	160	18-22	20-30	50-55
P40	32 x 18 x 10	160	18-22	20-30	50-60
P15	25 x 15 x 10	160	18-22	20-30	50-57
P30	∅ 60	160	18-22	20-30	62-65

Tabelul 3.5. Parametri ai regimului electric la debitarea barelor din oțel inox ([HV92])

Diametru [mm]	Tensiune de mers în gol [V]	Tensiune pe SL [V]	Rezistență suplimentară Rs [Ω]	Grosime OT disc [mm]
< 100 mm	37	24-25	0,11	1,0-1,5
peste 100 mm	37	24-26	0,1	1,5-2,0

OT de tip disc se confecționează din oțel cu grosimea de 0,5-2 mm și diametre între 200-1000 mm, funcție de diametrul OP ([GM76, IP81, Nag98]).

Electrolizii utilizați sunt silicatul de sodiu sau soluții de acid boric și borax cu caolină, cu densitatea de 1,25-1,30 g/cm³ ([GM76]).

3.3. MODELE MATEMATICE DETERMINATE

Experimentele care au fost efectuate și publicate în lucrări de specialitate, în baza rezultatelor obținute, au permis elaborarea unor forme matematice ale dependenței parametrilor de ieșire de cei de intrare la procesul de prelucrare (în particular, de debitare) prin EEC.

3.3.1. Productivitatea prelucrării

S-au obținut următoarele rezultate:

- pentru profilarea carburilor P10 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86, LHM93b]):

$$-v_r=6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 1.114 \cdot 10^{-2} + 1.0977 \cdot j - 1.7186 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.4)$$

$$-v_r=10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 1.93 \cdot 10^{-2} + 1.202 \cdot j - 1.7109 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.5)$$

$$-v_r=15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -8.3 \cdot 10^{-3} + 1.9783 \cdot j - 2.7785 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.6)$$

$$-v_r=20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -0.1094 \cdot 10^{-3} + 3.7051 \cdot j - 6.3808 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.7)$$

$$-v_r=27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -9.54 \cdot 10^{-2} + 2.736 \cdot j - 4.576 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.8)$$

- pentru profilarea carburilor P10 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86, LHM93b]):

$$-v_r=6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -2.3 \cdot 10^{-3} + 0.2081 \cdot j + 4.1442 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.9)$$

$$-v_r=10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -7.51 \cdot 10^{-2} + 1.0192 \cdot j + 2.6268 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.10)$$

$$-v_r=15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 1.681 \cdot 10^{-1} - 2.302 \cdot j + 12.6364 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.11)$$

$$-v_r=20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 0.1327 - 2.0643 \cdot j + 13.114 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.12)$$

$$-v_r=27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 0.1121 - 2.0031 \cdot j + 13.266 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.13)$$

- pentru profilarea carburilor P10 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86, LHM93b]):

$$-v_r=6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -5.58 \cdot 10^{-2} + 1.3215 \cdot j - 2.2708 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.14)$$

$$-v_r=10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -4.31 \cdot 10^{-2} + 1.2782 \cdot j - 2.913 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.15)$$

$$-v_r=15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -3.71 \cdot 10^{-2} + 1.2997 \cdot j - 2.0434 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.16)$$

$$-v_r=20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -5.17 \cdot 10^{-2} + 1.7886 \cdot j - 3.2297 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.17)$$

$$-v_r=27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 1.96 \cdot 10^{-2} + 0.064 \cdot j - 1.0047 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.18)$$

- pentru profilarea carburilor P20 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$-v_r=6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -7.49 + 2.717 \cdot j - 5.0288 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.19)$$

$$-v_r=10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -9.23 \cdot 10^{-2} + 2.8649 \cdot j - 5.094 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.20)$$

$$-v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -0.1226 + 3.3473 \cdot j - 5.5882 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.21)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -0.1513 + 4.1983 \cdot j - 6.9253 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.22)$$

$$-v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -6.65 \cdot 10^{-2} + 2.7455 \cdot j - 3.2516 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.23)$$

- pentru profilarea carburilor P20 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 2.35 \cdot 10^{-2} + 0.3018 \cdot j + 6.2406 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.24)$$

$$-v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 3.97 \cdot 10^{-2} - 0.4431 \cdot j + 6.6782 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.25)$$

$$-v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 7.41 \cdot 10^{-2} - 0.838 \cdot j + 8.669 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.26)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 2.77 \cdot 10^{-2} + 0.131 \cdot j + 6.7233 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.27)$$

$$-v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 4.46 \cdot 10^{-2} - 0.8125 \cdot j + 9.44 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.28)$$

- pentru profilarea carburilor P20 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -3.18 \cdot 10^{-2} + 1.3522 \cdot j - 2.744 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.29)$$

$$-v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -2.01 \cdot 10^{-2} + 1.2183 \cdot j - 2.2248 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.30)$$

$$-v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -3.88 \cdot 10^{-2} + 1.522 \cdot j - 2.732 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.31)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -5.83 \cdot 10^{-2} + 1.9044 \cdot j - 3.428 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.32)$$

$$-v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -2.99 + 1.3473 \cdot j - 2.115 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.33)$$

- pentru profilarea carburilor P30 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 5.3 \cdot 10^{-3} + 1.6907 \cdot j - 1.7477 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.34)$$

$$-v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 0.3739 + 1.365 \cdot j - 1.0263 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.35)$$

$$-v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 7.4 \cdot 10^{-3} + 1.907 \cdot j - 2.147 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.36)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 1.53 \cdot 10^{-2} + 2.5442 \cdot j - 3.6813 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.37)$$

$$-v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -6.17 \cdot 10^{-2} + 2.6436 \cdot j - 3.5318 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.38)$$

- pentru profilarea carburilor P30 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -6.79 \cdot 10^{-2} + 1.6902 \cdot j + 0.373 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.39)$$

$$-v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -3.33 \cdot 10^{-2} + 1.8745 \cdot j - 0.2173 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.40)$$

$$-v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -0.1422 + 2.897 \cdot j + 0.877 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.41)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -0.1422 + 2.897 \cdot j + 0.877 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.42)$$

$$-v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -0.1799 + 3.533 \cdot j - 1.7641 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.43)$$

- pentru profilarea carburilor P30 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -3.07 \cdot 10^{-2} + 0.787 \cdot j + 0.66 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.44)$$

$$-v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = 3.1 \cdot 10^{-3} + 0.3114 \cdot j + 2.3766 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.45)$$

$$-v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -3.77 \cdot 10^{-3} + 1.358 \cdot j + 4.4263 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.46)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -3.77 \cdot 10^{-3} + 1.358 \cdot j + 4.4263 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.47)$$

$$-v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = -5.363 \cdot 10^{-3} + 1.693 \cdot j + 2.4949 \cdot j^2 \text{ [g/min]} \quad (3.48)$$

- pentru profilarea carburilor P40 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$\begin{aligned}
 -v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 6 \cdot 10^{-3} + 0.9741 \cdot j - 0.838 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.49) \\
 -v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 3.2 \cdot 10^{-3} + 1.1202 \cdot j - 0.9763 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.50) \\
 -v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 2.63 \cdot 10^{-2} + 0.8161 \cdot j + 0.7855 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.51) \\
 -v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 4.58 \cdot 10^{-2} + 2.372 \cdot j - 2.739 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.52) \\
 -v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 2.84 \cdot 10^{-2} + 1.8046 \cdot j - 1.4076 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.53)
 \end{aligned}$$

- pentru profilarea carburilor P40 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$\begin{aligned}
 -v_r = 6 \text{ ms: } Q_{OP}^m &= -2.582 \cdot 10^{-2} + 1.282 \cdot j - 0.5689 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.54) \\
 -v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= -7.2 \cdot 10^{-3} + 0.7846 \cdot j + 3.215 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.55) \\
 -v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= -4.56 \cdot 10^{-2} + 1.769 \cdot j - 1.2454 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.56) \\
 -v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= -8.77 \cdot 10^{-2} + 2.2378 \cdot j + 0.4474 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.57) \\
 -v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 6.8 \cdot 10^{-2} + 1.9699 \cdot j + 0.733 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.58)
 \end{aligned}$$

- pentru profilarea carburilor P40 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite rezistive ([Lan86]):

$$\begin{aligned}
 -v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= -4.39 \cdot 10^{-2} + 0.3757 \cdot j + 0.2219 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.59) \\
 -v_r = 10 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 1.258 \cdot 10^{-1} + 0.6184 \cdot j + 0.3154 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.60) \\
 -v_r = 15 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 2.554 \cdot 10^{-1} + 0.6973 \cdot j + 0.4425 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.61) \\
 -v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= 1.78 \cdot 10^{-2} + 1.0052 \cdot j + 0.4704 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.62) \\
 -v_r = 27 \text{ m/s: } Q_{OP}^m &= -1.65 \cdot 10^{-2} + 1.234 \cdot j - 0.2746 \cdot j^2 \text{ [g/min]} & (3.63)
 \end{aligned}$$

- pentru prelucrarea OP din oțel inoxidabil (10TiCr180) de diverse diametre, pe mașina MEC-100, cu OT disc din OL37 având grosimea $g=1,5$ mm și viteza de 25 m/s, în soluție de silicat solubil de sodiu cu $M=3$ ([HLM99b]):

$$\begin{aligned}
 -d=45 \text{ mm: } Q_{OP} &= -2653.2235 + 3.9 \cdot P - 0.0013 \cdot P^2 + 1.3482 \cdot 10^{-7} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} & (3.64) \\
 -d=50 \text{ mm: } Q_{OP} &= -7431.9063 + 10.4603 \cdot P - 0.0037 \cdot P^2 + 3.9514 \cdot 10^{-7} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} & (3.65) \\
 -d=65 \text{ mm: } Q_{OP} &= -413.5757 + 0.6806 \cdot P + 0.00002 \cdot P^2 - 2.0237 \cdot 10^{-8} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} & (3.66) \\
 -d=90 \text{ mm: } Q_{OP} &= -810.838 + 0.5817 \cdot P + 3.6942 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 2.9295 \cdot 10^{-9} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} & (3.67) \\
 -d=100 \text{ mm: } Q_{OP} &= -632.2649 - 0.6689 \cdot P + 0.000065 \cdot P^2 + 2.721 \cdot 10^{-9} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} & (3.68)
 \end{aligned}$$

- pentru profilarea carburilor P10 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86, LHM93a]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.01 + 0.1549 \cdot L + 0.1312 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.057 + 0.6736 \cdot L - 0.1475 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 1.35 \cdot e^{(-0.14 \cdot L - 0.019 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.69)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.0154 + 0.6424 \cdot L - 0.153 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.2149 + 0.4513 \cdot L - 0.1106 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 4.14 \cdot e^{(-0.81 \cdot L + 0.044 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.70)$$

- pentru profilarea carburilor P10 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86, LHM93a]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.1931 + 0.0056 \cdot L + 0.2526 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ -0.9836 + 1.7778 \cdot L - 0.3996 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 3.5586 \cdot e^{(-0.599 \cdot L + 0.269 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.71)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.3786 + 0.1856 \cdot L + 0.0401 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.0888 + 0.7398 \cdot L - 0.2057 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 4.6044 \cdot e^{(-0.877 \cdot L + 0.05 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.72)$$

- pentru profilarea carburilor P10 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.1927 + 0.2753 \cdot L + 0.7502 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.4587 + 1.3143 \cdot L - 0.3283 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 3.1992 \cdot e^{(-0.6217 \cdot L + 0.2659 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.73)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.2325 + 0.2974 \cdot L - 0.7517 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.0294 + 0.4732 \cdot L - 0.1188 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 4.25 \cdot e^{(-0.951 \cdot L + 0.053 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.74)$$

- pentru profilarea carburilor P20 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.011 + 0.3422 \cdot L - 0.0405 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.1947 + 0.6807 \cdot L - 0.1621 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 2.24 \cdot e^{(-0.716 \cdot L + 0.041 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.75)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.018 + 0.7617 \cdot L - 0.344 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.2129 + 0.4605 \cdot L - 0.2302 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 0.3 \cdot e^{(-0.20 \cdot L + 0.012 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.76)$$

- pentru profilarea carburilor P30 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.0139 + 0.6338 \cdot L - 0.2821 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.1027 + 0.4842 \cdot L - 0.2441 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 0.4288 \cdot e^{(-0.3164 \cdot L + 0.0184 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.77)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.0252 + 1.6502 \cdot L - 0.9648 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.2940 + 0.8322 \cdot L - 0.3961 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 0.915 \cdot e^{(-0.3272 \cdot L + 0.02 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.78)$$

- pentru profilarea carburilor P40 cu OT din OL37 la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.0121 + 0.6181 \cdot L - 0.0355 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.0118 + 0.5351 \cdot L - 0.2656 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 0.3424 \cdot e^{(-0.3638 \cdot L + 0.021 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.79)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.0228 + 1.983 \cdot L - 1.1667 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.3664 + 0.9929 \cdot L - 0.5124 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 1.7652 \cdot e^{(-0.631 \cdot L + 0.035 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.80)$$

- pentru profilarea carburilor P20 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.2573 + 0.6273 \cdot L - 0.1772 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.3545 + 0.519 \cdot L - 0.1502 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 5.2426 \cdot e^{(-0.9448 \cdot L + 0.057 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.81)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.4087 + 0.2655 \cdot L - 0.0681 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.3628 + 0.3694 \cdot L - 0.1173 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 3.9137 \cdot e^{(-0.9113 \cdot L + 0.0536 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.82)$$

- pentru profilarea carburilor P20 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.2167 + 0.2287 \cdot L - 0.0203 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.0501 + 0.4873 \cdot L - 0.1177 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 1.5758 \cdot e^{(-0.4817 \cdot L + 0.014 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.83)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.3135 + 0.2963 \cdot L - 0.1422 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.5599 - 0.0606 \cdot L - 0.0166 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 0.5817 \cdot e^{(-0.248 \cdot L - 0.035 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.84)$$

- pentru profilarea carburilor P30 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.2618 - 0.0134 \cdot L + 0.1056 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.2267 + 0.7149 \cdot L - 0.1496 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 2.4645 \cdot e^{(-0.6254 \cdot L + 0.0283 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.85)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.3162 + 0.7803 \cdot L - 0.3046 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.7823 + 0.1789 \cdot L - 0.1264 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH [g/min]} \\ 1.187 \cdot e^{(-0.417 \cdot L + 0.0186 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.86)$$

- pentru profilarea carburilor P30 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.3053 + 0.4312 \cdot L - 0.2169 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.5447 - 0.0039 \cdot L - 0.023 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH} \text{ [g/min]} \\ 1.2767 \cdot e^{(-0.578 \cdot L + 0.0309 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.87)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.5657 + 0.3164 \cdot L - 0.155 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.8962 - 0.1056 \cdot L - 0.0379 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH} \text{ [g/min]} \\ 0.8483 \cdot e^{(-0.339 \cdot L - 0.0173 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.88)$$

- pentru profilarea carburilor P40 cu OT din cupru la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.1664 - 0.0131 \cdot L + 0.0523 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ -0.0917 + 0.4145 \cdot L - 0.1015 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH} \text{ [g/min]} \\ 0.7238 \cdot e^{(-0.3609 \cdot L + 0.014 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.89)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.3184 + 0.3075 \cdot L - 0.0083 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.0694 + 0.74 \cdot L - 0.1858 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH} \text{ [g/min]} \\ 2.7179 \cdot e^{(-0.5693 \cdot L + 0.0247 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.90)$$

- pentru profilarea carburilor P40 cu OT din fontă la diferite viteze folosind circuite inductive ([Lan86]):

$$-v_r = 6 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.1957 + 0.3534 \cdot L - 0.1729 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.5406 - 0.1358 \cdot L + 0.0139 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH} \text{ [g/min]} \\ 0.4919 \cdot e^{(-0.375 \cdot L + 0.02 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.91)$$

$$-v_r = 20 \text{ m/s: } Q_{OP}^m = \begin{cases} 0.3812 + 0.5456 \cdot L - 0.2164 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 0 - 2 \text{ mH} \\ 0.5114 + 0.3137 \cdot L - 0.1156 \cdot L^2, & \text{pentru } L = 2 - 3 \text{ mH} \text{ [g/min]} \\ 1.1813 \cdot e^{(-0.317 \cdot L + 0.0094 \cdot L^2)}, & \text{pentru } L = 3 - 10 \text{ mH} \end{cases} \quad (3.92)$$

- pentru debitarea oțelului Rp4 folosind diferite ML ([BC98a]):

$$\text{-în soluție de KNO}_3: \quad Q_{OP} = -190.97 + 5.39 \cdot I - 0.0137 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (3.93)$$

$$\text{-în soluție de KNO}_3\text{+Na}_2\text{CO}_3: \quad Q_{OP} = 55.4354 + 1.703 \cdot I \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (3.94)$$

$$\text{-în soluție de NaClO}_3: \quad Q_{OP} = 45.1696 + 1.7238 \cdot I - 0.005175 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (3.95)$$

$$\text{-în soluție de NaClO}_3\text{+KNO}_3: \quad Q_{OP} = -20.6556 + 1.8073 \cdot I - 0.004116 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (3.96)$$

$$\text{-în soluție de NaNO}_3: \quad Q_{OP} = -23.2622 + 1.8607 \cdot I \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (3.97)$$

$$\text{-în soluție de NaNO}_3\text{+NaClO}_3: \quad Q_{OP} = 255.3968 + 0.5392 \cdot I \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (3.98)$$

3.3.2. Durata prelucrării

S-au obținut următoarele rezultate:

- pentru prelucrarea fantelor deschise în bare din oțel inoxidabil (10TiNiCr180) de diferite diametre ([Her95]):

$$-d=45 \text{ mm: } t_p = 3.18 - 1.20 \cdot U_g - 0.85 \cdot R_s + 0.05 \cdot g + 0.65 \cdot U_s \text{ [min]} \quad (3.99)$$

$$-d=50 \text{ mm: } t_p = 3.29 - 0.99 \cdot U_g - 0.90 \cdot R_s + 0.70 \cdot g + 0.61 \cdot U_s \text{ [min]} \quad (3.100)$$

$$-d=65 \text{ mm: } t_p = 6.53 - 2.97 \cdot U_g - 1.93 \cdot R_s + 1.41 \cdot g + 1.87 \cdot U_s \text{ [min]} \quad (3.101)$$

$$-d=90 \text{ mm: } t_p = 7.55 - 1.74 \cdot U_g + 1.97 \cdot R_s - 0.20 \cdot g + 0.42 \cdot U_s \text{ [min]} \quad (3.102)$$

$$-d=100 \text{ mm: } t_p = 13.60 - 4.24 \cdot U_g + 5.37 \cdot R_s - 1.07 \cdot g + 3.32 \cdot U_s \text{ [min]} \quad (3.103)$$

- pentru prelucrarea fantelor deschise în bare din oțel inoxidabil (10TiNiCr180) cu diametre diferite, folosind OT cu grosimea $g=1$ mm și viteza periferică de 25 m/s, pe mașina MEC-100, cu LL soluție de silicat solubil de sodiu cu $M=3$ ([Her95, HO95]):

$$-d=45 \text{ mm: } t_p = 8.37 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot P + 7.221 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 - 5.276 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.104)$$

$$-d=50 \text{ mm: } t_p = 8.34 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot P + 7.894 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 - 6.427 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.105)$$

$$-d=65 \text{ mm: } t_p = 9.444 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot P - 5.017 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 + 2.299 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.106)$$

- pentru prelucrarea fantelor deschise în bare din oțel inoxidabil (10TiNiCr180) cu diametre diferite, folosind un OT cu grosimea $g=1,5$ mm și viteza periferică de 25 m/s, pe mașina MEC-100, cu LL soluție de silicat solubil de sodiu cu $M=3$ ([Her95]):

$$-d=45 \text{ mm: } t_p = 18.997 - 12 \cdot 10^{-3} \cdot P + 2.784 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 2.066 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.107)$$

$$-d=50 \text{ mm: } t_p = 21.503 - 12 \cdot 10^{-3} \cdot P + 2.611 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 1.767 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.108)$$

$$-d=65 \text{ mm: } t_p = 52.654 - 32 \cdot 10^{-3} \cdot P + 6.586 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 4.331 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.109)$$

$$-d=90 \text{ mm: } t_p = 29.806 - 10^{-2} \cdot P + 1.389 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 6.181 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.110)$$

$$-d=100 \text{ mm: } t_p = 123.334 - 63 \cdot 10^{-3} \cdot P + 1.135 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 6.688 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [min]} \quad (3.111)$$

3.3.3. Uzura radială a obiectului de transfer

S-au obținut următoarele rezultate:

- pentru prelucrarea fantelor deschise în bare din oțel inoxidabil (10TiNiCr180) cu diametre diferite ([Her95]):

$$-d=45 \text{ mm: } U_r = 0.65 - 0.08 \cdot U_g - 0.03 \cdot R_s - 0.18 \cdot g - 0.02 \cdot U_s \text{ [mm]} \quad (3.112)$$

$$-d=50 \text{ mm: } U_r = 0.80 + 0.03 \cdot U_g + 0.00 \cdot R_s - 0.08 \cdot g + 0.05 \cdot U_s \text{ [mm]} \quad (3.113)$$

$$-d=65 \text{ mm: } U_r = 1.23 - 0.10 \cdot U_g + 0.00 \cdot R_s - 0.13 \cdot g + 0.03 \cdot U_s \text{ [mm]} \quad (3.114)$$

$$-d=90 \text{ mm: } U_r = 1.36 - 0.01 \cdot U_g + 0.01 \cdot R_s - 0.03 \cdot g + 0.10 \cdot U_s \text{ [mm]} \quad (3.115)$$

$$-d=100 \text{ mm: } U_r = 2.06 - 0.05 \cdot U_g + 0.01 \cdot R_s - 0.11 \cdot g + 0.03 \cdot U_s \text{ [mm]} \quad (3.116)$$

- pentru prelucrarea fantelor deschise în bare din oțel inoxidabil (10TiNiCr180) cu diametre diferite, folosind un OT cu grosimea $g=1$ mm și viteza periferică de 25 m/s, pe mașina MEC-100, cu LL soluție de silicat solubil de sodiu cu $M=3$ ([Her95, H+95]):

$$-d=45 \text{ mm: } U_r = 1.056 - 1.094 \cdot 10^{-4} \cdot P - 1.573 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 + 5.826 \cdot 10^{-12} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.117)$$

$$-d=50 \text{ mm: } U_r = 0.99 + 6.636 \cdot 10^{-5} \cdot P - 7.138 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 + 1.138 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.118)$$

$$-d=65 \text{ mm: } U_r = 1.429 + 1.278 \cdot 10^{-6} \cdot P - 3.795 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 + 6.197 \cdot 10^{-12} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.119)$$

- pentru prelucrarea fantelor deschise în bare din oțel inoxidabil (10TiNiCr180) cu diametre diferite, folosind un OT cu grosimea $g=1,5$ mm și viteza periferică de 25 m/s, pe mașina MEC-100, cu LL soluție de silicat solubil de sodiu cu $M=3$ ([Her95, H+95]):

$$-d=45 \text{ mm: } U_r = 1.285 - 7.578 \cdot 10^{-5} \cdot P - 1.218 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 + 2.058 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.120)$$

$$-d=50 \text{ mm: } U_r = 1.872 - 6.277 \cdot 10^{-4} \cdot P + 9.268 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 - 2.752 \cdot 10^{-12} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.121)$$

$$-d=65 \text{ mm: } U_r = 0.871 + 7.756 \cdot 10^{-4} \cdot P - 3.924 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 + 4.947 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.122)$$

$$-d=90 \text{ mm: } U_r = 3.427 + 10^{-3} \cdot P + 2.351 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 - 1.354 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.123)$$

$$-d=100 \text{ mm: } U_r = 3.981 - 10^{-3} \cdot P + 2.272 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 - 1.171 \cdot 10^{-11} \cdot P^3 \text{ [mm]} \quad (3.124)$$

3.3.4. Uzura relativă

S-au obținut următoarele rezultate:

- pentru prelucrarea OP din oțel inoxidabil (10TiCr180) de diverse diametre, pe mașina MEC-100, cu OT disc din OL37 având grosimea $g=1,5$ mm și viteza de 25 m/s, în soluție de silicat solubil de sodiu cu $M=3$ ([HLM99b]):

$$-d=45 \text{ mm: } U_z = 44.7154 - 0.0284 \cdot P + 8.8134 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 8.604 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [%]} \quad (3.125)$$

$$-d=50 \text{ mm: } U_z = 125.3723 - 0.1329 \cdot P - 0.000046 \cdot P^2 - 4.8437 \cdot 10^{-9} \cdot P^3 \text{ [%]} \quad (3.126)$$

$$-d=65 \text{ mm: } U_z = 248.6988 + 0.4222 \cdot P + 0.000257 \cdot P^2 - 6.1886 \cdot 10^{-8} \cdot P^3 + 5.2748 \cdot 10^{-12} \cdot P^4 \text{ [%]} \quad (3.127)$$

$$-d=90 \text{ mm: } U_z = 1.7427 \cdot 10^9 - 2.4544 \cdot 10^6 \cdot P + 1459.7551 \cdot P^2 - 0.4748 \cdot P^3 + 0.000091 \cdot P^4 - 1.0314 \cdot 10^{-8} \cdot P^5 + 6.372 \cdot 10^{-13} \cdot P^6 - 1.6577 \cdot 10^{-17} \cdot P^7 \text{ [%]} \quad (3.128)$$

$$-d=100 \text{ mm: } U_z = -632.2649 - 0.6689 \cdot P + 0.000065 \cdot P^2 + 2.721 \cdot 10^{-9} \cdot P^3 \text{ [%]} \quad (3.129)$$

3.4. STADIUL ACTUAL AL SOLUȚIILOR CONSTRUCTIVE

Schema generală a unei mașini de prelucrare prin EEC este prezentată în figura 3.10. O astfel de mașină poate utiliza una din următoarele variante de OT ([IP81]):

- **cu OT rotativ.** Permite tăierea materialelor cu diametre de 300-400 mm folosind un disc (este situația prezentată în figură);
- **cu OT care avansează.** La acestea, OT este o bandă și permite tăierea materialelor cu diametre mai mari de 400 mm și de lungime mică.

Pe lângă criteriile de mai sus, în alegerea construcției mașinii de prelucrare prin EEC trebuie ținut cont și de următoarele considerații ([IP81]):

- gradul de automatizare (care, la rândul său, influențează complexitatea construcției) depinde de destinația mașinii: pentru producție de serie și secțiuni mari se recomandă automatizarea avansului de lucru, a fixării pieselor și oprirea automată a mașinii la terminarea tăierii;
- la mașinile de debitat table de grosime sub 100 mm sau materiale cu diametre sub 300 mm se recomandă utilizarea OT disc;
- la mașinile de debitat conducte se recomandă un dispozitiv automat care rotește conducta.

Mașinile de prelucrare prin EEC pot fi ([RL96]):

- **mașini universale**, care sunt utilizate pentru o gamă largă de operații;
- **mașini specializate**, destinate numai unei (sau unui număr foarte redus) de operații de prelucrare.

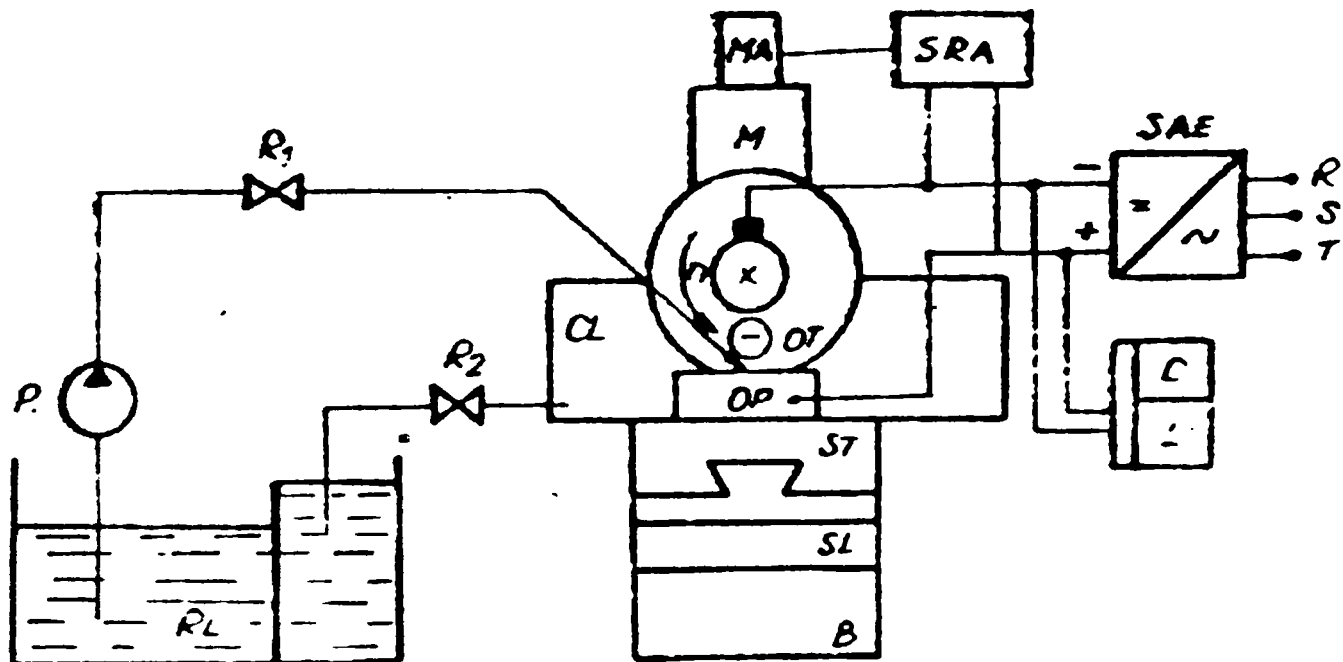


Figura 3.10. Structura unei mașini de prelucrare prin EEC ([Kar00a, Lan86, N+83, RL96])

Pe lângă componenta de prelucrare propriu-zisă, o astfel de mașină poate avea o parte de comandă automată care să ajute operatorul uman în vederea desfășurării prelucrării într-un timp mai scurt și de o calitate mai bună.

Apariția acestei componente este motivată prin aceea că, în activitatea sa de-a lungul secolelor, omul nu s-a rezumat doar la cunoașterea naturii înconjurătoare fără a o influența, o cunoaștere sterilă, făcută numai din curiozitate; el s-a preocupat permanent de existența sa, a căutat să modifice natura, să o perfecționeze în sensul ameliorării continue a condițiilor de viață.

Preocuparea sa continuă pentru obținerea de bunuri materiale pe care natura nu le pune direct la dispoziție a cunoscut următoarele etape ([Kar01, Kar02]):

- **etapa mecanizării:** obiectele materiale noi, necesare vieții, se obțin prin adaptarea eforturilor necesare pe măsura posibilităților la dispoziție sau prin reducerea la minim a acestora sau prin apelarea la resursele naturale considerate inepuizabile. În această etapă, utilizând unelte primitive (pârghia, roata, cuțitul), mai evolute (mașinile cu apă, cu aburi) sau chiar foarte evolute (mașini mecanice de calcul), omul intervine direct și nemijlocit în producția bunurilor materiale. Astfel, mecanizarea permite ușurarea efortului fizic al omului dar nu îl eliberează pe acesta de intervenția directă asupra producției;
- **etapa automatizării:** intervenția omului se reduce considerabil prin utilizarea de ansamble de obiecte materiale care înlocuiesc omul în procesele de producție, acestuia rămânându-i doar rolul conducător al procesului, prin determinarea condițiilor de desfășurare și controlul desfășurării. În această etapă, omul desfășoară o activitate de ordin intelectual, prin care se implică în desfășurarea actului de producție;
- **etapa cibernetizării:** intervenția omului dispare cu desăvârșire și este înlocuită cu obiecte materiale capabile să realizeze operații de gândire logică. Omul nu mai desfășoară nici măcar o acțiune de intervenție în actul de conducere, în schimb activitatea sa se comută pe planul creării de dispozitive apte de a realiza această funcție în locul său.

Evident, aceste etape se suprapun parțial, ele apărând succesiv pe măsură ce omul a devenit un mai bun cunoscător al realității obiective; în același timp, în domenii diverse de activitate se pot întâlni în același timp oricare din aceste etape.

Mai mult, deși inițial obiectele utilizate pentru a promova de la o etapă la alta s-au folosit cu precădere în sfera producției de bunuri, mecanizarea, automatizarea și cibernetizarea s-au introdus și în viața socială, în sfera serviciilor, în viața de zi cu zi.

Toată această activitate umană, prin care au fost (și mai sunt) imaginate, proiectate, create, construite, ansamble de obiecte materiale care singure sau împreună cu ansamble existente deja în natură, sunt în stare să satisfacă un anumit scop, indiferent dacă în obținerea lor s-au cunoscut sau nu aprioric legile care caracterizează funcționarea acestor ansamble, poate fi numită activitate de invenție. Ea face apel la întreaga capacitate de imaginație, de abilitate și invenție pe care un om sau colective întregi le au la dispoziție.

Nici domeniul tehnologic în general, cel al prelucrării neconvenționale în particular nu au putut fi ocolite de avântul creator al științei și ingeniozității umane. Astfel, dispozitive de conducere automată au fost deja imaginate, construite, experimentate și utilizate pe scară largă pentru a crește eficiența muncii în domeniu. Cu toate acestea, nu s-a ajuns încă la tot ce mintea umană poate oferi acestui domeniu, și probabil că viitorul va oferi surprize de neimaginat în ceea ce privește utilizarea de dispozitive menită să automatizeze și cibernetizeze acest domeniu de mari perspective al tehnologiei.

Indiferent de domeniul de activitate (din procesele tehnologice de prelucrare) în care funcționează un dispozitiv dotat cu componentă de conducere automată, acesta trebuie să conțină următoarele sisteme funcționale ([Kar01, Kar02, KN03b], vezi figura 2.24) cu funcțiunile asociate:

a. Sistemul de comandă și reglare:

- asigurarea deplasării relative între OP și OT;
- asigurarea presiunii de lucru p .

b. Sistemul pentru electrolit:

- asigurarea stocării, refacerii și recirculării LL.

c. Sistemul mecanic:

- asigurarea prinderii și fixării OP și OT;
- asigurarea cinematicii necesare obținerii suprafețelor dorite;
- asigurarea vitezei relative de avans între OP și OT;
- asigurarea dirijării optime a LL și evacuarea sa;
- asigurarea evacuării din SL a produselor eroziunii și aerosolilor formați.

d. Sistemul de alimentare cu energie electrică:

- asigurarea alimentării ansamblului cu energie electrică.

Dacă suprafața care se prelucrează este cvasiconstantă, atunci avansul poate fi comandat prin urmărirea menținerii constante a tensiunii pe interstițiu. Totuși, din considerente constructive care țin de stabilitatea procesului de prelucrare se mai execută o reglare la nivelul caracteristicii externe a sursei de alimentare ([RL96]). În acest caz, sistemul de reglare a avansului poate avea schema bloc ca în figura 3.11.

Se remarcă în această schemă existența a două bucle majore de reglare, una pentru tensiunea pe interstițiu (prin intermediul avansului v) și una pentru caracteristica externă a sursei de alimentare, reglabilă continuu sau în trepte. Pe lângă acestea mai există buclele minore din interiorul regulatorului de tensiune, una pentru controlul vitezei (turației) OT iar cealaltă pentru curentul rotorului al motorului de avans.

O altă schemă ce permite reglarea automată a avansului folosind un sistem electromecanic este prezentată în figura 3.12; schema permite menținerea sistemului OP+OT+LL într-o stare energetică constantă cu ajutorul unei bucle de reglare care funcționează în circuit închis ([HMM93b, LMG91]).

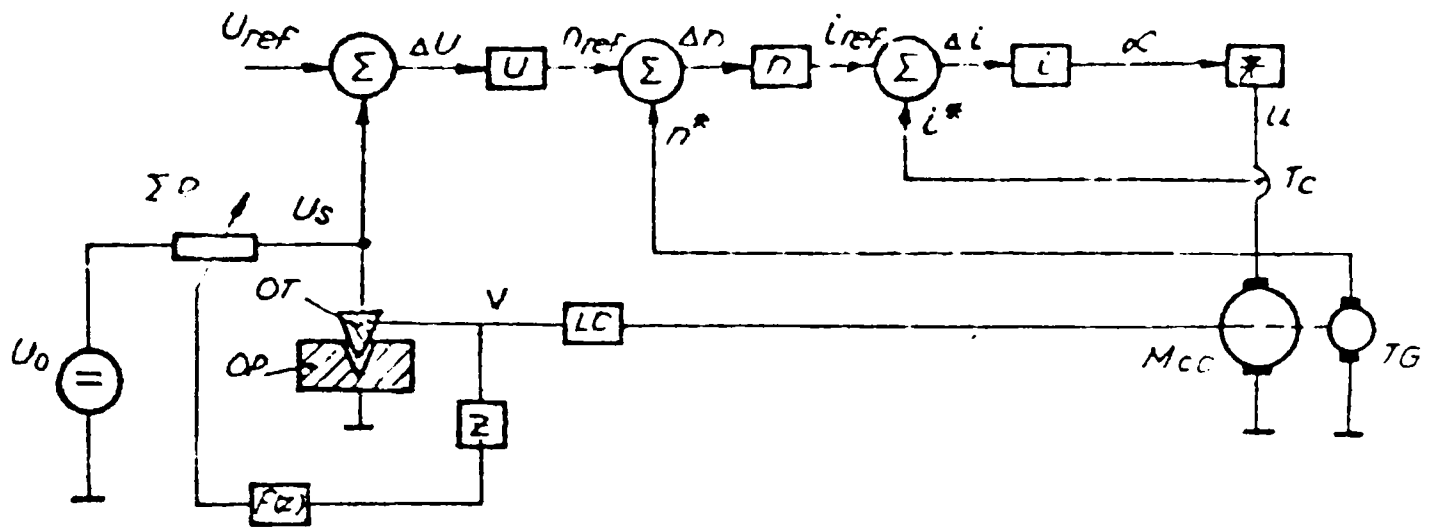


Figura 3.11. Schemă bloc pentru un SRA ([RL96])

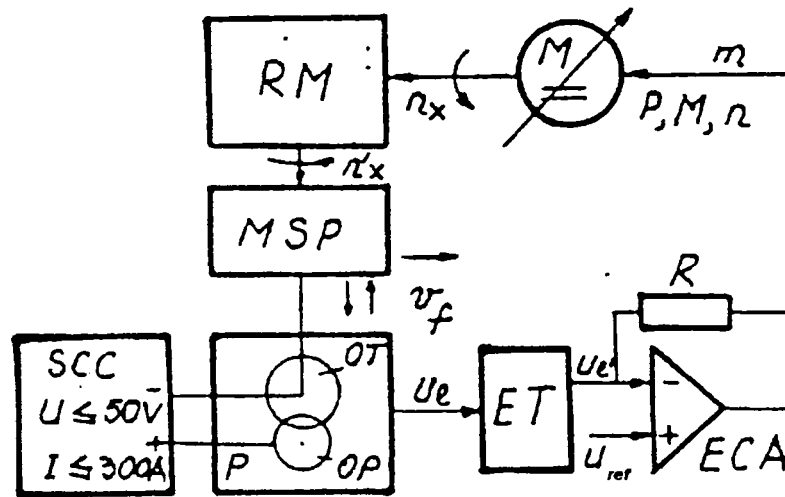


Figura 3.12. Schemă bloc pentru un SRA electromecanic ([HMM93b])

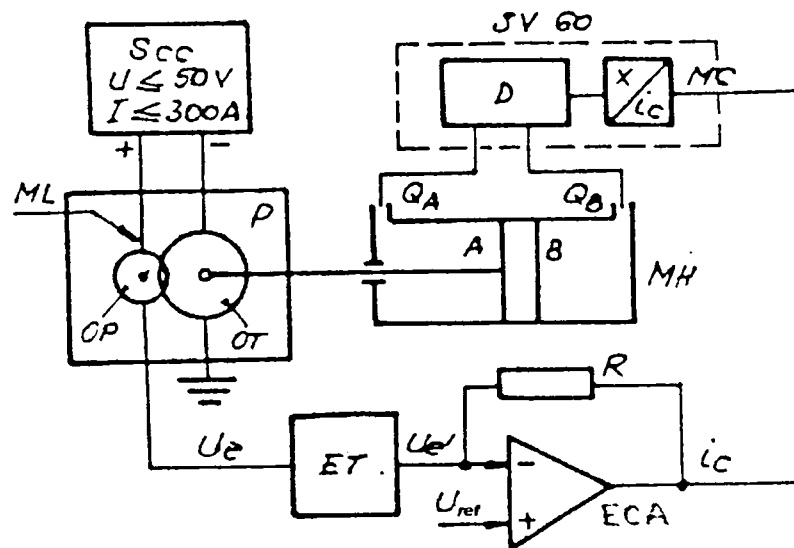


Figura 3.13. Schemă bloc pentru un SRA electrohidraulic ([MHM93])

Parametrii electrici U și I , asigurați de sursa de curent continuu SCC, sunt menținuți în starea dorită cu ajutorul elementului de execuție M , a cărui funcționare în timp este modelată de nivelul de tensiune electrică pe spațiul de lucru. Comanda automată acționează asupra tensiunii de lucru U_l care prin elementul traducător ET este introdusă în elementul comparator-amplificator ECA de unde se aplică servomotorului M care transformă semnalul electric m într-o deplasare corespunzătoare a OT.

O variantă electrohidraulică a sistemului anterior ([MHL99a, MHL99b, MHM93]) este prezentată în figura 3.13, în care parametrii electrici U și I , asigurați de sursa de curent continuu SCC, sunt menținuți în starea dorită cu ajutorul elementului de execuție MH, a cărui funcționare în timp este modelată de nivelul de tensiune electrică pe spațiul de lucru. Comanda acționează asupra tensiunii de lucru U_l care prin elementul traducător ET este introdusă în elementul comparator-amplificator ECA de unde se aplică servovalvei SV60 care transformă semnalul electric i_c într-un debit proporțional care alimentează camerele A și B ale hidromotorului MH care asigură la rândul său deplasarea corespunzătoare a OT.

Dezvoltarea echipamentelor numerice de conducere, standardizarea sistemelor de cuplare și interconectare sa echipamentelor, a făcut posibilă realizarea unor structuri de conducere automată în care se utilizează sisteme de conducere cu dispozitive numerice (discrete).

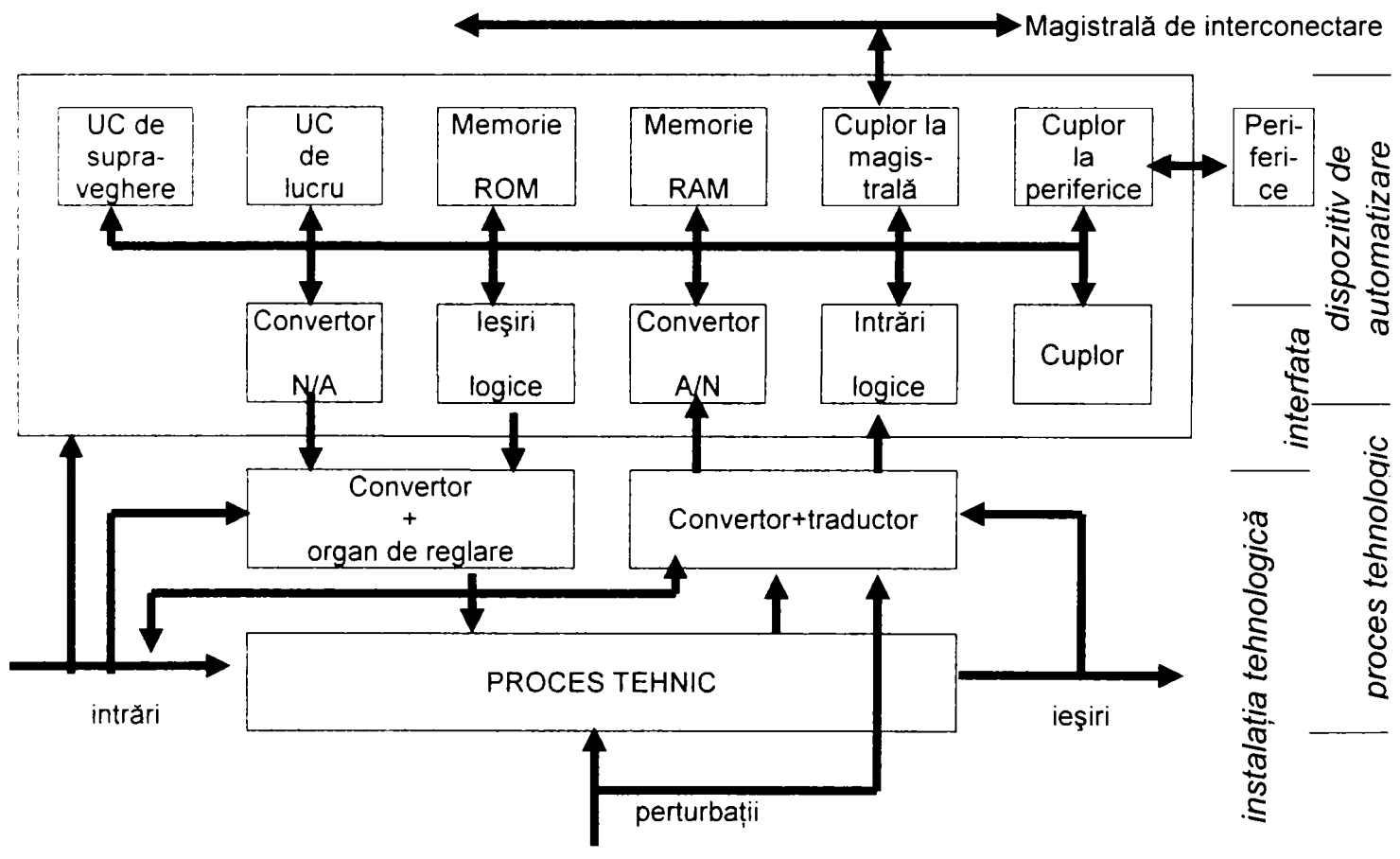


Figura 3.14. Schema bloc a unui sistem de conducere automată cu dispozitiv de automatizare cu echipament numeric ([Kar01, Kar02])

Un astfel de sistem de conducere are structura generală ca în figura 3.14, în care dispozitivul de automatizare este bazat pe o structură cu microprocesor legat prin diferite facilități de cuplare cu procesul condus și cu alte sisteme de conducere automată. Schema de mai sus se regăsește în literatura de specialitate ca fiind un SRA posibil de aplicat la conducerea proceselor neconvenționale.

3.4.1. Mașina de debitat MEC-75

Mașina de debitare prin EEC MEC-75 realizată pentru Întreprinderea Ambalajul Metalic Timișoara, în colaborare cu Catedra de Tehnologie Mecanică din Universitatea „Politehnica” Timișoara, prezentată în figura 3.15, are următoarele caracteristici ([Her92, IP81]):

- permite efectuarea următoarelor operații: profilare, debitare, rectificare;
- diametrul maxim al OP 60 mm;
- alimentare cu redresor de 4 kW cu 4 trepte de tensiune: 5, 25, 30, 35 V, curent maxim 100 A;
- lichid de lucru silicat de sodiu solubil, densitate 1,2 kg/dm³, debit de alimentare 1 m³/h;
- cursa mesei principale 150 mm, cursa mesei transversale 80 mm;
- avansul mesei principale automatizat;
- OT disc profilat, disc subțire, diametru 200-250 mm, viteză periferică 20-25 m/s.

Acest utilaj se compune în principal din mașina propriu-zisă, pupitrul de comandă (include sursa de alimentare electrică) și instalația de alimentare cu LL ([IP81]).

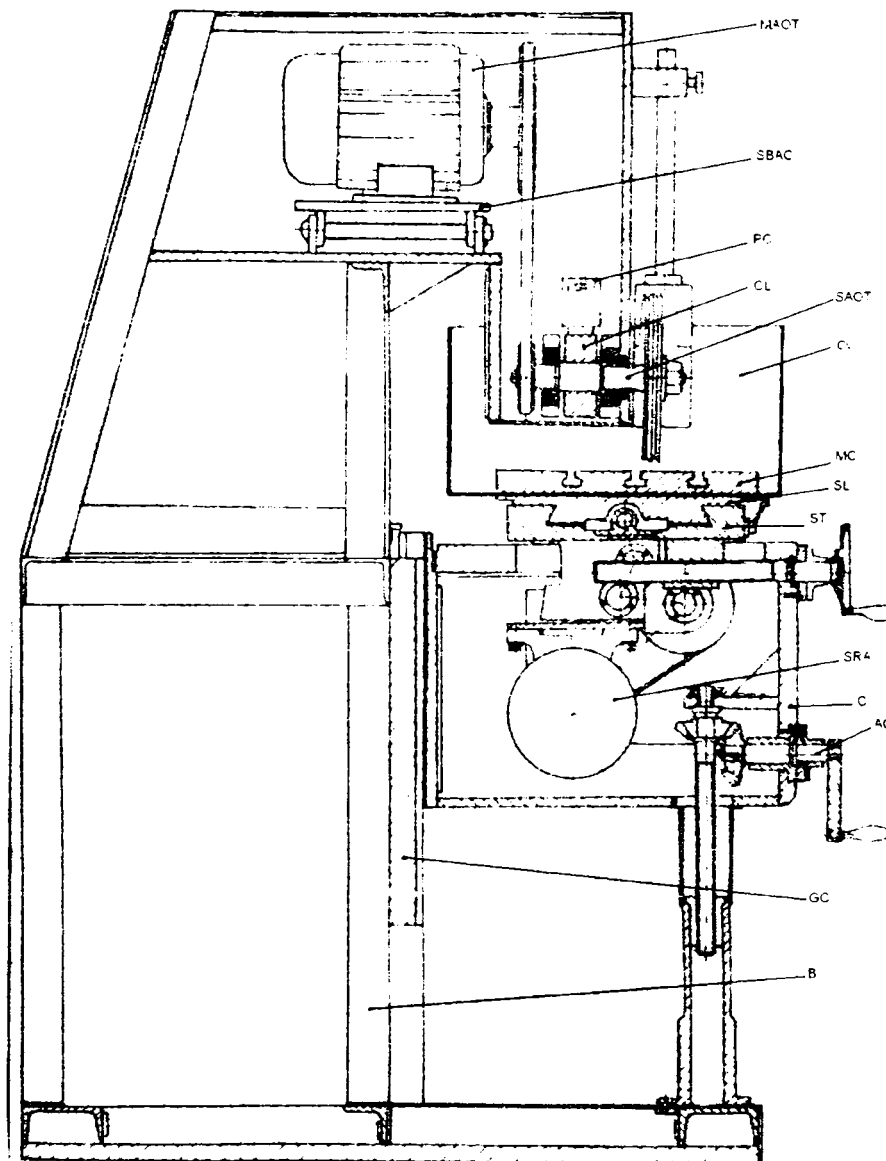


Figura 3.15. Mașină de prelucrare prin EEC la Ambalajul Metalic ([Her92, IP81])

3.4.2. Mașina de prelucrat fante longitudinale

Mașina de prelucrare a fantelor longitudinale prin EEC realizată pentru S.C. Safar București, Baza Complexă Caracal ([Her92, Her95, Her98, Kar00a]), are schema din figura 3.16 și funcționează prin imersarea completă a OP în cuva de lucru Cv. CL se deplasează de-a lungul cuvei, permițând efectuarea de fante succesive (mișcarea de poziționare ML) sau fante cu lungime mare (mișcarea de lucru cu avans longitudinal cu viteza v_l).

OP se sprijină pe rolele RS, care permit efectuarea mișcării de rotație de poziționare MPP de către dispozitivul de rotire și divizare DR.

Instalația mai cuprinde sistemul de recirculare a LL format din Rz, sorbul S, robinetele de reglare a debitului R_1 și R_2 , pompa P și conductele de legătură CLeg.

Un pas înainte de trecere de la prelucrarea manuală la cea automată, folosind un anumit procedeu tehnologic de prelucrare, este automatizarea unei părți din ciclul de lucru, ceea ce permite creșterea productivității și a preciziei de prelucrare.

[Her95, Her98] prezintă un SRA pentru mașina de prelucrare a fantelor în țevi de lungime mare, care comandă deplasarea relativă între OP și OT (figura 3.17). Parametrii electrici urmăriți sunt căderea de tensiune de interstițiu U_s [V], curentul I [A] și densitatea de curent din interstițiu j [A/mm²].

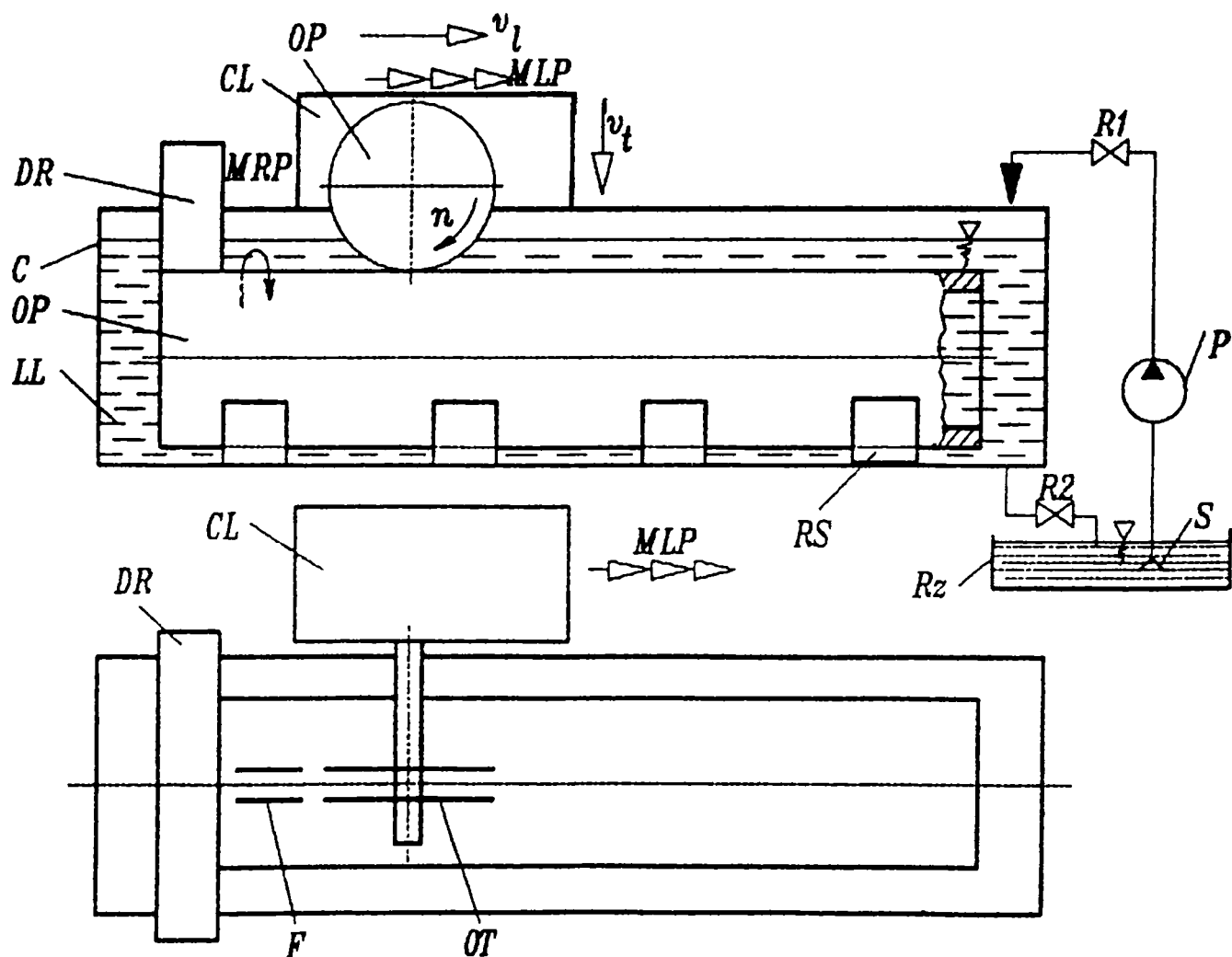


Figura 3.16. Mașina de prelucrare a fantelor prin EEC ([Her92, Her95, Her98, Kar00a])

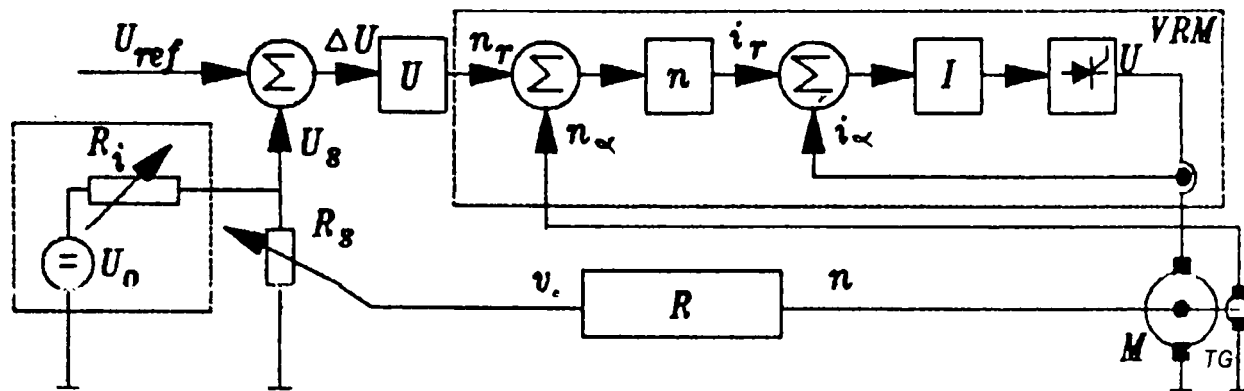


Figura 3.17. Schema bloc a SRA la mașina de prelucrare a fantelor ([Her95, Her98])

Menținerea constantă a valorii U_s se face prin compararea cu o tensiune de referință U_{ref} de către elementul sumator Σ . Un motor de curent continuu M alimentat printr-un variator de tip VRM (pentru reducerea turației de 1:1000) antrenează OT, printr-un reductor melcat și un mecanism șurub-piuliță R , în mișcarea de avans cu viteza v_e . Referința de tensiune se obține de la regulatorul de tensiune U în care se prelucrează semnalul diferență între U_s și U_{ref} .

3.4.3. Mașina de debitat țevi

În [Her95, M+91] este prezentată schema (figura 3.18) unei instalații complexe de debitat care lucrează succesiv cu avans automat transversal și circular, schimbarea mișcării făcându-se automat, pe cale electrică. Mașina permite debitarea de semifabricate pline sau tubulare cu diametrul maxim de 300 mm.

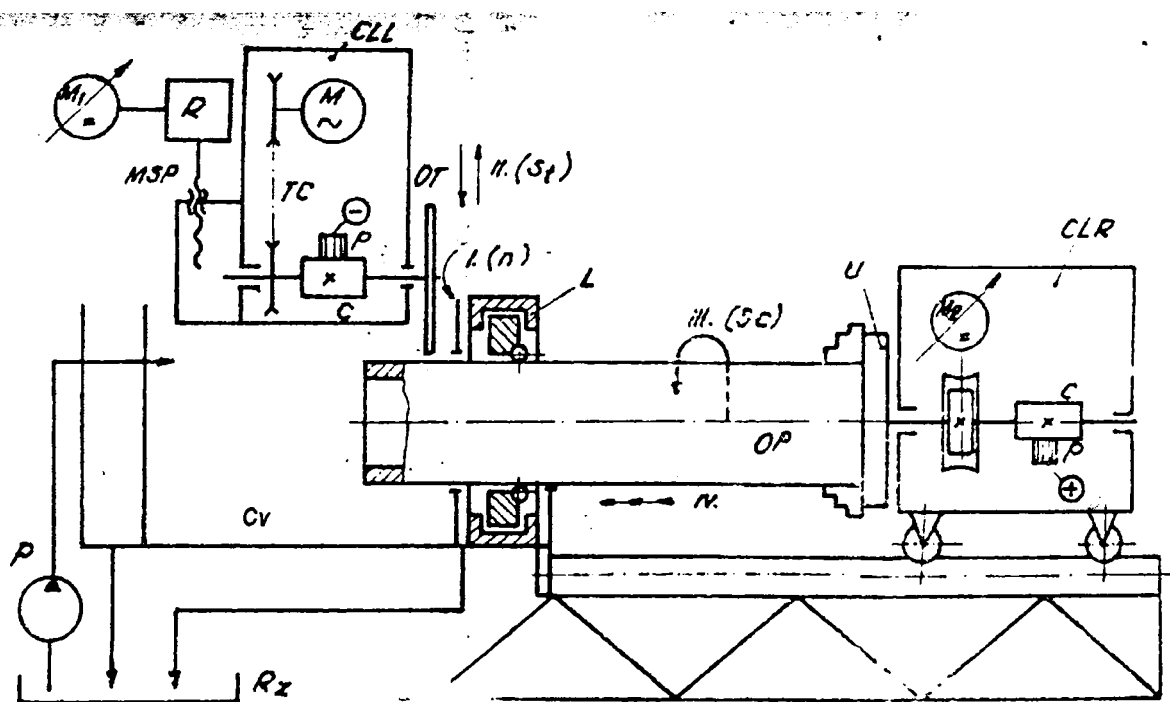


Figura 3.18. Utilajul de debitat țevi prin EEC ([M+91])

Procesul de debitare prin EEC are loc într-o cuvă de lucru Cv prin interacțiunea între OP legat la polul pozitiv al sursei de alimentare și OT legat la polul negativ, în prezența ML care poate acoperi SL (prelucrare în imersie) sau poate fi dirijat în SL (prelucrare cu jet).

Sursa de energie este un redresor de sudură tip RSC 400 care poate asigura un curent de max 400 A și o tensiune de max 50 V.

Sistemul pentru LL se compune din rezervorul Rz, cuva de lucru Cv, pompa centrifugă P și tuburile de legătură. Cuvă Cv este prevăzută cu elemente de reglare a nivelului LL astfel încât să acopere SL și de asemenea să permită golirea LL.

OT este din oțel având diametrul $d=400$ mm și grosimea $g=1,5$ mm, mișcarea sa fiind asigurată:

- de motorul de curent alternativ M prin transmisia cu curea trapezoidală TC, pentru mișcarea de rotație;
- prin motorul de alimentare cu curent continuu prin rotorul M1, reductorul RM și mecanismul MSP, pentru mișcarea de avans transversal, care se execută în mod automat.

Dacă prelucrarea se face cu avans circular, OT execută mișcarea de prelucrare iar OP execută mai întâi o mișcare de avans transversal apoi una de avans circular prin intermediul motorului de curent continuu M2 și a reductorului RM.

Schema reglajului automat al avansului este prezentată în figura 3.19, având ca parametri de intrare curentul I (max 400 A), tensiunea V (max 50 V), LL și deplasarea pe direcțiile de avans transversal și circular iar ca parametru de reglare tensiunea pe SL. Reglarea se face prin elementul de măsură EM prin comparare cu tensiunea de referință U_{ref} , rezultatul fiind amplificat în regulatorul electronic RE care stabilește condițiile de reglare.

Testările efectuate au demonstrat funcționarea corectă a mașinii și obținerea unor productivități superioare oricăror alte mașini care funcționează în același scop.

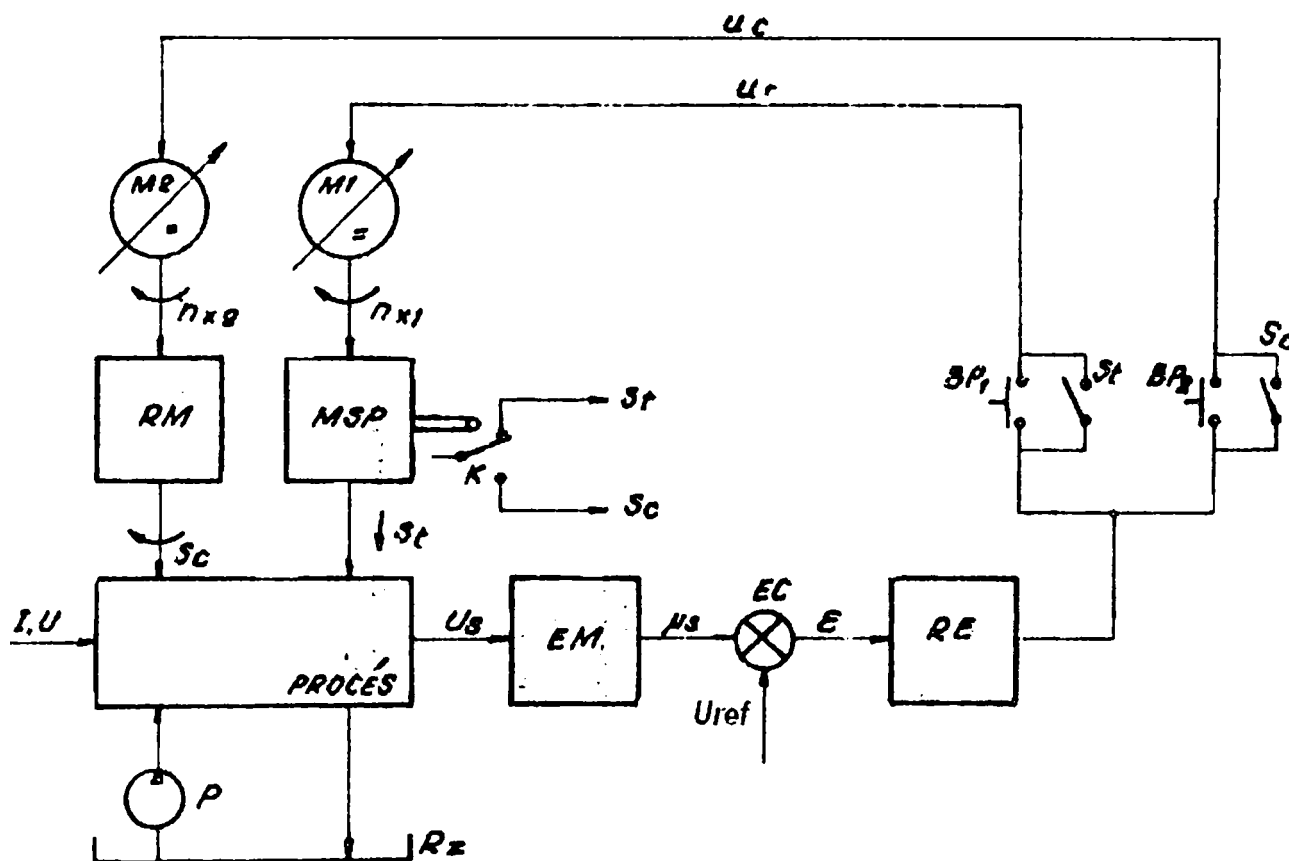


Figura 3.19. Schema de reglaj automat al avansului la utilajul de debitat țevi prin EEC ([M+91])

Capitolul 4.

CONTRIBUȚII LA MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALĂ PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ COMPLEXĂ

Pentru buna cunoaștere a realității înconjurătoare, a modului de desfășurare a fenomenelor și proceselor, unul din mijloacele de cunoaștere este experimentul ([Tal87]), ca metodă de verificare a ipotezelor și teoriilor.

Realizarea unui experiment se poate face pe două căi:

- **empiric**, efectuând foarte multe experiențe fără un plan anume;
- în baza **programării** experimentului, după un plan de acțiune bine pus la punct.

Dacă procesul care se studiază este un sistem complex, cu variabile de intrare multe și interdependente – iar procesul de eroziune electrică complexă este unul din cele mai potrivite exemple – există elaborate metode de cercetare care permit evaluarea fenomenelor aleatoare și determinarea caracteristicilor lor constante iar pentru partea care este neclară se aplică teoria probabilităților.

Pentru factorii care acționează sistematic și care pot fi depistați și controlați cu greu se poate elabora un plan de experimentare care să randomizeze acești factori iar rezultatele acestui experiment se prelucrează mai apoi statistic.

Pentru descrierea modului de funcționare a sistemului și a relațiilor care apar între variabilele sale de intrare și cele de ieșire se utilizează modelul matematic, care este un ansamblu de funcții (matematice) ce descriu relațiile existente între diversele variabile. Scopul acestui model este de a descrie cât mai fidel sistemul fizic, real, dar această descriere trebuie să fie cât mai simplă pentru a fi ușor de înțeles și de utilizat ([DL78, DM85]). Pe baza acestui model matematic se pot rezolva unele probleme privind funcționarea sistemului, printre care cel mai adesea se pune problema căutării condițiilor optime de funcționare a sa, ceea ce revine la aplicarea în practică a unui experiment extremal.

Căutarea și adoptarea unei soluții optime de funcționare a sistemului are o importanță primordială în condițiile unor resurse limitate, când eficiența folosirii acestora pentru progresul economic și social necesită selectarea celor mai indicate variante tehnico-economice ([CCB93]).

Când factorii care influențează funcționarea procesului sunt mai mulți și se influențează reciproc, determinarea modelului matematic al sistemului se poate face:

- prin modificarea pe rând a fiecărei variabile;
- prin modificarea simultană a tuturor factorilor (experiment factorial).

Experimentul factorial pare a fi o cale mai ușoară de a colecta informații despre funcționarea sistemului, dar este la fel de adevărat că este o cale și mai complicată de cercetare ([Tal87, BCH93, NHO93]).

Experimentul se poate realiza în mod pasiv, dacă sunt experimentate condiții diferite, oarecare, și se interpretează datele obținute, sau în mod activ, când experiențele sunt orientate către o anumită direcție pentru a obține informațiile cele mai potrivite pentru modelul matematic presupus.

În studierea modului de funcționare a sistemului, pe cale experimentală, pot apărea trei situații:

- modelul matematic este cunoscut – experimentul are doar rolul de a verifica modelul sau de a demonstra că acesta este corect;

- modelul matematic are mai multe variante – experimentul trebuie să demonstreze care dintre ele este cea mai apropiată de funcționarea reală;
- modelul matematic nu este cunoscut – în baza unor ipoteze despre tipul (clasa, alura) funcțiilor, experimentul trebuie doar să deceleze funcțiile potrivite și coeficienții care intervin în exprimarea acestora.

Dacă experimentul este optimal, atunci în realizarea sa trebuie parcurse două etape:

- **cercetarea preliminară**, în care se colectează informații apriorice despre sistemul analizat în baza cărora se selectează parametrii de proces care sunt semnificativi;
- **experimentul de bază**, având ca finalitate obținerea modelului matematic al procesului și utilizarea acestuia pentru optimizarea funcționării sistemului.

Realizarea experimentului optimal se face, după [CCB93, Ghe95, NK01], în următoarele etape:

1. formularea problemei:

- stabilirea obiectivelor de realizat;
- alegerea criteriului de optimizat;
- stabilirea restricțiilor care urmează a fi îndeplinite;

2. constituirea fondului informațional și stabilirea modelului:

- cunoașterea datelor privind sistemul de optimizat;
- stabilirea factorilor de influență;
- stabilirea factorilor măsurabili sau cuantificabili și a unităților de măsură;
- stabilirea factorilor după natura lor și posibilitatea de prelucrare;
- stabilirea factorilor ce vor fi introduși în modelul matematic;
- elaborarea modelului matematic;

3. aprecierea, prelucrarea și reprezentarea modelului:

- observații și măsurători pentru determinarea valorii constantelor ce vor fi introduse în model pentru a-l apropia de sistemul real;
- introducerea de variabile noi;

4. verificarea practică a modelului și aprecierea plauzibilității sale:

- efectuarea probelor de sensibilitate;
- efectuarea probelor de justete;

5. ameliorarea modelului:

- observații și măsurători pentru determinarea valorii constantelor ce vor fi introduse în model pentru a-l apropia de sistemul real;
- introducerea de variabile noi;

6. alegerea modelului pentru optimizarea condițiilor de lucru

7. alegerea factorilor și rezolvarea modelului matematic:

- semnificația factorilor;
- găsirea domeniului de optimizat;

8. studierea domeniului de optimizat prin experimente

9. interpretarea (reprezentarea) rezultatelor obținute.

Aceste etape și pașii de urmat pot fi sintetizați într-o schemă logică ce prezintă etapele de parcurs, ca în figura 4.1.

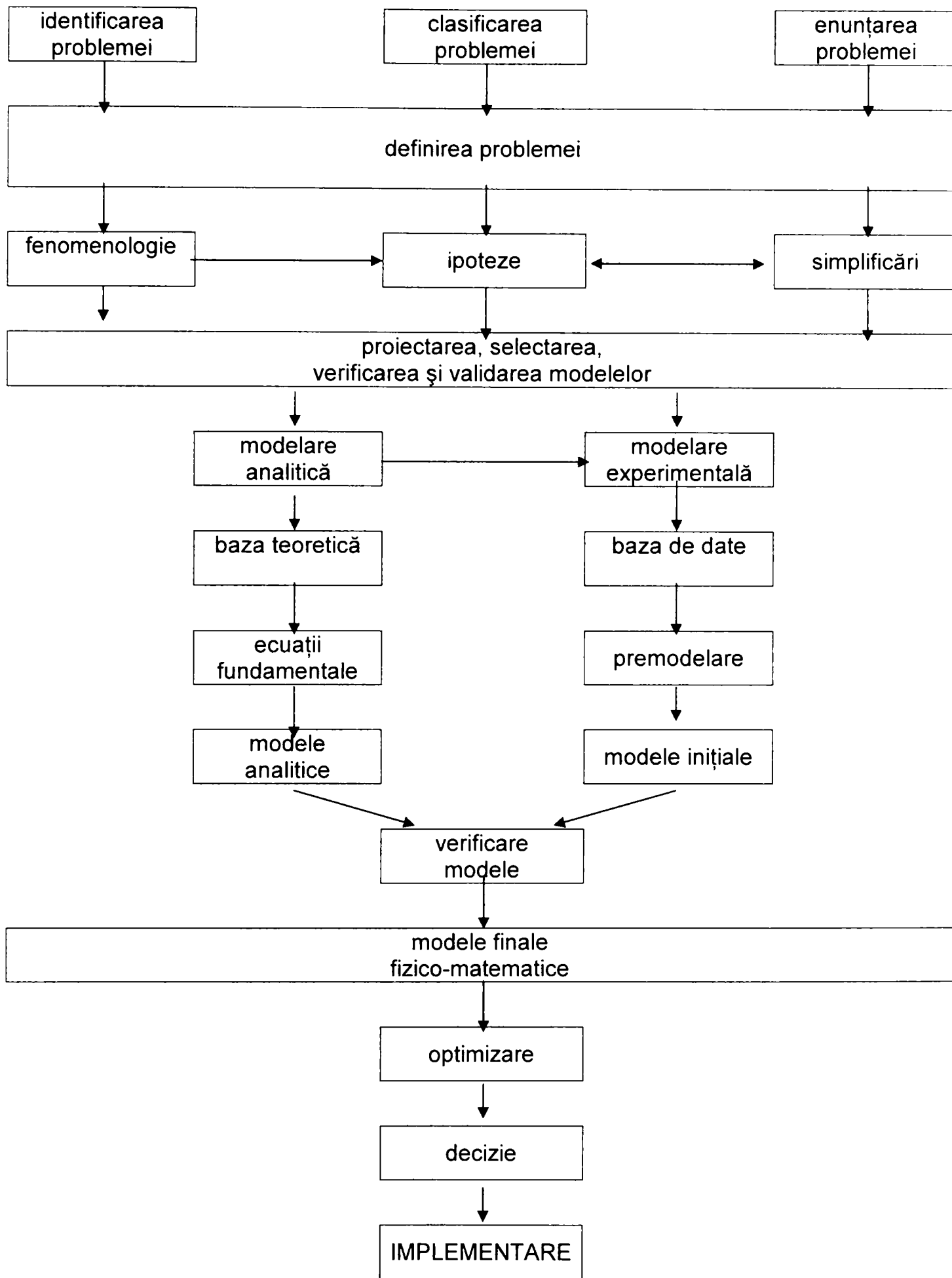


Figura 4.1. Schema bloc de optimizare a prelucrării dimensionale ([NO99])

4.1. MODELE MATEMATICE ALE EXPERIMENTELOR EFECTUATE

Așa cum s-a prezentat anterior, numărul mare de factori care pot influența prelucrarea prin EEC face ca prima etapă în procesul de modelarea să fie premodelarea, adică alegerea din multitudinea factorilor a aceluia care au o influență determinantă asupra fenomenului de prelucrare.

O concluzie din literatura de specialitate este importantă ([NO99]): nu există o importanță apriorică a factorilor de influență, fiecare factor este mai mult sau mai puțin important funcție de contextul concret al prelucrării tehnologice respective: același factor poate fi hotărâtor într-un caz și total nesemnificativ în alt caz. De aceea, pentru obținerea unui model general problema se abordează statistic, funcție de frecvența cu care factorii respectivi apar în diferitele cazuri.

După stabilirea acestor factori, urmează elaborarea unui experiment factorial în baza căruia se determină care sunt experimentele care se vor efectua, pentru a evita un număr prea mare de încercări. Detalierea acestui program este prezentată în capitolul următor.

În baza rezultatelor acestor experimente se poate face elaborarea modelului matematic, folosind tehnici de interpolare prin diferite metode.

4.1.1. Experimente

În vederea stabilirii modelului matematic al depedenței productivității prelucrării (sau timpului de debitare) și calității suprafeței (rugozitatea) funcție de parametrii electrici, mecanici etc. s-a experimentat debitarea unor probe de oțel carbon PC52, utilizat în armăturile și structurile portante din beton.

Tabelul 4.1. Compoziția chimică a oțelului carbon PC52 [%]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
0,16-0,22	1,2-1,6	0,55	0,04	0,04	≤0,3	≤0,3	≤0,3

PC52 este un oțel slab aliat livrat în baza STAS 438/1-89, cu limita la curgere de peste 430 N/mm², R_{p0,2}=360 N/mm²·min, R_m=510 N/mm²·min, A5=20 %·min, având suprafața cu profil periodic ([A+97]).

Testele s-au efectuat cu probe din OP cu diametrul de 20 mm, pe mașina de debitat MEC-50 (figurile 4.2 și 4.3) din dotarea Laboratorului de Tehnologii Neconvenționale al Catedrei de Tehnologie Mecanică, folosind ca OP discuri din OL37 și alamă cu diametrul de 200 mm și grosimea de 1 mm, cu LL silicat solubil de sodiu cu densitatea de 1,24 g/cm³ și M=3, la diverse regimuri electrice asigurate de redresorul RSC-400 (figura 4.4) iar rezultatele acestora sunt prezentate în tabelul 4.3 și graficele 4.6 și 4.7 obținute prin prelucrarea datelor cu programul MathCAD al firmei MathSoft Inc. Cambridge, MA, USA ([D+97, Kar04e, Kar04f]).

Măsurarea timpilor s-a efectuat cu un cronometru iar a rugozității cu aparatul SURTRONIC producție Danemarca (figura 4.5).



Figura 4.2. Mașina de prelucrare prin EEC MEC-50

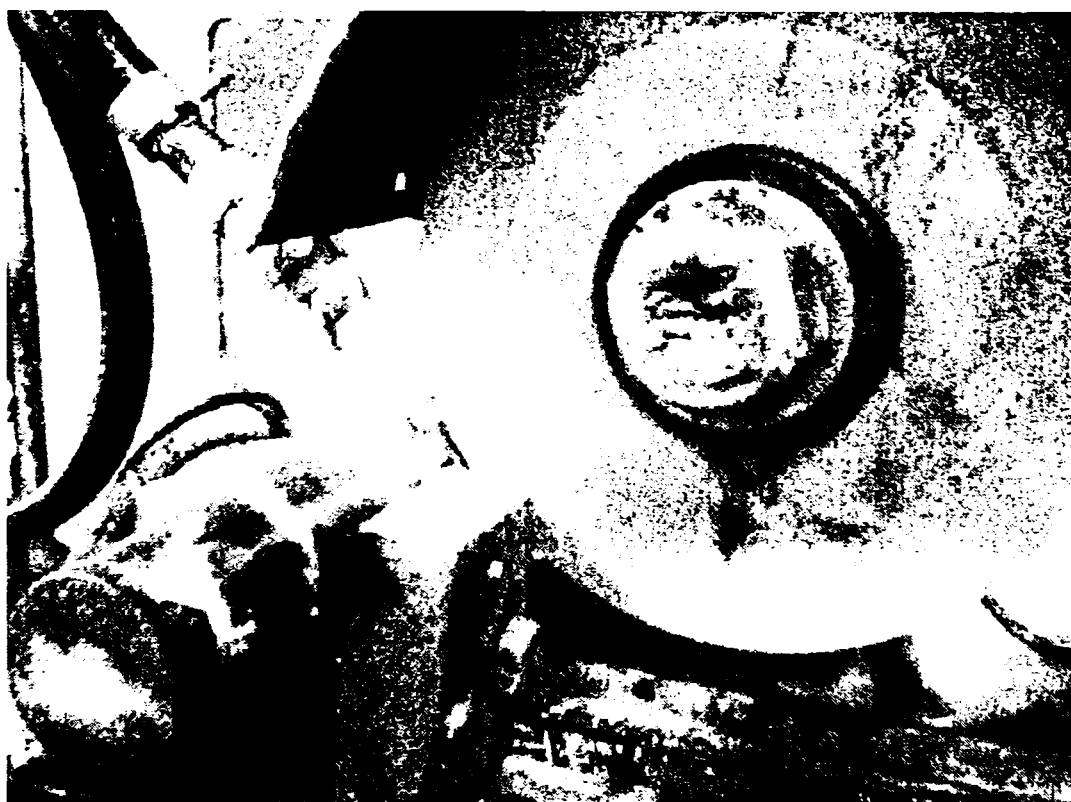


Figura 4.3. Zona de lucru a mașinii MEC-50

În urma prelucrării s-au obținut probe având caracteristici prezentate în figurile 4.8-4.13, din care se observă că:

- deteriorarea suprafeței este cu atât mai evidentă cu cât puterea indusă în SL crește;
- calitatea suprafeței este mai bună pe fața OP care rămâne nedetașată (prinsă în menghină) decât pe fața tăiată (figura 4.9 comparativ cu figura 4.10);



Figura 4.4. Redresorul RSC-400 de alimentare a mașinii MEC-50



Figura 4.5. Rugozimetrul SURTRONIC

- la creșterea puterii induse apar urme lăsate de OT pe suprafața OP (figura 4.11 și următoarele);
- când regimul de lucru devine necorespunzător, suprafața OP este de calitate slabă, ea suferind modificări negative atât în ceea ce privește stratul modificat termic dar și în profunzime (figura 4.13, apariția stratului alb);

- pe lângă aceste rezultate cuantificabile, s-a observat că prelucrarea cu OT din Am este mai necorespunzătoare din cauza noxelor foarte puternice degajate în timpul debitării.

Tabelul 4.2. Rezultate la debitarea PC52 prin EEC

OT din OL37					OT din Am				
Treapta redresor	U [V]	I [A]	t_p [s]	R_a [μm]	Treapta redresor	U [V]	I [A]	t_p [s]	R_a [μm]
I	16	30	152	5.0	I	16	35	200	10.0
	18	35	140	5.3		20	50	160	13.0
	20	40	128	5.6		25	70	145	14.5
II	14	25	155	3.0	II	20	60	80	12.5
	15.5	35	135	3.5		24	100	70	15.0
	20	50	112	5.0		30	125	44	15.5
III	20	80	52	12.5	III	25	125	65	10.8
	25	120	45	14.5		30	150	42	16.0
	35	200	36	17.0		35	200	22	18.7
IV	25	120	30	12.0					
	30	150	23	16.0					
	35	200	15	-					

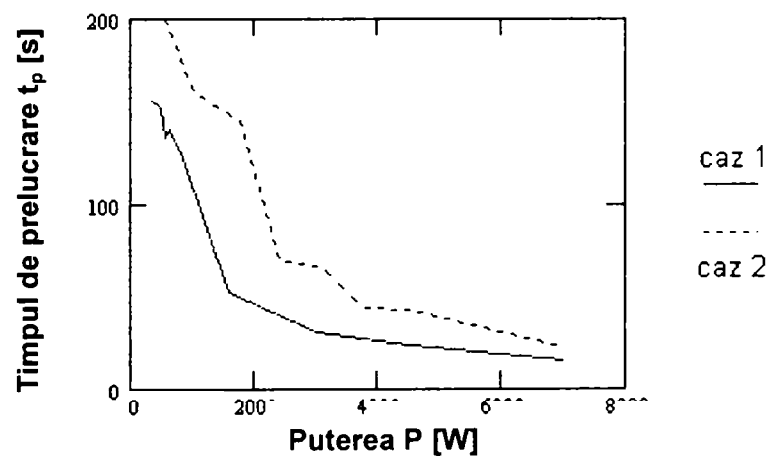


Figura 4.6. Dependența timpului de prelucrare de puterea indusă în spațiul de lucru (caz 1=OT din OL37, caz 2=OT din Am)

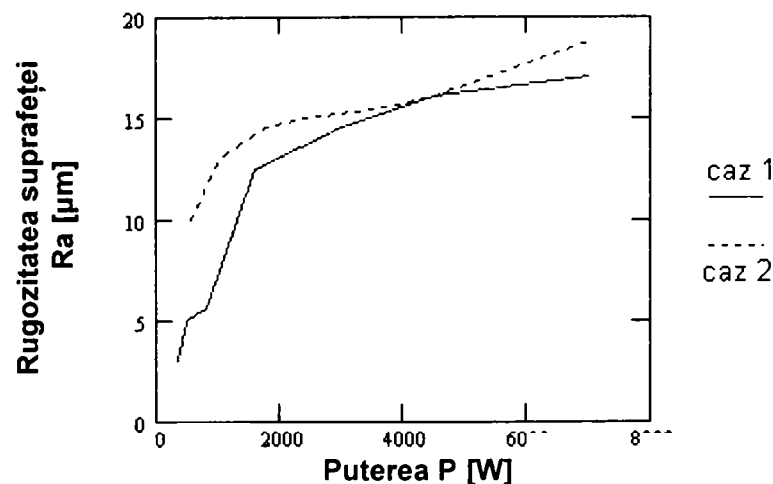


Figura 4.7. Dependența rugozității suprafeței de puterea indusă în spațiul de lucru (caz 1=OT din OL37, caz 2=OT din Am)



Figura 4.8. Suprafața rezultată în urma prelucrării cu regimul I



Figura 4.9. Suprafața rezultată în urma prelucrării cu regimul II



Figura 4.10. Suprafața rămasă pe OP nedetașat în urma prelucrării cu regimul II



Figura 4.11. Suprafața rezultată în urma prelucrării cu regimul III la putere mică

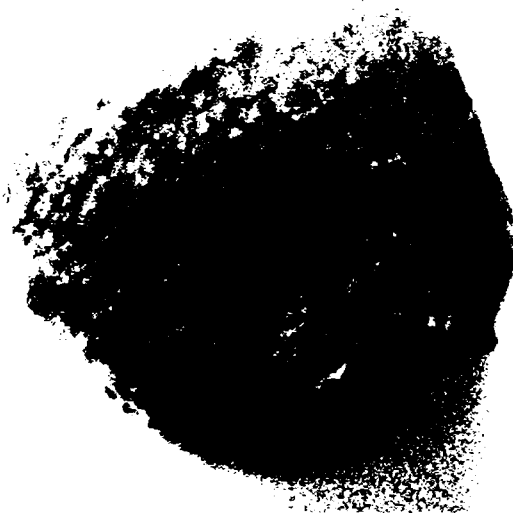


Figura 4.12. Suprafața rezultată în urma prelucrării cu regimul III la putere mare



Figura 4.13. Suprafața rezultată în urma prelucrării cu regimul IV

4.1.2. Modele matematice

În continuarea experimentului prezentat la 4.1.1 s-a trecut la stabilirea modelului matematic al dependenței $t_p=f(P)$, pentru care am încercat reprezentarea prin funcții polinomiale de gradul 1, 2, 3 și prin funcții exponențiale, considerându-se expresiile ([Kar04d]):

$$t_{p1} = a_0 + a_1 \cdot P \text{ [s]} \quad (4.1)$$

$$t_{p2} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 \text{ [s]} \quad (4.2)$$

$$t_{p3} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 + a_3 \cdot P^3 \text{ [s]} \quad (4.3)$$

$$t_{p4} = e^{a_0 + a_1 \cdot P} \text{ [s]} \quad (4.4)$$

$$t_{p5} = e^{a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2} \text{ [s]} \quad (4.5)$$

Similar, pentru modelul matematic al dependenței $R_a=f(P)$ am încercat funcții asemănătoare având expresiile:

$$R_{a1} = a_0 + a_1 \cdot P \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.6)$$

$$R_{a2} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.7)$$

$$R_{a3} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2 + a_3 \cdot P^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.8)$$

$$R_{a4} = e^{a_0 + a_1 \cdot P} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.9)$$

$$R_{a5} = e^{a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.10)$$

Trebuie menționat că alegerea acestor tipuri de funcții s-a făcut pe baza rezultatelor similare prezentate în [Her95, HO95, HLM99b, Lan86, LHM93a, LHM93b].

Pentru determinarea coeficienților din cele zece funcții am efectuat o interpolare polinomială prin metoda celor mai mici pătrate ([Kil97]), folosind calculatorul, conform algoritmului ce se va prezenta în capitolul următor.

În urma calculelor am obținut rezultatele următoare ([Kar04e, Kar04f]):

- pentru dependența $t_p = f(P)$:

-la prelucrarea cu OT din OL37 (figura 4.14):

$$t_{p1} = 139.8528 - 0.0227 \cdot P \text{ [s]} \quad (4.11)$$

$$t_{p2} = 173.1836 - 0.0664 \cdot P + 6.3902 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 \text{ [s]} \quad (4.12)$$

$$t_{p3} = 203.1861 - 0.1286 \cdot P + 2.9231 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 2.1012 \cdot 10^{-9} \cdot P^3 \text{ [s]} \quad (4.13)$$

$$t_{p4} = e^{5.0184 - 3.8106 \cdot 10^{-4} \cdot P} \text{ [s]} \quad (4.14)$$

$$t_{p5} = e^{5.3583 - 8.2733 \cdot 10^{-4} \cdot P + 6.5171 \cdot 10^{-8} \cdot P^2} \text{ [s]} \quad (4.15)$$

-la prelucrarea cu OT din Am (figura 4.15):

$$t_{p1} = 176.56 - 0.0276 \cdot P \text{ [s]} \quad (4.16)$$

$$t_{p2} = 235.1635 - 0.0739 \cdot P + 6.2634 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 \text{ [s]} \quad (4.17)$$

$$t_{p3} = 250.9014 - 0.0973 \cdot P + 1.4194 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 7.0698 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [s]} \quad (4.18)$$

$$t_{p4} = e^{5.3654 - 3.5446 \cdot 10^{-4} \cdot P} \text{ [s]} \quad (4.19)$$

$$t_{p5} = e^{5.6637 - 5.9019 \cdot 10^{-4} \cdot P + 3.1885 \cdot 10^{-8} \cdot P^2} \text{ [s]} \quad (4.20)$$

- pentru dependența $R_a = f(P)$:

-la prelucrarea cu OT din OL37 (figura 4.16):

$$R_{a1} = 5.0109 + 2.114 \cdot 10^{-3} \cdot P \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.21)$$

$$R_{a2} = 2.0213 + 5.798 \cdot 10^{-3} \cdot P - 5.3189 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 [\mu\text{m}] \quad (4.22)$$

$$R_{a3} = -0.3225 + 0.0106 \cdot P - 2.2704 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 1.5962 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 [\mu\text{m}] \quad (4.23)$$

$$R_{a4} = e^{1.5881 + 2.2872 \cdot 10^{-4} \cdot P} [\mu\text{m}] \quad (4.24)$$

$$R_{a5} = e^{1.1907 + 7.184 \cdot 10^{-4} \cdot P - 7.07 \cdot 10^{-8} \cdot P^2} [\mu\text{m}] \quad (4.25)$$

-la prelucrarea cu OT din Am (figura 4.17):

$$R_{a1} = 11.4041 + 1.0912 \cdot 10^{-3} \cdot P [\mu\text{m}] \quad (4.26)$$

$$R_{a2} = 10.3746 + 1.9543 \cdot 10^{-3} \cdot P - 1.1648 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 [\mu\text{m}] \quad (4.27)$$

$$R_{a3} = 7.331 + 6.4795 \cdot 10^{-3} \cdot P - 1.6303 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 1.3391 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 [\mu\text{m}] \quad (4.28)$$

$$R_{a4} = e^{2.4439 + 7.5589 \cdot 10^{-5} \cdot P} [\mu\text{m}] \quad (4.29)$$

$$R_{a5} = e^{2.3363 + 1.6582 \cdot 10^{-4} \cdot P - 1.2176 \cdot 10^{-8} \cdot P^2} [\mu\text{m}] \quad (4.30)$$

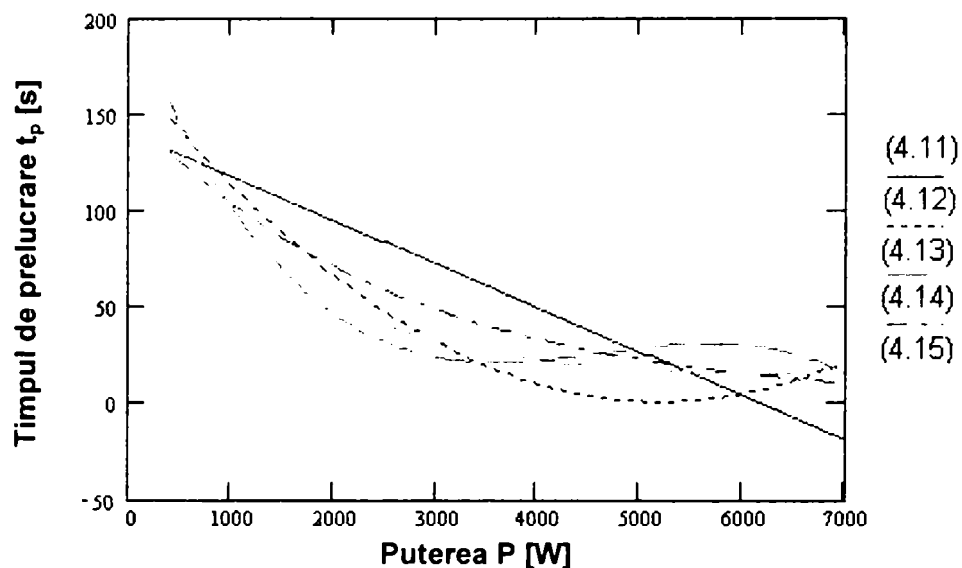


Figura 4.14. Reprezentarea funcțiilor de interpolare $t_p=f(P)$ la debitarea cu OT din OL37

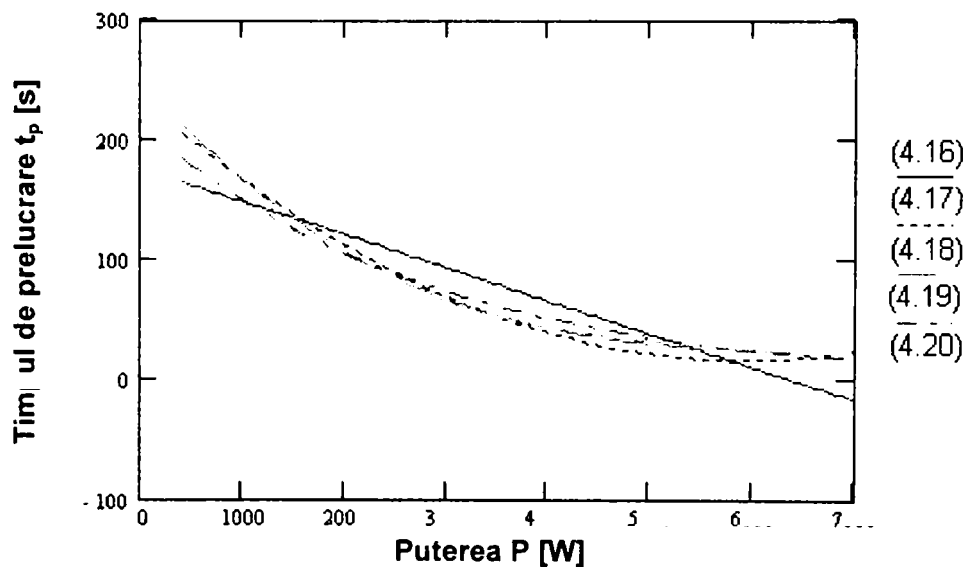


Figura 4.15. Reprezentarea funcțiilor de interpolare $t_p=f(P)$ la debitarea cu OT din Am

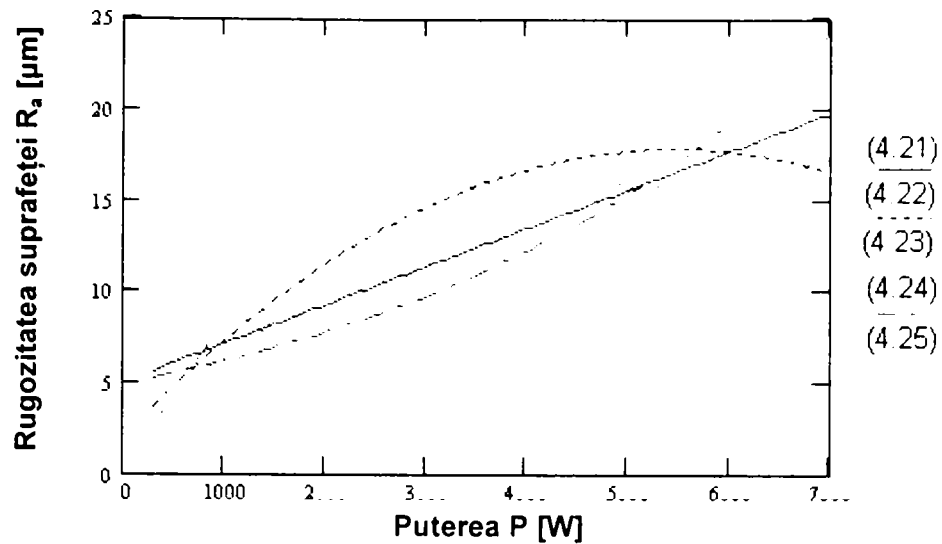


Figura 4.16. Reprezentarea funcțiilor de interpolare $R_a=f(P)$ la debitarea cu OT din OL37

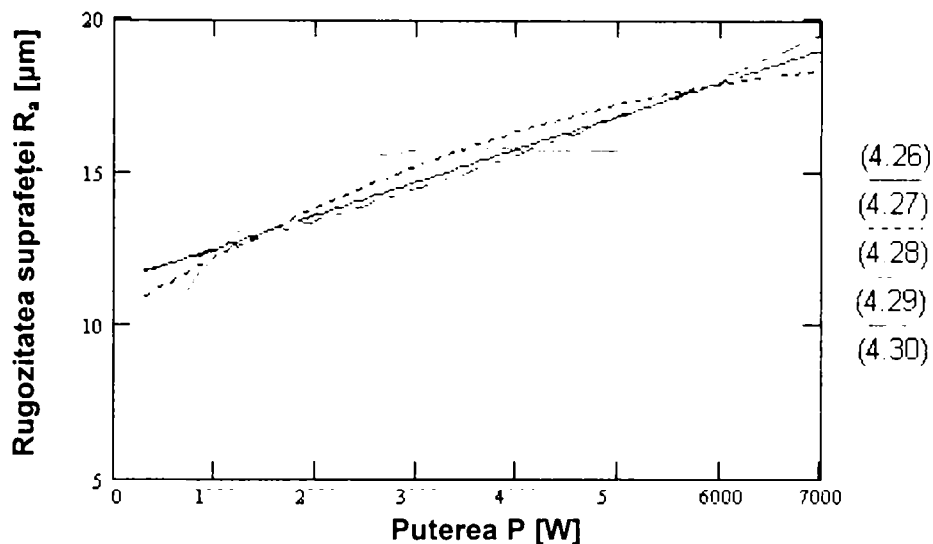


Figura 4.17. Reprezentarea funcțiilor de interpolare $R_a=f(P)$ la debitarea cu OT din Am

4.2. VERIFICAREA MODELELOR EXPERIMENTELOR EFECTUATE

Validarea modelului matematic obținut se face prin compararea rezultatelor experimentale cu cele determinate prin aplicarea funcțiilor de interpolare. Se determină abaterea medie pătratică pentru fiecare caz în parte iar modelul corect este ales acela pentru care abaterea este minimă. Rezultatele determinărilor pentru prelucrarea oțelului carbon PC52 sunt prezentate în tabelele 4.3 și 4.4 iar reprezentarea simultană a funcțiilor care interpoolează valorile experimentale se prezintă în figurile 4.18 și 4.19.

Tabelul 4.3. Abaterea medie pătratică pentru dependența $t_p=f(P)$

Cazul	OL37	Am
(1)	97,228	71,689
(2)	37,339	17,527
(3)	11,295	13,156
(4)	32,079	18,725
(5)	12,300	11,965

Tabelul 4.4. Abaterea medie pătratică pentru dependența $R_a=f(P)$

Cazul	OL37	Am
(1)	37,933	8,765
(2)	14,970	7,115
(3)	9,854	2,996
(4)	37,184	9,259
(5)	20,295	7,370

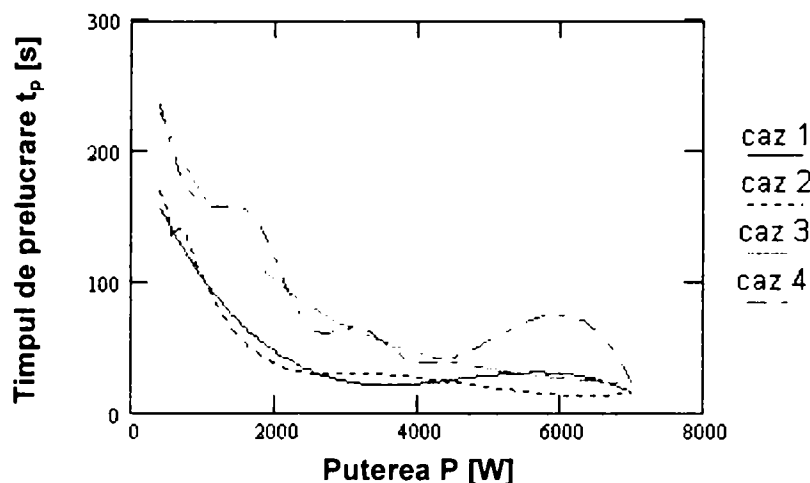


Figura 4.18. Funcția de dependență a timpului de prelucrare de puterea indusă în spațiul de lucru (caz 1= t_p pentru OT din OL37 și caz 2= t_p pentru OT din Am, ambele pentru rezultatele experimentale; caz 3= t_p pentru OT din OL37 și caz 4= t_p pentru OT din Am, ambele pentru funcțiile de interpolare optime)

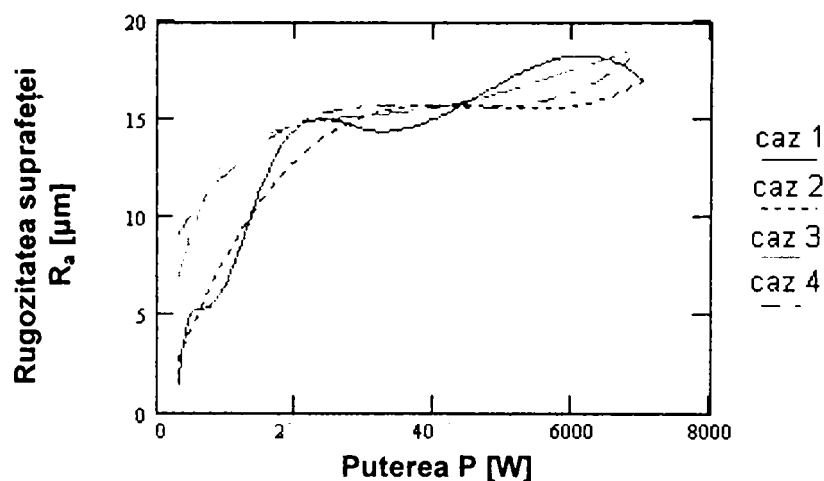


Figura 4.19. Funcția de dependență a rugozității suprafeței de puterea indusă în spațiul de lucru (caz 1= R_a pentru OT din OL37 și caz 2= R_a pentru OT din Am, ambele pentru rezultatele experimentale; caz 3= R_a pentru OT din OL37 și caz 4= R_a pentru OT din Am, ambele pentru funcțiile de interpolare optime)

Verificarea practică a modelului astfel obținut se face prin utilizarea funcțiilor de interpolare pentru calcularea valorii timpului de prelucrare pentru valori ale curentului diferite de cele utilizate în stabilirea modelului. Dacă valorile astfel determinate sunt confirmate în practică, cu o eroare satisfăcătoare, atunci se poate considera modelul matematic ca fiind corect.

Pentru timpul de prelucrare, s-au făcut măsurătorile (t_p^{exp} , [s]) și calculele (t_p^{calc} , [s]) prezentate în tabelul 4.5, determinându-se în același timp eroarea procentuală ($(t_p^{calc} - t_p^{exp})/t_p^{calc}$, [%]).

Pentru rugozitatea suprafeței, s-au făcut măsurătorile (R_a^{exp} , [μm]) și calculele (R_a^{calc} , [μm]) prezentate în tabelul 4.6, determinându-se în același timp eroarea procentuală ($(R_a^{calc} - R_a^{exp})/R_a^{calc}$, [%]).

Tabelul 4.5. Verificarea modelelor matematice pentru dependența $t_p=f(P)$

P [W]	OL37			Am		
	t_p^{calc}	t_p^{exp}	eroare	t_p^{calc}	t_p^{exp}	eroare
1500	69	60	13.04	128	122	4,69
3500	21	25	-19.04	54	60	-11,11
5500	30	20	33.33	29	31	6,90

Tabelul 4.6. Verificarea modelelor matematice pentru dependența $R_a=f(P)$

P [W]	OL37			Am		
	R_a^{calc}	R_a^{exp}	eroare	R_a^{calc}	R_a^{exp}	eroare
1500	11	12	-9,09	14	14,5	-3,57
3500	16	15	6,25	16	15	6,25
5500	16	16	0	16	16,5	-3,13

Rezultatele din tabelul 4.5 arată că modelele astfel determinate sunt relativ corecte, nivelele erorii fiind mai mari la prelucrarea cu OT din OL37 decât la OT din Am. Explicația erorilor este aceea că puterile induse în spațiul de lucru, ca produs al tensiunii și curentului, se pot obține pentru valori diferite ale acestor componente, funcție de treapta de funcționare a redresorului. Aceasta face ca dependențele propagate de tensiune sau curent să modifice rezultatul final al timpului de prelucrare.

Rezultatele din tabelul 4.6 arată că modelele astfel determinate sunt corecte cu o eroare de maxim 10%.

4.3. OPTIMIZAREA EXPERIMENTELOR EFECTUATE

Optimizarea rezultatelor urmărite înseamnă, din punct de vedere matematic, determinarea valorilor factorilor de influență pentru care funcția obiectiv are valoarea optimă (minimă sau maximă, după caz).

Practic, s-a constatat că nu se poate vorbi de o optimizare simultană a tuturor indicatorilor de performanță urmăriți. Strânsa interdependență între aceștia face ca îmbunătățirea unor indicatori de performanță să ducă la înrăutățirea altora ([NO99]). De aceea, utilizatorul trebuie să stabilească indicatorul de bază, a cărui optimizare este critică, în dauna (eventual) altor indicatori de importanță mai mică.

Conexiunile strânse pe care acțiunea de prelucrare prin EEC, ca activitate a unui agent economic, le are cu locul și rolul acestuia în economie și societate, fac ca problema simplei optimizări matematice să fie astăzi mult mai complexă.

Astfel, se constată că acțiunea de determinare a optimului doar ca rezultat al unui model matematic și al simulării nu trebuie despărțită de implicarea variabilelor determinate de starea complexă a agentului economic (resurse și posibilități materiale, necesități și

grad de pregătire) și de disponibilitatea societății (de a avea un anumit nivel de dezvoltare tehnologică care se pune la dispoziția agentului economic, [Tuc99]).

În urma experimentelor efectuate și prezentate în acest capitol, optimizarea a căutat să răspundă la întrebarea: dacă materialul care urmează a se prelucra este oțelul carbon PC52, cu diametrul de 20 mm, care este regimul optim de prelucrare astfel încât timpul de debitare să fie minim, în condițiile unei rugozități cât mai reduse?

Pentru a răspunde la această întrebare, plecând de la dependențele matematice $t_p=f(P)$ și $R_a=f(P)$ care aproximează cel mai bine datele experimentale (așa cum a rezultat din 4.1.1. și 4.1.2):

- OT din OL37:

$$t_p = 203.1861 - 0.1286 \cdot P + 2.9231 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 2.1012 \cdot 10^{-9} \cdot P^3 \text{ [s]} \quad (4.31)$$

- OT din Am:

$$t_p = e^{5.6637 - 5.9019 \cdot 10^{-4} \cdot P + 3.1885 \cdot 10^{-8} \cdot P^2} \text{ [s]} \quad (4.32)$$

- OT din OL37:

$$R_a = -0.3225 + 0.0106 \cdot P - 2.2704 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 1.5962 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.33)$$

- OT din Am:

$$R_a = 7.331 + 6.4795 \cdot 10^{-3} \cdot P - 1.6303 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 1.3391 \cdot 10^{-10} \cdot P^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.34)$$

se caută minimul funcțiilor (4.31) la (4.34). Această acțiune se poate face pe trei căi:

- derivarea relației care exprimă dependența funcțională și găsirea soluțiilor noii funcții;
- parcurgerea întregii game de valori admisibile pentru mărimea de intrare și determinarea valorii pentru care are loc minimul;
- inversarea funcției adică stabilirea unei funcții $P=f^{-1}(t_p)$ respectiv $P=f^{-1}(R_a)$ și determinarea minimului pe această cale ([KN03b]).

Pentru experimentul de debitare a oțelului carbon PC52, s-a determinat că minimul funcției $t_p=f(P)$ se atinge pentru $P=7200$ W cu OT din OL37, pentru care $t_p=8.5$ s și $R_a=17.5$ μm .

4.4. ALTE MODELE MATEMATICE

4.4.1. Funcții de o variabilă

Pentru elaborarea unui program care să efectueze în mod automat stabilirea funcțiilor de dependență a parametrilor tehnologic de factorii de influență, am elaborat următoarele modele matematice:

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea Rp3 cu secțiune transversală 10x20 mm ([KN03a, Pop70], figura 4.20):

$$Q_{OP} = -104 + 15.65 \cdot I - 0.145 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.35)$$

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea Rp3 de diferite secțiuni transversale ([KN03a, Pop70], figura 4.21):

$$\text{-15x20 mm: } Q_{OP} = -247 + 25.5 \cdot I - 0.32 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.36)$$

$$\text{-20x20 mm: } Q_{OP} = 68 + 1.375 \cdot I + 0.0675 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.37)$$

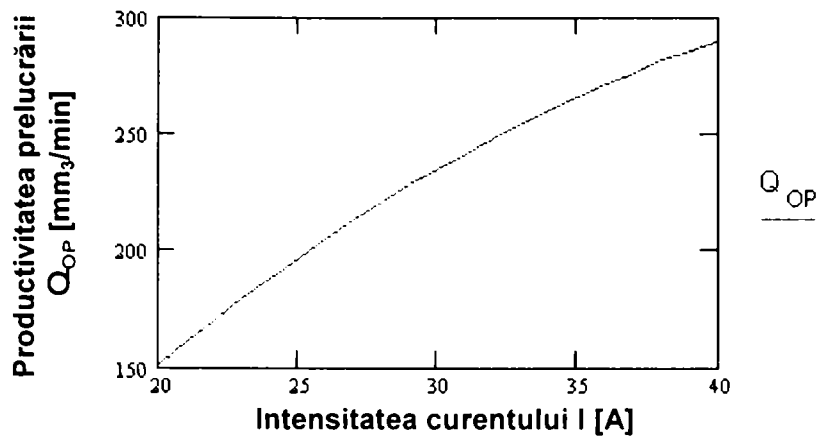


Figura 4.20. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea Rp3

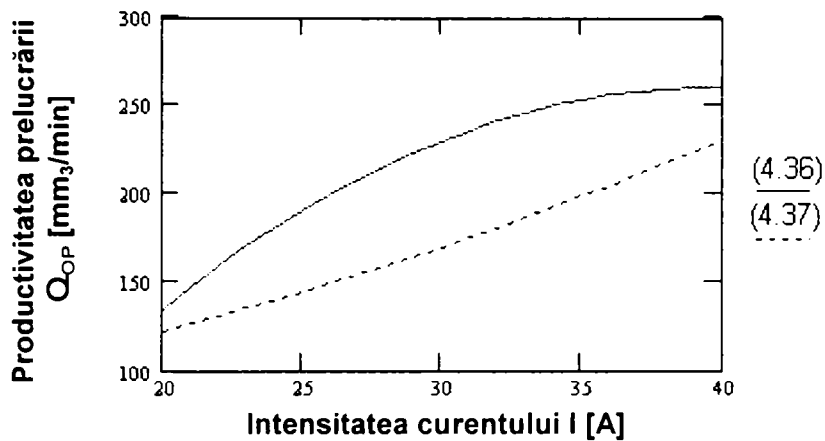


Figura 4.21. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea Rp3

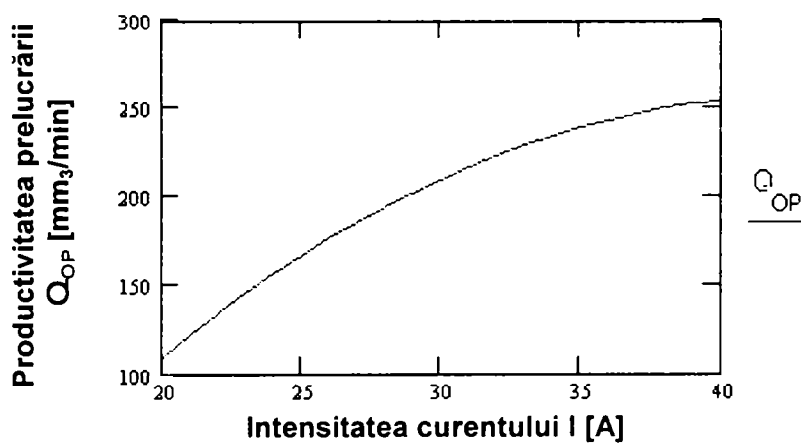


Figura 4.22. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea OLC60

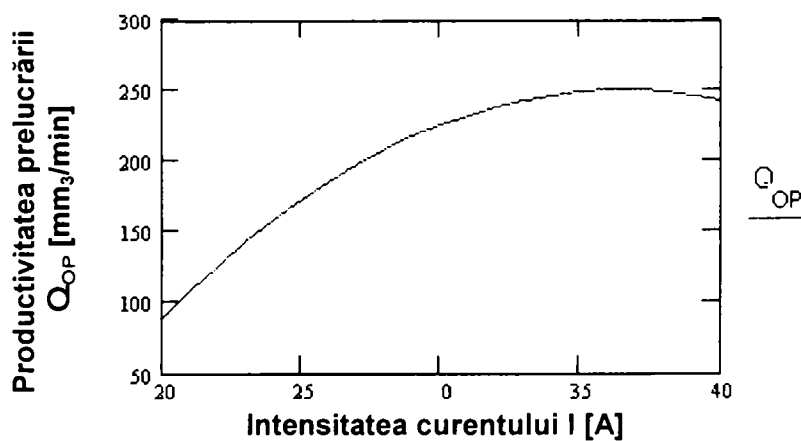


Figura 4.23. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea OSD10

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea OLC60 cu diametru 20 mm ([KN03a, Pop70], figura 4.22):

$$Q_{OP} = -255 + 23.75 \cdot I - 0.275 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.38)$$

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea OSD10 cu diametru 20 mm ([KN03a, Pop70], figura 4.23):

$$Q_{OP} = -535 + 43.05 \cdot I - 0.59 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.39)$$

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea Rp4 cu diametru 20 mm ([KN03a, Pop70], figura 4.24):

$$Q_{OP} = -286 + 27.25 \cdot I - 0.345 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.40)$$

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea 13CrNi25 cu diametru 20 mm ([KN03a, Pop70], figura 4.25):

$$Q_{OP} = -347 + 30.9 \cdot I - 0.4 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.41)$$

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea C120 cu diametru de 50 mm, la diferite tensiuni ([KN03b, Lan86], figura 4.26):

$$-U=23 \text{ V: } Q_{OP} = 56.3666 + 7.0422 \cdot I - 8.6045 \cdot 10^{-3} \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.42)$$

$$-U=30 \text{ V: } Q_{OP} = -1079 + 38.16 \cdot I - 0.176 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.43)$$

$$-U=39 \text{ V: } Q_{OP} = -576 + 32.24 \cdot I - 0.112 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.44)$$

- pentru dependența Q_{OP} de I , la debitarea 40Cr10 cu diametru de 35 mm, la diferite tensiuni ([KN03b, Lan86], figura 4.27):

$$-U=30 \text{ V: } Q_{OP} = -318 + 22.32 \cdot I - 0.08 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.45)$$

$$-U=39 \text{ V: } Q_{OP} = -219.5 + 21.18 \cdot I - 0.092 \cdot I^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.46)$$

- pentru dependența Q_{OP} de P , la debitarea fontei nodulare de diverse secțiuni transversale și diferite viteze relative ([Kar04c, Sav71], figura 4.28 pentru $v_r=14$ m/s și figura 4.29 pentru $v_r=17$ m/s):

$$-10 \times 10 \text{ mm, } v_r=14 \text{ m/s: } Q_{OP} = -2733 + 16.0802 \cdot P - 0.0312 \cdot P^2 + 1.9963 \cdot 10^{-5} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.47)$$

$$-10 \times 10 \text{ mm, } v_r=17 \text{ m/s: } Q_{OP} = e^{-1.0137 + 0.0152 \cdot P - 1.9967 \cdot 10^{-5} \cdot P^2} \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.48)$$

$$-15 \times 15 \text{ mm, } v_r=14 \text{ m/s: } Q_{OP} = -120.5961 + 0.8725 \cdot P - 0.002 \cdot P^2 + 1.4442 \cdot 10^{-6} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.49)$$

$$-15 \times 15 \text{ mm, } v_r=17 \text{ m/s: } Q_{OP} = -62.6287 + 0.4684 \cdot P - 9.444 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 + 5.7971 \cdot 10^{-7} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.50)$$

$$-20 \times 20 \text{ mm, } v_r=14 \text{ m/s: } Q_{OP} = 199.3607 - 1.1556 \cdot P + 0.0023 \cdot P^2 - 1.5408 \cdot 10^{-6} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.51)$$

$$-20 \times 20 \text{ mm, } v_r=17 \text{ m/s: } Q_{OP} = 301.6403 - 2.2968 \cdot P + 0.0059 \cdot P^2 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot P^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.52)$$

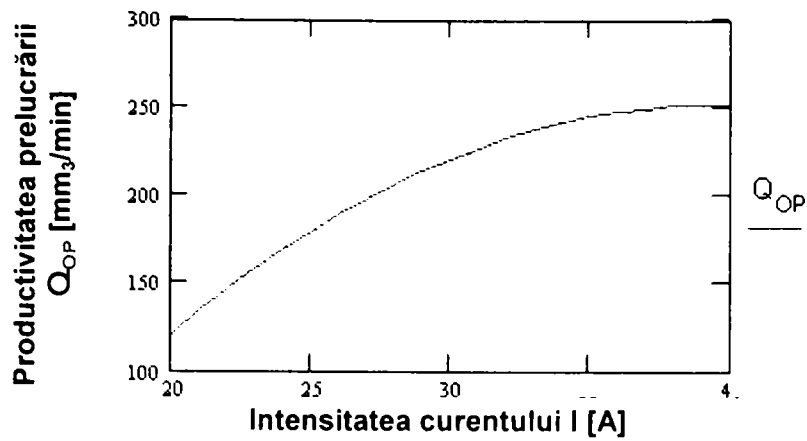


Figura 4.24. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea Rp4

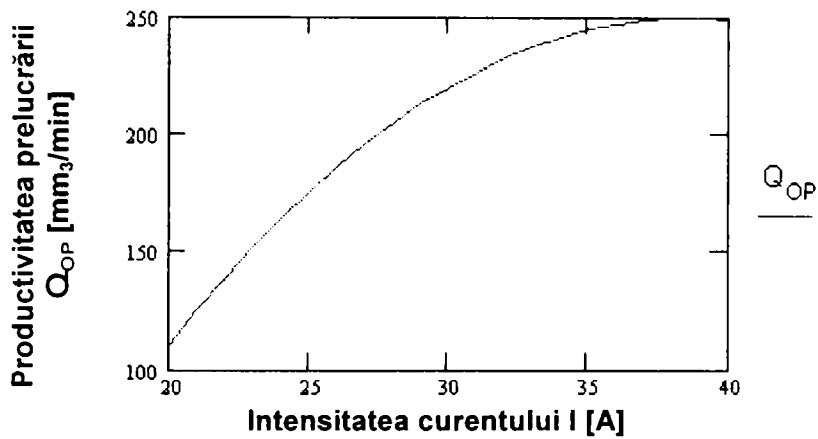


Figura 4.25. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea 13CrNi25

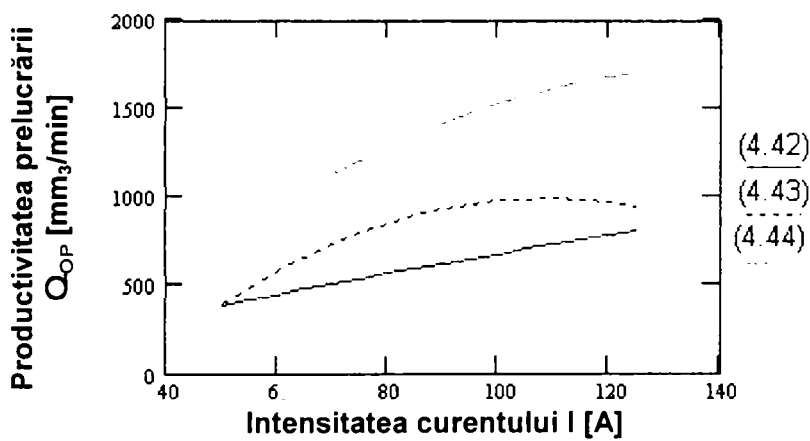


Figura 4.26. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea C120

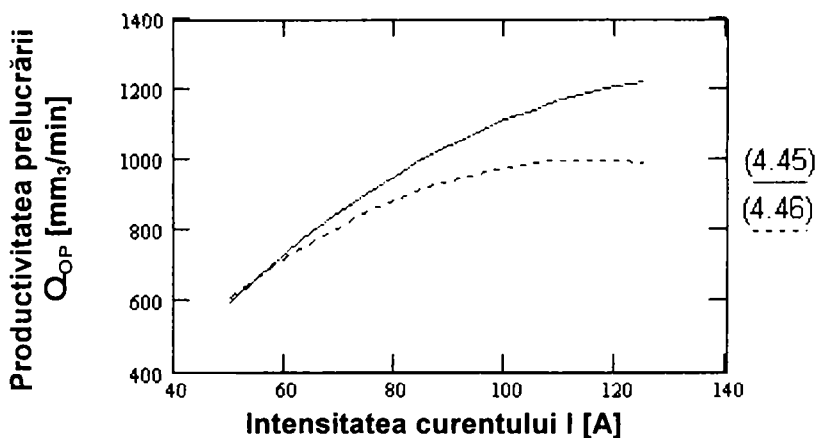


Figura 4.27. $Q_{OP}=f(I)$ la debitarea 40Cr10

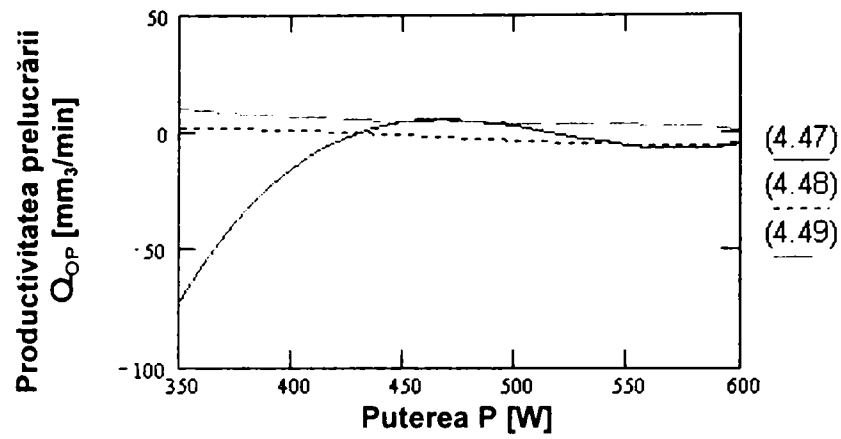


Figura 4.28. $Q_{OP}=f(P)$ la debitarea fontei nodulare cu $v_r=14$ m/s

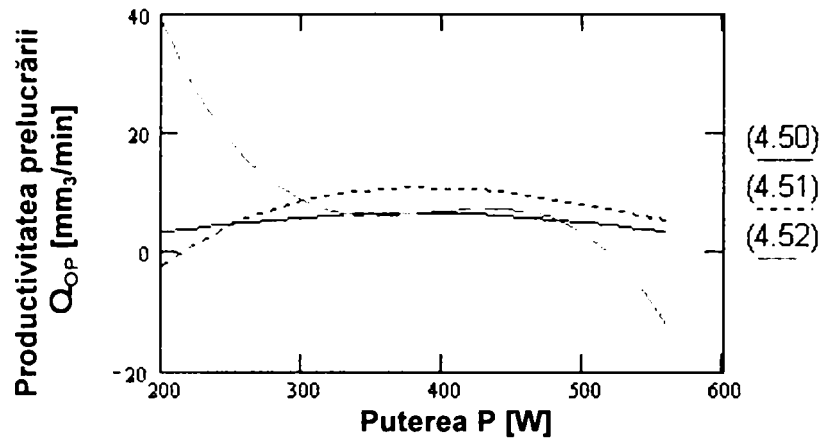


Figura 4.29. $Q_{OP}=f(P)$ la debitarea fontei nodulare cu $v_r=17$ m/s

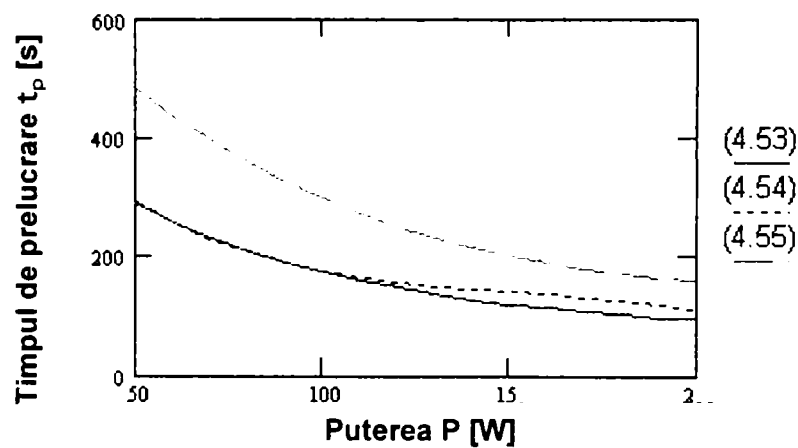


Figura 4.30. $t_p=f(I)$ la debitarea oțelurilor inoxidabile

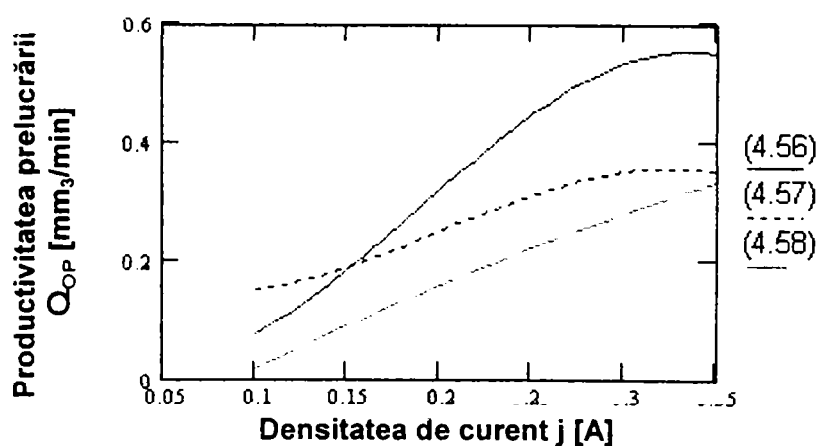


Figura 4.31. $Q_{OP}=f(j)$ la debitarea carburii metalice P30 cu $v_r=6$ m/s

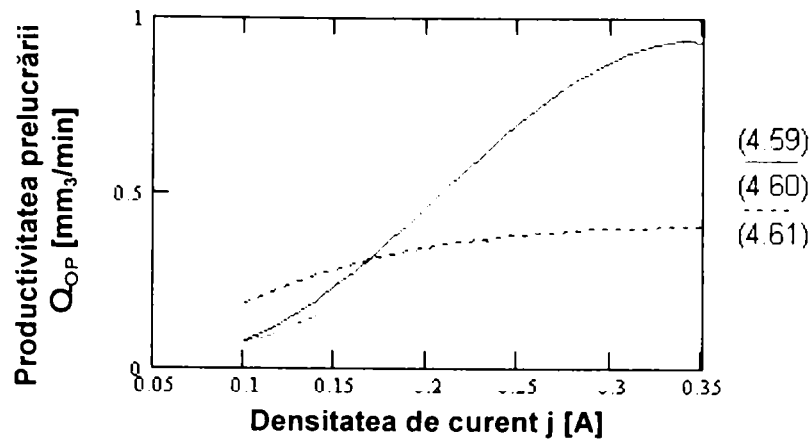


Figura 4.32. $Q_{OP}=f(j)$ la debitarea carburii metalice P30 cu $v_r=20$ m/s

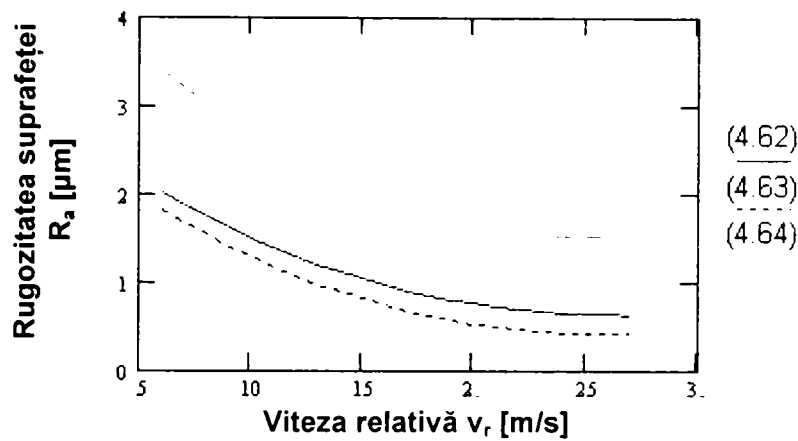


Figura 4.33. $R_a=f(v_r)$ la debitarea carburii metalice P30 cu $j=0,2$ A/mm²

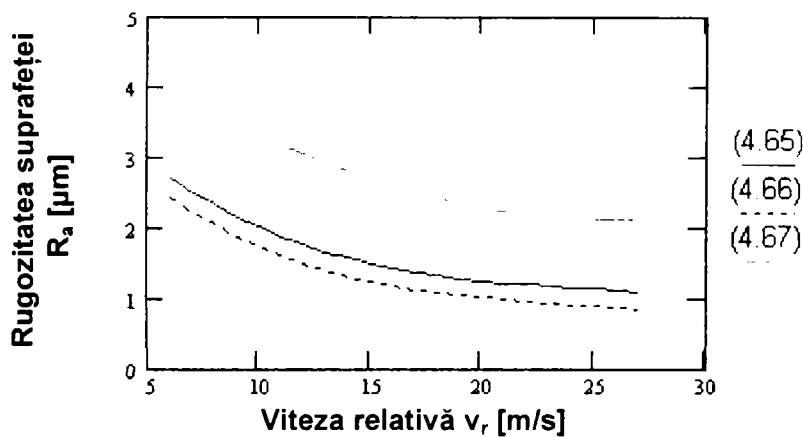


Figura 4.34. $R_a=f(v_r)$ la debitarea carburii metalice P30 cu $j=0,35$ A/mm²

- pentru dependența t_p de I , la debitarea oțelurilor inoxidabile cu OT de diverse diametre ([HLM88, Kar04d], figura 4.30):

$$-d=45 \text{ mm: } t_p = e^{6.297 - 1.4076 \cdot 10^{-2} \cdot I + 2.6503 \cdot 10^{-3} \cdot I^2} \text{ [s]} \quad (4.53)$$

$$-d=50 \text{ mm: } t_p = 564.3746 - 7.6477 \cdot I + 4.8275 \cdot 10^{-2} \cdot I^2 - 1.0752 \cdot 10^{-4} \cdot I^3 \text{ [s]} \quad (4.54)$$

$$-d=65 \text{ mm: } t_p = 787.8262 - 7.5632 \cdot I + 3.0976 \cdot 10^{-2} \cdot I^2 - 4.4569 \cdot 10^{-5} \cdot I^3 \text{ [s]} \quad (4.55)$$

- pentru dependența Q_{OP} de j la debitarea carburii metalice P30 cu OT din diverse materiale la diverse viteze relative ([Kar00c, NL83a], figura 4.31 pentru $v_r=6$ m/s și figura 4.32 pentru $v_r=20$ m/s):

$$\text{-OT din Fc, } v_r=6 \text{ m/s:} \\ Q_{OP} = 0.0514 - 1.7087 \cdot j + 23.7143 \cdot j^2 - 42.2222 \cdot j^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.56)$$

$$\text{-OT din Fc, } v_r=20 \text{ m/s:} \\ Q_{OP} = 0.2457 - 6.1762 \cdot j + 53.5714 \cdot j^2 - 86.6667 \cdot j^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.57)$$

$$\text{-OT din cupru, } v_r=6 \text{ m/s:} \\ Q_{OP} = 0.21 - 1.9333 \cdot j + 16 \cdot j^2 - 26.6667 \cdot j^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.58)$$

$$\text{-OT din cupru, } v_r=20 \text{ m/s:} \\ Q_{OP} = -0.1376 + 4.2116 \cdot j - 11 \cdot j^2 + 9.6296 \cdot j^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.59)$$

$$\text{-OT din OL37, } v_r=6 \text{ m/s:} \\ Q_{OP} = -0.1429 + 1.7071 \cdot j - j^2 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.60)$$

$$\text{-OT din OL37, } v_r=20 \text{ m/s:} \\ Q_{OP} = 0.0219 - 0.9847 \cdot j + 17.8571 \cdot j^2 - 31.8519 \cdot j^3 \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.61)$$

- pentru dependența R_a de j la debitarea carburii metalice P30 cu OT din diverse materiale, la diverse viteze relative ([Kar00b, NL83a], figura 4.33 pentru $j=0,2 \text{ A/mm}^2$ și figura 4.34 pentru $j=0,35 \text{ A/mm}^2$):

$$\text{-OT din Fc, } j=0,2 \text{ A/mm}^2: \\ R_a = 3.0685 - 0.2076 \cdot v_r + 0.0053 \cdot v_r^2 - 3.576 \cdot 10^{-5} \cdot v_r^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.62)$$

$$\text{-OT din Fc, } j=0,35 \text{ A/mm}^2: \\ R_a = 4.3852 - 0.3567 \cdot v_r + 0.0137 \cdot v_r^2 - 1.858 \cdot 10^{-4} \cdot v_r^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.63)$$

$$\text{-OT din cupru, } j=0,2 \text{ A/mm}^2: \\ R_a = 2.8355 - 0.198 \cdot v_r + 0.0044 \cdot v_r^2 - 1.399 \cdot 10^{-5} \cdot v_r^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.64)$$

$$\text{-OT din cupru, } j=0,35 \text{ A/mm}^2: \\ R_a = 4.0636 - 0.3512 \cdot v_r + 0.0137 \cdot v_r^2 - 1.8968 \cdot 10^{-4} \cdot v_r^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.65)$$

$$\text{-OT din OL37, } j=0,2 \text{ A/mm}^2: \\ R_a = 5.0369 - 0.3275 \cdot v_r + 0.0094 \cdot v_r^2 - 7.808 \cdot 10^{-5} \cdot v_r^3 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.66)$$

$$\text{-OT din OL, } j=0,35 \text{ A/mm}^2: \\ R_a = 5.3653 - 0.2525 \cdot v_r + 0.0049 \cdot v_r^2 \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.67)$$

4.4.2. Funcții de două variabile

Pentru elaborarea unui program care să efectueze în mod automat stabilirea funcțiilor de dependență a parametrilor tehnologic de factorii de influență, am elaborat următoarele modele matematice (modelele sunt funcții de gradul 1 și 2 iar funcția care aproximează cu eroare minimă este cea prezentată):

- pentru dependența t_p de diametrul OP și de l , la debitarea oțelului inoxidabil cu OT de grosimi diferite ([HLM88]):

-grosime OT de 1 mm (figura 4.35):

$$t_p = 524.4722 - 11.8924 \cdot d - 1.2784 \cdot l + 0.2080 \cdot d^2 + 0.0086 \cdot l^2 - 0.0435 \cdot d \cdot l \text{ [s]} \quad (4.68)$$

-grosime OT de 1,5 mm (figura 4.36):

$$t_p = -21.3862 + 12.5995 \cdot d - 3.4599 \cdot l + 0.094 \cdot d^2 + 0.0269 \cdot l^2 - 0.1106 \cdot d \cdot l \text{ [s]} \quad (4.69)$$

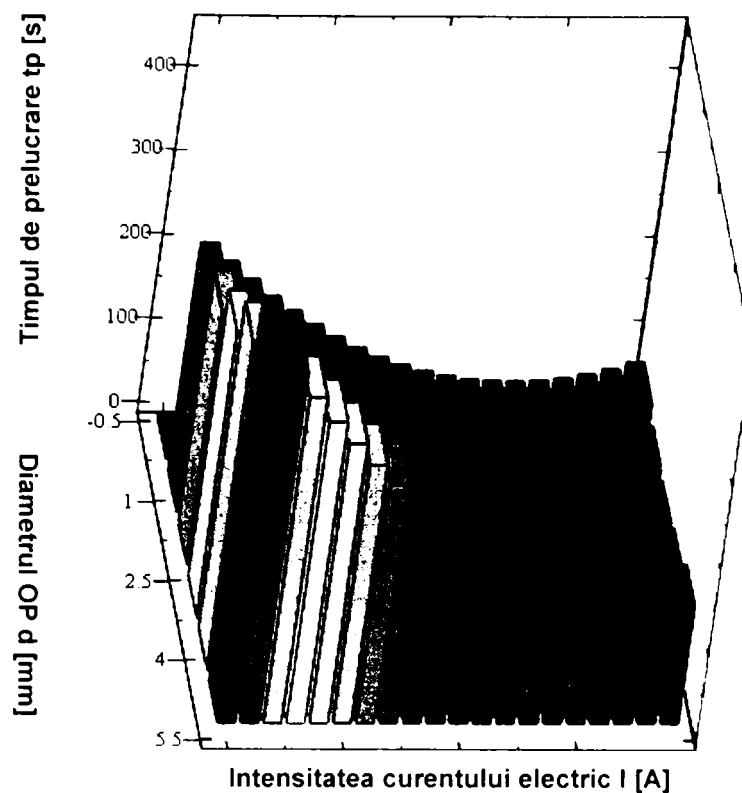


Figura 4.35. Dependența $t_p=f(d, I)$ la debitarea oțelului inox folosind OT cu grosime $g=1$ mm

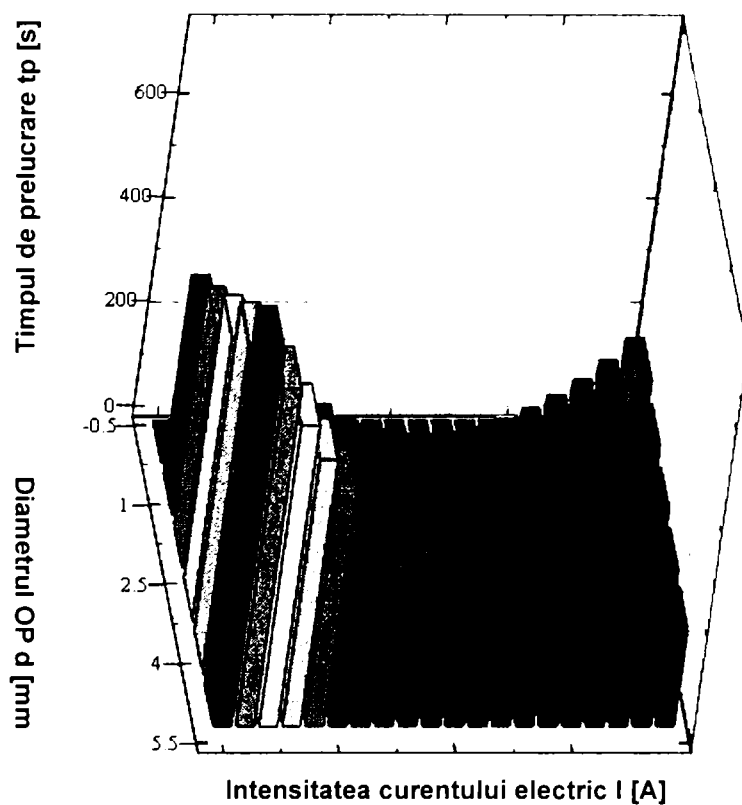


Figura 4.36. Dependența $t_p=f(d, I)$ la debitarea oțelului inox folosind OT cu grosime $g=1,5$ mm

- pentru dependența Q_{OP} de j și v_r , la debitarea carburii metalice P10 ([Lan86]):
-OT din OL37 (figura 4.37):

$$Q_{OP} = -0.1376 + 1.3513 \cdot j + 0.0136 \cdot v_r - 2.155 \cdot j^2 - 0.0004 \cdot v_r^2 - 0.0055 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3/\text{min]} \quad (4.70)$$

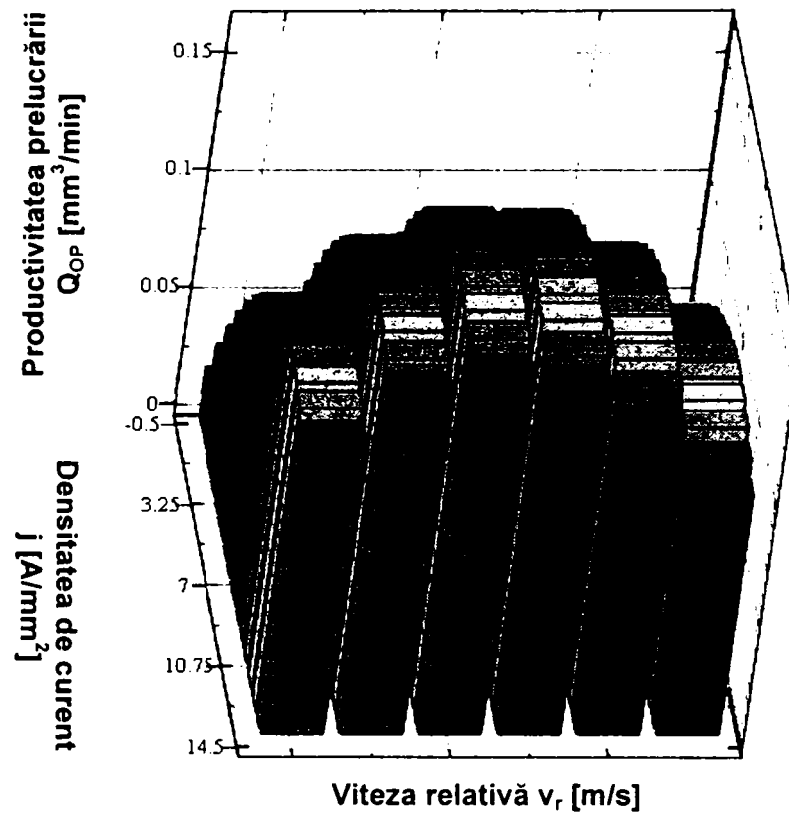


Figura 4.37. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P10 cu OT din OL37

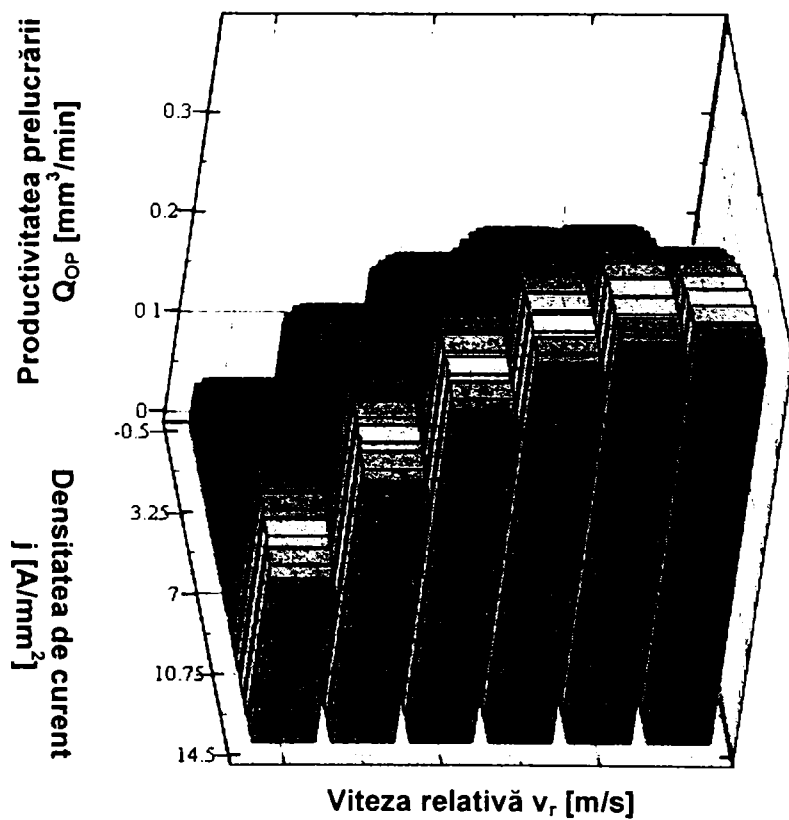
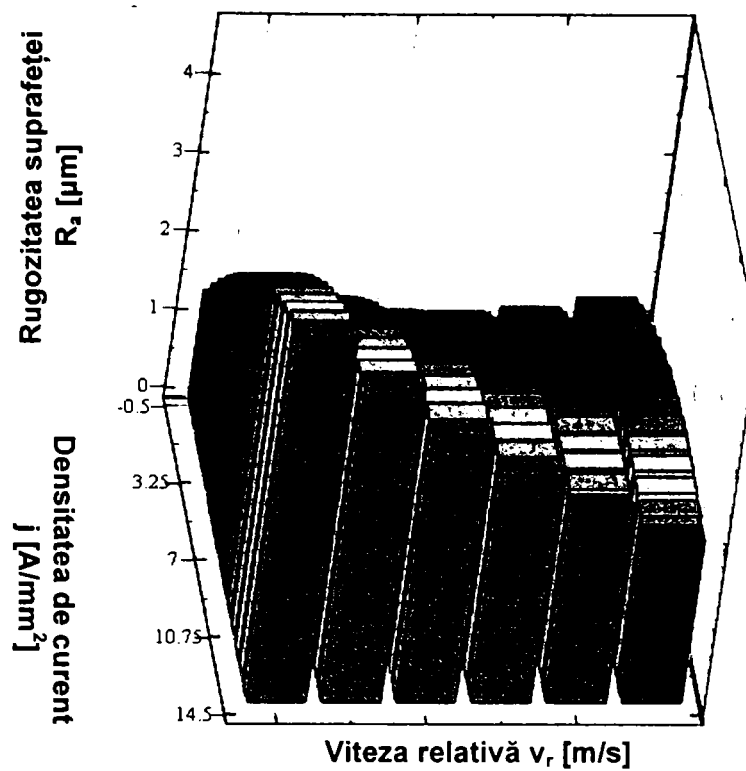
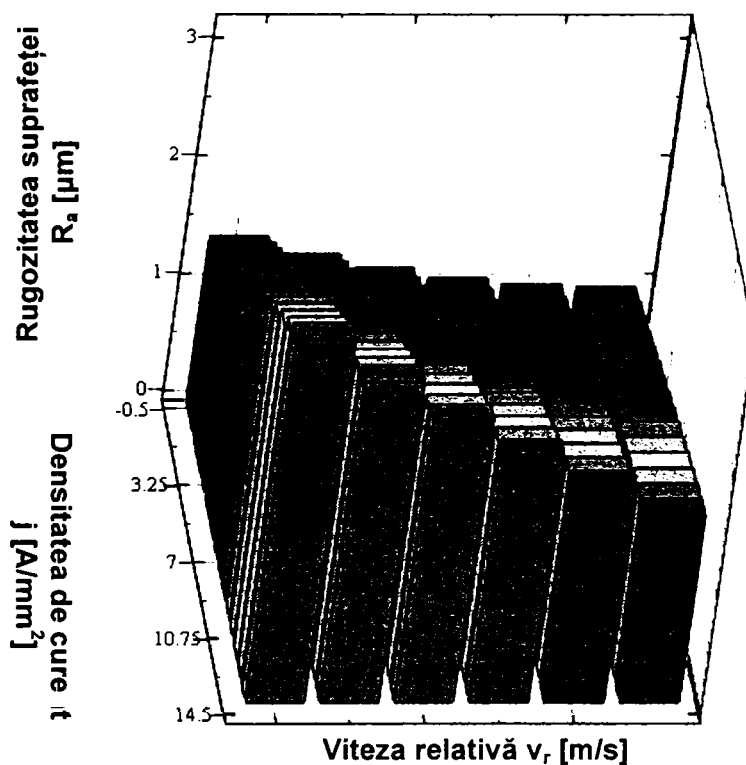


Figura 4.38. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P10 cu OT din cupru

-OT din cupru (figura 4.38):

$$Q_{OP} = -0.2315 + 1.7437 \cdot j + 0.0284 \cdot v_r - 3.4357 \cdot j^2 - 0.0008 \cdot v_r^2 + 0.0247 \cdot j \cdot v_r [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (4.71)$$

-OT din FC: atât funcția de gradul 1 cât și cea de grad 2 prezintă erori în jur de 100% deci nici una dintre ele nu aproximează corect dependența în cauză;


 Figura 4.39. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P10 cu OT din OL37

 Figura 4.40. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P10 cu OT din cupru

- pentru dependența R_a de j și v_r , la debitarea carburii metalice P10 ([Lan86]):
 -OT din OL37 (figura 4.39):

$$R_a = 0.0295 + 23.0492 \cdot j - 0.0383 \cdot v_r - 19.9 \cdot j^2 + 0.0022 \cdot v_r^2 - 0.4467 \cdot j \cdot v_r \quad [\mu\text{m}] \quad (4.72)$$

- OT din cupru (figura 4.40):

$$R_a = 1.0922 + 7.5427 \cdot j - 0.0382 \cdot v_r - 0.7101 \cdot j^2 + 0.0010 \cdot v_r^2 - 0.1926 \cdot j \cdot v_r \quad [\mu\text{m}] \quad (4.73)$$

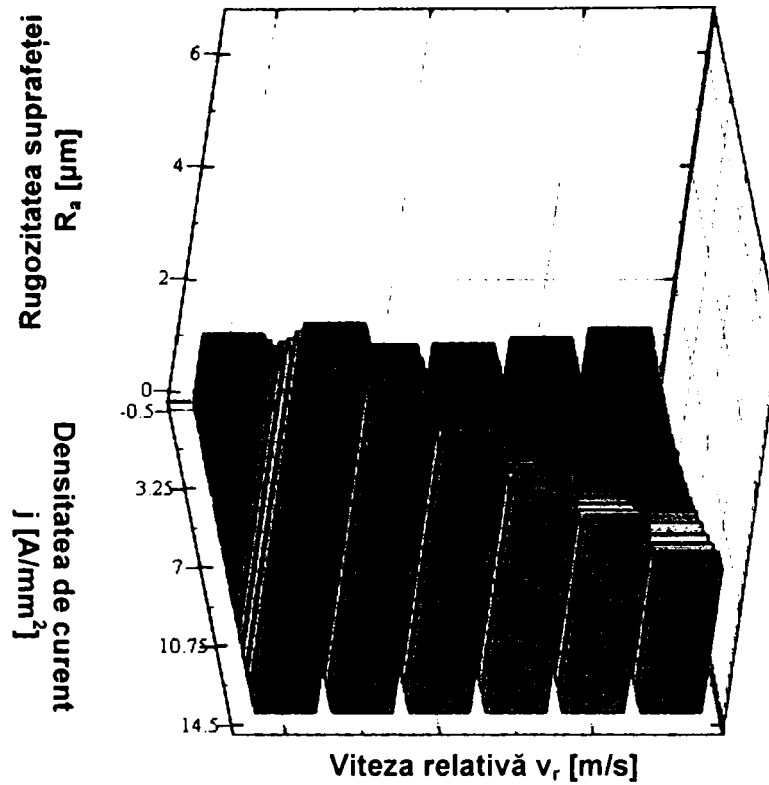


Figura 4.41. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P10 cu OT din Fc

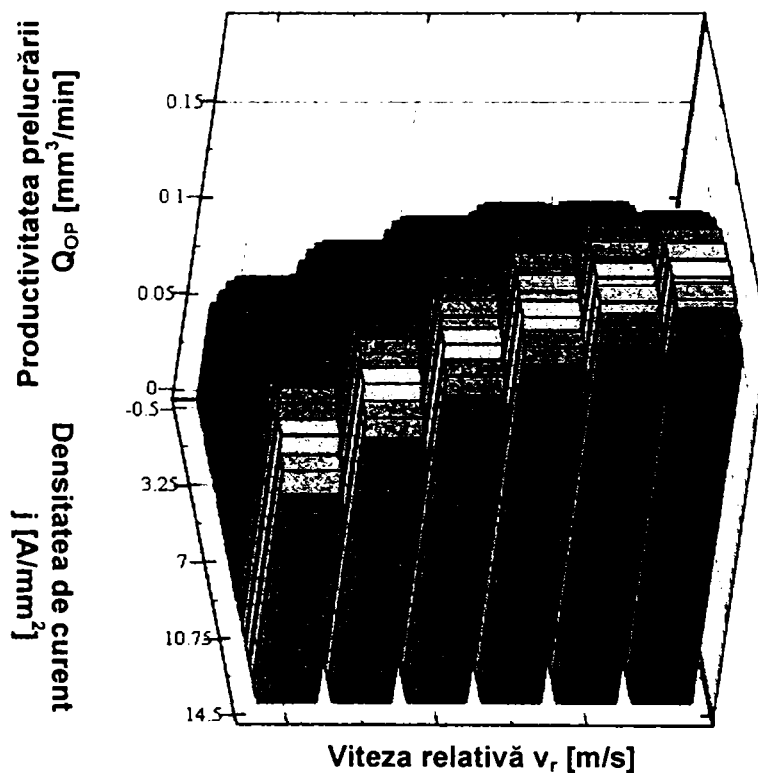


Figura 4.42. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P20 cu OT din OL37

-OT din fontă cenușie (figura 4.41):

$$R_a = 0.4041 + 12.5177 \cdot j - 0.0145 \cdot v_r + 25.524 \cdot j^2 + 0.0025 \cdot v_r^2 - 0.7475 \cdot j \cdot v_r \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.74)$$

• pentru dependența Q_{OP} de j și v_r , la debitarea carburii metalice P20 ([Lan86]):
-OT din OL37 (figura 4.42):

$$Q_{OP} = -0.0674 + 1.2659 \cdot j + 0.0058 \cdot v_r - 2.6495 \cdot j^2 - 0.0002 \cdot v_r^2 + 0.0130 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.75)$$

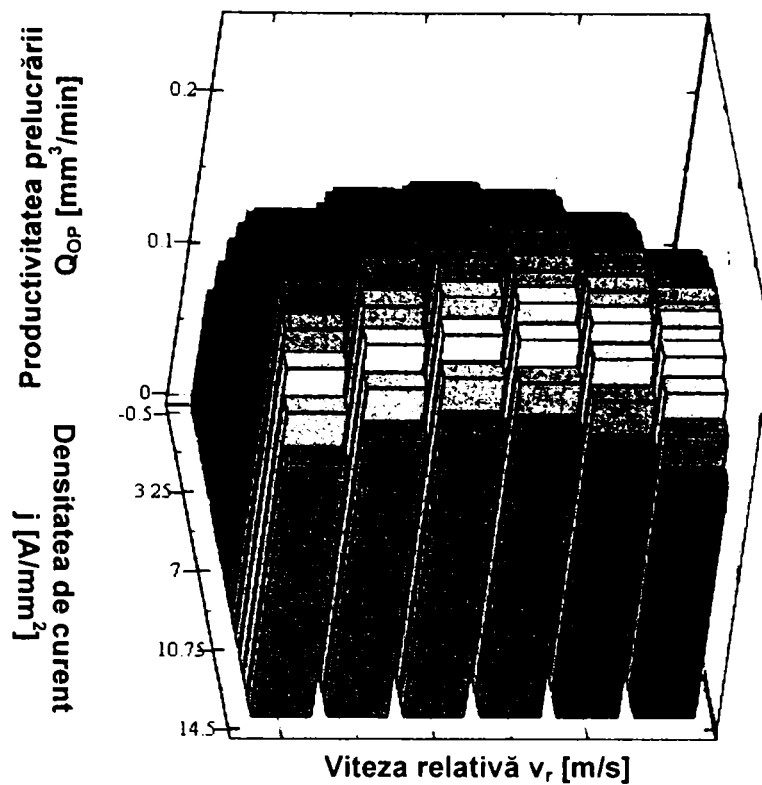


Figura 4.43. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P20 cu OT din cupru

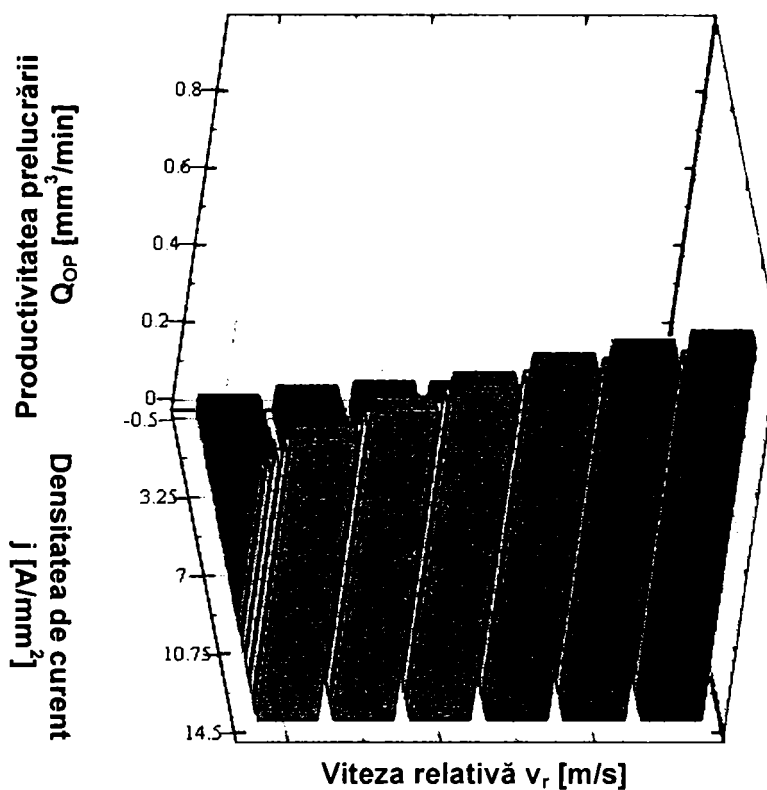


Figura 4.44. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P20 cu OT din Fc

-OT din cupru (figura 4.43):

$$Q_{OP} = -0.1302 + 2.5151 \cdot j + 0.0076 \cdot v_r - 5.041 \cdot j^2 - 0.0003 \cdot v_r^2 + 0.0038 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.76)$$

-OT din fontă cenușie (figura 4.44):

$$Q_{OP} = 0.0233 - 1.1518 \cdot j + 0.0089 \cdot v_r + 7.5505 \cdot j^2 - 0.0004 \cdot v_r^2 + 0.0448 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.77)$$

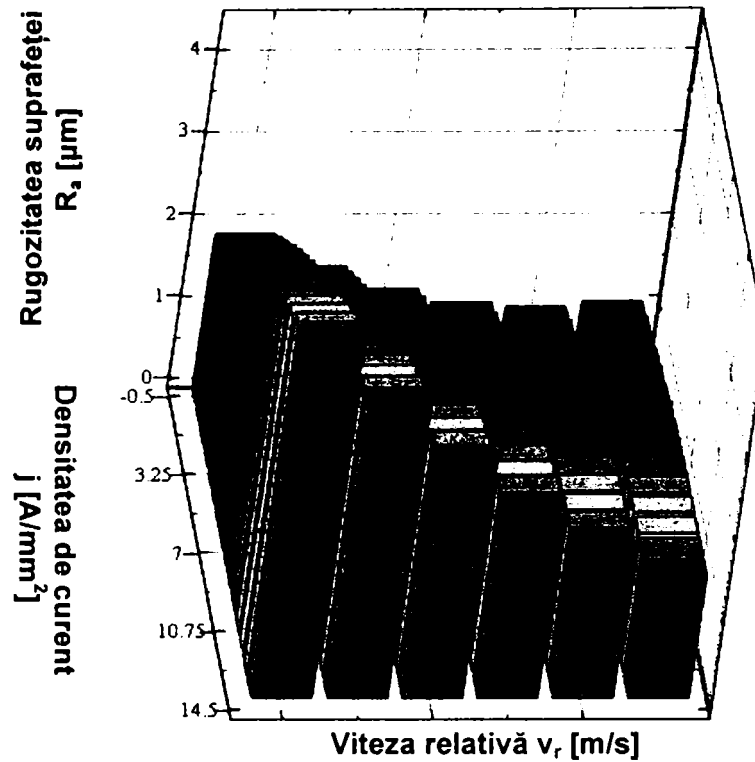


Figura 4.45. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P20 cu OT din OL37

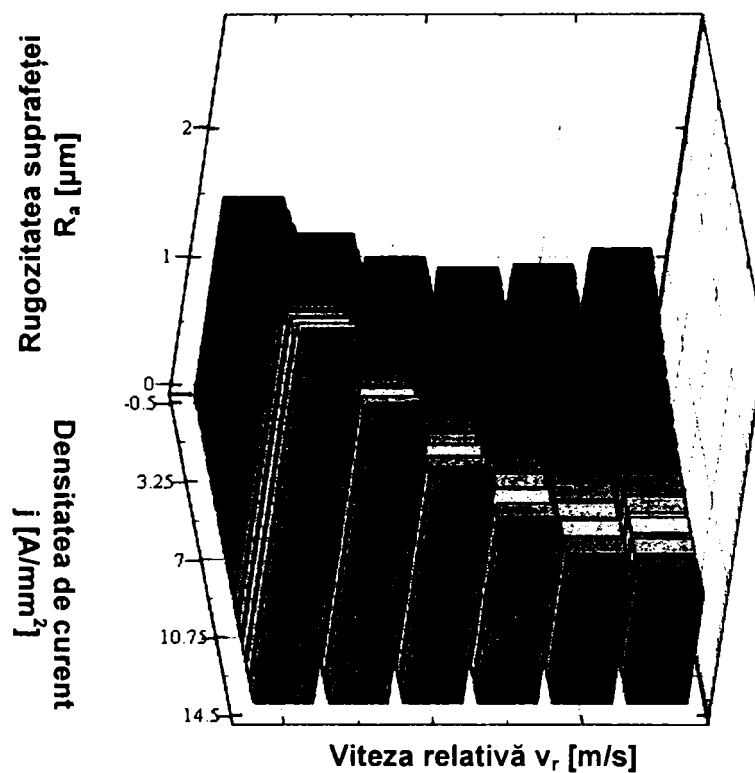


Figura 4.46. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P20 cu OT din cupru

- pentru dependența R_a de j și v_r , la debitarea carburii metalice P20 ([Lan86]):
-OT din OL37 (figura 4.45):

$$R_a = 1.6235 + 14.0559 \cdot j - 0.1275 \cdot v_r - 6.9181 \cdot j^2 + 0.0036 \cdot v_r^2 - 0.3673 \cdot j \cdot v_r [\mu\text{m}] \quad (4.78)$$

- OT din cupru (figura 4.46):

$$R_a = 1.8481 + 3.5456 \cdot j - 0.1004 \cdot v_r + 5.9214 \cdot j^2 + 0.0032 \cdot v_r^2 - 0.2761 \cdot j \cdot v_r [\mu\text{m}] \quad (4.79)$$

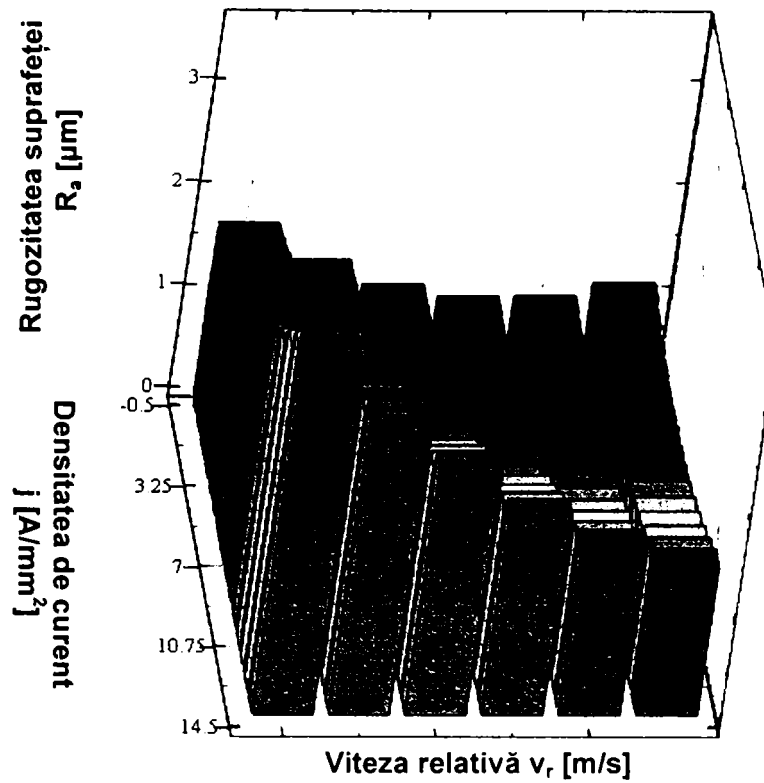


Figura 4.47. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P20 cu OT din Fc

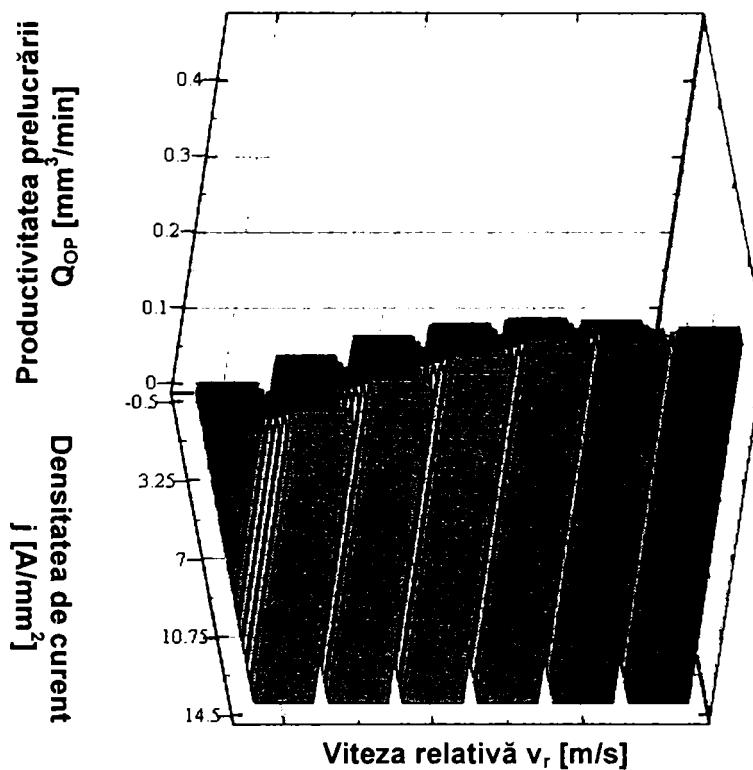


Figura 4.48. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P30 cu OT din OL37

-OT din fontă cenușie (figura 4.47):

$$R_a = 2.2309 + 1.8476 \cdot j - 0.1281 \cdot v_r + 14.632 \cdot j^2 + 0.0038 \cdot v_r^2 - 0.2756 \cdot j \cdot v_r [\mu m] \quad (4.80)$$

- pentru dependența Q_{OP} de j și v_r , la debitarea carburii metalice P30 ([Lan86]):
-OT din OL37 (figura 4.48):

$$Q_{OP} = -0.1168 + 0.6536 \cdot j + 0.0133 \cdot v_r + 1.2880 \cdot j^2 - 0.0003 \cdot v_r^2 + 0.005 \cdot j \cdot v_r [mm^3/min] \quad (4.81)$$

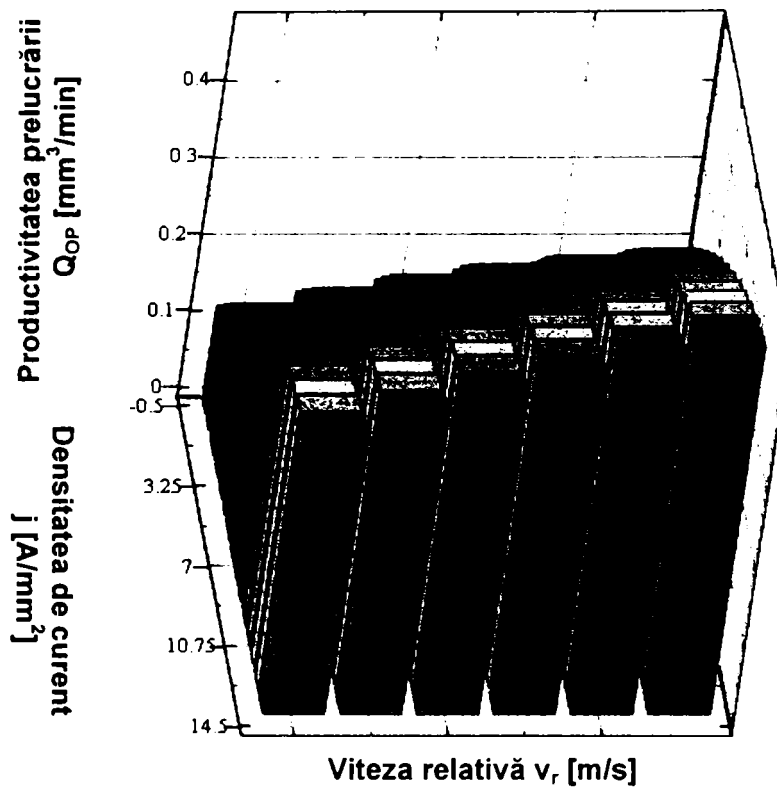


Figura 4.49. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P30 cu OT din cupru

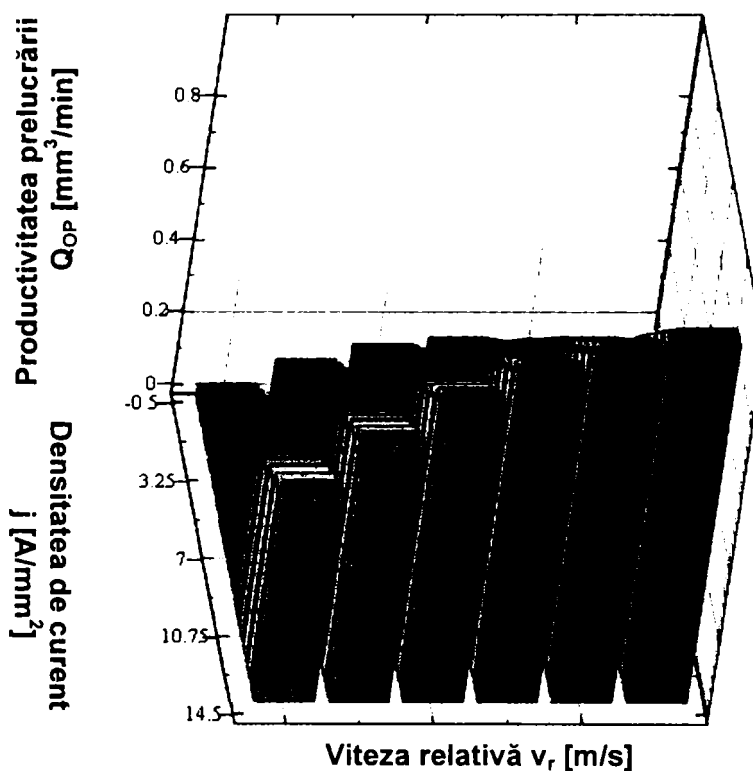


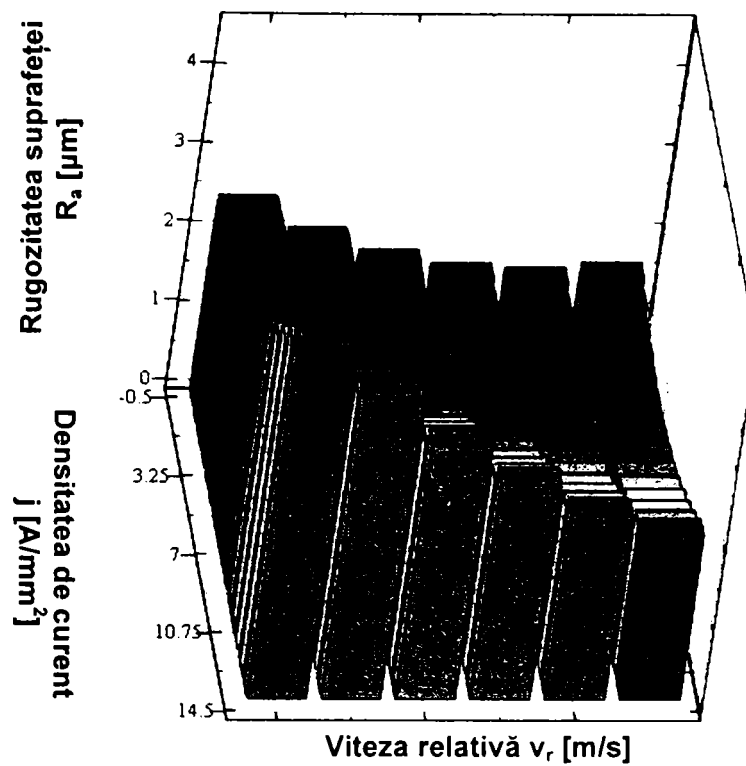
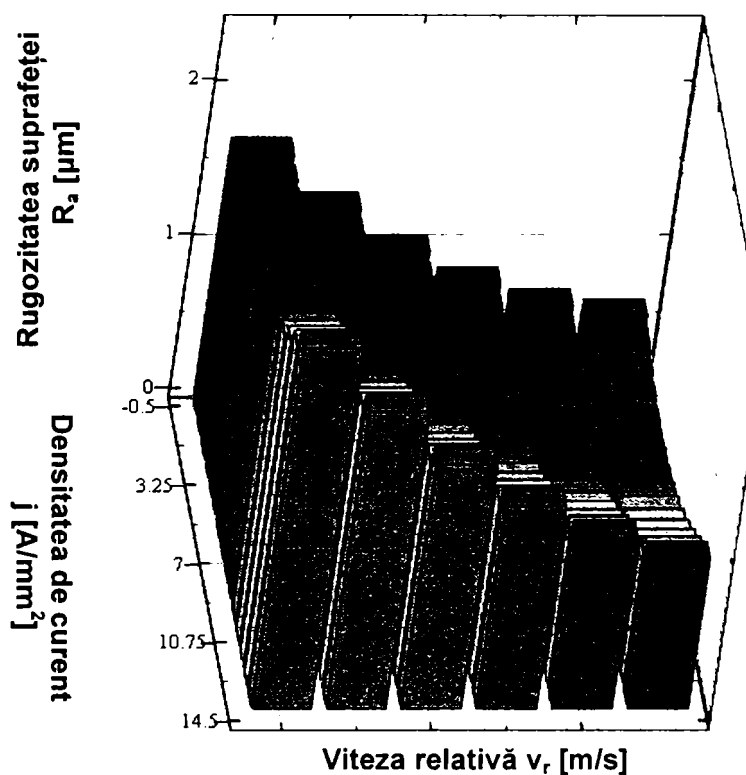
Figura 4.50. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P30 cu OT din Fc

-OT din cupru (figura 4.49):

$$Q_{OP} = -0.0503 + 1.8925 \cdot j + 0.0057 \cdot v_r - 2.2788 \cdot j^2 - 0.0001 \cdot v_r^2 + 0.0078 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.82)$$

-OT din fontă cenușie (figura 4.50):

$$Q_{OP} = -0.2545 + 1.7228 \cdot j + 0.025 \cdot v_r - 0.3482 \cdot j^2 - 0.0008 \cdot v_r^2 + 0.0604 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.83)$$

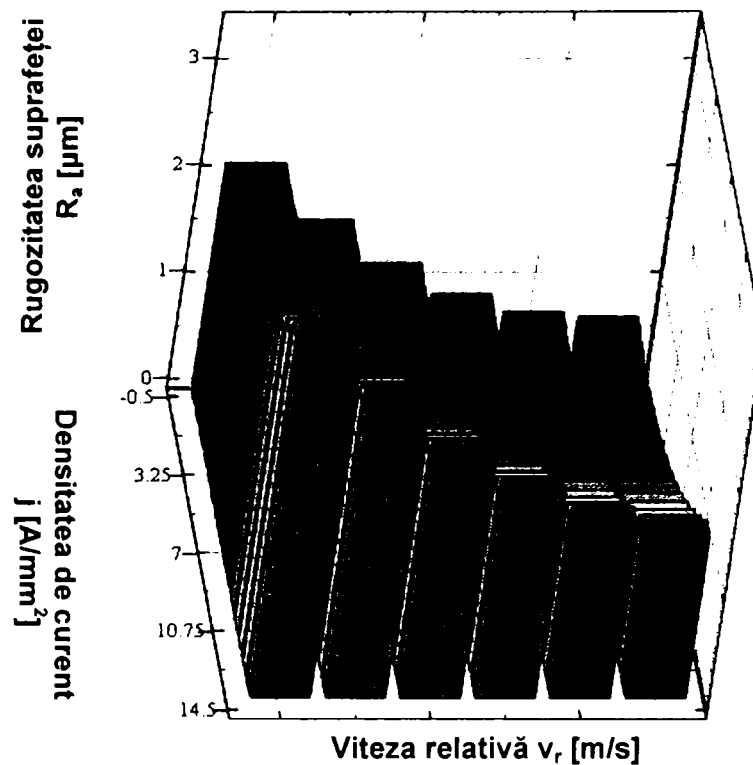
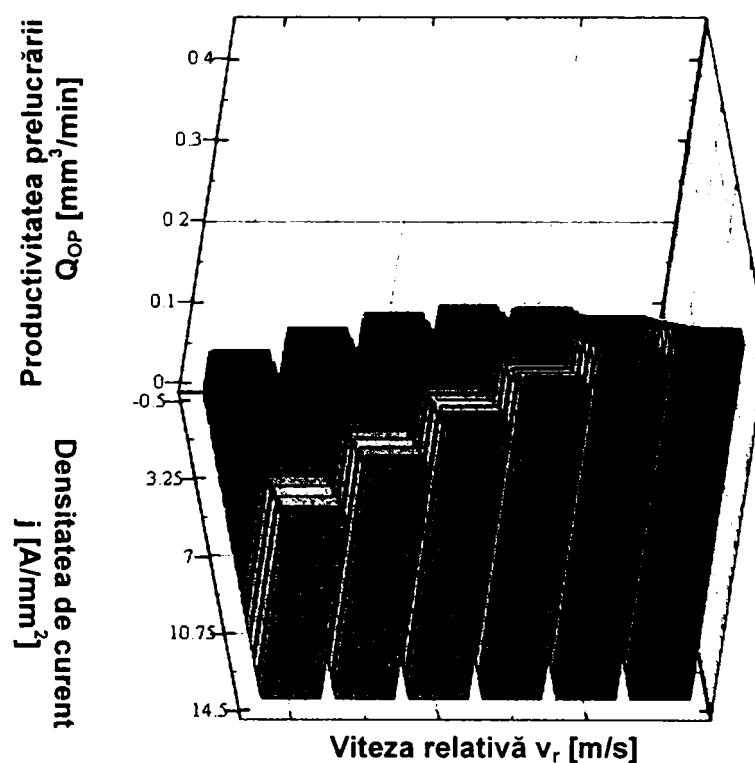

 Figura 4.51. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carbunii metalice P30 cu OT din OL37

 Figura 4.52. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carbunii metalice P30 cu OT din cupru

- pentru dependența R_a de j și v_r , la debitarea P30 ([Lan86]):
 -OT din OL37 (figura 4.51):

$$R_a = 3.2516 - 1.6534 \cdot j - 0.1338 \cdot v_r + 24.2037 \cdot j^2 + 0.0036 \cdot v_r^2 - 0.2861 \cdot j \cdot v_r \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.84)$$

- OT din cupru (figura 4.52):

$$R_a = 2.5603 - 3.8025 \cdot j - 0.1181 \cdot v_r + 14.7901 \cdot j^2 + 0.0022 \cdot v_r^2 - 0.0584 \cdot j \cdot v_r \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.85)$$


 Figura 4.53. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P30 cu OT din Fc

 Figura 4.54. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P40 cu OT din OL37

-OT din fontă cenușie (figura 4.53):

$$R_a = 3.2751 - 3.0322 \cdot j - 0.188 \cdot v_r + 17.7622 \cdot j^2 + 0.0038 \cdot v_r^2 - 0.0709 \cdot j \cdot v_r \quad [\mu\text{m}] \quad (4.86)$$

• pentru dependența Q_{OP} de j și v_r , la debitarea carburii metalice P40 ([Lan86]):
-OT din OL37 (figura 4.54):

$$Q_{OP} = -0.0303 + 0.2857 \cdot j + 0.0092 \cdot v_r + 0.24 \cdot j^2 - 0.0003 \cdot v_r^2 + 0.032 \cdot j \cdot v_r \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (4.87)$$

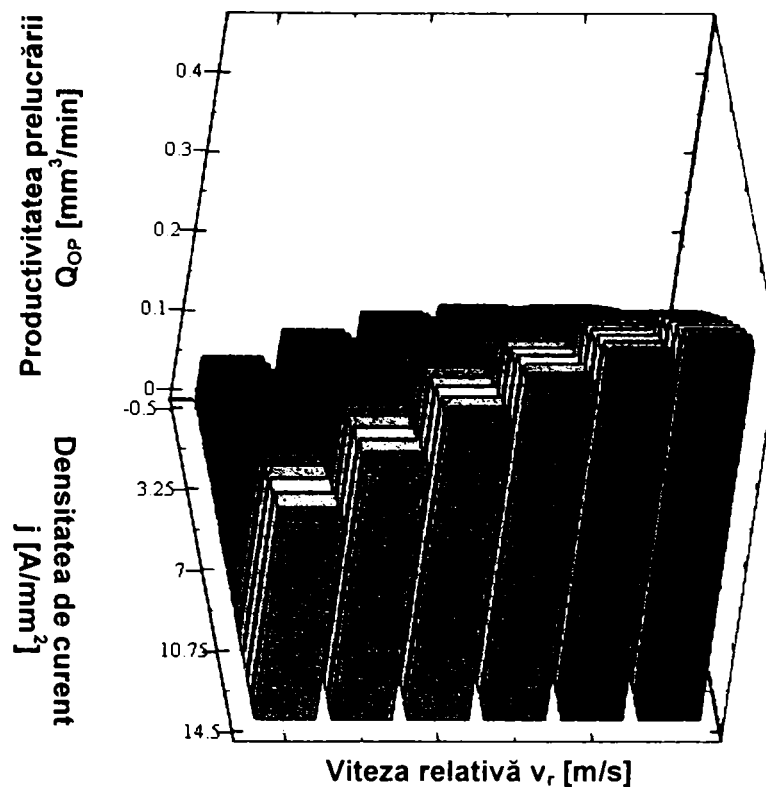


Figura 4.55. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carbunii metalice P40 cu OT din cupru

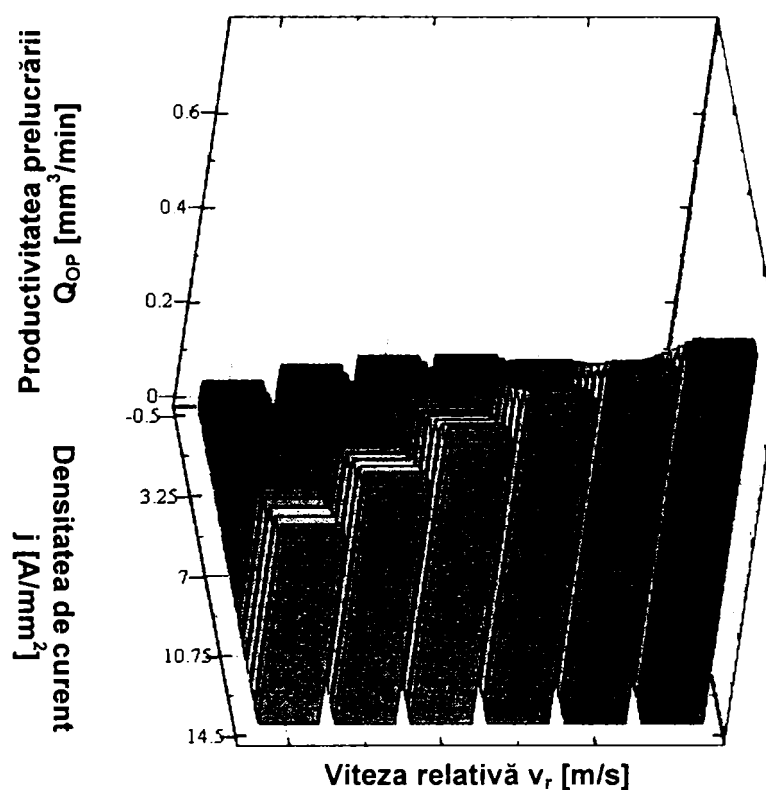


Figura 4.56. Dependența $Q_{OP}=f(j, v_r)$ pentru debitarea carbunii metalice P40 cu OT din Fc

-OT din cupru (figura 4.55):

$$Q_{OP} = -0.0887 + 0.9266 \cdot j + 0.0127 \cdot v_r - 1.0121 \cdot j^2 - 0.0004 \cdot v_r^2 + 0.0307 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.88)$$

-OT din fontă cenușie (figura 4.56):

$$Q_{OP} = -0.074 + 0.5542 \cdot j + 0.0113 \cdot v_r + 0.4995 \cdot j^2 - 0.0005 \cdot v_r^2 + 0.0679 \cdot j \cdot v_r \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.89)$$

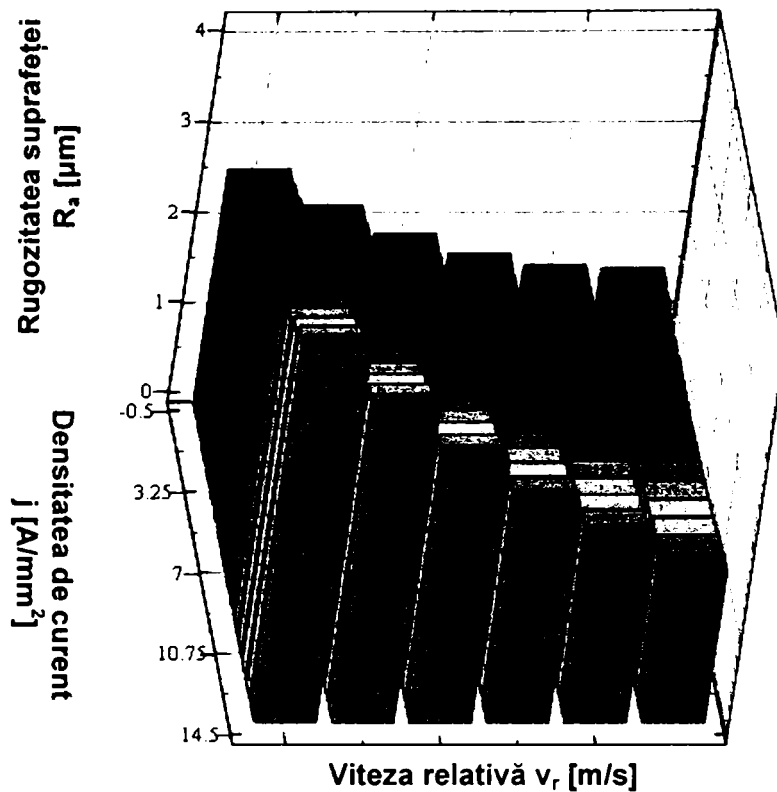


Figura 4.57. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P40 cu OT din OL37

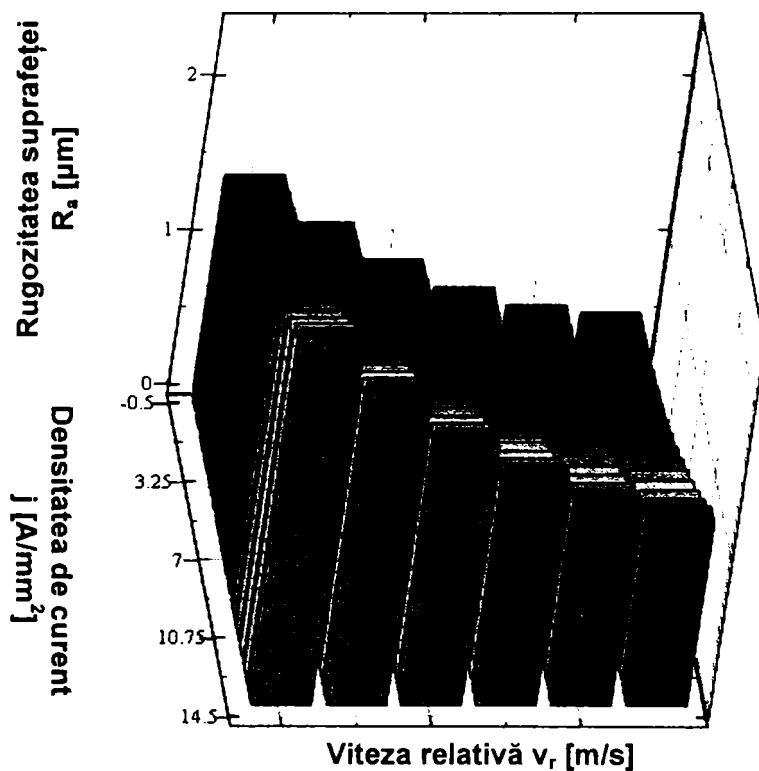


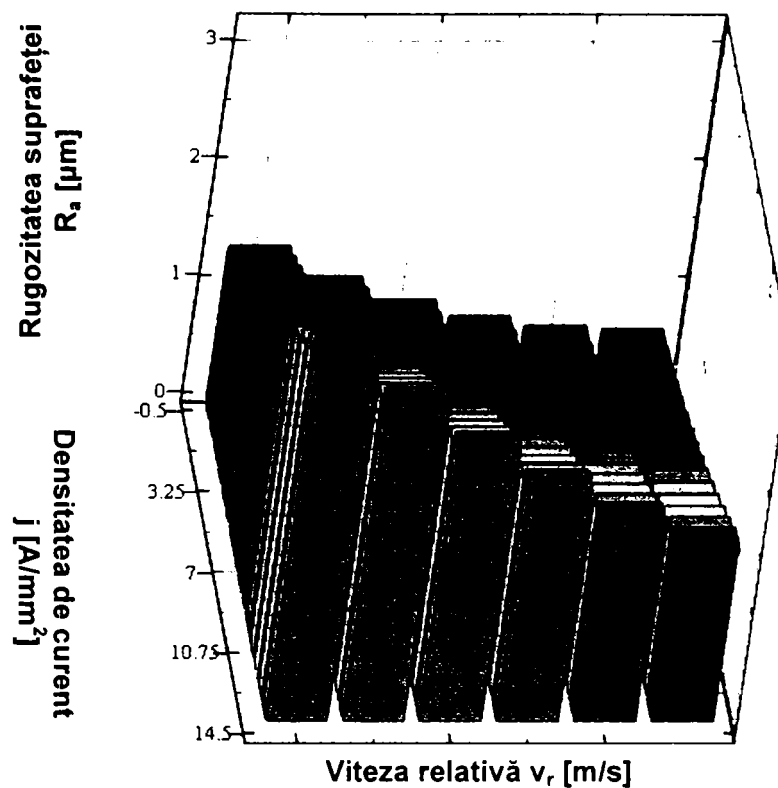
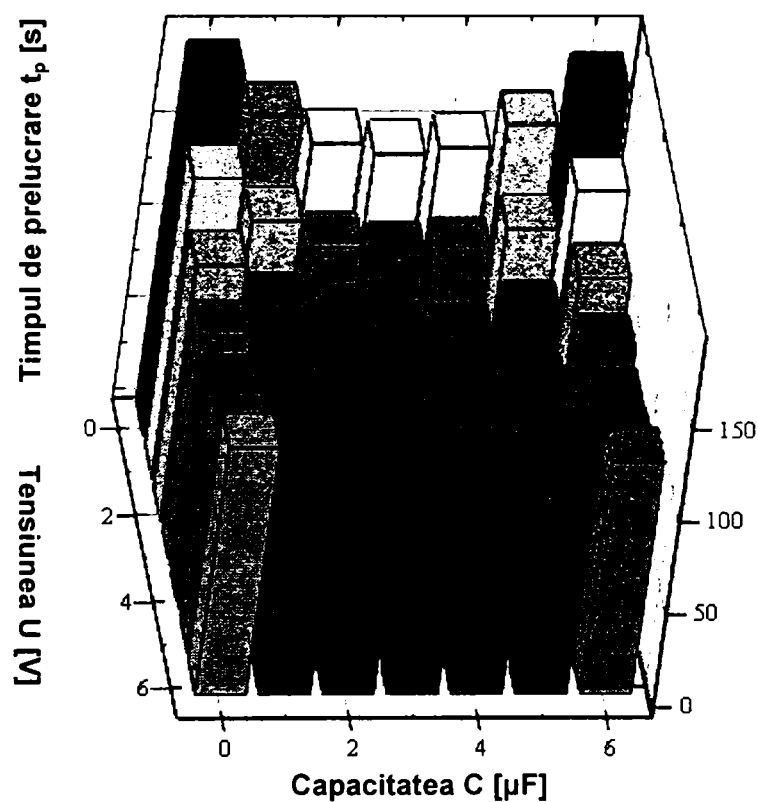
Figura 4.58. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P40 cu OT din Cu

- pentru dependența R_a de j și v_r , la debitarea carburii metalice P40 ([Lan86]):
-OT din OL37 (figura 4.57):

$$R_a = 3.0375 + 3.7564 \cdot j - 0.1289 \cdot v_r + 6.8192 \cdot j^2 + 0.0029 \cdot v_r^2 - 0.2356 \cdot j \cdot v_r [\mu\text{m}] \quad (4.90)$$

- OT din cupru (figura 4.58):

$$R_a = 1.947 + 0.1257 \cdot j - 0.1049 \cdot v_r + 7.6827 \cdot j^2 + 0.002 \cdot v_r^2 - 0.0462 \cdot j \cdot v_r [\mu\text{m}] \quad (4.91)$$


 Figura 4.59. Dependența $R_a=f(j, v_r)$ pentru debitarea carburii metalice P40 cu OT din Fc

 Figura 4.60. Dependența $t_p=f(U, C)$ pentru debitarea 7NiCr180

-OT din fontă cenușie (figura 4.59):

$$R_a = 1.4154 + 4.753 \cdot j - 0.0793 \cdot v_r + 6.0122 \cdot j^2 + 0.0018 \cdot v_r^2 - 0.1663 \cdot j \cdot v_r \quad [\mu\text{m}] \quad (4.92)$$

- pentru dependența t_p de U și C , la debitarea 7NiCr180 ([IP81], figura 4.60):

$$t_p = 783.0464 - 43.8106 \cdot U - 0.0029 \cdot C + 0.7217 \cdot U^2 + 5 \cdot 10^{-8} \cdot C^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot U \cdot C \quad [\text{s}] \quad (4.93)$$

Capitolul 5.

SISTEM INFORMATIC PENTRU OPTIMIZAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALĂ PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ COMPLEXĂ

Programele care pot fi utilizate în asociere cu procesul de prelucrare prin eroziune electrică complexă pot avea următoarele utilizări ([Kar02], figura 5.2):

- **conducerea procesului.** Aceste programe se referă la utilizarea unui calculator care preia date de la mașina de prelucrare și le interpretează astfel încât să obțină comenzi adresate mașinii prin care să se obțină (eventual în condiții mai bune) rezultatul dorit. Astfel de programe se pot regăsi în [BD73, L+96, PSA98, RL98, RLS98, RLS99, TIS99];
- **stabilirea modelului matematic al prelucrării.** Aceste programe se referă la interpretarea statistică a rezultatelor experimentale și la determinarea, pe baza unui număr suficient de mare de informații, a unui model matematic care să reflecte evoluția procesului. Astfel de programe se regăsesc în lucrări ca [BC98a, BC98b, Bul00, CMS98, Her95, Kar02, KN01, NBT99, NK01, NT98, O+99, Ros97, Tit04, Tit98, TN98] (figura 5.1);
- **evidența rezultatelor prelucrării.** Aceste programe se referă la evidența rezultatelor experimentale și prelucrarea lor statistică, folosind pentru aceasta instrumente de lucru ale statisticii: teste de validare, teste și criterii de concordanță etc. Astfel de programe sunt prezentate în [Her95, Kar02, NT01, NO99, NT98, Ola99, OO99, O+99, Tit98, TN98].

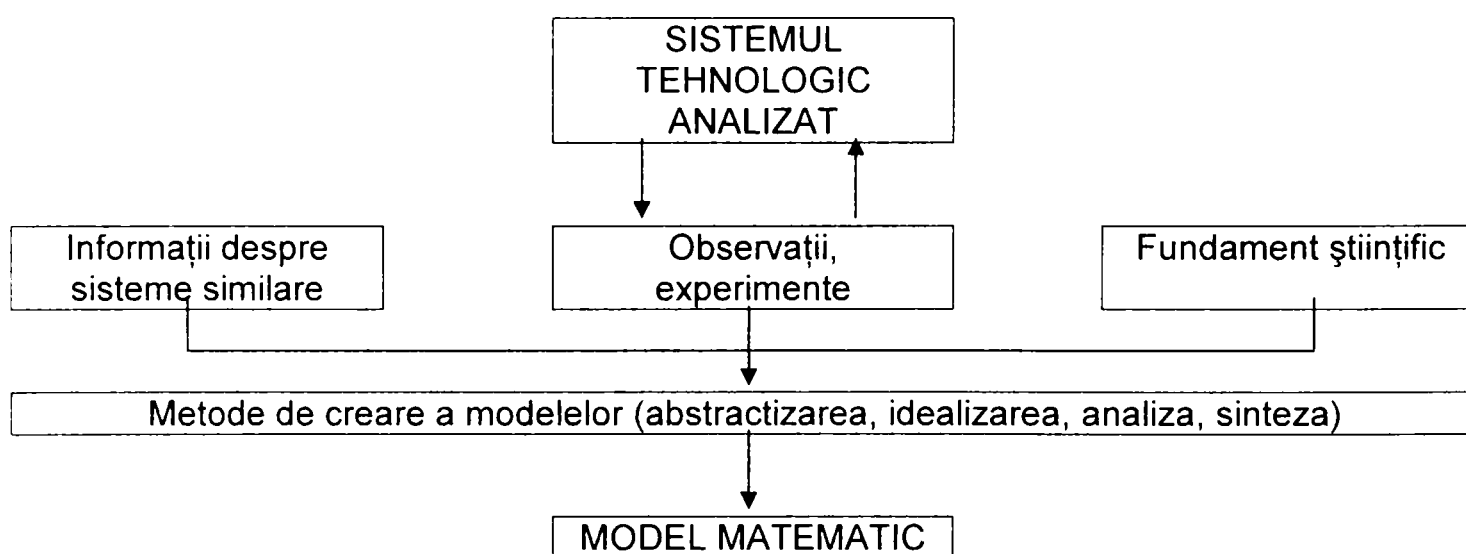


Figura 5.1. Schema determinării modelului matematic (după [Cic99, Tit04])

Lucrarea de față propune un sistem informatic care să reunească informațiile experimentale existente (cu posibilitatea completării ulterioare) despre operațiile de prelucrare prin EEC într-o bază de date care să poată fi exploatată de utilizatorii care doresc:

- să efectueze noi încercări practice, prin asigurarea unui program de experiment activ care să permită executarea unui număr cât mai mic de încercări pentru informații cât mai bogate;

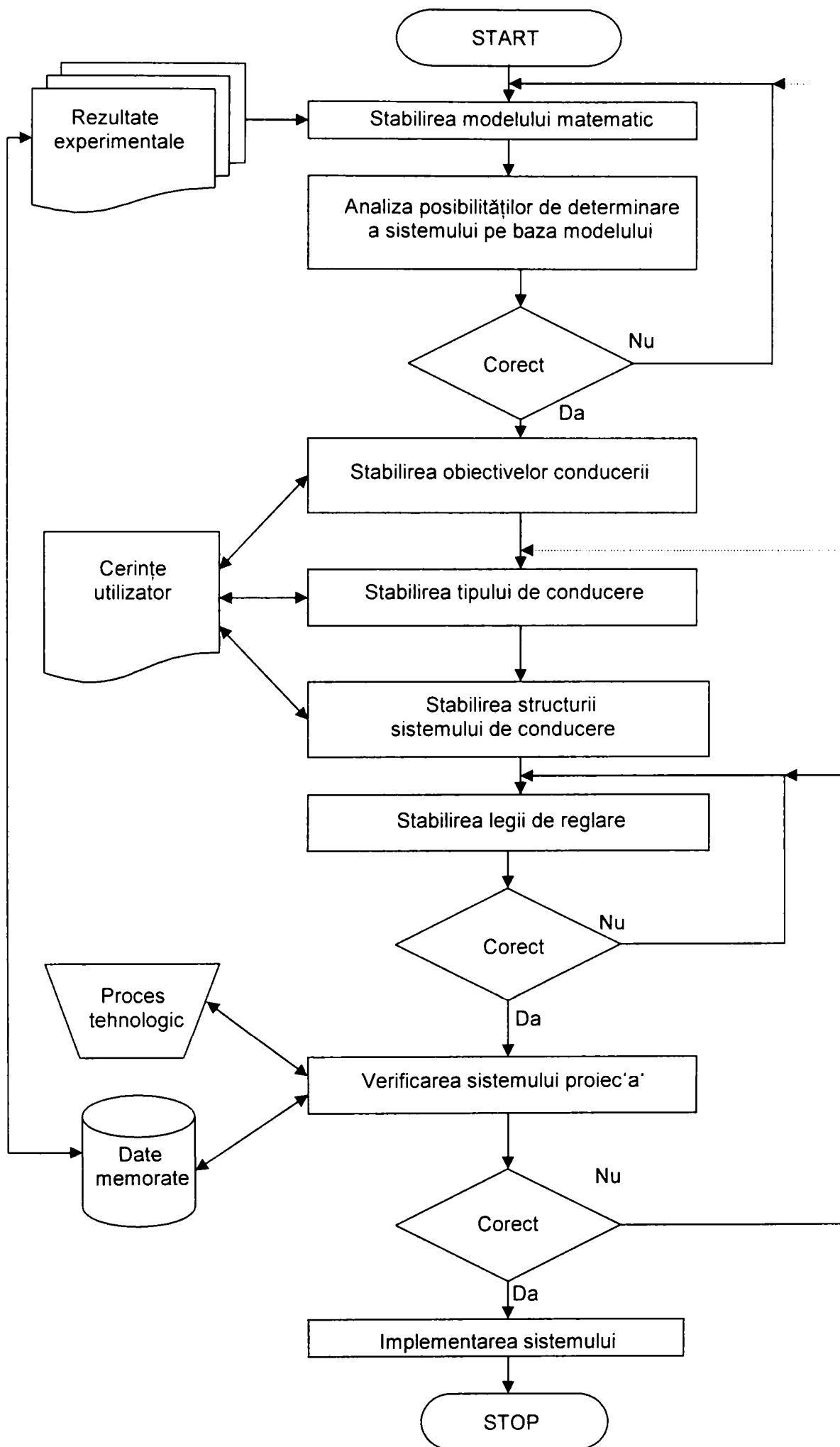


Figura 5.2. Algoritm de optimizare a conducerii procesului tehnologic

- să obțină un model matematic al dependenței parametrilor tehnologici de factorii de intrare;
- să efectueze o operație de prelucrare în condițiile optime stabilite de către sistemul informatic;
- să obțină informații despre experimentele efectuate și rezultatele acestora.

Pentru realizarea acestui sistem informatic am urmărit, pe de o parte, elaborarea algoritmilor necesari, pe de altă parte definirea bazei de date informaționale și încărcarea ei cu informații.

5.1. ALGORITMI DE PLANIFICARE A EXPERIMENTELOR

Rezultatele experimentale pe care utilizatorul le folosește pentru stabilirea modelului matematic al procesului tehnologic sunt obținute în urma unui număr mare de experimente, realizate pentru diferite valori ale parametrilor reglabili ai procesului (numiți în continuare **factori de intrare**) și care permit obținerea valorilor pentru caracteristicile tehnico-economice măsurate (numite în continuare **indicatori tehnologici**).

Experimentările se efectuează, așa cum am arătat și în paragraful 3.2, fie aleator, alegând diferite regimuri de lucru, fie programat, când valorile factorilor de intrare sunt alese pentru a minimiza numărul de experiențe.

Această din ultimă situație poartă denumirea de **experiment activ**. Un astfel de experiment se poate aplica atunci când numărul factorilor de intrare este mare iar verificarea tuturor combinațiilor posibile este, prin urmare, îndelungată. Formula de calcul a numărului combinațiilor experimentale este:

$$N = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_m \quad (5.1)$$

unde prin N_k am notat numărul de valori stabilite pentru factorul de intrare numărul k , din totalul de m factori de intrare.

De exemplu, dacă se dorește urmărirea t_p la o operație de debitare, prin reglarea U (5 valori), R (5 valori), L (5 valori), C (5 valori), conform (5.1) numărul total de experimente care trebuie efectuate este $N = 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 = 625$; la un timp mediu de 5 min/experiment, aceasta ar însemna 52 ore de muncă, fără a ține cont de timpii intermediari necesari curățirii mașinii, schimbării OT uzat, prelucrării LL ș.a.m.d.

Cheltuielile de orice fel (timp, materiale, ore-muncă etc.) implicate de un astfel de experiment pot fi evitate aplicând teoria matematică a experimentului ([Tit04]). Prin aceasta, experimentul este programat folosind un plan stabilit anterior, optim din punct de vedere al algoritmului de modificare a factorilor de intrare.

O variantă de experiment activ, citată de literatura de specialitate ([Cic99, Gro01, Her95, Tit04, Tal87, Tur03]) este **experimentul factorial**, care pentru fiecare factor de intrare presupune alegerea doar a două valori posibile, codificate prin -1 (pentru nivelul inferior) și $+1$ (pentru nivelul superior). Experimentul factorial necesită efectuarea a:

$$N = 2^m \quad (5.2)$$

măsurări, unde m este numărul de factori de intrare.

Cele două valori ale fiecărui factor de intrare, notate în experimentul factorial cu $+1$ respectiv -1 , corespund limitelor maxime și minime alese pentru variația factorului de intrare. Dacă în realitate aceste două limite au o anumită valoare și o unitate de măsură

(ce corespunde definiției factorului de intrare), în timpul experimentului factorial ele sunt înlocuite prin valorile +1 și -1 și nu au unitate de măsură.

Pentru exemplul prezentat anterior, numărul de experimente va fi în acest caz $N = 2^5 = 32$, adică un timp de nici 3 ore față de cele 52 ore determinate prin experiment aleator. Tabelul care conține valorile parametrilor de intrare și zona rezervată pentru valorile determinate experimental ale indicatorilor tehnologici are forma din tabelul 5.1.

Tabelul 5.1. Matricea program a experimentului factorial complet

Factori de intrare				Parametri tehnologici			
x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	...	y_n
-1	-1	-1	-1				
-1	-1	-1	+1				
-1	-1	+1	-1				
-1	-1	+1	+1				
-1	+1	-1	-1				
-1	+1	-1	+1				
-1	+1	+1	-1				
-1	+1	+1	+1				
+1	-1	-1	-1				
+1	-1	-1	+1				
+1	-1	+1	-1				
+1	-1	+1	+1				
+1	+1	-1	-1				
+1	+1	-1	+1				
+1	+1	+1	-1				
+1	+1	+1	+1				

Dacă încercările experimentale se efectuează pentru toate cele 2^m combinații posibile ale factorilor de intrare, experimentul factorial se numește **complet**, în caz contrar fiind numit **incomplet** sau **fracționat**.

La fiecare experiment se efectuează mai multe replici, pentru a se elimina erorile întâmplătoare care ar putea afecta rezultatul.

Având în vedere că, din punct de vedere informatic, combinațiile de 0 și 1 din tabelul 1 reprezintă valorile lui 0, 1, 2, ..., $2^m - 1$ scrise în sistemul de numerație cu baza 2, generarea matricei program a experimentului factorial complet revine la algoritmul de reprezentare binară a unor numere zecimale, adică:

```
function trecel0in2(n, lungime:integer):string;
var i,m:integer;
    s:string;
begin
    m:=n;
    s:='';
    repeat
        if m mod 2=0 then begin s:='0'+s; m:=m div 2 end
            else begin s:='1'+s; m:=m div 2 end;
    until {m=0;} length(s)=lungime;
    trecel0in2:=s;
end;
```

Deoarece implementarea algoritmului se face pe calculator, am utilizat în secvența de program codificările 0 și respectiv 1, pe care le-am considerat a simboliza valorile -1 respectiv +1.

Un astfel de experiment factorial complet se poate utiliza pentru a obține datele necesare generării unui model matematic al dependenței indicatorilor tehnologici de

factorii de intrare. Experimentul factorial complet care generează cele 2^m combinații posibile ale valorilor +1 și -1 permite determinarea coeficienților polinomiali care intervin în formula modelului, de exemplu:

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot x_j \quad (5.3)$$

În această formulă sunt explicitate doar dependențele factorilor de intrare x_1, x_2, \dots asupra indicatorului tehnologic y . Dacă se dorește introducerea în formulă și a altor factori de intrare suplimentari sau a influenței reciproce între factorii deja luați în calcul, aceasta presupune reluarea experimentelor după un plan extins. În această nouă situație, o parte dintre influențe sunt deja determinate prin experimentul factorial complet efectuat, deci reluarea lor nu are rost deoarece nu aduce noi informații. Un astfel de experiment se numește **fracționat** și constă în actualizarea matricei program ca în tabelul 5.2 în care la cei patru factori de intrare s-au mai adăugat și dependențele între x_1 și x_2 , x_2 și x_3 respectiv x_3 și x_4 :

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot x_j + a_{m+1} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{m+2} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{m+3} \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (5.4)$$

Tabelul 5.2. Matricea program a experimentului factorial fracționat

Factori de intrare							Parametri tehnologici			
x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \leftrightarrow x_2$	$x_2 \leftrightarrow x_3$	$x_3 \leftrightarrow x_4$	y_1	y_2	...	y_n
-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1				
-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1				
-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1				
-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1				
-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1				
-1	+1	-1	+1	-1	-1	-1				
-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1				
-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1				
+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1				
+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1				
+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1				
+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1				
+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1				
+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1				
+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1				
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1				

Obținerea valorilor de +1 sau -1 corespunzătoare coloanei care indică dependența a doi factori x_i și x_j se face prin produsul valorilor corespunzătoare din cele două coloane x_i și x_j .

Așa cum se poate observa, acest program necesită efectuarea tot a 2^m experimente dar permite determinarea coeficienților modelului regresional (5.4).

Am decis aplicarea acestor metode de planificare a experimentelor pentru debitarea prin EEC deoarece ele au fost aprofundate și aplicate cu rezultate foarte bune în literatura de specialitate, mai ales în [Cic99, Her95, Kar04b, Tit04].

5.2. ALGORITMI DE PRELUCRARE A DATELOR EXPERIMENTALE

După stabilirea programului de experimentări, acestea se efectuează iar rezultatele lor se înscriu în tabele similare lui 5.1 sau 5.2.

Deoarece pentru fiecare experiment în parte se efectuează mai multe replici, se pune problema care dintre acestea este rezultatul care urmează a se lua în considerare. Există aici mai multe metode bazate pe statistica matematică printre care:

- se face media tuturor valorilor măsurate; are dezavantajul că prezența unei măsurători greșite, foarte departe ca valoare de celelalte măsurători, modifică media spre valoarea respectivă;
- se aleg valorile care au apariții multiple; are dezavantajul că necesită un număr mare de replici.

O metodă statistică de determinare a valorilor corecte și eliminarea celor problematice este bazată ([Cic99, Her95, Lun01, R+84, Tal87]) pe compararea dispersiilor. Aceasta se aplică asupra măsurătorilor individuale în comparație cu media măsurătorilor și indică dacă rezultatul individual concordă cu cel mediu (deci este corect) sau este diferit (deci incorect). Metoda se aplică prelucrărilor prin EEC deoarece experimentele în acest caz se efectuează cu un număr de replici (3-5) și este necesar a se stabili dacă acestea sunt sau nu corect determinate.

Pentru aplicarea acestei metode se calculează dispersia de selecție pentru fiecare selecție în parte (de exemplu, pentru toate replicile aceluiași experiment):

$$S_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, i = 1, 2, \dots, k \quad (5.5)$$

unde am notat cu $i=1, k$ experimentele, cu n_i numărul de replici ale aceluiași experiment, cu \bar{y}_i valoarea medie a rezultatelor pentru un experiment, cu y_{ij} rezultatele la fiecare replică j a fiecărui experiment i iar cu S_i^2 dispersia experimentului i .

Se determină în continuare dispersia de selecție totală ca medie aritmetică ponderată a dispersiilor pentru fiecare selecție în parte:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k S_i^2 \cdot f_i}{\sum_{i=1}^k f_i}, \quad f_i = n_i - 1 \quad (5.6)$$

după care se aplică criteriul Bartlett (care verifică dacă dispersiile sunt sau nu egale, [Cic99]) care necesită determinarea valorii:

$$\chi^2 = \frac{2,30259}{\frac{\sum_{i=1}^k \frac{1}{f_i} - \frac{1}{f}}{3(k-1)} + 1} (f \cdot \lg S^2 - \sum_{i=1}^k f_i \cdot \lg S_i^2), \quad f = \sum_{i=1}^k f_i \quad (5.7)$$

care urmează repartiția χ^2 cu $k-1$ grade de libertate ([CEB86]).

Dacă, în particular, numărul de replici a fost constant $n_1=n_2=\dots=n$, atunci formula de mai sus se poate rescrie:

$$\chi^2 = \frac{2,30259}{\frac{k+1}{3k(n-1)} + 1} k(n-1) \left(\lg S^2 - \frac{\sum_{i=1}^k S_i^2}{k} \right) \quad (5.8)$$

În baza acestei formule se poate determina dacă valorile utilizate în calcul sunt omogene sau nu; pentru aceasta, alegând pragul de semnificație $q_1=0,05$ ($P=1-q_1/2=0,975$) pentru care din repartiția χ^2 se determină χ^2_{tabelat} (care depinde de valoarea lui n) și dacă $\chi^2_{\text{calculat}} < \chi^2_{\text{tabelat}}$ atunci ipoteza se acceptă (rezultatele sunt omogene). În caz contrar, se elimină rezultatele cu dispersia cea mai mare (ele nu sunt corespunzătoare) și se reiau calculele pentru cele $k-1$ experimente rămase. Procedul este iterativ și se încheie când au fost eliminate (dacă a fost nevoie) toate replicile care alterează omogenitatea rezultatului.

Dacă ipoteza este satisfăcută atunci se poate calcula estimația:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^k n_i - 1} \quad (5.9)$$

care aproximează dispersia întregului ansamblu de date experimentale.

Algoritmul care implementează verificarea omogenității experimentelor este:

```

program Bartlett;
uses crt;
type matricer=array[1..10,1..10]of real;
      vectorr=array[1..10]of real;
      vectori=array[1..10]of integer;
var fis:text;
    x,si2:vectorr;
    y:matricer;
    ni:vectori;
    ymed,s2,hi2,hi2tabelat:real;
    i,j,k,n,pozitie:integer;
begin
  clrscr;
  assign(fis,'Bartlett.txt'); rewrite(fis);
  write('Introduceti numarul de experimente:'); readln(k);
  for i:=1 to k do
    begin
      write('Introduceti numarul de replici ale experimentului ',i,'=');
      readln(ni[i]);
      write('      x['',i,'']='); readln(x[i]);
      writeln('Introduceti replicile:');
      for j:=1 to ni[i] do
        begin
          write('      y['',i,'','',j,'']='); readln(y[i,j]);
        end;
      end;
    repeat
      writeln;
      writeln(fis);
      writeln('Date de intrare:');
      writeln(fis,'Date de intrare:');
      for i:=1 to k do
        begin

```

```

writeln('Experimentul ',i);
writeln(fis,'Experimentul ',i);
write(x[i]:9:4,'->');
write(fis,x[i]:9:4,'->');
for j:=1 to ni[i] do write(y[i,j]:9:4);
for j:=1 to ni[i] do write(fis,y[i,j]:9:4);
writeln;
writeln(fis);
end;
for i:=1 to k do
begin
ymed:=0;
for j:=1 to ni[i] do ymed:=ymed+y[i,j];
ymed:=ymed/ni[i];
si2[i]:=0;
for j:=1 to ni[i] do si2[i]:=si2[i]+(y[i,j]-ymed)*(y[i,j]-ymed);
si2[i]:=si2[i]/(ni[i]-1);
writeln('Experimentul ',i,' dispersia=',si2[i]);
writeln(fis,'Experimentul ',i,' dispersia=',si2[i]);
end;
s2:=0; n:=0;
for i:=1 to k do
begin
s2:=s2+si2[i]*(ni[i]-1);
n:=n+(ni[i]-1);
end;
s2:=s2/n;
writeln('Dispersia totala=',s2);
writeln(fis,'Dispersia totala=',s2);
ymed:=0;
for i:=1 to k do ymed:=ymed+1/(ni[i]-1);
hi2:=2.30259/((ymed-1/n)/3/(k-1)+1);
ymed:=0;
for i:=1 to k do ymed:=ymed+(ni[i]-1)*(ln(si2[i])*0.4342944818);
hi2:=hi2*(n*(ln(s2)*0.4342944818)-ymed);
writeln('Variabila hi2=',hi2);
writeln(fis,'Variabila hi2=',hi2);
writeln;
writeln(fis);
if (k-1)=1 then hi2tabelat:=5.02;
if (k-1)=2 then hi2tabelat:=7.38;
if (k-1)=3 then hi2tabelat:=9.35;
if (k-1)=4 then hi2tabelat:=11.1;
if (k-1)=5 then hi2tabelat:=12.8;
if (k-1)=6 then hi2tabelat:=14.4;
if (k-1)=7 then hi2tabelat:=16.0;
if (k-1)=8 then hi2tabelat:=17.5;
if (k-1)=9 then hi2tabelat:=19.0;
if (k-1)=10 then hi2tabelat:=20.5;
if hi2<hi2tabelat then
begin
writeln('Selectia respecta criteriul de omogenitate');
writeln(fis,'Selectia respecta criteriul de omogenitate');
end
else
begin
ymed:=-1; pozitie:=0;
for i:=1 to k do
if si2[i]>ymed then begin ymed:=si2[i]; pozitie:=i; end;
writeln('Selectia nu respecta criteriul de omogenitate');
writeln('Se elimina dispersia cea mai mare (' ,pozitie,')');
for i:=pozitie+1 to k do
begin

```

```

ni{i-1}:=ni{i};
x{i-1}:=x{i};
for j:=1 to ni{i} do y{i-1,j}:=y{i,j};
end;
k:=k-1;
end;
until hi2<hi2tabelat;
close(fis);
readln;
end.

```

Odată ce dintre datele experimentale au fost eliminate acelea care nu îndeplinesc condițiile de omogenitate, se poate trece la verificarea modului în care indicatorul tehnologic măsurat este sau nu influențat de factorul sau factorii de intrare utilizați în experiment.

Pentru aceasta se poate efectua o analiză dispersională care permite verificarea ipotezei statistice despre legătura între factorii de intrare și indicatorii tehnologici.

5.2.1. Analiza dispersională cu un factor

Se aplică atunci când se dorește a se verifica o ipoteză statistică despre dependența unui indicator tehnologic de un factor de intrare ([Cic99, R+84]). Întrucât în această lucrare se studiază dependențele indicatorilor tehnologici Q_{OP} , t_p și R_a de mărimile de intrare U , I , j , p , v_r etc., este necesar ca o astfel de analiză statistică să fie efectuată pentru a verifica modul în care are loc această dependență.

Pentru aceasta, considerându-se mai multe replici j ale unor experimente i în urma cărora s-au obținut valorile y_{ij} , se determină variația globală V_g a acestor rezultate față de valoarea medie, care se poate descompune în variația reziduală datorată factorilor întâmplători V_1 și variația datorată factorului sistematic V_2 :

$$V_g = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (5.10)$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - \sum_{i=1}^k \frac{(\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij})^2}{n_i} \quad (5.11)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij})^2}{n_i} - \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (5.12)$$

în baza cărora se calculează estimările corespunzătoare:

$$S_g^2 = \frac{V_g}{\sum_{i=1}^k n_i - 1} \quad (5.13)$$

$$S_1^2 = \frac{V_1}{\sum_{i=1}^k n_i - k} \quad (5.14)$$

$$S_2^2 = \frac{V_2}{k - 1} \quad (5.15)$$

În cazul particular în care numărul de replici este constant $n_1=n_2=\dots=n$, formulele de mai sus se rescriu astfel:

$$V_g = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij})^2}{nk} \quad (5.16)$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{\sum_{i=1}^k (\sum_{j=1}^n y_{ij})^2}{n} \quad (5.17)$$

$$V_2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\sum_{j=1}^n y_{ij})^2}{n} - \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij})^2}{nk} \quad (5.18)$$

$$S_g^2 = \frac{V_g}{nk - 1} \quad (5.19)$$

$$S_1^2 = \frac{V_1}{k(n - 1)} \quad (5.20)$$

$$S_2^2 = \frac{V_2}{k - 1} \quad (5.21)$$

În baza estimațiilor determinate cu formulele de mai sus se compară dispersiile datorate factorilor întâmplători și factorului sistematic, folosind criteriul F (care determină dacă există sau nu o legătură între datele de intrare și cea de ieșire, [Cic99]) definit prin:

$$F = \frac{S_2^2}{S_1^2} \quad (5.22)$$

și se compară valoarea astfel obținută (F_{calculat}) cu valoarea găsită în tabelele de specialitate (F_{tabelat}); dacă $F_{\text{calculat}} < F_{\text{tabelat}}$ atunci ipoteza este adevărată și deci indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare iar estimația totală \bar{y} pentru valoarea medie a rezultatelor experimentale obținute se poate face cu formula:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{y}_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (5.23)$$

Dacă însă $F_{\text{calculat}} > F_{\text{tabelat}}$ atunci înseamnă că unele medii nu sunt corecte și urmează a se elimina, aplicând testul Student (care determină fiecare corelație între toți factorii de intrare și indicatorul tehnologic, [Cic99]) folosind valorile t date de relația:

$$t = \left| \frac{\bar{y}_i - \bar{y}}{\frac{S_1}{\sqrt{n_i}}} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5.24)$$

Algoritmul corespunzător este:

```

program AnalizaDispersional1;
uses crt;
type matricer=array[1..50,1..50]of real;
   vectorr=array[1..10]of real;
   vectori=array[1..10]of integer;
var fis:text;
   x,t:vectorr;
   y,ft:matricer;
   ni:vectori;
   s1,s2,s3,vg,v1,v2,sg2,s12,s22,fcalculat,ftabelat,ymediu,tmaxim:real;
   i,j,k,pozitie:integer;
begin
  clrscr;
  assign(fis,'Dispers1.txt'); rewrite(fis);
  write('Introduceti numarul de experimente:'); readln(k);
  for i:=1 to k do
    begin
      write('Introduceti numarul de replici ale experimentului ',i,'=');
      readln(ni[i]);
      write('      x[' ,i, '='); readln(x[i]);
      writeln('Introduceti replicile:');
      for j:=1 to ni[i] do
        begin
          write('      y[' ,i, ', ',j, '='); readln(y[i,j]);
        end;
      end;
      writeln;
      writeln(fis);
      writeln('Date de intrare:');
      writeln(fis,'Date de intrare:');
      for i:=1 to k do
        begin
          writeln('Experimentul ',i);
          writeln(fis,'Experimentul ',i);
          write(x[i]:9:4,'->');
          write(fis,x[i]:9:4,'->');
          for j:=1 to ni[i] do write(y[i,j]:9:4);
          for j:=1 to ni[i] do write(fis,y[i,j]:9:4);
          writeln;
          writeln(fis);
        end;
    end;
end;

```

```

end;
writeln;
writeln(fis);
s1:=0;
for i:=1 to k do
  for j:=1 to ni[i] do s1:=s1+y[i,j]*y[i,j];
s2:=0;
for i:=1 to k do
  for j:=1 to ni[i] do s2:=s2+y[i,j];
s3:=0;
  for i:=1 to k do s3:=s3+ni[i];
vg:=s1-s2*s2/s3;
s2:=0;
for i:=1 to k do
  begin
  s3:=0;
  for j:=1 to ni[i] do s3:=s3+y[i,j];
  s2:=s2+s3*s3/ni[i];
  end;
v1:=s1-s2;
s1:=0;
for i:=1 to k do
  for j:=1 to ni[i] do s1:=s1+y[i,j];
s3:=0;
for i:=1 to k do s3:=s3+ni[i];
v2:=s2-s1*s1/s3;
writeln('Vg=',vg);
writeln('V1=',v1);
writeln('V2=',v2);
writeln(fis,'Vg=',vg);
writeln(fis,'V1=',v1);
writeln(fis,'V2=',v2);
s1:=0;
for i:=1 to k do s1:=s1+ni[i];
sg2:=vg/(s1-1);
s12:=v1/(s1-k);
s22:=v2/(k-1);
fcalculat:=s22/s12;
writeln('Sg2=',sg2);
writeln('S12=',s12);
writeln('S22=',s22);
writeln('Fcalculat=',fcalculat);
writeln(fis,'Sg2=',sg2);
writeln(fis,'S12=',s12);
writeln(fis,'S22=',s22);
writeln(fis,'Fcalculat=',fcalculat);

ft[1, 1]:= 648; ft[1, 2]:=38.5; ft[1, 3]:=17.4; ft[1, 4]:=12.2; ft[1, 5]:=10.0;
ft[1, 6]:=8.81; ft[1, 7]:=8.07; ft[1, 8]:=7.57; ft[1, 9]:=7.21; ft[1,10]:=6.94;
ft[1,11]:=6.72; ft[1,12]:=6.55; ft[1,13]:=6.41; ft[1,14]:=6.30; ft[1,15]:=6.20;
ft[1,16]:=6.12; ft[1,17]:=6.04; ft[1,18]:=5.98; ft[1,19]:=5.92; ft[1,20]:=5.87;
ft[1,21]:=5.83; ft[1,22]:=5.79; ft[1,23]:=5.75; ft[1,24]:=5.72; ft[1,25]:=5.69;
ft[1,26]:=5.66; ft[1,27]:=5.63; ft[1,28]:=5.61; ft[1,29]:=5.59; ft[1,30]:=5.57;
ft[2, 1]:= 800; ft[2, 2]:=39.0; ft[2, 3]:=16.0; ft[2, 4]:=10.6; ft[2, 5]:=8.43;
ft[2, 6]:=7.26; ft[2, 7]:=6.54; ft[2, 8]:=6.06; ft[2, 9]:=5.71; ft[2,10]:=5.46;
ft[2,11]:=5.26; ft[2,12]:=5.10; ft[2,13]:=4.97; ft[2,14]:=4.86; ft[2,15]:=4.76;
ft[2,16]:=4.69; ft[2,17]:=4.62; ft[2,18]:=4.56; ft[2,19]:=4.51; ft[2,20]:=4.46;
ft[2,21]:=4.42; ft[2,22]:=4.39; ft[2,23]:=4.35; ft[2,24]:=4.32; ft[2,25]:=4.29;
ft[2,26]:=4.27; ft[2,27]:=4.24; ft[2,28]:=4.22; ft[2,29]:=4.20; ft[2,30]:=4.18;
ft[3, 1]:= 864; ft[3, 2]:=39.2; ft[3, 3]:=15.4; ft[3, 4]:=9.98; ft[3, 5]:=7.76;
ft[3, 6]:=6.60; ft[3, 7]:=5.89; ft[3, 8]:=5.42; ft[3, 9]:=5.08; ft[3,10]:=4.83;
ft[3,11]:=4.63; ft[3,12]:=4.47; ft[3,13]:=4.35; ft[3,14]:=4.24; ft[3,15]:=4.15;
ft[3,16]:=4.08; ft[3,17]:=4.01; ft[3,18]:=3.95; ft[3,19]:=3.90; ft[3,20]:=3.86;
ft[3,21]:=3.82; ft[3,22]:=3.78; ft[3,23]:=3.75; ft[3,24]:=3.72; ft[3,25]:=3.69;
ft[3,26]:=3.67; ft[3,27]:=3.65; ft[3,28]:=3.63; ft[3,29]:=3.61; ft[3,30]:=3.59;

```



```

ft[4, 1]:= 900; ft[4, 2]:=39.2; ft[4, 3]:=15.1; ft[4, 4]:=9.60; ft[4, 5]:=7.39;
ft[4, 6]:=6.23; ft[4, 7]:=5.52; ft[4, 8]:=5.05; ft[4, 9]:=4.72; ft[4,10]:=4.47;
ft[4,11]:=4.28; ft[4,12]:=4.12; ft[4,13]:=4.00; ft[4,14]:=3.89; ft[4,15]:=3.80;
ft[4,16]:=3.73; ft[4,17]:=3.66; ft[4,18]:=3.61; ft[4,19]:=3.56; ft[4,20]:=3.51;
ft[4,21]:=3.48; ft[4,22]:=3.44; ft[4,23]:=3.41; ft[4,24]:=3.38; ft[4,25]:=3.35;
ft[4,26]:=3.33; ft[4,27]:=3.31; ft[4,28]:=3.29; ft[4,29]:=3.27; ft[4,30]:=3.25;
ft[5, 1]:= 922; ft[5, 2]:=39.3; ft[5, 3]:=14.9; ft[5, 4]:=9.36; ft[5, 5]:=7.15;
ft[5, 6]:=5.99; ft[5, 7]:=5.29; ft[5, 8]:=4.82; ft[5, 9]:=4.48; ft[5,10]:=4.24;
ft[5,11]:=4.04; ft[5,12]:=3.89; ft[5,13]:=3.77; ft[5,14]:=3.66; ft[5,15]:=3.58;
ft[5,16]:=3.50; ft[5,17]:=3.44; ft[5,18]:=3.38; ft[5,19]:=3.33; ft[5,20]:=3.29;
ft[5,21]:=3.25; ft[5,22]:=3.22; ft[5,23]:=3.18; ft[5,24]:=3.15; ft[2,25]:=3.13;
ft[5,26]:=3.10; ft[5,27]:=3.08; ft[5,28]:=3.06; ft[5,29]:=3.04; ft[5,30]:=3.03;

ftabelat:=ft[k-1,trunc(s1)-k];
if fcalculat<ftabelat then
  begin
    writeln('Selectia respecta criteriul de dependenta: y depinde de x');
    writeln(fis,'Selectia respecta criteriul de dependenta: y depinde de x');
    s2:=0;
    for i:=1 to k do
      begin
        s3:=0;
        for j:=1 to ni[i] do s3:=s3+y[i,j];
        s2:=s2+s3/ni[i]*ni[i];
      end;
    ymediu:=s2/s1;
    writeln('Valoarea estimatiei totale a mediei este ymediu=',ymediu);
    writeln(fis,'Valoarea estimatiei totale a mediei este ymediu=',ymediu);
  end
else
  begin
    writeln('Selectia nu respecta criteriul de dependenta');
    writeln(fis,'Selectia nu respecta criteriul de dependenta');
    s2:=0;
    for i:=1 to k do
      for j:=1 to ni[i] do s2:=s2+y[i,j];
    for i:=1 to k do
      begin
        s3:=0;
        for j:=1 to ni[i] do s3:=s3+y[i,j];
        t[i]:=abs(s3/ni[i]-s2/s1)/(sqrt(s12)/sqrt(ni[i]));
      end;
    tmaxim:=-1; pozitie:=0;
    for i:=1 to k do
      if t[i]>tmaxim then begin tmaxim:=t[i]; pozitie:=i; end;
    writeln('Se elimina selectia cu diferenta cea mai mare (',pozitie,')');
    writeln(fis,'Se elimina selectia cu diferenta cea mai mare (',pozitie,')');
    s2:=0;
    for i:=1 to k do
      if i<>pozitie then
        begin
          s3:=0;
          for j:=1 to ni[i] do s3:=s3+y[i,j];
          s2:=s2+s3/ni[i]*ni[i];
        end;
    ymediu:=s2/(s1-ni[pozitie]);
    writeln('Valoarea estimatiei totale a mediei este ymediu=',ymediu);
    writeln(fis,'Valoarea estimatiei totale a mediei este ymediu=',ymediu);
  end;
close(fis);
readln;
end.

```

5.2.2. Analiza dispersională cu doi factori independenți

În cazul în care asupra indicatorului tehnologic măsurat experimental acționează doi factori de intrare A și B independenți, analiza dispersională cu doi factori (bifactorială) permite să se verifice dacă indicatorul tehnologic depinde de amândoi factorii sau doar de unul dintre ei ([Cic99, R+84]).

La prelucrarea prin EEC, volumul mare al factorilor de intrare și interdependențele între aceștia sunt cauzele care nu au permis până acum exprimarea matematică a unei legi de desfășurare a procesului. Această metodă permite determinarea legăturilor între diferiții indicatori tehnologici și factorii de intrare asociați.

Pentru aceasta, considerând că y_{ij} este rezultatul experimentului obținut pentru valoarea A_i (pentru factorul A, care poate lua k valori) respectiv B_j (pentru factorul B, care poate lua n valori), se fac determinările:

$$V_A = n \sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2, \quad \text{unde } y_i = \frac{y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}}{n} \quad (5.25)$$

$$V_B = k \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2, \quad \text{unde } y_j = \frac{y_{1j} + y_{2j} + \dots + y_{kj}}{k} \quad (5.26)$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_i - y_j + \bar{y})^2 \quad (5.27)$$

$$V_g = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (5.28)$$

$$S_A^2 = \frac{V_A}{k-1} \quad (5.29)$$

$$S_B^2 = \frac{V_B}{n-1} \quad (5.30)$$

$$S_1^2 = \frac{V_1}{(k-1)(n-1)} \quad (5.31)$$

$$S_g^2 = \frac{V_g}{kn-1} \quad (5.32)$$

în baza cărora se aplică criteriul F:

$$F_A = \frac{S_A^2}{S_1^2} \quad (5.33)$$

$$F_B = \frac{S_B^2}{S_1^2} \quad (5.34)$$

și se compară valorile astfel obținute cu valoarea tabelată; pentru factorul de intrare la care $F_{\text{calculat}} < F_{\text{tabelat}}$ rezultă că ipoteza este adevărată și deci indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare; dacă relația $F_{\text{calculat}} < F_{\text{tabelat}}$ este adevărată pentru ambii factori de intrare, aceasta înseamnă că atât A cât și B influențează indicatorul tehnologic analizat.

Algoritmul corespunzător aplicării analizei dispersive bifactoriale fără influențe reciproce este:

```

program AnalizaDispersionala2farainteractiune;
uses crt;
type matricer=array[1..50,1..50]of real;
   vectorr=array[1..10]of real;
   vectori=array[1..10]of integer;
var fis:text;
   yi,yj,t:vectorr;
   y,ft:matricer;
   vl,va,vb,vg,sg2,sa2,sb2,s12,fa,fb,fatabelat,fbtabelat,ymediu:real;
   i,j,k,n:integer;
begin
  clrscr;
  assign(fis,'Disper2.txt'); rewrite(fis);
  write('Introduceti numarul de valori ale factorului A (k)='); readln(k);
  write('Introduceti numarul de valori ale factorului B (n)='); readln(n);
  writeln('Introduceti valorile parametrului tehnologic:');
  for i:=1 to k do
    for j:=1 to n do
      begin
        write('y[' ,i ,',',j ,']='); readln(y[i,j]);
      end;
  writeln;
  writeln(fis);
  writeln('Date de intrare:');
  writeln(fis,'Date de intrare:');
  for i:=1 to k do
    begin
      for j:=1 to n do write(y[i,j]:8:4);
      for j:=1 to n do write(fis,y[i,j]:8:4);
      writeln;
      writeln(fis);
    end;
  writeln;
  writeln(fis);
  for i:=1 to k do
    begin
      yi[i]:=0;
      for j:=1 to n do yi[i]:=yi[i]+y[i,j];
      yi[i]:=yi[i]/n;
    end;
  for j:=1 to n do
    begin
      yj[j]:=0;
      for i:=1 to k do yj[j]:=yj[j]+y[i,j];
      yj[j]:=yj[j]/k;
    end;
  ymediu:=0;
  for i:=1 to k do
    for j:=1 to n do ymediu:=ymediu+y[i,j];
  ymediu:=ymediu/n/k;
  va:=0;
  for i:=1 to k do va:=va+(yi[i]-ymediu)*(yi[i]-ymediu);
  va:=va*n;
  vb:=0;

```

```

for j:=1 to n do vb:=vb+(yj[j]-ymediu)*(yj[j]-ymediu);
vb:=vb*k;
v1:=0;
for i:=1 to k do
  for j:=1 to n do
    v1:=v1+(y[i,j]-yi[i]-yj[j]+ymediu)*(y[i,j]-yi[i]-yj[j]+ymediu);
vg:=0;
for i:=1 to k do
  for j:=1 to n do
    vg:=vg+(y[i,j]-ymediu)*(y[i,j]-ymediu);
sa2:=va/(k-1);
sb2:=vb/(n-1);
s12:=v1/((k-1)*(n-1));
sg2:=vg/(k*n-1);
fa:=sa2/s12;
fb:=sb2/s12;
writeln('VA=',va);
writeln('VB=',vb);
writeln('V1=',v1);
writeln('Vg=',vg);
writeln(fis,'VA=',va);
writeln(fis,'VB=',vb);
writeln(fis,'V1=',v1);
writeln(fis,'Vg=',vg);
writeln('SA2=',sa2);
writeln('SB2=',sb2);
writeln('S12=',s12);
writeln('Sg2=',sg2);
writeln('FAcalculat=',fa);
writeln('FBcalculat=',fb);
writeln(fis,'SA2=',sa2);
writeln(fis,'SB2=',sb2);
writeln(fis,'S12=',s12);
writeln(fis,'Sg2=',sg2);
writeln(fis,'FAcalculat=',fa);
writeln(fis,'FBcalculat=',fb);

ft[1, 1]:= 648; ft[1, 2]:=38.5; ft[1, 3]:=17.4; ft[1, 4]:=12.2; ft[1, 5]:=10.0;
ft[1, 6]:=8.81; ft[1, 7]:=8.07; ft[1, 8]:=7.57; ft[1, 9]:=7.21; ft[1,10]:=6.94;
ft[1,11]:=6.72; ft[1,12]:=6.55; ft[1,13]:=6.41; ft[1,14]:=6.30; ft[1,15]:=6.20;
ft[1,16]:=6.12; ft[1,17]:=6.04; ft[1,18]:=5.98; ft[1,19]:=5.92; ft[1,20]:=5.87;
ft[1,21]:=5.83; ft[1,22]:=5.79; ft[1,23]:=5.75; ft[1,24]:=5.72; ft[1,25]:=5.69;
ft[1,26]:=5.66; ft[1,27]:=5.63; ft[1,28]:=5.61; ft[1,29]:=5.59; ft[1,30]:=5.57;
ft[2, 1]:= 800; ft[2, 2]:=39.0; ft[2, 3]:=16.0; ft[2, 4]:=10.6; ft[2, 5]:=8.43;
ft[2, 6]:=7.26; ft[2, 7]:=6.54; ft[2, 8]:=6.06; ft[2, 9]:=5.71; ft[2,10]:=5.46;
ft[2,11]:=5.26; ft[2,12]:=5.10; ft[2,13]:=4.97; ft[2,14]:=4.86; ft[2,15]:=4.76;
ft[2,16]:=4.69; ft[2,17]:=4.62; ft[2,18]:=4.56; ft[2,19]:=4.51; ft[2,20]:=4.46;
ft[2,21]:=4.42; ft[2,22]:=4.39; ft[2,23]:=4.35; ft[2,24]:=4.32; ft[2,25]:=4.29;
ft[2,26]:=4.27; ft[2,27]:=4.24; ft[2,28]:=4.22; ft[2,29]:=4.20; ft[2,30]:=4.18;
ft[3, 1]:= 874; ft[3, 2]:=39.2; ft[3, 3]:=15.4; ft[3, 4]:=9.98; ft[3, 5]:=7.76;
ft[3, 6]:=6.60; ft[3, 7]:=5.89; ft[3, 8]:=5.42; ft[3, 9]:=5.08; ft[3,10]:=4.83;
ft[3,11]:=4.63; ft[3,12]:=4.47; ft[3,13]:=4.35; ft[3,14]:=4.24; ft[3,15]:=4.15;
ft[3,16]:=4.08; ft[3,17]:=4.01; ft[3,18]:=3.95; ft[3,19]:=3.90; ft[3,20]:=3.86;
ft[3,21]:=3.82; ft[3,22]:=3.78; ft[3,23]:=3.75; ft[3,24]:=3.72; ft[3,25]:=3.69;
ft[3,26]:=3.67; ft[3,27]:=3.65; ft[3,28]:=3.63; ft[3,29]:=3.61; ft[3,30]:=3.59;
ft[4, 1]:= 900; ft[4, 2]:=39.2; ft[4, 3]:=15.1; ft[4, 4]:=9.60; ft[4, 5]:=7.39;
ft[4, 6]:=6.23; ft[4, 7]:=5.52; ft[4, 8]:=5.05; ft[4, 9]:=4.72; ft[4,10]:=4.47;
ft[4,11]:=4.28; ft[4,12]:=4.12; ft[4,13]:=4.00; ft[4,14]:=3.89; ft[4,15]:=3.80;
ft[4,16]:=3.73; ft[4,17]:=3.66; ft[4,18]:=3.61; ft[4,19]:=3.56; ft[4,20]:=3.51;
ft[4,21]:=3.48; ft[4,22]:=3.44; ft[4,23]:=3.41; ft[4,24]:=3.38; ft[4,25]:=3.35;
ft[4,26]:=3.33; ft[4,27]:=3.31; ft[4,28]:=3.29; ft[4,29]:=3.27; ft[4,30]:=3.25;
ft[5, 1]:= 922; ft[5, 2]:=39.3; ft[5, 3]:=14.9; ft[5, 4]:=9.36; ft[5, 5]:=7.15;
ft[5, 6]:=5.99; ft[5, 7]:=5.29; ft[5, 8]:=4.82; ft[5, 9]:=4.48; ft[5,10]:=4.24;
ft[5,11]:=4.04; ft[5,12]:=3.89; ft[5,13]:=3.77; ft[5,14]:=3.66; ft[5,15]:=3.58;
ft[5,16]:=3.50; ft[5,17]:=3.44; ft[5,18]:=3.38; ft[5,19]:=3.33; ft[5,20]:=3.29;
ft[5,21]:=3.25; ft[5,22]:=3.22; ft[5,23]:=3.18; ft[5,24]:=3.15; ft[2,25]:=3.13;

```

```

ft{5,26}:=3.10; ft{5,27}:=3.08; ft{5,28}:=3.06; ft{5,29}:=3.04; ft{5,30}:=3.03;

fatabelat:=ft[k-1,k*n-1];
fbtabelat:=ft[n-1,k*n-1];
if fa<fatabelat then
  begin
  writeln('Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare A');
  writeln(fis,'Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare A');
  end
  else
  begin
  writeln('Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare A');
  writeln(fis,'Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare A');
  end;
if fb<fbtabelat then
  begin
  writeln('Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare B');
  writeln(fis,'Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare B');
  end
  else
  begin
  writeln('Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare B');
  writeln(fis,'Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare B');
  end;
close(fis);
readln;
end.

```

5.2.3. Analiza dispersională cu doi factori dependenți

În cazul în care asupra indicatorului tehnologic măsurat experimental acționează doi factori de intrare A și B care se influențează reciproc, analiza dispersională cu doi factori (bifactorială) permite să se verifice modul cum indicatorul tehnologic depinde de amândoi factorii și interacțiunea dintre ei ([Cic99, R+84]). În urma cercetărilor de până acum privind desfășurarea procesului de prelucrare prin EEC, concluziile sunt că toți factorii de influență relaționează între ei și de aceea aplicarea acestei metode statistice de verificare a dependenței este utilă în programul de optimizare a rezultatelor prelucrării.

Pentru aceasta, considerând că y_{ijv} este rezultatul experimentului obținut pentru valoarea A_i (pentru factorul A, care poate lua k valori) respectiv B_j (pentru factorul B, care poate lua n valori), pentru fiecare experiment fiind efectuate mai multe replici ($v=1,2,\dots,r$), se fac determinările:

$$y_{ij} = \frac{\sum_{v=1}^r y_{ijv}}{r} \quad (5.35)$$

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^r y_{ijv}}{nr} \quad (5.36)$$

$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^r y_{ijv}}{kr} \quad (5.37)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^r y_{ijv}}{knr} \quad (5.38)$$

$$V_A = nr \sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2 \quad (5.39)$$

$$V_B = kr \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2 \quad (5.40)$$

$$V_{AB} = r \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_i - y_j + \bar{y})^2 \quad (5.41)$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^r (y_{ijv} - y_{ij})^2 \quad (5.42)$$

$$V_g = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^r (y_{ijv} - \bar{y})^2 \quad (5.43)$$

$$S_A^2 = \frac{V_A}{k-1} \quad (5.44)$$

$$S_B^2 = \frac{V_B}{n-1} \quad (5.45)$$

$$S_{AB}^2 = \frac{V_{AB}}{(k-1)(n-1)} \quad (5.46)$$

$$S_1^2 = \frac{V_1}{kn(r-1)} \quad (5.47)$$

$$S_g^2 = \frac{V_g}{knr-1} \quad (5.48)$$

în baza cărora se aplică criteriul F:

$$F_A = \frac{S_A^2}{S_1^2} \quad (5.49)$$

$$F_B = \frac{S_B^2}{S_1^2} \quad (5.50)$$

$$F_{AB} = \frac{S_{AB}^2}{S_1^2} \quad (5.51)$$

și se compară valorile astfel obținute cu valoarea tabelată; dacă $F_{\text{calculat}} < F_{\text{tabelat}}$ atât pentru factorul A cât și pentru B, rezultă că ipoteza este adevărată și deci indicatorul tehnologic depinde de cei doi factori de intrare; se mai verifică de asemenea dacă relația $F_{\text{calculat}} < F_{\text{tabelat}}$ este adevărată și pentru F_{AB} ceea ce înseamnă că A și B se influențează reciproc.

Algoritmul corespunzător aplicării analizei dispersionale bifactoriale cu influențe reciproce este:

```

program AnalizaDispersionala2cuinteractiune;
uses crt;
type cubr=array[1..10,1..10,1..10]of real;
   matricer=array[1..30,1..30]of real;
   vectorr=array[1..10]of real;
   vectori=array[1..10]of integer;
var fis:text;
   yi,yj,t:vectorr;
   y:cubr;
   yij,ft:matricer;
   vl,va,vb,vab,vg,sg2,sa2,sb2,sab2,s12,fa,fb,fab,fatabelat,fbtabelat,
   fabtabelat,ymediu:real;
   i,j,k,n,r,v:integer;
begin
  clrscr;
  assign(fis,'Disper22.txt'); rewrite(fis);
  write('Introduceti numarul de valori ale factorului A (k)='); readln(k);
  write('Introduceti numarul de valori ale factorului B (n)='); readln(n);
  write('Introduceti numarul de replici ale fiecarui experiment (r)=');
  readln(r);
  writeln('Introduceti valorile parametrului tehnologic:');
  for i:=1 to k do
    for j:=1 to n do
      begin
        writeln('y[' ,i ,',',j ,']=');
        for v:=1 to r do
          begin
            write('      replica ',v ,'='); readln(y[i,j,v]);
          end;
        end;
      writeln;
      writeln(fis);
      writeln('Date de intrare:');
      writeln(fis,'Date de intrare:');
      for i:=1 to k do
        for j:=1 to n do
          begin
            write('A',i ,' si ', 'B',j ,'->');
            write(fis,'A',i ,' si ', 'B',j ,'->');
            for v:=1 to r do write(y[i,j,v]:8:4);
            for v:=1 to n do write(fis,y[i,j,v]:8:4);
            writeln;
            writeln(fis);
          end;
        writeln;
        writeln(fis);
        for i:=1 to k do
          for j:=1 to n do
            begin

```



```

    yij[i,j]:=0;
    for v:=1 to r do yij[i,j]:=yij[i,j]+y[i,j,v];
    yij[i,j]:=yij[i,j]/r;
    end;
for i:=1 to k do
    begin
    yi[i]:=0;
    for j:=1 to n do
        for v:=1 to r do yi[i]:=yi[i]+y[i,j,v];
    yi[i]:=yi[i]/n/r;
    end;
for j:=1 to n do
    begin
    yj[j]:=0;
    for i:=1 to k do
        for v:=1 to r do yj[j]:=yj[j]+y[i,j,v];
    yj[j]:=yj[j]/k/r;
    end;
ymediu:=0;
for i:=1 to k do
    for j:=1 to n do
        for v:=1 to r do ymediu:=ymediu+y[i,j,v];
ymediu:=ymediu/n/k/r;
va:=0;
for i:=1 to k do va:=va+(yi[i]-ymediu)*(yi[i]-ymediu);
va:=va*n*r;
vb:=0;
for j:=1 to n do vb:=vb+(yj[j]-ymediu)*(yj[j]-ymediu);
vb:=vb*k*r;
vab:=0;
for i:=1 to k do
    for j:=1 to n do
        vab:=vab+(yij[i,j]-yi[i]-yj[j]+ymediu)*(yij[i,j]-yi[i]-yj[j]+ymediu);
vab:=vab*r;
v1:=0;
for i:=1 to k do
    for j:=1 to n do
        for v:=1 to r do
            v1:=v1+(y[i,j,v]-yij[i,j])*(y[i,j,v]-yij[i,j]);
vg:=0;
for i:=1 to k do
    for j:=1 to n do
        for v:=1 to r do
            vg:=vg+(y[i,j,v]-ymediu)*(y[i,j,v]-ymediu);
sa2:=va/(k-1);
sb2:=vb/(n-1);
sab2:=vab/((k-1)*(n-1));
sl2:=v1/(k*n*(r-1));
sg2:=vg/(k*n*r-1);
fa:=sa2/sl2;
fb:=sb2/sl2;
fab:=sab2/sl2;
writeln('VA=',va);
writeln('VB=',vb);
writeln('VAB=',vab);
writeln('V1=',v1);
writeln('Vg=',vg);
writeln(fis,'VA=',va);
writeln(fis,'VB=',vb);
writeln(fis,'VAB=',vab);
writeln(fis,'V1=',v1);
writeln(fis,'Vg=',vg);
writeln('SA2=',sa2);

```

```

writeln('SB2=', sb2);
writeln('SAB2=', sab2);
writeln('S12=', s12);
writeln('Sg2=', sg2);
writeln('FAcalculat=', fa);
writeln('FBcalculat=', fb);
writeln('FABcalculat=', fab);
writeln(fis, 'SA2=', sa2);
writeln(fis, 'SB2=', sb2);
writeln(fis, 'SAB2=', sab2);
writeln(fis, 'S12=', s12);
writeln(fis, 'Sg2=', sg2);
writeln(fis, 'FAcalculat=', fa);
writeln(fis, 'FBcalculat=', fb);
writeln(fis, 'FABcalculat=', fab);

ft[1, 1]:= 648; ft[1, 2]:=38.5; ft[1, 3]:=17.4; ft[1, 4]:=12.2; ft[1, 5]:=10.0;
ft[1, 6]:=8.81; ft[1, 7]:=8.07; ft[1, 8]:=7.57; ft[1, 9]:=7.21; ft[1,10]:=6.94;
ft[1,11]:=6.72; ft[1,12]:=6.55; ft[1,13]:=6.41; ft[1,14]:=6.30; ft[1,15]:=6.20;
ft[1,16]:=6.12; ft[1,17]:=6.04; ft[1,18]:=5.98; ft[1,19]:=5.92; ft[1,20]:=5.87;
ft[1,21]:=5.83; ft[1,22]:=5.79; ft[1,23]:=5.75; ft[1,24]:=5.72; ft[1,25]:=5.69;
ft[1,26]:=5.66; ft[1,27]:=5.63; ft[1,28]:=5.61; ft[1,29]:=5.59; ft[1,30]:=5.57;
ft[2, 1]:= 800; ft[2, 2]:=39.0; ft[2, 3]:=16.0; ft[2, 4]:=10.6; ft[2, 5]:=8.43;
ft[2, 6]:=7.26; ft[2, 7]:=6.54; ft[2, 8]:=6.06; ft[2, 9]:=5.71; ft[2,10]:=5.46;
ft[2,11]:=5.26; ft[2,12]:=5.10; ft[2,13]:=4.97; ft[2,14]:=4.86; ft[2,15]:=4.76;
ft[2,16]:=4.69; ft[2,17]:=4.62; ft[2,18]:=4.56; ft[2,19]:=4.51; ft[2,20]:=4.46;
ft[2,21]:=4.42; ft[2,22]:=4.39; ft[2,23]:=4.35; ft[2,24]:=4.32; ft[2,25]:=4.29;
ft[2,26]:=4.27; ft[2,27]:=4.24; ft[2,28]:=4.22; ft[2,29]:=4.20; ft[2,30]:=4.18;
ft[3, 1]:= 864; ft[3, 2]:=39.2; ft[3, 3]:=15.4; ft[3, 4]:=9.98; ft[3, 5]:=7.76;
ft[3, 6]:=6.60; ft[3, 7]:=5.89; ft[3, 8]:=5.42; ft[3, 9]:=5.08; ft[3,10]:=4.83;
ft[3,11]:=4.63; ft[3,12]:=4.47; ft[3,13]:=4.35; ft[3,14]:=4.24; ft[3,15]:=4.15;
ft[3,16]:=4.08; ft[3,17]:=4.01; ft[3,18]:=3.95; ft[3,19]:=3.90; ft[3,20]:=3.86;
ft[3,21]:=3.82; ft[3,22]:=3.78; ft[3,23]:=3.75; ft[3,24]:=3.72; ft[3,25]:=3.69;
ft[3,26]:=3.67; ft[3,27]:=3.65; ft[3,28]:=3.63; ft[3,29]:=3.61; ft[3,30]:=3.59;
ft[4, 1]:= 900; ft[4, 2]:=39.2; ft[4, 3]:=15.1; ft[4, 4]:=9.60; ft[4, 5]:=7.39;
ft[4, 6]:=6.23; ft[4, 7]:=5.52; ft[4, 8]:=5.05; ft[4, 9]:=4.72; ft[4,10]:=4.47;
ft[4,11]:=4.28; ft[4,12]:=4.12; ft[4,13]:=4.00; ft[4,14]:=3.89; ft[4,15]:=3.80;
ft[4,16]:=3.73; ft[4,17]:=3.66; ft[4,18]:=3.61; ft[4,19]:=3.56; ft[4,20]:=3.51;
ft[4,21]:=3.48; ft[4,22]:=3.44; ft[4,23]:=3.41; ft[4,24]:=3.38; ft[4,25]:=3.35;
ft[4,26]:=3.33; ft[4,27]:=3.31; ft[4,28]:=3.29; ft[4,29]:=3.27; ft[4,30]:=3.25;
ft[5, 1]:= 922; ft[5, 2]:=39.3; ft[5, 3]:=14.9; ft[5, 4]:=9.36; ft[5, 5]:=7.15;
ft[5, 6]:=5.99; ft[5, 7]:=5.29; ft[5, 8]:=4.82; ft[5, 9]:=4.48; ft[5,10]:=4.24;
ft[5,11]:=4.04; ft[5,12]:=3.89; ft[5,13]:=3.77; ft[5,14]:=3.66; ft[5,15]:=3.58;
ft[5,16]:=3.50; ft[5,17]:=3.44; ft[5,18]:=3.38; ft[5,19]:=3.33; ft[5,20]:=3.29;
ft[5,21]:=3.25; ft[5,22]:=3.22; ft[5,23]:=3.18; ft[5,24]:=3.15; ft[2,25]:=3.13;
ft[5,26]:=3.10; ft[5,27]:=3.08; ft[5,28]:=3.06; ft[5,29]:=3.04; ft[5,30]:=3.03;

fatabelat:=ft[k-1,k*n-1];
fbtabelat:=ft[n-1,k*n-1];
fabtabelat:=ft[(k-1)*(n-1),k*n-1];
if fa<fatabelat then
begin
writeln('Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare A');
writeln(fis,'Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare A');
end
else
begin
writeln('Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare A');
writeln(fis,'Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare A');
end;
if fb<fbtabelat then
begin
writeln('Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare B');
writeln(fis,'Indicatorul tehnologic depinde de factorul de intrare B');
end
else

```

```

begin
writeln('Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare B');
writeln(fis,'Indicatorul tehnologic nu depinde de factorul de intrare B',);
end;
if fab<fabtabelat then
begin
writeln('Factorii de intrare A si B sunt dependenti');
writeln(fis,'Factorii de intrare A si B sunt dependenti');
end
else
begin
writeln('Factorii de intrare A si B nu sunt dependenti');
writeln(fis,'Factorii de intrare A si B nu sunt dependenti');
end;
close(fis);
readln;
end.

```

5.3. ALGORITMI DE MODELARE

După definitivarea rezultatelor experimentale se poate trece la elaborarea modelelor matematice ale dependențelor indicatorilor tehnologici de factorii de intrare, activitate bazată pe prelucrarea statistică a datelor și efectuată pe baza tehnicilor de interpolare ([OB86, CU79]).

Aceste modele matematice se elaborează pentru fiecare indicator tehnologic în parte iar dependența poate fi:

- de o singură variabilă, în care se caută o funcție de forma:

$$y = f(x) \quad (5.52)$$

- de mai multe variabile:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p), p \leq m \quad (5.53)$$

5.3.1. Modelarea funcțiilor de o singură variabilă

Pentru dependența $y = f(x)$ se încearcă reprezentarea prin funcții polinomiale de gradul 1, 2, 3 și prin funcții exponențiale, considerându-se expresiile:

$$y_1 = a_0 + a_1 \cdot x \quad (5.54)$$

$$y_2 = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (5.55)$$

$$y_3 = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 \quad (5.56)$$

$$y_4 = \exp(a_0 + a_1 \cdot x) \quad (5.57)$$

$$y_5 = \exp(a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2) \quad (5.58)$$

$$y_6 = a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2) \quad (5.59)$$

Alegerea formei acestor expresii matematice s-a făcut pe baza celor prezentate în lucrările de specialitate în care s-a căutat exprimarea dependenței indicatorilor tehnologici de factorii de intrare la prelucrarea prin EEC ([Bul00, BCH93, Her95, Her96, HO95, H+95, Kar00b, Kar00c, Kar03a, Kar03b, Kar03c, Kar03d, Kar03e, Kar04d, Kar04e, Kar04f, Kar04g, KN01, KN03a, KN03b, LHM93a, LHM93b, Mal01, NHO93, O+99]).

Pentru determinarea coeficienților din expresiile de mai sus este necesară cunoașterea perechilor de valori $(x_i, f(x_i))$ în $n+1$ puncte (n este gradul polinoamelor) ceea ce revine la rezolvarea unui sistem de ecuații liniare de forma ([And97, Kil97]):

$$\begin{cases} a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + \dots + a_nx_0^n = f(x_0) \\ a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \dots + a_nx_1^n = f(x_1) \\ \dots \\ a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \dots + a_nx_n^n = f(x_n) \end{cases} \quad (5.60)$$

Acest sistem are determinantul de tip Vandermonde:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{vmatrix} = \prod_{\substack{i,j=0 \\ i>j}}^n (x_i - x_j) \quad (5.61)$$

care indică dacă sistemul are soluție (a_0, a_1, \dots, a_n) unică.

Pentru micșorarea volumului de calcule impus de rezolvarea sistemului de mai sus se poate aproxima funcția $f(x_i)$ printr-un polinom $P_m(x_i)$ (unde m este gradul polinomului de interpolare) astfel încât suma pătratelor diferențelor:

$$S = \sum_{i=0}^n [P_m(x_i) - f(x_i)]^2 \quad (5.62)$$

să fie minimă (cea mai mică valoare posibilă).

Aproximații prin interpolare liniară Newton de speța întâi

Metodele de aproximare cu interpolare liniară sunt aplicabile acolo unde perechile de valori $(x_i, f(x_i))$ au proprietatea că $x_{i+1} - x_i = \text{constant}$ ([Kil97, PDB02]).

Polinoamele de interpolare Newton de speța întâi sunt de forma:

$$P_n(x) = a_0 + a_1 \cdot (x-x_0)^{[1]} + a_2 \cdot (x-x_0)^{[2]} + \dots + a_n \cdot (x-x_0)^{[n]} \quad (5.63)$$

unde notația $(x-x_0)^{[k]}$ simbolizează puterea generalizată, care se calculează cu formula:

$$(x-x_0)^{[k]} = (x-x_0) \cdot (x-x_1) \cdot (x-x_2) \cdot \dots \cdot (x-x_{k-1}) \quad (5.64)$$

iar coeficienții a_k se calculează după formula:

$$a_k = \frac{\Delta^k y_0}{k! \cdot h^k} \quad (5.65)$$

în care $\Delta^k y_0$ poartă denumirea de diferență finită de ordinul k și se calculează astfel:

$$\begin{aligned} \Delta y_0 &= y_1 - y_0 \\ \Delta y_1 &= y_2 - y_1 \\ &\dots \\ \Delta^2 y_0 &= \Delta y_1 - \Delta y_0 \\ \Delta^2 y_1 &= \Delta y_2 - \Delta y_1 \\ &\dots \\ \Delta^k y_s &= \Delta^{k-1} y_{s+1} - \Delta^{k-1} y_s \end{aligned} \tag{5.66}$$

cea ce, pentru ușurința calculelor, se poate scrie sub formă tabelară astfel (exemplificarea este pentru n=4):

x	y = $\Delta^0 y$	$\Delta y = \Delta^1 y$	$\Delta^2 y$	$\Delta^3 y$	$\Delta^4 y$
x ₀	y ₀	Δy_0	$\Delta^2 y_0$	$\Delta^3 y_0$	$\Delta^4 y_0$
x ₁	y ₁	Δy_1	$\Delta^2 y_1$	$\Delta^3 y_1$	
x ₂	y ₂	Δy_2	$\Delta^2 y_2$		
x ₃	y ₃	Δy_3			
x ₄	y ₄				

În aceste condiții, polinomul de interpolare Newton de prima speță poate fi descris prin relația:

$$P_n(x) = x_0 + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta^k y_0}{k! \cdot h^k} \cdot (x - x_0)^{[k]} \tag{5.67}$$

care se observă a fi un polinom de gradul n, unde n+1 este numărul de puncte experimentale determinate.

Algoritmul care implementează determinarea unui polinom de interpolare Newton de speța întâi este:

```

program Newton1;
uses crt;
type matricer=array[0..10,0..10]of real;
      vectorr=array[0..10]of real;
var i,j,k,n:integer;
    h,ak,xx,ff:real;
    x,y,a:vectorr;
    delta,coef:matricer;
    fis:text;
function fact(n:integer):integer;
var i,f:integer;
begin
  f:=1;
  for i:=2 to n do f:=f*i;
  fact:=f;
end;
function mlan(h:real;k:integer):real;
var i:integer; f:real;
begin
  f:=1;
  for i:=1 to k do f:=f*h;
  mlan:=f;
end;

```

```

begin
  clrscr;
  assign(fis,'Newton1.txt'); rewrite(fis);
  write('Introduceti numarul de puncte n='); readln(n);
  writeln('Introduceti punctele:');
  for i:=0 to n-1 do
    begin
      writeln('Punctul ',i);
      write('      x['',i,'']='); readln(x[i]);
      write('      y['',i,'']='); readln(y[i]);
    end;
  h:=x[1]-x[0];
  writeln;
  writeln('Datele de intrare sunt:');
  writeln(fis,'Datele de intrare sunt:');
  writeln('  x[i]      y[i]');
  writeln(fis,'  x[i]      y[i]');
  writeln('-----');
  writeln(fis,'-----');
  for i:=0 to n-1 do writeln(x[i]:8:4,' ',y[i]:8:4);
  for i:=0 to n-1 do writeln(fis,x[i]:8:4,' ',y[i]:8:4);
  writeln('-----');
  writeln(fis,'-----');
  for i:=0 to n-1 do delta[i,0]:=y[i];
  for j:=1 to n-1 do
    for i:=0 to n-1-j do delta[i,j]:=delta[i+1,j-1]-delta[i,j-1];
  for i:=1 to n do a[i]:=0;
  a[0]:=y[0];
  coef[1,0]:=1; for j:=1 to 10 do coef[1,j]:=0;
  for j:=0 to 10 do coef[2,j]:=0;
  for j:=0 to 10 do coef[3,j]:=0;
  for k:=1 to n-1 do
    begin
      ak:=delta[0,k]/fact(k)/mlan(h,k);
      for j:=k downto 1 do coef[2,j]:=coef[1,j-1];
      for j:=k-1 downto 0 do coef[3,j]:=-coef[1,j]*x[k-1];
      for j:=k downto 0 do coef[1,j]:=coef[2,j]+coef[3,j];
      for j:=0 to 10 do coef[2,j]:=0;
      for j:=0 to 10 do coef[3,j]:=0;
      for j:=0 to 10 do a[j]:=a[j]+coef[1,j]*ak;
    end;
  writeln;
  writeln('Coeficientii polinomului Pn(x)=an-lxn-1+...+alx1+a0 sunt:');
  for i:=n-1 downto 0 do writeln('a',i,'=',a[i]:8:4);
  writeln(fis,'Coeficientii polinomului Pn(x)=an-lxn-1+...+alx1+a0 sunt:');
  for i:=n-1 downto 0 do writeln(fis,'a',i,'=',a[i]:8:4);
  readln;
  repeat
    write('Introduceti valoarea de interpolat (sau 0 pentru terminare) xx=');
    readln(xx);
    ff:=a[0];
    for i:=1 to n-1 do ff:=ff+a[i]*mlan(xx,i);
    writeln('Pentru xx=',xx:8:4,' valoarea calculata este Pn(xx)=',ff:8:4);
    writeln(fis,'Pentru xx=',xx:8:4,' valoarea calculata este Pn(xx)=',ff:8:4);
  until xx=0;
  readln;
  close(fis);
end.

```

Aproximații prin interpolare liniară Newton de speța a doua

Polinoamele de interpolare Newton de speța a doua sunt de forma ([Kil97]):

$$P_n(x) = a_0 + a_1 \cdot (x-x_n)^{[1]} + a_2 \cdot (x-x_{n-1})^{[2]} + \dots + a_n \cdot (x-x_1)^{[n]} \quad (5.68)$$

unde coeficienții a_k se calculează după formula:

$$a_k = \frac{\Delta^k y_{n-k}}{k! \cdot h^k} \quad (5.69)$$

În aceste condiții, polinomul de interpolare Newton de a doua speță poate fi descris prin relația:

$$P_n(x) = x_n + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta^k y_{n-k}}{k! \cdot h^k} \cdot (x - x_{n+1-k})^{[k]} \quad (5.70)$$

care este, ca și polinomul Newton de speță întâi, un polinom de gradul n , unde $n+1$ este numărul de puncte experimentale determinate.

Algoritmul care implementează determinarea unui polinom de interpolare Newton de speță a doua este:

```

program Newton2;
uses crt;
type matricer=array[0..10,0..10]of real;
     vectorr=array[0..10]of real;
var i,j,k,n:integer;
    h,ak,xx,ff:real;
    x,y,a:vectorr;
    delta,coef:matricer;
    fis:text;
function fact(n:integer):integer;
var i,f:integer;
begin
    f:=1;
    for i:=2 to n do f:=f*i;
    fact:=f;
end;
function mlan(h:real;k:integer):real;
var i:integer; f:real;
begin
    f:=1;
    for i:=1 to k do f:=f*h;
    mlan:=f;
end;
begin
    clrscr;
    assign(fis,'Newton2.txt'); rewrite(fis);
    write('Introduceti numarul de puncte n='); readln(n);
    writeln('Introduceti punctele:');
    for i:=0 to n-1 do
        begin
            writeln('Punctul ',i);
            write('    x[' ,i, ']='); readln(x[i]);
            write('    y[' ,i, ']='); readln(y[i]);
        end;
    h:=x[1]-x[0];
    writeln;
    writeln('Datele de intrare sunt:');
    writeln(fis,'Datele de intrare sunt:');
    writeln('  x[i]    y[i]');
    writeln(fis,'  x[i]    y[i]');

```



```

writeln('-----');
writeln(fis,'-----');
for i:=0 to n-1 do writeln(x[i]:8:4,' ',y[i]:8:4);
for i:=0 to n-1 do writeln(fis,x[i]:8:4,' ',y[i]:8:4);
writeln('-----');
writeln(fis,'-----');
for i:=0 to n-1 do delta[i,0]:=y[i];
for j:=1 to n-1 do
  for i:=0 to n-1-j do delta[i,j]:=delta[i+1,j-1]-delta[i,j-1];
for i:=1 to n do a[i]:=0;
a[0]:=y[n-1];
coef[1,0]:=1; for j:=1 to 10 do coef[1,j]:=0;
for j:=0 to 10 do coef[2,j]:=0;
for j:=0 to 10 do coef[3,j]:=0;
for k:=1 to n-1 do
  begin
    ak:=delta[n-1-k,k]/fact(k)/mlan(h,k);
    for j:=k downto 1 do coef[2,j]:=coef[1,j-1];
    for j:=k-1 downto 0 do coef[3,j]:=-coef[1,j]*x[n-k];
    for j:=k downto 0 do coef[1,j]:=coef[2,j]+coef[3,j];
    for j:=0 to 10 do coef[2,j]:=0;
    for j:=0 to 10 do coef[3,j]:=0;
    for j:=0 to 10 do a[j]:=a[j]+coef[1,j]*ak;
  end;
writeln;
writeln('Coeficientii polinomului Pn(x)=an-1xn-1+...+alx1+a0 sunt:');
for i:=n-1 downto 0 do writeln('a',i,'=',a[i]:8:4);
writeln(fis,'Coeficientii polinomului Pn(x)=an-1xn-1+...+alx1+a0 sunt:');
for i:=n-1 downto 0 do writeln(fis,'a',i,'=',a[i]:8:4);
readln;
repeat
  write('Introduceti valoarea de interpolat (sau 0 pentru terminare) xx=');
  readln(xx);
  ff:=a[0];
  for i:=1 to n-1 do ff:=ff+a[i]*mlan(xx,i);
  writeln('Pentru xx=',xx:8:4,' valoarea calculata este Pn(xx)=' ,ff:8:4);
  writeln(fis,'Pentru xx=',xx:8:4,' valoarea calculata este Pn(xx)=' ,ff:8:4);
until xx=0;
readln;
close(fis);
end.

```

Aproximații prin interpolare liniară Lagrange

Polinoamele de interpolare Lagrange sunt de gradul n, de forma ([Kil97]):

$$P_n(x) = y_0 \cdot g_0(x) + y_1 \cdot g_1(x) + \dots + y_n \cdot g_n(x) \quad (5.71)$$

unde $g_k(x)$ sunt polinoame de gradul n de forma:

$$g_k(x) = \frac{L_k(x)}{L_k(x_k)}, \quad \text{cu } L_k(x) = (x-x_0) \cdot (x-x_1) \cdot \dots \cdot (x-x_{k-1}) \cdot (x-x_{k+1}) \cdot \dots \cdot (x-x_n) \quad (5.72)$$

Algoritmul care implementează determinarea unui polinom de interpolare Lagrange este:

```

program Lagrange;
uses crt;
type matricer=array[0..10,0..10]of real;
      vectorr=array[0..10]of real;
var i,j,k,l,n:integer;

```

```

    ak,xx,ff:real;
    x,y,a:vectorr;
    coef:matricer;
    fis:text;
function mlan(m:real; n:integer):real;
var i:integer; r:real;
begin
    r:=1;
    for i:=1 to n do r:=r*m;
    mlan:=r;
end;
begin
    clrscr;
    assign(fis,'Lagrange.txt'); rewrite(fis);
    write('Introduceti numarul de puncte n='); readln(n);
    writeln('Introduceti punctele:');
    for i:=0 to n-1 do
        begin
            writeln('Punctul ',i);
            write('      x['',i,'']='); readln(x[i]);
            write('      y['',i,'']='); readln(y[i]);
        end;
    writeln;
    writeln('Datele de intrare sunt:');
    writeln(fis,'Datele de intrare sunt:');
    writeln('  x[i]      y[i]');
    writeln(fis,'  x[i]      y[i]');
    writeln('-----');
    writeln(fis,'-----');
    for i:=0 to n-1 do writeln(x[i]:8:4,' ',y[i]:8:4);
    for i:=0 to n-1 do writeln(fis,x[i]:8:4,' ',y[i]:8:4);
    writeln('-----');
    writeln(fis,'-----');
    for i:=0 to n do a[i]:=0;
    for k:=0 to n-1 do
        begin
            ak:=1;
            for j:=0 to n-1 do
                if (j<>k) then ak:=ak*(x[k]-x[j]);
            ak:=y[k]/ak;
            for i:=1 to 3 do
                for j:=0 to n-1 do coef[i,j]:=0;
            coef[1,0]:=1;
            for i:=0 to n-1 do
                if (i<>k) then
                    begin
                        for j:=n-1 downto 1 do coef[2,j]:=coef[1,j-1];
                        for j:=n-1 downto 0 do coef[3,j]:=-coef[1,j]*x[i];
                        for j:=n-1 downto 0 do coef[1,j]:=coef[2,j]+coef[3,j];
                        for j:=n-1 downto 0 do coef[2,j]:=0;
                        for j:=n-1 downto 0 do coef[3,j]:=0;
                    end;
                for j:=0 to 10 do a[j]:=a[j]+coef[1,j]*ak;
            end;
        writeln;
        writeln('Coeficientii polinomului Pn(x)=an-1xn-1+...+alx1+a0 sunt:');
        for i:=n-1 downto 0 do writeln('a',i,'=',a[i]:8:4);
        writeln(fis,'Coeficientii polinomului Pn(x)=an-1xn-1+...+alx1+a0 sunt:');
        for i:=n-1 downto 0 do writeln(fis,'a',i,'=',a[i]:8:4);
        readln;
        repeat
            write('Introduceti valoarea de interpolat (sau 0 pentru terminare) xx=');
            readln(xx);

```

```

ff:=a[0];
for i:=1 to n-1 do ff:=ff+a[i]*mlan(xx,i);
writeln('Pentru xx=',xx:8:4,' valoarea calculata este Pn(xx)=' ,ff:8:4);
writeln(fis,'Pentru xx=',xx:8:4,' valoarea calculata este Pn(xx)=' ,ff:8:4);
until xx=0;
readln;
close(fis);
end.

```

Metoda celor mai mici pătrate

Pentru determinarea coeficienților funcțiilor se efectuează o interpolare prin **metoda celor mai mici pătrate** ([Cic99, Kil97, Mal01, PDB02, Tal87]) care permite determinarea coeficienților funcției:

$$y_i = f(x_i) \quad (5.73)$$

în $n+1$ puncte distincte oarecare, adică perechi de valori $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ ceea ce este cazul în situația datelor obținute în urma experiențelor de prelucrare prin EEC. Metoda poartă această denumire deoarece determină un polinom:

$$\begin{aligned}
 P(x) &= a_0 + a_1 \cdot x \\
 P(x) &= a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2
 \end{aligned} \quad (5.74)$$

$$P(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m$$

pentru care abaterea medie pătratică este minimă:

$$S = \sum_{i=0}^n [P(x) - f(x_i)]^2 = \text{minim} \quad (5.75)$$

Dacă polinomul de interpolare P este de gradul 1, problema se mai numește **regresie liniară** și presupune rezolvarea ecuațiilor cu derivate parțiale:

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 0, j = 0,1 \quad (5.76)$$

ceea ce după explicitarea derivatelor:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial S}{\partial a_0} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i - y_i) \\
 \frac{\partial S}{\partial a_1} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i - y_i) \cdot x_i
 \end{cases} \quad (5.77)$$

revine la sistemul de ecuații:

$$\begin{cases}
 s_0 \cdot a_0 + s_1 \cdot a_1 = t_0 \\
 s_1 \cdot a_0 + s_2 \cdot a_1 = t_1
 \end{cases} \quad (5.78)$$

unde s-au folosit notațiile :

$$s_0 = n + 1 \quad (5.79)$$

$$s_1 = \sum_{i=0}^n x_i \quad (5.80)$$

$$s_2 = \sum_{i=0}^n x_i^2 \quad (5.81)$$

$$t_0 = \sum_{i=0}^n y_i \quad (5.82)$$

$$t_1 = \sum_{i=0}^n x_i \cdot y_i \quad (5.83)$$

Pentru polinoame de gradul 2 (**regresie parabolică**), derivatele parțiale sunt:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_0} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 - y_i) \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 - y_i) \cdot x_i \\ \frac{\partial S}{\partial a_2} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 - y_i) \cdot x_i^2 \end{cases} \quad (5.84)$$

iar sistemul de ecuații care se rezolvă este:

$$\begin{cases} s_0 \cdot a_0 + s_1 \cdot a_1 + s_2 \cdot a_2 = t_0 \\ s_1 \cdot a_0 + s_2 \cdot a_1 + s_3 \cdot a_2 = t_1 \\ s_2 \cdot a_0 + s_3 \cdot a_1 + s_4 \cdot a_2 = t_2 \end{cases} \quad (5.85)$$

unde, pe lângă formulele anterioare s-a mai notat:

$$s_3 = \sum_{i=0}^n x_i^3 \quad (5.86)$$

$$s_4 = \sum_{i=0}^n x_i^4 \quad (5.87)$$

$$t_2 = \sum_{i=0}^n y_i \cdot x_i^2 \quad (5.88)$$

Pentru polinoame de grad superior (m), problema se pune în mod asemănător, sistemul are $m+1$ ecuații iar coeficienții sunt s_0, s_1, \dots, s_{2m} respectiv t_0, t_1, \dots, t_m .

Pentru funcțiile exponențiale, găsirea valorilor coeficienților a_0, a_1, \dots se face prin logaritmarea polinomului de interpolare, astfel:

$$P(x) = \exp(a_0 + a_1 \cdot x) \quad (5.89)$$

$$\Rightarrow \ln P(x) = a_0 + a_1 \cdot x \quad (5.90)$$

apoi, notând:

$$\ln P(x) = PP(x) \quad (5.91)$$

problema revine la o regresie parabolică, exceptând faptul că în locul valorilor y_0, y_1, \dots, y_n se vor folosi în calcul $\ln y_0, \ln y_1, \dots, \ln y_n$.

În mod absolut asemănător, pentru formulele cu exponențiale de gradul doi se fac modificările:

$$P(x) = \exp(a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2) \quad (5.92)$$

$$\Rightarrow \ln P(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (5.93)$$

$$\text{apoi notăm: } \ln P(x) = PP(x) \quad (5.94)$$

respectiv:

$$P(x) = a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2) \quad (5.95)$$

$$\Rightarrow \ln P(x) = \ln a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (5.96)$$

$$\text{și notăm: } \ln P(x) = PP(x) \quad (5.97)$$

$$\text{respectiv: } \ln a_0 = aa_0 \quad (5.98)$$

Secvențele de program care implementează algoritmi pentru calculul valorilor coeficienților din cele șase modele de funcții sunt:

- pentru interpolarea liniară de gradul I:

```
procedure interpol(x,y:vectorr;n:integer;var a1,a0:double);
var i:integer;
    s0,s1,s2,t0,t1:double;
begin
    s0:=n+1;
    t0:=0;
    for i:=0 to n do t0:=t0+y[i];
    s1:=0;
    for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
    t1:=0;
    for i:=0 to n do t1:=t1+y[i]*x[i];
    s2:=0;
    for i:=0 to n do s2:=s2+x[i]*x[i];
    a1:=(s1*t0-s0*t1)/(s1*s1-s0*s2);
    a0:=(t0-s1*a1)/s0;
    writeln('Pentru functia f(x)=a1 x + a0 coeficientii sunt:');
    writeln('a1=',a1);
    writeln('a0=',a0);
    writeln(fis,'Pentru functia f(x)=a1 x + a0 coeficientii sunt:');
    writeln(fis,'a1=',a1);
    writeln(fis,'a0=',a0);
    readln;
end;
```

- pentru interpolarea liniară de gradul II:

```
procedure interpo2(x,y:vectorr;n:integer;var a2,a1,a0:double);
var i:integer;
    coef,a,b,c,d,e,f:double;
    s0,s1,s2,s3,s4,t0,t1,t2:double;
begin
    s0:=n+1;
    t0:=0;
```

```

for i:=0 to n do t0:=t0+y[i];
s1:=0;
for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
t1:=0;
for i:=0 to n do t1:=t1+y[i]*x[i];
s2:=0;
for i:=0 to n do s2:=s2+x[i]*x[i];
t2:=0;
for i:=0 to n do t2:=t2+y[i]*x[i]*x[i];
s3:=0;
for i:=0 to n do s3:=s3+x[i]*x[i]*x[i];
s4:=0;
for i:=0 to n do s4:=s4+x[i]*x[i]*x[i]*x[i];
coef:=s1/s0;
a:=s2-s1*coef;
b:=s3-s2*coef;
c:=t1-t0*coef;
coef:=s2/s0;
d:=s3-s1*coef;
e:=s4-s2*coef;
f:=t2-t0*coef;
coef:=d/a;
a2:=(f-c*coef)/(e-b*coef);
a1:=(c-b*a2)/a;
a0:=(t0-s2*a2-s1*a1)/s0;
writeln('Pentru functia f(x)=a2 x2 + a1 x + a0 coeficientii sunt:');
writeln('a2=',a2);
writeln('a1=',a1);
writeln('a0=',a0);
writeln(fis,'Pentru functia f(x)=a2 x2 + a1 x + a0 coeficientii sunt:');
writeln(fis,'a2=',a2);
writeln(fis,'a1=',a1);
writeln(fis,'a0=',a0);
readln;
end;

```

- pentru interpolarea liniară de gradul III:

```

procedure interpo3(x,y:vectorr;n:integer;var a3,a2,a1,a0:double);
var i:integer;
    aa,bb,cc,dd,ee,ff,gg,hh,ii,jj,kk,ll,ss,tt,uu,vv,ww,xx:double;
    s0,s1,s2,s3,s4,s5,s6,t0,t1,t2,t3:double;
begin
    s0:=n+1;
    s1:=0;
    for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
    s2:=0;
    for i:=0 to n do s2:=s2+x[i]*x[i];
    s3:=0;
    for i:=0 to n do s3:=s3+x[i]*x[i]*x[i];
    s4:=0;
    for i:=0 to n do s4:=s4+x[i]*x[i]*x[i]*x[i];
    s5:=0;
    for i:=0 to n do s5:=s5+x[i]*x[i]*x[i]*x[i]*x[i];
    s6:=0;
    for i:=0 to n do s6:=s6+x[i]*x[i]*x[i]*x[i]*x[i]*x[i];
    t0:=0;
    for i:=0 to n do t0:=t0+y[i];
    t1:=0;
    for i:=0 to n do t1:=t1+y[i]*x[i];
    t2:=0;
    for i:=0 to n do t2:=t2+y[i]*x[i]*x[i];
    t3:=0;

```

```

for i:=0 to n do t3:=t3+y[i]*x[i]*x[i]*x[i];
aa:=-s1*s1+s0*s2;
bb:=-s1*s2+s0*s3;
cc:=-s1*s3+s0*s4;
dd:=-s1*t0+s0*t1;
ee:=-s1*s2+s0*s3;
ff:=-s2*s2+s0*s4;
gg:=-s2*s3+s0*s5;
hh:=-s2*t0+s0*t2;
ii:=-s1*s3+s0*s4;
jj:=-s3*s2+s0*s5;
kk:=-s3*s3+s0*s6;
ll:=-s3*t0+s0*t3;
ss:=-bb*ee+aa*ff;
tt:=-cc*ee+aa*gg;
uu:=-dd*ee+aa*hh;
vv:=-bb*ii+aa*jj;
ww:=-cc*ii+aa*kk;
xx:=-dd*ii+aa*ll;
a3:=(-uu*vv+xx*ss)/(-tt*vv+ww*ss);
a2:=(uu-tt*a3)/ss;
a1:=(dd-cc*a3-bb*a2)/aa;
a0:=(t0-s3*a3-s2*a2-s1*a1)/s0;
writeln('Pentru functia f(x)=a3 x3 + a2 x2 + a1 x + a0 coeficientii sunt:');
writeln('a3=',a3);
writeln('a2=',a2);
writeln('a1=',a1);
writeln('a0=',a0);
  writeln(fis,'Pentru functia f(x)=a3 x3 + a2 x2 + a1 x + a0 coeficientii sunt:');
  writeln(fis,'a3=',a3);
  writeln(fis,'a2=',a2);
  writeln(fis,'a1=',a1);
  writeln(fis,'a0=',a0);
  readln;
end;

```

- pentru interpolarea exponențială de gradul I:

```

procedure interpel(x,y:vectorr;n:integer;var a1,a0:double);
var i:integer;
    coef,a,b,c,d,e,f:double;
    s0,s1,s2,t0,t1:double;
begin
  s0:=n+1;
  t0:=0;
  for i:=0 to n do t0:=t0+y[i];
  s1:=0;
  for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
  t1:=0;
  for i:=0 to n do t1:=t1+y[i]*x[i];
  s2:=0;
  for i:=0 to n do s2:=s2+x[i]*x[i];
  a1:=(s1*t0-s0*t1)/(s1*s1-s0*s2);
  a0:=(t0-s1*a1)/s0;
  writeln('Pentru functia f(x)=exp(a1 x + a0) coeficientii sunt:');
  writeln('a1=',a1);
  writeln('a0=',a0);
  writeln(fis,'Pentru functia f(x)=exp(a1 x + a0) coeficientii sunt:');
  writeln(fis,'a1=',a1);
  writeln(fis,'a0=',a0);
  readln;
end;

```


- pentru interpolarea exponențială de gradul II:

```

procedure interpe2(x,y:vectorr;n:integer;var a2,a1,a0:double);
var i:integer;
    coef,a,b,c,d,e,f:double;
    s0,s1,s2,s3,s4,t0,t1,t2:double;
begin
    s0:=n+1;
    t0:=0;
    for i:=0 to n do t0:=t0+y[i];
    s1:=0;
    for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
    t1:=0;
    for i:=0 to n do t1:=t1+y[i]*x[i];
    s2:=0;
    for i:=0 to n do s2:=s2+x[i]*x[i];
    t2:=0;
    for i:=0 to n do t2:=t2+y[i]*x[i]*x[i];
    s3:=0;
    for i:=0 to n do s3:=s3+x[i]*x[i]*x[i];
    s4:=0;
    for i:=0 to n do s4:=s4+x[i]*x[i]*x[i]*x[i];
    coef:=s1/s0;
    a:=s2-s1*coef;
    b:=s3-s2*coef;
    c:=t1-t0*coef;
    coef:=s2/s0;
    d:=s3-s1*coef;
    e:=s4-s2*coef;
    f:=t2-t0*coef;
    coef:=d/a;
    a2:=(f-c*coef)/(e-b*coef);
    a1:=(c-b*a2)/a;
    a0:=(t0-s2*a2-s1*a1)/s0;
    writeln('Pentru functia f(x)=exp(a2 x2 + a1 x + a0) coeficientii sunt:');
    writeln('a2=',a2);
    writeln('a1=',a1);
    writeln('a0=',a0);
    writeln(fis,'Pentru functia f(x)=exp(a2 x2 + a1 x + a0) coeficientii sunt:');
    writeln(fis,'a2=',a2);
    writeln(fis,'a1=',a1);
    writeln(fis,'a0=',a0);
    readln;
end;

```

- pentru interpolarea exponențială de gradul II cu coeficient de multiplicare:

```

procedure interpaeaa(x,y:vectorr;n:integer;var a2,a1,a0:double);
var i:integer;
    coef,a,b,c,d,e,f:double;
    s0,s1,s2,s3,s4,t0,t1,t2:double;
begin
    s0:=n+1;
    t0:=0;
    for i:=0 to n do t0:=t0+y[i];
    s1:=0;
    for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
    t1:=0;
    for i:=0 to n do t1:=t1+y[i]*x[i];
    s2:=0;
    for i:=0 to n do s2:=s2+x[i]*x[i];

```

```

t2:=0;
for i:=0 to n do t2:=t2+y[i]*x[i]*x[i];
s3:=0;
for i:=0 to n do s3:=s3+x[i]*x[i]*x[i];
s4:=0;
for i:=0 to n do s4:=s4+x[i]*x[i]*x[i]*x[i];
coef:=s1/s0;
a:=s2-s1*coef;
b:=s3-s2*coef;
c:=t1-t0*coef;
coef:=s2/s0;
d:=s3-s1*coef;
e:=s4-s2*coef;
f:=t2-t0*coef;
coef:=d/a;
a2:=(f-c*coef)/(e-b*coef);
a1:=(c-b*a2)/a;
a0:=(t0-s2*a2-s1*a1)/s0; a0:=exp(a0);
writeln('Pentru functia f(x)=a0 exp(a2 x2 + a1 x) coeficientii sunt:');
writeln('a2=',a2);
writeln('a1=',a1);
writeln('a0=',a0);
writeln(fis,'Pentru functia f(x)=a0 exp(a2 x2 + a1 x) coeficientii sunt:');
writeln(fis,'a2=',a2);
writeln(fis,'a1=',a1);
writeln(fis,'a0=',a0);
readln;
end;

```

După stabilirea coeficienților a_0 , a_1 , ..., pentru fiecare tip de funcție (polinomială, exponențială) urmează verificarea concordanței între funcțiile respective și valorile experimentale. Pentru aceasta, pentru fiecare funcție în parte, se determină fie dispersia fie abaterea medie pătratică ([R+84]):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y_{i\text{calc}} - y_{i\text{exp}})^2}{k}} \quad (5.99)$$

în care $y_{i\text{calc}}$ sunt valorile calculate conform funcției determinată prin interpolare, $y_{i\text{exp}}$ sunt valorile determinate experimental, k este numărul de perechi de valori experimentale.

Dacă abaterea are o valoare mică, modelul obținut este corect; mai mult de atât, modelul optim este acea funcție pentru care abaterea medie pătratică este cea mai mică din cele șase valori determinate prin calcul.

Implementarea acestui algoritm (pentru cele trei funcții polinomiale, de gradul 1, 2 și 3) se face cu secvența de program:

```

for i:=0 to n do
begin
ypol1:=alpol1*x[i]+a0pol1;
ypol2:=a2pol2*x[i]*x[i]+alpol2*x[i]+a0pol2;
ypol3:=a3pol3*x[i]*x[i]*x[i]+a2pol3*x[i]*x[i]+alpol3*x[i]+a0pol3;
epol1:=(y[i]-ypol1)/y[i]*100;
epol2:=(y[i]-ypol2)/y[i]*100;
epol3:=(y[i]-ypol3)/y[i]*100;
writeln(x[i]:10:3, y[i]:11:3,
ypol1:11:3, epol1:8:3, ypol2:11:3, epol2:8:3, ypol3:11:3, epol3:8:3);
abatere1:=abatere1+epol1*epol1;
abatere2:=abatere2+epol2*epol2;

```

```
abatere3:=abatere3+epol3*epol3;
end;
writeln('Abaterea medie este:', sqrt(abatere1/(n+1)), sqrt(abatere2/(n+1)),
sqrt(abatere3/(n+1)));
```

5.3.2. Modelarea funcțiilor de mai multe variabile

Pentru dependența $y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$ se încearcă reprezentarea prin funcții polinomiale de gradul 1 sau 2, considerându-se expresiile (întâlnite în literatura de specialitate, [Her95]):

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_p \cdot x_p \quad (5.100)$$

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_{p+1} \cdot x_1^2 + a_{p+2} \cdot x_2^2 + \dots + a_{2p+1} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{2p+2} \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots \quad (5.101)$$

Pentru determinarea coeficienților din prima funcție se efectuează o interpolare polinomială pentru care coeficienții de regresie se calculează cu formula ([Her95]):

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot \bar{y}}{k} \quad (5.102)$$

unde:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k} \quad (5.103)$$

Pentru cazul concret al tezei am căutat dependențe de 2 variabile care să fie de gradul 1 și 2, adică:

$$z = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y \quad (5.104)$$

$$z = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot y^2 + a_5 \cdot x \cdot y \quad (5.105)$$

determinarea coeficienților a_0, a_1, \dots fiind bazată pe **metoda celor mai mici pătrate**. Astfel, pentru funcția (5.104) se aplică formula:

$$S = \sum_{i=0}^n [P(x) - y_i]^2 = \text{minim} \quad (5.106)$$

de unde:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_0} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i - z_i) \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i - z_i) \cdot x_i \\ \frac{\partial S}{\partial a_2} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i - z_i) \cdot y_i \end{cases} \quad (5.107)$$

adică, folosind notațiile:

$$s_0 = n + 1 \quad (5.108)$$

$$s_1 = \sum_{i=0}^n x_i \quad (5.109)$$

$$s_2 = \sum_{i=0}^n y_i \quad (5.110)$$

$$s_3 = \sum_{i=0}^n x_i^2 \quad (5.111)$$

$$s_4 = \sum_{i=0}^n x_i \cdot y_i \quad (5.112)$$

$$s_5 = \sum_{i=0}^n y_i^2 \quad (5.113)$$

$$t_0 = \sum_{i=0}^n z_i \quad (5.114)$$

$$t_1 = \sum_{i=0}^n z_i \cdot x_i \quad (5.115)$$

$$t_2 = \sum_{i=0}^n z_i \cdot y_i \quad (5.116)$$

revine la rezolvarea sistemului de ecuații:

$$\begin{cases} s_0 \cdot a_0 + s_1 \cdot a_1 + s_2 \cdot a_2 = t_0 \\ s_1 \cdot a_0 + s_3 \cdot a_1 + s_4 \cdot a_2 = t_1 \\ s_2 \cdot a_0 + s_4 \cdot a_1 + s_5 \cdot a_2 = t_2 \end{cases} \quad (5.117)$$

Pentru funcția de două variabile (5.105), plecând de la aceeași formulă (5.106) se scrie sistemul de ecuații cu derivate parțiale:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial a_0} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i - z_i) \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i - z_i) \cdot x_i \\ \frac{\partial S}{\partial a_2} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i - z_i) \cdot y_i \\ \frac{\partial S}{\partial a_3} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i - z_i) \cdot x_i^2 \\ \frac{\partial S}{\partial a_4} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i - z_i) \cdot y_i^2 \\ \frac{\partial S}{\partial a_5} = 2 \cdot \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i - z_i) \cdot x_i \cdot y_i \end{array} \right. \quad (5.118)$$

care se rescrie ca sistem de ecuații liniare astfel:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_0 \cdot a_0 + s_1 \cdot a_1 + s_2 \cdot a_2 + s_3 \cdot a_3 + s_4 \cdot a_4 + s_5 \cdot a_5 = t_0 \\ s_1 \cdot a_0 + s_3 \cdot a_1 + s_5 \cdot a_2 + s_6 \cdot a_3 + s_7 \cdot a_4 + s_8 \cdot a_5 = t_1 \\ s_2 \cdot a_0 + s_5 \cdot a_1 + s_4 \cdot a_2 + s_8 \cdot a_3 + s_9 \cdot a_4 + s_7 \cdot a_5 = t_2 \\ s_3 \cdot a_0 + s_6 \cdot a_1 + s_8 \cdot a_2 + s_{10} \cdot a_3 + s_{11} \cdot a_4 + s_{12} \cdot a_5 = t_3 \\ s_4 \cdot a_0 + s_7 \cdot a_1 + s_9 \cdot a_2 + s_{11} \cdot a_3 + s_{13} \cdot a_4 + s_{14} \cdot a_5 = t_4 \\ s_5 \cdot a_0 + s_8 \cdot a_1 + s_7 \cdot a_2 + s_{12} \cdot a_3 + s_{14} \cdot a_4 + s_{11} \cdot a_5 = t_5 \end{array} \right. \quad (5.119)$$

În care variabilele s respectiv t sunt definite prin:

$$s_0 = n + 1 \quad (5.120)$$

$$s_1 = \sum_{i=0}^n x_i \quad (5.121)$$

$$s_2 = \sum_{i=0}^n y_i \quad (5.122)$$

$$s_3 = \sum_{i=0}^n x_i^2 \quad (5.123)$$

$$s_4 = \sum_{i=0}^n y_i^2 \quad (5.124)$$

$$s_5 = \sum_{i=0}^n x_i \cdot y_i \quad (5.125)$$

$$s_6 = \sum_{i=0}^n x_i^3 \quad (5.126)$$

$$s_7 = \sum_{i=0}^n x_i \cdot y_i^2 \quad (5.127)$$

$$s_8 = \sum_{i=0}^n x_i^2 \cdot y_i \quad (5.128)$$

$$s_9 = \sum_{i=0}^n y_i^3 \quad (5.129)$$

$$s_{10} = \sum_{i=0}^n x_i^4 \quad (5.130)$$

$$s_{11} = \sum_{i=0}^n x_i^2 \cdot y_i^2 \quad (5.131)$$

$$s_{12} = \sum_{i=0}^n x_i^3 \cdot y_i \quad (5.132)$$

$$s_{13} = \sum_{i=0}^n y_i^4 \quad (5.133)$$

$$s_{14} = \sum_{i=0}^n x_i \cdot y_i^3 \quad (5.134)$$

$$t_0 = \sum_{i=0}^n z_i \quad (5.135)$$

$$t_1 = \sum_{i=0}^n z_i \cdot x_i \quad (5.136)$$

$$t_2 = \sum_{i=0}^n z_i \cdot y_i \quad (5.137)$$

$$t_3 = \sum_{i=0}^n z_i \cdot x_i^2 \quad (5.138)$$

$$t_4 = \sum_{i=0}^n z_i \cdot y_i^2 \quad (5.139)$$

$$t_5 = \sum_{i=0}^n z_i \cdot x_i^2 \cdot y_i^2 \quad (5.140)$$

După determinarea coeficienților funcției de interpolare urmează verificarea modelului ales prin calculul dispersiilor:

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2}{k-1} \quad (5.141)$$

și verificarea omogenității dispersiilor folosind criteriul Cochran; pentru aceasta se calculează valoarea :

$$C_o = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^k S_u^2} \quad (5.142)$$

care se compară cu cea tabelată; dacă valoarea calculată este mai mică decât cea calculată, datele astfel obținute sunt corecte și se poate trece mai departe; dacă valoarea calculată depășește pe cea tabelată, se elimină din calcule acele valori care produc depășirea valorii tabelate.

În continuare se pot determina eroarea experimentală și dispersia coeficienților de regresie cu formulele:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2}{k} \quad (5.143)$$

$$S_{hi}^2 = \frac{S_0^2}{k} \quad (5.144)$$

în baza cărora se determină dispersia de concordanță:

$$S_{con}^2 = \frac{k}{k - (n + 1)} \sum_{u=1}^n (\bar{y} - f(x)) \quad (5.145)$$

și în mod corespunzător valoarea criteriului Fischer:

$$F = \frac{S_{con}^2}{S_a^2} \quad (5.146)$$

valoare care indică dacă modelul este concordant ($F_{calculat} < F_{tabelat}$) sau nu. În caz de respingere, alegerea modelului se reia de la început, până la obținerea unui model adecvat care să corespundă criteriilor statistice arătate mai sus.

Algoritmul care implementează modelarea funcțiilor de două variabile este:

```

program interpolareXY;
uses crt;
type vectorr=array[0..10]of real;
var i,j,n:integer;
    x,y,z:vectorr;
    abaterel,abatere2,a0pol1,alpol1,a2pol1,a0pol2,alpol2,a2pol2,a3pol2,a4pol2,
    a5pol2,zpol1,zpol2,epol1,epol2,xx,yy:double;
    fis:text;
procedure interpol(x,y,z:vectorr;n:integer;var a2,a1,a0:double);
var i:integer;
    s0,s1,s2,s3,s4,s5,t0,t1,t2,k1,k2,k3,k4,k5,k6:double;
begin
    s0:=n+1;
    s1:=0;
    for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
    s2:=0;
    for i:=0 to n do s2:=s2+y[i];
    s3:=0;
    for i:=0 to n do s3:=s3+x[i]*x[i];
    s4:=0;
    for i:=0 to n do s4:=s4+x[i]*y[i];
    s5:=0;
    for i:=0 to n do s5:=s5+y[i]*y[i];
    t0:=0;
    for i:=0 to n do t0:=t0+z[i];
    t1:=0;
    for i:=0 to n do t1:=t1+z[i]*x[i];
    t2:=0;
    for i:=0 to n do t2:=t2+z[i]*y[i];
    k1:=s1*s1-s0*s3;
    k2:=s1*s2-s0*s4;
    k3:=t0*s1-t1*s0;
    k4:=s2*s1-s0*s4;
    k5:=s2*s2-s0*s5;

```



```

k6:=t0*s2-t2*s0;
a2:=(k3*k4-k6*k1)/(k2*k4-k5*k1);
a1:=(k3-a2*k2)/k1;
a0:=(t0-s1*a1-s2*a2)/s0;
writeln('Pentru functia f(x,y)=a0+alx+a2y coeficientii sunt:');
writeln('a0=',a0);
writeln('a1=',a1);
writeln('a2=',a2);
writeln(fis,'Pentru functia f(x,y)=a0+alx+a2y coeficientii sunt:');
writeln(fis,'a0=',a0);
writeln(fis,'a1=',a1);
writeln(fis,'a2=',a2);
readln;
end;
procedure interpo2(x,y,z:vectorr;n:integer;var a5,a4,a3,a2,a1,a0:double);
var i:integer;
    s0,s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14,t0,t1,t2,t3,t4,t5,
    k1,k2,k3,k4,k5,k6,k7,k8,k9,k10,k11,k12,k13,k14,k15,k16,k17,k18,k19,k20,
    k21,k22,k23,k24,k25,k26,k27,k28,k29,k30,q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,q8,q9,q10,
    q11,q12,q13,q14,q15,q16,q17,q18,q19,q20,v1,v2,v3,v4,v5,v6,v7,v8,v9,v10,
    v11,v12,w1,w2,w3,w4,w5,w6:double;
begin
    s0:=n+1;
    s1:=0;
    for i:=0 to n do s1:=s1+x[i];
    s2:=0;
    for i:=0 to n do s2:=s2+y[i];
    s3:=0;
    for i:=0 to n do s3:=s3+x[i]*x[i];
    s4:=0;
    for i:=0 to n do s4:=s4+y[i]*y[i];
    s5:=0;
    for i:=0 to n do s5:=s5+x[i]*y[i];
    s6:=0;
    for i:=0 to n do s6:=s6+x[i]*x[i]*x[i];
    s7:=0;
    for i:=0 to n do s7:=s7+x[i]*y[i]*y[i];
    s8:=0;
    for i:=0 to n do s8:=s8+x[i]*x[i]*y[i];
    s9:=0;
    for i:=0 to n do s9:=s9+y[i]*y[i]*y[i];
    s10:=0;
    for i:=0 to n do s10:=s10+x[i]*x[i]*x[i]*x[i];
    s11:=0;
    for i:=0 to n do s11:=s11+x[i]*x[i]*y[i]*y[i];
    s12:=0;
    for i:=0 to n do s12:=s12+x[i]*x[i]*x[i]*y[i];
    s13:=0;
    for i:=0 to n do s13:=s13+y[i]*y[i]*y[i]*y[i];
    s14:=0;
    for i:=0 to n do s14:=s14+x[i]*y[i]*y[i]*y[i];
    t0:=0;
    for i:=0 to n do t0:=t0+z[i];
    t1:=0;
    for i:=0 to n do t1:=t1+z[i]*x[i];
    t2:=0;
    for i:=0 to n do t2:=t2+z[i]*y[i];
    t3:=0;
    for i:=0 to n do t3:=t3+z[i]*x[i]*x[i];
    t4:=0;
    for i:=0 to n do t4:=t4+z[i]*y[i]*y[i];
    t5:=0;
    for i:=0 to n do t5:=t5+z[i]*x[i]*y[i];

```

```

k1:=s1*s1-s0* s3; k2:=s1*s2-s0* s5; k3:=s1*s3-s0* s6; k4:=s1*s4-s0* s7;
k5:=s1*s5-s0* s8; k6:=s1*t0-s0* t1;
k7:=s2*s1-s0* s5; k8:=s2*s2-s0* s4; k9:=s2*s3-s0* s8; k10:=s2*s4-s0* s9;
k11:=s2*s5-s0* s7; k12:=s2*t0-s0* t2;
k13:=s3*s1-s0* s6; k14:=s3*s2-s0* s8; k15:=s3*s3-s0*s10; k16:=s3*s4-s0*s11;
k17:=s3*s5-s0*s12; k18:=s3*t0-s0* t3;
k19:=s4*s1-s0* s7; k20:=s4*s2-s0* s9; k21:=s4*s3-s0*s11; k22:=s4*s4-s0*s13;
k23:=s4*s5-s0*s14; k24:=s4*t0-s0* t4;
k25:=s5*s1-s0* s8; k26:=s5*s2-s0* s7; k27:=s5*s3-s0*s12; k28:=s5*s4-s0*s14;
k29:=s5*s5-s0*s11; k30:=s5*t0-s0* t5;
q1:=k2* k7-k1* k8; q2:=k3* k7-k1* k9; q3:=k4* k7-k1*k10; q4:=k5* k7-
k1*k11; q5:=k6* k7-k1*k12;
q6:=k2*k13-k1*k14; q7:=k3*k13-k1*k15; q8:=k4*k13-k1*k16; q9:=k5*k13-
k1*k17; q10:=k6*k13-k1*k18;
q11:=k2*k19-k1*k20; q12:=k3*k19-k1*k21; q13:=k4*k19-k1*k22; q14:=k5*k19-
k1*k23; q15:=k6*k19-k1*k24;
q16:=k2*k25-k1*k26; q17:=k3*k25-k1*k27; q18:=k4*k25-k1*k28; q19:=k5*k25-
k1*k29; q20:=k6*k25-k1*k30;
v1:= q6*q2-q1* q7; v2:= q6*q3-q1* q8; v3:= q6*q4-q1* q9; v4:= q6*q5-
q1*q10;
v5:=q11*q2-q1*q12; v6:=q11*q3-q1*q13; v7:=q11*q4-q1*q14; v8:=q11*q5-
q1*q15;
v9:=q16*q2-q1*q17; v10:=q16*q3-q1*q18; v11:=q16*q4-q1*q19; v12:=q16*q5-
q1*q20;
w1:=v2*v5-v1* v6; w2:=v3*v5-v1* v7; w3:=v4*v5-v1* v8;
w4:=v2*v9-v1*v10; w5:=v3*v9-v1*v11; w6:=v4*v9-v1*v12;
a5:=(w3*w4-w1*w6)/(w2*w4-w5*w1);
a4:=(w3-w2*a5)/w1;
a3:=(v4-v2*a4-v3*a5)/v1;
a2:=(q5-q3*a3-q3*a4-q4*a5)/q1;
a1:=(k6-k2*a2-k3*a3-k4*a4-k5*a5)/k1;
a0:=(t0-s1*a1-s2*a2-s3*a3-s4*a4-s5*a5)/s0;
writeln('Pentru functia f(x,y)=a0+alx+a2y+a3x^2+a4y^2+a5xy coeficientii sunt:');
writeln('a5=',a5);
writeln('a4=',a4);
writeln('a3=',a3);
writeln('a2=',a2);
writeln('a1=',a1);
writeln('a0=',a0);
writeln(fis,'Pentru functia f(x,y)=a0+alx+a2y+a3x^2+a4y^2+a5xy coeficientii sunt:');
writeln(fis,'a5=',a5);
writeln(fis,'a4=',a4);
writeln(fis,'a3=',a3);
writeln(fis,'a2=',a2);
writeln(fis,'a1=',a1);
writeln(fis,'a0=',a0);
readln;
end;
begin
assign(fis,'interxy.txt'); rewrite(fis);
clrscr;
write('Introduceti numarul de puncte n='); readln(n); n:=n-1;
writeln('Introduceti pe rand valorile lui x, y si z in cele n puncte:');
for i:=0 to n do
begin
writeln('Punctul: i=',i:2);
write (' x='); readln(x[i]);
write (' y='); readln(y[i]);
write (' z='); readln(z[i]);
end;
writeln(fis,'Valorile masurate sunt:');
for i:=0 to n do writeln(fis,x[i]:10:4,y[i]:10:4,z[i]:10:4);
interpol(x,y,z,n,a2pol1,alpol1,a0pol1);
interpo2(x,y,z,n,a5pol2,a4pol2,a3pol2,a2pol2,alpol2,a0pol2);

```

```

writeln('Verificare:');
writeln(fis,'Verificare:');
abatere1:=0; abatere2:=0;
writeln('      X      Y      Zmas      Zpol1      Epol1      Zpol2      Epol2 ');
writeln('-----');
writeln(fis,'      X      Y      Zmas      Zpol1      Epol1      Zpol2      Epol2 ');
writeln(fis,'-----');
for i:=0 to n do
begin
  zpol1:=a0pol1+alpol1*x[i]+a2pol1*y[i];
  zpol2:=a0pol2+alpol2*x[i]+a2pol2*y[i]+a3pol2*x[i]*x[i]+
    a4pol2*y[i]*y[i]+a5pol2*x[i]*y[i];
  epol1:=(z[i]-zpol1)/z[i]*100;
  epol2:=(z[i]-zpol2)/z[i]*100;
  writeln(x[i]:10:3,y[i]:11:3,z[i]:11:3,zpol1:11:3,epol1:8:3,zpol2:11:3,epol2:8:3);
  writeln(fis,x[i]:10:3,y[i]:11:3,z[i]:11:3,zpol1:11:3,epol1:8:3,
    zpol2:11:3,epol2:8:3);
  abatere1:=abatere1+epol1*epol1;
  abatere2:=abatere2+epol2*epol2;
end;
writeln('-----');
writeln('Abaterea medie este: ',
  sqrt(abatere1/(n+1)):7:3,sqrt(abatere2/(n+1)):19:3);
writeln('-----');
writeln(fis,'-----');
writeln(fis,'Abaterea medie este: ',
  sqrt(abatere1/(n+1)):7:3,sqrt(abatere2/(n+1)):19:3);
writeln(fis,'-----');
readln;
repeat
  write('Introduceti valorile lui x si y pentru care doriti pe z (0 pt terminare)');
  write('xx='); readln(xx);
  write('yy='); readln(yy);
  zpol1:=a0pol1+alpol1*xx+a2pol1*yy;
  zpol2:=a0pol2+alpol2*xx+a2pol2*yy+a3pol2*xx*xx+a4pol2*yy*yy+a5pol2*xx*yy;
  writeln('x=',xx:10:3,' y=',yy:10:3,' zpol1=',zpol1:10:3,' zpol2=',zpol2:10:3);
  writeln(fis,'x=',xx:10:3,' y=',yy:10:3,' zpol1=',zpol1:10:3,' zpol2=',zpol2:10:3);
until (xx=0) and (yy=0);
readln;
close(fis);
end.

```

5.4. ALGORITMI DE SIMULARE

Simularea este definită ca fiind „dezvoltarea și utilizarea modelelor computerizate pentru studiul sistemelor dinamice reale sau virtuale” ([SL00]).

Conform acestei definiții, operația de simulare aplicată asupra procesului tehnologic de prelucrare prin EEC presupune mai întâi elaborarea unui model matematic de forma unor ecuații, care să descrie relațiile dintre factorii de intrare și cei de ieșire din sistem (proces tehnologic). Este însă la fel de adevărat că, dacă modelul matematic nu poate fi exprimat concret (matematic), simularea poate avea loc deoarece ea poate să facă ajustarea parametrilor simulării până la apropierea de criteriile funcționale dorite, în așa fel încât să permită elaborarea modelului matematic.

Simularea presupune parcurgerea următoarelor etape ([Poc98, SL00, Vad77]):

- **dezvoltarea modelului**, adică elaborarea dependențelor matematice care descriu funcționarea sistemului și implementarea lor într-un mod care să permită utilizarea (prelucrarea) folosind calculatorul;

- **testarea modelului**, adică verificarea comportamentului în condiții specificate pentru a verifica modul de adecvare a modelului la realitate;
- **exploatarea modelului**, adică utilizarea sa pentru a descrie modul în care sistemul respectiv funcționează în realitate.

Sunt două metode generale pentru căutarea optimului unei funcții utilizând simularea numerică ([VSO83]):

- metoda explorării aleatoare pure, constând în generarea unui număr de puncte uniform repartizate într-un domeniu dat și reținerea după fiecare ciclu de simulare a valorii optime a funcției;
- metoda explorării aleatoare lente dirijate, constând în efectuarea unor calcule aritmetice și teste comparative în cadrul unui ciclu de simulare, care devine astfel mai lung dar scade numărul total de cicluri.

Am apelat la două metode de simulare din cea de-a doua categorie, pentru funcțiile de o singură variabilă respectiv pentru cele de două variabile.

5.4.1. Metoda reducerii domeniului admisibil la funcțiile de o variabilă

Metoda se poate aplica funcțiilor continue și unimodale² ([VSO83]) ceea ce este cazul³ la prelucrările tehnologice prin EEC. Pașii algoritmului de simulare pentru maximizarea funcției $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ sunt:

Pasul 1. Se generează n numere aleatoare distincte x_i , $i=1, n$, uniform repartizate pe domeniul de definiție a funcției.

Pasul 2. Se ordonează crescător șirul $\{x_i\}$.

Pasul 3. Se calculează valorile $y_i=f(x_i)$, $i=1, n$. Dacă $y_1 < y_2 < y_3$ atunci calculele continuă. Calculele se opresc atunci când:

- $f(x_{i-1}) < f(x_i)$ și $f(x_{i+1}) < f(x_i)$ (5.147)

În această situație, se restrânge domeniul de definiție al funcției la intervalul $[a', b']$ unde $a' = x_{i-1}$ iar $b' = x_{i+1}$;

- $f(x_{n-1}) < f(x_n)$ (5.148)

caz în care se iau $a' = x_n$ iar $b' = b$;

- $f(x_{i-1}) = f(x_i)$ dar $f(x_i) > f(x_{i+1})$ (5.149)

caz în care se iau $a' = x_{i-1}$ iar $b' = x_i$.

Pasul 4. Dacă:

$$b' - a' < \varepsilon \text{ și } |f(b') - f(a')| < \eta \quad (5.150)$$

² o funcție se numește **unimodală** dacă ea are un singur punct de extrem (maxim sau minim) pe intervalul său de definiție

³ am considerat că funcțiile care exprimă dependența între parametrii tehnologici și factorii de intrare sunt continue și unimodale deoarece am constatat că ele se pot exprima fie prin funcții polinomiale fie prin funcții exponențiale, care îndeplinesc aceste două condiții

unde ε și η sunt abateri admisibile, atunci valoarea optimă este $x_{\text{optim}}=(a'+b')/2$. Dacă relația (5.150) nu este satisfăcută atunci se reia algoritmul de la pasul 1.

Algoritmul care implementează această problemă, folosit la prelucrarea prin EEC pentru funcțiile de o singură variabilă determinate așa cum s-a prezentat la 5.3.1, este:

```

program Simulare1;
uses crt;
type vectorr=array[0..10]of real;
var coef,x,y:vectorr;
    i,j,m,n:integer;
    a,b,epsilon,ita,pas,fa,fb,xoptim:real;
    gata:boolean;
function f(k:integer;coef,x:real):real;
var i:integer; g:real;
begin
    g:=coef;
    for i:=1 to k do g:=g*x;
    f:=g;
end;
begin
    clrscr;
    writeln('Introduceti datele despre functia f:');
    write('Gradul polinomului n='); readln(n);
    writeln('Introduceti coeficientii polinomiali:');
    for i:=n downto 0 do
        begin
            write('a['',i,'']='); readln(coef[i]);
        end;
    writeln('Introduceti domeniul de definitie a functiei f:');
    write('a='); readln(a);
    write('b='); readln(b);
    write('Introduceti epsilon='); readln(epsilon);
    write('Introduceti ita='); readln(ita);
    gata:=false; m:=10;
    repeat
        pas:=(b-a)/m;
        for i:=0 to m do x[i]:=a+i*pas;
        for i:=0 to m do
            begin
                y[i]:=coef[0];
                for j:=1 to n do y[i]:=y[i]+f(j,coef[j],x[i]);
            end;
        for i:=0 to m do
            begin
                if (y[i-1]<y[i]) and (y[i+1]<y[i]) then
                    begin
                        a:=x[i-1]; b:=x[i+1];
                    end;
                if (y[m-1]<y[m]) then
                    begin
                        a:=x[m];
                    end;
                if (y[i-1]=y[i]) and (y[i]>y[i+1]) then
                    begin
                        a:=x[i-1]; b:=x[i];
                    end;
            end;
        fa:=coef[0];
        for j:=1 to n do fa:=fa+f(j,coef[j],a);
        fb:=coef[0];
        for j:=1 to n do fb:=fb+f(j,coef[j],b);
        if ((b-a)<epsilon) and (abs(fb-fa)<ita) then

```

```

begin
xoptim:=(a+b)/2;
writeln('Solutia optima este xoptim=',xoptim);
gata:=true;
readln;
end;
until gata;
end.

```

5.4.2. Metoda reducerii domeniului admisibil la funcțiile de două variabile

Pentru optimizarea funcției de două variabile $f:[a,b] \times [c,d] \rightarrow \mathbb{R}$ se parcurg următorii pași:

Pasul 1. Se alege un punct $(x,y) \in [a,b] \times [c,d]$.

Pasul 2. Se menține y constant și se determină valoarea x' pentru care:

$$f(x',y) = \text{optim } f(x,y) \quad (5.151)$$

Pasul 3. Se menține x' constant și se determină y' pentru care:

$$f(x',y') = \text{optim } f(x',y) \quad (5.152)$$

Pasul 4. Se verifică dacă:

$$|x-x'| \leq \varepsilon_1, |y-y'| \leq \varepsilon_2, |f(x,y)-f(x',y')| \leq \eta \quad (5.153)$$

unde ε_1 , ε_2 și η sunt abaterile admisibile. Dacă da, atunci optimul este $x_{\text{optim}}=(x+x')/2$ și $y_{\text{optim}}=(y+y')/2$ și algoritmul se încheie. Dacă nu, se trece la pasul 5.

Pasul 5. Se compară x cu x' și y cu y' . Dacă $y' < y$ se ia $d=y'$; dacă $y' > y$ se ia $c=y'$; dacă $x' < x$ se ia $b=x'$; dacă $x' > x$ se ia $a=x'$ și se revine la pasul 2.

Algoritmul care implementează această problemă utilizează funcțiile de două variabile care modelează prelucrarea prin EEC, determinate ca la 5.3.2, este:

```

program Simulare2;
uses crt;
type matricer=array[0..10,0..10]of real;
      vectorr=array[0..10]of real;
var x,y:vectorr;
    coef,z:matricer;
    i,j,k,l,m,n:integer;
    a,b,c,d,epsilon,ita,pasx,pasy,fa,fb,fc,fd,xoptim,yoptim:real;
    gata:boolean;
function f(k,l:integer;x,y:real):real;
var i:integer; g:real;
begin
  g:=1;
  for i:=1 to k do g:=g*x;
  for i:=1 to l do g:=g*y;
  f:=g;
end;
begin
  clrscr;
  writeln('Introduceti datele despre functia f:');

```

```

write('Gradul maxim al polinomului n='); readln(n);
writeln('Introduceti coeficientii polinomiali:');
for i:=0 to n do
  for j:=0 to n do
    begin
      write('coeficientul lui x^',i,'*y^',j,'='); readln(coef[i,j]);
    end;
writeln('Introduceti domeniul de definitie a functiei f:');
write('a='); readln(a);
write('b='); readln(b);
write('c='); readln(c);
write('d='); readln(d);
write('Introduceti epsilon='); readln(epsilon);
write('Introduceti ita='); readln(ita);
gata:=false; m:=10;
repeat
  pasx:=(b-a)/m;
  pasy:=(d-c)/m;
  for i:=0 to m do x[i]:=a+i*pasx;
  for i:=0 to m do y[i]:=c+i*pasy;
  for i:=0 to m do
    for j:=0 to m do
      begin
        z[i,j]:=1;
        for k:=0 to n do
          for l:=0 to n do
            z[i,j]:=z[i,j]+coef[k,l]*f(k,l,x[i],y[j]);
          end;
        end;
    for i:=0 to m do
      begin
        if (z[i-1,m div 2]<z[i,m div 2]) and (z[i+1,m div 2]<z[i,m div 2]) then
          begin
            a:=x[i-1]; b:=x[i+1];
          end;
        if (z[m-1,m div 2]<z[m,m div 2]) then
          begin
            a:=x[m];
          end;
        if (z[i-1,m div 2]=z[i,m div 2]) and (z[i,m div 2]>z[i+1,m div 2]) then
          begin
            a:=x[i-1]; b:=x[i];
          end;
        end;
      fa:=coef[0,0];
      for i:=1 to n do fa:=fa+coef[i,m div 2]*f(i,m div 2,x[i],y[m div 2]);
      fb:=coef[0,0];
      for i:=1 to n do fb:=fb+coef[i,m div 2]*f(i,m div 2,x[i],y[m div 2]);
      if ((b-a)<epsilon) and (abs(fb-fa)<ita) then
        begin
          xoptim:=(a+b)/2;
          writeln('Solutia optima este xoptim=',xoptim);
          gata:=true;
          readln;
        end;
until gata;
gata:=false;
repeat
  pasy:=(d-c)/m;
  for i:=0 to m do y[i]:=c+i*pasy;
  for j:=0 to m do
    begin
      z[1,j]:=1;
      for k:=0 to n do

```



```

    for l:=0 to n do
        z[1,j]:=z[1,j]+coef[k,l]*f(k,l,xoptim,y[j]);
    end;
for j:=0 to m do
    begin
    if (z[1,j-1]<z[1,j]) and (z[1,j+1]<z[1,j]) then
        begin
        c:=y[j-1]; d:=y[j+1];
        writeln('S-a modificat c=',c:10:4,' d=',d:10:4); readln;
        end;
    if (z[1,m-1]<z[1,m]) then
        begin
        c:=y[m];
        writeln('S-a modificat c=',c:10:4); readln;
        end;
    if (z[1,j-1]=z[1,j]) and (z[1,i]>z[1,j+1]) then
        begin
        c:=y[j-1]; d:=y[j];
        writeln('S-a modificat c=',c:10:4,' d=',d:10:4); readln;
        end;
    end;
fc:=coef[0,0];
for j:=1 to n do fc:=fc+coef[1,i]*f(1,j,xoptim,y[j]);
fd:=coef[0,0];
for j:=1 to n do fd:=fd+coef[1,j]*f(1,j,xoptim,y[j]);
if ((d-c)<epsilon) and (abs(fd-fc)<ita) then
    begin
    yoptim:=(c+d)/2;
    writeln('Solutia optima este yoptim=',yoptim);
    gata:=true;
    readln;
    end;
until gata;
end.

```

5.5. ALGORITMI DE OPTIMIZARE

După determinarea modelului matematic al procesului tehnologic, problema optimizării se reduce la aflarea extremului (maxim sau minim) unei funcții liniare sau neliniare, care depinde de una sau mai multe variabile, în condițiile existenței unor restricții suplimentare la care sunt supuși factorii procesului.

În multe situații, strategia de conducere a procesului tehnologic constă ([Tal87]) în a impune procesului valorilor optime rezultate în etapa de optimizare și a aștepta ca procesul să ajungă la optimul staționar calculat, acțiune numită **optimizare staționară** sau **statică**. Dacă pentru proces are importanță comportarea tranzitorie, atunci este necesară comandarea corectă și continuă a variabilelor de comandă ceea ce înseamnă o **optimizare dinamică** a procesului.

Totuși, specialiștii consideră că este suficientă optimizarea staționară la majoritatea proceselor tehnologice existente. Din acest motiv am considerat oportună aplicarea metodele de optimizare staționară cu restricții asupra variabilelor de comandă, întrucât în lucrare se tratează procesul global de prelucrare prin EEC, care, în ansamblul său, este un proces netranzitoriu.

Problema optimizării unui proces tehnologic care se traduce într-o optimizare prin maximizarea sau minimizarea unei funcții în condițiile existenței unor restricții suplimentare la care sunt supuse variabilele este o problemă de programare liniară.

Pentru optimizarea unei funcții liniare în care variabilele sunt supuse unor restricții liniare este utilă **metoda simplex** elaborată în 1949 de către G. B. Dantzig.

Pentru optimizarea funcțiilor neliniare în care variabilele sunt supuse unor restricții liniare sau neliniare se pot aplica metode din programarea matematică cum ar fi **metoda gradientului proiectat**.

5.5.1. Programarea liniară. Algoritmul simplex

O problemă de programare liniară este constituită dintr-un sistem de ecuații și inecuații liniare, împreună cu o funcție, de asemenea liniară, care trebuie optimizată ([Kar02, Kar03f]).

În această situație, pot apărea următoarele elemente alternative:

- funcția de optimizat, care se numește **funcție scop (funcție obiectiv)**, poate fi maximizată sau minimizată;
- sistemul de ecuații și inecuații, care se numește **sistem de restricții**, poate fi compus doar din ecuații, doar inecuații (caz în care pot apărea inecuații doar cu semnul \leq , doar cu semnul \geq sau ambele) sau pot fi prezente simultan ecuații și inecuații (cu cele trei cazuri);
- variabilele pot fi toate pozitive, toate negative sau unele pozitive și unele negative.

Plecând de la aceste multe combinații posibile, iată că problema de programare liniară are o multitudine de forme de prezentare. Totuși, două dintre ele sunt de interes pentru rezolvarea problemei pe cale computațională.

Forma generală a problemei de programare liniară are toate combinațiile posibile de situații⁴:

$$[\text{opt}] f = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (5.154)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n \leq b_1 \\ a_{s,1}x_1 + a_{s,2}x_2 + \dots + a_{s,n}x_n \leq b_s \\ a_{s+1,1}x_1 + a_{s+1,2}x_2 + \dots + a_{s+1,n}x_n = b_{s+1} \\ a_{t,1}x_1 + a_{t,2}x_2 + \dots + a_{t,n}x_n = b_t \\ a_{t+1,1}x_1 + a_{t+1,2}x_2 + \dots + a_{t+1,n}x_n \geq b_{t+1} \\ a_{m,1}x_1 + a_{m,2}x_2 + \dots + a_{m,n}x_n \geq b_m \end{array} \right. \quad (5.155)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2, \dots, x_p \geq 0, \\ x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_q \leq 0, \\ x_{q+1}, x_{q+2}, \dots, x_n \text{ cu semn oarecare} \end{array} \right. \quad (5.156)$$

adică:

⁴ în prezentările care urmează, uneori, indicii matriceali sunt scriși cu virgulă pentru a indica în mod clar diferența între linie și coloană; astfel, $a_{s+1,1}$ va însemna elementul aflat pe linia $s+1$, coloana 1, în matricea A

-funcția obiectiv poate fi optimizată în sens de maxim sau minim;

-primele s inecuații sunt cu semnul \leq ; următoarele, de la $s+1$ la t , sunt ecuații; ultimele, de la $t+1$ la m , sunt inecuații cu semnul \geq ;

-primele p variabile sunt pozitive; următoarele, de la $p+1$ la q , sunt negative; celelalte variabile pot avea orice semn.

Problema de programare liniară, în forma sa generală, poate fi scrisă matriceal astfel:

$$[\text{opt}] f = c^1 x^1 + c^2 x^2 + c^3 x^3 \quad (5.157)$$

$$\begin{cases} A_{11}x^1 + A_{12}x^2 + A_{13}x^3 \leq b^1 \\ A_{21}x^1 + A_{22}x^2 + A_{23}x^3 = b^2 \\ A_{31}x^1 + A_{32}x^2 + A_{33}x^3 \geq b^3 \end{cases} \quad (5.158)$$

$$x^1 \geq 0, x^2 \leq 0, x^3 \text{ oarecare} \quad (5.159)$$

unde am notat:

$$A_{11} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,p} \\ \dots & \\ a_{s,1} & a_{s,p} \end{pmatrix} \quad A_{12} = \begin{pmatrix} a_{1,p+1} & a_{1,q} \\ \dots & \\ a_{s,p+1} & a_{s,q} \end{pmatrix} \quad A_{13} = \begin{pmatrix} a_{1,q+1} & a_{1,n} \\ \dots & \\ a_{s,q+1} & a_{s,n} \end{pmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{pmatrix} a_{s+1,1} & a_{s+1,p} \\ \dots & \\ a_{t,1} & a_{t,p} \end{pmatrix} \quad A_{22} = \begin{pmatrix} a_{s+1,p+1} & a_{s+1,q} \\ \dots & \\ a_{t,p+1} & a_{t,q} \end{pmatrix} \quad A_{23} = \begin{pmatrix} a_{s+1,q+1} & a_{s+1,n} \\ \dots & \\ a_{t,q+1} & a_{t,n} \end{pmatrix} \quad (5.160)$$

$$A_{31} = \begin{pmatrix} a_{t+1,1} & a_{t+1,p} \\ \dots & \\ a_{m,1} & a_{m,p} \end{pmatrix} \quad A_{32} = \begin{pmatrix} a_{t+1,p+1} & a_{t+1,q} \\ \dots & \\ a_{m,p+1} & a_{m,q} \end{pmatrix} \quad A_{33} = \begin{pmatrix} a_{t+1,q+1} & a_{t+1,n} \\ \dots & \\ a_{m,q+1} & a_{m,n} \end{pmatrix}$$

$$(x^1) = (x_1, \dots, x_p); (x^2) = (x_{p+1}, \dots, x_q); (x^3) = (x_{q+1}, \dots, x_n) \quad (5.161)$$

$$(b^1) = (b_1, \dots, b_s); (b^2) = (b_{s+1}, \dots, b_t); (b^3) = (b_{t+1}, \dots, b_m) \quad (5.162)$$

$$(c^1) = (c_1, \dots, c_p); (c^2) = (c_{p+1}, \dots, c_q); (c^3) = (c_{q+1}, \dots, c_n) \quad (5.163)$$

Problema de programare liniară în forma standard de lucru are toate liniile din sistemul de restricții dub formă de egalități, toate variabilele sunt nenegative, în matricea A trebuie să poată fi regăsită o matrice unitate de dimensiune egală cu numărul de restricții iar termenii liberi ai restricțiilor sunt nenegativi.

Pentru transformarea unei probleme din forma generală în cea standard de lucru, necesară rezolvării problemei de programare liniară, trebuie efectuate următoarele modificări asupra problemei care este în forma generală:

-inegalitățile care sunt de forma \leq devin egalități prin adunarea la membrul stâng a unei variabile auxiliare $y \geq 0$;

-inegalitățile care sunt de forma \geq devin egalități prin scăderea din membrul stâng a unei variabile auxiliare $y \geq 0$;

-variabilele negative vor fi înlocuite cu variabile pozitive după formula $x = -y$;

-variabilele cu semn oarecare vor fi înlocuite prin două variabile pozitive după formula $x = y - z$.

-dacă între coeficienții din sistemul de restricții nu se regăsesc cei necesari constituirii unei matrice unitate, se modifică în mod corespunzător doar acele restricții unde lipsesc coeficienții necesari, prin introducerea unor variabile y numite **variabile artificiale**; ele trebuie introduse și în funcția obiectiv, având un coeficient M ($M > 0$) numit **coeficient de penalizare**, care trebuie să fie cu semnul + dacă problema este de minim respectiv cu semnul - dacă problema este de maxim;

-termenii liberi devin nenegativi prin înmulțirea ecuației cu -1.

Algoritmul care trece o problemă de programare liniară din forma generală în cea standard de lucru este:

```

program GeneralaLaStandard;
uses crt;
type matrice=array[1..10,1..10]of real;
     sirr=array[1..10]of real;
     siri=array[1..10]of integer;
var a:matrice;
    b,c,x:sirr;
    maxmin,m,n,i,j,m1,rang,poz,catide0,catidel:integer;
    semn,semnx,coloana:siri;
procedure afisare(x:real);
begin
  if x=trunc(x)
  then
    if x>0
    then
      if x=1 then write('      +') else write('    +',x:2:0)
      else
        if x=0 then write('    +0')
        else
          if x=-1 then write('     -') else write('   ',x:3:0)
    else
      if x>0 then write('+',x:5:2) else write(x:6:2);
end;
begin
  clrscr;
  {se citesc datele problemei in forma generala}
  repeat
    write('Problema este de maxim [1] sau de minim [2]='); readln(maxmin);
  until (maxmin=1) or (maxmin=2);
  repeat
    write('Introduceti numarul de ecuatii m='); readln(m);
  until (m>0) and (m<=10);
  repeat
    write('Introduceti numarul de necunoscute n='); readln(n);
  until (n>0) and (n<=11);
  writeln('Introduceti matricea coeficientilor A');
  for i:=1 to m do
    for j:=1 to n do
      begin
        write('a[' ,i:2, ', ',j:2, ']='); readln(a[i,j]);
      end;
  writeln('Introduceti vectorul coloana B');
  for i:=1 to m do
    begin
      write('b[' ,i:2, ']='); readln(b[i]);
    end;
  writeln('Introduceti semnele inegalitatilor pentru fiecare linie a matricei');
  for i:=1 to m do
    begin

```

```

    write('Linia ',i:2,' este [1=mai mic, 2=mai mare, 3=egal]=');
readln(semn[i]);
    end;
writeln('Introduceti coeficientii functiei obiectiv');
for j:=1 to n do
    begin
        write('c[',j:2,']='); readln(c[j]);
        end;
writeln('Introduceti semnele inegalitatilor variabilelor');
for i:=1 to n do
    begin
        write('Variabila x',i:2,' este [1=mai mica ca 0, 2=mai mare ca 0,
3=oarecare]=');
        readln(semnx[i]);
        end;
clrscr;
if maxmin=1 then write('max f=') else write('min f=');
for j:=1 to n do
    begin
        afisare(c[j]);
        write('x',j);
        end;
writeln;
writeln;
for i:=1 to m do
    begin
        for j:=1 to n do
            begin
                afisare(a[i,j]);
                write('x',j);
                end;
        if semn[i]=1 then write('<=') else if semn[i]=3 then write('=') else
write('>=');
        writeln(b[i]:5:2);
        end;
writeln;
for i:=1 to n do
    begin
        write('x',i);
        if semnx[i]=1 then write('<=0; ') else
            if semnx[i]=2 then write('>=0; ') else write(' oarecare; ');
        end;
writeln;
readln;
{se transforma problema in forma standard}
for i:=1 to m do
    begin
        if semn[i]=1 then
            begin
                for j:=1 to m do a[j,n+1]:=0;
                a[i,n+1]:=1;
                semn[i]:=3;
                semnx[n+1]:=2;
                c[n+1]:=0;
                n:=n+1;
                end;
        if semn[i]=2 then
            begin
                for j:=1 to m do a[j,n+1]:=0;
                a[i,n+1]:=-1;
                semn[i]:=3;
                semnx[n+1]:=2;
                c[n+1]:=0;
            end;
    end;

```

```

    n:=n+1;
    end;
end;
for i:=1 to n do
begin
if semnx[i]=1 then
begin
for j:=1 to m do a[j,i]:=-a[j,i];
semnx[i]:=2;
c[i]:=-c[i];
end;
if semnx[i]=3 then
begin
for j:=1 to m do a[j,n+1]:=-a[j,i];
semnx[i]:=2;
semnx[n+1]:=2;
c[n+1]:=-c[i];
n:=n+1;
end;
end;
if m<n then rang:=m else rang:=n;
{se cauta termenii liberi negativi}
for i:=1 to m do
if b[i]<0 then
begin
for j:=1 to n do a[i,j]:=-a[i,j];
b[i]:=-b[i];
end;
{se cauta coloanele care ar putea apare in matricea unitate}
for i:=1 to rang do coloana[i]:=0;
for i:=1 to n do
begin
poz:=0; catide0:=0; catidel:=0;
for j:=1 to m do
if a[j,i]=0 then catide0:=catide0+1
else
if a[j,i]=1 then begin catidel:=catidel+1; poz:=j end;
if (catidel=1) and (catide0=rang-1) then coloana[poz]:=i;
end;
for i:=1 to rang do
if coloana[i]=0 then
begin
coloana[i]:=n+1;
if maxmin=1 then c[n+1]:=-99 else c[n+1]:=99;
for j:=1 to m do a[j,n+1]:=0;
a[i,n+1]:=1;
semnx[n+1]:=2;
n:=n+1;
end;
clrscr;
if maxmin=1 then write('max f=') else write('min f=');
for j:=1 to n do
begin
afisare(c[j]);
write('x',j);
end;
writeln;
writeln;
for i:=1 to m do
begin
for j:=1 to n do
begin
afisare(a[i,j]);

```

```

write('x',j);
end;
if semn[i]=1 then write('<=') else if semn[i]=3 then write('=') else
write('>=');
writeln(b[i]:5:2);
end;
writeln;
for i:=1 to n do
begin
write('x',i);
if semn[i]=1 then write('<=0; ') else
if semn[i]=2 then write('>=0; ') else write(' carecare; ');
end;
writeln;
readln;
end.

```

Pentru rezolvarea computațională a problemei de programare liniară, aceasta este în forma standard de lucru:

$$\begin{cases}
 [\max] f = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\
 \dots \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \\
 x_i \geq 0, i=1,n
 \end{cases} \quad (5.164)$$

Aceasta înseamnă că între cele n variabile se găsesc m care contribuie la formarea unei matrice unitate de ordinul m. Atunci, punând toate celelalte variabile pe valoarea 0, se poate determina o soluție inițială, de pornire, ca fiind:

$$\begin{aligned}
 x_s &= b_p \\
 \dots & \\
 x_t &= b_q
 \end{aligned} \quad (5.165)$$

și se poate completa următorul tabel, numit **tabelul simplex** (el corespunde problemei de maxim):

C^B	B	X^B	C_1	...	C_i	...	C_m	C_{m+1}	...	C_j	...	C_n
			a_1	...	a_i	...	a_m	a_{m+1}	...	a_j	...	a_n
C_1	a_1	b_1	1	...	0	...	0	$Z_{m+1,1}$	...	Z_{j1}	...	Z_{n1}
...
C_i	a_i	b_i	0	...	1	...	...	$Z_{m+1,i}$	...	Z_{ji}	...	Z_{ni}
...
C_m	a_m	b_m	0	...	0	...	1	$Z_{m+1,m}$	...	Z_{jm}	...	Z_{nm}
	$\Delta_j = C_j - f_j$	$f_0 = C^B X^B$	0	...	0	...	0	$C_{m+1} - Z_{m+1}$	...	$C_j - X_j$	...	$C_n - Z_n$

Semnificația informațiilor din acest tabel este următoarea:

- C^B reprezintă coeficienții din funcția obiectiv asociați variabilelor care constituie soluția inițială;
- B reprezintă variabilele care constituie soluția inițială (numită **bază**);
- X^B reprezintă termenii liberi asociați variabilelor care constituie soluția inițială;
- c_1, \dots, c_n sunt coeficienții din funcția obiectiv;
- a_1, \dots, a_n sunt variabilele;
- zona nehașurată din tabel reprezintă matricea coeficienților, scrisă (pe coloane) astfel încât în prima parte să fie coloanele aferente variabilelor care constituie soluția inițială;
- Δ_j reprezintă diferențele între c_j (aflat pe coloana respectivă, pe prima linie) și produsele $c_1 \cdot z_{j1}, \dots, c_m \cdot z_{jm}$;
- f_0 reprezintă valoarea funcției obiectiv, pentru valorile variabilelor care constituie soluția inițială de pe coloana X^B .

După completarea tabelului simplex, urmează desfășurarea algoritmului simplex. Se analizează diferențele $\Delta_j = c_j - f_j$ care pot fi:

- a) dacă toate diferențele sunt ≤ 0 (respectiv $=0$ pentru variabilele care au fost soluții inițiale și <0 pentru celelalte), atunci rezultatul astfel obținut este optim și algoritmul se încheie cu decizia „optim finit unic”;
- b) dacă toate diferențele sunt ≤ 0 (respectiv $=0$ pentru variabilele care au fost soluții inițiale, $=0$ pentru o parte din celelalte variabile și <0 pentru restul de variabile), atunci rezultatul astfel obținut este optim și algoritmul se încheie cu decizia „optim finit multiplu”;
- c) dacă există atât diferențe $=0$ (cele care corespund soluțiilor inițiale) cât și diferențe ≤ 0 și ≥ 0 (printre celelalte variabile), atunci soluția nu este optimă și algoritmul continuă pentru îmbunătățirea soluției.

Îmbunătățirea soluției curente a algoritmului simplex se face astfel:

Pasul 1. se alege variabila care intră în baza de la pasul anterior, ca fiind aceea pentru care diferențele Δ_j au cea mai mare valoare pozitivă, fie aceasta a_k ;

Pasul 2. se alege variabila care iese din bază, ca fiind aceea pentru care raportul X^B/a_k (efectuat element cu element, doar pentru componentele strict pozitive ale coloanei a_k) este de valoare minimă;

Pasul 3. elementul aflat la intersecția liniei care iese cu coloana care intră se numește **pivot**;

Pasul 4. se reface tabelul index având în locul liniei care iese linia care intră;

Pasul 5. elementele de pe linia pivotului se împart la pivot;

Pasul 6. elementele din celelalte linii se înlocuiesc după formula triunghiului, adică noul element este vechiul element minus raportul dintre produsul elementelor alăturate supra elementul aflat în colțul opus.

Algoritmul de determinare a soluției problemei de programare liniară pusă în forma standard de lucru este:

```

program Simplex;
uses crt;
type matrice=array[1..10,1..10]of real;
     sirr=array[1..10]of real;
     siri=array[1..10]of integer;
var a:matrice;
     simplex=array[1..20,-3..10]of real;
     b,c,x,deltaj,xx:sirr;
     maxmin,m,n,i,j,m1,rang,poz,catide0,catide1,xintra,xiese,
     simplexintra,simplexiese,primalinie:integer;
     aux,f0,max,min,pivot:real;
     gata:boolean;
     semn,semnx,coloana:siri;
procedure afisare(x:real);
begin
  if x=trunc(x)

```

```

then
if x>0
  then
  if x=1 then write('  +') else write('  ',x:2:0)
  else
  if x=0 then write('  +0')
  else if x=-1 then write('  -') else write('  ',x:3:0)
  else
  if x>0 then write('+',x:5:2) else write(x:6:2);
end;
begin
clrscr;
{se citesc datele problemei in forma standard de lucru}
repeat
  write('Problema este de maxim [1] sau de minim [2]='); readln(maxmin);
until (maxmin=1) or (maxmin=2);
repeat
  write('Introduceti numarul de ecuatii m='); readln(m);
until (m>0) and (m<=10);
repeat
  write('Introduceti numarul de necunoscute n='); readln(n);
until (n>0) and (n<=11);
writeln('Introduceti matricea coeficientilor A');
for i:=1 to m do
  for j:=1 to n do
    begin
      write('a['',i:2,',',',j:2,']='); readln(a[i,j]);
    end;
writeln('Introduceti vectorul coloana B');
for i:=1 to m do
  begin
    write('b['',i:2,']='); readln(b[i]);
  end;
for i:=1 to m do
  begin
    semn[i]:=3;
  end;
writeln('Introduceti coeficientii functiei obiectiv');
for j:=1 to n do
  begin
    write('c['',j:2,']='); readln(c[j]);
  end;
for i:=1 to n do
  begin
    semnx[i]:=2;
  end;
clrscr;
if maxmin=1 then write('max f=') else write('min f=');
for j:=1 to n do
  begin
    afisare(c[j]);
    write('x',j);
  end;
writeln;
writeln;
for i:=1 to m do
  begin
    for j:=1 to n do
      begin
        afisare(a[i,j]);
        write('x',j);
      end;
    if semn[i]=1 then write('<=') else

```

```

    if semn[i]=3 then write(' =') else write('>=');
    writeln(b[i]:5:2);
end;
writeln;
for i:=1 to n do
begin
write('x',i);
if semn[i]=1 then write('<=0; ') else
if semn[i]=2 then write('>=0; ') else write(' oarecare; ');
end;
writeln;
readln;
{se transforma problema punand solutia initiala in stanga matricei}
if m<n then rang:=m else rang:=n;
for i:=1 to rang do coloana[i]:=0;
for i:=1 to n do
begin
poz:=0; catide0:=0; catidel:=0;
for j:=1 to m do
if a[j,i]=0 then catide0:=catide0+1
else
if a[j,i]=1 then begin catidel:=catidel+1; poz:=j end;
if (catidel=1) and (catide0=rang-1) then coloana[poz]:=i;
end;
for i:=1 to rang do
if i<coloana[i] then
begin
for j:=1 to m do
begin
aux:=a[j,i];
a[j,i]:=a[j,coloana[i]];
a[j,coloana[i]]:=aux;
end;
aux:=c[i];
c[i]:=c[coloana[i]];
c[coloana[i]]:=aux;
end;
{stabilirea solutiei initiale}
for i:=1 to n do xx[i]:=0;
for i:=1 to rang do xx[i]:=b[i]/a[i,i];
{completarea tabelii simplex}
primalinie:=1;
for i:=1 to m do
begin
simplex[primalinie+i-1,-3]:=c[i];
simplex[primalinie+i-1,-2]:=i;
simplex[primalinie+i-1,-1]:=xx[i];
for j:=1 to n do simplex[primalinie+i-1,j]:=a[i,j];
end;
clrscr;
write('          |');
for j:=1 to n do write(c[j]:6:2,' ');
writeln;
write('          |');
for j:=1 to n do write('----- ');
writeln;
write(' CB      B      XB |');
for j:=1 to n do write(' a',j,' ');
writeln;
for i:=1 to m do
begin
write('-----|');
for j:=1 to n do write('----- ');

```

```

writeln;
write(simplex[primalinie+i-1,-3]:6:2,' a',simplex[primalinie+i-1,-2]:1:0,
      ' ',simplex[primalinie+i-1,-1]:6:2,'|');
for j:=1 to n do write(simplex[primalinie+i-1,j]:6:2,' ');
writeln;
end;
write('-----|');
for j:=1 to n do write('----- ');
writeln;
f0:=0;
for i:=1 to n do f0:=f0+c[i]*b[i];
for i:=1 to n do
  begin
    deltaj[i]:=c[i];
    for j:=1 to m do deltaj[i]:=deltaj[i]-a[j,i]*c[j];
  end;
simplex[primalinie+m,-1]:=f0;
for i:=1 to n do simplex[primalinie+m,i]:=deltaj[i];
write(' ',simplex[primalinie+m,-1]:6:2,'|');
for j:=1 to n do write(simplex[primalinie+m,j]:6:2,' ');
readln;
{verificarea solutiei gasite}
gata:=true;
for i:=1 to rang do if deltaj[i]<>0 then gata:=false;
for i:=rang+1 to n do if deltaj[i]>0 then gata:=false;
while not gata do
  begin
    {determinarea variabilelor care intra si ies din tabela}
    max:=-1; xintra:=0;
    for i:=rang+1 to n do
      if (deltaj[i]>max) and (deltaj[i]>0) then
        begin
          max:=deltaj[i]; xintra:=i;
        end;
    min:=999; xiese:=0; simplexiese:=0;
    for i:=1 to m do
      if (simplex[primalinie+i-1,xintra]>0) and
        (xx[i]/simplex[primalinie+i-1,xintra]<min) then
        begin
          min:=xx[i]/simplex[primalinie+i-1,xintra];
          xiese:=i;
          simplexiese:=primalinie+i-1;
        end;
    pivot:=simplex[simplexiese,xintra];
    writeln(chr(27),xiese,' ',chr(24),xintra);
    readln;
    {completarea tabelii simplex}
    primalinie:=primalinie+m+1;
    for i:=1 to m do
      begin
        if i=xiese
          then simplex[primalinie+i-1,-3]:=c[xintra]
          else simplex[primalinie+i-1,-3]:=
            simplex[primalinie+i-1-m-1,-3];
        if i=xiese then simplex[primalinie+i-1,-2]:=xintra
          else simplex[primalinie+i-1,-2]:=simplex[primalinie+i-1-m-1,-2];
        if i=xiese then simplex[primalinie+i-1,-1]:=
          simplex[primalinie+i-1-m-1,-1]/pivot
          else simplex[primalinie+i-1,-1]:=simplex[primalinie+i-1-m-1,-1]-
            simplex[simplexiese,-1]*simplex[primalinie+i-1-m-1,xintra]/pivot;
        for j:=1 to n do
          if i=xiese
            then simplex[primalinie+i-1,j]:=simplex[primalinie+i-1-m-1,j]/pivot

```

```

        else simplex[primalinie+i-1,j]:=simplex[primalinie+i-1-m-1,j]-
            simplex[simplexiese,j]*simplex[primalinie+i-1-m-1,xintra]/pivot;
    end;
for i:=1 to m do
    begin
        write('----- |');
        for j:=1 to n do write('----- ');
        writeln;
        write(simplex[primalinie+i-1,-3]:6:2,' a',simplex[primalinie+i-1,-2]:1:0,
            ',simplex[primalinie+i-1,-1]:6:2,|');
        for j:=1 to n do write(simplex[primalinie+i-1,j]:6:2,' ');
        writeln;
        end;
write('----- |');
for j:=1 to n do write('----- ');
writeln;
f0:=0;
for i:=1 to n do
    f0:=f0+simplex[primalinie+i-1,-3]*simplex[primalinie+i-1,-1];
for i:=1 to n do
    begin
        delta[j[i]]:=c[i];
        for j:=1 to m do
            delta[j[i]]:=delta[j[i]]-simplex[primalinie+j-1,i]*simplex[primalinie+j-1,-3];
        end;
simplex[primalinie+m,-1]:=f0;
for i:=1 to n do simplex[primalinie+m,i]:=delta[j[i]];
write(' ',simplex[primalinie+m,-1]:6:2,|');
for j:=1 to n do write(simplex[primalinie+m,j]:6:2,' ');
writeln;
gata:=true;
for i:=1 to rang do if delta[j[i]]>0 then gata:=false;
for i:=rang+1 to n do if delta[j[i]]>0 then gata:=false;
end;
{afisarea rezultatului final}
for i:=1 to n do xx[i]:=0;
for i:=1 to m do
    xx[trunc(simplex[primalinie+i-1,-2])]:=simplex[primalinie+i-1,-1];
writeln;
writeln('Solutia problemei este:');
for i:=1 to n do writeln('x[' ,i:2,']=',xx[i]:6:2);
writeln('f(x)=' ,f0:6:2);
writeln;
end.

```

5.5.2. Programarea neliniară. Algoritmul Rosen

Forma unei probleme de programare matematică este aceea a unei probleme de extrem, în care se cere determinarea unor variabile reale x_1, x_2, \dots , care maximizează sau minimizează o funcție f (*funcția obiectiv*) pe un domeniu din R^n definit de un număr de relații funcționale (*restricții*).

Dacă în paragraful anterior au fost prezentate problemele de programare liniară, acelea în care funcția obiectiv este exprimată prin polinoame de grad 0 și 1, în realitate situațiile concrete pot duce la apariția unor modele matematice care să utilizeze și polinoame de grad mai mare (cel puțin 2).

O problemă de programare convexă ([Kar02]) cere determinarea optimului (maxim sau minim) al unei funcții convexe⁵ sau concave⁶ f pe o submulțime convexă a spațiului vectorial n -dimensional R^n :

$$[\max] \begin{matrix} f(x) \\ x \in \mathcal{X} \end{matrix} \quad (5.166)$$

unde:

$$\mathcal{X} = \{x \in R^n \mid g_j(x) \leq 0, j=1,r, h_j(x) = 0, j=1,m, x \geq 0\} \quad (5.167)$$

în care f este o funcție concavă, g_j sunt funcții convexe iar $h_j(x) = a_j x + b_j$ sunt forme liniare, cu $a_j, b_j \in R^n$; un enunț echivalent se obține când se dorește minimul din f funcție convexă iar în mulțimea \mathcal{X} se înlocuiește condiția $g_j(x) \leq 0$ cu $g_j(x) \geq 0$, funcții concave:

$$[\min] \begin{matrix} f(x) \\ x \in \mathcal{X} \end{matrix} \quad (5.168)$$

unde:

$$\mathcal{X} = \{x \in R^n \mid g_j(x) \geq 0, j=1,r, h_j(x) = 0, j=1,m, x \geq 0\} \quad (5.169)$$

Așa cum se observă, domeniul este definit prin egalități sau inegalități liniare sau prin condiții de nenegativitate (nepozitivitate) ale unor funcții convexe sau concave.

Din definițiile de mai sus se observă că vectorii a_j și respectiv b_j , care intervin în exprimarea formei liniare a funcțiilor h_j se pot grupa matriceal astfel:

$$A = \begin{pmatrix} a_1^T \\ a_2^T \\ \dots \\ a_m^T \end{pmatrix} \quad (5.170)$$

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix} \quad (5.171)$$

ceea ce permite exprimarea definiției mulțimii \mathcal{X} astfel:

$$\mathcal{X} = \{x \in R^n \mid Ax = b, x \geq 0\} \quad (5.172)$$

Problemei de programare convexă definită ca mai sus i se poate asocia *lagrangeanul (funcția lui Lagrange)*:

$$L(x, u) = f(x) - \sum_{j=1}^m u_j h_j(x) \quad (5.173)$$

⁵ o funcție f se numește **convexă** dacă $f(\lambda x^1 + (1-\lambda)x^2) \leq \lambda f(x^1) + (1-\lambda)f(x^2)$, $0 \leq \lambda \leq 1$

⁶ o funcție f se numește **concavă** dacă $-f$ este funcție convexă

$$j=1$$

în care componentele u_1, u_2, \dots, u_m ale vectorului $u \in R^n$ poartă denumirea de *multiplicatori ai lui Lagrange*.

Algoritmul pentru determinarea soluției optime a unei probleme de programare convexă aparține lui Rosen, se bazează pe utilizarea gradientului (de aceea se numește **metoda gradientului proiectat**) și este următorul:

Pasul 1. se determină o soluție inițială x^0 , folosind algoritmul simplex aplicat sistemului de restricții.

Pasul 2. Se verifică dacă această soluție inițială satisface formularea problemei inițiale. Dacă nu, atunci problema de programare convexă nu are soluție. Dacă da, se trece la pasul următor.

Pasul 3. Se construiesc:

$$A_{(r)} = \begin{pmatrix} a_1^T \\ a_2^T \\ \dots \\ a_r^T \end{pmatrix} \quad (5.174)$$

și

$$b_{(r)} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_r \end{pmatrix} \quad (5.175)$$

unde $r < m$ este acel număr care reprezintă câte din inegalitățile din problema inițială sunt respectate cu semnul „egal” de către soluția de pornire x^0 .

Pasul 4. Se verifică optimalitatea soluției găsite. Soluția este optimă dacă și numai dacă ea îndeplinește simultan condițiile:

$$P_r \nabla f(x^k) = 0 \quad (5.176)$$

$$u^k = (A_{(r)} A_{(r)}^T)^{-1} A_{(r)} \nabla f(x^k) \geq 0 \quad (5.177)$$

unde:

$$P_r = I_n - A_{(r)}^T (A_{(r)} A_{(r)}^T)^{-1} A_{(r)} \quad (5.178)$$

Dacă soluția respectă cele două condiții, ea este optimă și algoritmul s-a încheiat. Dacă nu, se trece la pasul următor.

Pasul 5.

a) Dacă nu este îndeplinită prima condiție de la pasul anterior, se calculează:

$$s = P_{(r)} \nabla f(x^k) \quad (5.179)$$

apoi se trece la litera c) a acestui pas.

b) Dacă nu este îndeplinită a doua condiție de la pasul anterior, atunci înseamnă că pentru o parte dintre componentele lui u^k se verifică $u_j^k < 0$. Se alege $A_{(r-1)}$ compus din acele inegalități ale problemei inițiale pentru care există:

$$\min_i u_i^k \quad (5.180)$$

și se calculează pe rând $P_{(r-1)}$ cu formula:

$$P_{(r-1)} = I_{(r)} - A_{(r-1)}^T (A_{(r-1)} A_{(r-1)}^T)^{-1} A_{(r-1)} \quad (5.181)$$

respectiv s cu formula:

$$s = P_{(r-1)} \nabla f(x^k) \quad (5.182)$$

și se trece la litera c) a acestui pas.

c) Se determină:

$$\lambda' = \min (b_i - a_i^T x^k) / (a_i^T s), \text{ pentru acei } i \text{ pentru care } a_i^T s > 0 \quad (5.183)$$

Pasul 6. Se determină:

$$h'(\lambda') = s^T f(x^k + \lambda' s) \quad (5.184)$$

și se verifică dacă aceasta este pozitivă. Dacă da, atunci se poate îmbunătăți soluția problemei cu formula:

$$x^{k+1} = x^k + \lambda' s \quad (5.185)$$

și se revine la pasul 3. Dacă nu, atunci se determină λ'' pentru care are loc relația:

$$s^T \nabla f(x^k + \lambda'' s) = 0 \quad (5.186)$$

și atunci:

$$x^{k+1} = x^k + \lambda'' s \quad (5.187)$$

și se revine la pasul 3.

Programul Pascal care implementează algoritmul de determinare a unei soluții optime pentru problema de programare convexă, cunoscând o soluție inițială, este:

```

program Rosen;
uses crt;
type matricer=array[1..10,1..10]of real;
   sirr=array[1..10]of real;
   siri=array[1..10]of integer;
   sirb=array[1..10]of boolean;
var a,aa,x,xx,aat,c,cminus1,gradient,fgradient,d,pr,u,s,aaa,aaat,st:matricer;
    b,bb:sirr;
    semn:siri;
    egal:sirb;
    maxmin,m,n,i,j,k,pas,r,pozmin:integer;
    cx2,cx1,cy2,cy1,cxy,cliber,rez,det,min,lambdal1,lambdal2:real;
    gata,estezero,maimarecazero,estepozitiv:boolean;
procedure afisare(x:real);
begin
  if x=trunc(x)
  then

```

```

    if x>0 then if x=1 then write('    +') else write('  +',x:2:0)
                else
                if x=0 then write('    +0')
                else if x=-1 then write('    -') else write('  ',x:3:0)
    else
    if x>0 then write('+',x:5:2) else write(x:6:2);
end;
procedure transpus(a:matricer;m,n:integer;var at:matricer);
var i,j:integer;
begin
    for i:=1 to m do
        for j:=1 to n do
            at[j,i]:=a[i,j];
    end;
procedure inmultire(a:matricer;m,n:integer;b:matricer;p,q:integer;var
c:matricer);
var i,j,k:integer;
begin
    for i:=1 to m do
        for j:=1 to q do
            begin
                c[i,j]:=0;
                for k:=1 to n do
                    c[i,j]:=c[i,j]+a[i,k]*b[k,j];
                end;
    end;
end;
begin
    clrscr;
    {se citesc datele problemei de programare convexa de maxim}
    writeln('Introduceti coeficientii functiei obiectiv');
    write('coeficientul lui x1 la puterea 2='); readln(cx2);
    write('coeficientul lui x2 la puterea 2='); readln(cy2);
    write('coeficientul lui x1 la puterea 1='); readln(cx1);
    write('coeficientul lui x2 la puterea 1='); readln(cy1);
    write('coeficientul lui x1x2      ='); readln(cxy);
    write('coeficientul termenului liber  ='); readln(cliber);
    repeat
        write('Introduceti numarul de ecuatii m='); readln(m);
    until (m>0) and (m<=10);
    n:=2;
    writeln('Introduceti matricea coeficientilor A');
    for i:=1 to m do
        for j:=1 to n do
            begin
                write('a[' ,i:2,',' ,j:2,']='); readln(a[i,j]);
            end;
    writeln('Introduceti semnele inegalitatilor pentru fiecare linie a matricei');
    for i:=1 to m do
        begin
            write('Linia ',i:2,' este [1=mai mic, 2=mai mare, 3=egal]=');
            readln(semn[i]);
        end;
    writeln('Introduceti vectorul coloana B');
    for i:=1 to m do
        begin
            write('b[' ,i:2,']='); readln(b[i]);
        end;
    clrscr;
    write('max f=');
    afisare(cx2); write('x1^2');
    afisare(cx1); write('x1');
    afisare(cy2); write('x2^2');
    afisare(cy1); write('x2');

```

```

afisare(cxy); write('x1x2');
afisare(cliber); writeln;
writeln;
for i:=1 to m do
  begin
  for j:=1 to n do
    begin
    afisare(a[i,j]);
    write('x',j);
    end;
  if semn[i]=1 then write('<=') else
    if semn[i]=3 then write(' =') else write('>=');
  writeln(b[i]:5:2);
  end;
writeln;
readln;
{introducerea solutiei initiale}
writeln('Introduceti solutia initiala:');
write('x1='); readln(x[1,1]);
write('x2='); readln(x[2,1]);
{determinarea solutiei optime}
gata:=false; pas:=0;
repeat
  pas:=pas+1;
  writeln;
  writeln('Pasul ',pas:2);
  writeln('-----');
  for i:=1 to m do
    begin
    egal[i]:=false;
    rez:=a[i,1]*x[1,1]+a[i,2]*x[2,1];
    if rez=b[i] then egal[i]:=true;
    end;
  r:=0;
  for i:=1 to m do
    if egal[i] then
      begin
      r:=r+1;
      aa[r,1]:=a[i,1];
      aa[r,2]:=a[i,2];
      bb[r]:=b[i];
      end;
  writeln('Matricea A(r) este:');
  for i:=1 to r do
    writeln(aa[i,1]:6:2,aa[i,2]:6:2);
  writeln;
  writeln('Matricea b(r) este:');
  for i:=1 to r do
    writeln(bb[i]:6:2);
  writeln;
  transpus(aa,r,2,aat);
  inmultire(aa,r,2,aat,2,r,c);
  det:=c[1,1]*c[2,2]-c[1,2]*c[2,1];
  cminus1[1,1]:=c[2,2]/det;
  cminus1[1,2]:=-c[1,2]/det;
  cminus1[2,1]:=-c[2,1]/det;
  cminus1[2,2]:=c[1,1]/det;
  writeln('Inversa este:');
  for i:=1 to r do
    begin
    for j:=1 to r do write(cminus1[i,j]:6:2);
    writeln;
    end;
end;

```

```

writeln;
gradient[1,1]:=2*cx2;
gradient[1,2]:=cx1;
gradient[2,1]:=2*cy2;
gradient[2,2]:=cy1;
writeln('Coeficientii gradientului sunt:');
for i:=1 to 2 do writeln(gradient[i,1]:6:2,gradient[i,2]:6,6);
writeln;
fgradient[1,1]:=gradient[1,1]*x[1,1]+gradient[1,2];
fgradient[2,1]:=gradient[2,1]*x[2,1]+gradient[2,2];
inmultire(aat,2,r,cminus1,r,r,c);
inmultire(c,2,r,aa,r,2,pr);
for i:=1 to 2 do
  for j:=1 to 2 do
    if i=j then pr[i,j]:=1-pr[i,j] else pr[i,j]:=-pr[i,j];
writeln('Matricea P(r) este:');
for i:=1 to 2 do
  begin
    for j:=1 to 2 do write(pr[i,j]:6:2);
    writeln;
  end;
writeln;
inmultire(pr,2,2,gradient,2,2,d);
estezero:=true;
for i:=1 to 2 do
  for j:=1 to 2 do
    if abs(d[i,j])>0.00001 then estezero:=false;
if estezero then writeln('Prima conditie la pasul 4 este indeplinita')
  else writeln('Prima conditie la pasul 4 nu este indeplinita');
writeln;
inmultire(cminus1,r,r,aa,r,2,c);
inmultire(c,r,2,fgradient,2,1,u);
writeln('Matricea uk este:');
for i:=1 to 2 do
  writeln(u[i,1]:6:2);
writeln;
maimarecazero:=true;
for i:=1 to 2 do
  if u[i,1]<0 then maimarecazero:=false;
if maimarecazero then writeln('A doua conditie la pasul 4 este indeplinita')
  else writeln('A doua conditie la pasul 2 nu este indeplinita');
writeln;
if estezero and maimarecazero then gata:=true
  else
  begin
    if not estezero then
      begin
        inmultire(pr,2,2,fgradient,2,1,s);
        writeln('s este:');
        for i:=1 to 2 do writeln(s[i,1]:6:2);
        writeln;
      end;
    if not maimarecazero then
      begin
        min:=999; pozmin:=0;
        for i:=1 to 2 do
          if u[i,1]<min then
            begin
              min:=u[i,1];
              pozmin:=i;
            end;
        for j:=1 to 2 do aaa[1,j]:=a[pozmin,j];
        writeln('Matricea A(r-1) este:');

```

```

for j:=1 to 2 do write(aaa[1,j]:6:2);
writeln;
writeln;
transpus(aaa,1,2,aaat);
inmultire(aaa,1,2,aaat,2,1,c);
cminus1[1,1]:=1/c[1,1];
writeln('Inversa este:');
writeln(cminus1[1,1]:6:2);
writeln;
inmultire(aaat,2,1,cminus1,1,1,d);
inmultire(d,2,1,aaa,1,2,pr);
for i:=1 to 2 do
  for j:=1 to 2 do
    if i=j then pr[i,j]:=1-pr[i,j] else pr[i,j]:=-pr[i,j];
writeln('Matricea P(r-1) este:');
for i:=1 to 2 do
  begin
    for j:=1 to 2 do write(pr[i,j]:6:2);
    writeln;
  end;
writeln;
inmultire(pr,2,2,fgradient,2,1,s);
writeln('s este:');
for i:=1 to 2 do writeln(s[i,1]:6:2);
writeln;
end;
inmultire(a,m,2,s,2,1,c);
min:=999;
for i:=1 to m do
  if c[i,1]>0 then
    begin
      inmultire(a,m,2,x,2,1,d);
      rez:=(b[i]-d[i,1])/c[i,1];
      if rez<min then min:=rez;
    end;
lambdal:=min;
fgradient[1,1]:=gradient[1,1]*x[1,1]+gradient[1,2];
fgradient[2,1]:=gradient[2,1]*x[2,1]+gradient[2,2];
transpus(s,2,1,st);
inmultire(st,1,2,fgradient,2,1,c);
estepozitiv:=true;
for i:=1 to 2 do
  if c[i,1]<0 then estepozitiv:=false;
if estepozitiv then
  begin
    for i:=1 to 2 do
      x[i,1]:=x[i,1]+lambdal*s[i,1];
    writeln('Solutia imbunatatita este:');
    for i:=1 to 2 do writeln(x[i,1]:6:2);
    writeln;
  end
else
  begin
    for k:=1 to trunc(1000*lambdal) do
      begin
        for j:=1 to 2 do
          xx[i,1]:=x[i,1]+k*s[i,1]/1000;
          fgradient[1,1]:=gradient[1,1]*xx[1,1]+gradient[1,2];
          fgradient[2,1]:=gradient[2,1]*xx[2,1]+gradient[2,2];
          inmultire(st,1,2,fgradient,2,1,c);
          estezero:=true;
          for i:=1 to 2 do
            if abs(c[i,1])>0.0001 then estezero:=false;

```

```

    if estezero then lambda2:=k/1000.0;
    end;
    for i:=1 to 2 do
        x[i,1]:=x[i,1]+lambda2*s[i,1];
        writeln('Solutia imbunatatita este:');
        for i:=1 to 2 do writeln(x[i,1]:6:2);
        writeln;
    end;
end;
readln;
until gata;
writeln('Solutia finala este:');
for i:=1 to 2 do writeln(x[i,1]:6:2);
writeln;
readln;
end.

```

5.6. UTILIZAREA BAZELOR DE DATE ÎN PRELUCRAREA TEHNOLOGICĂ

Din punct de vedere al prelucrării tehnologice, sistemul se consideră compus din subsistemele OP, OT și ML ([KN01]). Asupra acestui sistem acționează un număr de factori de influență, grupați în capitolele anterioare în mărimi electrice (U, I, j, structura circuitului), mărimi mecanice (p și v_r), mărimi care depind de OT (forma, dimensiunile, materialul), mărimi care depind de OP (forma, dimensiunile, materialul), mărimi care depind de ML (tipul și modul de spălare), mărimi care depind de sistemul tehnic (sistemul de comandă și reglare, sistemul mecanic, sistemul pentru electrolit, sistemul de alimentare electrică), mărimi care depind de tipul prelucrării, mărimi care depind de operatorul uman, mărimi care depind de mediul înconjurător.

La ora actuală, pentru gestiunea informațiilor aflate în cantitate mare se preferă utilizarea bazelor de date. Acestea permit descrieri complexe ale articolelor și calcule efectuate într-un timp scurt. Pentru procesul de prelucrare prin EEC am creat o bază de date relațională care conține următoarele tabele⁷ ([HH99, KN01]):

- OP - informații despre obiectul de prelucrat:
 - MaterialOP (Numeric, 2) codul materialului OP
 - Denumire (Character, 30) denumirea materialului OP
- COMPOZIT – informații despre materialul din care este confecționat OP:
 - MaterialOP (Numeric, 2) codul materialului OP
 - Element (Character, 2) denumirea elementului chimic component
 - ProcMin (Numeric, 6.3) procentul minim al elementului
 - ProcMax (Numeric, 6.3) procentul maxim al elementului
- OT - informații despre scula utilizată:
 - MaterialOT (Numeric, 2) codul materialului OT
 - Denumire (Character, 30) denumirea materialului OT
 - Pret (Numeric, 10.3) prețul unitar al materialului OT [lei]
- MASINA - informații despre utilajul tehnologic:
 - Masina (Numeric, 2) codul mașinii de prelucrare

⁷ trebuie notat faptul că limbaje de descriere a bazelor de date nu permit utilizarea indicilor inferiori (de tipul Q_{OP}) și că tratează literele mari și mici fără a face diferență între ele (adică notațiile Ra și RA sunt echivalente), motive pentru care simbolurile utilizate la crearea și exploatarea bazelor de date trebuie înțelese chiar dacă nu respectă forma de notație prezentată în decursul lucrării

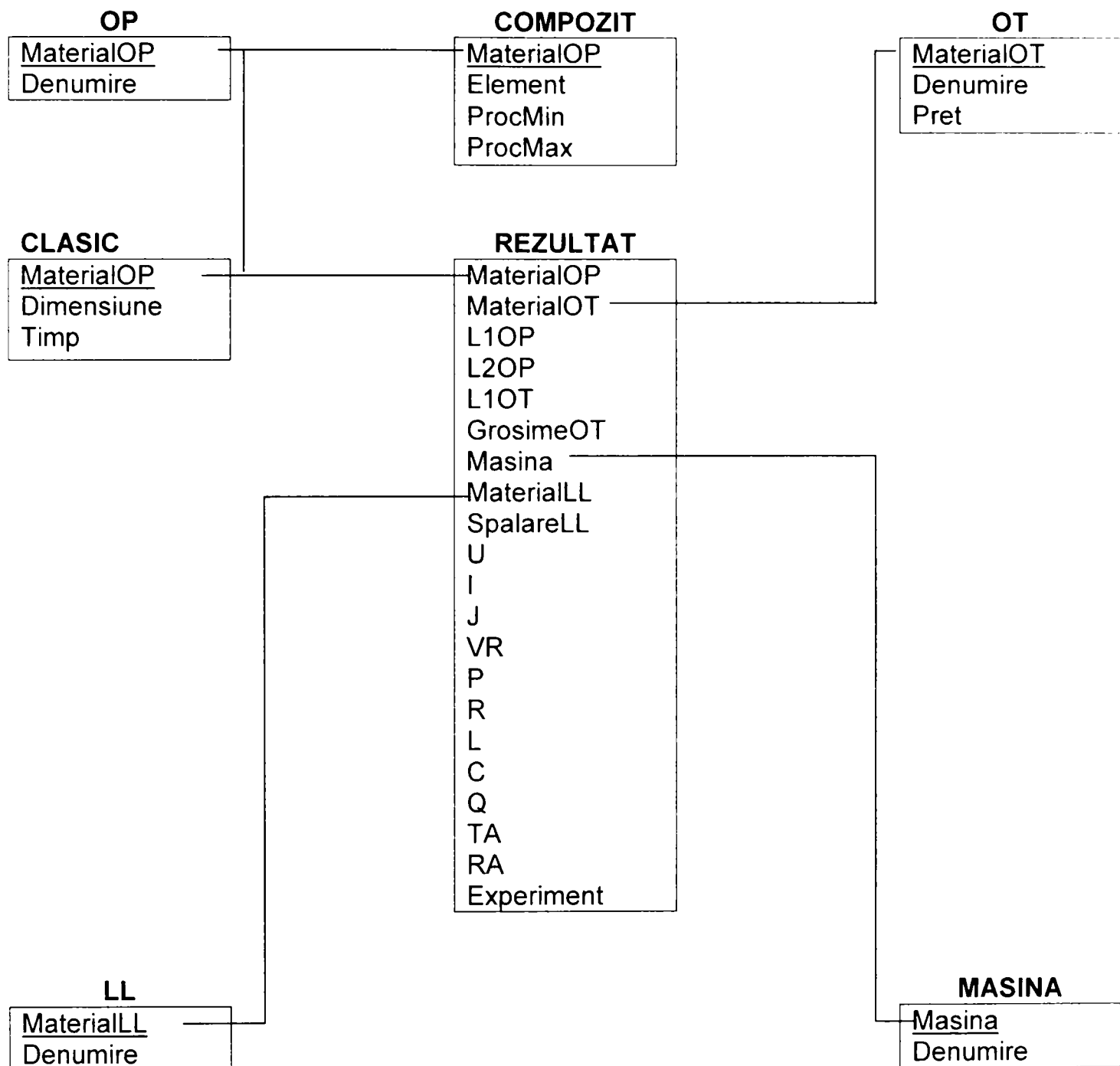


Figura 5.3. Diagrama relațiilor din baza de date

- **LL** - informații despre lichidul de lucru:
 - Denumire (Caracter, 30) denumirea și caracteristicile mașinii
 - MaterialLL (Numeric, 2) codul LL
 - Denumire (Caracter, 30) denumirea și caracteristicile LL
- **REZULTAT** - informații despre rezultatele experimentelor efectuate:
 - MaterialOP (Numeric, 2) codul materialului OP
 - MaterialOT (Numeric, 2) codul materialului OT
 - L1OP (Numeric, 3) diametrul sau una din laturile OP [mm]
 - L2OP (Numeric, 3) a doua latură a OP sau 0 [mm]
 - L1OT (Numeric, 3) diametrul OT [mm]
 - GrosimeOT (Numeric, 3.1) grosimea OT [mm]
 - Masina (Numeric, 2) codul mașinii de prelucrare
 - MaterialLL (Numeric, 2) codul LL

-SpalareLL	(Character, 1)	modul de spălare cu LL (I=imersie, J=jet)
-U	(Numeric, 6.2)	tensiunea U [V]
-I	(Numeric, 6.2)	intensitatea curentului I [A]
-J	(Numeric, 6.2)	densitatea de curent j [A/mm ²]
-VR	(Numeric, 6.2)	viteza relativă v _r [m/s]
-P	(Numeric, 6.2)	presiunea p [daN/cm ²]
-R	(Numeric, 10.3)	rezistența din circuit R [Ω]
-L	(Numeric, 10.3)	bobina din circuit L [mH]
-C	(Numeric, 6)	condensatorul din circuit C [μF]
-Q	(Numeric, 10.4)	productivitatea debitării Q _{OP} [mm ³ /min]
-TA	(Numeric, 10.3)	timpul de debitare t _d [s]
-RA	(Numeric, 10.3)	rugozitatea suprafeței R _a [μm]
-Experiment	(Character, 20)	date despre efectuarea experimentului
• CLASIC	- informații despre prelucrarea OP prin metode clasice ([Nor96, V+83]):	
-MaterialOP	(Numeric, 2)	codul materialului OP
-Dimensiune	(Numeric, 3)	dimensiunea echivalentă a OP [mm]
-Timp	(Numeric, 10.3)	timpul de debitare clasică [s]

Diagrama relațiilor între tabelele bazei de date este prezentată în figura 5.3. Se observă că aceasta corespunde unei baze de date relaționale și respectă criteriile de normalizare impuse de modelul relațional al bazelor de date ([KL03, LKD04]).

5.7. SISTEM INFORMATIC DE OPTIMIZARE A PRELUCRĂRII DIMENSIONALE

Cercetătorii din orice domeniu de activitate au astăzi la dispoziție un număr mare de mijloace de informare, multiple și de multe feluri, ceea ce implică un timp îndelungat pentru studiu, concepție, conducere a cercetărilor și acumulare a cunoștințelor necesare ([O+99]). Chiar dacă mijloacele de transmitere, difuzare și recepționare a informației au în ultimul timp forme din ce în ce mai perfecționate, timpul necesar găsirii datelor necesare pentru a fi informat corect și complet este prea mare pentru viața alertă pe care cu toții o desfășurăm în zilele actuale. Internet-ul, cu toate avantajele sale de întindere, viteză, capacitate, necesită ore și zile de căutări pentru a ajunge la ceea ce este util și necesar în munca de cercetare.

Plecând de la aceste considerente, am realizat un sistem informatic universal și interactiv care pregătește experimentele de prelucrare prin EEC (dar metoda aleasă nu este restrictivă, sistemul se poate aplica oricărui proces tehnologic, cu modificarea corespunzătoare a conținutului informațional), culege datele experimentale, modelează și simulează procesele care au loc, optimizează și permite conducerea unui proces de prelucrare.

Sistemul informatic implementat prin această lucrare oferă un suport bine documentat de luare a deciziilor legate de studiul proceselor tehnologice, analiza și interpretarea datelor experimentale, verificarea și modelarea acestora.

Programele sunt scrise folosind sistemul de gestiune a bazelor de date relaționale FoxPro al firmei Fox Software care are printre avantajele ([DD95, Kar99]):

- interfață cu utilizatorul foarte plăcută, comodă, ușor de folosit;
- multitasking, programele pot fi executate în paralel cu alte aplicații pe același calculator;

- control eficient al perifericelor, asigurat de către Windows, care permite utilizarea ușoară a mouse-ului și imprimantei;
- posibilitatea realizării de programe în manieră clasică, fără folosirea mecanismelor specifice programării sub Windows;
- posibilitatea gestionării unui număr foarte mare de înregistrări (peste 1 miliard);
- posibilitatea utilizării atât în regim monoutilizator cât și în rețea etc.

În elaborarea programului au fost folosite concepte similare regăsite în lucrările de specialitate referitoare la conducerea procesului de eroziune electrică ([O+99, Tit98]), de eroziune electrochimică ([IT98, TIS99])

Programul este structurat după cum urmează (figura 5.4):

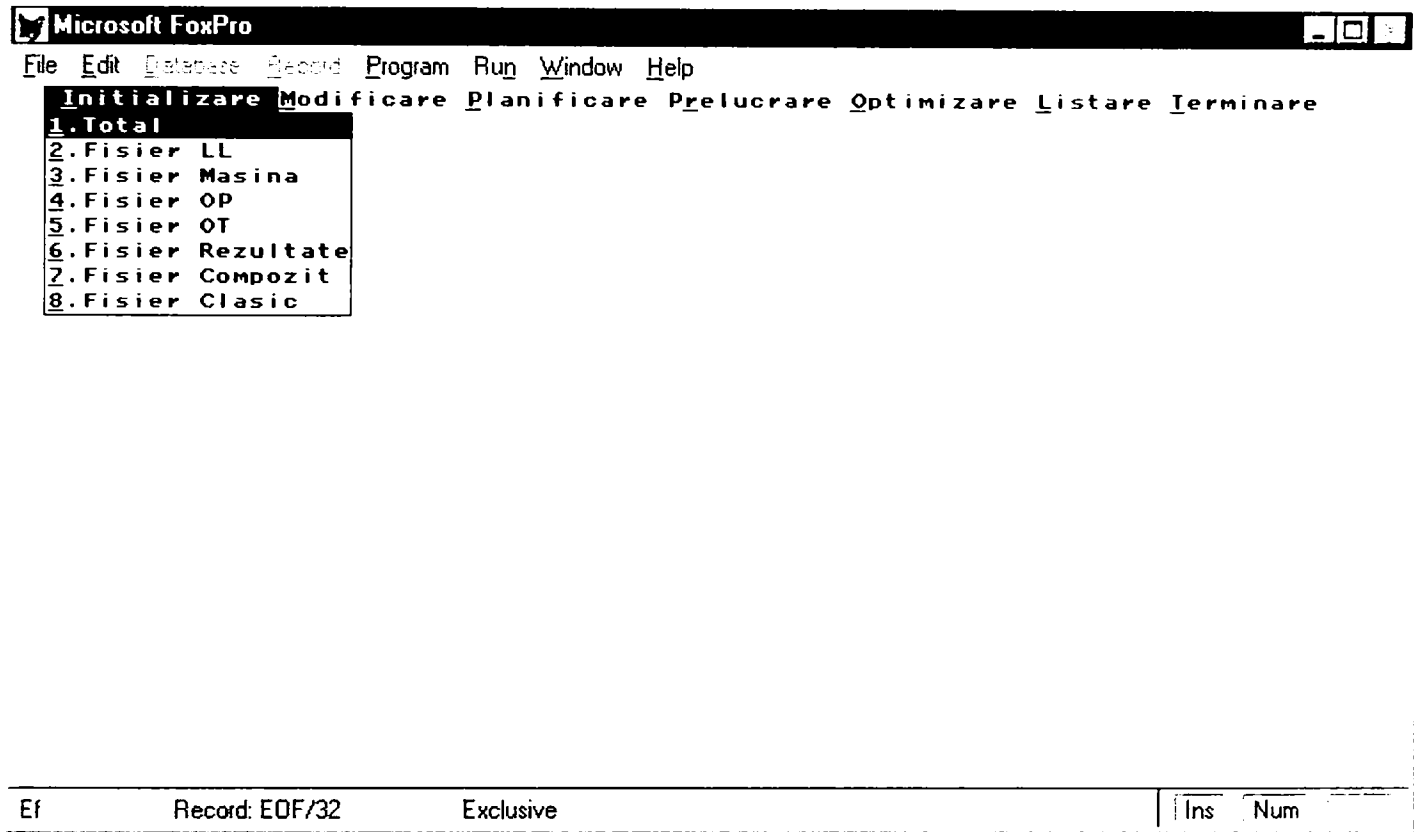


Figura 5.4. Meniul principal

- meniul **I**nitializare, permite ștergerea tuturor informațiilor din baza de date, respectiv din tabelele (fișierele) LL, Mașina, OP, OT, Rezultat, Compozit, Clasic;
- meniul **M**odificare, permite adăugarea, modificarea sau ștergerea datelor din tabelele LL, Mașina, OP, OT, Compozit, Clasic;
- meniul **P**lanificare, permite crearea matricei program a unui experiment factorial;
- meniul **P**relucrare, permite introducerea, modificarea sau ștergerea datelor despre experimente, analiza acestora din punct de vedere statistic, modelarea și simularea;
- meniul **O**ptimizare, permite determinarea condițiilor optime de desfășurare a unei operații de prelucrare;
- meniul **L**istare, permite obținerea de liste cu informațiile din baza de date;
- meniul **T**erminare, pentru încheierea lucrului cu sistemul informatic.

Selectarea meniului dorit se poate face cu mouse-ul sau de la tastatură prin combinația de taste <Alt> și litera subliniată din numele meniului respectiv.

Meniul **I**nitializare (figura 5.4) efectuează operațiile de ștergere a datelor din întreaga bază de date (opțiunea **1.Total**) sau din unul din tabelele acestuia (opțiunea **2.**

Fișier LL, 3. Fișier Mașina, 4. Fișier OP, 5. Fișier OT, 6. Fișier Rezultate, 7. Fișier Compozit, 8. Fișier Clasic).

Deoarece ștergerea datelor poate compromite conținutul bazei de date, utilizatorul este solicitat să confirme intenția de ștergere, ca în figura 5.5.



Figura 5.5. Confirmarea inițializării bazei de date

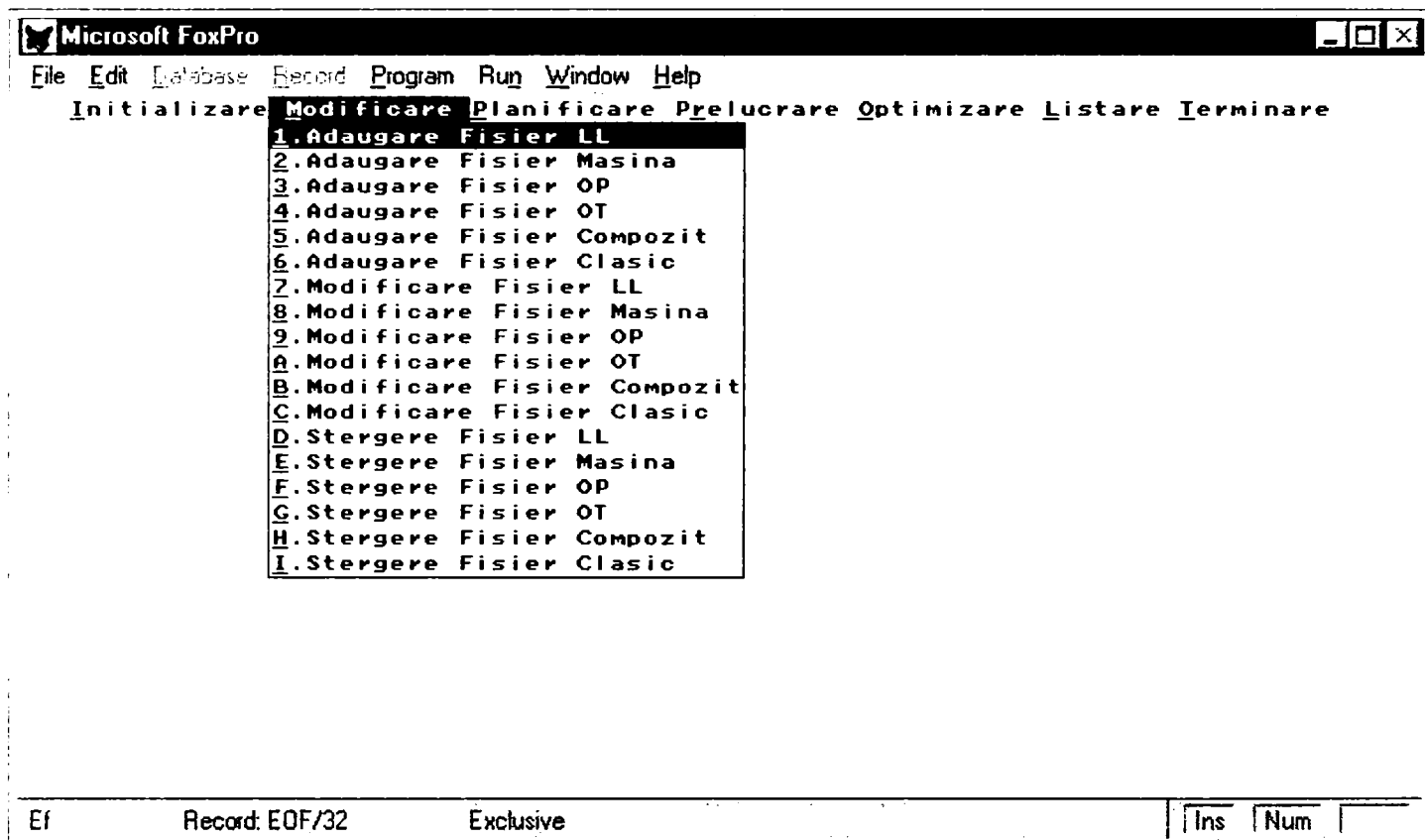


Figura 5.6. Meniul Modificare

Meniul **Modificare** (figura 5.6) efectuează operații asupra informațiilor din baza de date, permițând adăugări, modificări și ștergeri.

Opțiunea **1. Adăugare Fișier LL** permite adăugarea unei noi informații în tabelul cu LL, ca în figura 5.7. Semnificația celor trei butoane din fereastră este următoare: butonul **Continuare** efectuează operația de adăugare și revine la o altă adăugare; butonul **Corectare** abandonează operația curentă și reia procesul de adăugare; butonul **Terminare** efectuează operația de adăugare și revine în meniul principal.

Opțiunea **2. Adăugare Fișier Mașina** permite adăugarea denumirii unei noi mașini de prelucrare în tabelul corespunzător, ca în figura 5.8.

Opțiunea **3. Adăugare Fișier OP** este utilizată pentru adăugarea denumirii unui nou material al OP în tabelul OP, ca în figura 5.9.

Opțiunea **4. Adăugare Fișier OT** adaugă denumirea unui material nou pentru OT în tabelul corespunzător, ca în figura 5.10.

ADAUGA LL

Denumire:

Figura 5.7. Fereastra de adăugare a LL

ADAUGA Masina

Denumire:

Figura 5.8. Fereastra de adăugare a mașinii de prelucrare

ADAUGA OP

Denumire:

Figura 5.9. Fereastra de adăugare a materialului OP

ADAUGA OT

Denumire:

Figura 5.10. Fereastra de adăugare a materialului OT

ADAUGA Compozit

Alegeți materialul OP care doriți a fi descris:

1 [Adauga]

2 Otel aliat 15Cr08

3 Otel aliat 40Cr10

▼

Figura 5.11. Fereastra de alegere a materialului OP pentru descrierea compoziției

ADAUGA Compozit

Alegeți materialul OP care doriți a fi descris:

Otel aliat 15Cr08

Element:

Procent minim: 0

Procent maxim: 0

Figura 5.12. Fereastra de adăugare a compoziției materialului OP

ADAUGA Clasic

Alegeți materialul OP care doriți a fi descris:

1 [Adauga]

2 Otel aliat 15Cr08

3 Otel aliat 40Cr10

▼

Figura 5.13. Fereastra de alegere a materialului OP pentru debitarea clasică

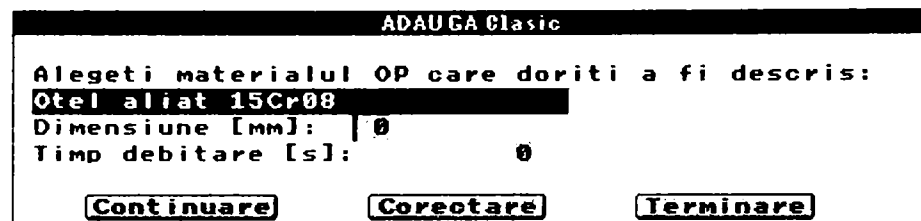


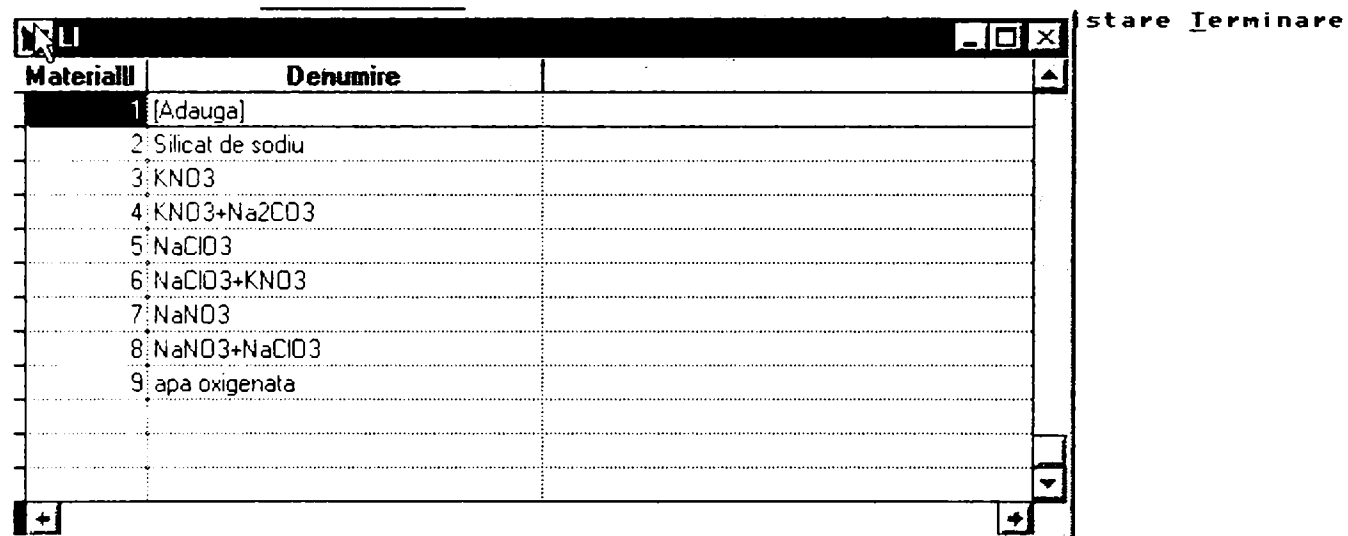
Figura 5.14. Fereastra de adăugare a datelor despre prelucrarea clasică a OP

Pentru indicarea elementelor componente ale unui material al OP se utilizează opțiunea **5. Adăugare Fișier Compozit**, pentru care trebuie introdusă denumirea materialului OP (se selectează dintr-o listă ca în figura 5.11) apoi elementul chimic și limitele procentelor admise (figura 5.12).

Similar, introducerea datelor privind prelucrarea clasică a materialului OP se face prin opțiunea **6. Adăugare Fișier Clasic** care necesită alegerea materialului OP (figura 5.13) și indicarea datelor cerute ca în figura 5.14.

Modificarea informațiilor din baza de date se poate face prin opțiunile **7. Modificare Fișier LL**, **8. Modificare Fișier Mașina**, **9. Modificare Fișier OP**, **A. Modificare Fișier OT**, **B. Modificare Fișier Compozit**, **C. Modificare Fișier Clasic**, fiecare deschizând o fereastră (ca în figurile 5.15-5.20) în care utilizatorul caută datele care trebuie modificate, efectuează operațiile dorite apoi salvează modificările prin combinația de taste <Ctrl+W>.

Trebuie menționat că programul nu permite modificarea câmpurilor cheie primară (MaterialLL, Mașina, MaterialOP, MaterialOT) pentru a nu apare probleme de consistență a bazei de date.



Dupa efectuarea modificarilor apasati <Ctrl+W>

Fereastra 5.15. Fereastra de modificare a LL

Masina	Denumire
1	[Aadauga]
2	MEC-75
3	Masina experimentala IP81
4	MEC-100
5	MPTEEC

Fereastra 5.16. Fereastra de modificare a mașinii de prelucrare

Materialop	Denumire
1	[Aadauga]
2	Otel aliat 15Cr08
3	Otel aliat 40Cr10
4	Otel aliat 35Mn16
5	Otel aliat 40BCr10
6	Otel aliat 33MoCr11
7	Otel aliat 41MoCr11
8	Otel aliat 34MoCrW15
9	Otel aliat 21MoMnCr12
10	Otel rapid RP1
11	Otel rapid RP2
12	Otel rapid RP3

Figura 5.17. Fereastra de modificare a materialului OP

Materialot	Denumire
1	[Aadauga]
2	OL37
3	Fonta cenusie
4	Cu
5	Am
6	Otel moale
7	Material

Figura 5.18. Fereastra de modificare a materialului OT

Materialop	Element	Procmin	Procmax
2	C	0,120	0,180
2	Mn	0,400	0,700
2	Si	0,170	0,370
2	Cr	0,700	1,000
3	C	0,360	0,440
3	Mn	0,500	0,800
3	Si	0,170	0,370
3	Cr	0,800	1,000
4	C	0,320	0,400
4	Mn	1,400	1,800
4	Si	0,170	0,370
5	C	0,360	0,440

Figura 5.19. Fereastra de modificare a compoziției materialului OP

Materialop	Dimensiune	Timp
2	0	0,000
2	0	0,000

Figura 5.20. Fereastra de modificare a datelor despre prelucrarea clasică

STERGE LL

Alegeti materialul LL care doriti a fi sters:

1 [Adauga]

2 Silicat de sodiu

Figura 5.21. Fereastra de alegere a LL de șters

STERGE LL

Alegeti materialul LL care doriti a fi sters:

apa oxigenata

Continuare
Corectare
Terminare

Figura 5.22. Fereastra de confirmare a ștergerii LL

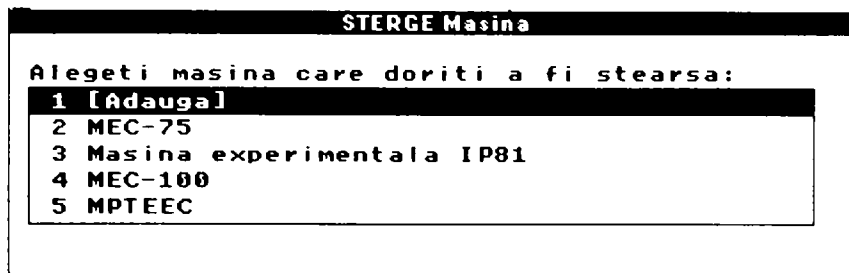


Figura 5.23. Fereastra de alegere a mașinii de șters



Figura 5.24. Fereastra de confirmare a ștergerii mașinii de prelucrare

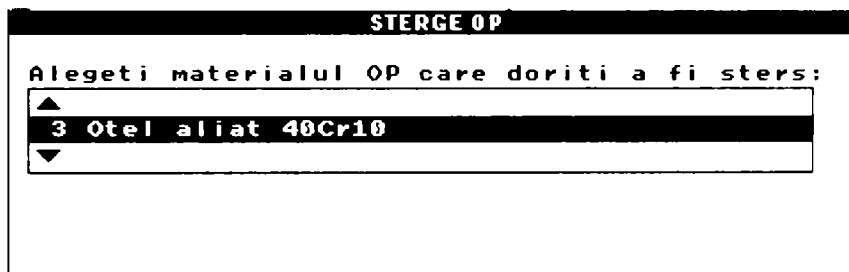


Figura 5.25. Fereastra de alegere a OP de șters

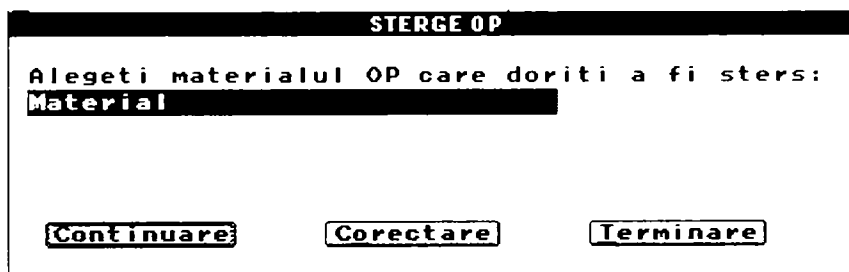


Figura 5.26. Fereastra de confirmare a ștergerii OP

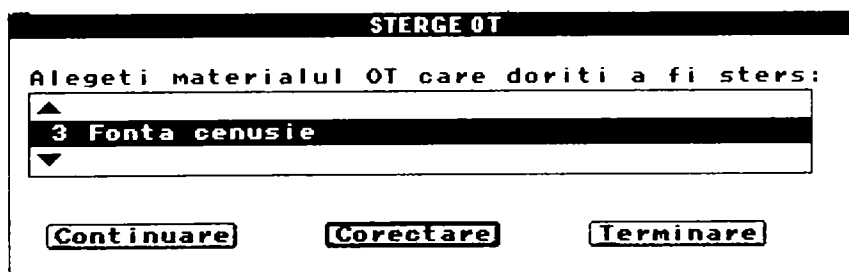


Figura 5.27. Fereastra de alegere a OT de șters

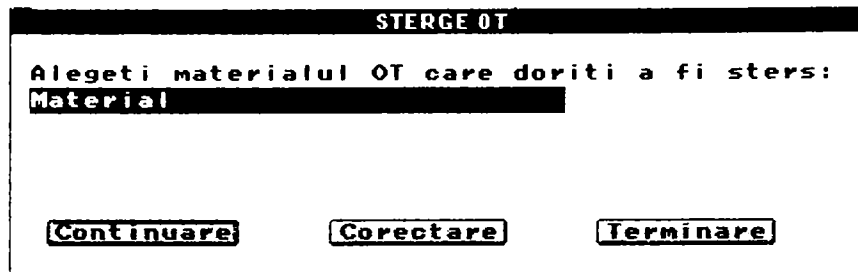


Figura 5.28. Fereastra de confirmare a ștergerii OT

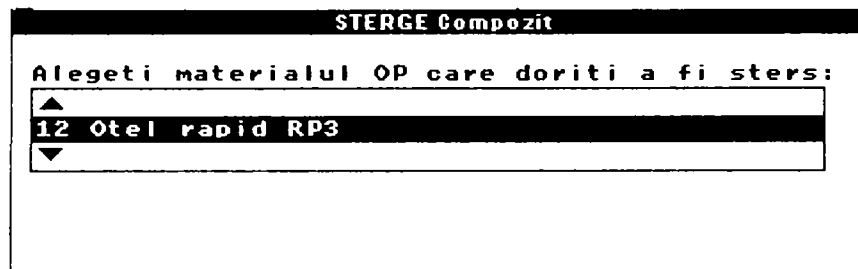


Figura 5.29. Fereastra de alegere a compoziției OP de șters

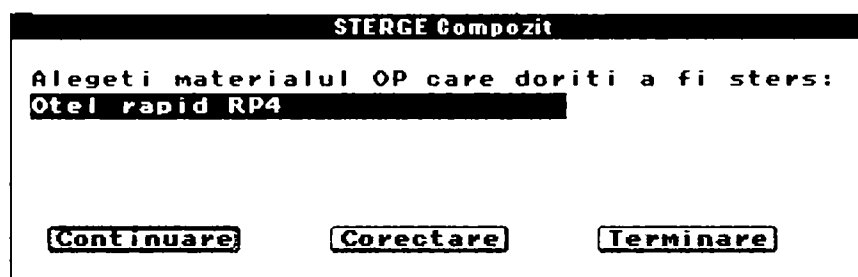
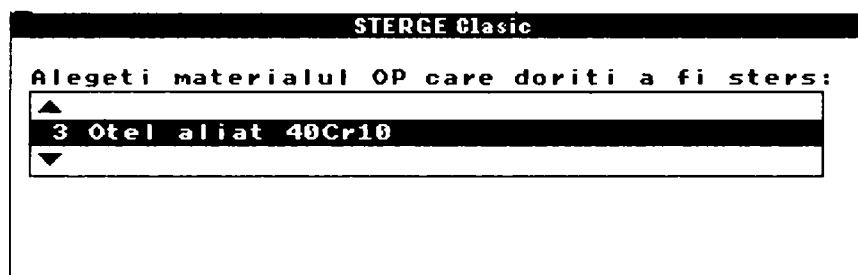


Figura 5.30. Fereastra de confirmare a ștergerii compoziției OP



Fereastra 5.31. Fereastra de alegere a OP prelucrat clasic de șters



Fereastra 5.32. Fereastra de confirmare a ștergerii prelucrării clasice a OP

Pentru ștergerea informațiilor despre un anumit LL se utilizează opțiunea **D. Ștergere Fișier LL** care solicită alegerea LL din listă (figura 5.21) și confirmarea ștergerii (figura 5.22). Semnificația celor trei butoane este similară celei prezentată la operația de adăugare.

Ștergerea informațiilor despre mașina de prelucrare se face cu opțiunea **E. Ștergere Fișier Mașina** în care se cere selectarea mașinii dintr-o listă (figura 5.23) și confirmarea ștergerii (figura 5.24).

În mod similar au loc și operațiile de ștergere a datelor despre materialul OP respectiv OT, cu opțiunile **F. Ștergere Fișier OP** și **G. Ștergere Fișier OT**, care presupun alegerea materialului (figurile 5.25, 5.27) și confirmarea ștergerii materialului (figurile 5.26 și 5.28). Opțiunea **H. Ștergere Fișier Compozit** permite alegerea materialului a cărui compoziție va fi ștearsă (figura 5.29) urmată de confirmarea operației de ștergere (figura 5.30).

Asemănător, opțiunea **I. Ștergere Fișier Clasic** permite alegerea datelor despre prelucrarea clasică a OP, prin selectarea materialului OP (figura 5.31) și confirmarea ștergerii (figura 5.32).

Meniul **Planificare** (figura 5.33) permite elaborarea unui plan de efectuare a cercetărilor prin experiment factorial complet de ordinul n (introducerea lui n se face ca în figura 5.34) iar matricea program a experimentului este prezentată pe ecran ca în figura 5.35; simultan, ea este listată în fișierul cu numele **EF.TXT** din directorul curent.

Introducerea, modificarea, prelucrarea și interpretarea datelor experimentale se efectuează prin intermediul meniului **Prelucrare** (figura 5.36).

Opțiunea **1. Culegere date** a acestui meniu permite introducerea informațiilor experimentale în baza de date. Pentru aceasta se parcurg următorii pași: se alege mașina de prelucrare (figura 5.37), apoi LL (figura 5.38), materialul OP (figura 5.39) și OT (figura 5.40), iar în final toate celelalte informații variabile despre experiment (figura 5.41).

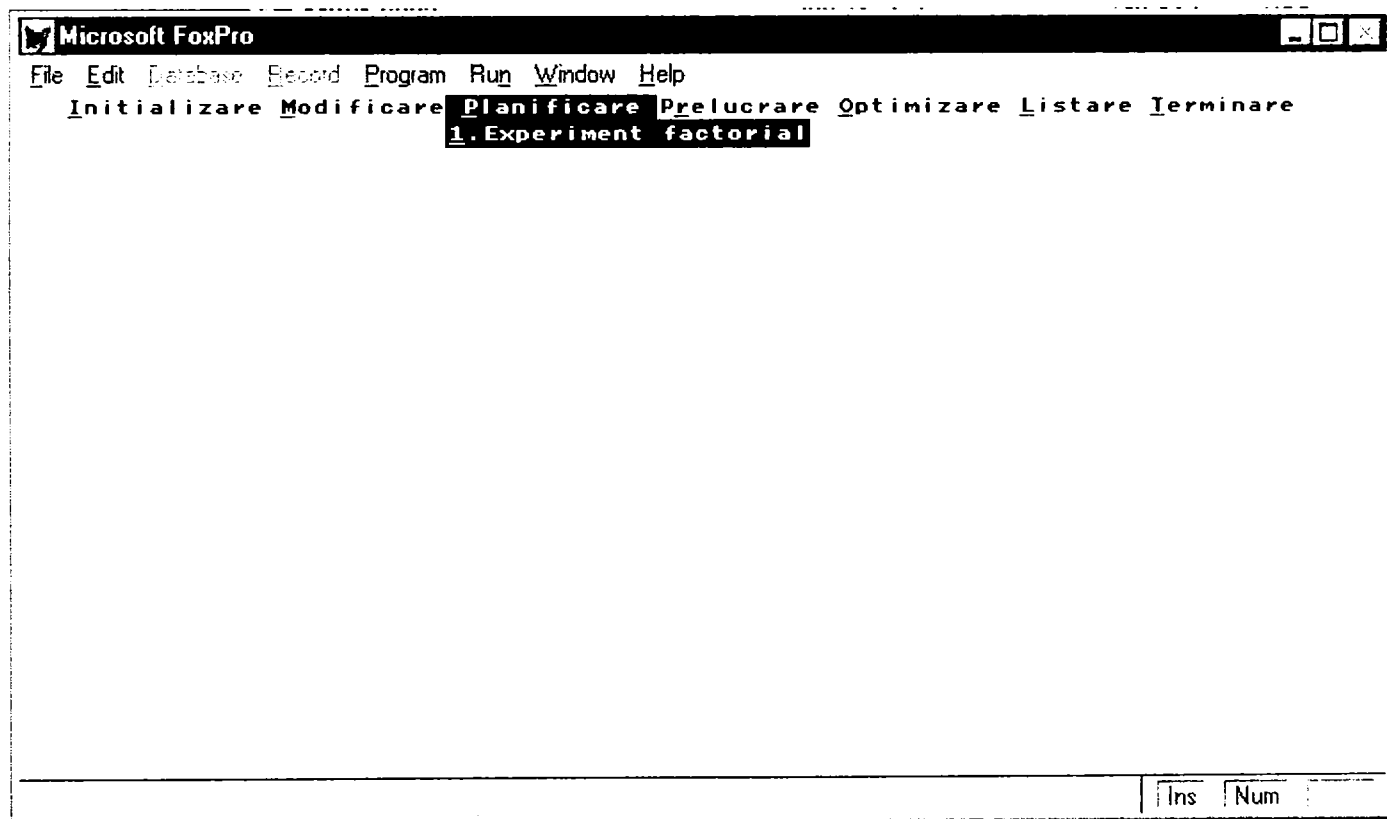


Figura 5.33. Meniul Planificare

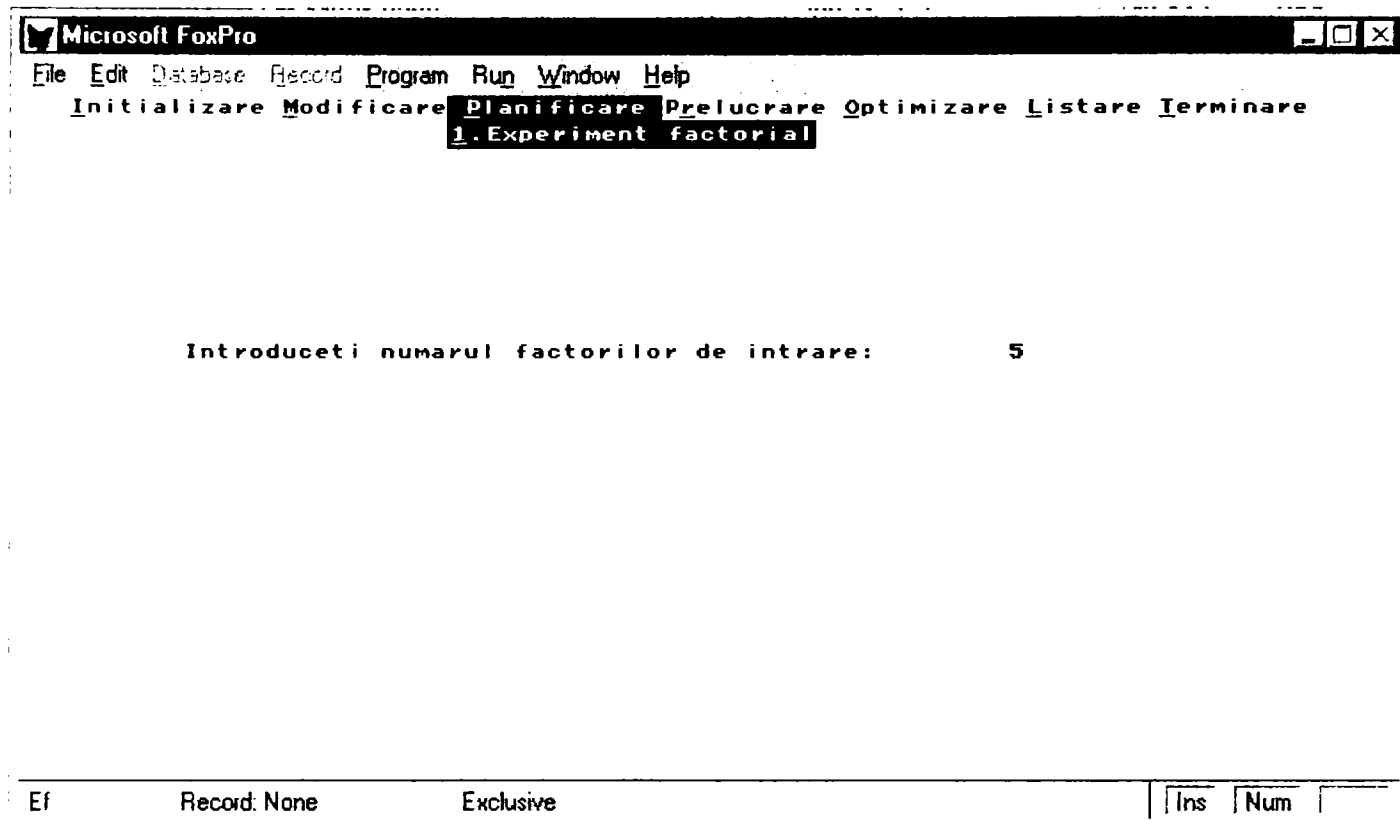


Figura 5.34. Fereastra de introducere a datelor pentru experimentul factorial

The screenshot shows the 'Preview' window displaying the factorial experiment matrix. The title is 'MATRICEA PROGRAM A EXPERIMENTULUI FACTORIAL'. The matrix is divided into two columns: 'Factori de intrare' and 'Parametri tehnologici'. The matrix contains 10 rows of data, each representing a different combination of factors and parameters.

Factori de intrare	Parametri tehnologici
-1 -1 -1 -1 -1	
-1 -1 -1 -1 1	
-1 -1 -1 1 -1	
-1 -1 -1 1 1	
-1 -1 1 -1 -1	
-1 -1 1 -1 1	
-1 -1 1 1 -1	
-1 -1 1 1 1	
-1 1 -1 -1 -1	

At the bottom of the window, there are buttons for 'Done' and 'More', and a label 'Column: 8'.

Figura 5.35. Lista experimentului factorial

The screenshot shows the 'Prelucrare' menu options. The menu is expanded, showing the following options:

- 1. Culegere date
- 2. Modificare date
- 3. Stergere date
- 4. Prelucrare statistica
- 5. Analiza dispersionala monofactoriala
- 6. Analiza dispersionala bifactoriala
- 7. Modelare monovariabila
- 8. Modelare multivariabila
- 9. Simulare monovariabila
- A. Simulare multivariabila
- B. Calcul comparativ
- C. Calcul economic

Figura 5.36. Meniul Prelucrare

ADAUGA EXPERIMENT	
Masina:	
1 [Adauga]	
2 MEC-75	
3 Masina experimentală IP81	
4 MEC-100	
5 [sters]	
Grosime OP:	Material OT:
	Lungime OT:
	Latime OT:
	Grosime OT:
I[A]:	
j[A/mm ²]:	
Ur[m/s]:	
p[daN/cm ²]:	
R[0]:	
L[mH]:	
C[uF]:	
Q[g/min]:	
t[sec]:	
Ra[um]:	
Experiment:	

Figura 5.37. Selectarea mașinii folosite la experiment

Material LL:
1 [Adauga]
2 Silicat de sodiu
3 KN03
4 KN03+Na2CO3
5 NaClO3

Figura 5.38. Selectarea LL folosit la experiment

Material OP:
1 [Adauga]
2 Otel aliat 15Cr08
3 Otel aliat 40Cr10
4 Otel aliat 35Mn16
5 Otel aliat 40BCr10

Figura 5.39. Selectarea OP folosit la experiment

Material OT:
1 [Adauga]
2 OL37
3 Fonta cenusie
4 Cu
5 Am
6 Otel moale
7 [sters]

Figura 5.40. Selectarea OT folosit la experiment

Modificarea datelor experimentale se face apelând opțiunea **2. Modificare date** care deschide o fereastră ca în figura 5.42; încheierea modificărilor se indică prin combinația de taste <Ctrl+W>.

Opțiunea **3. Ștergere date** (figura 5.43) permite ștergerea informațiilor experimentale din baza de date prin selectarea liniei care corespunde informației de șters și apăsarea combinației de taste <Ctrl+T> care marchează efectuarea operației; încheierea ștergerilor se indică prin combinația de taste <Ctrl+W>.

ADAUGA EXPERIMENT

Masina: **MEC-75**

Material LL: **NaClO3**

Material OP: **Otel aliat 35Mn16** Material OT: **Cu**

Lungime OP: **0** Lungime OT: **0**

Latime OP: **0** Latime OT: **0**

Grosime OP: **0** Grosime OT: **0**

I[A]: **0**

j[A/mm2]: **0**

Ur[m/s]: **0**

p[daN/cm2]: **0**

R[O]: **0**

L[mH]: **0**

C[uF]: **0**

Q[g/min]: **0**

t[sec]: **0**

Ra[um]: **0**

Experiment:

Figura 5.41. Introducerea datelor despre experiment

Materialop	Materialot	L1op	L2op	L1ot	Grosimeot	Masina	Materialli	Spalarell	U
23		37			0,0	4	2		22
24		31			0,0	4	2		22
7		28			0,0	4	2		22
25		30			0,0	4	2		22
26		24			0,0	4	2		22
27		32			0,0	4	2		22
28		33			0,0	4	2		22
29		38			0,0	4	2		22
30		38			0,0	4	2		22
31		29			0,0	4	2		22
32		32			0,0	4	2		22
33		35			0,0	4	2		22

Figura 5.42. Modificarea datelor despre experiment

Microsoft FoxPro

File Edit Database Record Program Run Browse Window Help

Materialop	Materialot	L1op	L2op	L1ot	Grosimeot	Masina	Materialli	Spalarell	U
23		37			0,0	4	2		22
24		31			0,0	4	2		22
7		28			0,0	4	2		22
25		30			0,0	4	2		22
26		24			0,0	4	2		22
27		32			0,0	4	2		22
28		33			0,0	4	2		22
29		38			0,0	4	2		22
30		38			0,0	4	2		22
31		29			0,0	4	2		22
32		32			0,0	4	2		22
33		35			0,0	4	2		22

Stare Terminare

monofactoriala

bifactoriala

Selectati inregistrarea, apasati <Ctrl+T> iar in final <Ctrl+W>

Rezultat Record: 1/1256 Exclusive

Figura 5.43. Ștergerea datelor despre experiment

Opțiunea **4. Prelucrare statistică** analizează datele unui experiment (selectat ca în figura 5.44) pentru a stabili dacă rezultatele obținute sunt sau nu omogene; dacă da, prelucrarea se încheie; dacă nu, se propune utilizatorului datele care trebuie eliminate și procesul de analiză se reia (figura 5.45).

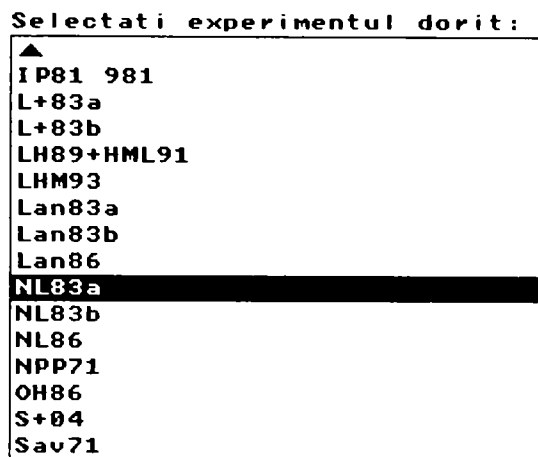


Figura 5.44. Alegerea experimentului pentru prelucrarea statistică

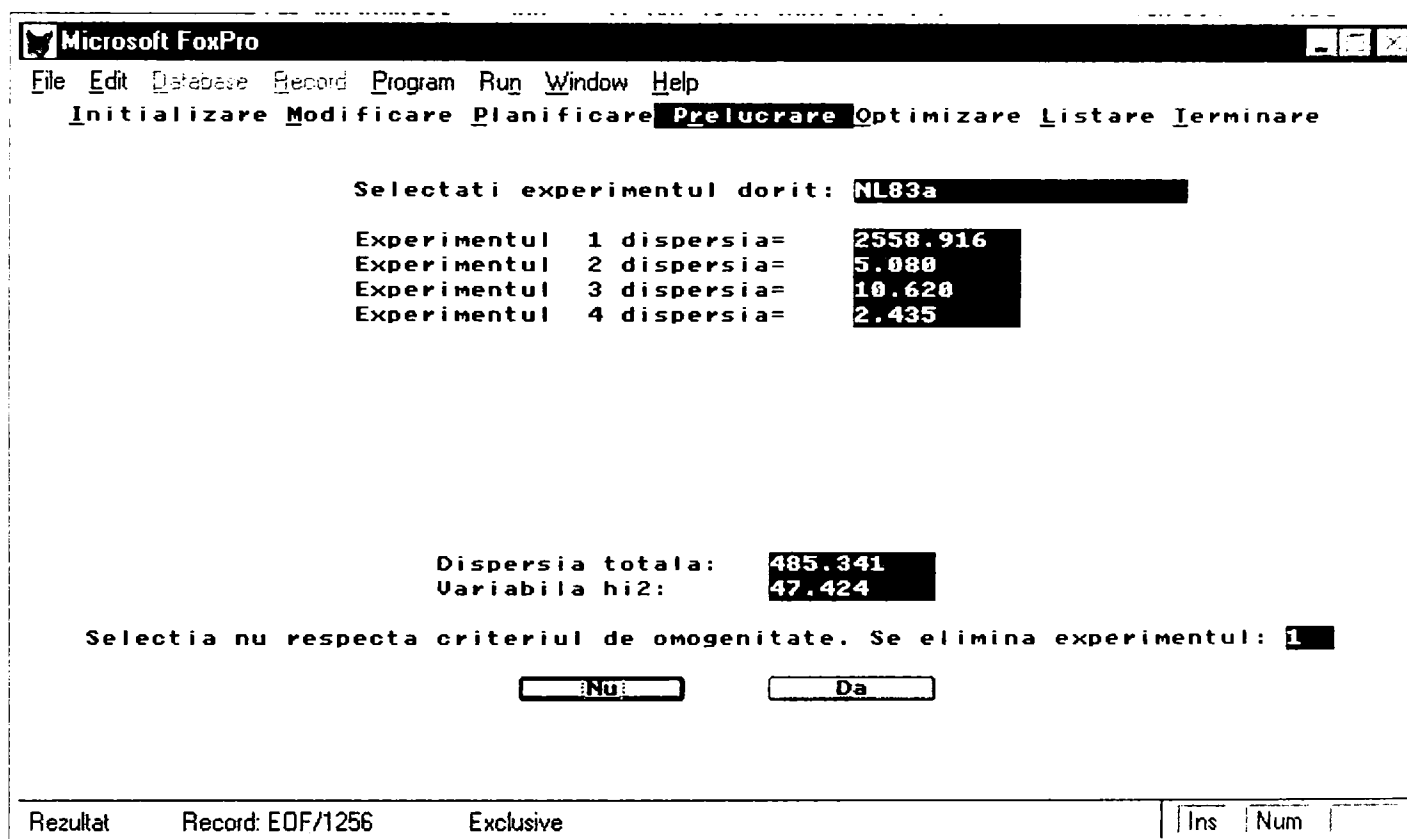


Figura 5.45. Prelucrarea statistică a datelor unui experiment

Pentru a verifica dacă rezultatele experimentale depind sau nu de unul sau doi factori de intrare se utilizează opțiunile **5. Analiză dispersională monofactorială** respectiv **6. Analiză dispersională bifactorială** care presupun selectarea experimentului de analizat (ca în figura 5.44) apoi se obțin rezultatele ca în figurile 5.46 și 5.47.

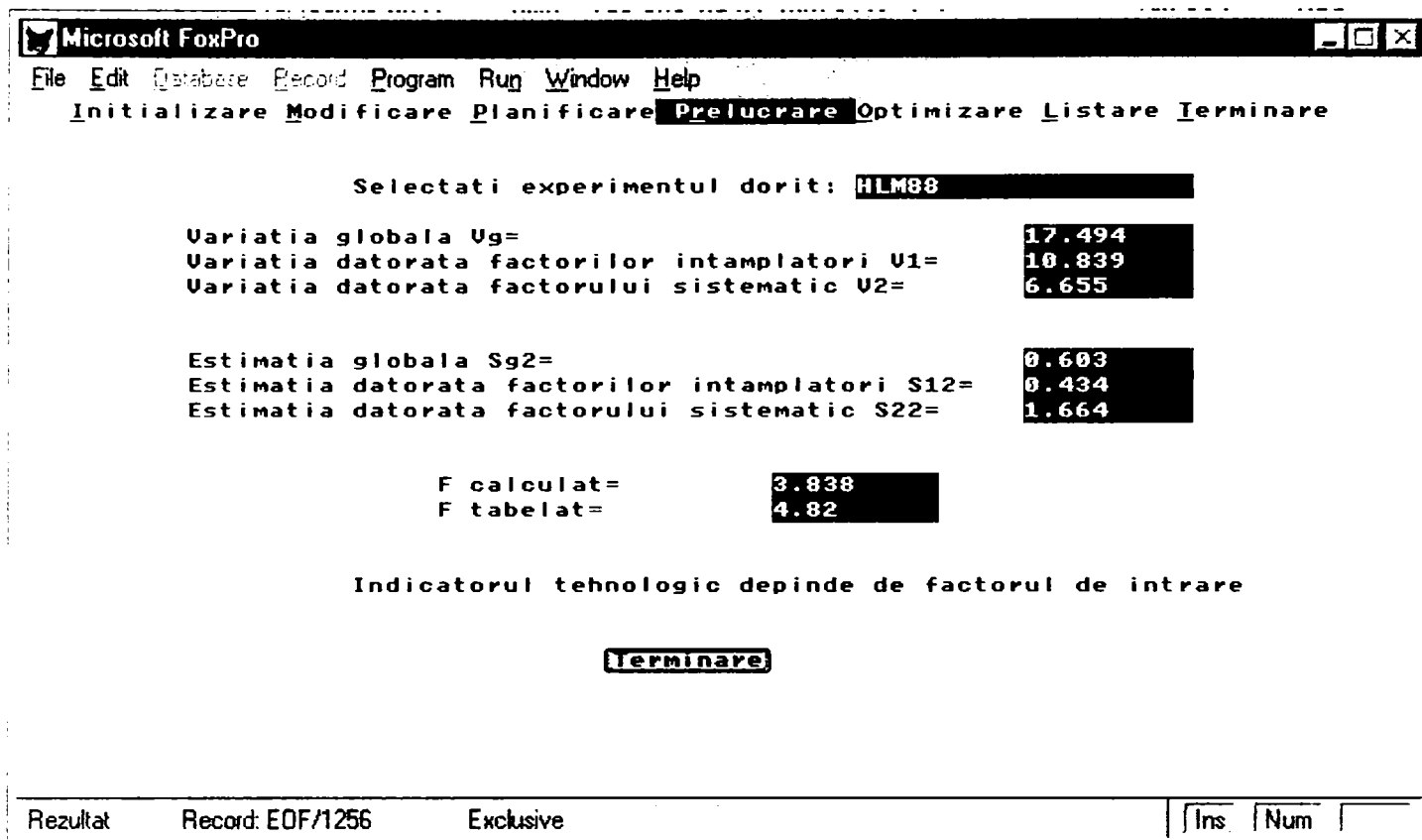


Figura 5.46. Analiza dispersională monofactorială a unui experiment

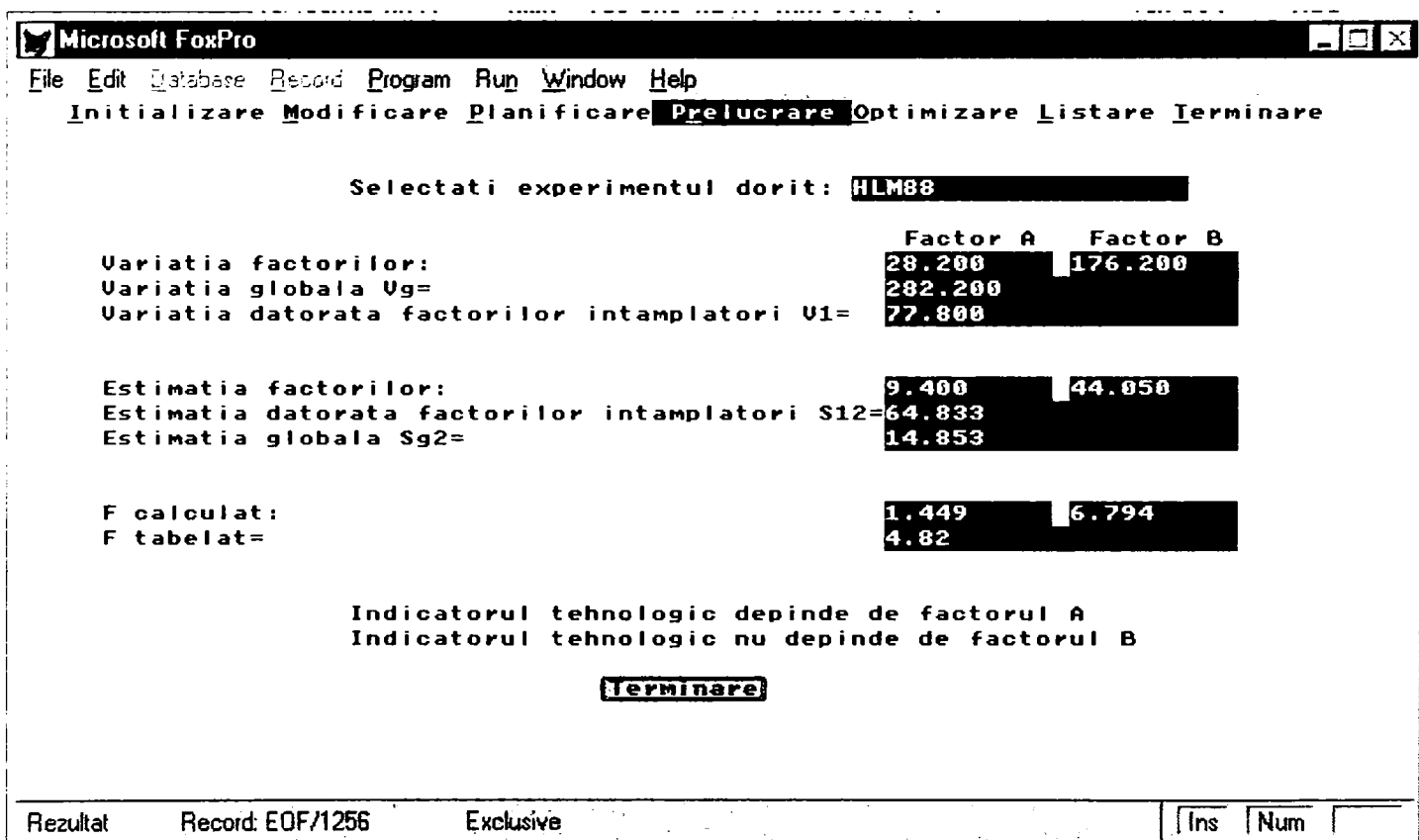


Figura 5.47. Analiza dispersională bifactorială a unui experiment

Pentru elaborarea modelului matematic al dependenței parametrului tehnologic obținut experimental (aflat în baza de date) de factorii de intrare (aflați și ei în baza de date) se apelează opțiunea **7. Modelare monovariabilă** sau **8. Modelare multivariabilă**, după cum se caută dependența de unul sau doi factori de intrare. Cele două opțiuni

necesită mai întâi selectarea experimentului apoi se obțin rezultatele ca în figura 5.48 respectiv 5.49.

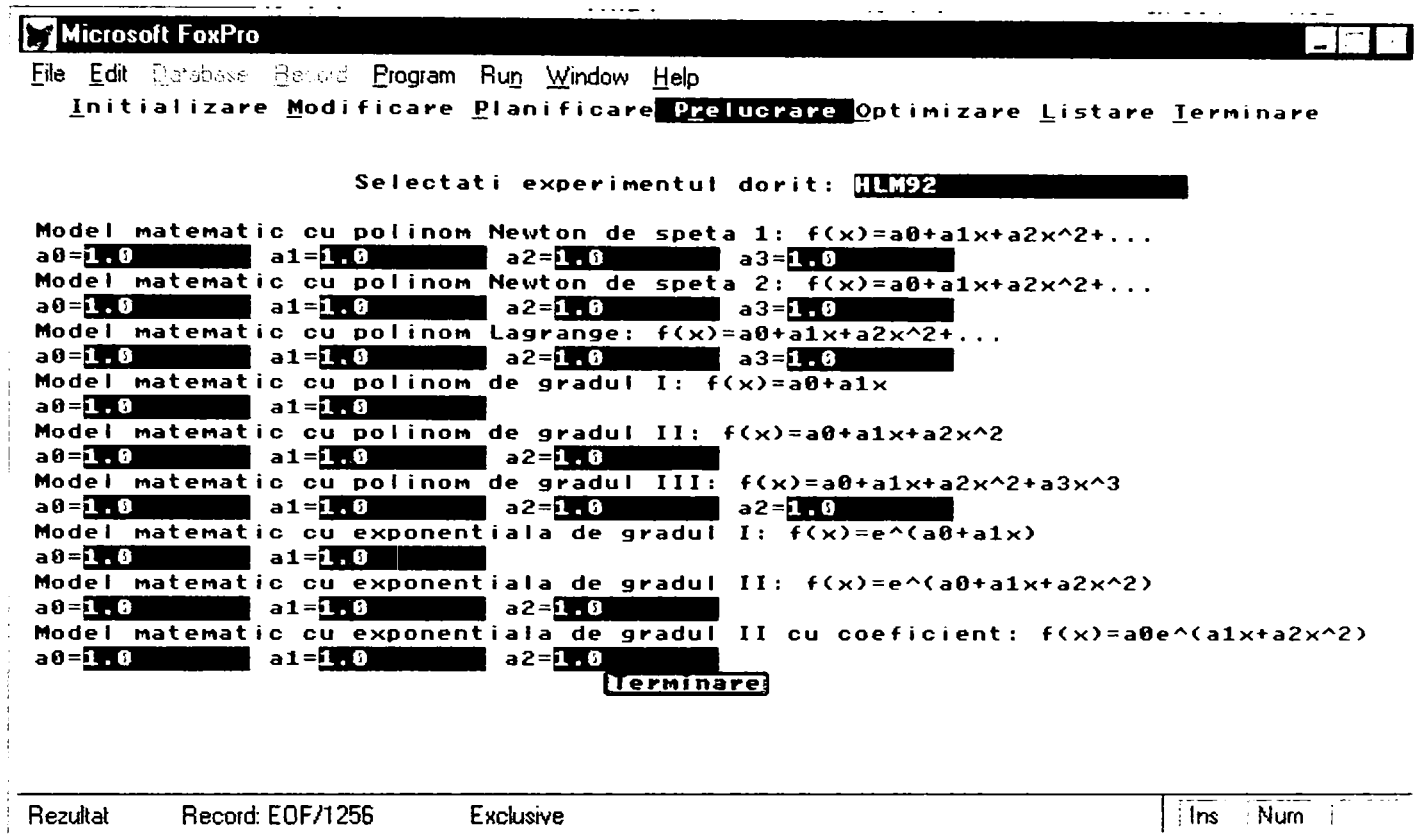


Figura 5.48. Modelarea monovariabilă a unui experiment

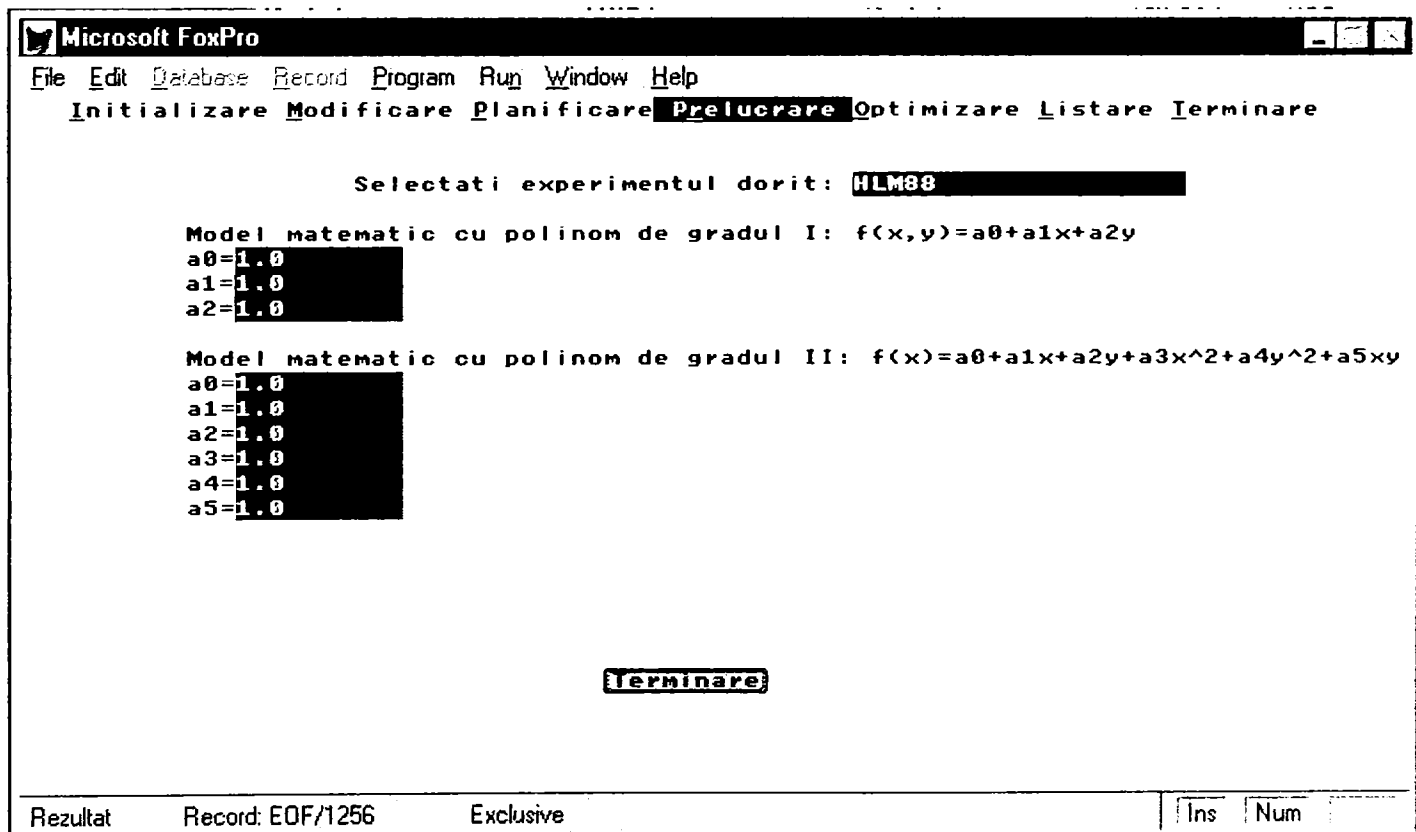


Figura 5.49. Modelarea multivariabilă a unui experiment

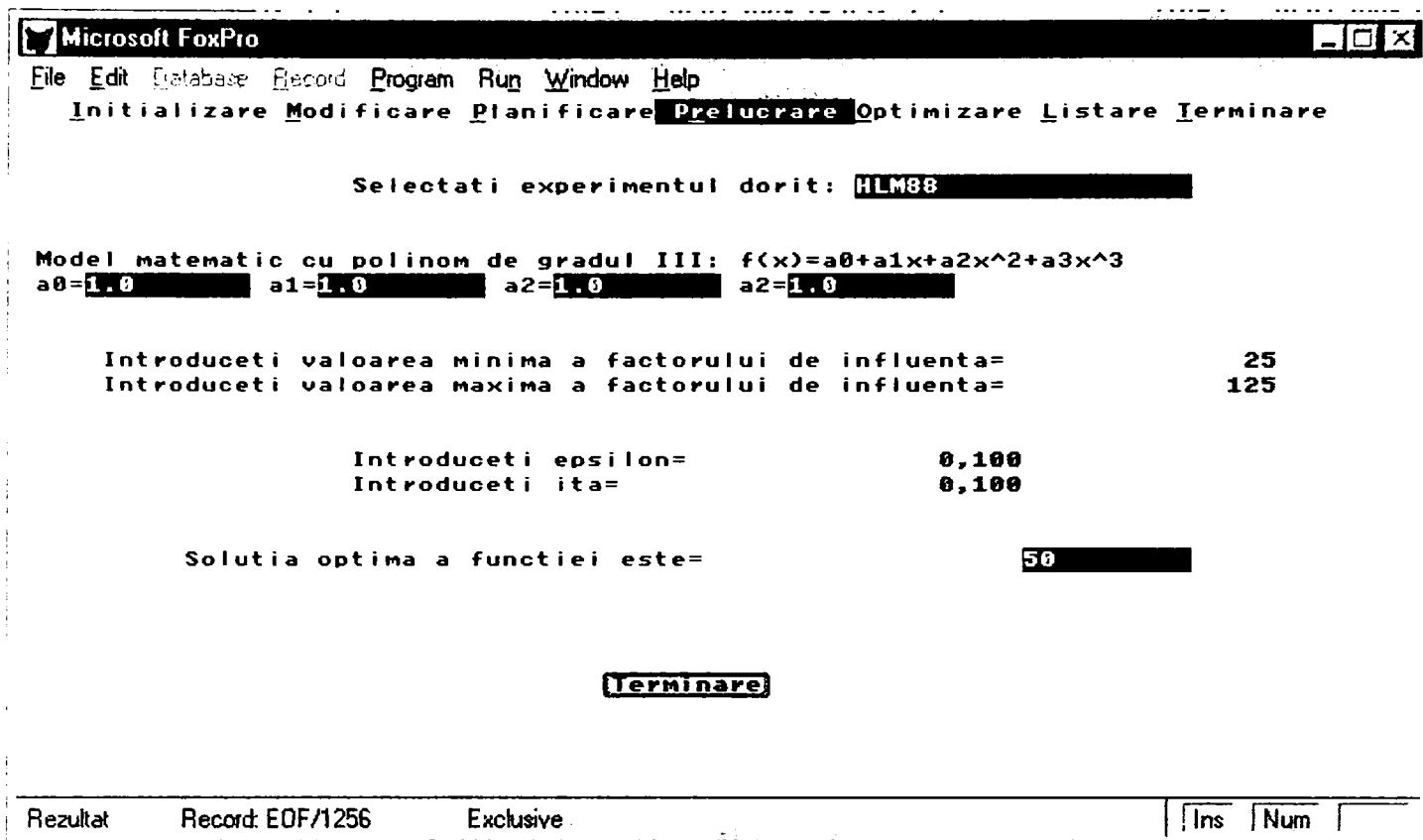


Figura 5.50. Simularea monovariabilă a unui experiment

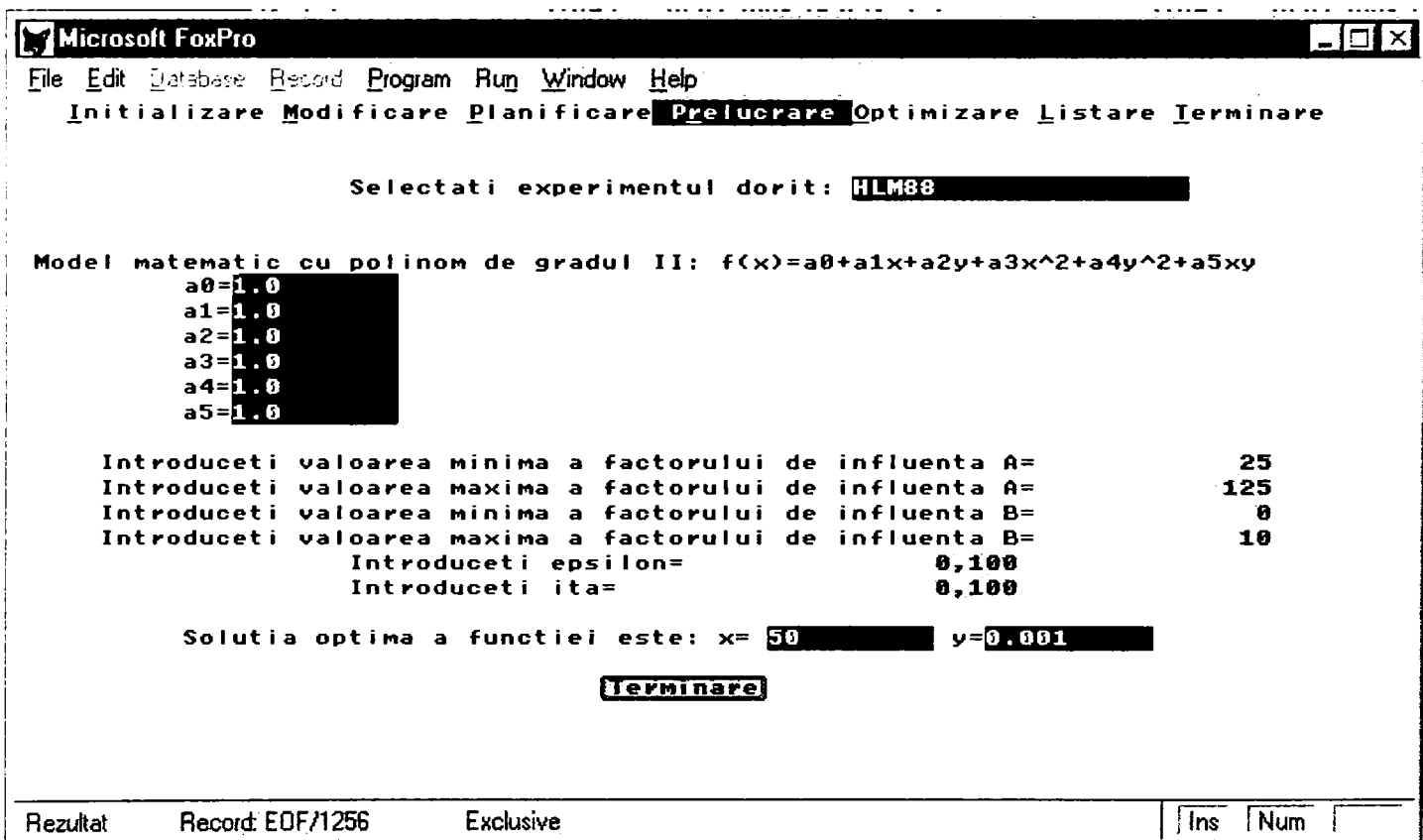
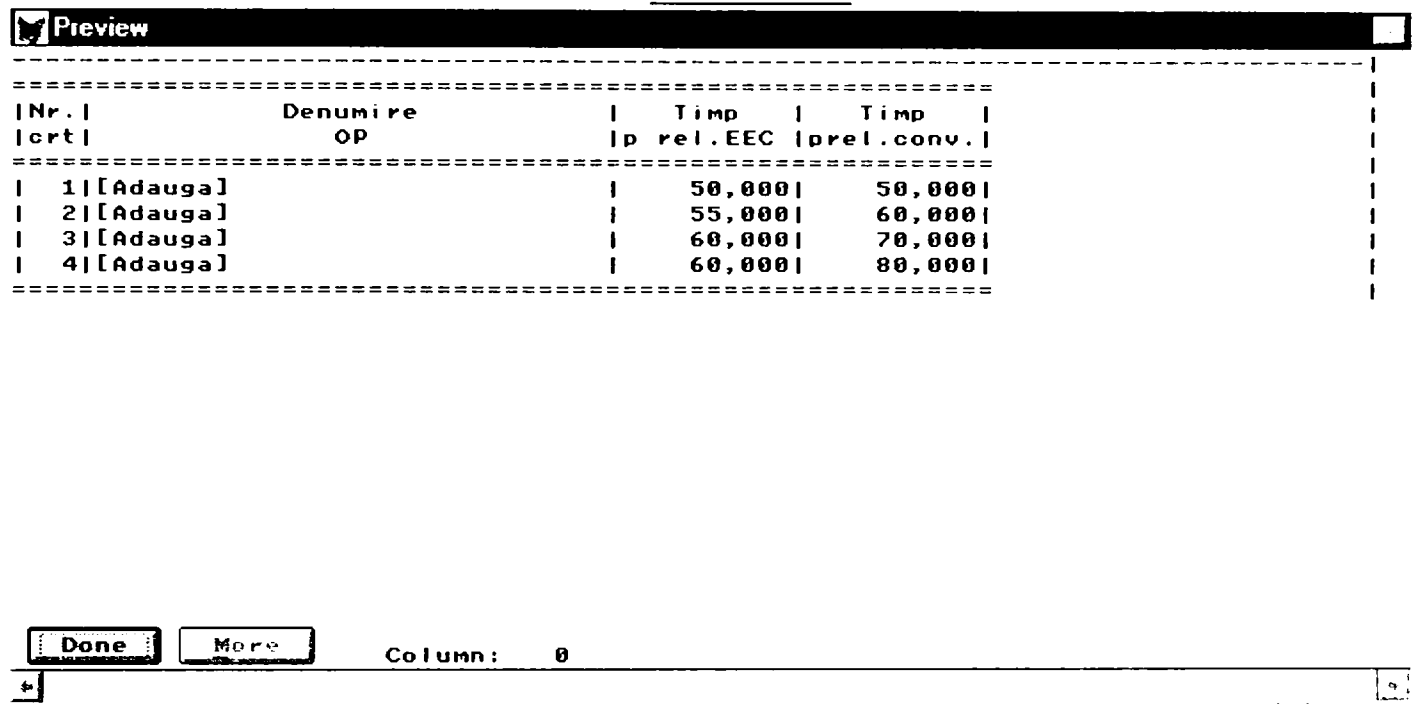


Figura 5.51. Simularea multivariabilă a unui experiment

Cum programul permite elaborarea mai multor modele matematice și alegerea celui optim dintr-o clasă largă de funcții, opțiunile **9. Simulare monovariabilă** și **A. Simulare multivariabilă** permit utilizatorului să determine comportarea mașinii de prelucrare în condițiile experimentale date (alese ca în figura 5.44) prin determinarea celei mai potrivite

funcții de interpolare de o variabilă (figura 5.50) sau de două variabile (figura 5.51) și afișarea rezultatelor respective.

Pentru determinarea comparativă a rezultatelor prelucrării prin EEC și prin metode convenționale (prezentate în lucrări ca [Nor96, V+83]), programul permite regăsirea din baza de date a timpului de prelucrare prin EEC (din tabela REZULTAT) și prin metodele clasice (din tabela CLASIC) și prezentarea lor comparativă, apelând la opțiunea **B. Calcul comparativ**, rezultatele fiind ca în figura 5.52.



Nr. crt	Denumire OP	Time p rel. EEC	Time (prel. conv.)
1	[Adauga]	50,000	50,000
2	[Adauga]	55,000	60,000
3	[Adauga]	60,000	70,000
4	[Adauga]	60,000	80,000

Done More Column: 0

Figura 5.52. Calculul comparativ al timpului de prelucrare prin EEC și clasică

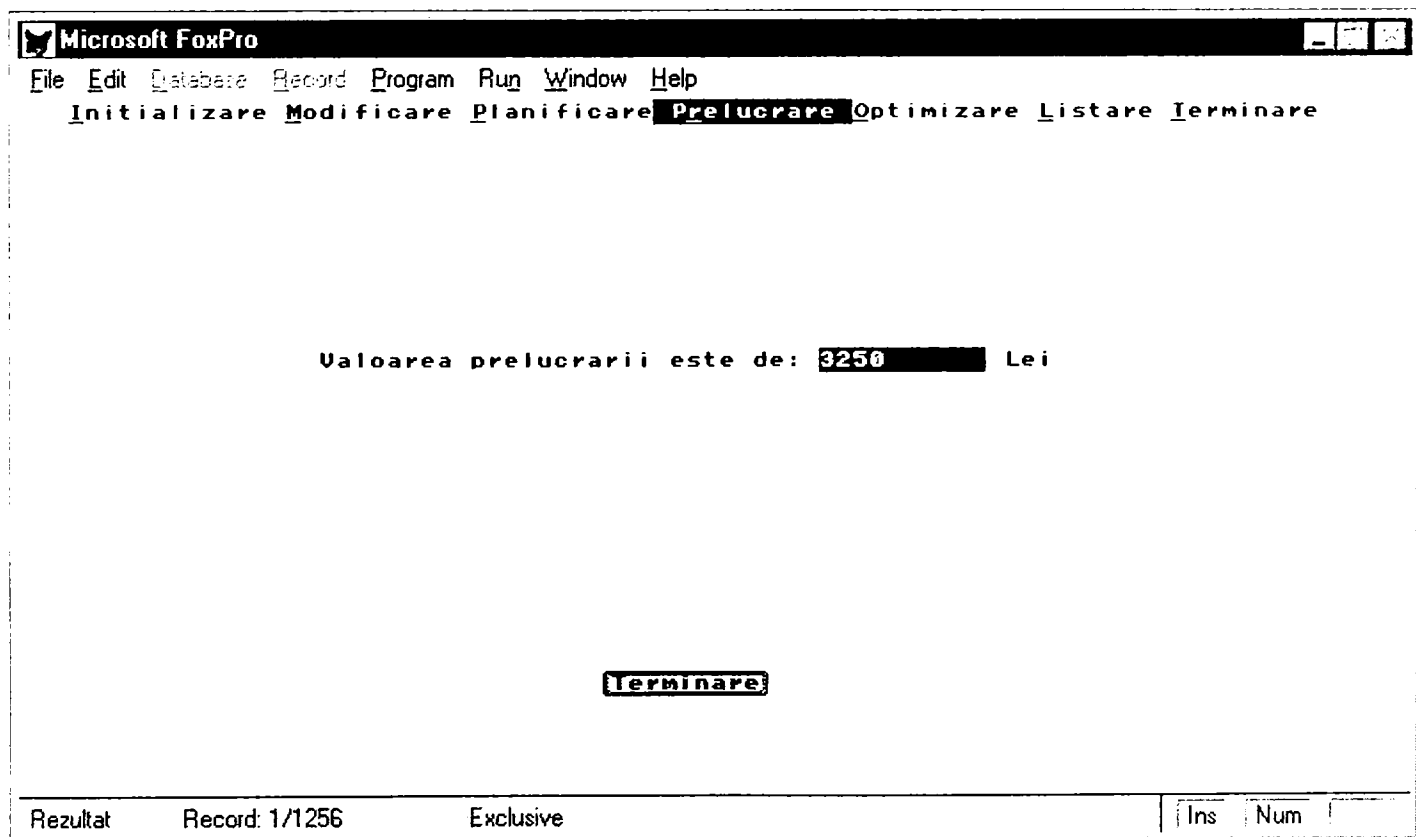


Figura 5.53. Calculul economic al prelucrării prin EEC

Calculul economic al costului prelucrării prin EEC se face prin opțiunea **C. Calcul economic**, care necesită alegerea experimentului dorit iar rezultatul se obține ca în figura 5.53.

SELECTIE EXPERIMENTE	
Selectati optiunile dorite sau [Adaugati] daca nu aveti optiune	
Masina:	Lungime OP:
1 [Adauga]	Latime OP:
2 MEC-75	Grosime OT:
3 Masina experimentală IP81	
4 MEC-100	
5 [sters]	

Figura 5.54. Alegerea mașinii pentru optimizare

SELECTIE EXPERIMENTE	
Selectati optiunile dorite sau [Adaugati] daca nu aveti optiune	
Masina: Masina experimentală IP81	Lungime OP:
Material LL:	Latime OP:
1 [Adauga]	Grosime OT:
2 Silicat de sodiu	
3 KN03	
4 KN03+Na2CO3	
5 NaClO3	

Figura 5.55. Alegerea LL pentru optimizare

SELECTIE EXPERIMENTE	
Selectati optiunile dorite sau [Adaugati] daca nu aveti optiune	
Masina: Masina experimentală IP81	Lungime OP:
Material LL: Silicat de sodiu	Latime OP:
Material OP:	Grosime OT:
1 [Adauga]	
2 Otel aliat 15Cr08	
3 Otel aliat 40Cr10	
4 Otel aliat 35Mn16	
5 Otel aliat 40BCr10	

Figura 5.56. Alegerea OP pentru optimizare

SELECTIE EXPERIMENTE	
Selectati optiunile dorite sau [Adaugati] daca nu aveti optiune	
Masina: Masina experimentală IP81	Lungime OP:
Material LL: Silicat de sodiu	Latime OP:
Material OP: Otel aliat 15Cr08	Grosime OT:
Material OT:	
1 [Adauga]	
2 0L37	
3 Fonta cenusie	
4 Cu	
5 Am	
6 Otel moale	
7 [sters]	

Figura 5.57. Alegerea OT pentru optimizare

Obiectivul principal al acestei lucrări este determinarea condițiilor optime de debitare a materialelor care se pretează la prelucrarea prin EEC. În acest scop, meniul **Optimizare** (cu unica opțiune **1. Optimizare**, figura 5.4) permite alegerea condițiilor de lucru prin selectarea mașinii (condiție opțională, figura 5.54), LL (condiție opțională, figura 5.55), OP (figura 5.56) și OT (figura 5.57) și introducerea celorlalte informații necesare (figura 5.57, partea din dreapta a ferestrei). După terminarea selectării parametrilor de lucru, programul prezintă o selecție din baza de date cuprinzând informațiile despre experimentele similare (figura 5.58) și rezultatele procesului de optimizare (figura 5.59).

Trebuie menționat că dacă în baza de date nu se găsesc informații despre experimente similare, programul emite un mesaj de avertizare și optimizarea se încheie fără succes.

SELECȚIE EXPERIMENTE						
Materialop	Materialot	L1op	L2op	L1ot	Grosimeot	Masina
41	6	10	10	200	1,0	
41	6	10	10	200	1,0	
41	6	10	10	200	1,0	
41	6	10	10	200	1,0	
41	6	10	10	200	1,0	

Figura 5.58. Confirmarea datelor disponibile pentru optimizare

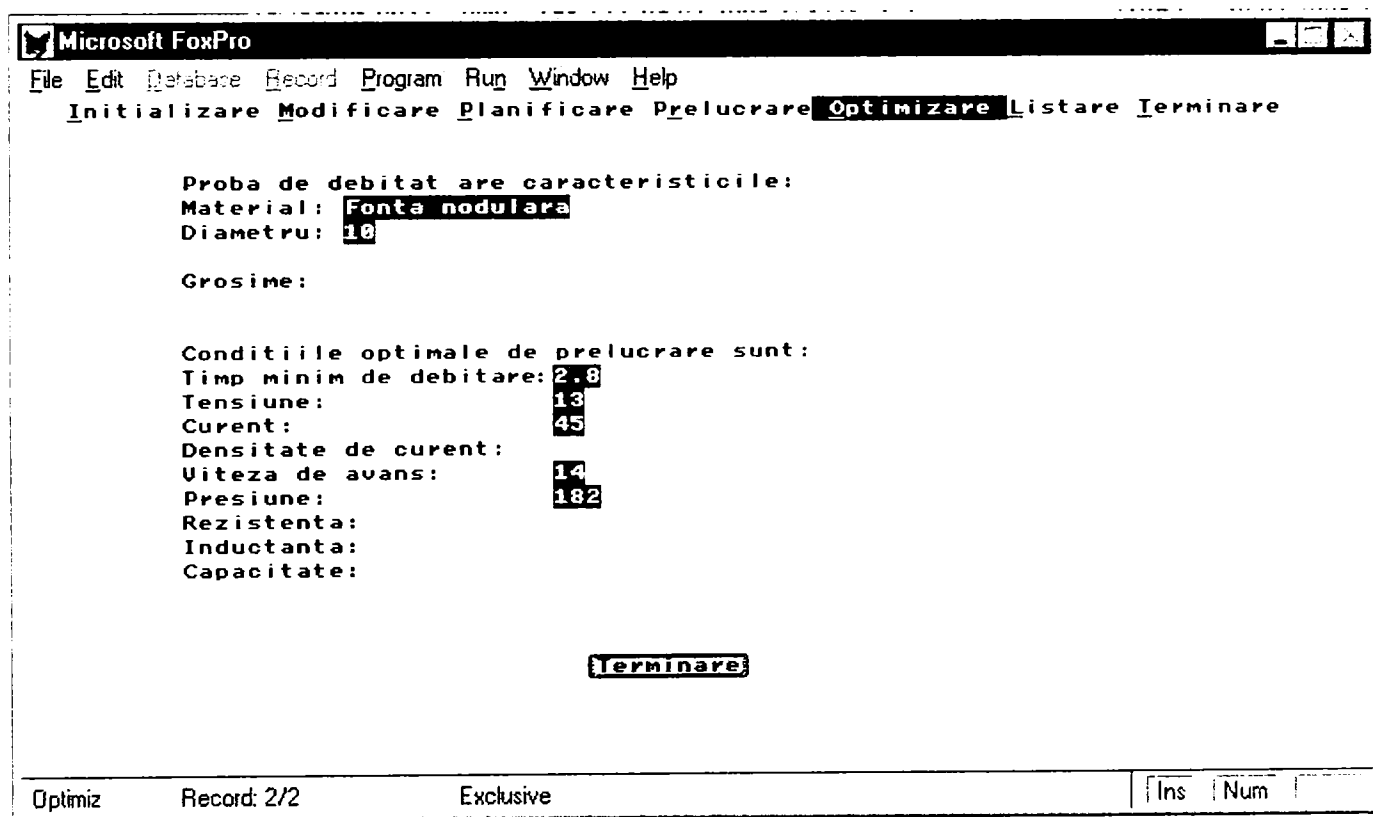


Figura 5.59. Rezultatul optimizării

Listare Terminare
1. Generala
2. Tot/masina
3. Tot/OP
4. Tot/OT
5.1/Masina
6.1/OP
7.1/OT
8.1/Experiment

Figura 5.60. Meniul Listare

Nr. crt	U [V]	I [A]	j [A/mm ²]	v _r [m/s]	p [daN/cm ²]	R [Ω]	L [mH]	C [μF]	Q [g/min]	t [s]
MASINA: LICHID DE LUCRU:										
OT: Diametru: 0 Grosime: 15 x 20										
OP: Otel rapid RP4 Dimensiuni: 2,000										
1	20,00	20,00				2,000			130,0000	0,000
2	20,00	30,00				2,000			213,0000	0,000
3	22,00	20,00						5000	141,0000	0,000
4	22,00	20,00						10000	150,0000	0,000
5	22,00	20,00					1,200		136,0000	0,000
6	22,00	20,00					10,850		133,0000	0,000
7	22,00	30,00						5000	256,0000	0,000
8	22,00	30,00						10000	276,0000	0,000
9	22,00	30,00					1,200		220,0000	0,000
10	22,00	30,00					10,850		211,0000	0,000
OT: OL37 Diametru: 0 Grosime: 0										
OP: Carbura metalica P20 Diametru: 0										
11	0,00	0,08	6,00						0,0650	0,000

Figura 5.61. Lista tuturor experimentelor

1721	15,00	35,00	223,00	17,00	31,80	0,800			6,5000	0,000
1722	18,00	25,00	159,00	14,00	6,40				7,0000	0,000
1723	20,00	20,00	127,00	17,00	6,40				11,0000	0,000
1724	24,00	16,00	102,00	14,00	3,40				9,2000	0,000
1725	26,00	12,00	73,00	17,00	3,25				10,0000	0,000

MASINA: MEC-75 LICHID DE LUCRU: NaClO3										
OT: Cu Dimensiuni: 0										
OP: Otel aliat 35Mn16 Dimensiuni: 0										
1726	0,00									0,000

MASINA: MEC-75 LICHID DE LUCRU: Silicat de sodiu										
OT: Dimensiuni: 0										
OP: Otel C120 Dimensiuni: 50										
1727	10,00	50,00								600,000
1728	10,00	75,00								540,000
1729	10,00	100,00								285,000
1730	15,00	75,00								445,000

Figura 5.62. Lista tuturor experimentelor grupate pe mașina de prelucrare

Meniul **Listare** (figura 5.60) este utilizat pentru a obține, pe ecran și în fișiere text, informații din baza de date.

Opțiunea **1. Generală** afișează lista tuturor informațiilor disponibile, grupate și sortate după mașina de prelucrare, LL, OT, OP (în această ordonare, figura 5.61). Lista se obține pe ecran și în fișierul **REZULTA1.TXT** din directorul de lucru.

Opțiunea **2. Tot/mașina** (figura 5.62) listează toate informațiile grupate pe tipuri de mașini de prelucrare, pe ecran și în fișierul **REZULTA2.TXT**.

Opțiunea **3. Tot/OP** (figura 5.63) grupează informațiile după materialul OP și le afișează pe ecran și în fișierul **REZULTA3.TXT**.

Informațiile similare grupate după materialul OT sunt obținute prin opțiunea 4. Tot/OT, pe ecran (figura 5.64) și în fișierul **REZULTA4.TXT**.

Preview									
|OT:		Diametru: 0 Grosime:							
| 48|	22,00|	100,00|	|	|	|	|	|	|	74,000

|OP:Otel aliat 34MoCrW15		Diametru: 20							
|MASINA:Masina experimentală IP81		LICHID DE LUCRU:Silicat de sodiu							
|OT:OL37		Diametru: 0 Grosime:1,0							
| 49|	15,50|	50,00|	|	|	|	|	|	0,4200|	70,000
| 50|	15,80|	30,00|	|	|	|	|	|	0,3500|	140,000
| 51|	22,50|	200,00|	|	|	|	|	|	2,2500|	13,000
| 52|	23,00|	150,00|	|	|	|	|	|	1,4500|	20,000
| 53|	23,50|	100,00|	|	|	|	|	|	0,7000|	35,000

|OP:Otel aliat 21MoMnCr12		Diametru: 24							
|MASINA:Masina experimentală IP81		LICHID DE LUCRU:Silicat de sodiu							
|OT:OL37		Diametru: 0 Grosime:1,0							
| 54|	25,00|	200,00|	|	|	|	|	|	0,047|	38,000
| 55|	26,00|	50,00|	|	|	|	|	|	0,188|	140,000
| 56|	26,00|	100,00|	|	|	|	|	|	0,141|	86,000

Done		More		Column: 0					

Figura 5.63. Lista tuturilor experimentelor grupate pe materialul OP

Preview									
|OP:Otel rapid RP3		Diametru: 0							
|684|	22,00|	50,00|	|	|	|	|	|	0,8200|	732,000
|685|	22,00|	75,00|	|	|	|	|	|	0,9900|	630,000
|686|	22,00|	100,00|	|	|	|	|	|	1,3000|	486,000
|687|	22,00|	125,00|	|	|	|	|	|	1,4800|	438,000
|688|	22,00|	150,00|	|	|	|	|	|	1,7200|	384,000
|MASINA:MEC-100		LICHID DE LUCRU:Silicat de sodiu							
|OP:Otel rapid RP3		Diametru: 0							
|689|	22,00|	50,00|	|	|	|	|	|	0,8700|	1272,000
|690|	22,00|	75,00|	|	|	|	|	|	1,0500|	1098,000
|691|	22,00|	100,00|	|	|	|	|	|	1,3700|	876,000

|692|	22,00|	125,00|	|	|	|	|	|	1,7300|	750,000
|693|	22,00|	150,00|	|	|	|	|	|	1,8500|	708,000

|OT:OL37		Diametru: 2 Grosime:							
|MASINA:MEC-100		LICHID DE LUCRU:Silicat de sodiu							
|OP:10TiCr180		Diametru: 45							
|694|	22,00|	120,00|	|	|	|	|	|	1081,4900|	150,000
|695|	22,00|	150,00|	|	|	|	|	|	1081,4900|	150,000

Done		More		Column: 0					

Figura 5.64. Lista tuturilor experimentelor grupate pe materialul OT

Selectati masina:

- 1 [Adauga]
- 2 MEC-75
- 3 Masina experimentală IP81
- 4 MEC-100
- 5 [sters]

Figura 5.65. Selectarea mașinii pentru listare

Nr. crt	U [V]	I [A]	j [A/mm ²]	U _r [m/s]	p [daN/cm ²]	R [O]	L [mH]	C [uF]	Q [g/min]	t [s]
MASINA: MEC-100						LICHID DE LUCRU: Silicat de sodiu				
Obiect de transfer:						Diametru: 0 Grosime:				
Obiect de prelucrat:										
Diametru: 0										
1	50,00								0,8200	0,000
2	75,00								0,9900	0,000
3	100,00								1,3000	0,000
4	125,00								1,4800	0,000
5	150,00								1,7400	0,000
6	50,00								0,8800	0,000

Figura 5.66. Lista experimentelor pentru o anumită mașină

Material OP:

1	[Adauga]
2	Otel aliat 15Cr08
3	Otel aliat 40Cr10
4	Otel aliat 35Mn16
5	Otel aliat 40BCr10

Figura 5.67. Selectarea materialului OP pentru listare

Nr. crt	U [V]	I [A]	j [A/mm ²]	U _r [m/s]	p [daN/cm ²]	R [O]	L [mH]	C [uF]	Q [g/min]	t [s]
OP: Otel aliat 40Cr10						Diametru: 35				
MASINA: Masina experimentală IP81						LICHID DE LUCRU: Silicat de sodiu				
OT: OL37						Diametru: 0 Grosime: 1,0				
1	17,00	100,00				0,188	8,500			630,000
2	19,00	100,00				0,188	8,500			480,000
3	30,00	100,00				0,188	8,500			220,000
4	37,00	100,00				0,188	8,500			350,000

Figura 5.68. Lista experimentelor pentru un anumit material al OP

Opțiunea **5. 1/Mașina** permite obținerea informațiilor despre prelucrarea cu o anumită mașină (selectată ca în figura 5.65), lista fiind afișată pe ecran (figura 5.64) și în fișierul **REZULTA5.TXT**.

Lista informațiilor despre un anumit material al OP se obține cu opțiunea **6. 1/OP** care necesită alegerea OP (figura 5.65) și listarea se face pe ecran (figura 5.66) și în fișierul **REZULTA6.TXT**.

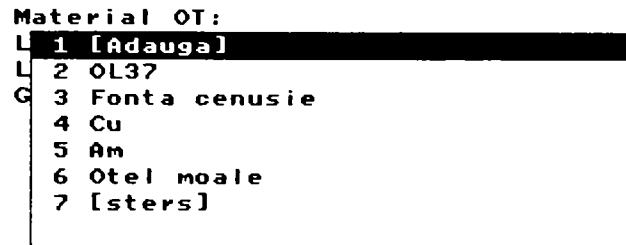


Figura 5.69. Selectarea materialului OT pentru listare

Nr.	U	I	j	U _r	p	R	L	C	Q	t
[crt]	[V]	[A]	[A/mm ²]	[m/s]	[daN/cm ²]	[O]	[mH]	[uF]	[g/min]	[s]
| OT:Cu										
| Diametru: 0 Grosime:										
| MASINA:										
| OP:Carbura metalica P20										
| Diametru: 0										
1	0,00		0,08	6,00					0,1192	0,000
2	0,00		0,08	10,00					0,1129	0,000
3	0,00		0,08	15,00					0,1269	0,000
4	0,00		0,08	20,00					0,1608	0,000
5	0,00		0,08	27,00					0,1555	0,000
6	0,00		0,15	6,00					0,2005	0,000
7	0,00		0,15	10,00					0,2066	0,000
8	0,00		0,15	15,00					0,2237	0,000
9	0,00		0,15	20,00					0,2744	0,000
10	0,00		0,15	27,00					0,2855	0,000
11	0,00		0,20	6,00					0,2635	0,000
12	0,00		0,20	10,00					0,2672	0,000
13	0,00		0,20	15,00					0,3042	0,000

Figura 5.70. Lista experimentelor pentru un anumit material al OT

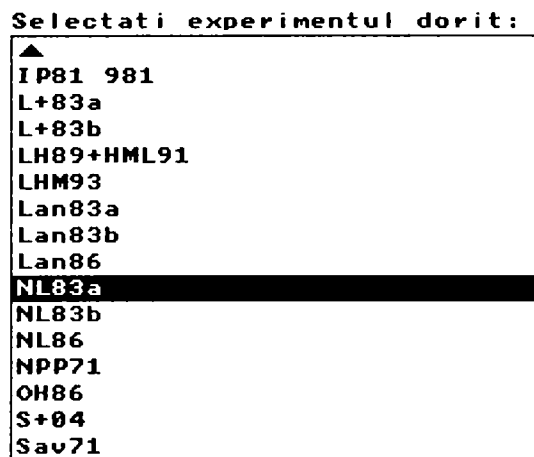


Figura 5.71. Selectarea experimentului pentru listare

Nr.	U	I	j	Ur	p	R	L	C	Q	t
[crt]	[V]	[A]	[A/mm ²]	[m/s]	[daN/cm ²]	[O]	[mH]	[uF]	[g/min]	[s]
MASINA: MEC-100						LICHID DE LUCRU: Silicat de sodiu				
OP: Otel aliat 41MoCr11						Diametru:	28			
OT:						Diametru:	0	Grosime:		74,000
1	22,00	100,00								
OP: 60Si15A						Diametru:	37			
OT:						Diametru:	0	Grosime:		79,000
2	22,00	100,00								
OP: 50RA						Diametru:	31			
OT:						Diametru:	0	Grosime:		95,000
3	22,00	100,00								
4	22,00	100,00								90,000
OP: OLC35						Diametru:	24			
OT:						Diametru:	0	Grosime:		60,000
5	22,00	100,00								
OP: 34MoCrNi15						Diametru:	32			
OT:						Diametru:	0	Grosime:		

Figura 5.72. Lista încercărilor pentru un anumit experiment

Aceeași listă dar pentru un anumit material al OT este disponibilă cu opțiunea **7. 1/OT** care după selectarea OT (figura 5.67) afișează situația pe ecran (figura 5.68) și în fișierul **REZULTA7.TXT**.

În fine, afișarea rezultatelor unui anumit experiment se face prin opțiunea **8. Experiment** care necesită indicarea experimentului (figura 5.71) după care lista este disponibilă pe ecran (figura 5.72) și în fișierul **REZULTA8.TXT**.

5.8. CONDUCEREA OFF-LINE/ON-LINE A PROCESULUI FOLOSIND SISTEMUL INFORMATIC

Pașii pe care utilizatorul îi parcurge pentru a folosi sistemul informatic de optimizare a prelucrării dimensionale prin EEC sunt următorii:

1. alege materialul care trebuie debitat (OP);
2. introduce materialul în sistemul informatic (meniul **Optimizare**);
3. dacă în baza de date există informații despre materialul OP, atunci sistemul execută o optimizare care presupune parcurgerea următoarelor etape:
 - se determină modelul matematic al dependenței parametrului (parametrilor) tehnologici de factorii de intrare care asigură o eroare minimă; dependența poate fi polinomială sau exponențială; modelul poate fi de o variabilă sau de două variabile;
 - se optimizează acest model pentru a determina valorile corespunzătoare ale factorilor de intrare;
4. valorile optime ale factorilor de intrare sunt obținute de sistem și oferite utilizatorului;
5. după cum sistemul informatic este sau nu legat la sistemul tehnologic de prelucrare, factorii optimi de intrare pot fi folosiți:
 - off-line**, prin comanda manuală sau automată a mașinii de debitat, folosind valorile optime;
 - on-line**, prin comanda direct de către calculator, printr-un dispozitiv de interfață, a mașinii de debitat.

La punctul 3 am presupus că în baza de date a sistemului informatic există informații despre debitarea OP dorit. Dacă aceste informații nu există, sistemul nu poate oferi soluții și este nevoie ca baza de date să fie completată cu astfel de date, prin parcurgerea următoarelor etape:

- planificarea unor experimente de obținere a datelor (meniul **Planificare**);
 - introducerea datelor experimentale în baza de date (meniul **Prelucrare** opțiunea **1. Culegere date**);
 - prelucrarea statistică a datelor experimentale pentru a determina omogenitatea lor (meniul **Prelucrare**, opțiunea **4. Prelucrare statistică**);
 - verificarea dependenței parametrilor tehnologici de factorii de intrare (meniul **Prelucrare**, opțiunile **5. Analiză dispersională monofactorială** respectiv **6. Analiză dispersională bifactorială**);
 - obținerea de modele matematice ale dependenței parametrilor tehnologici de factorii de intrare (meniul **Prelucrare**, opțiunile **7. Modelare monovariabilă** respectiv **8. Modelare multivariabilă**);
 - se verifică modelul matematic obținut anterior prin simulare (meniul **Prelucrare** opțiunile **9. Simulare monovariabilă** respectiv **A. Simulare multivariabilă**).
- Așadar, datele (optime) pe care sistemul informatic le calculează vor fi folosite pentru comanda mașinii de debitat, așa cum se va prezenta imediat.

5.8.1. Comanda off-line

Utilizatorul obține, așa cum am văzut la paragraful anterior, condițiile optime de prelucrare a OP dorit. Aceste condiții pot fi:

- privind tipul mașinii, LL și modul de spălare;
- privind materialul și grosimea OT;
- privind valorile U , I , j , v_r , R , L , C optime,

situația concretă a factorilor de intrare depinzând de volumul și complexitatea informațiilor existente în baza de date.

Dacă nu există o legătură între calculatorul pe care se rulează sistemul informatic de optimizare a prelucrării și mașina de debitare, atunci combinația factorilor optimi se folosește de către utilizator pentru a alege regimul de lucru al mașinii de debitat ceea ce va duce la obținerea parametrilor tehnologici doriți.

5.8.2. Comanda on-line

Dacă între calculatorul pe care se rulează sistemul informatic de optimizare a prelucrării și mașina de debitat există o legătură printr-o interfață, atunci sistemul informatic poate comanda direct utilajul tehnologic prin transmiterea pe canalul de legătură a condițiilor optime (U , I , j , v_r , etc.) prin intermediul cărora se poate realiza prelucrarea.

Pentru aceasta este necesar însă un canal informațional de legătură între calculator și mașina de debitat, care să asigure transferul datelor, adaptarea parametrilor electrică și interpretarea comenzilor.

Propunem pentru realizarea acestui canal un dispozitiv ca în figura următoare, care are următoarele funcțiuni:

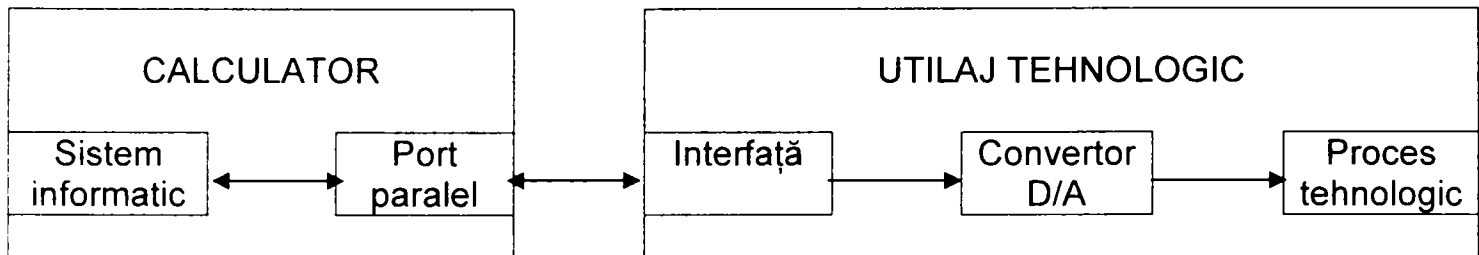


Figura 5.73. Comanda on-line a procesului tehnologic

- după obținerea valorilor optime ale conducerii, acestea sunt transmise, pe rând, de către sistemul informatic, spre un port paralel din configurația calculatorului;
- portul paralel este legat la o interfață a utilajului tehnologic, care are rolul de a interpreta semnalele sosite (U , I , j , v_r , etc.) și a determina valoarea parametrului respectiv;
- convertorul D/A transformă valorile digitale sosite de la calculator în valori analogice, de mărimea necesară conducerii procesului.

Portul paralel (figura 5.74 și respectiv 5.75 pentru conectorul paralel) este o componentă a calculatorului utilizată pentru intrarea/ieșirea datelor compus din 18 linii de semnal (4 de control, 5 de stare și 8 de date) și 8 împământări (tabelul 5.2). Transmisia este half-duplex (într-o singură direcție la un moment dat) deoarece există doar 8 linii de date. Adresele portului paralel sunt mapate în spațiul de intrare/ieșire al calculatorului.

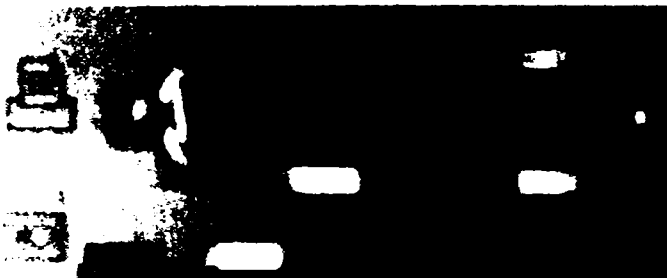


Figura 5.74. Portul paralel



Figura 5.75. Conectorul paralel

Utilizarea semnalelor, în comanda on-line propusă pentru mașina de debitat, pentru trimiterea valorilor lui U și I , se face în felul următor:

- sistemul informatic trimite către portul paralel un semnal pentru linia nSTROBE, de valoarea 1, ca indiciu că pe liniile de date se trimite valoarea U ;
- interfața de la mașina de debitat așteaptă ca semnalul nSTROBE să devină 1 apoi citește liniile de date, obține valoarea U pe care o trimite spre convertor;
- confirmarea citirii valorii lui U se face de către interfață prin punerea semnalului nACK pe valoarea 1;
- sistemul informatic așteaptă ca semnalul nACK să devină 1 (indicând că datele au fost recepționate) și trimite către portul paralel un semnal pentru linia nAUTOFEED, de valoarea 1, ca indiciu că pe liniile de date se trimite valoarea I ;
- interfața de la mașina de debitat așteaptă ca semnalul nAUTOFEED să devină 1 apoi citește liniile de date, obține valoarea I pe care o trimite spre convertor;

- confirmarea citirii valorii lui 1 se face de către interfață prin punerea semnalului nACK pe valoarea 1;
- sistemul informatic așteaptă ca semnalul nACK să devină 1 (indicând că datele au fost recepționate) indicând sfârșitul ciclului de comandă on-line.

Tabelul 5.3. Semnalele portului paralel (în situația standard a legării unei imprimante)

Grupul	Semnalul	Intrare/ieșire	Explicație
Control	nSTROBE	ieșire	Datele se află pe liniile de date
	nAUTOFEED	ieșire	Imprimanta să insereze un LF la fiecare CR
	nSELECTIN	ieșire	Imprimanta este selectată
	nINIT	ieșire	Reset imprimantă
Stare	nACK	Intrare	Ultimul caracter a fost recepționat
	BUSY	Intrare	Imprimanta este ocupată și nu poate primi date
	PE	Intrare	Lipsă hârtie
	SELECT	Intrare	Imprimanta este on-line
	nERROR	Intrare	Eroare
	Date	DATA	ieșire	8 linii de date

Prin utilizarea acestui sistem de comandă on-line, sistemul informatic poate asigura valorile parametrilor de lucru direct către utilajul tehnologic, ceea ce poate constitui un element de facilitare a lucrului la mașină și de îndepărtare a operatorului uman de condițiile nocive de muncă datorate prezenței LL.

5.8.3. Reglarea automată a funcționării mașinii de debitat

În cele ce urmează este prezentat un sistem de reglare automată a avansului ([B+85, DP78, D+04, Her95, SMC98, TIS99]) pentru o mașină de debitat prin EEC care utilizează un microcalculator ce rulează un model matematic de introducere a corecțiilor necesare pentru reglarea automată a avansului funcție de tensiunea electrică pe SL.

Sistemul este complet automatizat și folosește ca date de pornire condițiile optime de prelucrare obținute de la sistemul informatic prezentat în paragraful anterior. Reglarea se face prin măsurarea U_s și compararea ei cu valoarea de referință U_{ref} . Întrucât valorile acestor mărimi, utilizate în cadrul procesului tehnologic, nu sunt compatibile cu cele folosite în calculator, sunt utilizate două convertoare ce transformă semnalul electric analogic în numeric (la ieșirea din proces) respectiv din semnal numeric în analogic (pentru comanda elementelor de execuție).

Intrarea și respectiv ieșirea datelor numerice în/din calculator se face prin interfața paralelă de tip LPT, prezentată la paragraful anterior.

Principial, modul de lucru al SRA prezentat în acest paragraf este următorul (figura 5.76):

- procesul tehnologic este cel de debitare care impune prezența simultană a OP, OT și LL în SL;
- OP este atașat pe mașina de prelucrare folosind o menghină MB care asigură fixarea sa și cuplarea la polul pozitiv al sursei de alimentare;
- accesul LL în SL este asigurat de un sistem compus din rezervorul Rz și pompa de alimentare P;

- rotirea OT cu viteza (turația) stabilă se realizează prin intermediul mecanismului RM care primește mișcarea de la motorul M2;
- deplasarea OT cu viteza de avans v_e se realizează prin intermediul mecanismului MSP, comandat de motorul M1. Acest motor este la rândul său comandat de către un dispozitiv de comandă DC ce primește de la calculator semnalul de corecție necesar;
- calculatorul culege din SL o mărime electrică și anume U_s pe care prin elementul de măsură EM îl aplică unui convertor A/N apoi interfeței paralele pentru a fi introdusă în sistemul informatic de conducere automată;
- valoarea (numerică) a tensiunii este comparată cu tensiunea U_{ref} (evident, și aceasta transformată numeric) și în urma prelucrării de către elementul comparator – care aici este o parte a programelor sistemului informatic – rezultă o valoare numerică a corecției de tensiune;
- calculatorul transmite prin portul paralel valoarea corecției de tensiune la convertorul N/A care o aplică motorului M1 ce comandă avansul OT.

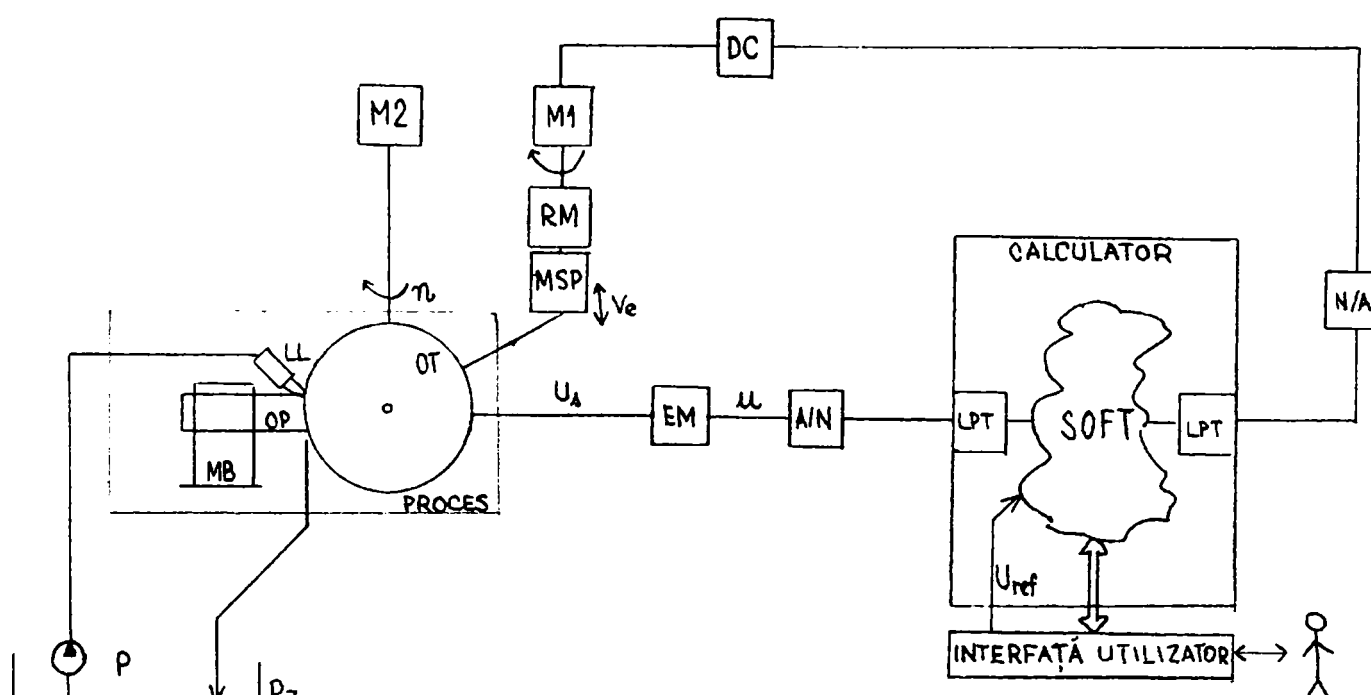


Figura 5.76. Sistem de reglare automată a avansului la debitarea prin EEC

Printre avantajele acestei metode de conducere automată a procesului de debitare prin EEC se pot enumera:

- utilizarea calculatorului și a sistemului informatic prezentat în lucrare permite alegerea regimului optim de prelucrare și funcționarea mașinii de debitat chiar fără acțiunea operatorului uman;
- fiabilitatea întregului ansamblu este strâns legată de cea a calculatorului, care este foarte mare; dacă dispozitivul este implementat și funcționează într-un regim intens, soluțiile constructive de dublare a componentelor mai puțin fiabile din arhitectura sistemului de calcul fac ca fiabilitatea să rămână ridicată.

Verificarea modului în care acest sistem răspunde cerințelor impuse pentru mașinile de prelucrare prin EEC și în special stabilitatea sa se face prin intermediul funcției de transfer a sistemului ([DM85, DP78, Her95, L+96, MG01, ML00, MHL91, MLG00,

MLG01]), definită de funcțiile de transfer ale elementelor componente și de modalitatea acestora de legare în serie sau paralel.

Funcțiile de transfer ale elementelor ce compun SRA sunt:

- pentru procesul P: s-a determinat experimental ([Her95]) că dependența $U_{med}=f(l)$, în intervalul optim de prelucrare (determinat software cum s-a prezentat la paragraful anterior) este de forma:

$$Y_p(s) = K_p = 0,45 \text{ m/s} \quad (5.188)$$

- pentru elementul de măsurare EM: s-a determinat ([Her95]) că, întrucât elementul de măsurare este unul simplu de tip rezistiv, funcția sa de transfer este :

$$Y_{EM}(s) = K_{EM} = 0,3 \text{ V/V} \quad (5.189)$$

- pentru convertoarele A/N și N/A precum și componentele calculatorului utilizate pentru introducerea/extragerea și prelucrarea datelor, se poate considera că acestea nu influențează funcția de transfer ;
- pentru dispozitivul de comandă DC, acesta este de tip proporțional cu funcția de transfer :

$$Y_{DC}(s) = K_{DC} = 10 \text{ V/V} \quad (5.190)$$

- pentru elementul de execuție care este un motor de curent continuu M1, funcția de transfer este:

$$Y_{EE}(s) = \frac{1}{K_e \cdot (T_m \cdot s + 1) \cdot (T \cdot s + 1)} = \frac{K_{EE}}{(T_m \cdot s + 1) \cdot (T \cdot s + 1)} \quad (5.191)$$

formulă în care K_e este constanta electrică determinată din relația:

$$K_e = \frac{U_n - I_n \cdot R_r}{n_n} = 0,01504 \text{ V/(rot} \cdot \text{min)} \quad (5.192)$$

relație în care U_n , I_n și n_n sunt valorile nominale ale tensiunii, curentului și rotației motorului iar R_r este rezistența rotorică; T este constanta de timp electrică a indusului:

$$T = \frac{L}{R} = 0,04196 \text{ s} \quad (5.193)$$

unde L și R sunt inductanța respectiv rezistența indusului și a bobinei de filtrare; în fine, T_m este constanta de timp electromecanică a motorului definită prin:

$$T_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R}{C_e \cdot C_m} = 0,0038 \text{ s} \quad (5.194)$$

formulă în care GD^2 este momentul de inerție, R este rezistența totală a circuitului rotoric, C_e este factorul tensiunii contraelectromotoare la mersul în gol și are valoarea $C_e = U_n/v =$

0,146 V/rot/min, C_m este factorul cuplului de rotație a motorului cu valoarea $C_m = M_m/I_m = 0,072 \text{ daN}\cdot\text{m/A}$.

- pentru reductorul melcat RM, acesta are funcția de transfer:

$$Y_{RM} = K_{RM} = \frac{1}{i} = 1/40 \quad (5.195)$$

în care i este raportul de transmisie;

- funcția de transfer a MSP este :

$$Y_{MSP} = K_{MSP} = p = 4 \text{ mm} \quad (5.196)$$

unde p este pasul șurubului.

Reunind toate aceste funcții de transfer, având în vedere că toate componentele sunt conectate în serie și că pentru analiza stabilității dinamice a SRA se poate folosi funcția de transfer a buclei de reglare, funcția de transfer a întregului mecanism este dată de produsul funcțiilor (5.188) – (5.196):

$$Y_d(s) = Y_p(s) \cdot Y_{EM}(s) \cdot Y_{DC}(s) \cdot Y_{EE}(s) \cdot Y_{RM}(s) \cdot Y_{MSP}(s) \quad (5.197)$$

adică, după înlocuirea expresiilor din funcțiile de mai sus :

$$Y_d(s) = \frac{K_p \cdot K_{EM} \cdot K_{DC} \cdot K_{EE} \cdot K_{RM} \cdot K_{MSP}}{(T_m \cdot s + 1) \cdot (T \cdot s + 1)} \quad (5.198)$$

unde valorile (constante) de la numărător pot fi reunite ca o singură constantă K :

$$K = K_p \cdot K_{EM} \cdot K_{DC} \cdot K_{EE} \cdot K_{RM} \cdot K_{MSP} \quad (5.199)$$

Urmează verificarea stabilității sistemului deschis care se poate face de către calculator cu ajutorul criteriului grafic Nyquist. Aceasta înseamnă că, în formula (5.199), se face înlocuirea variabilei complexe $s = \sqrt{-1}$ cu variabila frecvențială $j\omega$ (unde ω este frecvența de lucru) și atunci formula (5.198) se rescrie ca:

$$Y_d(j\omega) = \frac{K}{(T_m \cdot j\omega + 1) \cdot (T \cdot j\omega + 1)} \quad (5.200)$$

de unde, separând partea reală de cea imaginară, se obține:

$$Y_d(j\omega) = \frac{K \cdot (1 - T \cdot T_m \cdot \omega^2)}{(1 - T \cdot T_m \cdot \omega^2)^2 + \omega^2 \cdot (T + T_m)^2} - j \cdot \frac{K \cdot \omega \cdot (T + T_m)}{(1 - T \cdot T_m \cdot \omega^2)^2 + \omega^2 \cdot (T + T_m)^2} \quad (5.201)$$

ceea ce înseamnă, de fapt, un număr complex de forma:

$$Y_d(j\omega) = R(\omega) + j \cdot Q(\omega) \quad (5.202)$$

în care am făcut notațiile:

$$R(\omega) = \frac{K \cdot (1 - T \cdot T_m \cdot \omega^2)}{N(\omega)} \quad (5.203)$$

$$Q(\omega) = \frac{-K \cdot \omega \cdot (T + T_m)}{N(\omega)} \quad (5.204)$$

$$N(\omega) = (1 - T \cdot T_m \cdot \omega^2)^2 + \omega^2 \cdot (T + T_m)^2 \quad (5.205)$$

Metoda lui Nyquist face o reprezentare în planul complex a valorilor lui Y_d (de fapt, a valorilor lui R și Q) pentru diferite valori ale lui ω și interpretează apoi graficul astfel obținut pentru a determina dacă sistemul este dinamic stabil sau nu.

Programul care generează perechile de puncte (R , Q) este:

```

program nyquist;
uses crt;
var i, omega: integer;
    k, t, tm, n, r, q: real;
    fis: text;
begin
  clrscr;
  k:=8.9761;
  t:=0.04196;
  tm:=0.0038;
  writeln('omega      real      imaginar ');
  writeln('-----');
  assign(fis, 'nyquist.txt'); rewrite(fis);
  writeln(fis, 'omega      real      imaginar ');
  writeln(fis, '-----');
  for i:=0 to 50 do
    begin
      omega:=10*i;
      n:=sqrt(1-t*tm*omega*omega)+omega*omega*sqrt(t+tm);
      r:=k*(1-t*tm*omega*omega)/n;
      q:=-k*omega*(t+tm)/n;
      writeln(omega:5, r:11:5, q:11:5);
      writeln(fis, omega:5, r:11:5, q:11:5);
    end;
  close(fis);
  readln;
end.

```

iar rezultatele executării acestui program, pentru ω între 0 și 500, sunt prezentate în tabelul 5.4 prin preluare directă din fișierul cu rezultate.

Reprezentarea grafică a acestor puncte poartă numele de **hodograful lui Nyquist** și el este folosit pentru a determina dacă SRA în discuție are sau nu o comportare dinamică stabilă: dacă înconjoară punctul critic $(-1, 0j)$ nu este stabil, altfel sistemul este stabil. Analizând figura 5.77 se poate observa că graficul nu înconjoară punctul sus-amintit, deci, concluzionând, un astfel de SRA are stabilitate dinamică și deci poate fi folosit la conducerea procesului de debitare prin EEC.

Tabelul 5.4. Valorile părților reală și imaginară la studiul stabilității SRA

ω	$R(\omega)$	$Q(\omega)$	ω	$R(\omega)$	$Q(\omega)$
0	8.97610	0.00000	250	-1.08717	-1.38723
10	7.49980	-3.48751	260	-0.87823	-1.06853
20	4.90264	-4.79256	270	-0.74335	-0.86450
30	2.93641	-4.70650	280	-0.64843	-0.72240
40	1.71211	-4.20716	290	-0.57754	-0.61760
50	0.96452	-3.66960	300	-0.52225	-0.53702
60	0.49531	-3.19242	310	-0.47767	-0.47309
70	0.19044	-2.78923	320	-0.78666	-0.75154
80	-0.01371	-2.45187	330	-0.66358	-0.61236
90	-0.15351	-2.16864	340	-0.57636	-0.51441
100	-0.25060	-1.92900	350	-0.51106	-0.44166
110	-0.31838	-1.72446	360	-0.46013	-0.38547
120	-0.36545	-1.54838	370	-0.41916	-0.34073
130	-0.39758	-1.39563	380	-0.38538	-0.30427
140	-0.41871	-1.26222	390	-0.35696	-0.27398
150	-0.43164	-1.14499	400	-0.33266	-0.24841
160	-0.43838	-1.04145	410	-0.38213	-0.27785
170	-0.44042	-0.94959	420	-0.35109	-0.24874
180	-0.43891	-0.86776	430	-0.32497	-0.22451
190	1.09413	2.00014	440	-0.30265	-0.20401
200	1.96632	3.34623	450	-0.28331	-0.18646
210	6.36529	10.14115	460	-0.26637	-0.17126
220	-6.52579	-9.78021	470	-0.25137	-0.15798
230	-2.31586	-3.27836	480	-0.26496	-0.16285
240	-1.45864	-1.95736	490	-0.24902	-0.14976
			500	-0.23493	-0.13831

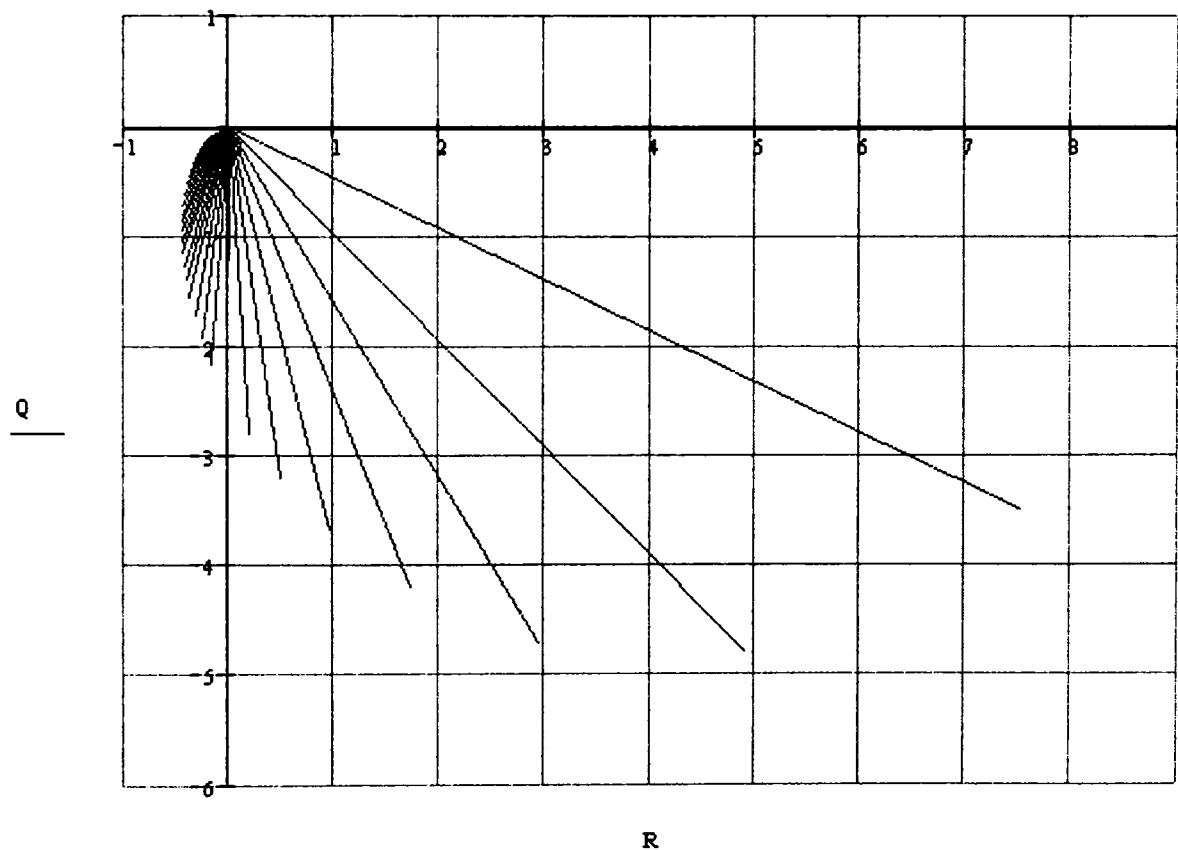


Figura 5.77. Hodograful lui Nyquist

CONCLUZII

În condițiile în care elaborarea și utilizarea materialelor cu caracteristici mecanice și termice superioare este tot mai frecventă, creșterea aplicabilității și a ariei de răspândire a tehnologiilor neconvenționale, în general, și a prelucrării prin EEC, în special, a devenit o strictă necesitate.

Prin elaborarea acestei teze, autorul și-a propus să aducă o contribuție la creșterea performanțelor mașinilor de prelucrare prin EEC, prin elaborarea unui sistem informatic de determinare a condițiilor optime de lucru.

Finalitatea urmărită a fost identificarea combinației de parametri de intrare (U , I , j , p , v_r , etc.) care să permită utilizatorului să obțină un timp optim de prelucrare și/sau o calitate optimă a suprafeței prelucrate, la debitarea prin EEC.

Prin aceasta, lucrarea contribuie la creșterea caracteristicilor tehnice și economice ale prelucrării prin EEC, la obținerea de rezultate economice mai bune și astfel la adaptarea acestei tehnologii neconvenționale la condițiile concurențiale existente în prezent și care se vor accentua pe zi ce trece.

Se remarcă următoarele concluzii generale rezultate din studiul documentației existente:

- mașinile de prelucrare prin EEC aflate în România la această dată sunt reduse atât din punct de vedere numeric cât și ca tip de operații pe care le execută;
- diversificarea producției, creșterea ponderii materialelor cu calități deosebite sau a produselor de tip special au produs mutații în organizarea producției, ceea ce a permis un avânt al cercetărilor teoretice și aplicațiilor practice ale tehnologiilor neconvenționale;
- modernizarea mașinilor existente, integral sau la anumite părți componente, adaptarea unor sisteme automate poate fi de cele mai multe ori o soluție eficientă;
- utilizarea sistemelor de calcul pentru îmbunătățirea performanțelor mașinilor constituie de cele mai multe ori o soluție mult mai ieftină decât achiziționarea unor mașini cu sisteme automate integrate.

În atingerea scopului urmărit la definirea temei lucrării, se evidențiază următoarele contribuții originale ale autorului:

A. Contribuții în domeniul teoretic

- identificarea posibilităților de caracterizare în timp real a procesului de prelucrare prin EEC, aceasta fiind făcută prin intermediul parametrilor de stare;
- reunirea într-o singură schemă (figura 2.22) a interdependențelor tuturor factorilor de influență;
- modelarea matematică a procesului de EEC prin metoda experimentului activ, utilizând pentru aceasta un algoritm de calcul implementat în limbajul FoxPro;
- stabilirea expresiilor unor caracteristici de eficiență a prelucrării (productivitatea debitării, timp de debitare, rugozitatea suprafeței) pentru caracterizarea calității procesului de debitare;
- realizarea unui studiu asupra formei optime a funcțiilor care descriu dependența caracteristicilor de eficiență de parametri de intrare;

- realizarea unui studiu pentru adaptarea algoritmilor de interpolare în vederea stabilirii concordanței între forma teoretică a funcției și cea experimentală;
- stabilirea unor metode algoritmice de determinare a optimului caracteristicilor de eficiență a prelucrării de fiecare parametru de intrare în vederea stabilirii condițiilor optime de debitare;
- realizarea unui studiu privind optimizarea caracteristicilor de eficiență în funcție de mai mulți parametri de intrare folosind programarea matematică;
- elaborarea structurii unei baze de date care să conțină rezultatele experimentale privind prelucrarea prin EEC;
- proiectarea unei scheme de principiu a SRA pentru mașina de debitat prin EEC și verificarea stabilității dinamice a acestuia folosind hodograful lui Nyquist.

B. Contribuții în domeniul experimental

- executarea unor experimente factoriale pentru determinarea dependențelor caracteristicilor de eficiență a debitării prin EEC de parametri de intrare;
- reunirea rezultatelor experimentale proprii și a celor efectuate de specialiști și prezentate în lucrări comunicate și/sau publicate într-o bază de date;
- implementarea modelelor matematice ale funcțiilor de dependență a caracteristicilor de eficiență de parametri de intrare;
- verificarea experimentală a modelelor matematice implementate;
- implementarea algoritmilor de optimizare a funcțiilor de dependență a caracteristicilor de eficiență de parametri de intrare;
- verificarea experimentală a algoritmilor de optimizare;
- elaborarea unui sistem informatic care conține baza de date a rezultatelor experimentale care poate fi ușor actualizat cu noi date;
- elaborarea unui sistem informatic care permite obținerea de informații despre prelucrarea dorită funcție de un criteriu de clasificare: după mașina de prelucrare, după materialul, forma și dimensiunile OP sau OT, după materialul sau modul de folosire a LL etc.;
- elaborarea unui sistem informatic ce conține algoritmii de stabilire automată a modelelor matematice și a algoritmilor de optimizare pentru orice set de experiențe aflate în baza de date;
- calculul comparativ al rezultatelor prelucrării prin debitare clasică și debitare prin EEC;
- calculul economic al procesului de debitare prin EEC.

C. Contribuții în domeniul aplicativ-tehnologic

- conceperea și implementarea unei baze de date de cunoștințe privind prelucrarea prin EEC cuprinzând rezultatele experimentale obținute până în prezent;
- reunirea în baza de date a circa 1.300 informații despre prelucrarea a 50 materiale care se pretează la prelucrarea prin EEC (oțeluri aliate, inoxidabile, carburi, fonte etc);
- stabilirea unei modalități simple de actualizare a bazei de date de cunoștințe;
- elaborarea unui algoritm automat de determinare a condițiilor optime de debitare a unui material, de caracteristici fizico-chimice și mecanice cunoscute, în condițiile existenței de informații despre materialul respectiv în baza de date;

- elaborarea unor metode de extrapolare a informațiilor din baza de date pentru prelucrarea unui material despre care informațiile cunoscute sunt incomplete;
- posibilitatea de extindere a modelelor matematice și pentru determinarea altor parametri, în condițiile existenței de informații în baza de date.

În final, se poate concluziona că cercetările efectuate în cadrul tezei au condus la mai buna cunoaștere a fenomenului de EEC și a debitării prin acest procedeu, în vederea obținerii unei productivități și calități optime pentru condițiile concrete în care are loc prelucrarea.

Se apreciază că rezultatele obținute pot fi îmbunătățite prin următoarele măsuri:

- elaborarea modelelor matematice folosind cele mai noi aplicații ale matematicilor aplicate, inteligența artificială, rețelele neuronale, programarea orientată pe obiecte etc. ([KL04, LK04, SB02, SB04]);
- utilizarea unui sistem de comandă a utilajului de prelucrare prin EEC care să primească rezultatele de la sistemul informatic de optimizare a caracteristicilor de eficiență;
- extinderea modelelor matematice și a bazei de date și la alte operații de prelucrare prin EEC și chiar la alte metode de prelucrare neconvențională.

BIBLIOGRAFIE

- [Ana91] *Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică*, Oradea, 1991
- [Ana92] *Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini*, Oradea, 1992
- [Ana93] *Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini*, Oradea, 1993
- [And97] **Andrei, Gabriel**, *Metode numerice și algoritmi de modelare*, Editura Evrika, 1997
- [A+97] **Alexandru, Ioan et all.**, *Alegerea și utilizarea materialelor metalice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1997
- [Bag97] **Bagiu, Lucian**, *Toleranțe, statistică și metrologie în construcția de mașini*, Editura Helicon, Timișoara, 1997
- [Bul00] **Bulea, Horațiu**, *Modelarea matematică a influenței parametrilor regimului de așchiere asupra rugozității suprafeței la rectificarea cilindrică exterioară cu discuri diamantate a ceramicii din oxid de aluminiu*, Sesiunea de comunicări științifice a Universității "Petru Maior", volumul 4, Târgu-Mureș, 2000
- [Bul03] *Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică*, Tomul 48 (62), Fascicola 1, Timișoara, 2003
- [Bul90] *Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică*, Tomul 35 (49), Fascicola 1-2, Timișoara, ianuarie-decembrie 1990
- [Bul91] *Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică*, Tomul 36 (50), Fascicola 1-2, Timișoara, ianuarie-decembrie 1991
- [Bul93a] *Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică*, Tomul 38 (52), Fascicola 1-2, Timișoara, ianuarie-decembrie 1993
- [Bul93b] *Buletinul Primului Colocviu Național Tehnic Interdisciplinar*, Brăila, 22-24 aprilie 1993
- [BC98a] **Botiș, Mihaela, Cicală, Eugen**, *Aplicarea analizei dispersionale în vederea stabilirii dependențelor funcționale ale productivității și vitezei de prelucrare de intensitatea curentului*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [BC98b] **Botiș, Mihaela, Cicală, Eugen**, *Studiul influenței mediului de lucru asupra productivității la prelucrările prin eroziune electrică complexă prin metoda analizei dispersionale*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Editura Augusta, Timișoara 1998
- [BD73] **Botez, Emil, Dorin, Alexandru**, *Tehnologia programării numerice a mașinilor-unelte*, Editura Tehnică, București, 1973
- [BCH93] **Botea, Traian, Cicală, Eugen, Herman, Richard**, *Model matematic al duratei debitării prin eroziune complexă, obținut prin experiment factorial de ordinul I*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [B+85] **Babuția, Ioan, Dragomir, Toma-Leonida, Mureșan, Ioan, Proștean, Octavian**, *Conducerea automată a proceselor*, Editura Facla, Timișoara, 1985
- [B+86a] **Bagiu, Lucian, et all.**, *Influența ZIT a unor oțeluri debitate prin rupere de contact și eroziune electrică complexă asupra posibilităților de prelucrare prin așchiere*, Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrare la cald. Vol. II. Tehnologii și utilaje pentru deformări plastice și tratamente termice,

- lucrări prezentate la sesiunea tehnico-științifică organizată de Universitatea din Brașov, 27-28 februarie 1986
- [B+86b] **Bagiu, Lucian et all.**, *Influența procedurii de debitare prin eroziune asupra modificărilor structurale a unor oțeluri de calitate*, Conferința de tratamente termice-comunicări, Târgu Mureș, 24-25 aprilie 1986
- [Cal81] **Călinescu, Valentin**, *Tehnologii neconvenționale*, Institutul Național de Informare și Documentare, București, 1981
- [Cic99] **Cicală, Eugen-Florin**, *Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale*, Editura Politehnica, Timișoara, 1999
- [Com86] *Comunicările celei de-a V-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece*, vol. III, Timișoara, 20-21 noiembrie 1986
- [Com89] *Comunicările celei de-a VI-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece*, vol. II, Timișoara, 5-6 mai 1989
- [Com93] *Comunicări științifice prezentate la sesiunea tehnico-științifică. Secția IV*, Reșița, 22-23 octombrie 1993
- [Con86] *Conferința de tratamente termice-comunicări*, Târgu Mureș, 24-25 aprilie 1986
- [CU79] **Ciocîrdia, C., Ungureanu, I.**, *Bazele cercetării experimentale în tehnologia construcțiilor de mașini*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979
- [CCB93] **Ciobanu, Mircea, Cozmîncă, Mircea, Blaj, Francisc**, *Aspecte ale optimizării procesului de finisare magneto-abrazivă*, Tehnomus VII. Tehnologii și produse noi în construcția de mașini. Secția IV. Tehnologii și utilaje pentru prelucrări neconvenționale, Suceava, 1993
- [CEB86] **Craiu, Virgil, Enache, Radu, Bâscă, Octavian**, *Teste de concordanță cu programe în Fortran*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986
- [CMS98] **Crainic, Nicolae, Mnerie, Dumitru, Slavici, Titus**, *Aspecte privind tendințele de modelare a procesului de solidificare prin intermediul tehnicii de calcul*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1998, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [CNT83] *CNTN'83. A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale*, Timișoara 3-5 noiembrie 1983, Intreprinderea Poligrafică Banatul, Timișoara, 1984
- [CNT89] *CNTN'89. A V-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale în prelucrarea materialelor*, Timișoara 6-7 octombrie 1989, Intreprinderea Poligrafică Banatul, Timișoara, 1989
- [CNT93] *CNTN'93. A VI-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale*, Timișoara 28-29 octombrie 1993, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1993
- [Dra71] **Drăghici, Gherman**, *Bazele teoretice ale proiectării proceselor tehnologice în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1971
- [Dra93] **Drăghici, George**, *Usinaje par electro-erosion*, 1993
- [DD95] **Dima, Gabriel și Mihai**, *FoxPro 2.6 sub Windows*, Editura Teora, București, 1995
- [DM85] **Dragomir, Toma-Leonida, Mureșan, Antoniu**, *Bazele tehnicii reglării automate*, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1985
- [DP78] **Dragomir, Toma-Leonida, Preitl, Ștefan**, *Teoria sistemelor și reglării automate*, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1978
- [D+04] **Dumitrescu Ion, Breaz, Radu, Pricop, Nadia, Țițu, Mihail**, *Possibilities of Using of Automatic System of Action in the Processing by Electric Erosion With Contact Breaking*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2004, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [D+97] **Dogaru, Octavian, Fortiș, Florin, Pau, Petru, Popa, Horia**, *MathCAD*, Editura Mirton, Timișoara, 1997

- [Efi98] *Eficiența tehnologiilor neconvenționale*, Conferință internațională, Timișoara 22-23 mai 1997, volumul I, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [Flo78] **Florescu, Ion**, *Progrese în tehnologia procedeelor neconvenționale de prelucrare a metalelor*, Institutul Național de Informare și Documentare, București, 1978
- [Flo98] **Floriganță, Gheorghe**, *Utilaje și tehnologii neconvenționale*, Reprografia Universității din Craiova, 1998
- [Ghe95] **Gherghel, Nicolae**, *Optimizarea sistemică a tehnologiilor neconvenționale de prelucrare a metalelor*, Tehnologii neconvenționale la sfârșit de mileniu, Simpozion, Timișoara, 25-26 mai 1995
- [Gro01] **Groza, Ioan-Vasile**, *Prelucrări cu medii abrazive magneto-reologice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2001
- [GM76] **Gavrilaș, Ionel, Marinescu, Niculae-Ion**, *Prelucrarea prin electroeroziune și electrochimic-abrazivă*, vol. I-II, Editura Tehnică, București, 1976
- [GM91] **Gavrilaș, Ionel, Marinescu, Niculae-Ion**, *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini*, vol. I, Editura Tehnică, București, 1991
- [GR93] **Gârlașu, Ștefan, Ruja, Ioan**, *Teoria sistemelor și automatizări*, Universitatea „Eftimie Murgu”, Reșița, 1993
- [GV52] **Gutkin, B.G., Vișnițki, A.L.**, *Regulatoarele regimului de funcționare a mașinilor de prelucrare cu scânteii electrice și anodo-mecanice (traducere din limba rusă)*, Institutul de Documentare Tehnică, București, 1952
- [Her03] **Herman, Mihaela**, *Considerations on the Energy Introduced in the Work Space at the Complex Electrical Erosion Processing*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2003, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Her70] **Herșcovici, Paul**, *Materiale dure*, Editura Tehnică, București, 1970
- [Her89] **Herman, Richard**, *Cap de lucru pentru realizarea fantelor longitudinale în conducte prin eroziune electrică complexă*, TEHNIC 2000. Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret, Timișoara 5-6 mai 1989
- [Her92] **Herman, Richard-Ioan-Emil**, *Utilaje și tehnologii pentru prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Referat nr. 3, Universitatea Tehnică Timișoara, 1992
- [Her93a] **Herman, Richard**, *Considerații asupra domeniilor de utilizare și a tehnologiilor de fabricație a pieselor cu fante în industrie*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [Her93b] **Herman, Richard**, *Influența principalilor parametri reglabili asupra vitezei de avans la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [Her95] **Herman, Richard-Ioan-Emil**, *Contribuții la optimizarea realizării fantelor prin eroziune electrică complexă*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1995
- [Her96] **Herman, Richard-Ioan-Emil**, *Model matematic referitor la lățimea fantei la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, TMCM'96. Tehnologii moderne în construcția de mașini. Secțiunea III: Tehnologii neconvenționale, Conferința internațională de comunicări științifice, Iași, 24-25 mai 1996
- [Her98] **Herman, Richard-Ioan-Emil**, *Prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [Her99a] **Herman, Mihaela**, *Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică complexă*, Referat nr. 1, Universitatea Tehnică Timișoara, 1999
- [Her99b] **Herman, Mihaela**, *Caracteristicile tehnologice și parametrii specifici la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Tehnologii neconvenționale aplicate, Editura Augusta, Timișoara, 1999

- [Her99c] **Herman, Mihaela**, *Considerații asupra influenței câmpului termic la debitarea prin eroziune electrică complexă*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [HF93a] **Herman, Richard, Fleșer, Traian**, *Posibilități de realizare a fantelor prin eroziune electrică complexă*, Tehnomus VII. Tehnologii și produse noi în construcția de mașini. Secția IV. Tehnologii și utilaje pentru prelucrări neconvenționale, Suceava, 1993
- [HF93b] **Herman, Richard, Fleșer, Traian**, *Influența parametrilor de lucru asupra adâncimii stratului modificat termic la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Tehnomus VII. Tehnologii și produse noi în construcția de mașini. Secția IV. Tehnologii și utilaje pentru prelucrări neconvenționale, Suceava, 1993
- [HF93c] **Herman, Richard, Fleșer, Traian**, *Considerații privind unele domenii de aplicare eficientă a prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Buletinul Primului Colocviu Național Tehnic Interdisciplinar, Brăila, 22-24 aprilie 1993
- [HH03] **Herman, Mihaela, Herman, Richard**, *Fundamental Flows in Complex Electrical Erosion Processing*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2003, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [HH99] **Herman, Richard, Herman, Mihaela**, *Considerații privind un sistem generalizat de acțiune tehnologică în procesul de prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Tehnologii neconvenționale nr. 2/1999, Editura Augusta, Timișoara 1999
- [HK00a] **Herman, Mihaela, Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Condiții de aplicare a diverselor procedee de prelucrare prin eroziune*, Analele Universității „Aurel Vlaicu”, Arad, 2000
- [HK00b] **Herman, Mihaela, Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Influența obiectului de transfer asupra prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Lucrările Sesiunii de comunicări științifice a Universității „Petru Maior” Târgu Mureș, 27-28 oct 2000, vol. IV Scule așchiitoare-Tehnologii, Editura Universității „Petru Maior”, Târgu Mureș, 2000
- [HL93] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu**, *New Processing Domains by Electrical Complex Erosion*, Sixth Israel Materials Engineering Conference. Part A: 1-303. Conference proceedings, Ben-Gurion University of Negev, Israel, February 24-25, 1993
- [HO95] **Herman, Richard, Olariu, Mircea**, *Model matematic pentru optimizarea prelucrării prin eroziune electrică complexă*, TSTM-1. Tehnologii, sisteme tehnologice și materiale performante în construcția de mașini. Volumul I, Iași, 1995
- [HV92] **Herman, Richard, Vasilescu, Mircea**, *Cercetări asupra tehnologiei și utilajului de debitat bare din oțel inoxidabil prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicula Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1992
- [HHB03] **Herman, Richard, Herman, Mihaela, Botiș, Mihaela**, *Performances Index for Processing by Electrical Complex Erosion (ECE)*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2003, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [HFM93] **Herman, Richard, Fleșer, Traian, Mnerie, Dumitru**, *Unele aspecte tehnico-economice pentru realizarea fantelor*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [HFO93] **Herman, Richard, Fleșer, Traian, Olariu, Mircea**, *Analiza prin metoda experimentului psihologic a principalelor influențe asupra rugozității suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Buletinul Primului Colocviu Național Tehnic Interdisciplinar, Brăila, 22-24 aprilie 1993

- [HLM88] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel**, *Prelucrarea prin eroziune electrică complexă a oțelurilor inoxidabile – aspecte tehnologice*, SITNEC 1. Simpozion pe teme de tehnologii neconvenționale, Bârlad, 1988
- [HLM91] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel**, *Contribuții la realizarea fantelor în piese tubulare*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică, Oradea, 1991
- [HLM92] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel**, *Studiu comparativ asupra debitării materialelor prin eroziune electrică complexă utilizând variantele de prelucrare cu jet sau imersie*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1992
- [HLM99a] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel**, *Contribuții privind determinarea teoretico-experimentală a productivității și uzurii relative la prelucrarea oțelurilor inoxidabile prin eroziune electrică complexă-parte I*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [HLM99b] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel**, *Contribuții privind determinarea teoretico-experimentală a productivității și uzurii relative la prelucrarea oțelurilor inoxidabile prin eroziune electrică complexă-parte II*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [HML91] **Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Contribuții privind debitarea semifabricatelor cu diametre mai mari de 100 mm prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică, Oradea, 1991
- [HML93a] **Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Modelarea statistică prin metoda experimentului psihologic a uzurii obiectului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1993
- [HML93b] **Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Stabilirea ordinii de influență a principalilor parametri reglabili asupra productivității la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1993
- [HMM93a] **Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel, Mălaimare, Gabriel**, *Analiza principalelor influențe asupra interstițiului lateral la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Comunicări științifice prezentate la sesiunea tehnico-științifică. Secția IV, Reșița, 22-23 octombrie 1993
- [HMM93b] **Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel, Mălaimare, Gabriel**, *Sistem de avans automat electromecanic pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică complexă*, Comunicări științifice prezentate la sesiunea tehnico-științifică. Secția IV, Reșița, 22-23 octombrie 1993
- [HOM86] **Herman, Richard, Olariu, Mircea, Marinceu, Dimitrie**, *Rezultate experimentale privind debitarea oțelurilor rapide prin eroziune complexă cu imersionarea obiectului de prelucrat*, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret „Tehnic-2000”, a V-a ediție, Secțiunea Construcții de mașini, hidraulică, tehnologii, Timișoara, 6-7 mai 1986
- [HVB93] **Herman, Richard, Vasilescu, Mircea, Botiș, Mihaela**, *Considerații asupra unor scheme de prelucrare la debitarea prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1993

- [H+93] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Șerban**, *Considerații asupra realizării fantelor prin eroziune electrică complexă*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [H+95] **Herman, Richard, Oprea, Mihai, Olariu, Mircea, Botea, Traian**, *Model matematic asupra uzurii obiectului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, MTeM'95. A III-a Conferință științifică internațională Mașini și Tehnologii Moderne. Volumul 2, Cugir, 12-14 octombrie 1995
- [H+98] **Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu, Fleșer, Traian, Botiș, Mihaela**, *Cercetări experimentale privind dezvoltarea fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune electrică complexă prin analiza termică diferențială și analiza termogravimetrică*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Conferință internațională, Timișoara 22-23 mai 1997, volumul I, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [IP81] **Iuhasz Popovici, Corina-Antigona**, *Cercetări teoretice și experimentale asupra tăierii prin eroziune complexă electrică-electrochimică a oțelurilor aliate pentru scule și matrițe*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1981
- [IT98] **Ivan, Mircea, Temur, Roberto**, *Proiectarea tehnologiilor de prelucrare prin eroziune electrochimică a suprafețelor frontale folosind baze de date computerizate*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1998, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [Kar00a] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Domenii de aplicare a eroziunii electrice complexe*, Referat doctorat nr. 1, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 2000
- [Kar00b] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Modelarea matematică a rugozității suprafeței la debitarea carburii metalice P30 prin eroziune electrică complexă*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2000, Editura Augusta, Timișoara, 2000
- [Kar00c] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Modelarea matematică a productivității debitării carburii metalice P30 prin eroziune electrică complexă*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2000, Editura Augusta, Timișoara, 2000
- [Kar01] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Posibilități de conducere automată a procesului de prelucrare prin eroziune electrică complexă*, Referat doctorat nr. 2, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 2001
- [Kar02] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Programe de utilizare optimală la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Referat doctorat nr. 3, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 2002
- [Kar03a] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Regulating the Rugosity of the Surface at the Processing through Complex Electric Erosion by the Current and the Working Pressure*, Competiție și integrare. Noua Europă, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Kar03b] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Regulating the Productivity of the Complex Electric Erosion Process through the Current and Working Pressusre*, Competiție și integrare. Noua Europă, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Kar03c] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Contribuții la elaborarea unui model matematic al procesului de eroziune electrică complexă*, Anale. Seria Informatică, volumul I, fascicula I, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Kar03d] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Contribuții la conducerea procesului de debitare prin eroziune electrică complexă a oțelurilor bogat aliate cu crom*, Anale. Seria Informatică, volumul I, fascicula II, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Kar03e] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Contribuții la modelarea matematică a procesului de debitare prin eroziune electrică complexă a oțelurilor bogat aliate*

- cu crom*, Anale. Seria Informatică, volumul I, fascicula II, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Kar03f] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Cercetări operaționale-teorie și aplicații*, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Kar04a] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Program de calcul automat al regimurilor optime de prelucrare la debitarea prin eroziune electrică complexă*, Al Doilea Simpozion Internațional „Mecatronică, Microtehnologii și Materiale Noi”, Târgoviște, 2004
- [Kar04b] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Programarea experimentelor de debitare prin eroziune electrică complexă folosind calculatorul*, Anale. Seria Informatică, volumul II, fascicula I, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [Kar04c] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Contribuții la modelarea procesului de debitare prin eroziune electrică complexă a fontei nodulare*, Anale. Seria Informatică, volumul II, fascicula II, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [Kar04d] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Contribuții la modelarea procesului de debitare a oțelurilor inoxidabile prin eroziune electrică complexă*, Anale. Seria Informatică, volumul II, fascicula II, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [Kar04e] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Model matematic al dependenței timpului de prelucrare de puterea indusă în spațiul de lucru la debitarea oțelului carbon PC52 prin eroziune electrică complexă*, A XXVIII-a Conferință Națională de Mecanica Solidelor, Târgoviște, 28-29 mai 2004
- [Kar04f] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Model matematic al dependenței rugozității suprafeței de puterea indusă în spațiul de lucru la debitarea oțelului carbon PC52 prin eroziune electrică complexă*, A XXVIII-a Conferință Națională de Mecanica Solidelor, Târgoviște, 28-29 mai 2004
- [Kar04g] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Aspecte ale modelării procesului de debitare prin eroziune electrică complexă folosind funcții de mai multe variabile*, A VIII-a Conferință internațională de comunicări științifice Iași-Chișinău „Tehnologii moderne, calitate, restructurare” TCMR-2004, Iași, 2004
- [Kar99] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Programarea calculatoarelor utilizând FoxPro*, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [Kil97] **Kilyeni, Ștefan**, *Metode numerice*, volumul I+II, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1997
- [KH00a] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Herman, Mihaela**, *Influența factorilor electrici asupra prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității „Aurel Vlaicu”, Arad, 2000
- [KH00b] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Herman, Mihaela**, *Influența factorilor mecanici asupra prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Lucrările Sesiunii de comunicări științifice a Universității „Petru Maior” Târgu Mureș, 27-28 oct 2000, vol. IV Scule așchietoare-Tehnologii, Editura Universității „Petru Maior”, Târgu Mureș, 2000
- [KL03] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Lacrămă, Dan-Laurențiu**, *Baze de date-teorie și aplicații*, Editura Mirton, Timișoara, 2003
- [KL04] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Lacrămă, Dan-Laurențiu**, *Optimizarea debitării prin eroziune electrică complexă folosind rețele neuronale*, A VIII-a Conferință internațională de comunicări științifice Iași-Chișinău „Tehnologii moderne, calitate, restructurare” TCMR-2004, Iași, 2004
- [KN01] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Nanu, Aurel**, *A Study about the Complex Electric Erosion Processing Modelling*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2001, Editura Augusta, Timișoara, 2001

- [KN03a] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Nanu, Aurel**, *Contributions to the Mathematic Modelling of the Unconventional Technological Process*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2003, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [KN03b] **Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Nanu, Aurel**, – *Contribution to the Optimisation of the Dimensional Processing Technological Procedure through Complex Electric Erosion*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2003, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Lan83a] **Lăncrăngean, Zenoviu**, *Dependența parametrilor tehnologici de natura circuitului electric, la prelucrarea prin eroziune electrică complexă a carburilor din sortul P40*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [Lan83b] **Lăncrăngean, Zenoviu**, *Prelucrabilitatea prin eroziune electrică complexă a carburilor din sortul P40*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [Lan86] **Lăncrăngean, Zenoviu**, *Contribuții la prelucrarea corpurilor de revoluție prin eroziune electrică complexă*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1986
- [Lun01] **Lungu, Ovidiu**, *Ghid introductiv pentru SPSS 10.0*, Iași, 2001
- [LH89] **Lăncrăngean, Zenoviu, Herman, Richard**, *Aspecte ale cercetării experimentale privind debitarea oțelurilor bogat aliate și refractare prin eroziune electrică complexă*, A V-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale în prelucrarea materialelor, Timișoara, 1989
- [LH98] **Lăncrăngean, Zenoviu, Herman, Richard**, *Considerații asupra fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Conferință internațională, Timișoara 22-23 mai 1997, volumul I, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [LHM91] **Lăncrăngean, Zenoviu, Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel**, *Cercetări experimentale privind debitarea prin eroziune electrică complexă a barelor obținute prin metalurgia pulberilor*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică, Oradea, 1991
- [LHM93a] **Lăncrăngean, Zenoviu, Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel**, *Model matematic pentru determinarea funcțiilor de răspuns la prelucrarea prin eroziune electrică complexă pentru circuite inductive*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1993
- [LHM93b] **Lăncrăngean, Zenoviu, Herman, Richard, Mărcușanu, Aurel**, *Model matematic pentru determinarea funcțiilor de răspuns la prelucrarea prin eroziune electrică complexă pentru circuite rezistive*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1993
- [LK04] **Lacrămă, Dan-Laurențiu, Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *Contribuții la optimizarea prelucrării oțelurilor înalt aliate prin procedee neconvenționale folosind rețele neuronale*, Anale. Seria Informatică, volumul II, fascicula I, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [LKD04] **Lacrămă, Dan-Laurențiu, Karnyanszky, Tiberiu-Marius, Deac, Maria**, *Baze de date-MySQL în aplicații comerciale*, Editura Mirton, Timișoara, 2004
- [LMG04] **Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel, Groza, Ioan**, *Contributions sur la génération des surfaces de révolution par érosion anodo-mécanique*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2004, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [LMG91] **Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel, Ghiță, M.**, *Système automatique électrohydraulique pour les machines d'usinage par érosion anodo-mécanique*,

- Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică, Tomul 36 (50), Fascicola 1-2, Timișoara, ianuarie-decembrie 1991
- [LMH91] **Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard**, *Aspecte tehnologice ale debitării oțelurilor inoxidabile prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică, Oradea, 1991
- [LMH92a] **Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard**, *Influența modificării structurii circuitului electric cu capacități asupra fenomenelor fundamentale în procesul prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1992
- [LMH92b] **Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard**, *Influența modificării structurii circuitului electric cu inductivități asupra fenomenelor fundamentale în procesul prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică. Secțiunea: Tehnologii în construcții de mașini, Oradea, 1992
- [L+83a] **Lăncrăngean, Zenoviu, Popovici, Ioan, Herman, Richard, Reviczky, Antoniu, Gavrilă, F.**, *Influența tensiunii din spațiul de lucru asupra timpului de debitare prin eroziune electrică complexă a oțelurilor bogat aliate cu crom*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [L+83b] **Lăncrăngean, Zenoviu, Popovici, Ioan, Herman, Richard, Reviczky, Antoniu, Gavrilă, F.**, *Influența curentului din spațiul de lucru asupra timpului de debitare și a productivității prelucrării oțelurilor bogat aliate cu crom prin eroziune electrică complexă*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [L+96] **Lazăr, Corneliu, Păstrăvanu, Octavian, Poli, Elena, Schonberger, Francisc**, *Conducerea asistată de calculator a proceselor tehnice. Proiectarea și implementarea algoritmilor de reglare numerică*, Editura Matrix Rom, București, 1996
- [Mal01] **Mălaimare, Gabriel**, *Calculating Algorithm for the Method of Least Squares Applied to the Processing of Results by Nonconventional Procedures*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 3/2001, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [Mar89] **Markus, Arke**, *Tehnologiile neconvenționale și cerințele producției*, A V-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale în prelucrarea materialelor, Timișoara, 1989
- [MG01] **Mărcușanu, Aurel, Groza, Ioan**, *Modèle mathématique du système d'avance automatique électro-pneumatique pour la machine d'usinage par érosion électrique complexe*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2001, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [ML00] **Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Étude de la stabilité du système de réglage automatique de l'avance pour la machine d'usinage par érosion anodo-mecanique MEC-100*, Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică, Tomul 35 (49), Fascicola 1-2, Timișoara, ianuarie-decembrie 1990
- [MHF93] **Mnerie, Dumitru, Herman, Richard, Fleșer, Traian**, *Considerații asupra variației forțelor la debitarea prin eroziune electrică complexă*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [MHL91] **Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Studiul stabilității sistemului de reglare automată a avansului la instalația de debitat bare din Wolfram prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică, Oradea, 1991

- [MHL99a] **Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Stand experimental echipat cu un sistem de avans automat electrohidraulic pentru debitarea semifabricatelor cilindrice prin eroziune electrică complexă-parte I*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [MHL99b] **Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Stand experimental echipat cu un sistem de avans automat electrohidraulic pentru debitarea semifabricatelor cilindrice prin eroziune electrică complexă-parte II*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [MHM93] **Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard, Mălaimare, Gabriel**, *Sistem de avans automat electrohidraulic pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică complexă*, Comunicări științifice prezentate la sesiunea tehnico-științifică. Secția IV, Reșița, 22-23 octombrie 1993
- [MLG00] **Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu, Gliță, Gheorghe**, *Modèle mathématique du système d'avans inclus dans la machine d'usinage par érosion anodo-mecanique MEC-100*, Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică, Tomul 35 (49), Fascicola 1-2, Timișoara, ianuarie-decembrie 1990
- [MLG01] **Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu, Groza, Ioan**, *Système d'avance automatique électro-pneumatique pour la machine d'usinage par érosion électrique complexe*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2001, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [MLH91] **Mărcușanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu, Herman, Richard**, *Instalație automată pentru debitarea barelor sinterizate din Wolfram prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea. Fascicola Mecanică, Oradea, 1991
- [MMC95] **Marinescu, Radu-Dumitru, Marinescu, Nicolae-Ion, Cristea, Radu**, *Posibilități de selectare a strategiei cercetării-dezvoltării în domeniul tehnologiilor neconvenționale*, TEHNOMUS VIII. Tehnologii și produse noi în construcția de mașini. Volumul IV. Tehnologii de prelucrare, Simpozion, Suceava 26-27 mai 1995, Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava, 1995
- [MTE95] *MTeM'95. A III-a Conferință științifică internațională Mașini și Tehnologii Moderne. Volumul 2*, Cugir, 12-14 octombrie 1995
- [M+90] **Mitelea, Ion, Paulescu, Gheorghe, Dreucean, Aurel, Rosinger, Ștefan, Breștin, Aurel, Achimescu, Nicolae**, *Materiale și tehnologii în construcția de mașini*, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1990
- [M+91] **Mărcușanu, Aurel, Herman, Richard, Marinceu, Dimitrie, Slavici, Titus**, *Contributions sur le débitage par érosion électrique complexe sur des demi-produits tubulaires*, Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică, Tomul 36 (50), Fascicola 1-2, Timișoara, ianuarie-decembrie 1991
- [Nag98] **Nagiț, Gheorghe**, *Tehnologii neconvenționale*, Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” Iași, 1998
- [Nan77] **Nanu, Aurel**, *Tehnologia materialelor*, Ediția a doua, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977
- [Nan83] **Nanu, Aurel**, *Realizări din domeniul tehnologiilor neconvenționale în R. S. România*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [Nan89] **Nanu, Aurel**, *Coroborarea tehnologiilor convenționale cu tehnologiile neconvenționale în construcția de mașini*, A V-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale în prelucrarea materialelor, Timișoara, 1989

- [Nan97] **Nanu, Aurel**, *Din istoria tehnologiilor neconvenționale în România*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1997, Editura Augusta, Timișoara, 1997
- [Nor96] *Normative unificate pe M.I.C.M. pentru prelucrări de debitare a metalelor pe mașini-unelte specifice*, Oficiul de Informare Documentară pentru Industria Construcțiilor de Mașini, București, 1996
- [Nou87] *Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrare la cald. Vol. II. Tehnologii și utilaje pentru deformări plastice și tratamente termice*, lucrări prezentate la sesiunea tehnico-științifică organizată de Universitatea din Brașov, 27-28 februarie 1986, Brașov, 1987
- [NK01] **Nanu, Aurel, Karnyanszky, Tiberiu-Marius**, *A Study about the Systemic Outlook Application for the Complex Electric Erosion Processing Optimisation*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2001, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [NL83a] **Nanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Prelucrabilitatea prin eroziune electrică complexă a carburilor din sortul P30*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [NL83b] **Nanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Dependența parametrilor tehnologici de natura circuitului electric, la prelucrarea prin eroziune electrică complexă a carburilor din sortul P30*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [NL86] **Nanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu**, *Dependența caracteristicilor tehnologice de structura circuitului electric în cazul prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Tehnologiile neconvenționale – mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini, Simpozion, Timișoara, 30-31 mai 1986
- [NO99] **Nanu, Aurel, Olariu, Mircea**, *Algoritm de cercetare și prelucrare a datelor în vederea optimizării prelucrării prin eroziune electrică*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [NT98] **Nanu, Dan, Țițu, Mihail**, *Program major de calcul automat pentru identificarea influenței câmpului magnetic exterior asupra mișcării purtătorilor de sarcină la prelucrarea prin eroziune electrică*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Editura Augusta, Timișoara 1998
- [NBT99] **Nanu, Dan, Bucur, Viorel, Țițu, Mihail**, *Analiza influenței factorilor de proces asupra criteriilor de performanță, la debitarea prin EERC, cu OT bandă metalică*, Tehnologii neconvenționale aplicate, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [NHO93] **Nanu, Aurel, Herman, Richard, Olariu, Mircea**, *Considerații asupra eficienței metodelor matematice la stabilirea parametrilor optimi la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [NLH97] **Nanu, Aurel, Lăncrăngean, Zenoviu, Herman, Richard**, *Parametrii și factorii care determină caracteristicile tehnologice la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică complexă*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1997, Editura Augusta, Timișoara, 1997
- [NNP71] **Nanu, Aurel, Nichici, Alexandru, Popa, Horia**, *O nouă concepție asupra noțiunii de prelucrare dimensională prin eroziune*, Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Intreprinderea Poligrafică „Banatul”, Timișoara, 1971
- [N+83] **Nichici, Alexandru, Popovici, Vasile, Nica, Mihai, Achimescu, Nicolae, Popa, Horia, Paulescu, Gheorghe**, *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*, Editura Facla, Timișoara 1983
- [N+89] **Nicolcescu, Gheorghe, Popovici, Vasile, Nicolcescu, Zoe, Herman, Richard**, *Cap de lucru pentru tăierea prin eroziune complexă a fantelor în țevile*

- de foraj, Comunicările celei de-a VI-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, vol. II, Timișoara, 5-6 mai 1989
- [Ola97] **Olariu, Mircea**, *Raționalitatea metodei de agregare folosită de experimentul psihologic în ierarhizarea factorilor prelucrării prin eroziune electrică*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1997, Editura Augusta, Timișoara, 1997
- [Ola99] **Olariu, Mircea**, *Verificarea analitică și experimentală a rezultatelor optimizării productivității specifice a prelucrării prin eroziune electrică cu electrod masiv*, Tehnologii neconvenționale nr. 2/1999, Editura Augusta, Timișoara 1999
- [OB86] **Olariu, Valter, Brătianu, Constantin**, *Modelare numerică cu elemente finite*, Editura Tehnică, București, 1986
- [OH86] **Olariu, Mircea, Herman, Richard**, *Influența modului de spălare a interstițiului tehnologic asupra rugozității suprafețelor obținute prin eroziune complexă*. Comunicările celei de-a V-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece vol. III, Timișoara, 20-21 noiembrie 1986
- [OO99] **Olariu, Mircea, Oprea, Mihai**, *Optimizarea productivității specifice a prelucrării prin eroziune electrică cu electrod masiv*, Tehnologii neconvenționale nr. 2/1999, Editura Augusta, Timișoara 1999
- [O+99] **Oprean, Constantin, Nanu, Dan, Țițu, Mihail, Cicală, Eugen, Vannes, Andre-Bernard**, *Software universal pentru modelare, optimizare și conducere asistată a proceselor tehnologice*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [Poc98] **Pocinog, Grigorie**, *Modele și metode de simulare*, Editura Eurobit, Timișoara, 1998
- [Pop70] **Popovici, Vasile**, *Contribuții la studiul fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune complexă*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Timișoara, 1970
- [Pop71] **Popovici, Vasile**, *Cercetări asupra fenomenului electrochimic la prelucrarea prin eroziune complexă*, Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Intreprinderea Poligrafică „Banatul”, Timișoara, 1971
- [Pop83a] **Popovici, Vasile**, *Corelația dintre proprietățile fizico-mecanice și prelucrabilitatea carburilor metalice prin eroziune complexă*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [Pop83b] **Popovici, Vasile**, *Reglarea interstițiului de lucru, factor de optimizare, la prelucrarea prin eroziune complexă*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [PB99] **Popa, Marcel, Borzan, Marian**, *Conexiuni ale securității naționale cu tehnici și tehnologii neconvenționale*, Tehnologii neconvenționale aplicate, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [PDB02] **Precup, Radu-Emil, Dragomir, Lavinia, Bulavițchi, Igor**, *Matematici asistate de calculator. Aplicații*, Editura Politehnica, Timișoara, 2002
- [PPG93] **Popovici, Vasile, Popovici, Ion, Groza, Ioan**, *Asupra contribuției componentei de dizolvare anodică în procesul de prelucrare prin eroziune electrică complexă*, CITN'93. A 6-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 28-29 octombrie 1993
- [PPO86] **Popovici, Vasile, Paulescu, Gheorghe, Olariu, Mircea**, *Studiul influenței impedanței circuitului de lucru asupra parametrilor de rugozitate la prelucrarea prin eroziune complexă*, Tehnologiile neconvenționale – mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini, Lucrări prezentate la simpozionul desfășurat în zilele de 30-31 mai 1986 la Timișoara
- [PSA98] **Popa, Marcel, Szentgyorgyi, Andras, Arboreanu, Antoniu**, *Utilizarea inteligenței artificiale în conducerea procesului tehnologic de eroziune electrică*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Editura Augusta, Timișoara 1998

- [P+92] **Picoș, C. et all**, *Proiectarea tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere*, vol. I, Editura Universitas, Chișinău, 1992
- [Rev00] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2000*, Editura Augusta, Timișoara, 2000
- [Rev01a] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2001*, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [Rev01b] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2001*, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [Rev01c] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 3/2001*, Editura Augusta, Timișoara, 2001
- [Rev02] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2002*, Editura Augusta, Timișoara, 2002
- [Rev03a] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2003*, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Rev03b] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2003*, Editura Augusta, Timișoara, 2003
- [Rev04a] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2004*, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [Rev04b] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2004*, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [Rev97] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1997*, Editura Augusta, Timișoara, 1997
- [Rev98] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1998*, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [Rev99a] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999*, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [Rev99b] *Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/1999*, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [Ros97] **Roșca, Liviu**, *Aspecte privind concepția unei baze de date și modele pentru prelucrarea prin eroziune electrică prin rupere de contact*, Tehnologii neconvenționale la sfârșit de mileniu, Editura Augusta, Timișoara 1997
- [RL96] **Reviczky-Levay, Antoniu**, *Ingineria proceselor tehnologice neconvenționale*, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 1996
- [RL98] **Reviczky-Levay, Antoniu-Ștefan**, *Contribuții la îmbunătățirea performanțelor sistemelor de avans automat pentru mașinile de prelucrare prin electroeroziune*, Teză de doctorat, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 1998
- [RGM83] **Roman, I., Gogoasă, I. Manițiu, C.**, *Tehnologii neconvenționale de prelucrare în construcția de mașini*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [RLS98] **Reviczky-Levay, Antoniu, Slavici, Titus**, *Considerații asupra algoritmilor utilizați în cazul implementării unui soft pentru conducerea mașinilor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Editura Augusta, Timișoara 1998
- [RLS99] **Reviczky-Levay, Antoniu, Slavici, Titus**, *Cercetări experimentale calitative asupra echipamentului CNC cu calculator PC a mașinii ELEROFIL-10*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [R+84] **Resa, Ion D., Petrescu, Șt., Precupal, M., Căra, Al.**, *Probleme de statistică rezolvate pe calculator*, Editura Facla, Timișoara, 1984
- [R+89] **Reviczky, Antoniu, Mărcușanu, Aurel, Slavici, Titus, Mighiu, Constantin, Dumitru, Eugen**, *Soluțiile pentru automatizarea ciclului de lucru la mașina de debitat prin eroziune electrică complexă*, A V-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale în prelucrarea materialelor, Timișoara, 1989

- [Sav71] **Savii, Gheorghe**, *Studiul asupra condițiilor de aplicare a procedurii de tăiere anodo-mecanică la fonta nodulară*, Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Intreprinderea Poligrafică „Banatul”, Timișoara, 1971
- [Sim97] **Simion, Carmen**, *Stabilitatea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, vol. I, Conferință internațională, Timișoara, 22-23 mai 1997
- [Six93] *Sixth Israel Materials Engineering Conference. Part A: 1-303. Conference proceedings*, Universitatea Ben-Gurion, Negev, Israel, 24-25 februarie 1993
- [Sla00] **Slătineanu, Laurențiu**, *Tehnologii neconvenționale în construcția de mașini*, Editura Tehnica-Info, Chișinău, 2000
- [SB02] **Slavici, Titus, Băcilă, Adriana**, *Methods of Artificial Intelligence Used in Nonconventional Technologies Optimisation*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2002, Editura Augusta, Timișoara, 2002
- [SB04] **Slavici, Titus, Băcilă, Adriana**, *Methods of Artificial Intelligence Used in Nonconventional Technologies Optimisation*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2004, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [SL00] **Slavii, George, Luchin, Milenco**, *Modelare și simulare*, Editura Eurostampa, Timișoara, 2000
- [SGP83] **Slătineanu, L., Grănescu, T., Pruteanu, O.**, *Câteva considerații asupra unui procedeu de debitare prin eroziune complexă*, A IV-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 3-5 noiembrie 1983
- [SIT88] *SITNEC 1. Simpozion pe teme de tehnologii neconvenționale*, Bârlad, 1988
- [SMC98] **Slavici, Titus, Mnerie, Dumitru, Crainic, Nicolae**, *Conducerea cu calculatoare compatibile IBM a mașinilor de prelucrat prin eroziune cu electrod filiform*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1998, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [S+04] **Sporea, Ion, Lăncrăngean, Zenoviu, Mărcușanu, Aurel, Olariu, Mircea, Simoiu, Alina**, *Researches about Rugosity for Parts of Manganese Steel Worked with Complex Electrical Erosion*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 2/2004, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [S+86] **Sporea, Ion et all.**, *Influența procedurii de prelucrare asupra așchiabilității unor categorii de oțeluri debitate prin eroziune*, Conferința de tratamente termice-comunicări, Târgu Mureș, 24-25 aprilie 1986
- [S+89] **Slavici, Titus, Marinceu, Dimitrie, Herman, Richard, Dumitru, Eugen**, *Analiza unui sistem de alimentare și orientare a semifabricatelor la mașina de prelucrat prin eroziune complexă*, TEHNIC 2000. Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret, Timișoara 5-6 mai 1989
- [Tal87] **Taloi, Dragoș**, *Optimizarea proceselor tehnologice-aplicații în metalurgie*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1987
- [Teh71] *Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor*, Conferința națională de tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, 14-16 octombrie 1971
- [Tit04] **Țițu, Mihail**, *The Factorial Experiment Strategy Applied for the Modelling and Optimisation of the Nonconventional Processing Procedures*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2004, Editura Augusta, Timișoara, 2004
- [Tit98] **Țițu, Mihail**, *Contribuții cu privire la modificarea transferului substanțial la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu câmpuri coercitive. Teză de doctorat*, Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu, 1998
- [Tuc99] **Țucu, Dumitru**, *O nouă concepție privind optimizarea globală a tehnologiilor neconvenționale*, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999

- [Tur03] **Turc, Cristian**, *Experimental Researches Regarding the Cutting of High Steel Workpieces by Complex Electrical and Electrochemical Machining*, Buletinul științific și tehnic al Universitatea Tehnică Timișoara. Mecanică, Tomul 48 (62), Fascicola 1, Timișoara, 2003
- [Tur99] **Turc, Cristian-Gheorghe**, *Cercetări privind optimizarea prelucrării dimensionale prin eroziune electrochimică. Teză de doctorat*, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1999
- [TN98] **Țițu, Mihail, Nanu, Dan**, *Program de calcul automat pentru modelarea parametrilor de mișcare a purtătorilor de sarcină la prelucrarea prin eroziune electrică cu activare magnetică*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, Editura Augusta, Timișoara 1998
- [TEH86a] *Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret „Tehnic-2000”, a V-a ediție*, Secțiunea Construcții de mașini, hidraulică, tehnologii, Timișoara, 6-7 mai 1986
- [TEH86b] *Tehnologiile neconvenționale – mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini*, Simpozion, Timișoara 30-31 mai 1986, Intreprinderea Poligrafică Banatul, Timișoara, 1986
- [TEH89] *TEHNIC 2000. Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret*, Timișoara 5-6 mai 1989
- [TEH93] *TEHNOMUS VII. Tehnologii și produse noi în construcția de mașini. Secția IV. Tehnologii și utilaje pentru prelucrări neconvenționale*, Simpozion, Suceava 4-6 iunie 1993, Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava, 1993
- [TEH95] *TEHNOMUS VII. Tehnologii și produse noi în construcția de mașini. Volumul IV. Tehnologii de prelucrare*, Simpozion, Suceava 26-27 mai 1995, Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava, 1995
- [TEH97] *Tehnologii neconvenționale la sfârșit de mileniu*, Simpozion, Timișoara, 25-26 mai 1995, Editura Augusta, Timișoara, 1997
- [TEH99] *Tehnologii neconvenționale aplicate*, Conferință internațională, Timișoara, 27-28 mai 1999, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- [TIS99] **Temur, Roberto, Ivan, Mircea, Sârbu, Flavius**, *Utilizarea microcalculatorului pentru controlul procesului de prelucrare prin eroziune electrochimică*, Tehnologii neconvenționale nr. 2/1999, Editura Augusta, Timișoara 1999
- [TMC96] *TMCM'96. Tehnologii moderne în construcția de mașini. Secțiunea III: Tehnologii neconvenționale*, Conferința internațională de comunicări științifice, Iași, 24-25 mai 1996
- [TST95] *TSTM-1. Tehnologii, sisteme tehnologice și materiale performante în construcția de mașini. Volumul I*, Iași, 1995
- [Vad77] **Văduva, Ion**, *Modele de simulare cu calculatorul*, Editura Tehnică, București, 1977
- [VBV80] **Vaida, Alexandru, Botez, Emil, Velicu, Spiru**, *Proiectarea mașinilor-unelte*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980
- [VSO83] **Văduva, Ion, Stoica, Marcel, Odăgescu, Ioan**, *Simularea proceselor economice*, Editura Tehnică, București, 1983
- [V+83] **Vlase, Aurelian, Sturzu, Aurel, Mihail, Atanase, Bercea, Ioan**, *Regimuri de așchiere, adaosuri de prelucrare și norme tehnice de timp*, volumul I, Editura Tehnică, București, 1983
- [Zla97] **Zlăteanu, Tudor**, *Tehnologia materialelor*, Editura Conspress, București, 1987
- [KKB52] **И.И.КОСОЛАПОВ, И.Г.КОСМАЧЕВ, А.Л.ВИШНИЦКИЙ**, *РАБОТА НА АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ЗАТОЧНЫХ СТАНКАХ*, ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, МОСКВА, 1952, ЛЕНИНГРАД