

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Ing. Cristian-Gheorghe TURC

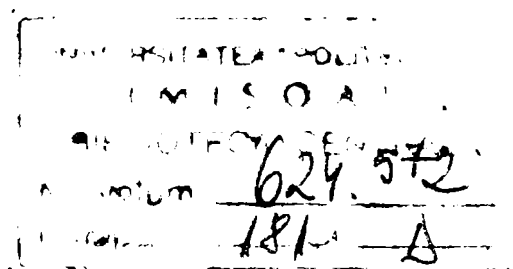
*Cercetări privind optimizarea prelucrării
dimensionale prin eroziune electrochimică*

-Teză de doctorat-

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof. Dr. Ing. Tudor ICLĂNZAN



Timișoara
1999

CUPRINS

1.	INTRODUCERE.....	3
2.	PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ.....	6
2.1.	PROCESUL DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ.....	6
2.1.1.	Principiul prelucrării prin eroziune electrochimică.....	6
2.1.2.	Procese în spațiul de lucru.....	7
2.1.3.	Influența unor factori asupra parametrilor prelucrării prin eroziune electrochimică	9
2.2.	STUDIUL DE SINTEZĂ PRIVIND PROCEDEELE DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ.....	11
2.2.1.	Prelucrarea prin eroziune electrochimică cu depasivare naturală.....	12
2.2.2.	Prelucrarea prin eroziune electrochimică cu depasivare hidrodinamică.....	14
2.2.3.	Prelucrarea prin eroziune electrochimică cu depasivare mecanică.....	17
→2.2.4.	Prelucrabilitatea diferitelor materiale prin eroziune electrochimică.....	20
2.2.5.	Calitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune electrochimică.....	24
2.3.	STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR.....	25
→ 3.	STUDIUL TEHNOLOGIEI DE GĂURIRE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ.....	27
3.1.	UTILAJUL PENTRU GĂURIRE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ.....	27
3.1.1.	Sistemul mecanic.....	28
3.1.2.	Sistemul pentru electrolit.....	30
3.1.3.	Sursa de energie electrică.....	32
3.2.	TEHNOLOGII DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ.....	32
3.2.1.	Alegerea electrolitului.....	33
3.2.2.	Alegerea materialului electrodului-sculă.....	34
3.2.3.	Stabilirea regimului de lucru.....	34
3.2.4.	Proiectarea electrodului-sculă.....	35
→ 3.2.5.	Modul de circulare a electrolitului.....	38
4.	MICROMAȘINĂ DE GĂURIT PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ.....	39
4.1.	SISTEMUL PENTRU ELECTROLIT AL MMGEE.....	39
4.2.	SISTEMUL MECANIC AL MMGEE.....	42
4.3.	SURSA DE ALIMENTARE CU ENERGIE ELECTRICĂ A MMGEE.....	43
4.4.	MECANISMUL DE AVANS AL MMGEE.....	45
4.5.	SISTEMUL DE COMANDĂ ȘI CONTROL AL MMGEE.....	49
4.5.1.	Sistemul de dezvoltare a aplicațiilor <i>ADS-51</i>	51
4.5.2.	Programarea sistemului de comandă și control.....	52

4.5.3	Traductoarele sistemului de comandă și control.....	68
4.5.4	Acționarea electrică a sistemului de avans.....	78
4.6.	ALGORITMUL DE COMANDĂ AL MMGEE.....	84
4.6.1.	Mulțimi fuzzy. Logica fuzzy. Operatori logici.....	89
4.6.2.	Regulatoare fuzzy.....	93
4.6.3.	Exemple de regulatoare fuzzy.....	101
4.6.4.	Programul de comandă și control.....	110
5.	CERCETĂRI EXPERIMENTALE.....	121
6.	CONCLUZII	125
	ANEXE.....	127
	BIBLIOGRAFIE.....	165

1. INTRODUCERE

Dezvoltarea tehnologică pe plan mondial și odată cu aceasta diversificarea produselor realizate de industrie necesită din ce în ce mai mult recurgerea la procedee de prelucrare noi sau perfecționarea celor existente. Dintre procedeele de prelucrare relativ noi, denumite generic procedee neconvenționale, face parte și prelucrarea dimensională prin eroziune electrochimică.

Prelucrarea electrochimică a materialelor metalice a fost brevetată în Marea Britanie, în anul 1929. Prima instalație pentru prelevare electrochimică de material metalic datează din anul 1946, iar prima aplicație industrială - rectificarea electrochimică mecanică - a fost implementată în anul 1950, în S.U.A. Prelucrările pur electrochimice au fost puse la punct începând cu anii 1956-1958 în domeniul găuririi materialelor dure și al profilării paletelor de turbină.

Principalele *avantaje* oferite de aplicarea acestui procedeu de prelucrare sunt:

- productivitatea prelucrării este relativ ridicată și foarte puțin influențată de duritatea materialului prelucrat;
- se obține o bună calitate a suprafeței prelucrate;
- prelucrarea nu produce bavuri;
- prelucrarea nu induce tensiuni remanente;
- electrodul-sculă nu se uzează.

Extinderea acestui procedeu este limitată de câteva *dezavantaje*:

- costul ridicat al instalațiilor;
- stabilirea formei electrodului-sculă și a parametrilor regimului de prelucrare sunt destul de dificile, impunând o serie de corecții experimentale.

Fiind un procedeu de prelucrare relativ nou, prelucrarea electrochimică constituie obiectul unor cercetări laborioase dirijate în principal pe două direcții vizând perfecționarea echipamentelor, respectiv a tehnologiilor de prelucrare electrochimică.

Teza de doctorat cuprinde șase capitole, capitolele 2, 3, 4 și 5 axându-se pe prezentarea problematicii abordate după cum urmează:

Capitolul 2 prezintă o serie de considerații asupra procesului de prelucrare prin eroziune electrochimică, respectiv principiul prelucrării prin eroziune electrochimică, procesele ce au loc în spațiul de lucru și influența unor factori asupra parametrilor prelucrării prin eroziune electrochimică. De asemenea, în acest capitol este prezentat un studiu de sinteză privind procedeele de prelucrare prin eroziune electrochimică. Capitolul se continuă cu două subcapitole privind prelucrabilitatea diferitelor materiale prin eroziune electrochimică, respectiv calitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune electrochimică. Capitolul se încheie

cu o trecere în revistă a stadiului actual al cercetărilor în domeniu, pe plan național și internațional.

În capitolul 3 este prezentat un studiu asupra tehnologiei de găurire prin eroziune electrochimică. Capitolul cuprinde o serie de considerații asupra construcției utilajelor pentru găurire electrochimică, respectiv asupra stabilirii tehnologiei de prelucrare prin găurire electrochimică.

Capitolul 4 prezintă structura și modul de funcționare a unei micromașini destinate studiului procesului de găurire electrochimică. Astfel, sunt prezentate sistemele funcționale ale micromașinii: sistemul pentru electrolit, sistemul mecanic, sursa de alimentare cu energie electrică, mecanismul de avans, sistemul de comandă și control, precum și algoritmul de comandă a mașinii, respectiv codul sursă în limbaj de asamblare al programului de comandă și control.

În capitolul 5 este prezentat un experiment factorial complet de tipul 2^3 în scopul estimării influenței asupra rugozității suprafeței laterale a găurilor prelucrate a modalității de reglare a mișcării de avans a electrodului-sculă, a modului de injecție a electrolitului în spațiul de lucru și a tipului de electrolit utilizat.

În ultimul capitol al lucrării sunt prezentate principalele contribuții originale care vizează perfecționarea procedurii de găurire prin eroziune electrochimică.

OBIECTIVELE LUCRĂRII

Deși este un procedeu de prelucrare relativ nou, eroziunea electrochimică este un procedeu de prelucrare consacrat în practica industrială. Din multitudinea de procedee de prelucrare dimensională prin eroziune electrochimică, lucrarea de față se axează pe studiul operației de găurire electrochimică. Procedeele de găurire-adâncire electrochimică au perspectiva extinderii sferei de aplicabilitate la producția de serie și de masă a pieselor datorită capacității productive ridicate și a costului redus pe unitatea de produs.

Din studiul bibliografic realizat s-a conturat tendința dominantă pe plan mondial de perfecționare a procedurilor de prelucrare dimensională prin eroziune electrochimică prin comanda de către calculator / microprocesor a procesului de prelucrare.

Cercetările vizează realizarea unei micromașini comandate de un sistem cu microcontroler care să realizeze comanda ciclului de prelucrare a unei piese, respectiv să regleze mișcarea de avans a electrodului-sculă în funcție de diferiți parametri de comandă în condiții de flexibilitate maximă. Deoarece procesul de prelucrare prin eroziune electrochimică este caracterizat prin modele matematice relativ complicate, s-a optat pentru implementarea unor algoritmi de comandă care au la bază teoria sistemelor fuzzy.

Micromașina fiind destinată studiului procesului de prelucrare în condițiile adoptării a diferite metode de comandă, este necesară și monitorizarea mărimilor ce caracterizează procesul de prelucrare și stocarea acestor date în vederea prelucrării lor ulterioare pe un calculator PC. Pentru ilustrarea posibilităților de lucru ale micromașinii se realizează un experiment factorial complet.

2. PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ

2.1. PROCESUL DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ

2.1.1. Principiul prelucrării prin eroziune electrochimică

Prelucrarea electrochimică se bazează pe fenomenul de *electroliză*, caracterizându-se prin faptul că în cazul scufundării a doi electrozi într-o soluție electrolică, datorită reacțiilor care se produc, are loc și o prelevare progresivă a metalului la anod [27], [60], [64] (figura 2.1). Acest proces este cunoscut sub denumirea de *dizolvare anodică*. Pentru a explica acest fenomen să presupunem că anodul este confecționat dintr-un aliaj de fier, iar electrolitul este o soluție de $NaCl$ în apă. Sub acțiunea câmpului electric dintre cei doi electrozi soluția de $NaCl$ se disociază în anioni de Cl^- și OH^- , respectiv cationi de Na^+ și H^+ .

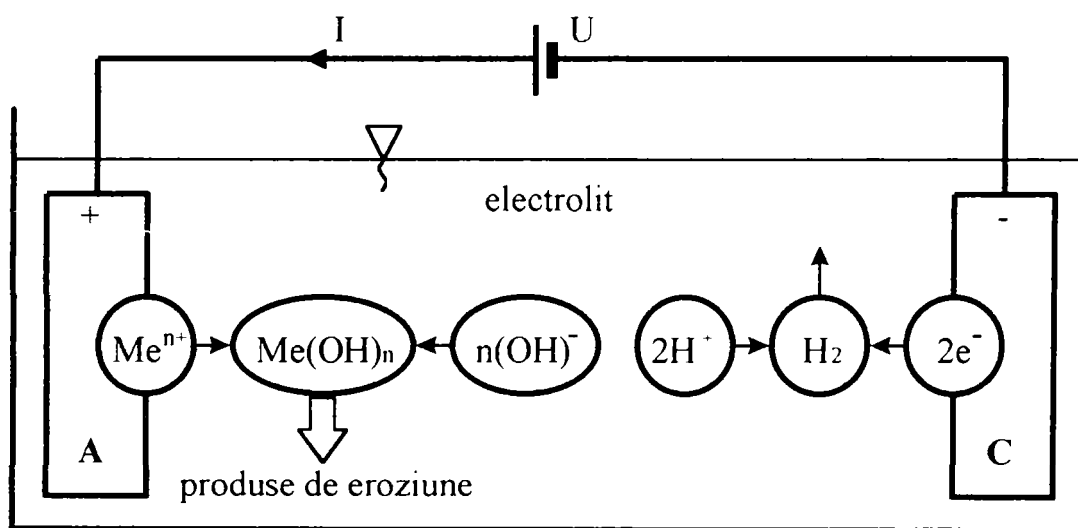


Fig. 2.1. Procesul de dizolvare anodică

La anod ar fi posibile următoarele reacții:



tensiunea normală a electrodului fiind $1,36V$;

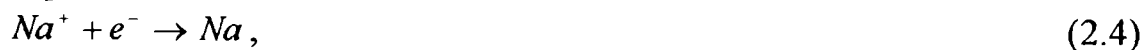


tensiunea normală a electrodului fiind $0,81V$;



tensiunea normală a electrodului fiind $0,44V$.

Reacțiile posibile la catod ar fi:



tensiunea normală a electrodului fiind $-2,70V$;



tensiunea normală a electrodului fiind $-0,42V$.

La fiecare din cei doi electrozi se va produce acea reacție căreia îi corespunde cea mai mică valoare absolută a tensiunii normale. Deci, la anod se va produce reacția (2.3), iar la catod reacția (2.5).

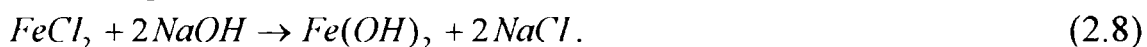
Anionii de clor reacționează cu fierul, formând un compus intermediar:



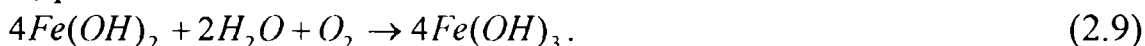
Cationii de sodiu reacționează cu apa, formând de asemenea un compus intermediar:



Acești doi compuși intermediari reacționează între ei, rezultând un prim produs de reacție, $Fe(OH)_2$, care rămâne în electrolit, poluându-l:



O parte din $Fe(OH)_2$ reacționează în continuare cu apa și oxigenul din mediu, rezultând cel de al doilea produs de reacție, $Fe(OH)_3$, care de asemenea rămâne în electrolit, poluându-l:



Conform reacțiilor (2.5) și (2.7) rezultă că procesul se desfășoară cu degajare de hidrogen, ceea ce constituie încă o sursă de poluare.

Este de remarcat faptul că electrodul-sculă, catodul, nu se uzează. De asemenea, reacția (2.8) evidențiază faptul că soluția de se regenerează. Există însă și electroliți care se consumă în timpul electrolizei.

2.1.2. Procese în spațiul de lucru

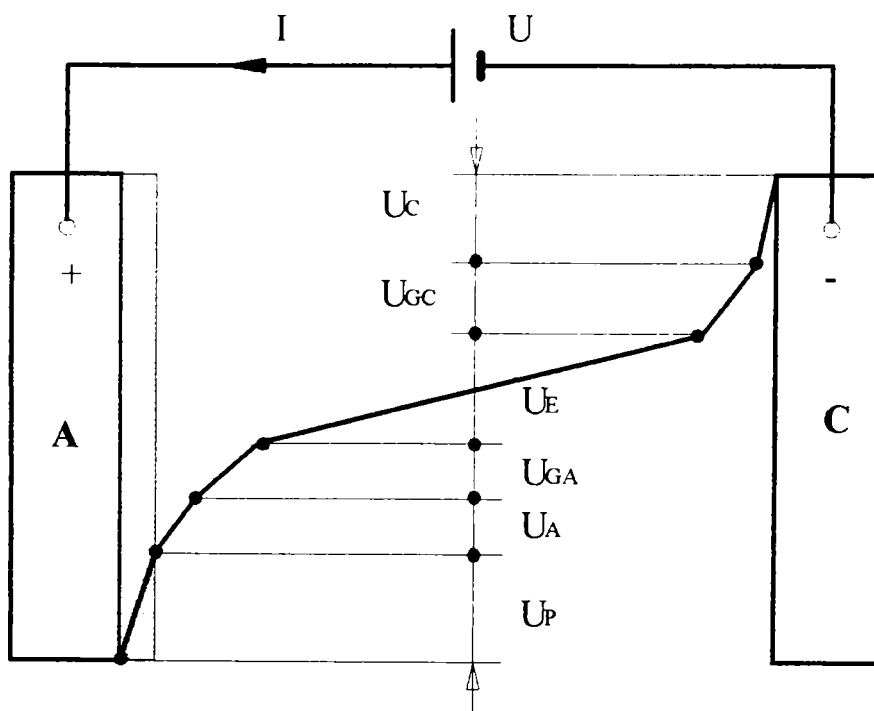


Fig. 2.2. Distribuția tensiunii electrice între electrozi

Studiile efectuate până acum au evidențiat existența unei distribuții a tensiunii electrice în interstițiul dintre cei doi electrozi [27], [60], [64]. Această distribuție a tensiunii este reprezentată grafic în figura 2.2, cei doi electrozi fiind alimentați cu o tensiune continuă. Semnificația tensiunilor notate pe figură este următoarea:

- U_P reprezintă căderea de tensiune în stratul pasivizat format în imediata vecinătate a anodului. De regulă se disting trei tipuri de pasivitate:
 1. *Pasivitatea mecanică*. Apare când pe anod se formează un strat relativ gros de produse de eroziune care împiedică dizolvarea mai departe a anodului.
 2. *Pasivitatea chimică*. Apare când metalul este adus în contact cu un mediu puternic oxidant.
 3. *Pasivitatea electrochimică*. Apare când anodul este adus la un anumit potențial critic - *tensiunea Flade* - care, deși este mai mare decât potențialul de echilibru, nu mai conduce la fenomenul de dizolvare anodică. Pentru a evita acest lucru se lucrează în zona *transpasivă* de potențiale, adică la potențiale mult mai mari decât tensiunea Flade [39], [40], [74], [75].

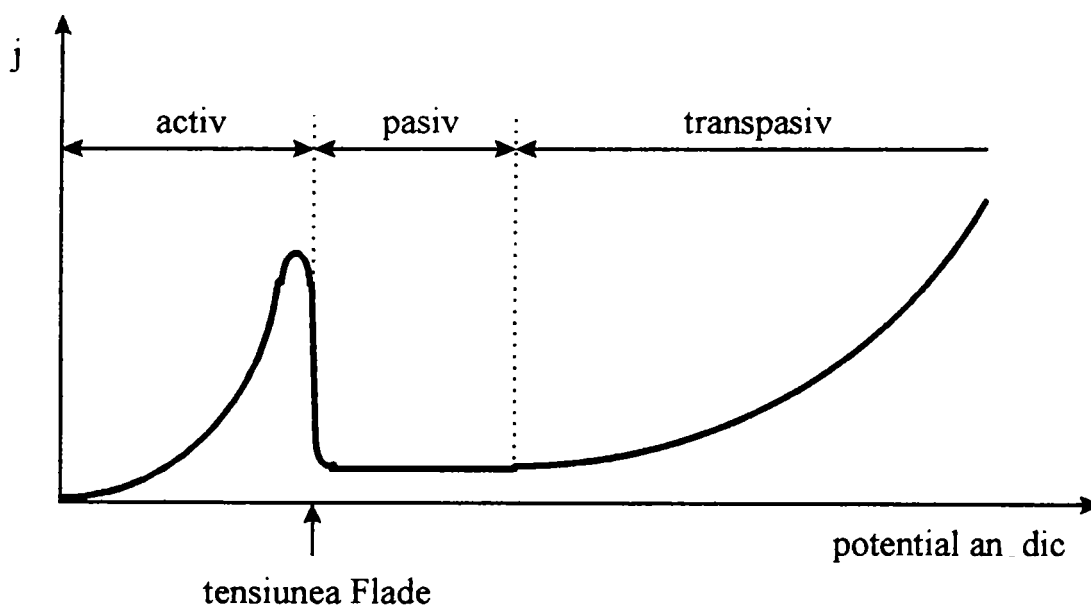


Fig. 2.3. Zonele de pasivitate electrochimică

- U_A și U_C reprezintă căderile de tensiune în stratul limită dintre electrolit și anod, respectiv catod. Aceste tensiuni se datorează formării unor rezistențe ohmice în cele două straturi limită.
- U_{GA} și U_{GC} reprezintă căderile de tensiune datorate degajărilor de gaze la anod, respectiv catod.
- U_E reprezintă căderea de tensiune în electrolit, constituind tensiunea utilă care determină efectiv procesul de dizolvare anodică.

Deci se poate scrie următoarea relație:

$$U = U_E + U_P + U_A + U_{GA} + U_C + U_{GC}. \quad (2.10)$$

Dacă definim potențialul total de polarizare prin

$$U_P^* = U_P + U_A + U_{GA} + U_C + U_{GC}, \quad (2.11)$$

atunci căderea de tensiune în electrolit se scrie sub forma

$$U_E = U - U_P^*. \quad (2.12)$$

Datorită fenomenelor complexe care apar în timpul procesului de dizolvare anodică, potențialul total de polarizare nu se poate stabili teoretic. Experimental s-a stabilit că, în cazul utilizării electroliților pe bază de $NaNO_3$, potențialul total de polarizare este de cca. 4...6 V.

2.1.3. Influența unor factori asupra parametrilor prelucrării prin eroziune electrochimică

În principiu, legile cantitative ale procesului de prelucrare electrochimică sunt *legile electrolizei* descoperite de Faraday [60], [64]:

Legea I

Masa de substanță dizolvată m este direct proporțională cu cantitatea de electricitate q care trece prin electrolit:

$$m = k \cdot q[g]. \quad (2.13)$$

Factorul de proporționalitate k se numește *echivalent electrochimic*.

Dacă admitem că în cursul procesului de prelucrare intensitatea curentului electric i care trece prin electrolit este variabilă în timp, atunci

$$q = \int_0^{t_p} i \cdot dt[C], \quad (2.14)$$

în care t_p reprezintă durata prelucrării.

Practic însă, procesul se desfășoară cu un anumit randament, astfel încât masa prelevată se calculează cu relația

$$m = \eta \cdot k \cdot \int_0^{t_p} i \cdot dt, \quad (2.15)$$

în care randamentul η este definit prin raportul dintre masa efectiv dizolvată și cea teoretică, în condițiile date.

Legea a II-a

Echivalentul electrochimic al unei substanțe este proporțional cu echivalentul chimic al substanței respective:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \left[\frac{g}{C} \right], \quad (2.16)$$

în care:

- $\frac{1}{F}$ reprezintă factorul de proporționalitate, unde $F=96485[C]$ este numărul lui Faraday;

- $\frac{A}{n}$ reprezintă echivalentul chimic, unde $A[g]$ este masa atomică a substanței, iar n este valența.

Volumul de material prelevat se poate scrie sub forma

$$V = \frac{1}{\rho} \cdot \eta \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot \int_0^{t_p} i \cdot dt, \quad (2.17)$$

în care $\rho [g/mm^3]$ reprezintă densitatea materialului prelucrat.

Definind echivalentul electrochimic volumic teoretic prin relația

$$k_{vt} = \frac{A}{\rho \cdot F \cdot n}, \quad (2.18)$$

volumul prelevat devine

$$V = \eta \cdot k_{vt} \cdot \int_0^{t_p} i \cdot dt. \quad (2.19)$$

Echivalentul electrochimic volumic teoretic ar trebui să aibe o valoare bine stabilită, dar deoarece transferul ionilor metalici în soluție se poate realiza la diferite valențe, valoarea lui variază între anumite limite. De exemplu, la prelucrarea cromului, echivalentul electrochimic volumic teoretic poate varia de la $2,019 \text{ mm}^3 (A \text{ min})$ pentru $n=2$ până la $0,673 \text{ mm}^3 (A \text{ min})$ pentru $n=6$.

În urma experimentărilor s-a constatat că și randamentul este influențat de o serie de factori specifici procesului, motiv pentru care este mai convenabilă definirea și utilizarea unei mărimi care să caracterizeze global procesul de prelucrare. Această mărime se numește *echivalent electrochimic volumic efectiv* și se definește prin relația

$$k_v = \eta \cdot k_{vt}. \quad (2.20)$$

Deci volumul de material prelevat se poate scrie sub forma

$$V = k_v \cdot \int_0^{t_p} i \cdot dt. \quad (2.21)$$

Intensitatea curentului electric care trece prin electrolit este un parametru de bază al procesului de prelucrare și se poate exprima prin relația

$$i = \frac{U_E}{R_E} [A], \quad (2.22)$$

R_E reprezentând rezistența electrică a electrolitului din interstițiu:

$$R_E = \frac{z}{\gamma \cdot S} [\Omega], \quad (2.23)$$

în care:

- $z [mm]$ reprezintă grosimea interstițiului de lucru (distanța dintre electrozi);
- $\gamma [1/(\Omega mm)]$ reprezintă conductivitatea electrică a electrolitului;

- $S [mm^2]$ reprezintă aria suprafeței prelucrate.

2.2. STUDIU DE SINTEZĂ PRIVIND PROCEDEELE DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ

Procesul de pasivare a suprafeței de prelucrat, descris în paragraful 2.1.2, conduce la o frânare a procesului de dizolvare anodică. De aici rezultă necesitatea unor măsuri de *depasivare*. În funcție de modul cum se realizează, depasivarea se numește [28], [64]:

- *naturală*, când depasivarea este realizată în mod natural prin degajările de gaze și prin dizolvare;
- *chimică*, când în electrolit se introduc agenți chimici care favorizează dizolvarea stratului pasivizat de pe suprafața piesei;
- *hidrodinamică*, când procesul de depasivare este asigurat în cea mai mare parte prin circulația forțată a electrolitului introdus sub presiune în interstițiul dintre electrozi;
- *mecanică*, când depasivarea este realizată de către acțiunea mecanică a unui corp solid;
- *electrică*, când depasivarea este realizată prin schimbarea periodică a polarității electrozilor.

Deoarece modul în care se realizează depasivarea are o foarte mare influență asupra caracteristicilor de bază ale procesului de eroziune electrochimică, cel mai potrivit criteriu de clasificare a diferitelor procedee de prelucrare electrochimică este modul de realizare a depasivării. O astfel de clasificare este prezentată în figura 2.3 [64].

Prelucrarea electrochimică se poate realiza și în combinație cu alte procedee de prelucrare. Mai frecvent utilizate în construcția de mașini sunt următoarele *procedee complexe* de prelucrare [64]:

- *Prelucrarea complexă electrochimică și mecanică*. În acest caz adaosul de prelucrare este îndepărtat în urma acțiunii simultane a eroziunii electrochimice și a unei acțiuni mecanice (cel mai frecvent o acțiune abrazivă);
- *Prelucrarea complexă electrochimică și electrică (anodomecanică)*. Prelevarea de material are loc printr-o acțiune simultană a eroziunii electrochimice și a celei electrice.
- *Prelucrarea complexă electrochimică și cu ultrasunete*. Adaosul de prelucrare este îndepărtat prin acțiunea simultană a eroziunii electrochimice și a celei cu ultrasunete.

În principiu, este posibilă folosirea tuturor modalităților de generare a formei piesei, însă utilizarea cea mai largă o are copierea.

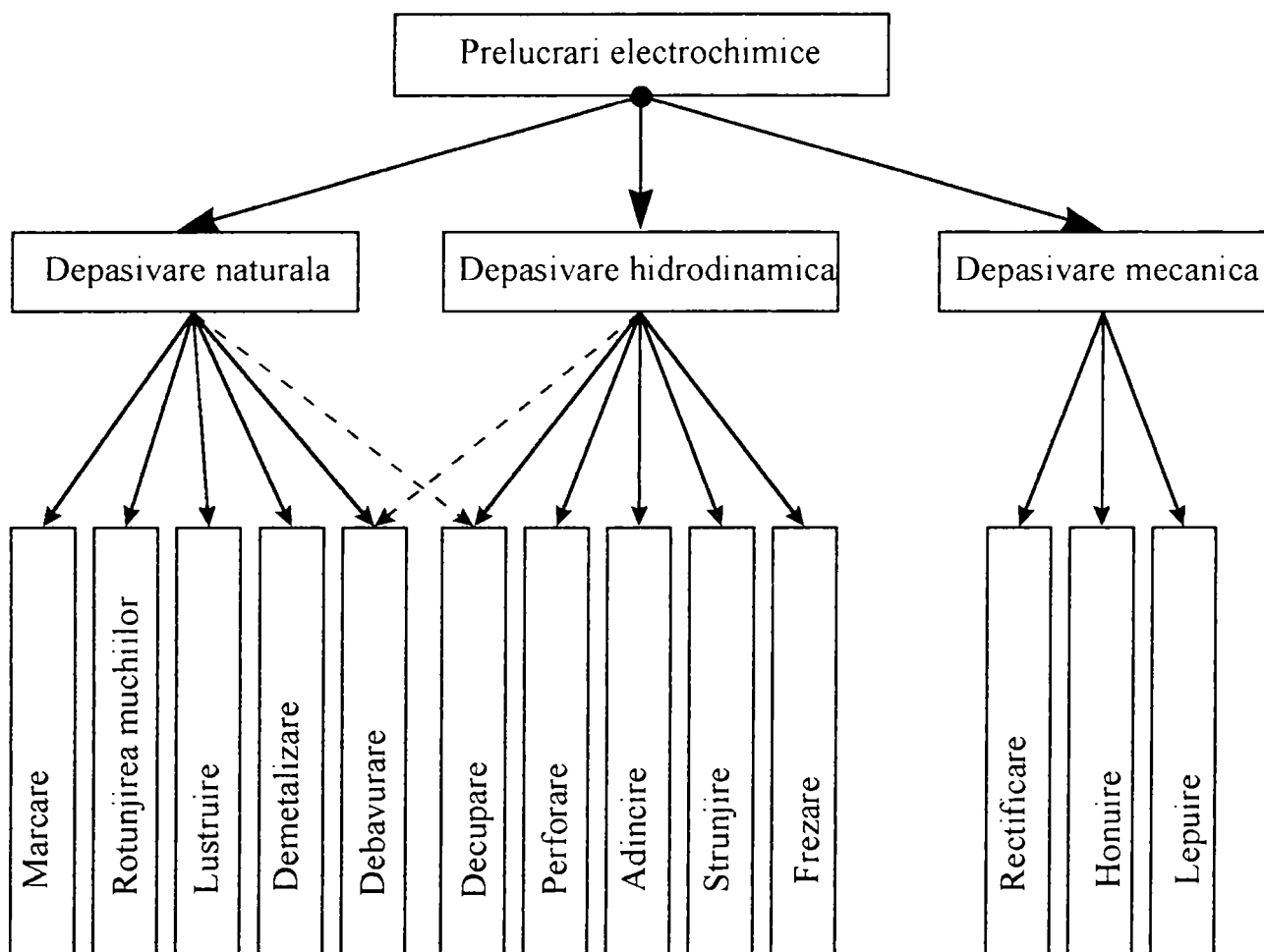


Fig. 2.4. Clasificarea procedeelor de prelucrare electrochimică

2.2.1. Prelucrarea prin eroziune electrochimică cu depasivare naturală

De regulă prelucrările electrochimice cu depasivare naturală se realizează în băi de prelucrare în interiorul cărora se află cei doi electrozi scufundați în electrolit. Cel mai adesea electrolizii folosiți sunt acizi, motiv pentru care băile sunt construite din materiale rezistente la coroziune.

În figura 2.4 este schițat cazul prelucrării unei suprafețe plane de arie S , fără deplasare relativă între cei doi electrozi [64]. Semnificația notațiilor folosite în figură este:

- z_i - mărimea inițială a interstițiului;
- z_f - mărimea finală a interstițiului;
- dz - variația interstițiului în intervalul de timp dt ;
- A_p - adaosul de prelucrare care trebuie îndepărtat.

În acord cu relația 2.21, volumul elementar de material erodat se scrie sub forma

$$dV = k_v \cdot i \cdot dt \quad (2.24)$$

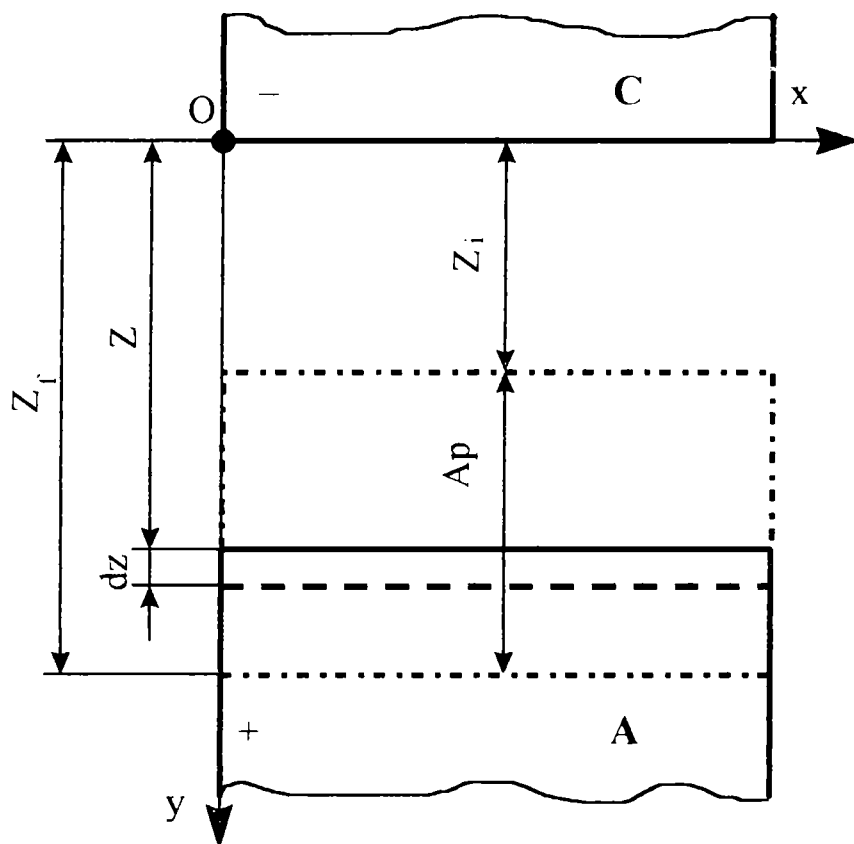


Fig. 2.5. Prelucrarea fără avans a unei suprafețe plane

Atunci variația elementară a mărimii interstițiului este

$$dz = \frac{dV}{S} = \frac{1}{S} \cdot k_v \cdot i \cdot dt. \quad (2.25)$$

Ținând cont de expresiile intensității curentului electric (relația 2.22) și a rezistenței electrice a electrolitului din interstițiu (relația 2.23), rezultă că

$$dz = \frac{1}{S} \cdot k_v \cdot U_E \cdot \frac{\gamma \cdot S}{z} \cdot dt, \quad (2.26)$$

sau

$$z \cdot dz = k_v \cdot U_E \cdot \gamma \cdot dt. \quad (2.27)$$

Prin integrare, ținând cont de valoarea inițială a interstițiului și de durata prelucrării, se obține valoarea finală a interstițiului:

$$z_f = \sqrt{z_i^2 + 2 \cdot k_v \cdot U_E \cdot \gamma \cdot t_p}. \quad (2.28)$$

Utilizând această relație se pot determina:

- adaosul de prelucrare îndepărtat într-un anumit interval de timp;
- timpul necesar îndepărtării unui anumit adaos.

Plecând de la relația (2.25) se poate determina și viteza de dizolvare anodică:

$$v_a = \frac{dz}{dt} = \frac{1}{S} \cdot k_v \cdot i = k_v \cdot j, \quad (2.29)$$

în care j [A/mm^2] reprezintă densitatea curentului electric.

De asemenea, ținând cont de relațiile (2.22) și (2.23), viteza de dizolvare anodică se poate exprima și sub forma

$$v_a = \frac{k_v \cdot U_{EY}}{z} \quad (2.30)$$

Pentru operațiile de *debavurare*, *rotunjire a muchiilor*, *lustruire* și *demetalizare* catodul exercită o acțiune globală asupra piesei [64]. Din acest motiv el are o formă simplă, iar distanța dintre electrozi este mare în vederea dirijării relativ uniforme a procesului de dizolvare anodică. Apărând o dizolvare preferențială a vîrfurilor rugozităților și a muchiilor, ca și concentratori ai procesului de eroziune, se asigură atât îmbunătățirea substanțială a rugozității suprafeței prelucrate cât și prelucrarea bavurilor. Se lucrează cu densități de curent mici, sub $0,01 A/mm^2$.

Pentru realizarea operațiilor de *marcare* și *decupare* procesul de eroziune trebuie localizat foarte bine, motiv pentru care între cei doi electrozi se interpun șabloane din material izolant, cu grosimea în jur de $0,2 mm$. Se lucrează cu tensiuni mici cuprinse între $5...7 V$, iar densitatea de curent poate lua valori cuprinse între $0,01...0,1 A/mm^2$, în funcție de tipul electrolitului utilizat.

2.2.2. Prelucrarea prin eroziune electrochimică cu depasivare hidrodinamică

Prelucrarea electrochimică cu depasivare hidrodinamică se realizează pe utilaje complexe, de puteri instalate mari. În cazul operației de *debavurare* (fig. 2.6), deoarece adaosul de prelucrare este mic, prelucrarea se realizează fără mișcare de avans. Componenta utilajului destinat operației de debavurare este prezentat schematic în figura 2.7 [64].

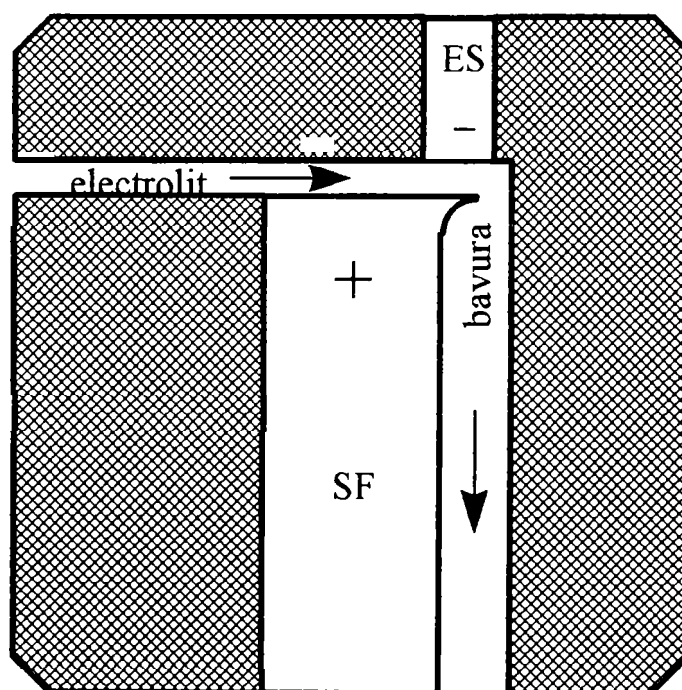


Fig. 2.6. Debavurarea electrochimică

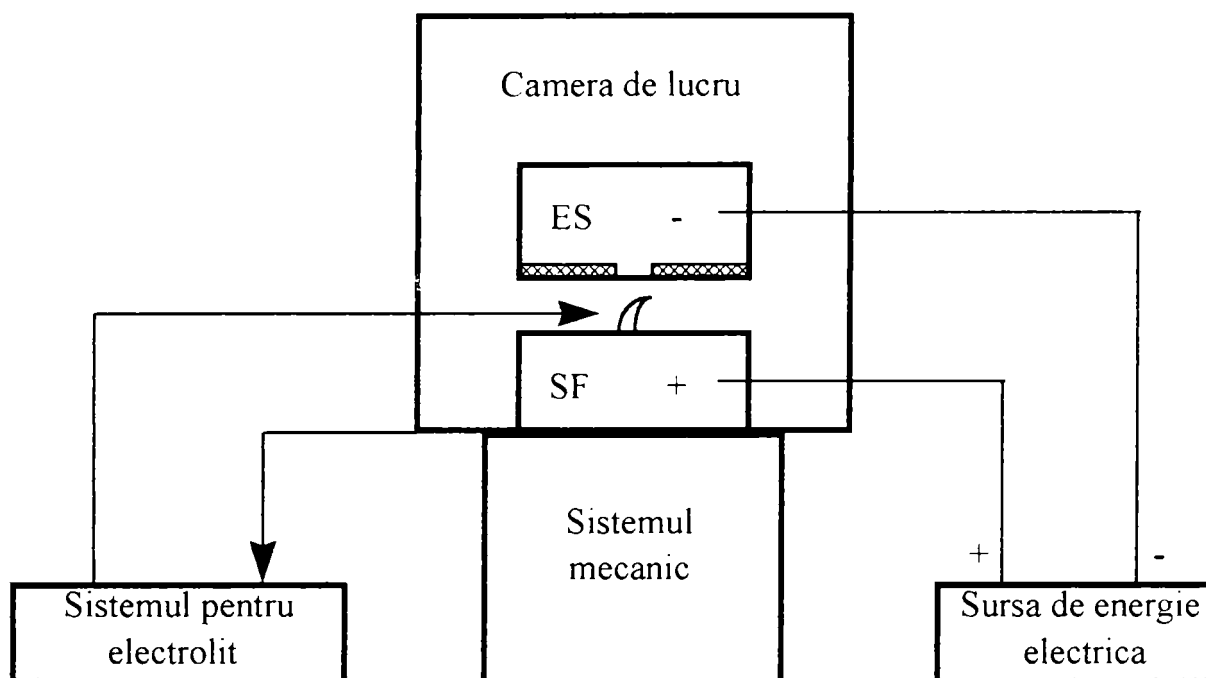


Fig. 2.7. Utilajul pentru debavurare electrochimică

În cazul operațiilor de găurire, decupare, adâncire, strunjire și frezare, deoarece adaosurile de prelucrare sunt mari, prelucrările se realizează cu mișcare de avans. În figura 2.8 este reprezentat schematic utilajul de prelucrare electrochimică cu depasivare hidrodinamică specific operațiilor de găurire, decupare și adâncire electrochimică.

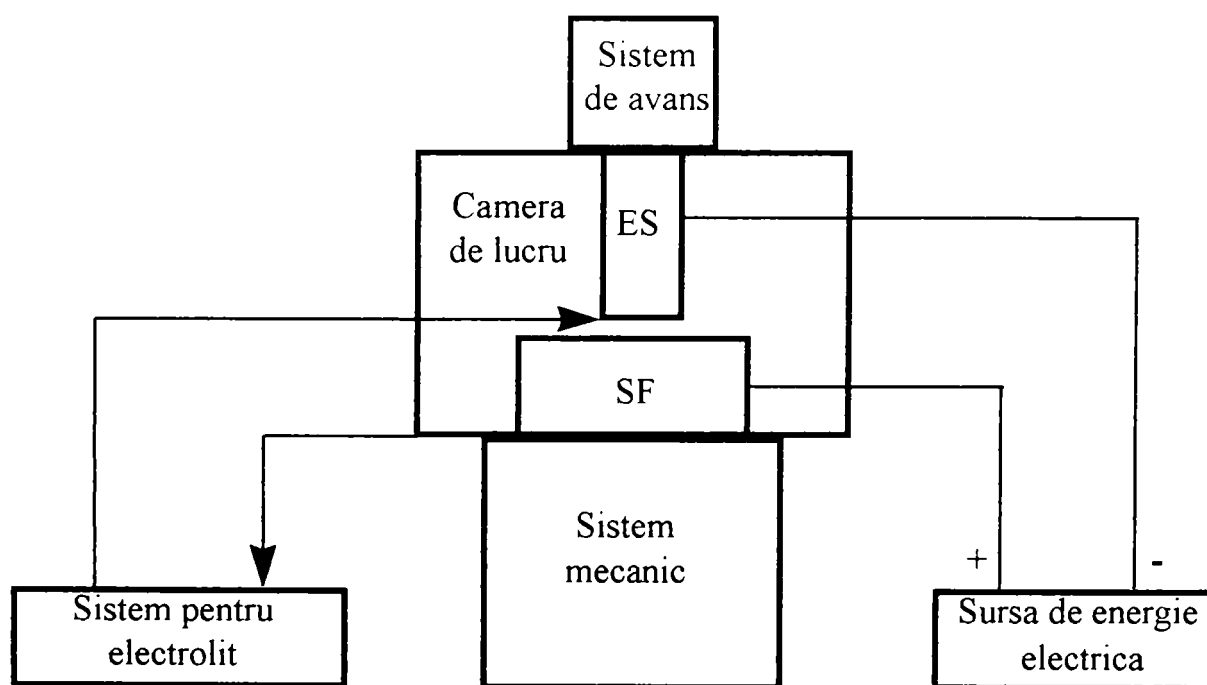


Fig. 2.8 Utilajul specific operațiilor de găurire, decupare și adâncire electrochimică.

În paragraful 2.2.1 s-a arătat că viteza de prelucrare (viteza de dizolvare anodică) este invers proporțională cu valoarea interstițiului dintre electrozi. Deci pentru a

asigura o productivitate mare este necesar să se lucreze cu interstiții cât mai mici. Un interstițiu cât mai mic este necesar și în vederea asigurării unei precizii de prelucrare cât mai ridicate deoarece suprafața prelucrată a piesei este generată prin copierea formei electrodului-sculă. De regulă se lucrează cu interstiții sub 1 mm , în unele cazuri ajungându-se la interstiții de $0,05\text{ mm}$ [10].

Datorită vehiculării electrolitului se poate lucra cu densități de curent mari, atingându-se chiar 6 A mm^2 [10]. Admițând cazul unei prelucrări în care $k_v = 2\text{ mm}^3 (\text{A} \cdot \text{min})$, rezultă că se poate atinge o viteză de prelucrare $v_a = 12\text{ mm min}$.

Pentru asigurarea uniformității procesului de dizolvare anodică pe toată lungimea interstițiului este necesară o viteză de curgere a electrolitului cu atât mai mare cu cât lungimea parcursă de electrolit în interstițiu este mai mare. Se recomandă ca viteza de curgere a electrolitului să corespundă vitezei de dizolvare anodică, conform relației [60]

$$v_E = 4 + 0,6 \cdot v_a^2 [\text{m} / \text{s}]. \quad (2.31)$$

În scopul evitării fenomenului de cavitație trebuie realizată o contrapresiune la ieșirea electrolitului din interstițiu. Contrapresiunea p_2 depinde de presiunea de intrare p_1 și de tipul prelucrării [64]:

- la prelucrarea găurilor și a suprafețelor plane:

$$p_2 = (0,3 \dots 0,5) \cdot p_1; \quad (2.32)$$

- la prelucrarea muchiilor frontale rotunjite:

$$p_2 = (0,2 \dots 0,25) \cdot p_1; \quad (2.33)$$

- la prelucrarea găurilor conice

$$p_2 = (0,1 \dots 0,15) \cdot p_1. \quad (2.34)$$

Contrapresiunea este asigurată cu ajutorul unor camere de contrapresiune.

Operația de frezare electrochimică se realizează după schema din figura 2.9. De regulă electrodul-sculă este o piesă cu geometrie de revoluție și execută o mișcare de rotație în vederea îmbunătățirii circulației electrolitului care este trimis în interstițiu prin interiorul electrodului-sculă sau printr-un ajutor exterior.

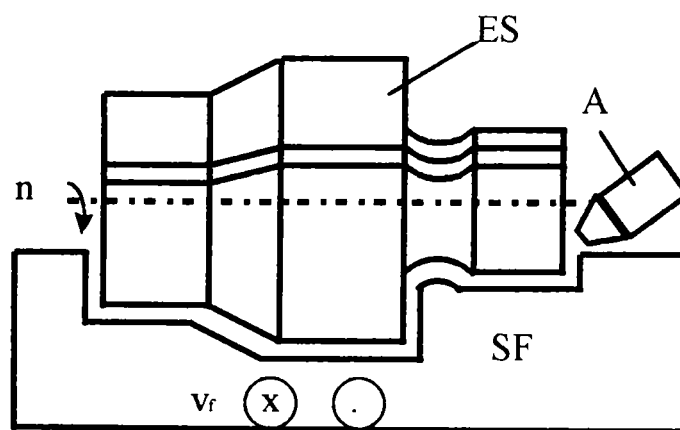


Fig. 2.9. Frezarea electrochimică

În figura 2.10 este reprezentat schematic echipamentul tehnologic de prelucrare electrochimică cu depasivare hidrodinamică specific operației de strunjire electrochimică cu depasivare hidrodinamică [39].

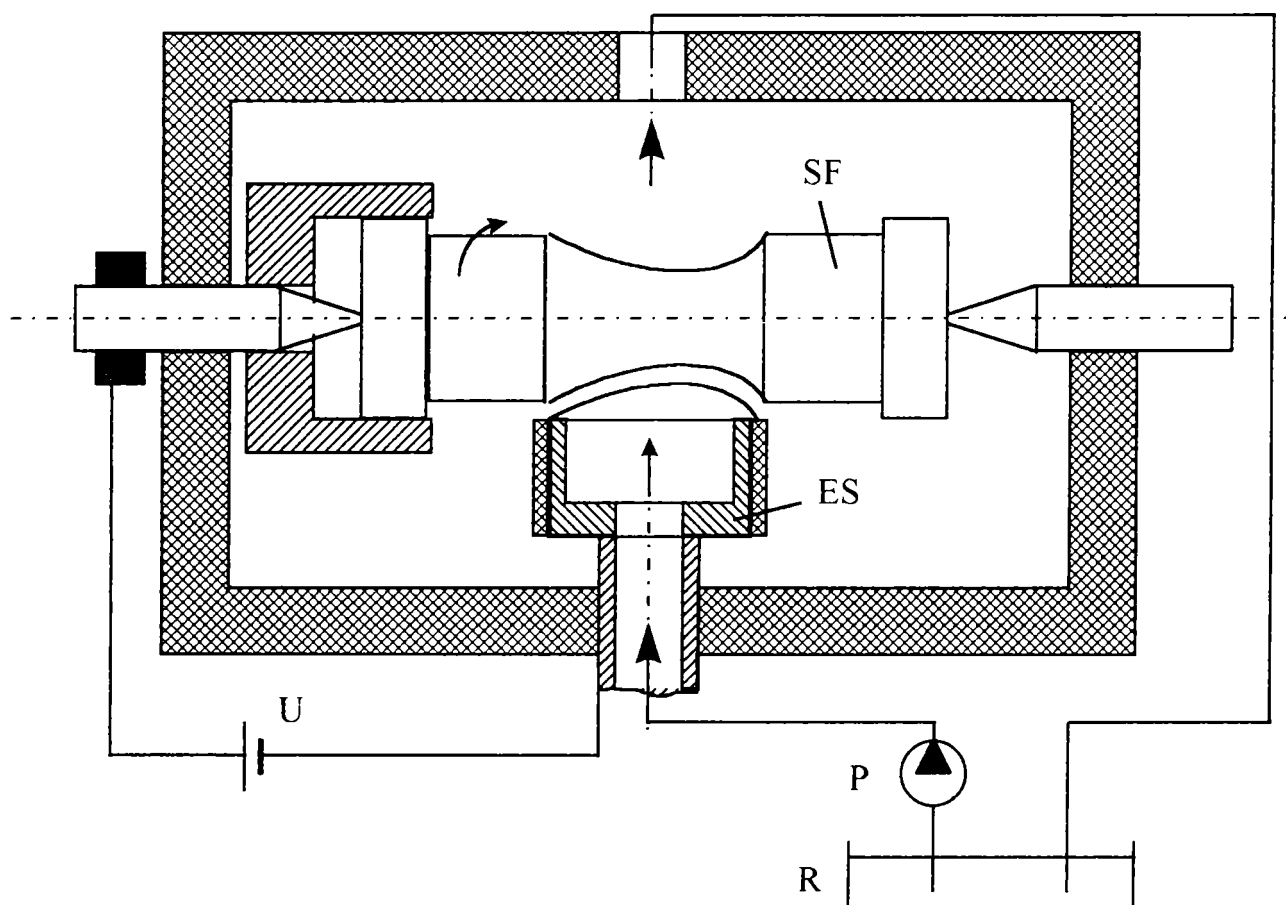


Fig. 2. 10. Strunjirea electrochimică

Semifabricatul execută o mișcare de rotație, iar electrodul-sculă o mișcare de avans transversal. Electrolitul este adus în interstițiu prin interiorul electrodului sculă, dar este posibilă și varianta utilizării unui ajutor exterior interstițiului. Zona de lucru este delimitată de o cameră de lucru închisă.

2.2.3. Prelucrarea prin eroziune electrochimică cu depasivare mecanică

În cazul acestui procedeu de prelucrare există și o componentă mecanică de abraziune. Când această componentă intervine exclusiv în scopul depasivării suprafeței piesei, prelucrarea se numește *electrochimică-mecanică*. Dacă însă componenta mecanică participă direct la îndepărtarea adaosului de prelucrare atunci prelucrarea se numește *electrochimică și mecanică* [64].

Caracterul prelucrării este asigurat prin reglarea presiunii exercitate de electrodul-sculă pe suprafața piesei:

- la presiuni sub $1,5 \text{ daN/cm}^2$ prelucrarea se numește *electrochimică-mecanică*;
- la presiuni peste $1,5 \text{ daN/cm}^2$ prelucrarea se numește *electrochimică și mecanică*.

Din categoria aceasta de prelucrări fac parte următoarele procedee de prelucrare:

- rectificarea electrochimică;
- honuirea electrochimică;
- lepuirea electrochimică.

Rectificarea electrochimică este aplicată în special la ascuțirea sculelor așchietoare armate cu plăcuțe din carburi metalice. Se utilizează mașini foarte asemănătoare celor convenționale, echipate însă cu subsansabilele necesare prelucrării electrochimice :

- sursa de tensiune continuă, caracterizată prin tensiuni sub $10V$ și curent maxim cuprins între $200...2000 A$;
- instalația de alimentare cu electolit.

În figura 2.11 este prezentată schematic operația de ascuțire prin rectificarea electrochimică a unui cuțit de strung [64]. Electrocul sculă este un disc diamantat pe suprafața sa activă (suprafața frontală). Prelucrare se realizează în electrolit pasivizant adus în zona de prelucrare printr-un ajutor exterior. Procedeeul rectificării electrochimice este caracterizat prin următoarele performanțe:

- productivitatea cu cca. 20...30% mai mare decât cea specifică procedeeului clasic de rectificare;
- lipsa tensiunilor interne în piesă;
- obținerea unei rugozități $R_a = 0,1...0,5 \mu m$

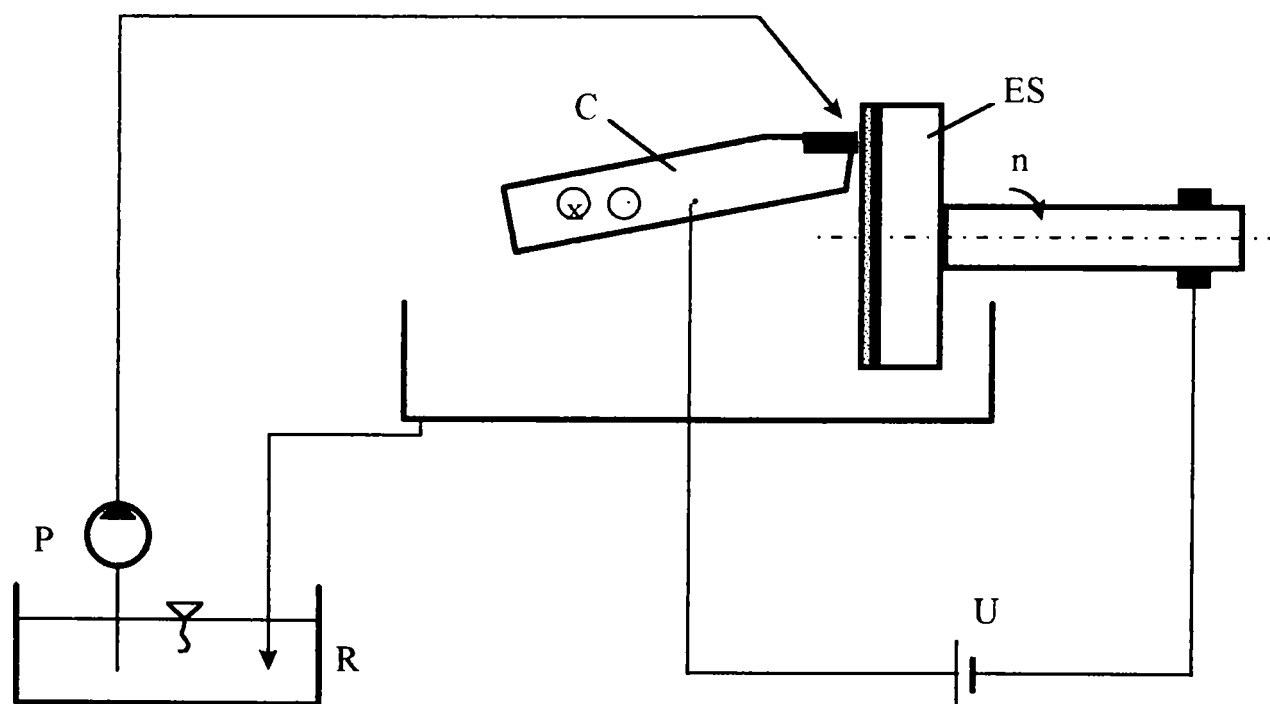


Fig. 2.11. Ascuțirea prin rectificarea electrochimică

Honuirea electrochimică se realizează pe mașini asemănătoare celor clasice care în plus au în componență un generator de tensiune continuă și o instalație de alimentare cu electrolit (fig. 2.12) [40].

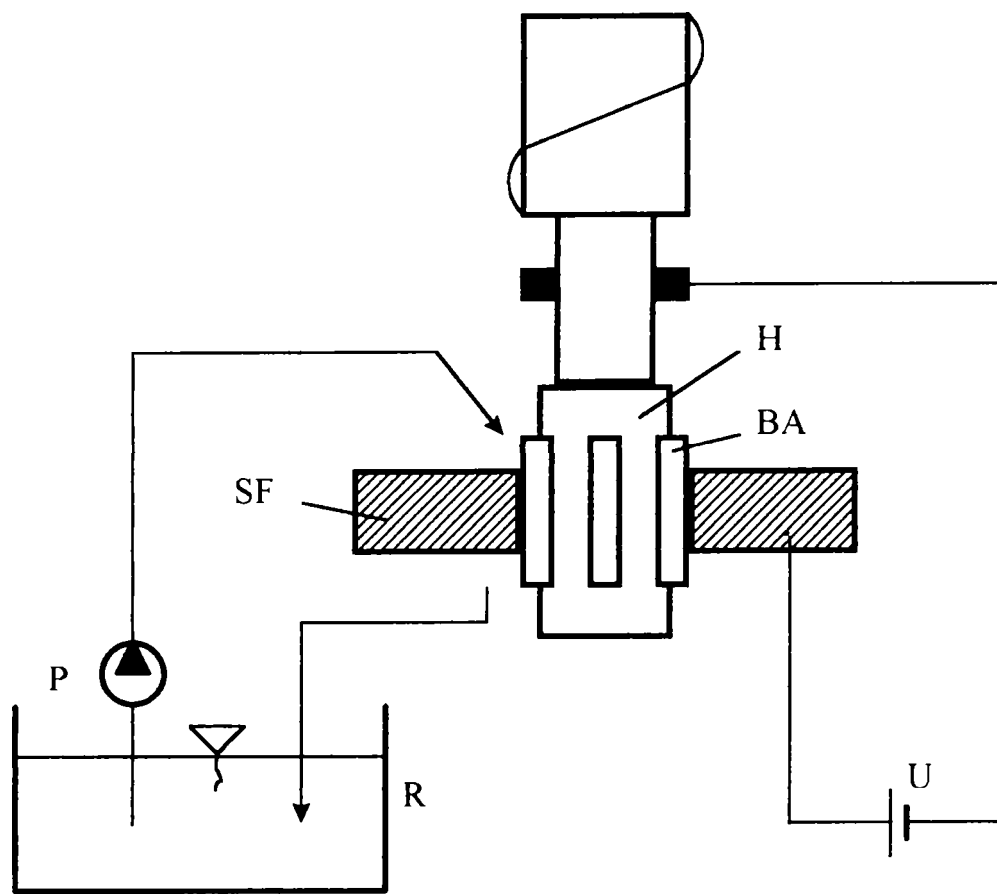


Fig 2.12. Honuirea electrochimică

Honul H utilizat are o construcție foarte asemănătoare celui folosit la honuirea clasică. Între corpul metalic al honului și suprafața alezajului piesei trebuie să existe un interstițiu de cca. 1 mm. Electrolitul este adus în interstițiu la joasă presiune, de regulă pe la unul din capetele alezajului supus prelucrării. Există și variante constructive la care electrolitul este pompat prin interiorul honului, de unde ajunge în interstițiu printr-o serie de fante radiale practicate în spațiile dintre baretele abrazive BA.

Performanțele asigurate de acest procedeu sunt:

- micșorare duratei operației de honuire de 3...5 ori;
- creșterea durabilității honului;
- obținerea unei rugozități $R_a=0,016...0,4\mu m$.

Lepuirea electrochimică se realizează cu ajutorul unor dispozitive de tipul celui prezentat în figura 2.13 [60]. Electrolitul, care conține și pulbere abrazivă, este trimis în spațiul de lucru prin interiorul electrodului-sculă la o presiune de cca. 5 bar. Depasivare este realizată de baretele abrazive BA. Prin lepuire electrochimică se obține o rugozitate $R_a=0,025...0,1\mu m$.

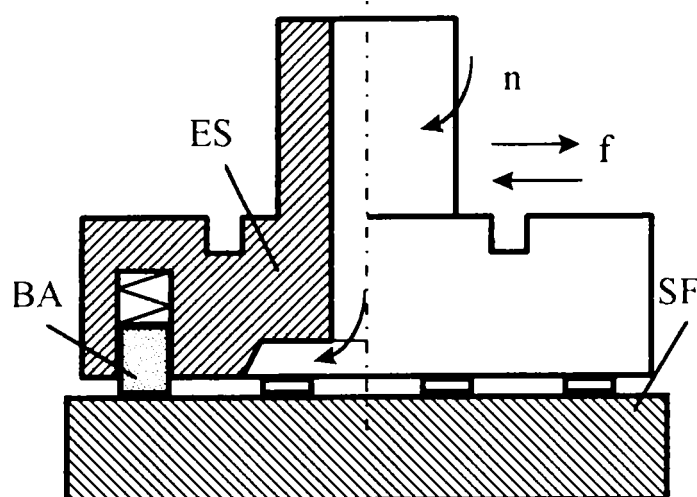


Fig. 2.13. Lepuirea electrochimică

2.2.4. Prelucrabilitatea diferitelor materiale prin eroziune electrochimică

Teoretic, în conformitate cu relația 2.29, viteza de prelucrare electrochimică este proporțională cu densitatea curentului de lucru. Practica a demonstrat că, în funcție de tipul materialului prelucrat, tipul de electrolit folosit și alți factori, această dependență nu este decât în foarte puține cazuri liniară. Astfel, pot apărea o serie de mecanisme de reacție specifice [27], [39], [40], [60], [64]:

- constituirea unor straturi pasivizante pe suprafața suprafeței prelucrate;
- modificări în mecanismul de eroziune datorate modificării valenței unuia sau mai multor elemente de aliere;
- apariția unor reacții secundare în spațiul de lucru.

Se poate face o clasificare a materialelor după gradul lor de prelucrabilitate electrochimică în funcție de tipul caracteristicii $v_a=f(j)$. Deoarece aceste caracteristici reflectă reacțiile de la anod, un tip specific de caracteristică descrie o anumită formă tipică de eroziune.

Factorii de influență care determină desfășurarea procesului de eroziune electrochimică sugerează faptul că o clasificare pe grupe de materiale având în vedere prelucrabilitatea nu se poate realiza doar după criteriul compoziției chimice a acestor materiale. În plus, același material se comportă diferit la prelucrarea cu diverși electroliti.

Cercetările efectuate până în prezent au evidențiat influența foarte mare a naturii și concentrației electrolitului atât asupra productivității prelucrării cât și asupra preciziei dimensionale, de formă și rugozității suprafeței prelucrate. Astfel a fost evidențiată variația foarte pronunțată a echivalentului electrochimic volumic efectiv în raport cu densitatea de curent în cazul electrolitelor așa-zisi *pasivizanți*. În cazul electrolitelor *activi* s-a constatat că această influență este mult mai redusă (vezi figura 2.14).

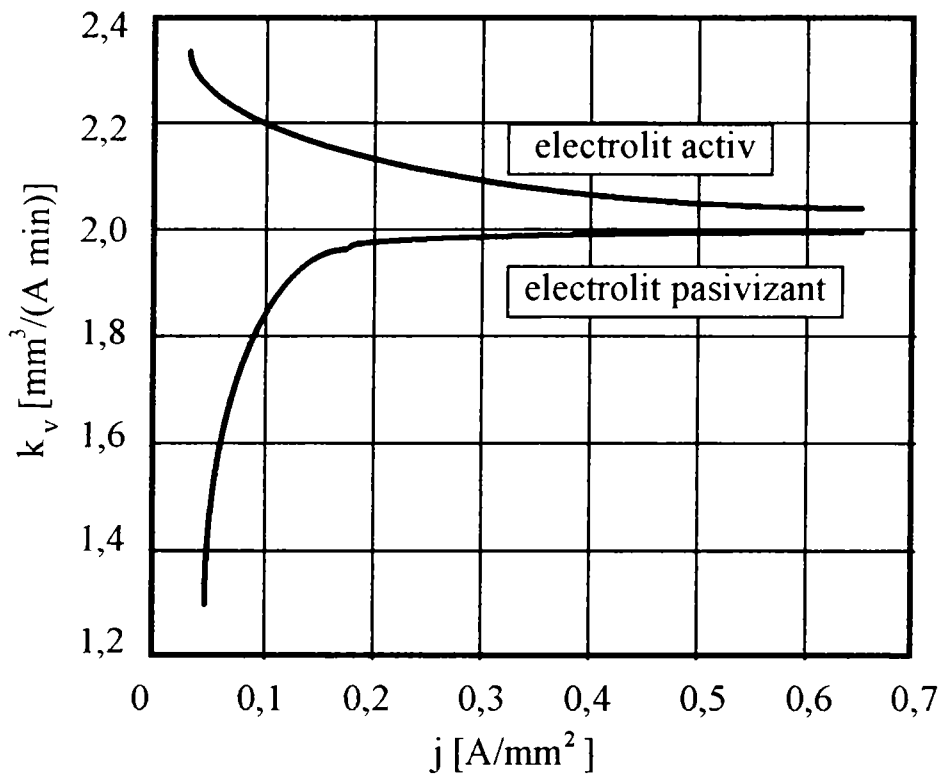


Fig. 2.14. Dependenta echivalentului electrochimic volumic efectiv în funcție de densitatea de curent

Prelucrabilitatea materialelor în cazul utilizării electroliților activi (tip NaCl) [39], [40]

Se ivesc trei tipuri de caracteristici, prezentate în figurile 2.15, 2.16 și 2.17. Caracteristica din figura 2.15 corespunde cazului în care reacțiile din spațiul de lucru se desfășoară constant, fără apariția de reacții secundare care să modifice concentrația de sarcini electrice din soluția de electrolit. În acest caz mecanismul de eroziune nu depinde de densitatea curentului de lucru. În această grupă de materiale se pot include toate oțelurile omogene și polifazice ale căror faze slab dizolvabile sunt atât de dispersate încât acestea pot fi îndepărtate din materialul de bază de către jetul de electrolit pompat în interstiul dintre cei doi electrozi.

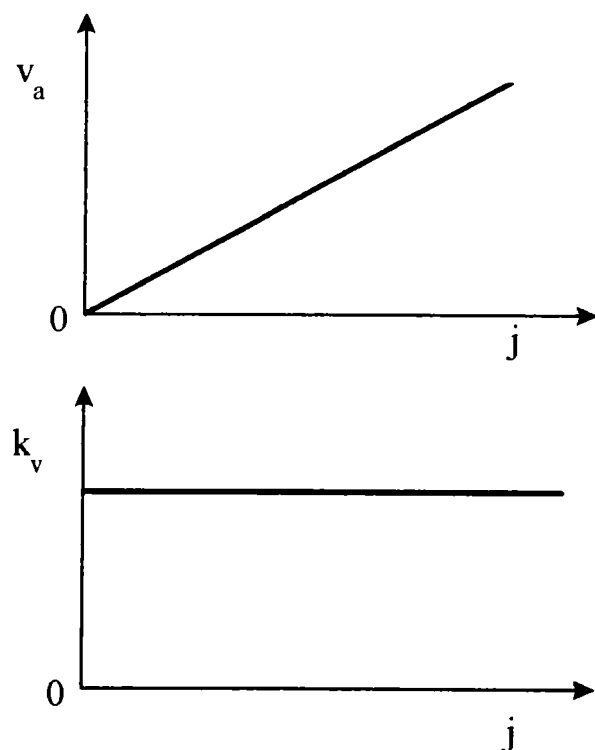


Fig. 2.15. Caracteristicile de prelucrabilitate a oțelurilor omogene și polifazice în cazul utilizării electroliților activi.

Se observă faptul că graficele din figurile 2.16 și 2.17 au puncte de discontinuitate.

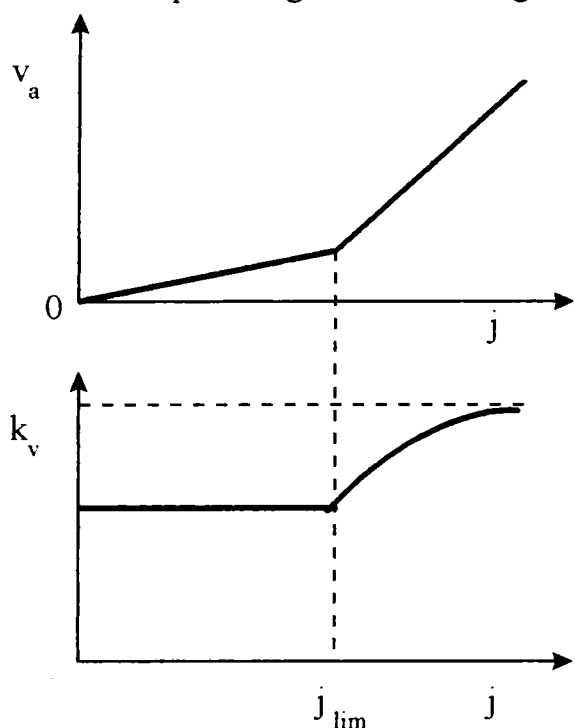


Fig. 2.16. Caracteristicile de prelucrabilitate a oțelurilor cu un conținut ridicat de Ni și Cr în cazul utilizării electroliților activi.

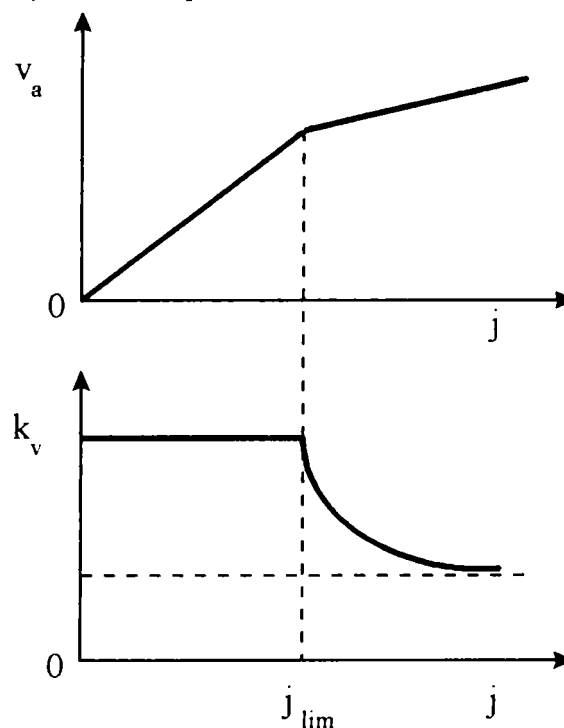


Fig. 2.17. Caracteristicile de prelucrabilitate a oțelurilor cu compoziție lamelară de cementită în cazul utilizării electroliților activi

În principal, un punct de discontinuitate al graficelor indică o modificare a mecanismelor de dizolvare anodică. În aceste cazuri poate fi vorba de următoarele cauze:

- dizolvarea anodică se realizează dependent de densitatea curentului, la valori diferite ale valenței. O mărire (micșorare) a valenței determină micșorarea (creșterea) pantei caracteristicii $v_a=f(j)$;
- apariția (dispariția) de reacții secundare are efect de micșorare (creștere) a pantei caracteristicii $v_a=f(j)$.

Deci o a doua grupă de materiale are caracteristica de tipul celei din figura 2.16, cu un comportament tipic derivativ. În această grupă sunt incluse toate materialele care au conținut mare de Cr și Ni. Dintre acestea pot fi menționate oțelurile austenitice și refractare.

A treia grupă de materiale, având caracteristica de prelucrabilitate din figura 2.17, este formată din oțeluri cu o compoziție lamelară de cementită care împiedică spălarea cu jet a fazelor slab dizolvabile. În acest caz erodarea se produce pe cale electrochimică, la fel ca la materialul de bază ușor dizolvabil.

Prelucrabilitatea materialelor în cazul utilizării electroliților pasivizanți (tip NaNO_3) [39], [40]

Se disting trei tipuri de caracteristici, prezentate în figurile 2.18, 2.19 și 2.20.

Caracteristica din figura 2.18 descrie comportamentul pasivizant al procesului de prelucrare electrochimică ce conduce la o blocare a procesului de dizolvare anodică la densități de curent inferioare lui j_{min} . Acest tip de caracteristică este specifică următoarelor tipuri de oțeluri având un conținut de până la 12%Cr, 2,5% Ni, respectiv 2% Mo:

- oțeluri cu structură feritică;
- oțeluri cu structură perlitică;
- oțeluri cu structură martensitică.

Caracteristica din figura 2.19 este specifică oțelurilor austenitice. În domeniul inferior al densității de curent ($j < j_{lim}$) mecanismele de eroziune sunt similare celor descrise anterior.

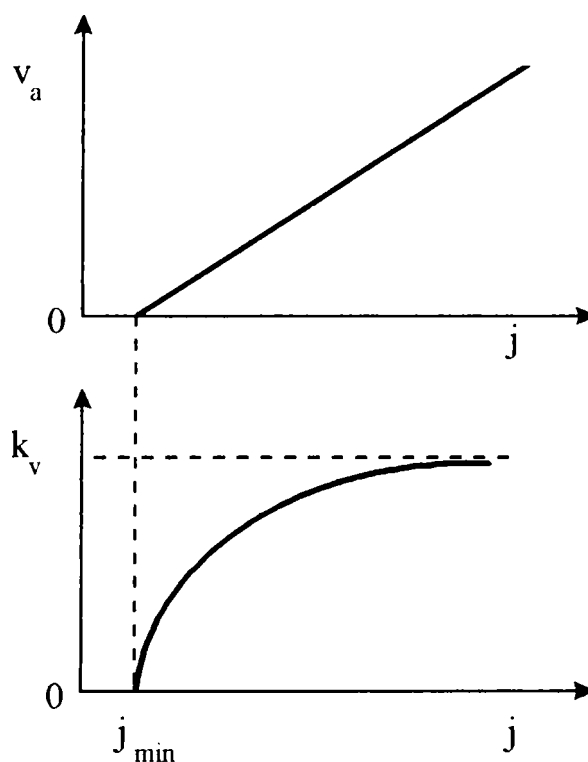


Fig. 2.18. Caracteristicile de prelucrabilitate a oțelurilor feritice, perlitice sau martensitice în cazul utilizării electroliților pasivi.

Creșterea echivalentului electrochimic volumic efectiv în domeniul superior al densității curentului este determinată de constituirea pe suprafața anodului a unui strat de acoperire care este caracterizat printr-o bună conductivitate electrică.

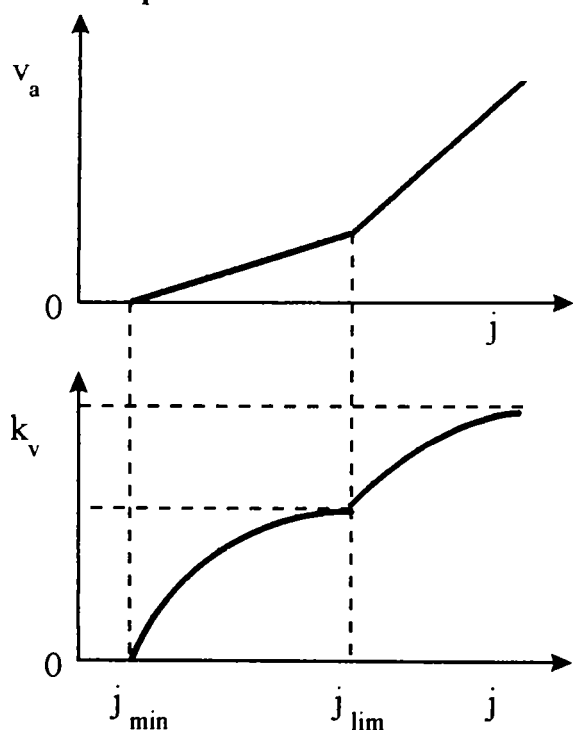


Fig. 2.19. Caracteristicile de prelucrabilitate a oțelurilor austenitice în cazul utilizării electroliților pasivi.

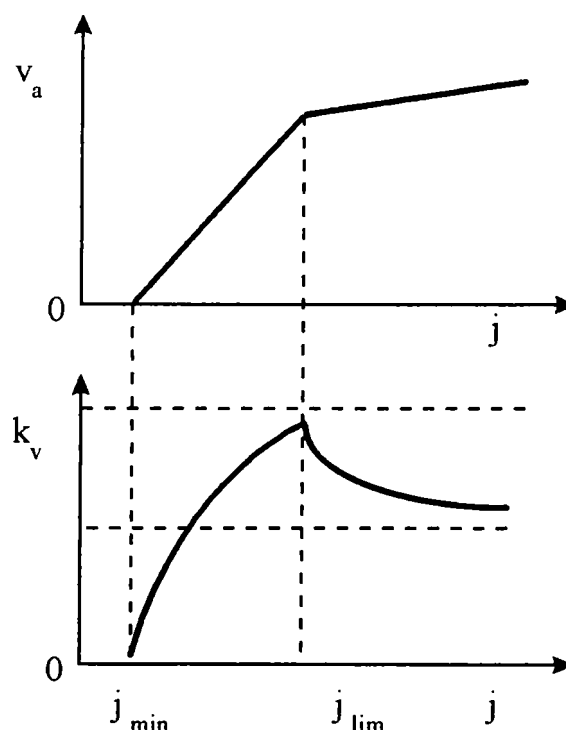


Fig. 2.20. Caracteristicile de prelucrabilitate a oțelurilor cu un conținut ridicat de Ni în cazul utilizării electroliților pasivi.

Aliajele cu un conținut ridicat de *Ni* au caracteristica prezentată în figura 2.20. În domeniul inferior al densității de curent comportamentul este similar celui întâlnit în cazul prelucrării austenitice. În schimb, la valori mari ale densității de curent ($j > j_{lim}$) nu se mai formează stratul de acoperire de conductivitate ridicată.

2.2.5. Calitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune electrochimică

Complexitatea factorilor de influență specifici electrolitului și materialului prelucrat face dificilă stabilirea rugozității suprafeței prelucrate în funcție de densitatea de curent.

În figura 2.21 este prezentată variația rugozității în cazul utilizării electrolitului 12% *NaCl* la 35 °C, materialul prelucrat fiind *TiAl6V4* [39], [40]:

- curba *a* corespunzătoare unui interstițiu $z=1,0\text{mm}$;
- curba *b* corespunzătoare unui interstițiu $z=0,3\text{mm}$.

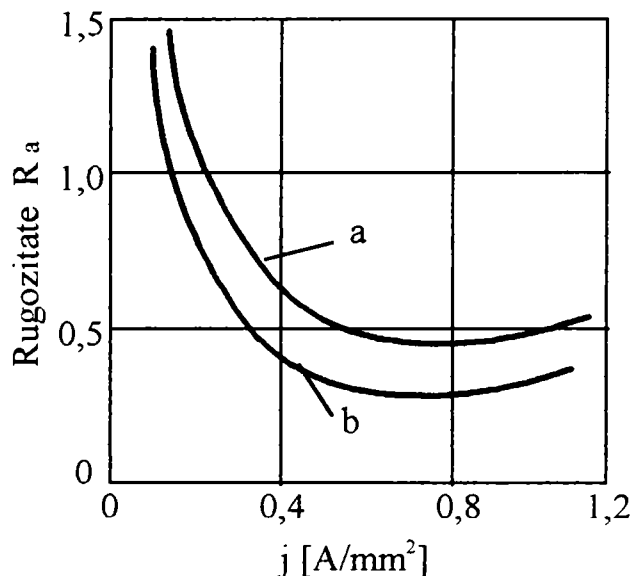


Fig. 2.21. Rugozitatea suprafeței în cazul prelucrării aliajului *TiAl6V4* în 12% *NaCl* la 35°C.

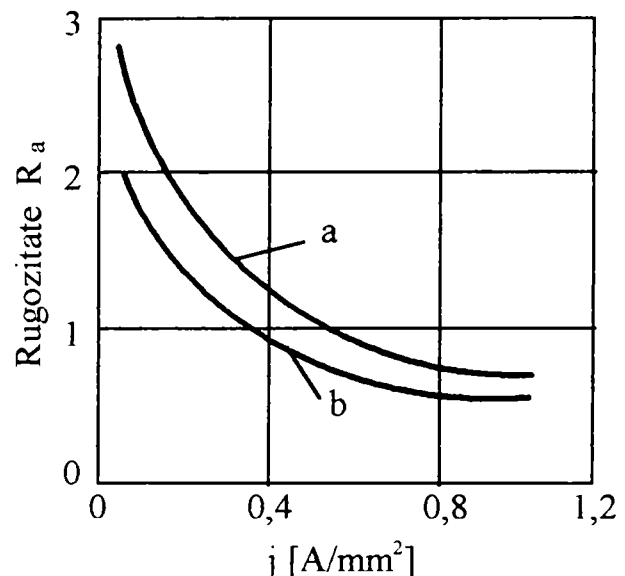


Fig. 2.22. Rugozitatea suprafeței în cazul prelucrării oțelului *56NiCrMoV7* în 20% *NaNO₃* la 35°C.

Și în cazul utilizării electrolitelor pasivizanți alura caracteristicilor de rugozitate este asemănătoare. În figura 2.22 [39], [40] este prezentată dependența rugozității de densitatea curentului de lucru în cazul prelucrării oțelului *56NiCrMoV7*, utilizând ca electrolit o soluție 20% *NaNO₃* la 35 °C:

- curba *a* corespunzătoare unui interstițiu $z=1,0\text{mm}$;
- curba *b* corespunzătoare unui interstițiu $z=0,3\text{mm}$.

În ambele cazuri se remarcă forma hiperbolică a caracteristicilor, observându-se însă tendința de aplatizare la valori mari ale densității de curent. Obținerea unor rugozități mici prin eroziune electrochimică se explică prin faptul că vârfurile

microneregularităților se constituie în concentratori de prelucrare. La prelucrarea suprafețelor complexe, deoarece interstițiul lateral este mai mare, densitatea de curent în aceste zone va fi mică și deci pe suprafețele laterale rugozitatea va fi mai mare.

2.3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR

În ultimii ani procedeele de prelucrare electrochimică a aliajelor metalice au luat o amploare din ce în ce mai mare datorită faptului că prin aceste procedee se pot realiza piese de formă complicată, la toleranțe strânse, din materiale cu prelucrabilitate redusă prin așchiere sau chiar neprelucrabile prin așchiere cum sunt oțelurile de scule, respectiv carburile metalice.

Deși primele descrieri de utilaje destinate prelucrării dimensionale prin eroziune electrochimică s-au făcut în anii '40, primele aplicații industriale au apărut în anii '60, când s-a produs deplina consacrare a procedeelelor de prelucrare prin eroziune electrochimică, acestea pătrunzând semnificativ în industria unor țări ca R.F.Germania, S.U.A., Franța, Japonia [27].

În prezent prelucrările prin eroziune electrochimică sunt folosite la scară industrială pentru realizarea găurilor simple și profilate în materiale dure, a cavităților de formă complexă a matrițelor, a paletelor de turbină, pentru debavurarea pieselor prelucrate prin așchiere, etc. Utilajele de prelucrare dimensională prin eroziune electrochimică produse de firme ca Anocut (S.U.A.), Charmilles (Elveția), Hitachi (Japonia) utilizează comanda numerică a procesului de prelucrare, asigurând astfel o productivitate și precizie de prelucrare ridicate, în condiții depline de protecție a mediului.

La Universitatea "Politehnica" din Timișoara cercetările sistematice privind procedeele de prelucrare prin eroziune electrochimică au început în anii '60. Au fost realizate o serie de sisteme experimentale necesare studiului fenomenului de eroziune electrochimică, pe baza cărora s-au proiectat și realizat mașini și echipamente tehnologice de prelucrare prin diverse procedee electrochimice. Astfel, au fost realizate:

- micromașină pentru prelucrarea prin eroziune electrochimică de 50 A;
- micromașină pentru prelucrarea prin eroziune electrochimică de 100 A;
- mașină de putere medie pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrochimică hidrodinamică;
- mașină pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrochimică hidrodinamică de 200 A;
- mașină pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrochimică hidrodinamică de 1450 A;
- dispozitive de finisat palete de turbină;
- instalație de finisare a roților dințate prin eroziune electrochimică hidrodinamică;

- instalație de finisare electrochimică a roților dințate prin rostogolire;
- instalații de lustruire;
- instalații de debavurare pentru piese de diferite tipo-dimensiuni;
- instalații pentru profilarea electrochimică a sonotrozilor mașinilor de prelucrat cu ultrasunete destinați recondiționării filierelor;
- instalații pentru marcarea electrochimică;
- mașină de rectificat electrochimic.

De asemenea, s-au efectuat cercetări vizând activarea ultrasonică a procesului de prelucrare electrochimică.

3. STUDIUL TEHNOLOGIEI DE GĂURIRE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ

3.1 UTILAJUL PENTRU GĂURIRE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ

În general mașinile destinate operațiilor de găurire-adâncire prin eroziune electrochimică au o construcție asemănătoare mașinilor-unelte convenționale, însă trebuie avute în vedere o serie de aspecte specifice:

- electrodul-sculă și piesa de prelucrat trebuie izolate electric de celelalte părți ale mașinii în mod durabil și sigur;
- deoarece curenții de lucru sunt de ordinul sutelor sau miilor de amperi este necesar un bun contact electric pe circuitul curentului de lucru;
- sunt necesare sisteme de avans foarte performante pentru a face față forțelor mari din proces și pentru a evita producerea scurt-circuitului între electrodul-sculă și semifabricat;
- prelucrarea se desfășoară în camere de lucru închise pentru evitarea împrăscării cu electrolit și evacuarea controlată a gazelor rezultate în urma procesului electrochimic;
- sunt necesare instalații auxiliare pentru spălarea și conservarea pieselor prelucrate electrochimic, precum și instalații de dozare a electrolitilor utilizați la diversele prelucrări.

Din punctul de vedere al arhitecturii generale, se conturează două tipuri de mașini-unelte pentru găurire-adâncire electrochimică:

- mașini verticale;
- mașini orizontale.

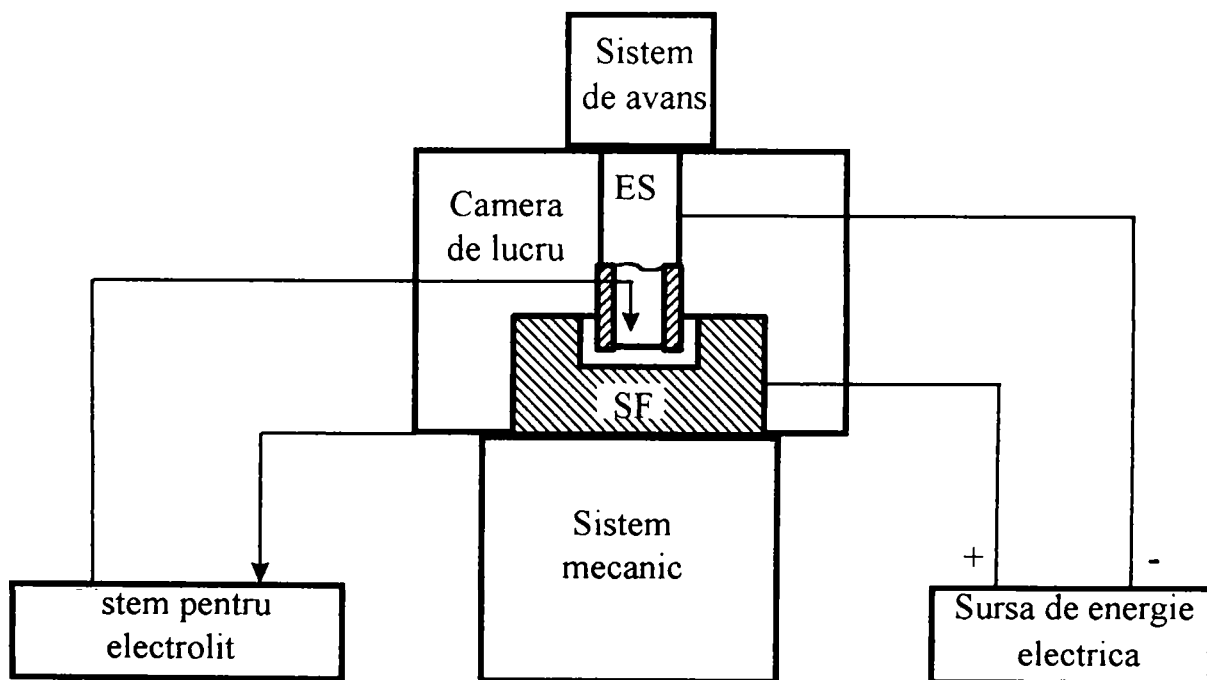


Fig. 3.1. Mașini verticale

Mașinile verticale au componența din figura 3.1 [64]. La aceste mașini mișcarea de avans a electrodului- sculă este orientată pe direcție verticală. Cele mai multe mașini verticale au o singură unitate de avans. Există și mașini verticale cu două unități de avans care lucrează în paralel, fiecare cu propriul său sistem de avans.

Mașinile orizontale au arhitectura din figura 3.2 [39]. La aceste mașini mișcarea de avans a electrodului- sculă este orientată pe direcție orizontală.

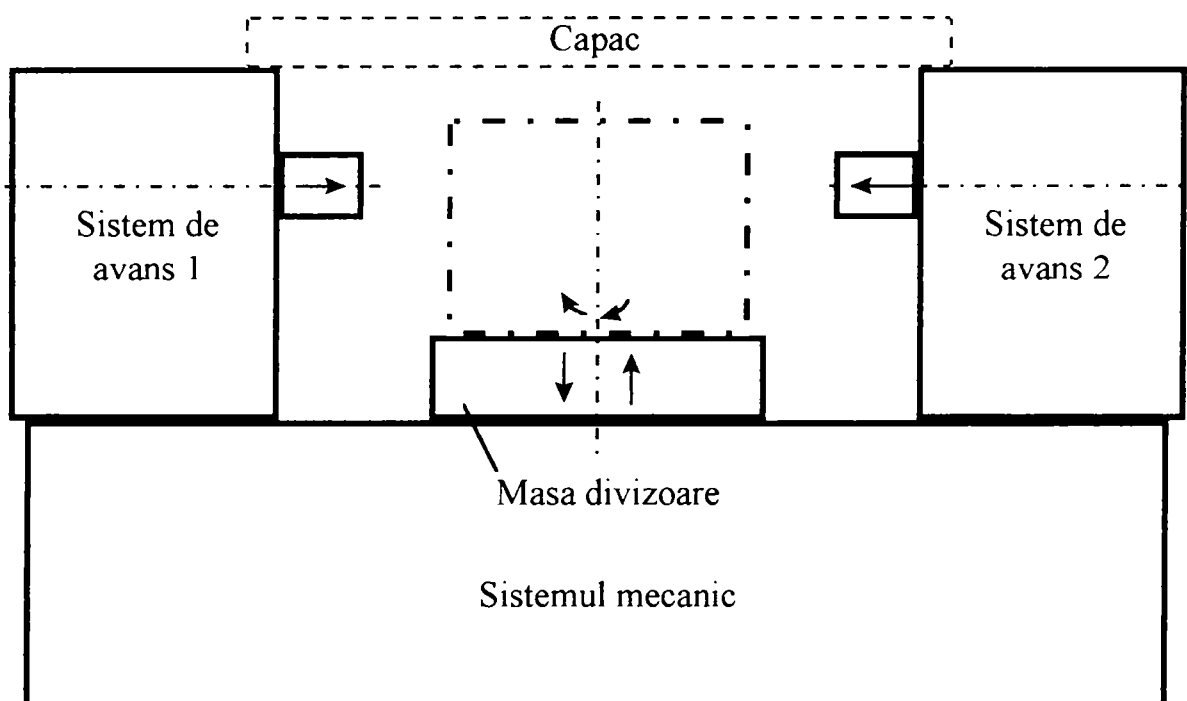


Fig. 3.2. Mașini orizontale

Cele mai multe mașini orizontale dispun de două sisteme de avans independente dispuse simetric față de masa pe care se instalează semifabricatul. Acest tip de mașini este destinat prelucrării pieselor de mari dimensiuni, arhitectura mașinii permițând folosirea macaralei pentru instalarea semifabricatului. Masa mașinii-unelte este în cele mai multe cazuri o masă indexoare (este cazul mașinilor utilizate la prelucrarea paletelor de la roțile de turbină), existând însă și mașini cu masa în coordonate sau doar cu posibilitatea poziționării pe direcție transversală. Pe de altă parte, există și mașini verticale cu o singură unitate de lucru, respectiv cu mai mult de două unități de lucru dispuse radial față de masa mașinii.

Principalele părți componente ale mașinilor de găurit-adâncit prin procedeul electrochimic sunt sistemul mecanic, sistemul pentru electrolit și sursa de energie electrică.

3.1.1. Sistemul mecanic

Sistemul mecanic se compune din:

- batiu;
- sănii;

- sistem de avans;
- cameră de lucru.

Batiul. Deoarece electrolitul este trimis în interstițiul de lucru cu presiune ridicată, forțele care intervin în proces sunt mari, dependente de intensitatea maximă a curentului de lucru, $I_{max} [A]$ [60]:

$$F = (0,1 \dots 0,5) I_{max} [daN] \quad (3.1)$$

De aceea, doar în cazul mașinilor mici, la care forța de înaintare a electrodului-sculă este sub $100 kN$, construcția batiului poate fi în consolă, în celelalte cazuri batiul fiind de tip cadru (construcție de tip portal).

Dacă se lucrează cu electroliți foarte corozivi și etanșarea camerei de lucru nu este perfectă, atunci sunt necesare măsuri suplimentare de protecție anticorozivă:

- acoperirea galvanică a batiului;
- izolarea electrică a electrozilor față de batiu și polarizarea electrică a batiului.

Săniile. De regulă poziționarea piesei se realizează cu ajutorul unei mese în coordonate cu precizia de poziționare de $0,01 mm$. De asemenea, săniile trebuie protejate anticoroziv.

... s d v s. P. t u s gu
 desfășurării procesului de prelucrare la o valoare constantă a interstițiului este necesar ca viteza de avans a electrodului-sculă v_e să fie egală cu viteza de dizolvare anodică v_a (vezi figura 3.3). Din acest punct de vedere există două tipuri de sisteme de avans:

- Sisteme cu *viteză de avans constantă*, folosite mai ales la prelucrarea unor suprafețe de formă simplă.
- Sisteme cu *viteză de avans variabilă*, folosite la prelucrarea suprafețelor complexe, la care aria suprafeței de lucru este variabilă în timpul prelucrării.

Parametrii de comandă pot fi [64]:

- căderea de tensiune pe electrozi;
- intensitatea curentului de lucru;
- densitatea de curent;
- căderea de presiune pe interstițiu;
- temperatura electrolitului la ieșirea din interstițiu.

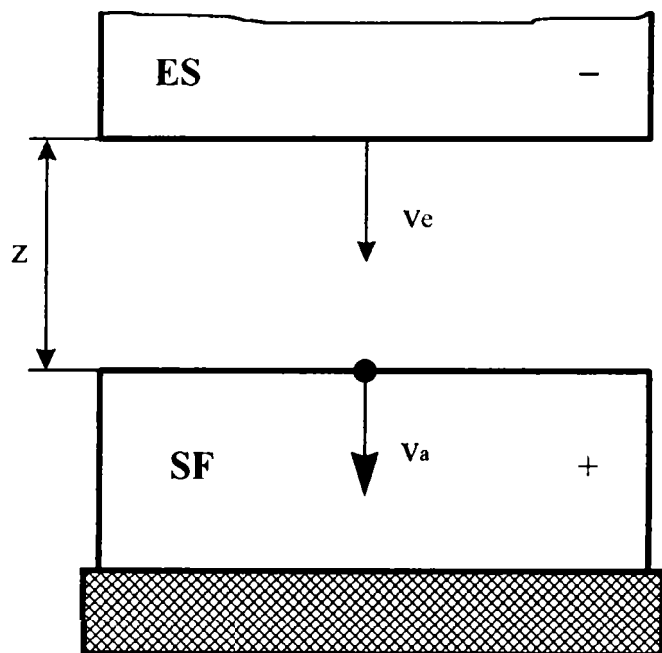


Fig. 3.3. Prelucrarea electrochimică cu avans

Acționarea sistemului de avans se poate face [40]:

- electro-mecanic, în cazul mașinilor mici;
- electro-hidraulic, în cazul mașinilor mari.

Inerția sistemului de avans trebuie să fie mică pentru a putea reacționa prompt când apare pericolul de scurt-circuit între cei doi electrozi. Uzual, viteza de avans este cuprinsă în intervalul $0,1 \dots 15 \text{ mm} \cdot \text{min}$.

Camera de lucru trebuie să fie o incintă închisă pentru a evita împrôscarea cu electrolit și pentru a permite evacuarea controlată a hidrogenului care se degajă în proces. La o concentrație de hidrogen mai mare de 2 % apare pericolul de explozie. De aceea camera de lucru este prevăzută cu un ventilator al cărui debit trebuie corelat cu intensitatea maximă a curentului de lucru ($I_{\max} [A]$) [64]:

$$Q_{H_2} = \frac{I_{\max}}{400} \left[\frac{m^3}{\text{min}} \right] \quad (3.2)$$

Dimensionarea camerei de lucru se face în funcție de gabaritul maxim al pieselor prelucrate pe mașină, gabaritul electrodului-sculă și gabaritul dispozitivelor de instalare a celor doi electrozi.

3.1.2. Sistemul pentru electrolit

De regulă, sistemul pentru electrolit are componența următoare (figura 3.4):

- rezervor;
- sistem de pompare;
- sistem de filtrare;
- sistem de curățare.

Rezervorul este dimensionat astfel încât să asigure de 5...10 ori debitul pompei de electrolit [64]. Este realizat din materiale rezistente la coroziune - oțeluri inoxidabile, sau placat cu plumb, materiale plastice sau ceramice. Pentru a se asigura sedimentarea produselor solide de eroziune rezervorul este compartimentat în cascadă.

De regulă rezervorul este prevăzut cu schimbătoare de căldură deoarece în faza inițială a prelucrării electrolitul trebuie adus la temperatura de regim ($20 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$, în funcție de cazul concret de prelucrare), iar în timpul prelucrării electrolitul trebuie menținut la temperatura de regim cu o toleranță de 2°C [60]. Rezervorul mai este prevăzut cu o serie de sisteme destinate controlului și corecției *pH*-ului și concentrației electrolitului.

Sistemul de pompare trebuie să asigure un debit de electrolit

$$Q_E = (0,05 \dots 0,1) \cdot I_{\max} \left[\frac{l}{\text{min}} \right], \quad (3.3)$$

la presiuni cuprinse în general între 5...20 bar [64].

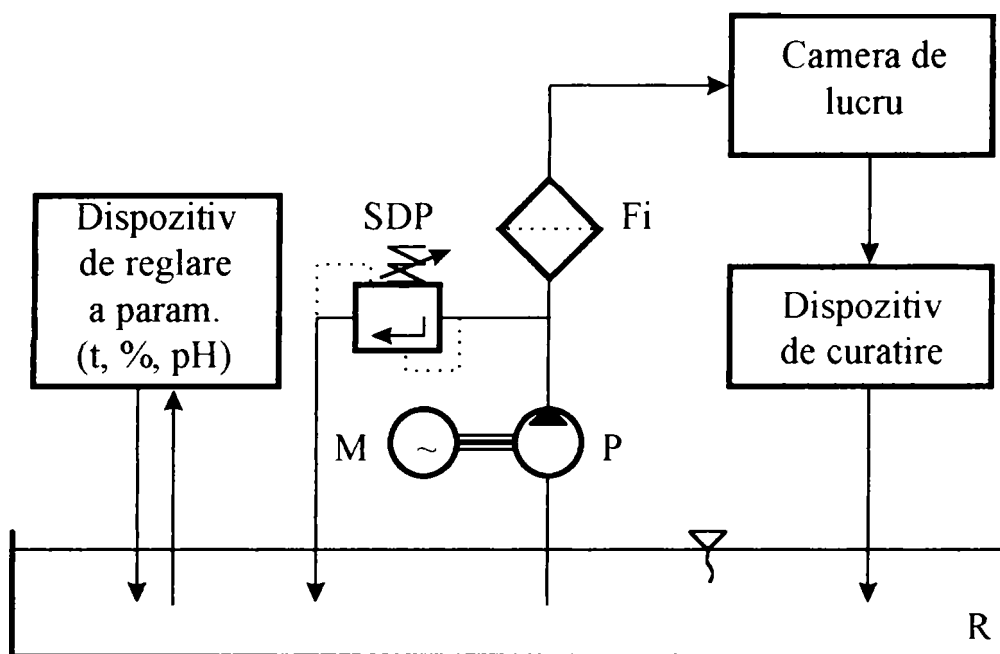


Fig. 3.4. Sistemul pentru electrolit al mașinilor de găurit electrochimic

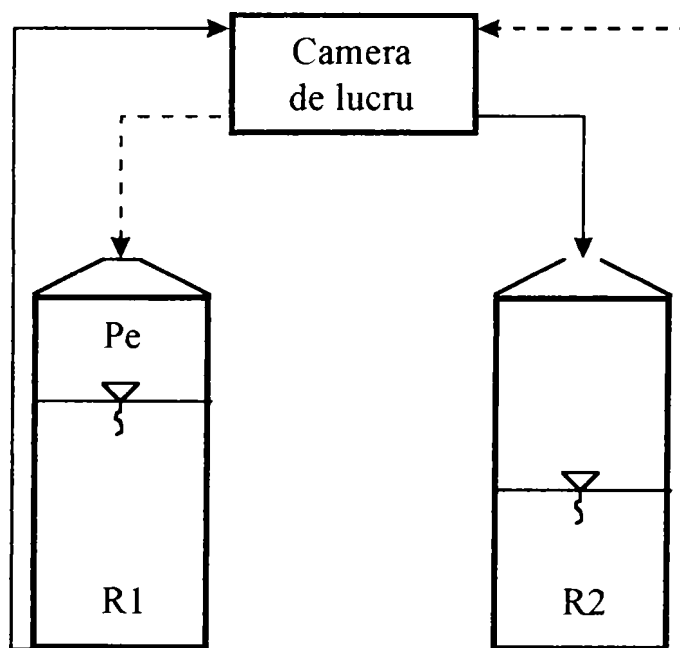


Fig. 3.5. Sistem de pompare cu pernă de aer

Pentru mașinile mari se folosesc pompe centrifuge cu 1 sau 2 etaje. După pompă se montează o supapă de descărcare a presiunii, însă reglajul presiunii se poate face și acționând direct asupra pompei sau motorului pompei. În cazul mașinilor mici se pot folosi pompe cu roți dințate sau sisteme de pompare cu pernă de aer (figura 3.5). Cele două rezervoare lucrează alternativ: când unul este sub presiune și trimite electrolitul în interstițiu, celălalt colectează electrolitul din camera de lucru. Toate componentele care vin în contact cu electrolitul trebuie realizate din materiale anticorozive [60].

Sistemul de filtrare are rolul de a reține particulele de dimensiuni mai mari sau apropiate mărimii interstițiului. Frecvent filtrele se realizează din site cu ochiuri de 25...75 μ m [60].

Sistemul de curățare are rolul de a realiza filtrarea grosieră a electrolitului astfel încât concentrația în produse solide de dizolvare să nu depășească 5 %. De regulă sistemul de curățare se realizează cu ajutorul unor separatoare centrifugale sau prin trecerea electrolitului prin cocs de granulație mare [27].

3.1.3. Sursa de energie electrică

Tensiunea continuă necesară prelucrării se obține cu ajutorul unui transformator și a unui redresor. În cazul unor prelucrări de mare precizie tensiunea trebuie să fie stabilizată. Reglarea tensiunii se face de regulă în primarul transformatorului, cu scheme cu tiristoare [39].

Sursele sunt prevăzute cu dispozitive de protecție la scurt-circuit care să decupleze sursa în timpi de ordinul microsecundelor.

3.2. TEHNOLOGII DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ

Stabilirea tehnologiei de prelucrare electrochimică presupune indicarea tuturor elementelor care definesc procesul de prelucrare și care influențează atât precizia de prelucrare cât și indicii de productivitate și de eficiență ai prelucrării. Astfel, pornind de la desenul de execuție al reperului, trebuie precizate următoarele:

- fazele de prelucrare;
- adaosurile de prelucrare și cotele tehnologice;
- utilajul și dispozitivele necesare;
- tipul și concentrația electrolitului;
- materialul electrodului-sculă;
- regimul de lucru;
- forma și dimensiunile electrodului-sculă;
- modul de circulare a electrolitului.

De regulă stabilirea corectă a tehnologiei de prelucrare implică parcurgerea a cel puțin două etape [64]:

- 1) *Predimensionarea* parametrilor regimului de prelucrare folosind date furnizate de literatura de specialitate sau de cercetări experimentale anterioare;
- 2) *Aplicarea* parametrilor anterior stabiliți în cadrul sistemului tehnologic cu care se va lucra și *ajustarea* acestor parametri în vederea obținerii performanțelor tehnologice dorite.

În cele ce urmează se vor prezenta câteva aspecte privind stabilirea tehnologiilor de prelucrare electrochimică în cazul operațiilor de găurire, respectiv adâncire electrochimică cu depasivare hidrodinamică.

3.2.1. Alegerea electrolitului

De regulă tipul electrolitului se stabilește în funcție de materialul piesei de prelucrat și de precizia de prelucrare cerută. La prelucrarea cu soluții de $NaCl$, din cauza faptului că ionii de clor aderă în special direct pe suprafața obiectului prelucrat, ionii de metal reacționează direct cu cei de clor. Din acest motiv se obțin suprafețe rugoase (așa-numitele suprafețe “cu găuri mâncate”). Avantajele utilizării acestor electroliti sunt [39]:

- randamentul foarte ridicat al prelucrării;
- amorsarea procesului de eroziune la densități de curent mici.

La utilizarea soluțiilor de $NaNO_3$ dizolvarea anodică a metalelor are loc la randamente mai mici datorită existenței unor reacții secundare consumatoare de curent. Avantajele utilizării acestui tip de electrolit sunt [39]:

- obținerea unor suprafețe cu un grad ridicat de netezire;
- obținerea unei precizii de formă ridicate la piesele care au forme spațiale complicate.

Tabelul 3.1. Electroliti

Electrolit	Concentrație [%]	Domeniu de utilizare	Condiții de utilizare
$NaCl$	5...20	oțeluri aliate/nealiat	nepasivizant, echivalent electrochimic volumic efectiv ridicat, ieftin, nu e nociv, ușor de utilizat, calitate scăzută a preciziei de prelucrare.
$NaClO_3$	20...45	oțeluri aliate/nealiat	echivalent electrochimic volumic efectiv ridicat, calitate bună a suprafeței
$NaNO_3$	10...20	oțeluri aliate/nealiat aliaje de aluminiu și cupru	pasivizant la oțeluri, precizie de copiere bună, utilizare universală.
HCl H_2SO_4	max. 10	aliaje cu conținut ridicat de Ni , Cr , Co	calitate foarte bună a suprafeței, electrolitul se consumă, nociv, necesită măsuri de protecție speciale.
$NaOH$	max. 10	aliaje cu W și Mo	nociv, măsuri de protecție speciale.
KNO_3+ $NaCl$	11,5+8	aliaje de Ti	utilizare ușoară.

În tabelul 3.1 sunt date câteva recomandări privind utilizarea diferiților electroliți în funcție de tipul de material prelucrat, cu precizarea unor condiții de utilizare specifice [27], [39], [40], [46], [47], [60], [64], [98].

3.2.2. Alegerea materialului electrodului-sculă

Electrodul-sculă se confecționează din materiale ușor prelucrabile, cu o bună conductivitate electrică și termică și cu o mare rezistență la coroziune. Cele mai utilizate materiale sunt cuprul și aliajele sale. Alte materiale utilizate sunt grafitul, cuprul grafitat, aluminiul și oțelul. Electrozii-sculă de dimensiuni mari se pot realiza dintr-un material mai ieftin - de exemplu oțel - care ulterior va fi acoperit galvanic cu un strat de material cu proprietăți deosebite - de exemplu cupru [10], [27], [60].

3.2.3. Stabilirea regimului de lucru

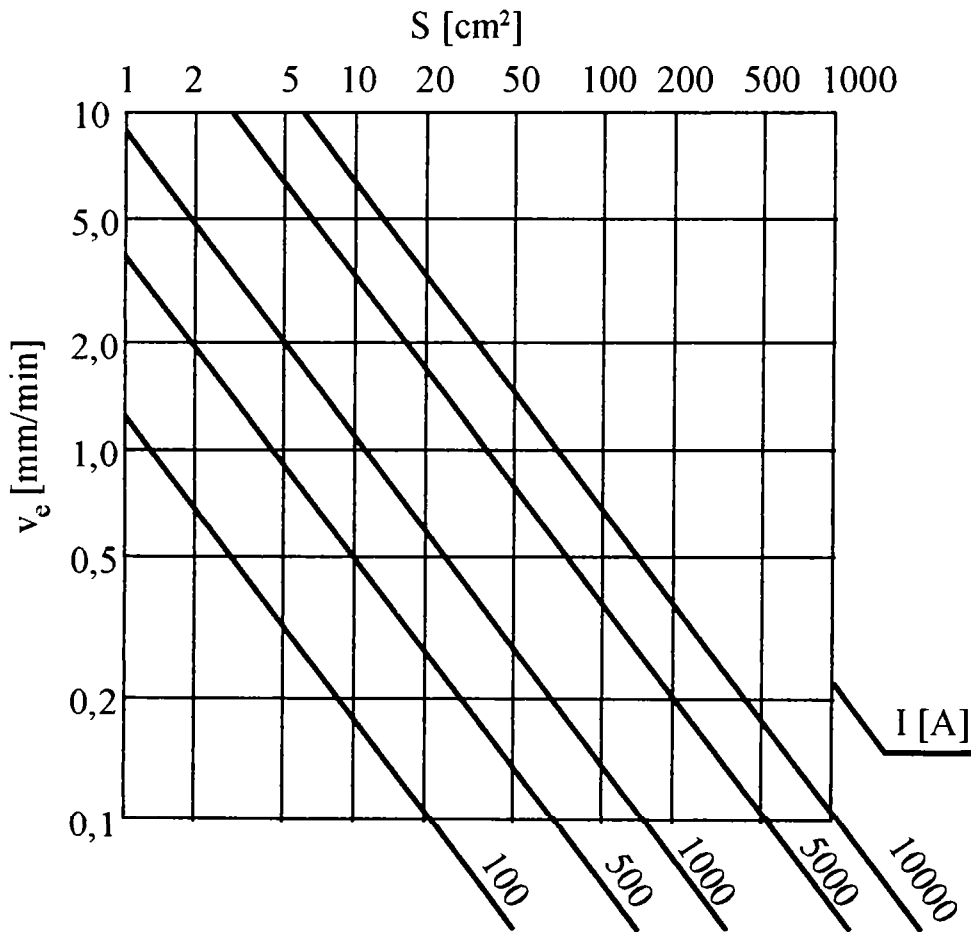


Fig. 3.6. Nomogramă pentru determinarea vitezei de avans

Alegerea tensiunii de lucru se face în funcție de aria suprafeței prelucrate, materialul electrodului-sculă și materialul piesei. În literatura de specialitate se recomandă valori cuprinse între 5...20 V [27], [40], [60]. De regulă valoarea tensiunii de lucru se stabilește pe baza relațiilor (2.22) și (2.23), admitând un anumit interstițiu de lucru și o anumită densitate de curent:

$$U = U_p^* + \frac{zj}{\gamma} \quad (3.4)$$

Trebuie avut în vedere ca sursa de tensiune să poată furniza curentul necesar,

$$I = jS \quad (3.5)$$

Viteza de avans a electrodului-sculă este dependentă de electrolitul folosit, aria suprafeței de prelucrat și curentul de lucru. Pentru determinarea sa se pot utiliza nomograme ca cea din figura 3.6 [27].

3.2.4. Proiectarea electrodului-sculă

La proiectarea electrodului-sculă se ține cont atât de forma suprafeței de prelucrat cât și de condițiile de prelucrare. De regulă, după stabilirea analitică a formei electrodului-sculă, se fac o serie de corecții experimentale determinate de multitudinea de factori care influențează procesul.

În figura 3.7.a este prezentată influența formei electrodului-sculă și a tipului electrolitului asupra formei suprafeței prelucrate [60]. Se observă că mai ales în cazul folosirii unui electrolit activ se obține o cavitate cu pereți înclinați. În cazul folosirii unui electrolit pasivizant pereții sunt mai puțin înclinați din două motive:

- 1) Figura 2.14 evidențiază o scădere pronunțată a echivalentului electrochimic volumic efectiv la valori mici ale densității de curent;
- 2) Din relația (3.4) se deduce faptul că densitatea de curent este invers proporțională cu mărimea interstițiului:

$$j = \frac{(U - U_p^*)\gamma}{z} \quad (3.6)$$

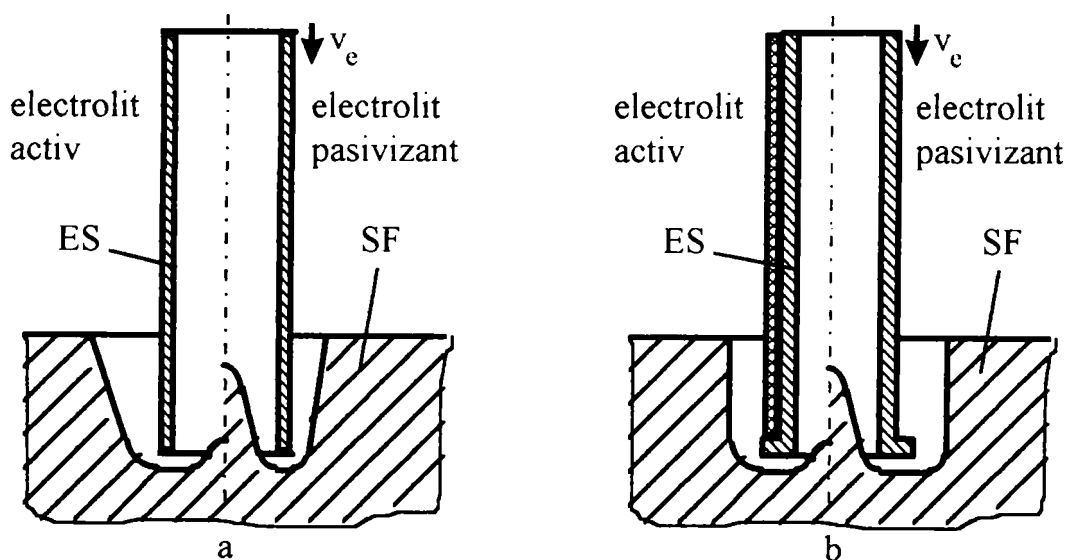


Fig. 3.7. Erori de prelucrare la găurirea electrochimică

Precizia prelucrării se poate îmbunătăți prin cele două metode ilustrate în figura 3.7.b [60]:

- *Subțierea* electrodului-sculă, ceea ce în cazul utilizării unui electrolit pasivizant va conduce la micșorarea vitezei de dizolvare anodică pe pereții laterali;

- Izolarea suprafeței laterale, care are un efect mult mai mare comparativ cu subtăierea electrodului.

În figura 3.8 sunt ilustrate performanțele care pot fi atinse folosind un electrolit pasivizant și un electrod-sculă cu pereții laterali izolați [60].

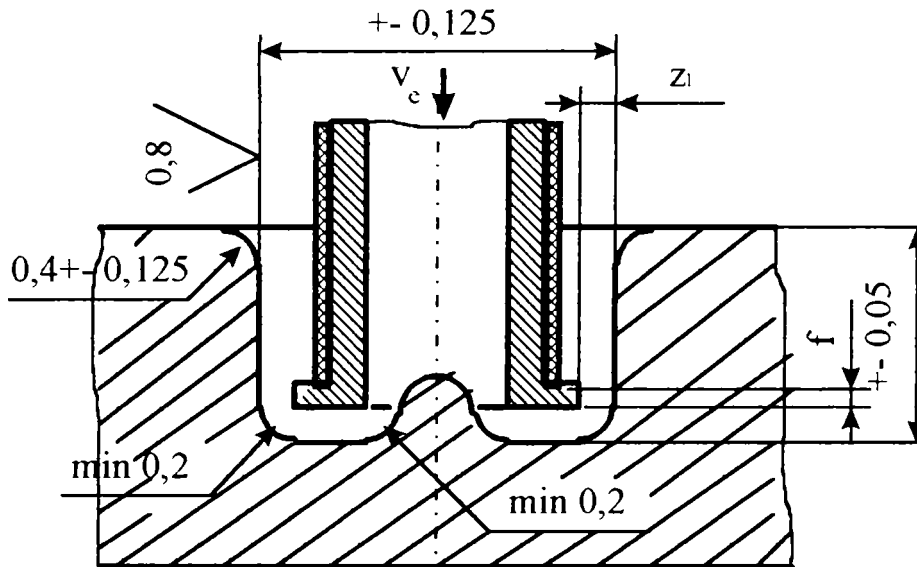


Fig. 3.8. Erori de prelucrare limită

În cazul găuririi, literatura de specialitate furnizează nomograme - cum este cea prezentată în figura 3.9 - care să ușureze determinarea dimensiunilor sculei. Nomogramele sunt ridicate în cazul utilizării unui anumit electrolit, pentru o anumită tensiune de lucru, și furnizează mărimea interstițiului lateral z_l în funcție de viteza de avans a electrodului-sculă și de lățimea fațetei f [27].

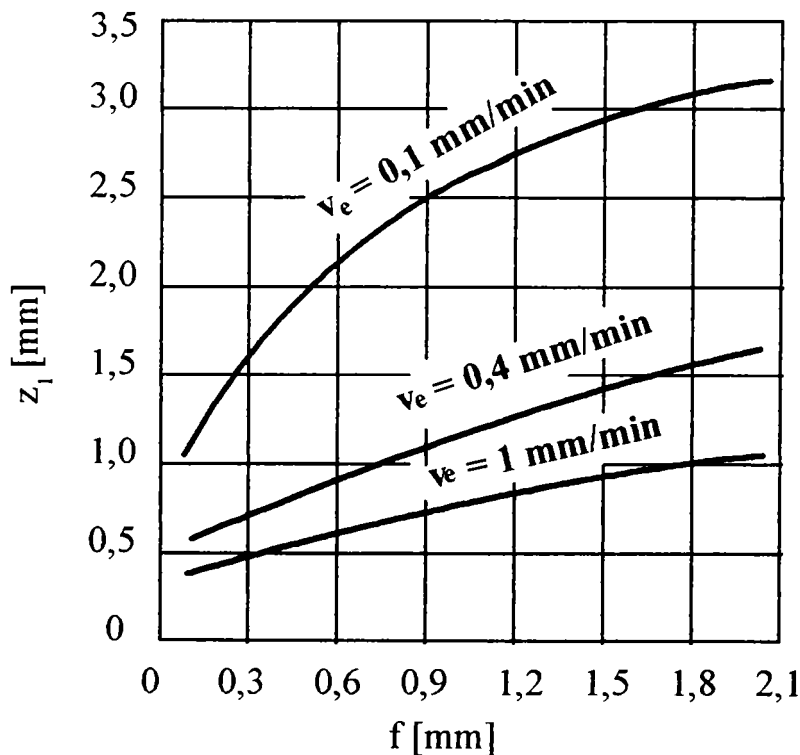


Fig. 3.9. Nomogramă pentru determinarea z_l

În cazul prelucrării unei suprafețe complexe se poate adopta metodologia de corecție a electrodului-sculă ilustrată în figura 3.10 [10], [39], [40]. S-au făcut următoarele notații:

- x - unghiul de contur, definit de intersecția tangentei la suprafața piesei în punctul considerat și direcția mișcării de avans a electrodului-sculă;
- z_x - mărimea interstițiului, considerată perpendicular pe suprafața piesei;
- $v_{ax} = v_a \sin x$ - componenta normală a vitezei de dizolvare anodică.

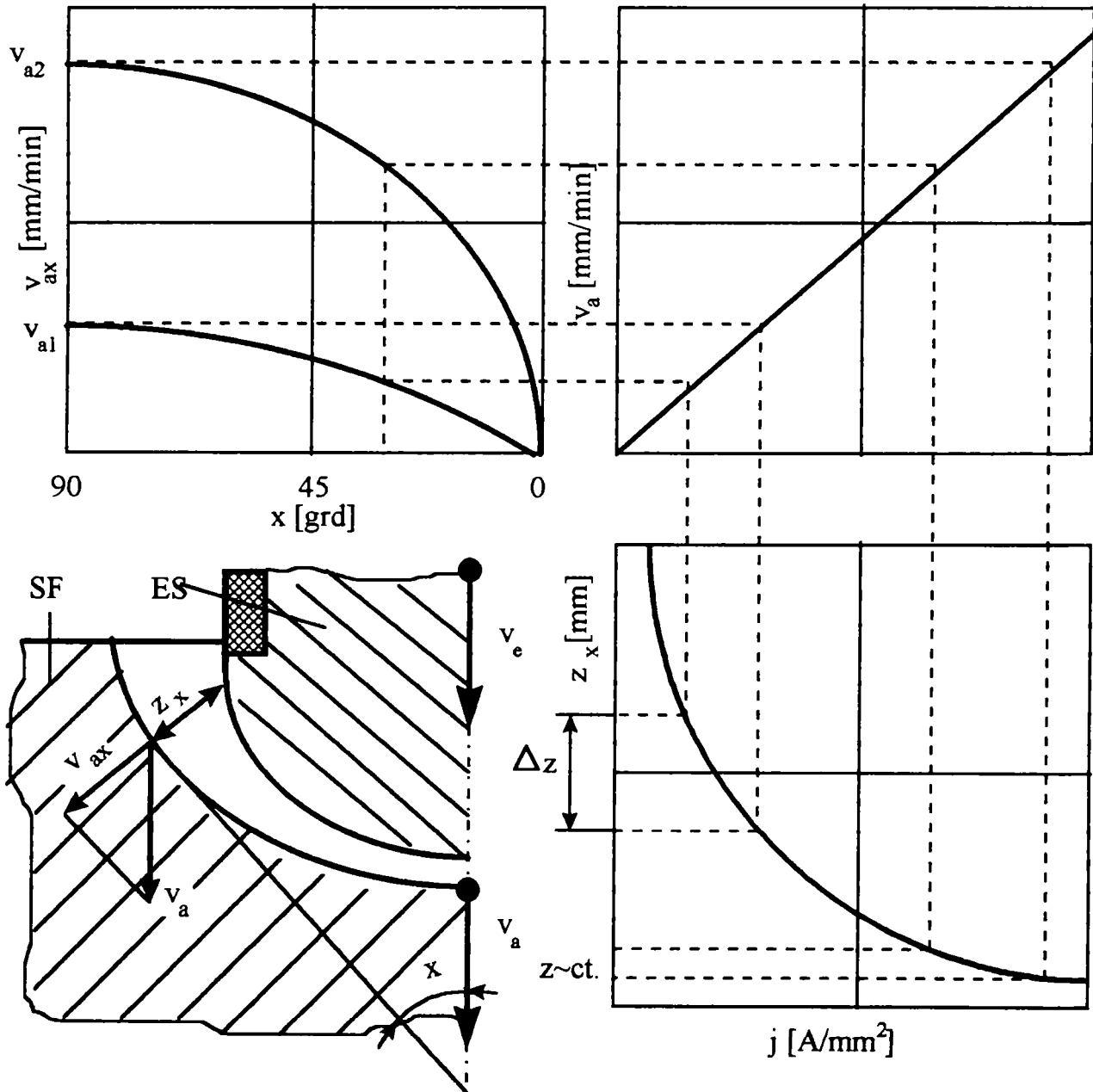


Fig. 3.10. Corecția formei electrodului-sculă la prelucrarea suprafețelor complexe

Cele trei grafice trebuie să fie ridicate în condițiile concrete ale prelucrării (viteză de avans, electrolit, tensiune de lucru, etc.). În funcție de unghiul de contur și de viteza de prelucrare impusă, se determină componenta normală a vitezei de prelucrare (dependența $v_{ax} = f(x)$). Cu ajutorul dependenței $v_a = f(j)$ se determină densitatea de curent corespunzătoare, apoi din graficul $z_x = f(j)$ se determină interstițiul corespunzător densității de curent.

Se observă că dacă se lucrează cu viteze de prelucrare mai mari corecțiile necesare sunt mult mai mici.

3.2.5. Modul de circulare a electrolitului

Circulația electrolitului prin interstițiu se poate asigura prin trei metode ilustrate în figura 3.11 [39], [40]:

- a) Din interiorul electrodului-sculă spre exteriorul acestuia;
- b) Din exteriorul electrodului-sculă prin interiorul acestuia, caz în care se obține cea mai bună precizie de prelucrare;
- c) Prin lateral (mai rar).

La proiectarea electrodului-sculă se va ține cont și de modul de circulare a electrolitului.

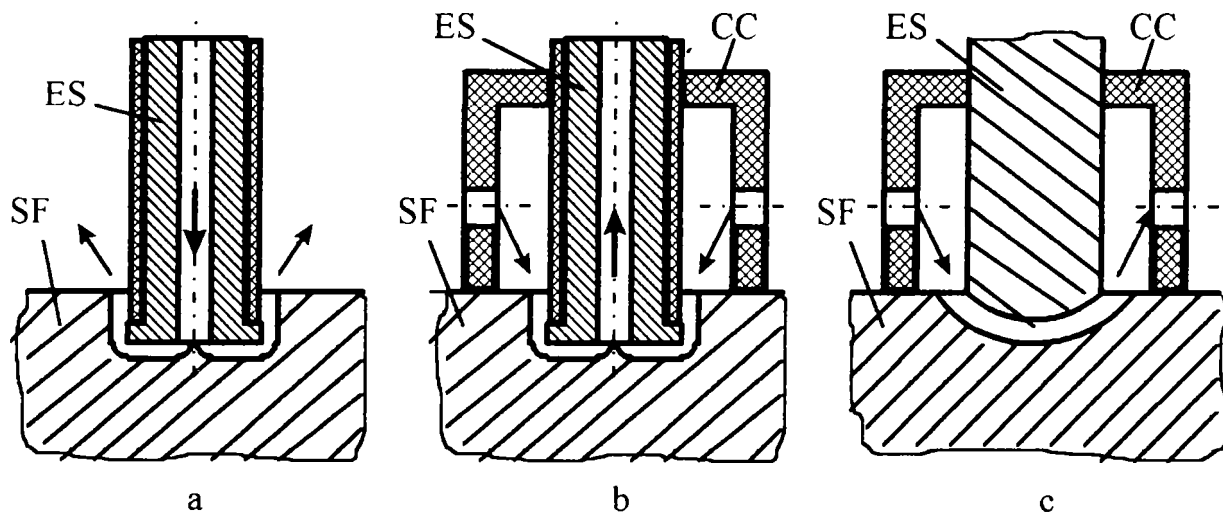


Fig. 3.11. Soluții de circulare a electrolitului

4. MICROMAȘINĂ DE GĂURIT PRIN EROZIUNE ELECTROCHIMICĂ

Pentru studiul procesului de găurire electrochimică în vederea unor optimizări tehnico-economice ale procesului a fost concepută micromașina de găurit prin eroziune electrochimică *MMGEE* prezentată schematic în figura 4.1.

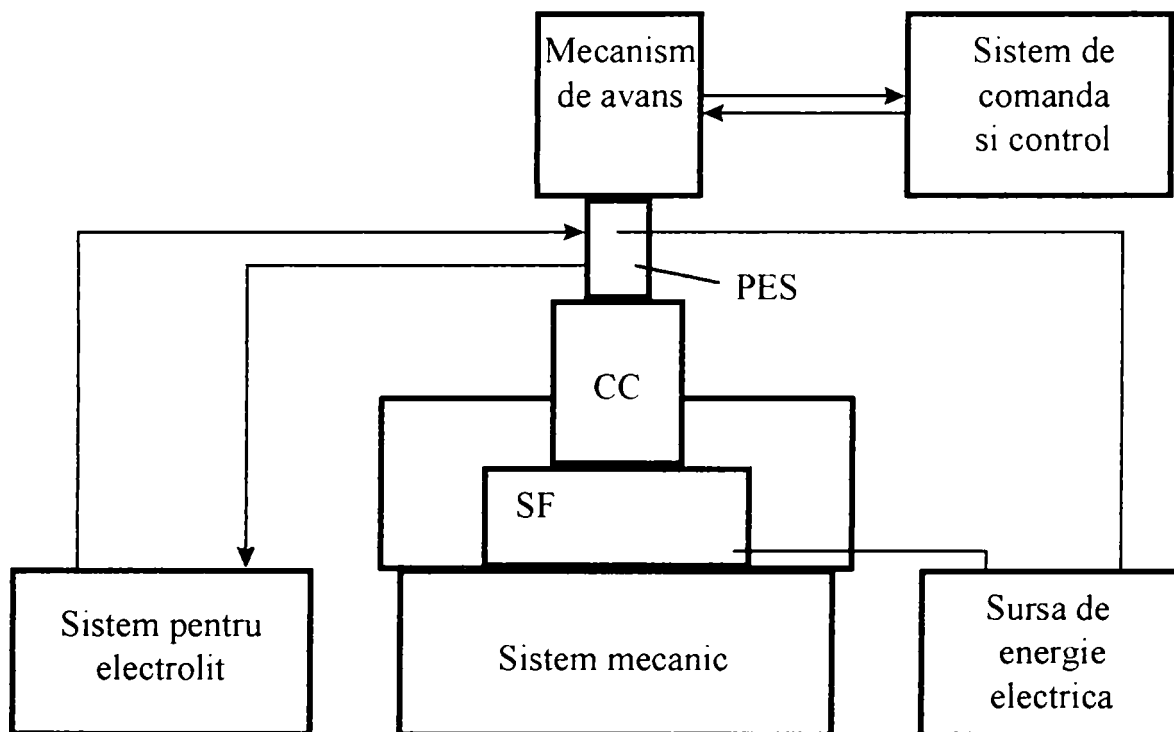


Fig. 4.1. Schema-bloc a micromașinii de găurit prin eroziune electrochimică

Micromașina este destinată realizării unor operații de găurire și adâncire electrochimică. Procesul de prelucrare electrochimică se desfășoară între cei doi electrozi - electrodul-sculă și semifabricat -situați în camera de lucru CC care împiedică împrôscarea cu electrolit. Instalarea semifabricatului și poziționarea acestuia în raport cu poziția electrodului-sculă este realizată de către sistemul mecanic. În figura 4.2 este prezentată o vedere de ansamblu a micromașinii realizate.

4.1 SISTEMUL PENTRU ELECTROLIT AL *MMGEE*

Electrolitul necesar procesului de prelucrare electrochimică este furnizat de către sistemul pentru electrolit care asigură:

- trimiterea electrolitului în interstițiul de lucru la un anumit debit și la o anumită presiune;
- menținerea electrolitului la temperatura de regim;
- filtrarea electrolitului.

În figura 4.3 este prezentată schematic componența sistemului pentru electrolit.

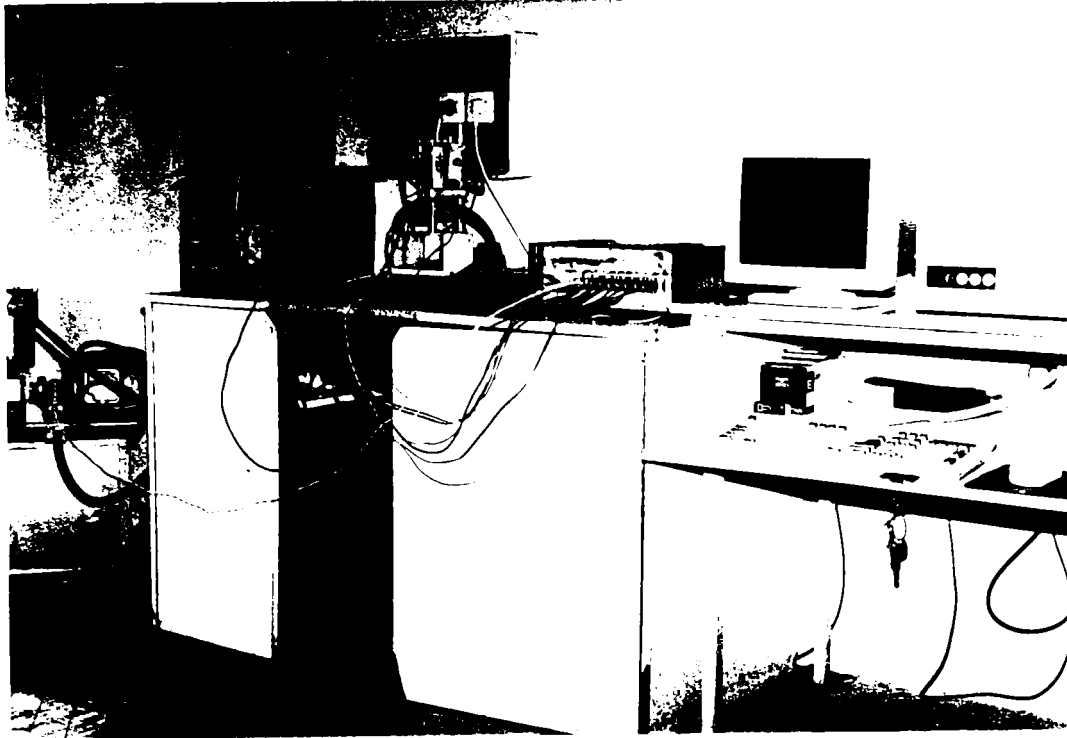


Fig. 4.2. Vedere de ansamblu a MMGEF.

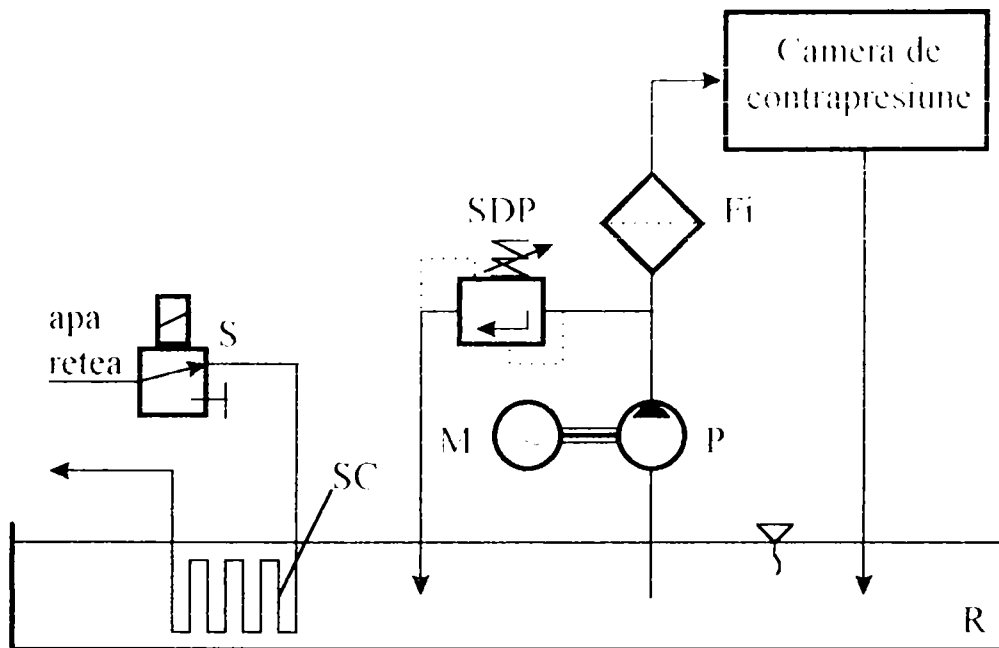


Fig. 4.3. Sistemul pentru electrolit al MMGEF.

Electrolitul din rezervorul R este trimis sub presiune în camera de contrapresiune CC prin intermediul pompei P acționată de motorul electric trifazat M printr-un cuplaj cu bolțuri. Deoarece se preconizează un curent maxim de lucru $I_{max} = 100A$, debitul necesar de electrolit este:

$$Q_E = (0,05 \dots 0,1) I_{max} = 5 \dots 10 \left[\frac{l}{min} \right] \quad (4.1)$$

Motorul electric are turația de 900 rot/min . Pompa cu roți dințate utilizată are următoarele caracteristici constructive:

- modulul danturii: $m = 2,5 \text{ mm}$;
- lățimea dinților: $b = 15 \text{ mm}$;
- numărul de dinți: $z = 10$;
- coeficientul deplasării de profil: $x = 0,25$;
- cremaliera de referință:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 20^\circ \\ f_0 &= 1 \\ c_0 &= 0,25 \end{aligned}$$

Deci caracteristicile constructive și funcționale ale pompei sunt:

- Unghiul de angrenare:

$$\text{inv}\alpha = \text{inv}\alpha_0 + 2\frac{x}{z}\text{tg}\alpha_0 = 0,0331 \quad (4.2)$$

$$\alpha = 25,783^\circ$$

- Gradul de acoperire:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(z+2+2x)^2 - z^2 \cos^2 \alpha_0} - z \cos \alpha_0 \text{tg}\alpha}{\pi \cos \alpha_0} = 1,255 \quad (4.3)$$

- Debitul mediu este:

$$q_m = 10^{-6} \frac{\pi}{2} b m^2 n [(z+2+2x)^2 - z^2 \frac{\cos^2 \alpha_0}{\cos^2 \alpha} - \frac{\pi^2 \cos^2 \alpha_0}{3} (4 - 6\varepsilon + 3\varepsilon^2)] \quad (4.4)$$

$$q_m = 9,3 \frac{l}{\text{min}}$$

- Coeficientul de pulsație a debitului:

$$\delta = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_m} = \frac{\pi^2 \varepsilon^2 z^2 \cos^2 \alpha_0}{4(z+2x)[z+1+2x - \frac{\pi^2 \varepsilon^2 z^2 \cos^2 \alpha_0}{8(z+2x)^2}]} = 0,3 \quad (4.5)$$

Deci sistemul pentru electrolit furnizează debitul necesar de electrolit. În funcție de debitul de electrolit furnizat s-a determinat volumul necesar al rezervorului:

$$V = (5 \dots 10) Q_E = 46,5 \dots 93 l \quad (4.6)$$

Se utilizează un rezervor din tablă de oțel inoxidabil cu capacitatea de 60 l care se încadrează în intervalul de mai sus.

Filtrarea electrolitului este realizată cu ajutorul filtrului cu sită *Fi*. Deoarece se preconizează efectuarea unor prelucrări caracterizate printr-un interstițiu de circa 0,1 mm, este utilizată o sită cu ochiurile 50 μm.

Pentru limitarea presiunii electrolitului la intrarea în interstițiu sistemul pentru electrolit este prevăzut cu supapa de descărcare a presiunii *SDP*.

Menținerea electrolitului la temperatura de regim este asigurată de către schimbătorul de căldură *SC* realizat dintr-o rețea de țevă din cupru prin care este

vehiculată apa de răcire. Supapa S, care permite accesul în schimbător al apei reci de la rețea, este comandat de către sistemul de comandă și control în funcție de temperatura electrolitului trimis în spațiul de lucru astfel încât variația acesteia să nu depășească $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Toate componentele sistemului care vin în contact cu electrolitul sunt executate din materiale rezistente la coroziune (oțel inoxidabil, cupru, bronz). În figura 4.4 este prezentată o vedere de ansamblu a sistemului pentru electrolit.

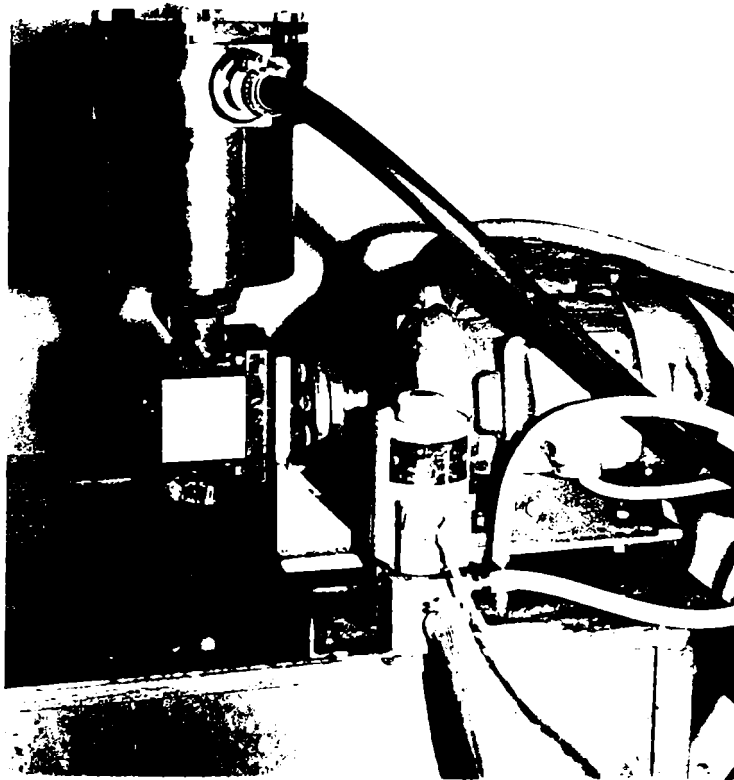


Fig. 4.4. Vedere de ansamblu a sistemului pentru electrolit

4.2 SISTEMUL MECANIC AL MMGEE

În figura 4.5 este prezentat sistemul mecanic al micromașinii. Acesta cuprinde un suport pe care s-au montat camera de lucru cu masa în coordonate și sistemul de avans. Suportul este constituit dintr-o placă de bază turnată dintr-un aliaj de aluminiu de care este fixată o coloană cilindrică pe care poate să culiseze o traversă în consolă care constituie suportul sistemului de avans. Aceasta se blochează pe coloană cu un șurub. Corpul sistemului de avans este astfel proiectat încât să poată fi montat în traversa culisantă.

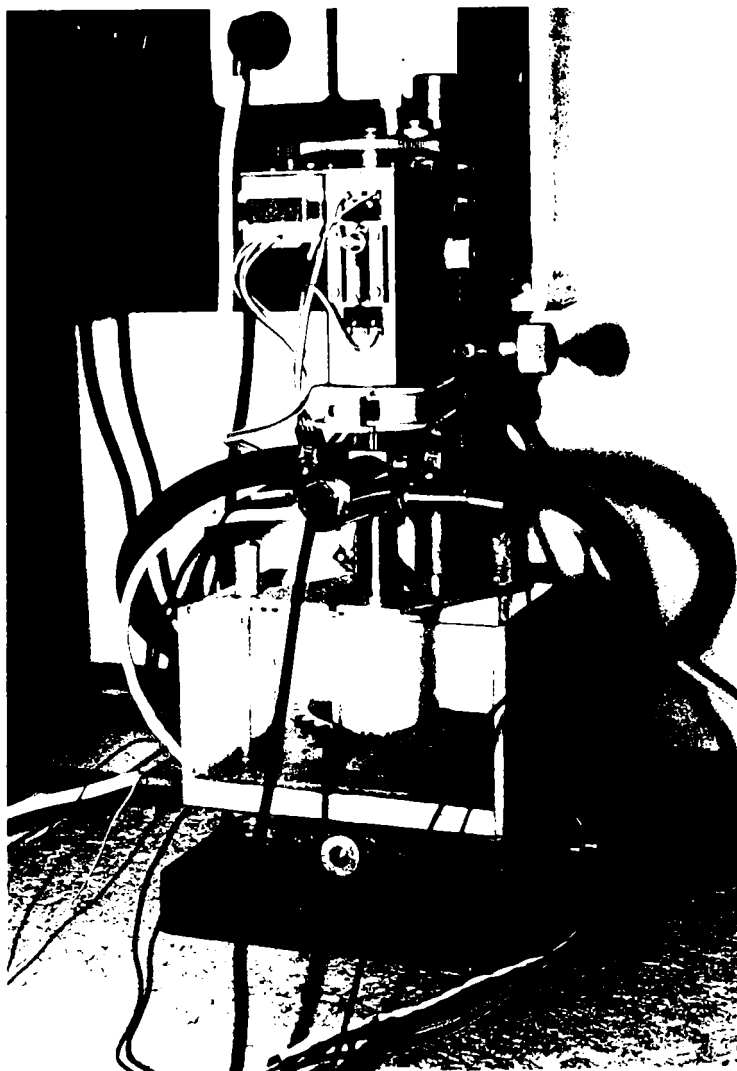


Fig. 4.5. Sistemul mecanic al MMGEE.

Camera de lucru este montată pe masa în coordonate, fiind izolată electric de aceasta prin intermediul unei plăci de textolit. Fundul camerei de lucru este confecționat dintr-o placă de oțel inoxidabil în care sunt prevăzute canale de scurgere a electrolitului și un racord de evacuare. Semifabricatul sau camera de contrapresiune pot fi fixate de masă cu ajutorul unei bride speciale. Tot pe placa de fund este montată priza anodului sursei de alimentare cu energie electrică. Dimensiunile camerei de lucru permit prelucrarea unei piese cu dimensiunile maxime $100 \times 60 \times 60 \text{ mm}$.

Masa în coordonate este prevăzută cu ghidaje prismatice cu posibilitatea de reglare a jocului și șuruburi de deplasare cu pasul de 1 mm . Masa permite o deplasare longitudinală de 50 mm , respectiv o deplasare transversală de 25 mm în vederea poziționării piesei de prelucrat în raport cu electrodul-sculă.

4.3 SURSA DE ALIMENTARE CU ENERGIE ELECTRICĂ A MMGEE

Sursa de alimentare cu energie electrică furnizează tensiunea continuă necesară procesului de prelucrare electrochimică. Sursa este constituită dintr-un

transformator monofazat coborâtor de tensiune și un redresor în punte, conform schemei din figura 4.6. În figura 4.7 este prezentată o vedere de ansamblu a sursei de alimentare cu energie electrică.

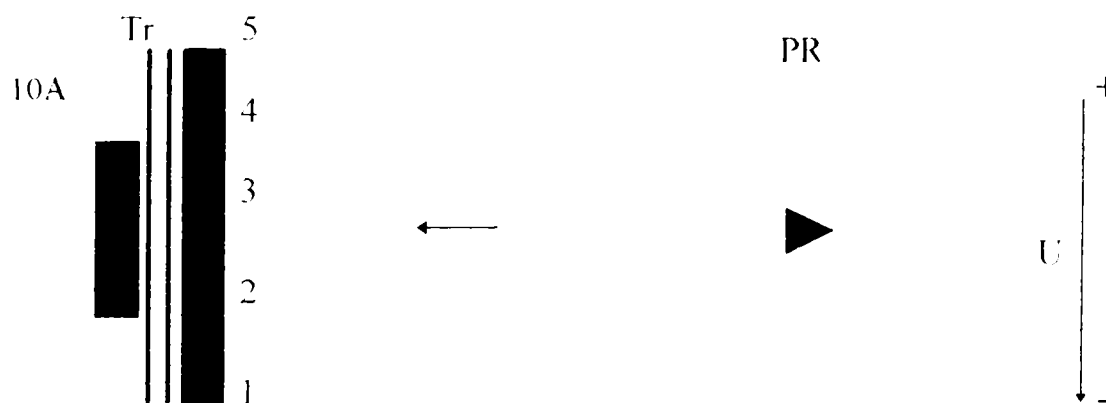


Fig. 4.6. Sursa de alimentare cu energie electrică a MMGE.

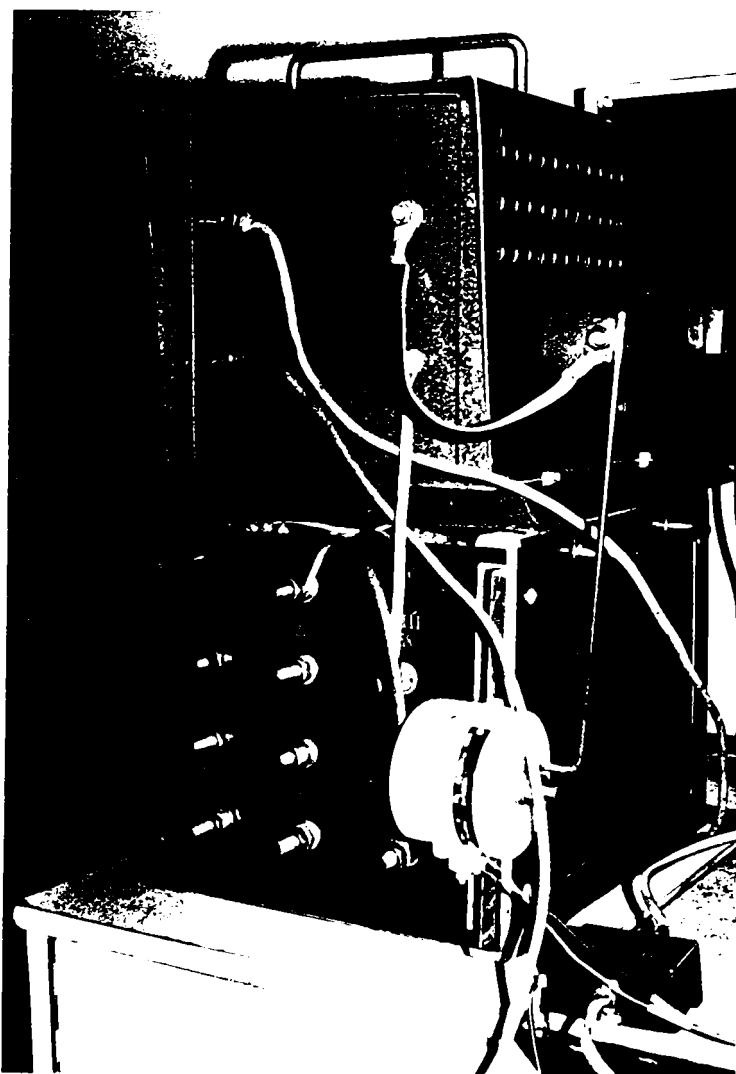


Fig. 4.7. Vedere a sursei de alimentare cu energie electrică

Transformatorul furnizează în secundar cinci trepte de tensiune, rezultând următoarele valori ale tensiunii redresate (valori măsurate în gol):

- treapta 1: $U_G = 5V$;
- treapta 2: $U_G = 9,7V$;

- treapta 3: U_{av} 16V;
- treapta 4: U_{av} 20V;
- treapta 5: U_{av} 25V

Redresorul este constituit dintr-o punte de patru diode redresoare de tipul TU 32. Sursa de alimentare cu energie electrică poate furniza un curent maxim de 120 A.

4.4 MECANISMUL DE AVANS AL MMGEE

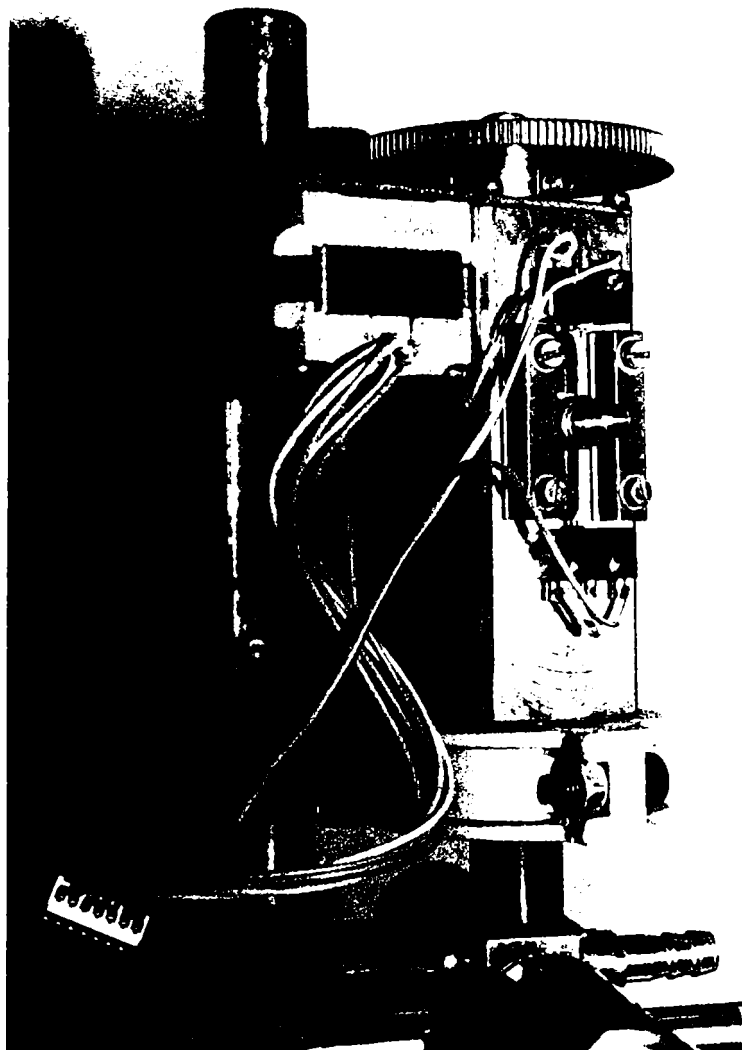


Fig. 4.8. Mecanismul de avans al MMGEE

Mișcarea de avans a electrodului-sculă este realizată de către sistemul de avans, compus din mecanismul de avans și sistemul de comandă a avansului. Sistemul de avans asigură realizarea tuturor mișcărilor necesare prelucrării unei piese:

- mișcările rapide de apropiere și retragere;
- poziționarea inițială a electrodului-sculă;
- avansul de lucru;
- oprirea prelucrării la cota programată.

Sistemul de avans asigură desfășurarea procesului de eroziune electrochimică la un anumit interstițiu între electrodul-sculă și semifabricat. Viteza de avans a

electrodului-sculă trebuie permanent corelată cu viteza de dizolvare anodică, la rândul său dependentă de o serie de factori.

Mecanismul de avans realizat este prezentat în figura 4.8. Schema cinematică a acestuia este prezentată în figura 4.9. Acționarea mecanismului este asigurată de către motorul pas cu pas *MPP* care transmite mișcarea șurubului conducător *II* prin intermediul transmisiei compuse din roțile dințate *I* și *2*. Șurubul conducător acționează pinola *P* pe care este fixat prin intermediul bucșei izolatoare *BI* port-electrodul *PE*. Bucșa izolatoare, executată din textolit, are rolul de a realiza izolarea galvanică a electrodului-sculă de restul mașinii.

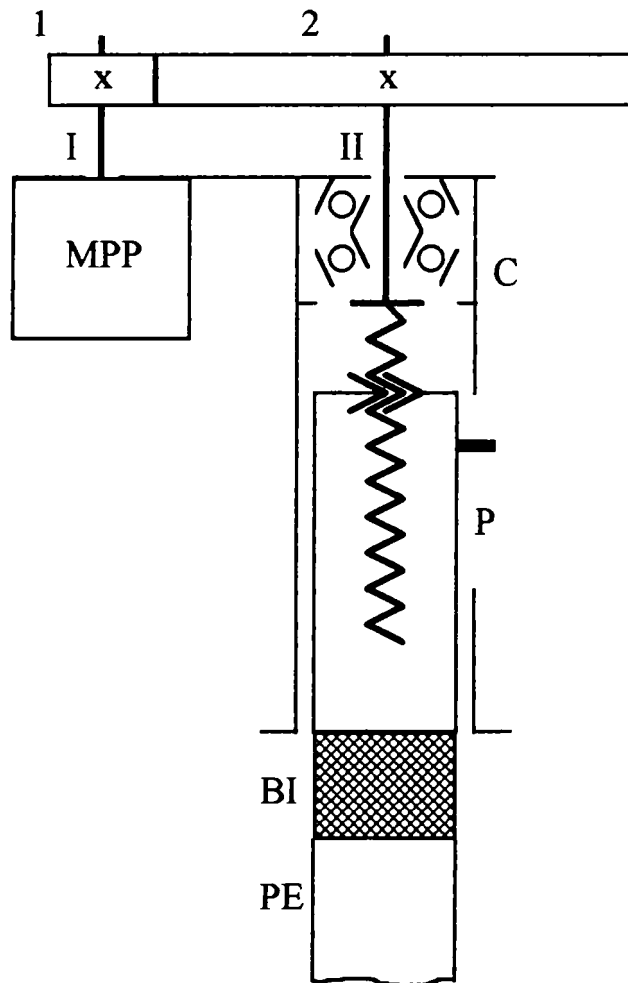
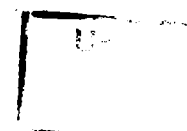


Fig. 4.9. Schema cinematică a mecanismului de avans al MMGEE

Pentru acționarea mecanismului de avans s-a optat pentru utilizarea unui motor pas cu pas deoarece comanda mișcării de avans este realizată de un sistem bazat pe microprocesor, în acest caz simplificându-se interfațarea sistemului de comandă cu motorul pas cu pas. Un alt avantaj al utilizării unui motor pas cu pas este faptul că prin contorizarea pașilor efectuați de acesta (în ambele sensuri) se poate determina cu exactitate poziția electrodului-sculă în raport cu piesa de prelucrat, respectiv față de limitele de cursă ale mecanismului de avans. Sistemul este prevăzut cu două microlimitatoare plasate la limita superioară, respectiv inferioară a mișcării de avans.



Caracteristicile funcționale ale motorului pas cu pas utilizat sunt următoarele:

- număr de faze: 4
- impedanța unei faze: 75Ω
- tensiunea de alimentare: $12 V_{cc}$
- numărul de pași pe tură: $N_t=200$
- unghiul de pășire: $1,8^\circ$

Angrenajul cilindric drept care transmite mișcarea de la motor la șurubul conducător are următoarele caracteristici constructive:

- roata dințată 1:
 - modulul $m=0,5 \text{ mm}$
 - numărul de dinți $z_1=26$
 - coeficientul deplasării de profil: $x_1=0$
 - lățimea danturii: $B_1=6 \text{ mm}$
- roata dințată 2:
 - numărul de dinți $z_2=130$
 - coeficientul deplasării de profil: $x_1=0$
 - lățimea danturii: $B_2=5 \text{ mm}$
- distanța dintre axe: $A=39 \text{ mm}$.

Șurubul conducător este lăgăruit în carcasa mecanismului de avans cu ajutorul unui rulment radial-axial dublu pentru preluarea sarcinilor axiale care acționează asupra pinolei, în special forța dezvoltată de electrolitul sub presiune. Dimensionarea șurubului conducător s-a făcut luând în calcul forța maximă de avans:

$$F = (0,1 \dots 0,5) I_{\max} = 10 \dots 50 \text{ daN} \quad (4.7)$$

rezultând un filet $M6$ cu pas normal, $p=1 \text{ mm}$.

Ținând cont de caracteristicile constructive de mai sus, se determină pasul pe care îl face electrodul-sculă când motorul pas cu pas efectuează un pas comandat de sistemul de comandă și control:

$$\Delta z = \frac{1}{N_t} \frac{z_1}{z_2} p = 0,001 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Se remarcă faptul că rezoluția mișcării de avans reprezintă doar 1% din interstițiul de lucru minim preconizat a fi de $0,1 \text{ mm}$.

În figura 4.10 este prezentată construcția subansamblului portelectrod-electrod-sculă-cameră de contrapresiune. Semnificația notațiilor din figură este:

1. corp racorduri;
2. papuc de polarizare electrod;
3. garnitură;
4. placă de fixare;
5. inel O 1;
6. suport electrod;
7. cameră de contrapresiune;
8. piuliță pecială;

- 9. electrod-sculă;
- 10.inel O 2;
- 11.semifabricat.

Port-electrodul este prevăzut cu două canale longitudinale:

- canalul I care comunică direct cu interiorul electrodului-sculă;
- canalul E care comunică direct cu exteriorul electrodului-sculă.

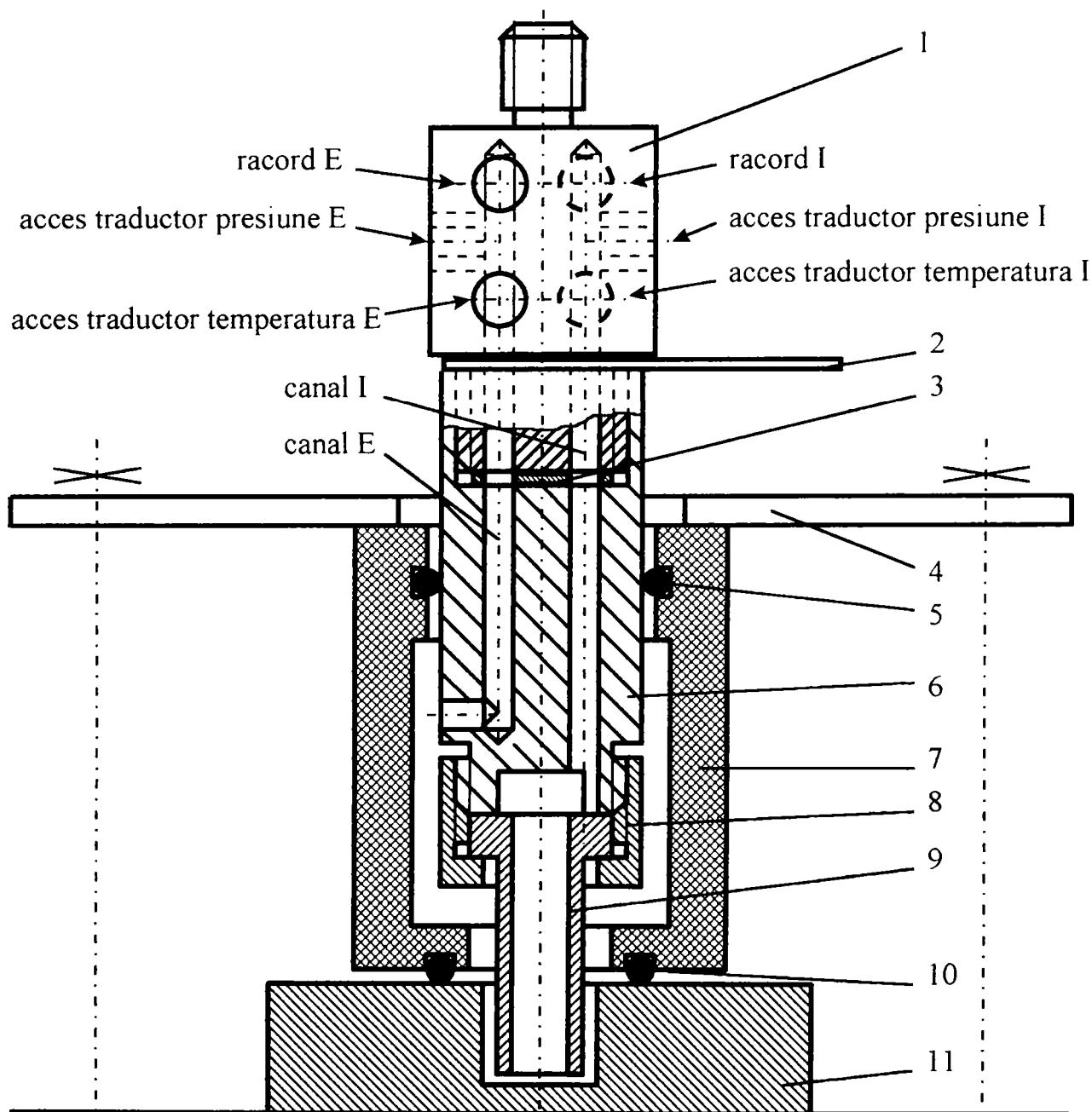


Fig. 4.10. Subansamblul portelectrod-electrod-sculă-cameră de contrapresiune

Presiunea și temperatura electrolitului care trece prin cele două canale sunt măsurate cu ajutorul unor traductoare specifice:

- presiunile sunt măsurate cu ajutorul a două traductoare cu timbre tensometrice:
 - traductorul de presiune I măsoară presiunea electrolitului în canalul care comunică cu interiorul electrodului-sculă;

-traductorul de presiune *E* măsoară presiunea electrolitului în canalul care comunică cu interiorul electrodului-sculă;

- temperaturile sunt măsurate cu ajutorul a două sonde cu termistor:

-traductorul de temperatură *I* măsoară temperatura electrolitului în canalul care comunică cu interiorul electrodului-sculă;

-traductorul de temperatură *E* măsoară temperatura electrolitului în canalul care comunică cu exteriorul electrodului-sculă;

Soluția adoptată permite testarea ambelor moduri de circulare a electrolitului:

- injecție prin electrodul-sculă și evacuare prin camera de contrapresiune;
- injecție prin camera de contrapresiune și evacuare prin electrodul-sculă.

4.5 SISTEMUL DE COMANDĂ ȘI CONTROL AL MMGEE

Sistemul de comandă și control al micromașinii a fost conceput pentru a realiza următoarele funcții:

- reglarea mișcării de avans a electrodului-sculă în scopul menținerii constante la valoarea de referință a parametrului de comandă adoptat;
- reglarea temperaturii electrolitului;
- comanda ciclului de lucru al mașinii;
- memorarea parametrilor de lucru măsurați.

În figura 4.11 este prezentată structura generală a sistemului de comandă și control.

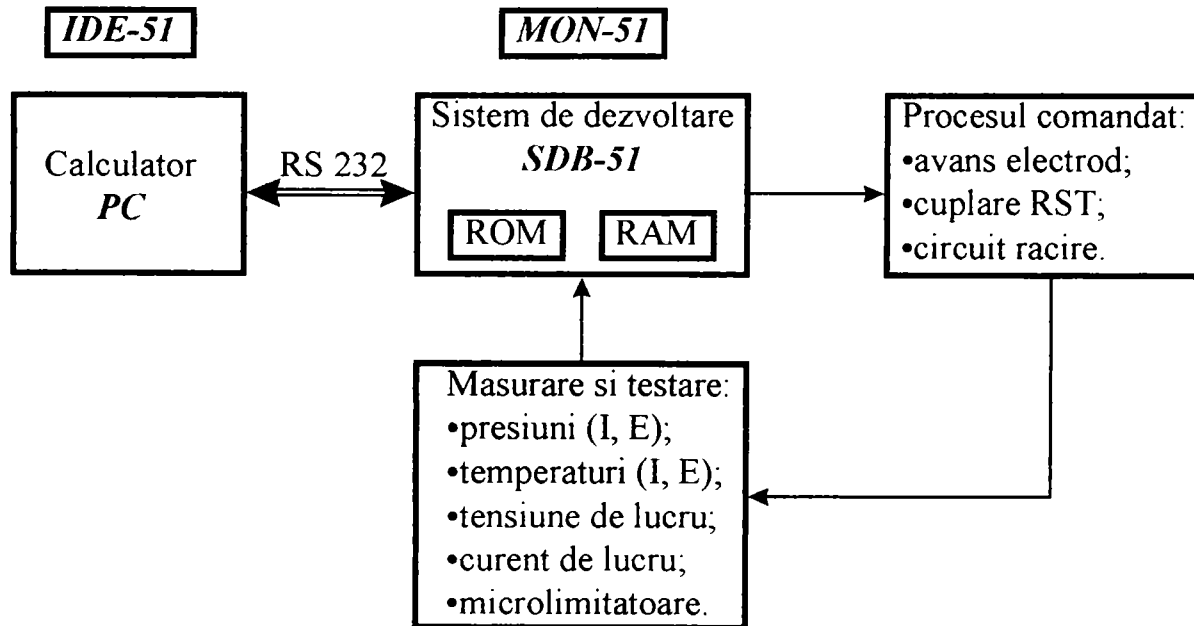


Fig. 4.11. Schema-bloc a sistemului de comandă și control al MMGEE

Sistemul se compune în principal din:

- calculatorul *PC*;
- placa sistemului de dezvoltare *SDB-51*;
- mediul de dezvoltare integrat *IDE-51*, care rulează pe calculatorul *PC*;
- programul monitor *MON-51*, care rulează în *SDB-51*;

- traductoare pentru măsurarea parametrilor procesului de prelucrare;
- elemente de execuție: driverul motorului pas cu pas, releul RST pentru cuplarea / decuplarea alimentării cu electrolit și tensiune de lucru, supapa circuitului de răcire.

Sistemul *SDB-51*, circuitele pentru măsurarea parametrilor de lucru și cele care comandă elementele de execuție ale micromașinii au fost realizate ca un ansamblu unitar, prezentat în figura 4.12.

Placa sistemului de dezvoltare *SDB-51*, mediul de dezvoltare integrat *IDE-51* și programul monitor *MON-51* formează un tot unitar numit *sistem de dezvoltare a aplicațiilor, ADS-51*. Programul monitor *MON-51* și mediul de dezvoltare *IDE-51* nu pot funcționa decât împreună, nici una din componente neputând funcționa separat. În memoria RAM a sistemului de dezvoltare rulează un program care asigură realizarea tuturor funcțiilor de comandă și control a mașinii enunțate la începutul acestui capitol, inclusiv transmiterea datelor măsurate în procesul de prelucrare pentru stocarea lor într-un fișier pe calculatorul PC.

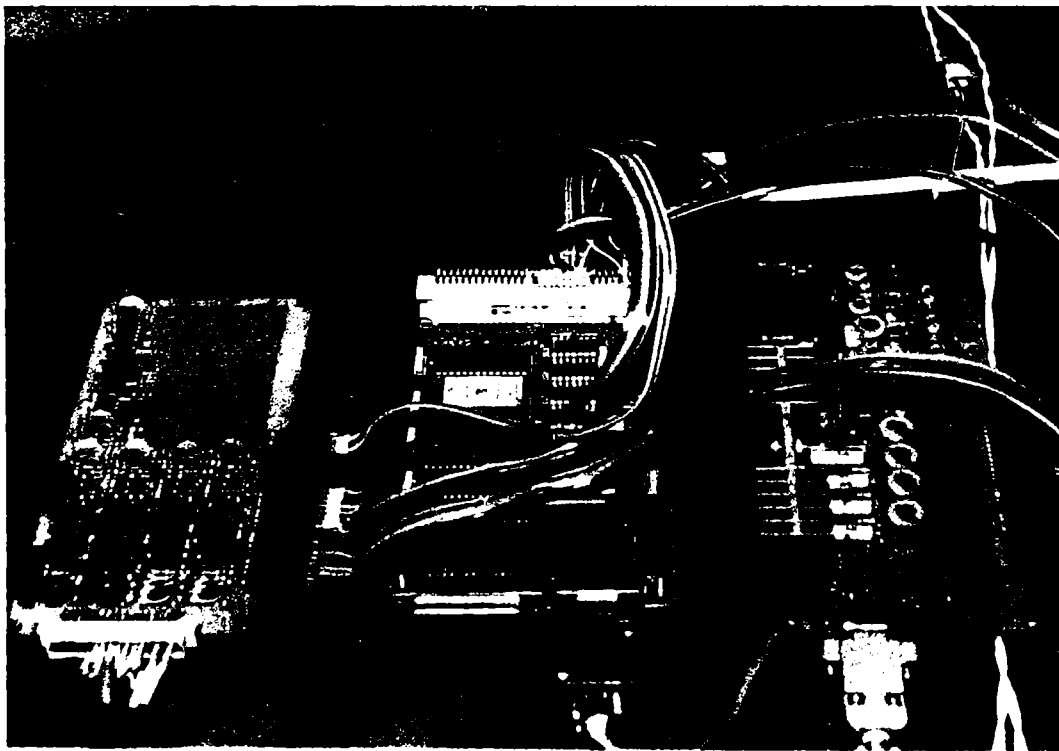


Fig. 4.12. Sistemul *SDB-51* și circuitele de măsurare și comandă

Cea mai complicată problemă în ceea ce privește comanda procesului de prelucrare este reglarea mișcării de avans a electrodului-sculă în scopul optimizării regimului de prelucrare. Pentru studiul acestei probleme este necesar un astfel de sistem de comandă, cât mai flexibil, care să permită testarea unei multitudini de algoritmi de comandă a avansului în funcție de unul sau mai mulți dintre posibii parametri de comandă:

- intensitatea sau densitatea curentului de lucru consumat de procesul electrochimic;
- căderea de tensiune electrică pe cei doi electrozi;

- căderea de presiune pe interstițiul de lucru;
- variația de temperatură a electrolitului pe interstițiu.

4.5.1 Sistemul de dezvoltare a aplicațiilor ADS-51

Elementul central al soluției propuse este sistemul de dezvoltare a aplicațiilor ADS-51. Acesta este un sistem de dezvoltare a aplicațiilor bazat pe microcontrolerele din familia 8051.

Sistemul utilizat pentru această aplicație este echipat cu:

- un microcontroler 80C552;
- memorie ROM: 2K;
- memorie RAM: 2K;

Sistemele de dezvoltare SDB-51 sunt prevăzute cu:

- circuit de interfață serială RS-232;
- sursă de alimentare stabilizată +5V;
- o zonă de “wrap-field” pentru montarea unor circuite suplimentare;
- conector de magistrală tip EURO 2×32.

Funcționarea SDB-51 este facilitată de programul monitor rezident în memoria EPROM a sistemului, MON-51. Programul monitor are două roluri principale:

- executarea unor comenzi transmise de către utilizator printr-o fereastră specială a programului IDE-51 aflat în calculatorul PC. Aceste comenzi permit următoarele operații:
 - afișarea/modificarea memoriei interne și externe a microcontrolerului;
 - încărcarea de programe și date din fișiere existente în calculatorul PC;
 - lansarea în execuție a programelor încărcate în microcontroler.
- pune la dispoziția programatorului un set de rutine care pot fi apelate din programele de aplicație pentru a realiza diverse operații de comunicație pe interfața serială, conversii de format, respectiv comparări.

Mediul de dezvoltare integrat IDE-51 este un program conceput pentru a facilita dezvoltarea aplicațiilor cu ajutorul sistemului SDB-51. Acest program rulează sub sistemul de operare MS-DOS, pe orice calculator compatibil IBM-PC, fără a solicita resurse hard deosebite (640 KRAM, 1.2 M disponibil pe harddisk, o interfață serială, orice tip de interfață video).

IDE-51 permite editarea programelor sursă, sub forma unor fișiere pe disc, având încorporat un editor cu facilități de căutare, înlocuire și transfer; se pot edita simultan mai multe fișiere, în ferestre diferite. Asamblarea, linkeditarea și conversia în format Intel HEX se fac prin apelarea din mediul integrat a unor programe externe. Comunicația cu sistemul de dezvoltare se face prin intermediul unei ferestre dedicate a mediului integrat.

O sesiune tipică de dezvoltare a unui program presupune parcurgerea următoarelor etape:

1. Se alimentează sistemul *SDB-51*; se lansează programul *IDE51.EXE* pe calculatorul *PC*; se resetează sistemul *SDB-51*, pentru realizarea testului de identificare între programele *MON-51* și *IDE-51*.
2. Se editează fișierul conținând programul în limbaj de asamblare utilizând programul *IDE-51*.
3. Se assemblează, linkeditează și convertește în format *Intel HEX* programul sursă editat, utilizând comenzile din meniul "TOOLS" al programului *IDE-51*; se corectează eventualele erori de sintaxă.
4. Se deschide o fereastră de comunicație utilizând comanda "TTY/Open TTY" din meniul programului *IDE-51*.
5. Se transferă fișierul în format *Intel HEX* în memoria sistemului *SDB-51*, utilizând comanda "TTY/Send file" din meniul programului *IDE-51*.
6. Eventual, se introduc manual date în memoria sistemului, utilizând comenzile "Mx" ale monitorului.
7. Se lansează în execuție programul, utilizând comanda "X" a monitorului.
8. Se testează corectitudinea execuției, eventual prin vizualizarea conținutului memoriei sistemului, cu ajutorul comenzilor "Mx" ale monitorului.
9. Dacă execuția nu a fost corectă, se modifică programul sursă din fereastra de editare, după care se repetă etapele 3-8.
10. Fișierul în format *Intel HEX* se poate utiliza direct pentru programarea memoriei EPROM a sistemului.

4.5.2. Programarea sistemului de comandă și control

Elementul central al *ADS-51* este microcontrolerul *80C552* care face parte din familia de microcontrolere *80C51*. În cele ce urmează se prezintă într-un mod succint arhitectura familiei de microcontrolere *80C51* și modul de programare al acestora în limbaj de asamblare. Față de caracteristicile comune ale familiei *80C51*, microcontrolerul *80C552* are o serie de dotări suplimentare care vor fi prezentate ulterior.

În figura 4.13 este prezentată schema bloc a microcontrolerului *80C51*. Toate microcontrolerele familiei *80C51* au în componență:

- minim două circuite de temporizare-contorizare (Timer 0, Timer 1);
- minim patru porturi digitale (P0, P1, P2, P3);
- circuite de declanșare a întreruperilor externe generate de alte dispozitive la care este conectat microcontrolerul (de exemplu închiderea/deschiderea unor comutatoare);
- circuit de conectare pe magistrală a mai multor microcontrolere;
- un port serial pentru comunicația cu alte sisteme (de exemplu conectarea la un calculator PC).

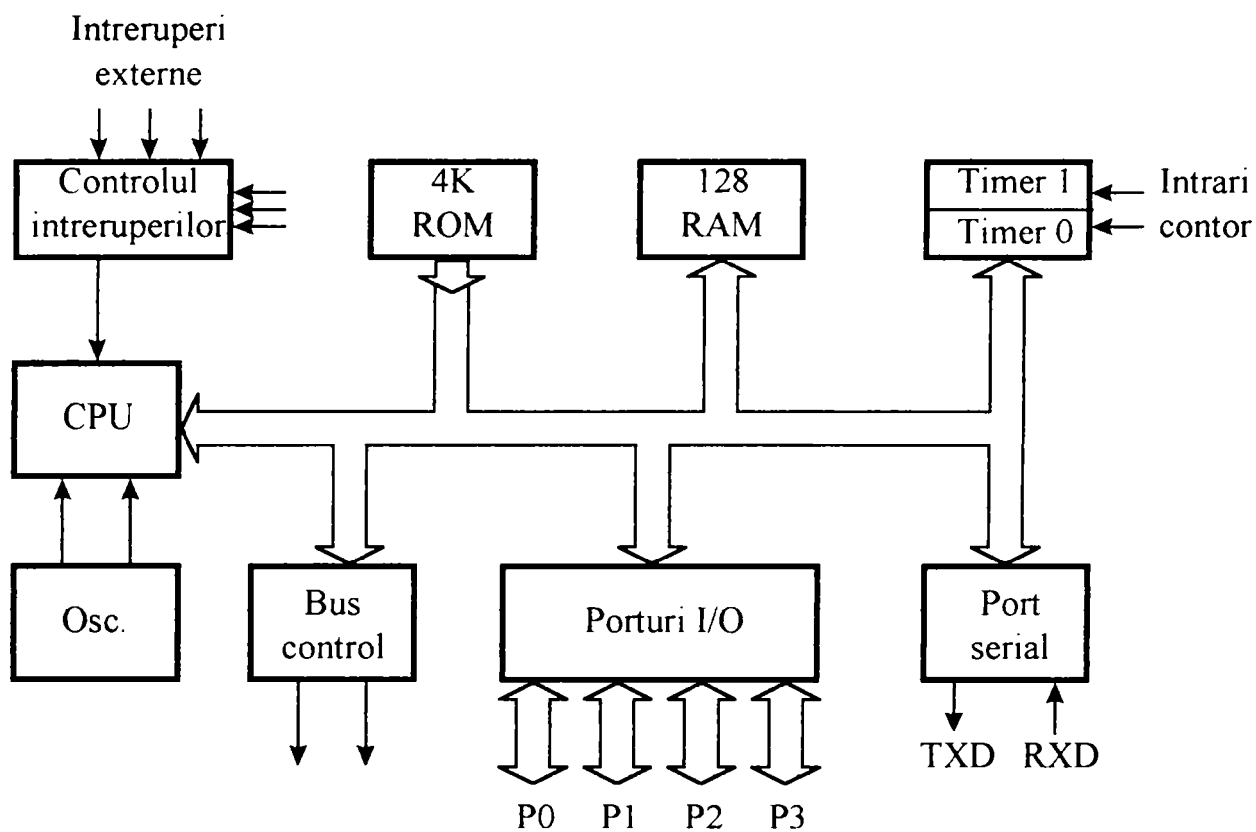


Fig 4.13. Schema bloc a microcontrolerului 80C51

Memoria microcontrolerului 80C51

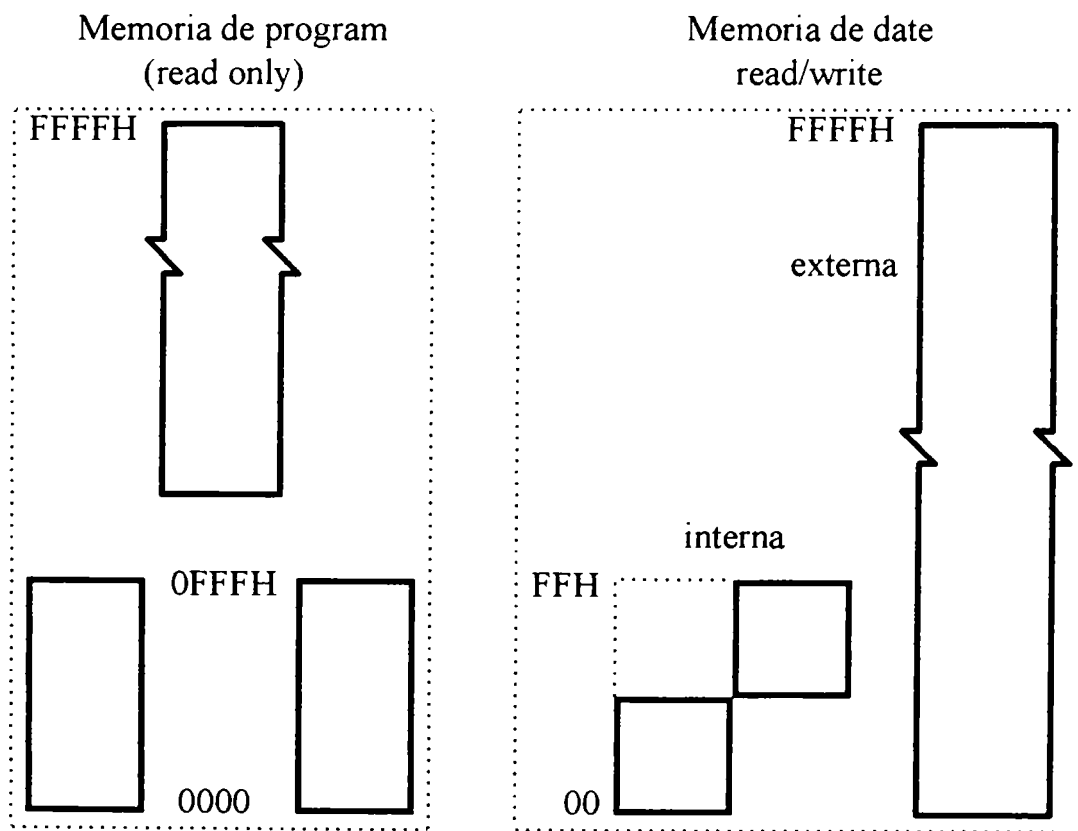


Fig. 4.14. Memoria microcontrolerului 80C51

Toate microcontrolerele 80C51 au spațiu de adrese separat pentru memoria de program și memoria de date. Separarea logică a memoriei de program și de date permite accesarea memoriei de date prin adrese de 8 bit, care pot fi stocate și memorate ușor de o unitate centală de 8 bit. Însă pot fi generate și adrese de memorie de 16 bit cu ajutorul registrului numit DPTR.

Memoria de program (ROM, EPROM) poate fi doar citită, nu și scrisă. Microcontrolerul poate accesa maxim 64 ko de memorie de program, din care 4 ko pot fi amplasate în cip. Versiunile fără memorie ROM au toată memoria de program în exterior (fig. 4.14).

Memoria de date (RAM) ocupă un spațiu de adresare diferit de memoria de program. Spațiul maxim de memorie RAM care poate fi adresat este de 64 ko, din care primii 128 octeți se găsesc în cip. Harta memoriei interne de date este prezentată în figura 4.15. Spațiul de memorie este divizat în trei blocuri:

- 128 octeți “de jos” (lower);
- 128 octeți “de sus” (upper);
- spațiul regiștrilor cu funcții speciale (SFR).

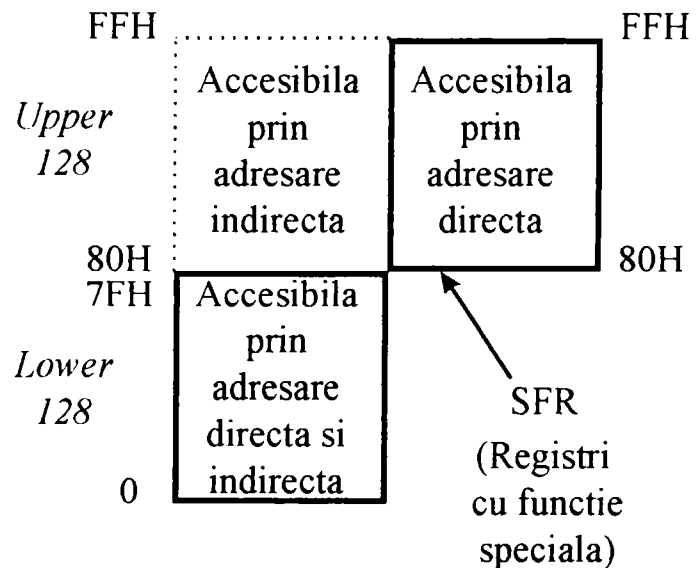


Fig. 4.15. Memoria internă de date

Toate adresele memoriei interne au un octet, ceea ce implică un spațiu de memorie de doar 256 octeți. Totuși memoria internă are 384 octeți utilizând un artificiu: adresele directe mai sus de 79H accesează un spațiu de memorie, iar adresele indirecte mai sus de 79H accesează un alt spațiu de memorie. Deci blocul celor 128 octeți “de sus” și cel al SFR ocupă același spațiu de memorie, dar sunt materializate prin entități fizice separate.

Cei 128 octeți “de jos” au aceeași structură în toate microcontrolerele 80C51 conform reprezentării din figura 4.16. Primii 32 octeți sunt gru-

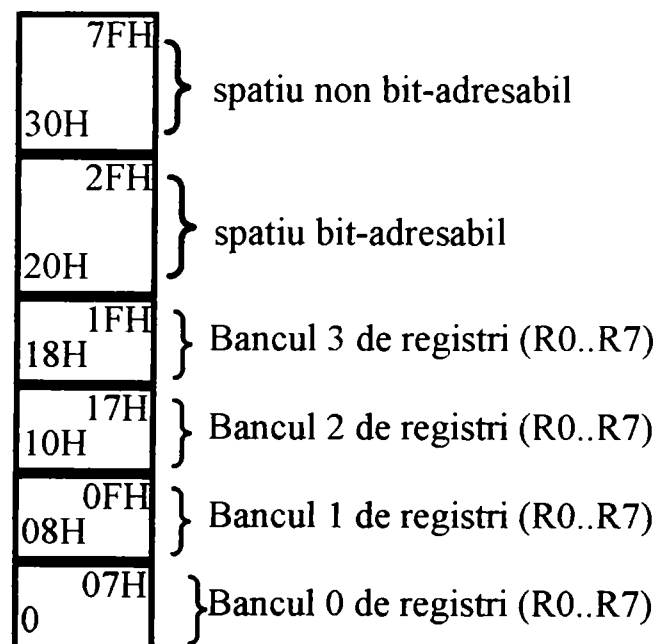


Fig. 4.16. Cei 128 de octeți “de jos”

pați în 4 bancuri a câte 8 regiștri. Instrucțiunile recunosc acești regiștri sub numele R0...R7. Instrucțiunile care lucrează cu regiștri sunt mai rapide decât cele care folosesc adresarea directă. Următorii 16 octeți formează un bloc de memorie în care este permisă accesarea directă a fiecărui bit. Setul de instrucțiuni al microcontrolerului cuprinde o arie largă de asemenea instrucțiuni. Adresele biților din acest bloc sunt numerotate de la 00H la 7FH.

Spațiul celor 128 octeți de jos se încheie cu 80 de octeți de memorie la care biții nu pot fi accesați direct. Toți cei 128 octeți de jos pot fi accesați prin adresare directă sau indirectă. Cei 128 octeți de sus nu au destinație specială și pot fi accesați numai prin adresare indirectă.

F8								FF
F0	B							F7
E8								EF
E0	ACC							E7
D8								DF
D0	PSW							D7
C8								CF
C0								C7
B8	IP							BF
B0	P3							B7
A8	IE							AF
A0	P2							A7
98	SCON	SBUF						9F
90	P1							97
88	TCON	TMOD	TL0	TL1	TH0	TH1		8F
80	P0	SP	DPL	DPH			PCON	87

↑
bit adresabil

Fig. 4.17. Spațiul regiștrilor cu destinație specială - SFR

Spațiul regiștrilor cu destinație specială este prezentat în figura 4.17. SFR include regiștri porturilor, timer-elor, controlul perifericelor, etc. Acești regiștri pot fi accesați doar direct. 16 adrese în SFR sunt adresaabile atât ca adrese de octet, cât și ca adrese de bit. Adresele care pot fi accesate ca adresă de bit sunt cele care se termină cu 0H sau 8H. Se observă că nu toate adresele sunt ocupate. Acestea nu sunt implementate, citirea lor generând valori aleatoare, iar scrierea lor neavând nici un efect. Rolul locațiilor din SFR este descris în cele ce urmează:

- ACC este registrul acumulator. În instrucțiuni se notează simplu cu A;
- registrul B este utilizat în operații de înmulțire sau împărțire;

- PSW (program status word) este cuvântul de starea al programului;
- SP (stack pointer) este registrul
- DPL și DPH sunt regiștri de tip DPTR -*data pointer*- care memorează octetul inferior, respectiv superior al unei adrese de memorie de 16 biți. Poate fi manipulat ca un registru dublu sau ca doi regiștri simpli;
- porturile P0,P1, P2 și P3. Dacă se scrie 1 într-un bit al unuia din acești regiștri, atunci pinul corespunzător al acelu port trece pe nivel ridicat de tensiune (nivel logic 1); scrierea unui 0 cauzează trecerea pinului respectiv pe nivelul de tensiune coborâtă (logic 0). Aceeași corespondență este valabilă când un pin al unui port este utilizat ca intrare.
- TH0 și TL0 sunt doi regiștri pereche utilizați la încărcarea timer-ului 0; timer-ul 1 utilizează regiștri TH1 și TL1.
- regiștri de control IP, IE, TMOD, TCON, SCON și PCON se utilizează pentru controlul timer-elor, al întreruperilor externe și al portului serial.

Setul de instrucțiuni

Setul de instrucțiuni al familiei de microcontrolere este optimizat pentru aplicațiile de reglare. Starea CPU este reflectată de cuvântul de stare - *PSW*. Conținutul acestuia este redat în figura 4.18, rolul biților din PSW fiind prezentat în continuare:

- bitul de transport CY este utilizat atât în operațiile aritmetice (“unu mai departe”) cât și ca acumulator în operațiile logice;
- biții RS0 și RS1 se utilizează pentru selecția bancului de regiștri R0...R7;
- bitul de paritate reflectă numărul de 1 și 0 din acumulator: un număr par de 1 dă P=1, respectiv un număr impar de 1 dă P=0; deci numărul de 1 din acumulator plus P este întotdeauna un număr impar;
- ceilalți doi biți pot fi utilizați ca fanioane de uz general.

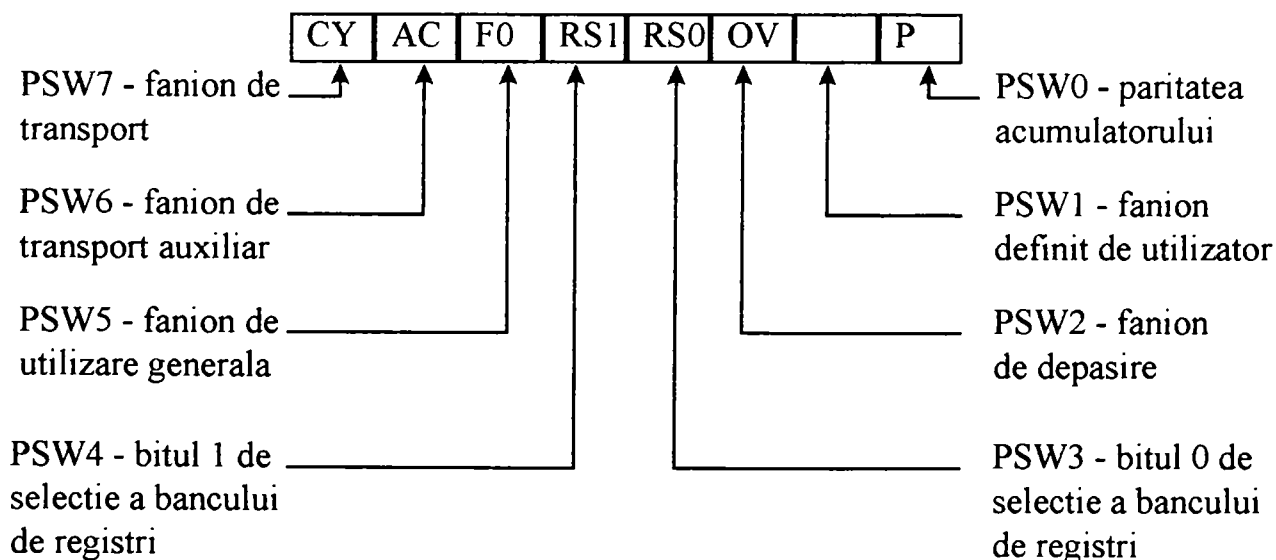


Fig. 4.18. Cuvântul de stare - PSW

Modurile de adresare

Modurile de adresare în microcontrolerele 80C51 sunt:

- *adresarea directă*: operandul este specificat printr-o adresă de 8 biți în câmpul instrucțiunii. Doar memoria internă de date și SFR pot fi adresate direct.
- *adresarea indirectă*: instrucțiunea specifică un registru care conține adresa operandului. Toată memoria RAM poate fi accesată indirect. Ca registru de adrese pentru o adresă de 8 biți se pot utiliza regiștri R0...R7 sau SP. Registrul de adrese pentru adresele de 16 biți poate fi doar registrul de 16 biți DPTR.
- *adresare la registru*: este utilizată în instrucțiuni care operează direct cu date din regiștri fără a fi nevoie de un octet de adresă.
- *instrucțiuni specifice unui registru*: instrucțiuni care operează cu un singur registru fără a afecta alte adrese de memorie.
- *adresare imediată*: în corpul instrucțiunii intră un registru și o constantă.
- *adresare indexată*: Doar memoria de program poate fi adresată indexat și se utilizează doar pentru citire. Acest mod de adresare este folosit pentru citirea unui tabel de valori din memoria de program. Un registru de 16 biți marchează adresa de început a tabelului (DPTR sau PC), iar acumulatorul este setat la poziția care trebuie citită din tabel. Adresa locației care va fi citită se obține adunând acumulatorul la registrul care marchează baza.

Instrucțiunile aritmetice

În tabelul 4.1 este prezentat setul de instrucțiuni aritmetice.

Tabelul 4.1. Setul de instrucțiuni aritmetice

MNEMONICA	OPERAȚIA	ADRESARE				TIMP [μs]
		d	id	r	i	
ADD A, <octet>	$A=A+\langle\text{octet}\rangle$	x	x	x	x	1
ADDC A, <octet>	$A=A+\langle\text{octet}\rangle+C$	x	x	x	x	1
SUBB A, <octet>	$A=A-\langle\text{octet}\rangle-C$	x	x	x	x	1
INC A	$A=A+1$	doar ACC				1
INC <octet>	$\langle\text{octet}\rangle=\langle\text{octet}\rangle+1$	x	x	x		1
INC DPTR	$DPTR=DPTR+1$	doar DPTR				2
DEC A	$A=A-1$	doar ACC				1
DEC <octet>	$\langle\text{octet}\rangle=\langle\text{octet}\rangle-1$	x	x	x		1
MUL AB	$B:A=B\times A$	doar ACC și B				4
DIV AB	$A=\text{Int}[A/B]$ $B=\text{Mod}[A/B]$	doar ACC și B				4
DA A	Ajustare zecimală	doar ACC				1

Tabelul indică tipul de adresare care se poate utiliza pentru fiecare instrucțiune în vederea accesării operandului <octet>. De exemplu, instrucțiunea *ADD A, <octet>* poate fi scrisă în următoarele moduri:

ADD A, 7FH (adresare directă)

ADD A, @R0 (adresare indirectă)

ADD A, R7 (adresare la registru)

ADD A, #127 (adresare imediată)

Timpii de execuție specificați în tabel corespund unei frecvențe de lucru de 12MHz.

Instrucțiunile *INC* și *DEC* realizează incrementarea, respectiv decrementarea operandului cu o unitate. Se remarcă faptul că orice octet din memoria de date internă poate fi incrementat, respectiv decrementat, fără a fi nevoie ca datele să fie încărcate în acumulator.

Instrucțiunea de înmulțire *MUL AB* multiplică conținutul acumulatorului cu al registrului B, punând rezultatul, un cuvânt pe 16 biți, în regiștri A și B. Instrucțiunea de împărțire *DIV AB* împarte acumulatorul la registrul B și pune rezultatul astfel:

- câtul în acumulator (8 biți);
- restul în registrul B (8 biți).

Instrucțiunea *DA A* este specifică operațiilor în aritmetică BCD.

Instrucțiunile logice

Tabelul 4.2 prezintă paleta instrucțiunilor logice.

Tabelul 4.2. Setul de instrucțiuni logice

MNEMONICA	OPERAȚIA	ADRESARE				TIMP [μs]
		d	id	r	i	
ANL A, <octet>	$A = A \wedge \text{<octet>}$	x	x	x	x	1
ANL <octet>, A	$\text{<octet>} = \text{<octet>} \wedge A$	x				1
ANL <octet>, #data	$\text{<octet>} = \text{<octet>} \wedge \text{data}$	x				2
ORL A, <octet>	$A = A \vee \text{<octet>}$	x	x	x	x	1
ORL <octet>, A	$\text{<octet>} = \text{<octet>} \vee A$	x				1
ORL <octet>, #data	$\text{<octet>} = \text{<octet>} \vee \text{data}$	x				2
XRL A, <octet>	$A = A \vee \text{ex <octet>}$	x	x	x	x	1
XRL <octet>, A	$\text{<octet>} = \text{<octet>} \vee \text{ex A}$	x				1
XRL <octet>, #data	$\text{<octet>} = \text{<octet>} \vee \text{ex \#data}$	x				2
CRL A	A=00H	doar ACC				1
CPL A	A= non A	doar ACC				1
RL A	Rotește ACC la stânga	doar ACC				1
RLC A	Rotește ACC la stânga cu C	doar ACC				1
RR A	Rotește ACC la dreapta	doar ACC				1
RRC A	Rotește ACC la dreapta cu C	doar ACC				1
SWAP A	Schimbă nibble în A	doar ACC				1

Pentru fiecare instrucțiune este precizat modul de adresare permis. De exemplu, pentru instrucțiunea *ANL A, <octet>* sunt permise următoarele forme:

ANL A, 7FH (adresare directă)

ANL A, @R1 (adresare indirectă)

ANL A, R6 (adresare la registru)

ANL A, #47 (adresare imediată)

Instrucțiunile pentru rotirea acumulatorului, *RL A*, *RLC A*, *RR A* și *RRC A*, mută conținutul acumulatorului cu un bit la stânga, respectiv dreapta. Pentru rotirea la stânga, bitul cel mai semnificativ (MSB) trece în poziția bitului cel mai puțin semnificativ (LSB).

Instrucțiunea *SWAP A* schimbă între ei nibble-ul inferior și superior ai acumulatorului.

Instrucțiunile de transfer

Vor fi prezentate instrucțiunile care vizează memoria RAM internă. Acestea sunt prezentate în tabelul 4.3. Instrucțiunile de tip *MOV <dest>, <sursa>* permit transferul datelor între orice locații de memorie internă de date și SFR. Acest set de instrucțiuni include și o instrucțiune pe 16 biți necesară inițializării registrului DPTR.

Tabelul 4.3. Setul instrucțiunilor de transfer

MNEMONICA	OPERAȚIA	ADRESARE				TIMP [μs]
		d	id	r	i	
<i>MOV A, <sursa></i>	<i>A=<sursa></i>	x	x	x	x	1
<i>MOV <dest>, A</i>	<i><dest>=A</i>	x	x	x		1
<i>MOV <dest>, <sursa></i>	<i><dest>=<sursa></i>	x	x	x	x	2
<i>MOV DPTR, #data16</i>	<i>DPTR=const. de 16 biți</i>				x	2
<i>PUSH <sursa></i>	<i>INC SP</i> <i>MOV "@SP", <sursa></i>	x				2
<i>POP <dest></i>	<i>MOV <dest>, "@SP"</i> <i>DEC SP</i>	x				2
<i>XCH A, <octet></i>	<i>ACC și <octet> comută</i>	x	x	x		1
<i>XCHD A, @Ri</i>	<i>ACC și @Ri comută low nibbles</i>		x			1

Instrucțiunea *PUSH* incrementează indicatorul de stivă, după care copiază octetul sursă în stivă; instrucțiunea *POP* operează complementar. Pentru a interschimba conținutul a două locații de memorie se utilizează instrucțiunea *XCH A, <octet>*.

Instrucțiunile de bit

Sunt instrucțiunile care accesează cei 128 biți adresabili direct ai memoriei interne de date, respectiv cei 128 biți ai SFR:

- adresele de bit 00H ... 7FH din "Lower 128";
- adresele de bit 80H ... FFH din SFR.

Toate instrucțiunile orientate pe bit (tabelul 4.4) utilizează doar adresarea directă a memoriei. De exemplu, pentru scrierea la un port se va utiliza următoarea succesiune de instrucțiuni:

```
MOV C, FLAG
MOV P1.0, C
```

În acest exemplu, FLAG este numele unui bit din zonele de memorie specificate mai sus. Bitul 0 (LSB) al portului P1 este pus pe 0 sau 1 în funcție de starea bitului FLAG. Bitul CY din PSW este utilizat ca bit acumulator și este notat în instrucțiuni cu C.

Tabelul 4.4. Setul instrucțiunilor orientate pe bit

MNEMONICA	OPERAȚIA	TIMP [μ s]
ANL C, bit	C=C.ȘI.bit	2
ANL C, /bit	C=C.ȘI..NU.bit	2
ORL C, bit	C=C.SAU.bit	2
ORL C, /bit	C=C.SAU..NU.bit	2
MOV C, bit	C=bit	1
MOV bit, C	bit=C	2
CLR C	C=0	1
CLR bit	bit=0	1
SETB C	C=1	1
SETB bit	bit=1	1
CPL C	C=NU.C	1
CPL bit	bit=NU.bit	1
JC rel	salt dacă C=1 la adresa rel	2
JNC rel	salt dacă C=0 la adresa rel	2
JB bit, rel	salt dacă bit=1 la adresa rel	2
JNB bit, rel	salt dacă bit=0 la adresa rel	2
JBC bit, rel	salt dacă bit=1 la adresa rel; CLR bit	2

Instrucțiunile de salt

Tabelul 4.5 prezintă lista instrucțiunilor de salt necondiționat.

Tabelul 4.5. Setul instrucțiunilor de salt necondiționat

MNEMONICA	OPERAȚIA	TIMP [μ s]
JMP adr	Salt la adresa <i>adr</i>	2
JMP @A+DPTR	Salt la A+DPTR	2
CALL adr	Cheamă subrutina de la adresa <i>adr</i>	2
RET	Ieșire din subrutină	2
RETI	Ieșire din întrerupere	2
NOP	Nici o operație	1

Adresa la care se face saltul poate fi de maxim 16 biți și poate fi specificată printr-o etichetă sau o constantă de 16 biți. Subrutinele chemate de instrucțiunea CALL trebuie să se încheie cu instrucțiunea RET pentru ca programul să fie reluat cu instrucțiunea care urmează după CALL. Instrucțiunea RETI este utilizată pentru ieșirea din rutinele de tratare a întreruperilor, având rolul de a informa sistemul de tratare a întreruperilor că întreruperea curentă a fost efectuată. Dacă nu există nici o întrerupere în derulare în timpul execuției instrucțiunii RETI, atunci aceasta are același efect cu RET.

Tabelul 4.6. Setul instrucțiunilor de salt condiționat

MNEMONICA	OPERAȚIA	ADRESARE				TIMP [μs]
		d	id	r	i	
JZ rel	Salt dacă A=0	doar ACC				2
JNZ rel	Salt dacă A≠0	doar ACC				2
DJNZ <octet>, rel	DEC <octet> Salt dacă rez. e dif. 0	x		x		2
CJNE A, <octet>, rel	Salt dacă A≠<octet>	x			x	2
CJNE <octet>, #data, rel	Salt dacă <octet>≠#data		x	x		2

În tabelul 4.6 este prezentată lista instrucțiunilor de salt condiționat. Toate instrucțiunile de salt condiționat specifică adresa în care se va produce saltul printr-un octet. Această adresă poate fi plasată la o distanță cuprinsă între -127 și +128 octeți față de adresa instrucțiunii care urmează după instrucțiunea de salt condiționat. Adresa la care se face saltul poate fi de maxim 16 biți și poate fi specificată printr-o etichetă sau o constantă de 16 biți.

Instrucțiunea DJNZ este utilizată frecvent pentru controlul buclelor de program. Pentru a executa o buclă de N ori, de exemplu N=10, numărul N se încarcă într-un contor, iar ultima instrucțiune a buclei va fi DJNZ, car va testa dacă numărul N a ajuns la zero și va decide reluarea buclei sau nu:

```
MOV CONTOR, #10
LOOP:
    •
    •
    •
    DJNZ CONTOR, LOOP
```

Instrucțiunile CJNE pot fi utilizate de asemenea pentru controlul buclelor sau pentru efectuarea de comparații.

Sistemul de întreruperi

Microcontrolerele 80C51 au minim 5 surse de întrerupere prezentate în planșa 4.1:

- două întreruperi externe, nINT0 și nINT1;

- două întreruperi generate de Timer 0 și Timer 1;
- o întrerupere generată de portul serial.



Simbol	Funcție
EA	Valideaza toate intreruperile daca EA=1. Invalideaza toate intreruperile daca EA=0
x	Biti rezervati
ES	Valideaza/invalideaza portul serial. Portul e validat daca ES=1
ET1	Valideaza/invalideaza intreruperea de la Timer1. Validare daca ET1=1
EX1	Valideaza/invalideaza intreruperea externa 1. Validare daca EX1=1
ET0	Timer0, similar cu ET1
EX0	Intrerupere externa 0, similar EX1

Fig. 4.19. Registrul IE

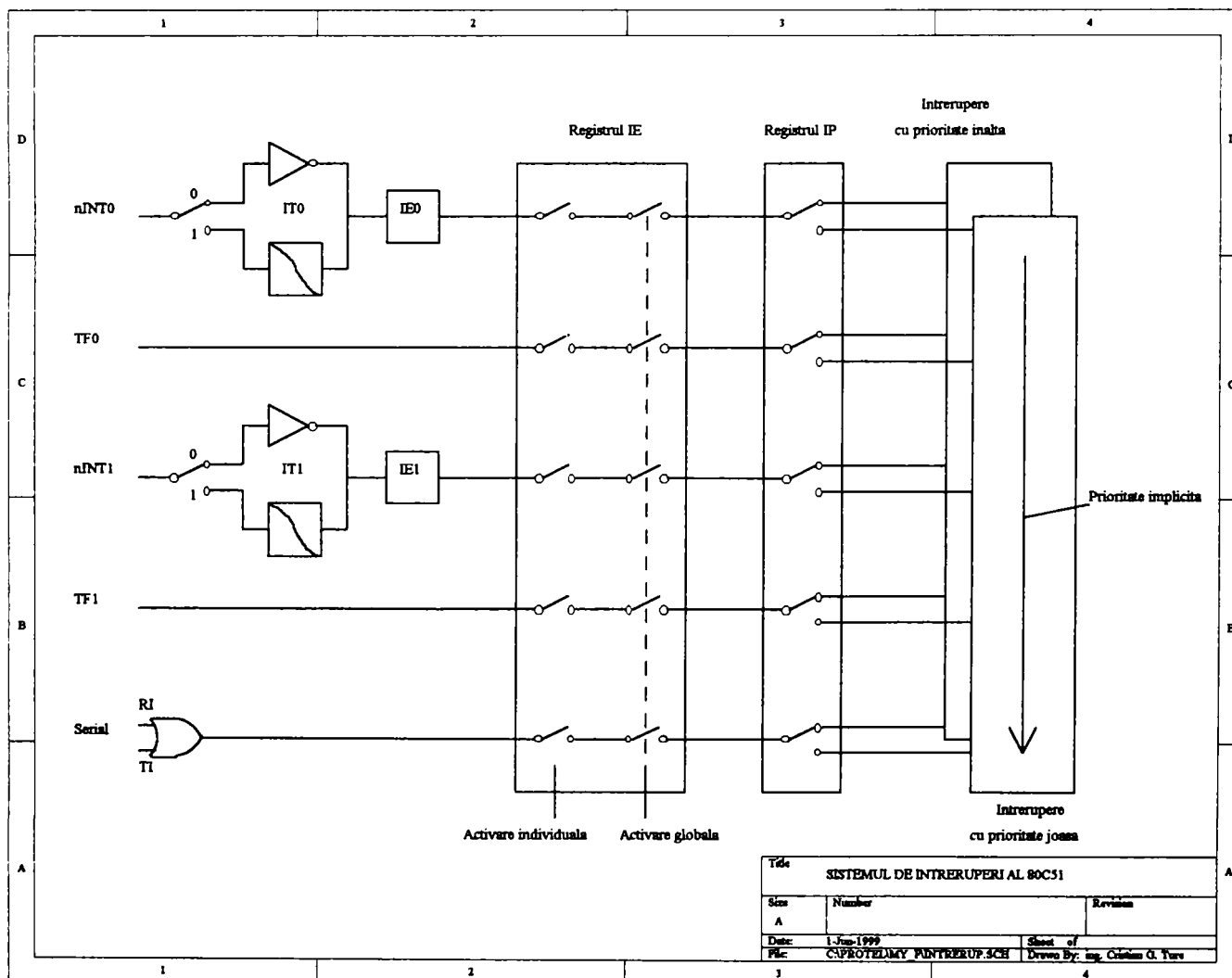


Simbol	Funcție
x	Biti rezervati
PS	Defineste nivelul de prioritate al portului serial.
PT1	Defineste nivelul de prioritate al Timer1.
PX1	Defineste nivelul de prioritate al intreruperii externe 1.
PT0	Defineste nivelul de prioritate al Timer0.
PX0	Defineste nivelul de prioritate al intreruperii externe 0.

Prioritate ridicata daca bit=1
Prioritate scazuta daca bit=0

Fig. 4.20. Registrul IP

Planșa 4.1. Sistemul de întreruperi al 80C51



Titlu		
SISTEMUL DE INTRERUPERI AL 80C51		
Size	Number	Revision
A		
Date:	1-Jun-1999	Sheet of
File:	CAPROTELUMY_PINTRERUPERI.SCH	Drawn By: eng. Cristian G. Turu

Fiecare întrerupere poate fi validată sau invalidată individual prin setarea bitului corespunzător din registrul IE (Interrupt Enable) din SFR. Acest registru mai conține un bit de validare globală care prin setare pe 0 invalidează toate întreruperile. Figura 4.19 prezintă registrul IE. Fiecare sursă de întrerupere poate fi programată pe unul din cele două nivele de prioritate prin setarea unui bit din registrul IP (Interrupt Priority) din SFR (figura 4.20). O întrerupere cu nivel de prioritate scăzut poate fi întreruptă de o întrerupere cu prioritate ridicată, dar nu și de o altă întrerupere cu nivel de prioritate scăzut. O întrerupere cu nivel de prioritate ridicat nu poate fi întreruptă de nici o altă întrerupere.

Dacă procesorul primește simultan două cereri de întrerupere cu nivele de prioritate diferite, va fi servită întreruperea cu prioritate ridicată. Dacă sunt primite simultan mai multe cereri de întrerupere cu același nivel de prioritate, va fi respectată următoarea succesiune de apel selectiv:

<i>Sursa</i>	<i>Prioritate</i>
1. IE0	cea mai mare
2. TF0	
3. IE1	
4. TF1	
5. RI+TI	cea mai mică

Întreruperile externe

Sursele externe de întrerupere pot fi programate să fie activate în două moduri:

- activare pe nivel logic zero al pinilor nINT0, respectiv nINT1;
- activare pe tranziția semnalului aplicat pinilor nINT0, respectiv nINT1, de la logic unu la logic zero.

Cele două moduri de funcționare a întreruperilor externe sunt determinate de modul în care sunt setați biții corespunzători din registrul TCON din SFR (figura 4.21).

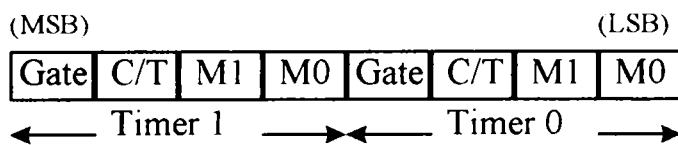


<i>Simbol</i>	<i>Semnificatie</i>	<i>Simbol</i>	<i>Semnificatie</i>
TF1	Fanion depasire Timer1. Setat de hard cind contorul a depasit. Adus la 0 cind procesorul lanseaza rutina intreruperii.	IE1	Fanion intrerupere ext. la pinul nINT1. Setat de hard la detectie. Adus la 0 cind procesorul lanseaza rutina intreruperii externe 1.
TR1	Bit de control al pornirii Timer1. Setat/adus la 0 de soft pentru a porni/opri Timer1.	IT1	Bit de control al tipului de intrerupere. Setat/adus la 0 de soft pentru a specif. o intrerupere ext. 1 pe tranzitie/nivel.
TF0	Fanion depasire Timer0. Actiune similara cu TF1.	IE0	Fanion tranzitie la pinul nINT0. Actiune similara cu IE1.
TR0	Bit de control al pornirii Timer0. Actiune similara cu TR1.	IT0	Bit de control al tipului de intrerupere. Actiune similara cu IT1.

Fig. 4.21. Registrul TCON

Înteruperile generate de Timer/Contor

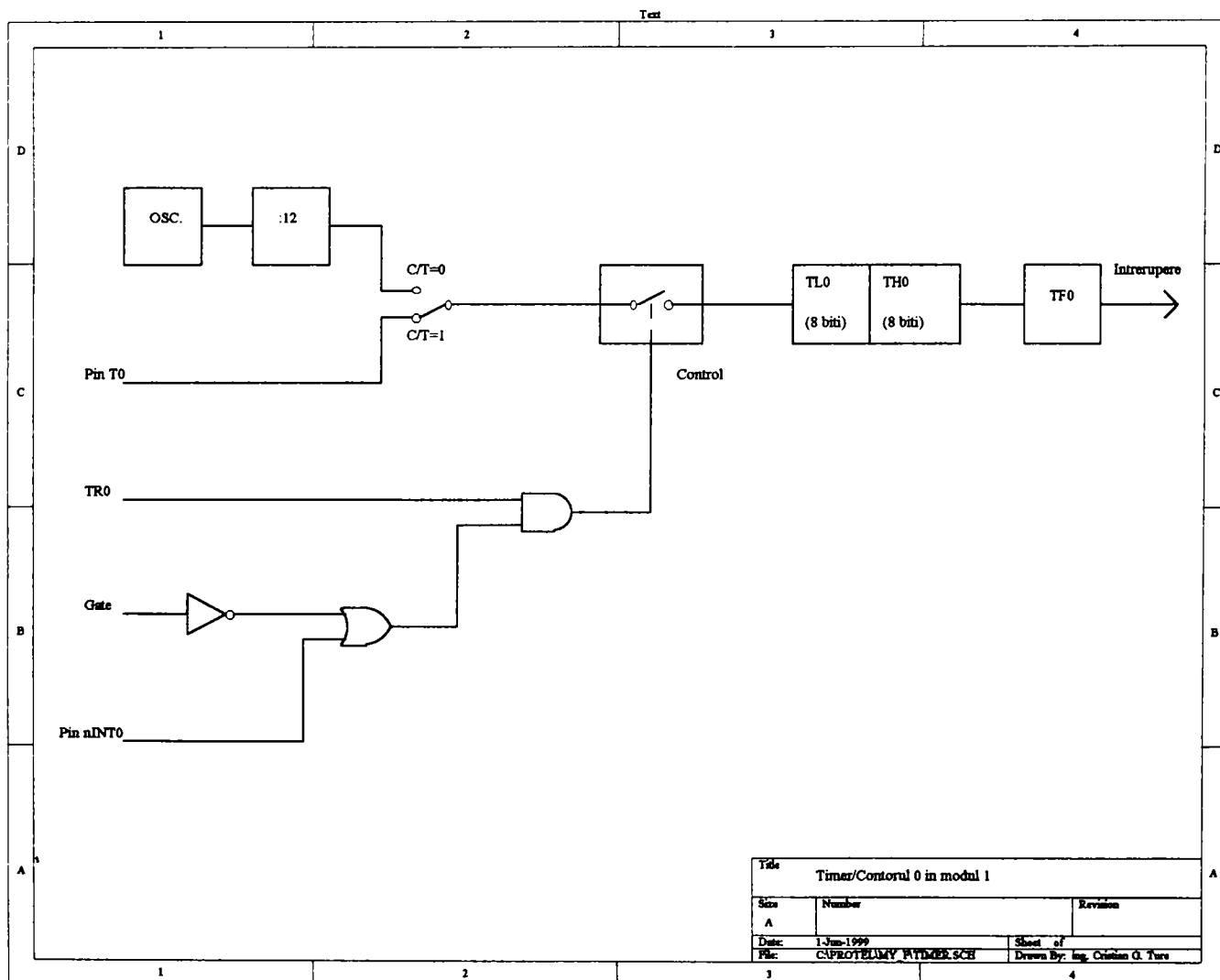
Microcontrolerele 80C51 au doi regiștri de Timer/Contor pe 16 biți: Timer0 și Timer1. Ambii pot fi configurați pentru a opera ca temporizator sau contor cu ajutorul biților de control din registrul TMOD aflat în SFR (fig. 4.22).



Simbol	Semnificație	M1	M0	Semnificație
Gate	Bit de validare a numararii. Adus la 0 valideaza numararea daca bitul TRx este setat. Setat, valideaza numararea daca nINTx=1 si TRx=1	0	0	Timer de tip 8048.
C/T	Selector intre Timer/Contor. Adus la 0 pt. operare ca Timer (intrare de la OSC.). Setat pt. operare ca Contor (intrare de la pinul Tx)	0	1	Timer/Contor pe 16 biti. THx si TLx sunt in cascada.
		1	0	Timer/Contor de 8 biti cu autoincarcare. THx pastreaza o valoare care este rein- cargata in TLx.
		1	1	Timer0: TL0 e timer/contor pe 8 biti controlat de bitii de control ai Timer0. TH0 e timer/contor pe 8 biti controlat de bitii de control ai Timer1. Timer1: stopat.

Fig. 4.22. Registrul TMOD

Planșa 4.2. Timer-ul 0 în modul 1



Title			Timer/Contorul 0 in modul 1		
Size	Number	Revision			
A					
Date:	1-Jun-1999	Sheet of			
File:	C:\PROTEL\MY\BTIMER.SCH	Drawn By:	ing. Cristian O. Turu		

În rol de timer, registrul este incrementat la fiecare ciclu mașină. Deoarece un ciclu se desfășoară pe durata a 12 perioade de oscilație a ceasului, frecvența de numărare este 1/12 din frecvența oscilatorului. În rol de contor, registrul este incrementat ca urmare a unei tranziții de la 1 la 0 a semnalului extern aplicat la pinul Tx (T0 pentru Timer0, T1 pentru Timer1). Selecția timer/contor este realizată de bitul de control C/T din registrul TMOD.

Fiecare Timer/Contor are patru moduri de operare care sunt selectate de biții pereche M1 și M0 din registrul TMOD. Modurile 0, 1 și 2 sunt identice pentru Timer 0 și Timer 1. Modul 3 este diferit. În aplicația de față este folosit Timer-ul 0 în modul 1 de operare, a cărui schemă funcțională este prezentată în planșa 4.2.

În acest mod registrul timer este configurat ca un registru de 16 biți, format din regiștri simpli de 8 biți TH0 și TL0. Când în acești regiștri se produce depășirea (trecerea de la 1 peste tot la 0 peste tot) este setat fanionul de întrerupere TF0, ceea ce va conduce la lansarea în execuție a rutinei de tratare a întreruperii. Intrarea în contor este validată dacă bitul de control TR0 (din registrul TCON) este setat și ori Gate=1, ori nINT0=1. Dacă bitul Gate este setat, atunci timer-ul poate fi controlat prin intrarea externă la pinul nINT0, ceea ce permite măsurarea duratei unui impuls.

Particularități ale microcontrolerului 80C552

80C552 este un microcontroler proiectat pentru a fi utilizat în aplicații de timp real cum sunt:

- monitorizarea proceselor;
- reglarea proceselor industriale;
- aplicații în reglarea autovehiculelor (controlul motorului și transmisiei).

Dispozitivul are în plus față de funcțiile standard ale 80C51 o serie de funcții dedicate pentru aceste aplicații.

Microcontrolerele 80C552 conțin:

- memorie internă de program: 8k×8;
- memorie internă de date: 256×8;
- patru porturi de intrare/ieșire de 8 biți;
- un port de intrare de 8 biți;
- trei timer-e: Timer0 și Timer1 identice cu ale 80C51, Timer2;
- timer “watchdog”;
- două nivele de prioritate;
- convertor analog-numeric cu opt intrări;
- ieșire dublă PWM;
- două interfețe seriale.

Corespunzător noilor funcții au fost implementați o serie de regiștri noi în spațiul de memorie SFR.

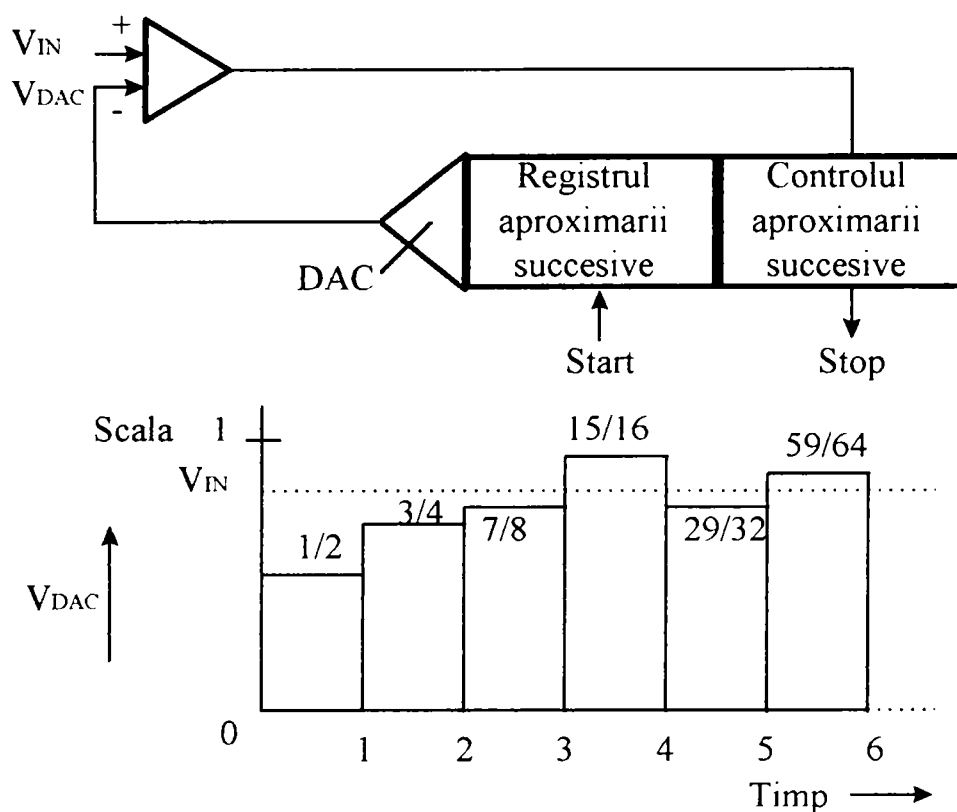


Fig. 4.23. Conversia A/D cu aproximare succesivă

Dintre funcțiile speciale ale 80C552 va fi prezentat convertorul analog-numeric utilizat de sistemul de comandă pentru a măsura semnalul furnizat de traductoare. Conversia A/D se realizează după o schemă cu aproximare succesivă prezentată în figura 4.23. Convertorul A/D conține un convertor numeric-analogic, DAC, ce are rolul de a converti registrul aproximațiilor succesive la o tensiune V_{DAC} care este comparată cu tensiunea de intrare analogică V_{IN} . Ieșirea din comparator este aplicată blocului de control al aproximațiilor succesive care decide valoarea următoarei aproximații. Rezoluția convertorului este de 10 biți. La începutul conversiei blocul de control setează bitul cel mai semnificativ și aduce la zero ceilalți biți ai registrului aproximațiilor succesive (10 0000 0000B). Ieșirea din DAC (50% din scală) este comparată cu tensiunea de intrare. Dacă $V_{IN} > V_{DAC}$ atunci bitul setat rămâne așa, altfel este adus la zero. Acum blocul de control setează următorul bit (11 0000 0000B sau 01 0000 0000B, în funcție de rezultatul precedent) și compară din nou cele două tensiuni. Dacă $V_{IN} > V_{DAC}$ atunci bitul testat rămâne setat, altfel este adus la zero. Acest proces se repetă până când sunt testați toți cei zece biți.

Funcționarea convertorului este controlată de registrul ADCON (fig. 4.24), ai cărui biți au următoarea semnificație:

- ADCON.0, ADCON.1 și ADCON.2 sunt biți de selecție a intrării analogice a portului P5 pentru care se face conversia (tabelul 4.7), comandând corespunzător multiplexorul;
- ADCON.3 este bitul de start al conversiei (pentru start trebuie setat). Poate fi setat prin soft sau de semnalul extern aplicat pinului STADC. Blocul de control

- menține acest bit setat pe toată durata conversiei până când fanionul întreruperii este setat. Atunci bitul de start este adus automat la zero (nu se poate prin soft);
- ADCON.4 este fanionul de întrerupere. Este setat când rezultatul conversiei este gata de a fi citit. Fanionul poate fi adus la zero prin soft, dar nu poate fi setat de soft. Cât timp ADCON.3 și ADCON.4 sunt setați nu poate începe o nouă conversie;
 - ADCON.5 validează startul din exterior al conversiei prin pinul STADC:
 - 0 = start numai prin soft
 - 1 = start prin soft sau STADC;
 - ADCON.6 este bitul 0 al rezultatului conversiei (cel mai puțin semnificativ);
 - ADCON.7 este bitul 1 al rezultatului conversiei.

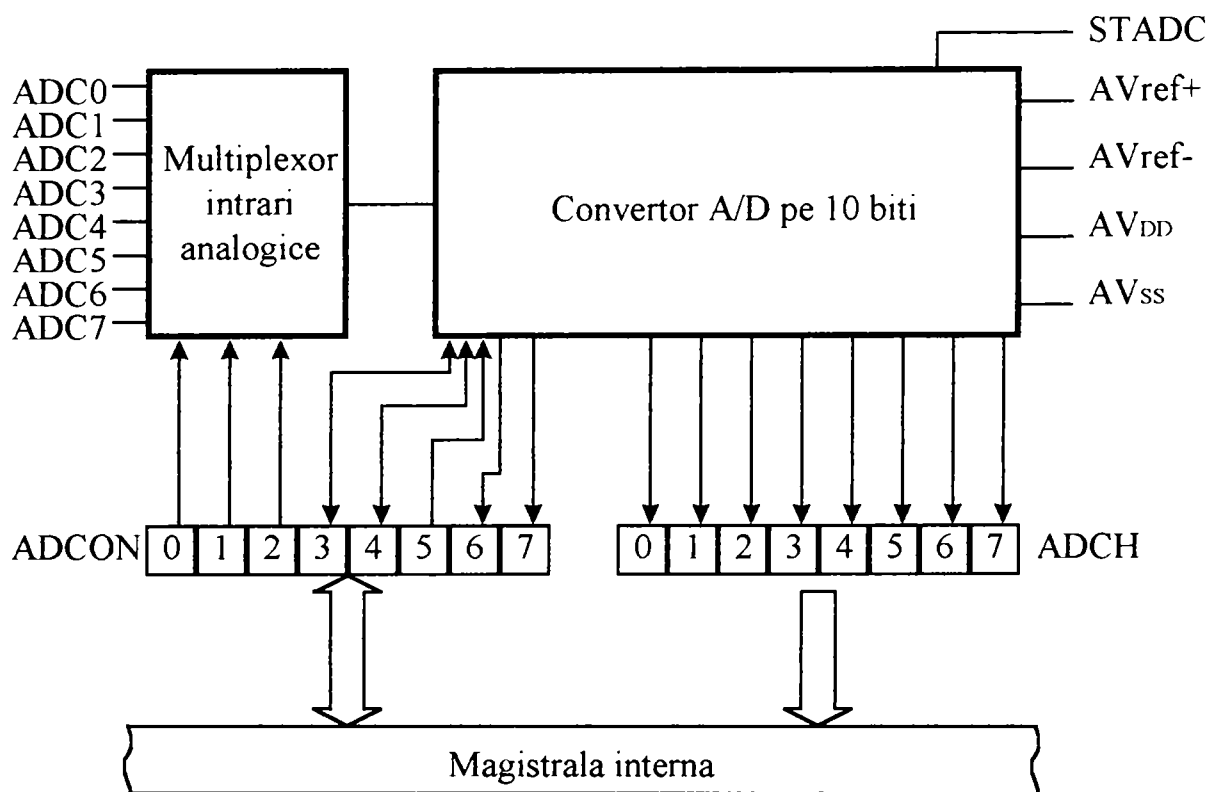


Fig. 4.24. Schema-bloc a convertorului A/D

Tabel 4.7. Comanda multiplexorului

ADCON.2	ADCON.1	ADCON.0	Intrare selectată
0	0	0	ADC0(P5.0)
0	0	1	ADC1(P5.1)
0	1	0	ADC2(P5.2)
0	1	1	ADC3(P5.3)
1	0	0	ADC4(P5.4)
1	0	1	ADC5(P5.5)
1	1	0	ADC6(P5.6)
1	1	1	ADC7(P5.7)

Prin soft conversia este inițializată setând bitul ADCON.3. Primii 8 biți ai rezultatului (cei mai semnificativi) sunt memorați în registrul ADCH, iar ultimii doi

în ADCON.7 și ADCON.6. Aceștia din urmă pot fi ignorați. La finele conversiei, care durează 50 de cicluri mașină) este setat fanionul care poate lansa în execuție o rutină de tratare a întreruperii.

Convertorul A/D are proprii pini de alimentare (AV_{DD} și AV_{SS}) și doi pini (AV_{ref+} și AV_{ref-}) conectați la convertorul D/A. Tensiunile pinilor AV_{ref+} și AV_{ref-} pot fi cuprinse între $AV_{DD}+0,2V$ și $AV_{SS}-0,2V$. AV_{ref+} trebuie să fie pozitivă față de AV_{ref-} , iar V_{IN} trebuie să fie cuprinsă între AV_{ref+} și AV_{ref-} . De exemplu dacă tensiunea de intrare este cuprinsă între 2...4V, atunci rezoluția maximă se obține dacă $AV_{ref+} = 4V$ și $AV_{ref-} = 2V$. Dacă sunt utilizați toți cei 10 biți ai rezultatului, acesta se poate calcula cu formula:

$$Rezultat = 1024 \times \frac{V_{IN} - AV_{ref-}}{AV_{ref+} - AV_{ref-}} \quad (4.9)$$

4.5.3 Traductoarele sistemului de comandă și control

Comada mișcării de avans a electrodului-sculă se realizează utilizând ca mărime de referință unul din următorii parametri de comandă:

- căderea de tensiune electrică pe cei doi electrozi;
- intensitatea curentului de lucru consumat de procesul electrochimic;
- căderea de presiune a electrolitului pe interstițiul de lucru;
- căderea de temperatură a electrolitului pe interstițiul de lucru.

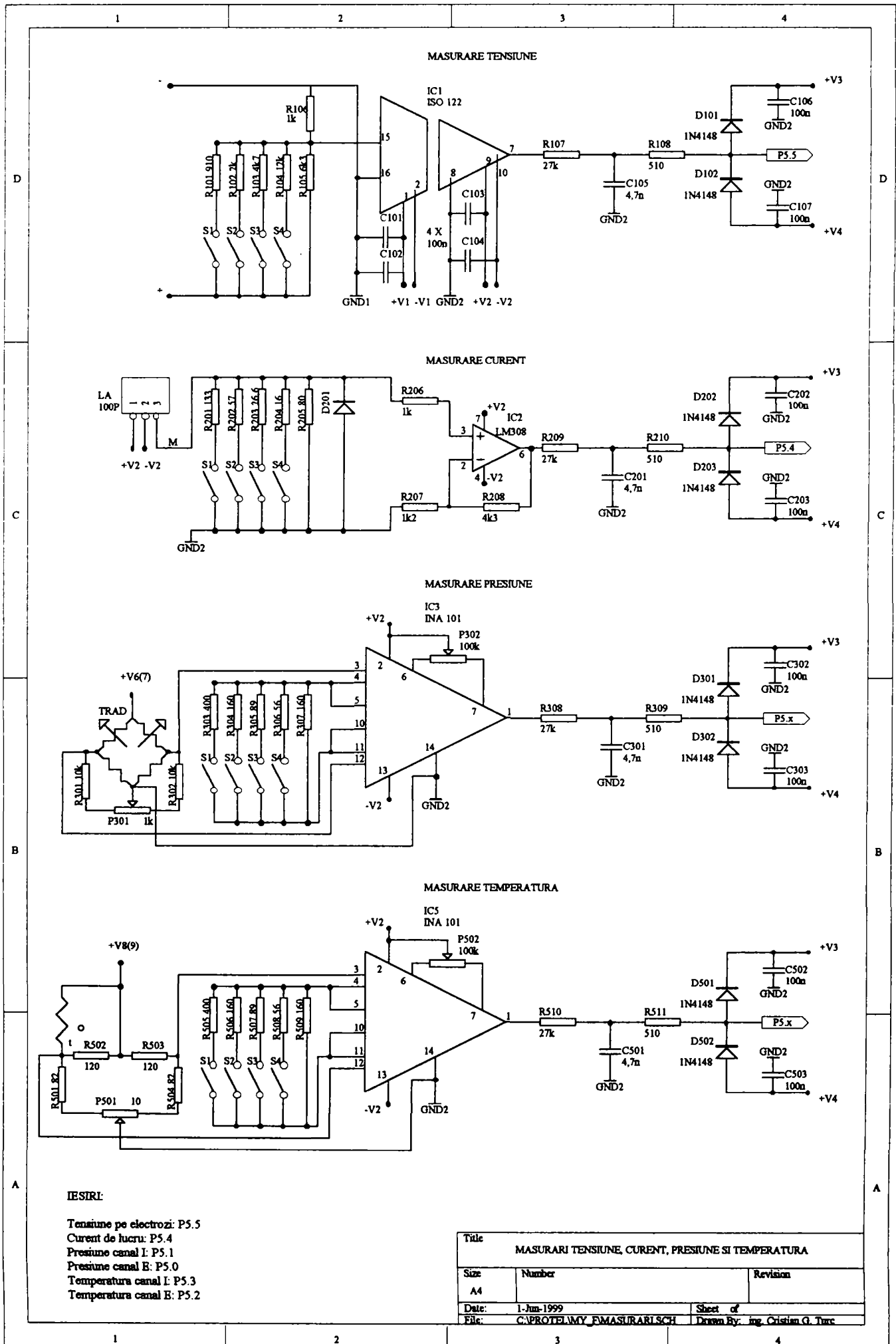
Deci pentru testarea diferitelor posibilități de comandă a mișcării de avans este necesară măsurarea tensiunii electrice dintre cei doi electrozi, a intensității curentului electric consumat de procesul de prelucrare, a presiunii electrolitului la intrarea și ieșirea din interstițiul de lucru, respectiv a temperaturii electrolitului la intrarea și ieșirea din interstițiul de lucru.

Deoarece comanda întregului proces de prelucrare se realizează utilizând un sistem cu microcontroler, pentru protecția sistemului este necesară izolarea galvanică a sistemului de comandă față de celelalte componente ale mașinii și limitarea tensiunilor de ieșire din sistemul de măsurare în domeniul 0...5V. Sistemul de măsurare a fost conceput și realizat ținând cont de acest deziderat.

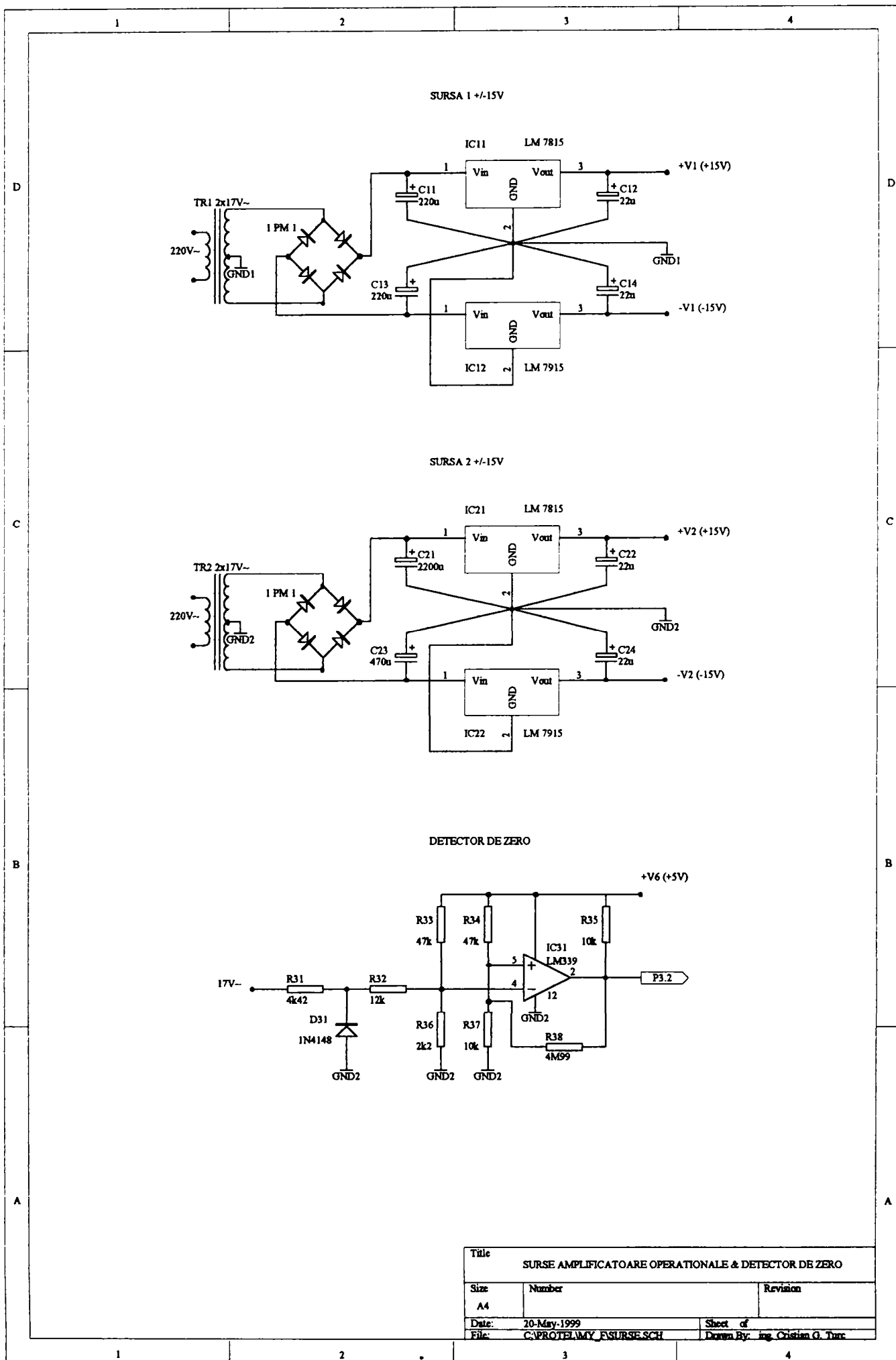
Măsurarea tensiunii electrice dintre electrozi.

Pentru măsurarea tensiunii și realizarea izolării galvanice se utilizează amplificatorul cu izolație marca *Burr-Brown* tip *ISO 122*. Schema electronică asociată este prezentată în planșa 4.3. Cele două secțiuni ale montajului (circuitul de intrare și cel de ieșire) sunt alimentate de la două surse diferite de $\pm 15V_{cc}$ (vezi planșa 4.4). Montajul de rezistențe de la intrare permite selectarea a cinci game de

Planșa 4.3. Circuitele de măsurare



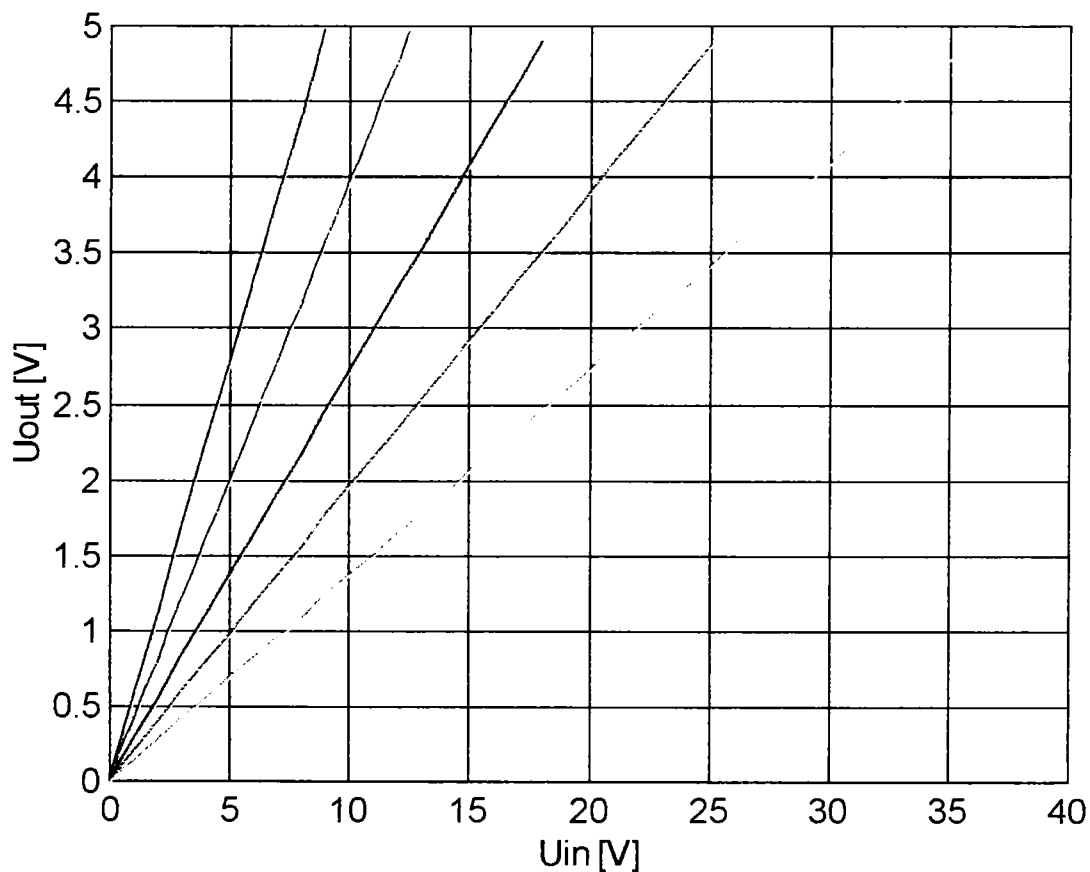
Planșa 4.4. Circuitele de alimentare a sistemului de măsurare și circuitul detector de zero



Title		
SURSE AMPLIFICATOARE OPERATIONALE & DETECTOR DE ZERO		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	20-May-1999	Sheet of
File:	C:\PROTEL\MY_ESURSE.SCH	Drawn By: ing. Cristian G. Turc

măsurare prin închiderea corespunzătoare a celor patru întrerupătoare astfel încât la ieșire tensiunea să fie cuprinsă în domeniul $0...5V$ (vezi fig. 4.25):

- s_1 închis, restul deschise: $U_{in} = 0...9V$;
- s_2 închis, restul deschise: $U_{in} = 0...12,5V$;
- s_3 închis, restul deschise: $U_{in} = 0...18V$;
- s_4 închis, restul deschise: $U_{in} = 0...25V$;
- toate întrerupătoarele deschise: $U_{in} = 0...36V$.



Legendă: — $U_{in} = 0...9V$
 — $U_{in} = 0...12,5V$
 — $U_{in} = 0...18V$
 — $U_{in} = 0...25V$
 — $U_{in} = 0...36V$

Fig. 4.25. Caracteristicile de lucru ale traductorului de tensiune

Tensiunea de ieșire este filtrată cu ajutorul unui filtru trece-jos cu frecvența de tăiere de cca. $1kHz$. Limitarea tensiunii de ieșire este asigurată de montajul cu diode de la ieșire care nu permite scăderea tensiunii de ieșire sub $0V$, respectiv creșterea tensiunii de ieșire peste $5V$.

Circuitul detector de zero prezentat în planșa 4.4 furnizează la ieșire un semnal dreptunghiular care este aplicat pinului 3.2 al microcontrolerului în vederea declanșării unei întreruperi externe în momentul trecerii prin zero a tensiunii alternative a rețelei (fig. 4.26). Măsurarea tensiunii redresate aplicate pe electrozi se realizează cu o întârziere de $5ms$, astfel determinându-se maximum acestei tensiuni.

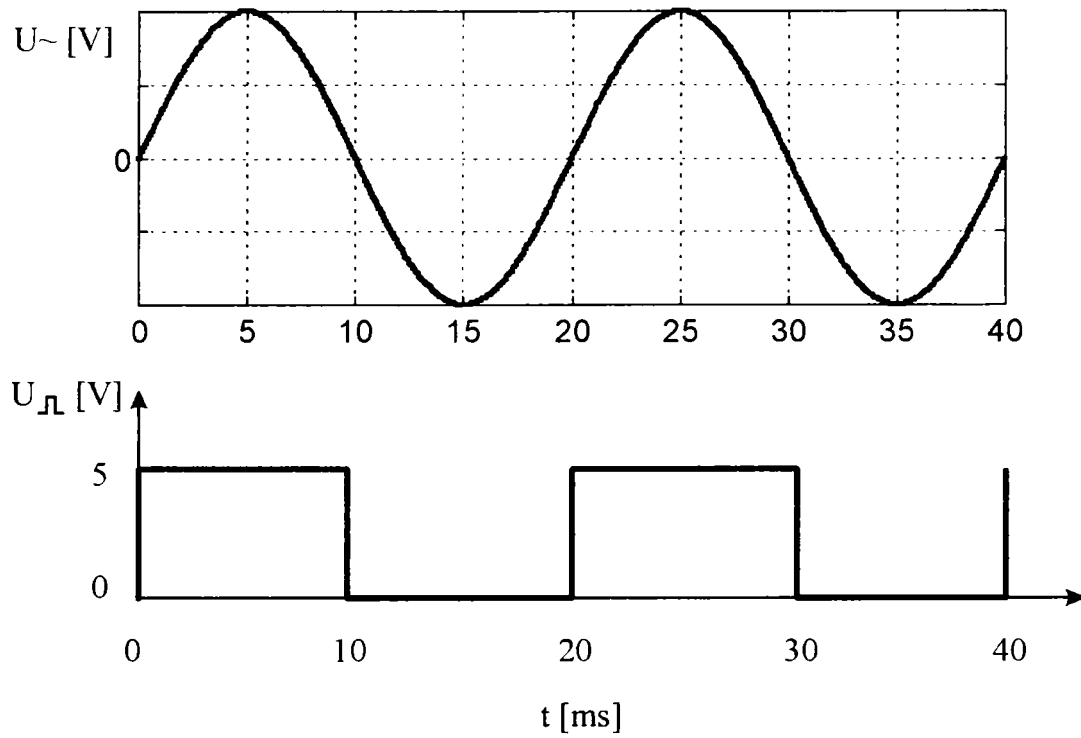


Fig. 4.26. Tensiunile la intrarea și ieșirea detectorului de zero

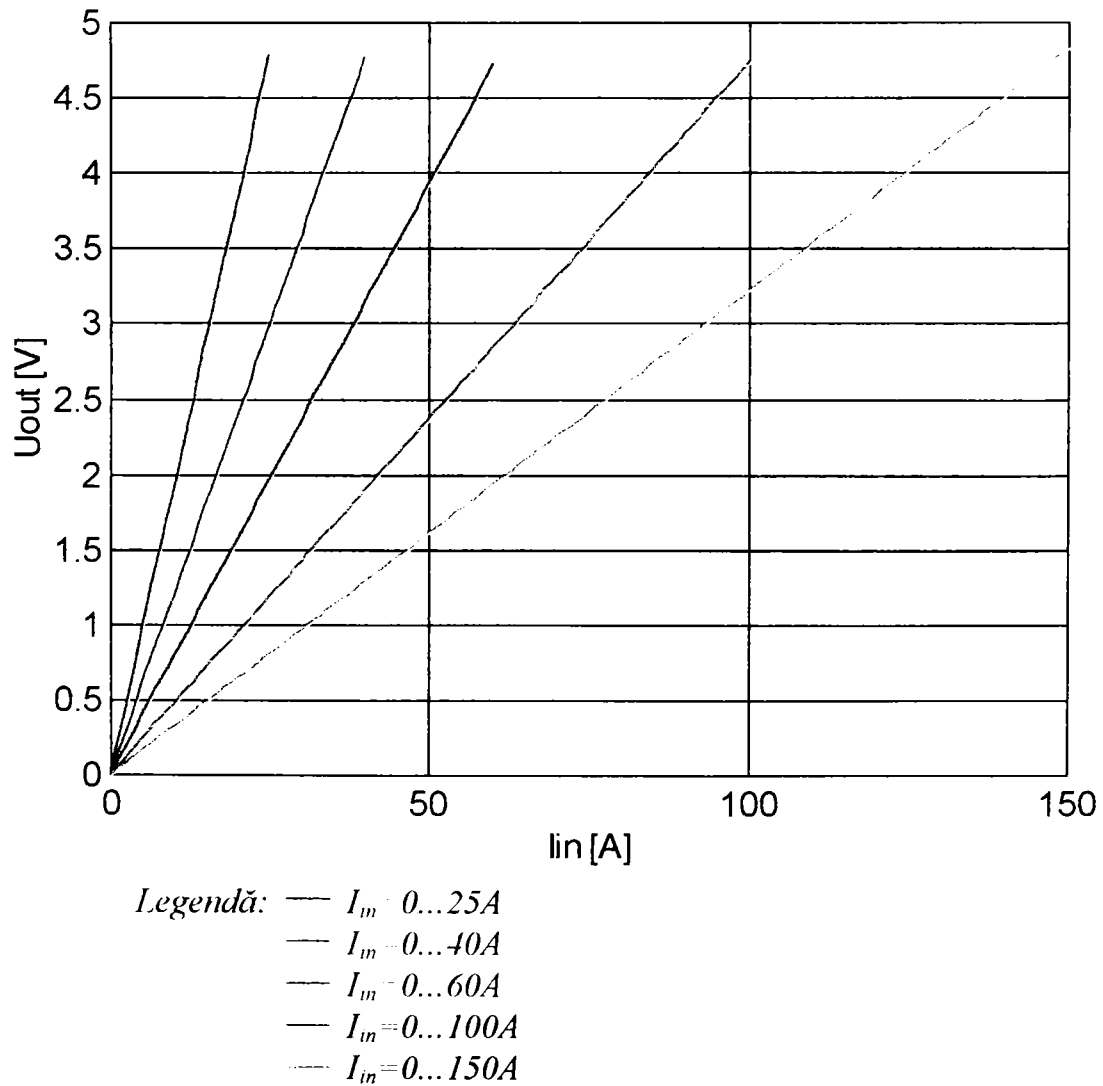


Fig. 4.27. Caracteristicile de lucru ale traductorului de curent

Măsurarea intensității curentului electric consumat.

Pentru măsurarea curentului este utilizat un traductor specializat marca *LEM* de tipul *LA 100P* care permite măsurarea unui curent efectiv maxim de *100A*. Schema electronică a montajului este prezentată în planșa 4.3. Montajul de rezistențe de la intrare permite selectarea a cinci game de măsurare a curentului de vârf prin închiderea corespunzătoare a celor patru întrerupătoare astfel încât la ieșire tensiunea să fie cuprinsă în intervalul $0...5V$ (vezi fig. 4.27):

- toate întrerupătoarele deschise: $I_{in}=25A$;
- s_1 închis, restul deschise: $I_{in}=40A$;
- s_2 închis, restul deschise: $I_{in}=60A$;
- s_3 închis, restul deschise: $I_{in}=100A$;
- s_4 închis, restul deschise: $I_{in}=150A$.

Tensiunea de ieșire este filtrată și limitată în modul descris în paragraful anterior.

Măsurarea presiunii electrolitului.

Traductoarele de presiune utilizate pentru măsurarea presiunii electrolitului la intrarea și ieșirea din interstițiul de lucru sunt de tip tensometric. Construcția traductoarelor este prezentată în figura 4.28.

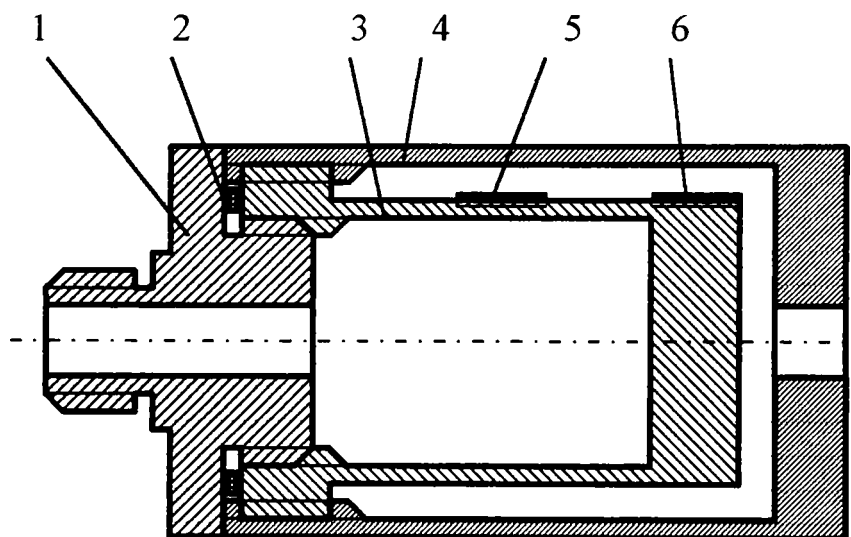


Fig. 4.28. Traductor de presiune

Semnificația notațiilor este următoarea:

- 1 - racord;
- 2 - garnitură;
- 3 - element sensibil;
- 4 - carcasă de protecție;
- 5,6 - timbre tensometrice.

Datorită mediului coroziv în care vor lucra traductoarele, toate elementele care vin în contact cu electrolitul se vor executa din oțelul inoxidabil *1MoCr260*. Dimensionarea traductorului s-a făcut prin limitarea tensiunii circumferențiale în elementul sensibil, admitând că presiunea maximă a electrolitului este $2 MPa$.

Pe elementul sensibil de tip tub sunt lipite, pe direcție circumferențială, două timbre tensometrice de tip *HBM-LY11* (unul activ și unul de compensare). Cele două timbre tensometrice, împreună cu două rezistențe adiționale, formează punte care se conectează la amplificatorul de instrumentație *INA 101* conform schemei din planșa 4.3.

Tensiunea de ieșire este

$$e_{out} = G(e_1 - e_2) \quad (4.9)$$

în care G reprezintă factorul de amplificare. Factorul de amplificare maxim este $G = 1000$. Amplificarea se reglează cu ajutorul rezistențelor buclei de reacție $R_{303} \dots R_{307}$ astfel încât tensiunea de ieșire să fie cuprinsă în domeniul $0 \dots 5V$. Formula de calcul a factorului de amplificare este

$$G = 1 + \frac{40k\Omega}{R_G} \quad (4.10)$$

în care prin $R_G [k\Omega]$ s-a notat rezistența buclei de reacție. Amplificarea a fost reglată astfel încât tensiunea de ieșire să se încadreze în intervalul $0 \dots 5V$ pentru o variație a presiunii în intervalul $0 \dots 2 MPa$. Echilibrarea punții se face cu ajutorul potențiometrului de $100 k\Omega$.

Tensiunea de ieșire este filtrată și limitată în același mod ca în cazul celorlalte circuite de măsurare. În figurile 4.29 și 4.30 sunt prezentate curbele de etalonare a traductoarelor de presiune.

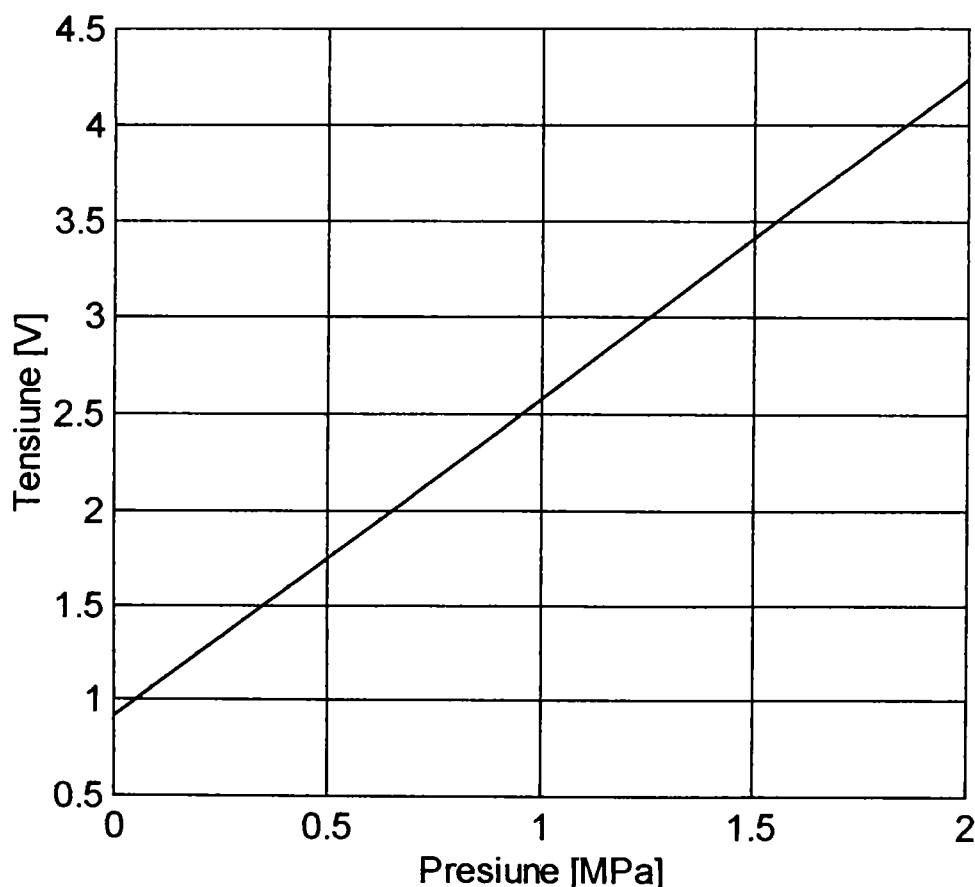


Fig. 4.29. Caracteristica traductorului de presiune - canal I

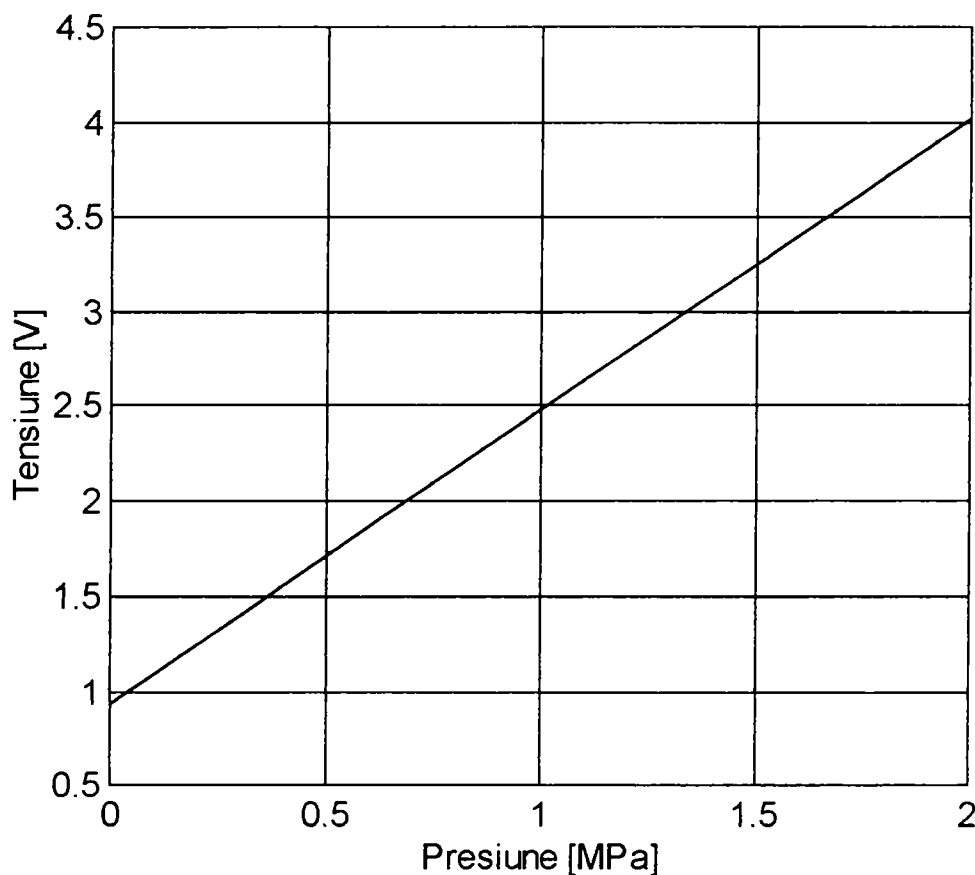


Fig. 4.30. Caracteristica traductorului de presiune - canal E

Traductoarele de temperatură

Temperatura electrolitului se măsoară atât la intrarea cât și la ieșirea din interstițiul de lucru cu ajutorul a două sonde de temperatură a căror construcție este prezentată în figura 4.31.

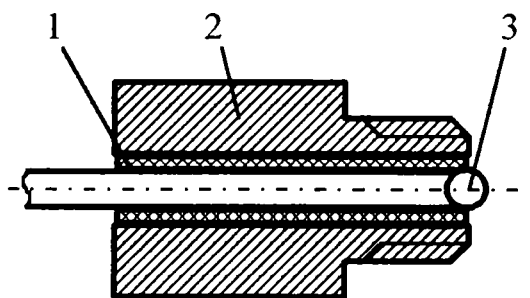


Fig. 4.31. Sondă de temperatură

Elementul sensibil este constituit de termistorul 3. Acesta face parte dintr-un montaj în sfert de punte care se conectează la un amplificator de instrumentație (de tipul celui utilizat la amplificarea semnalului de la traductorul de presiune, conform schemei din planșa 4.3). În figurile 4.32 și 4.33 sunt prezentate curbele de etalonare a traductoarelor de temperatură. Amplificarea a fost reglată astfel încât tensiunea de ieșire să se încadreze în intervalul $0...5V$ pentru o variație a temperaturii în intervalul $17...80^{\circ}C$.

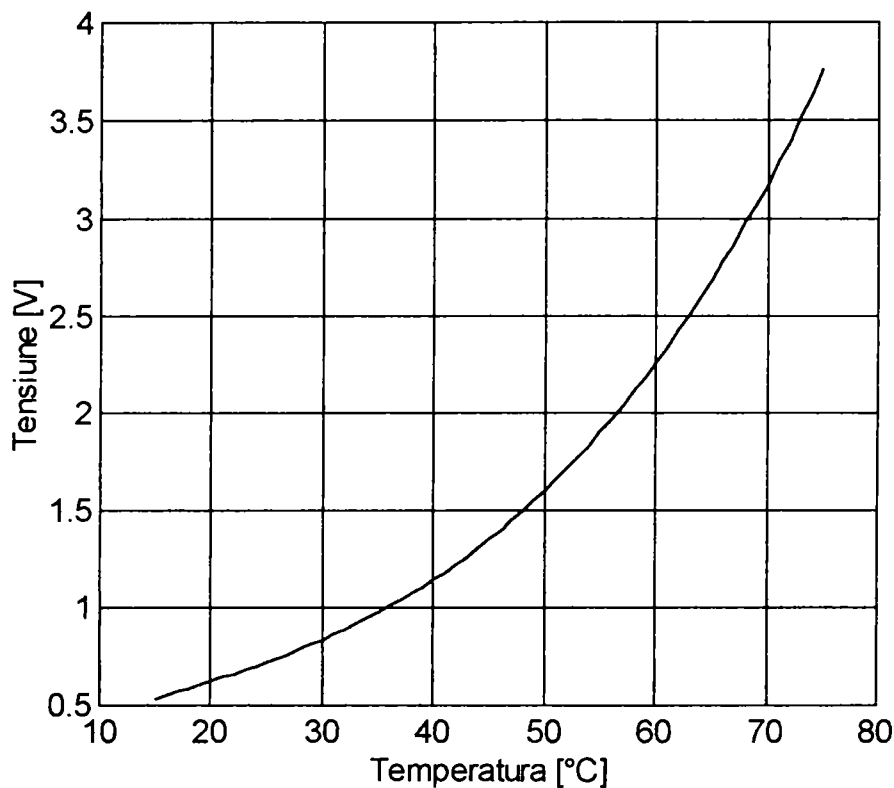


Fig. 4.32. Caracteristica traductorului de temperatură - canal I

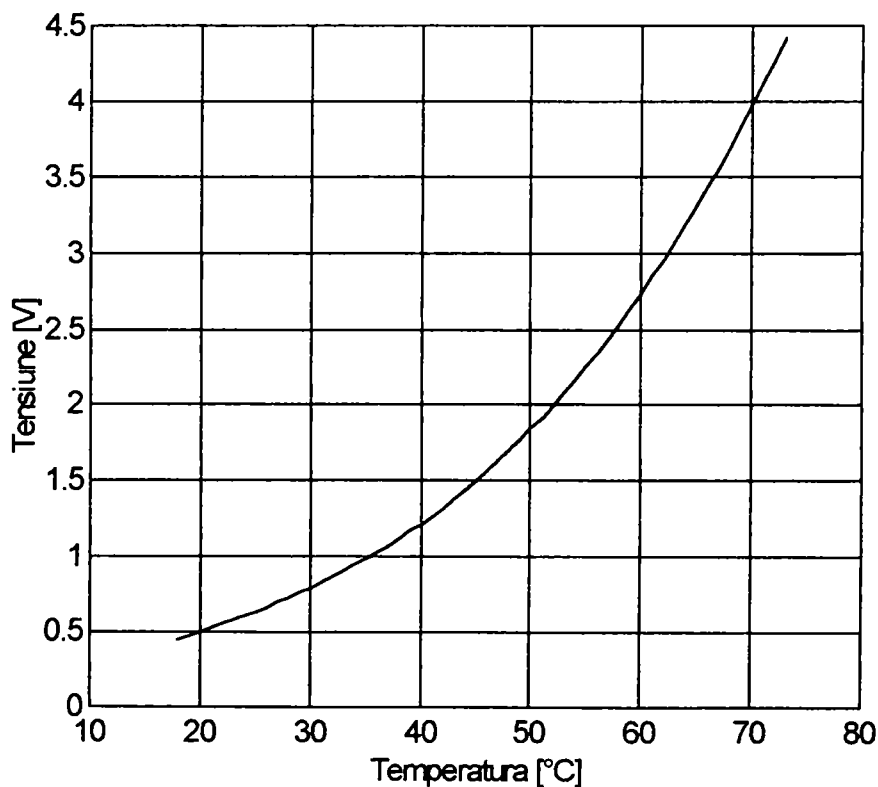
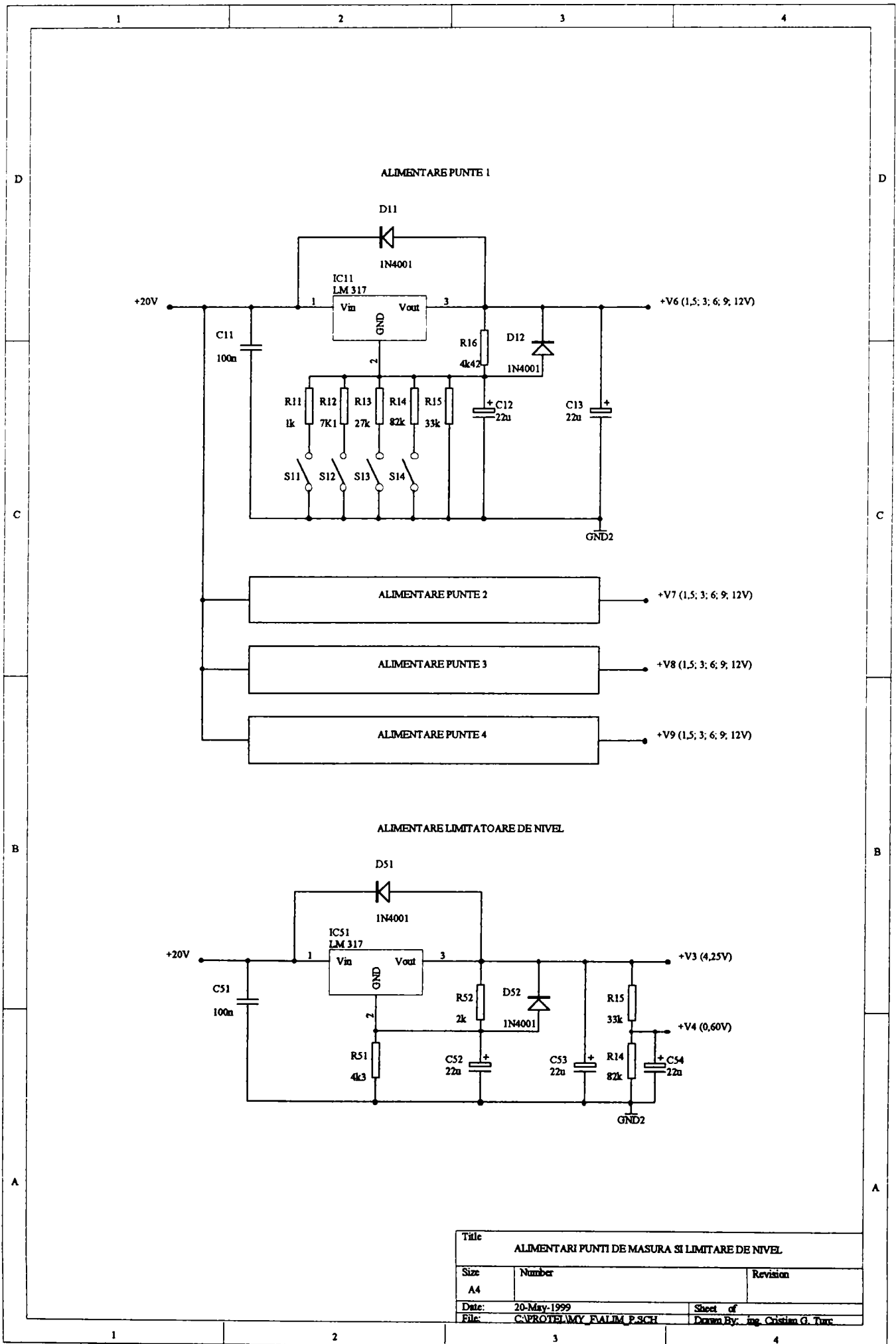


Fig. 4.33. Caracteristica traductorului de temperatură - canal E

Punțile Wheatstone utilizate la măsurarea presiunii și temperaturii pot fi alimentate independent la tensiuni de 1.5, 3, 6, 9, 12V cu ajutorul montajelor prezentate în planșa 4.5. Pentru stabilizarea tensiunilor au fost utilizate circuitele specializate LM 317. În aceeași planșă este prezentat montajul care alimentează limitatoarele de nivel a tensiunilor de ieșire.

Planșa 4.5. Circuitele de alimentare a punților și a limitatoarelor de nivel de ieșire



Title		
ALIMENTARI PUNTI DE MASURA SI LIMITARE DE NIVEL		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	20-May-1999	Sheet of
File:	C:\PROTEL\MY_EVALIM_P.SCH	Drawn By: ing. Cristian G. Turc

4.5.4 Acționarea electrică a sistemului de avans

În figura 4.34 este prezentată schema bloc a acționării electrice a sistemului de avans conceput și realizat de autor. Mecanismul de avans este acționat de către motorul pas cu pas *MPP* care este comandat de către sistemul de dezvoltare *ADS-51* pe baza unui algoritm care stabilește numărul de pași care trebuie efectuați în funcție de mărimile măsurate.

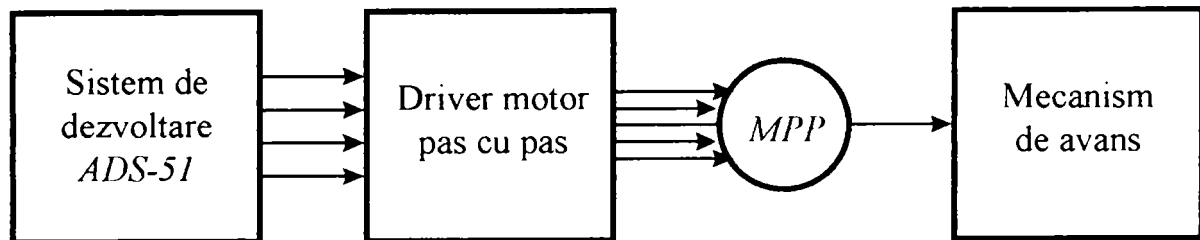


Fig. 4.34. Schema bloc a acționării electrice a sistemului de avans

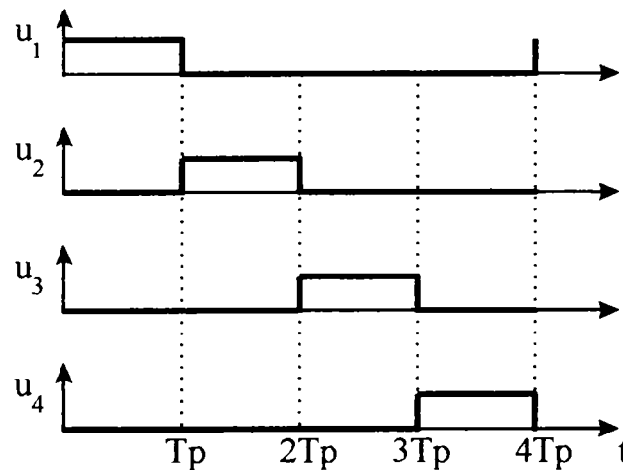


Fig. 4.35. Comanda monopolară simetrică simplă

Comanda unui motor pas cu pas presupune alimentarea înfășurărilor acestuia cu pulsuri de tensiune într-o secvență determinată în funcție de sensul de rotație dorit. După valorile pulsurilor de tensiune, metodele de comandă pot fi:

- comandă monopolară, când se utilizează pulsuri de o singură polaritate;
- comandă bipolară, când se utilizează pulsuri cu ambele polarități.

După secvența pulsurilor, metodele de comandă pot fi:

- comandă simetrică, la care același număr de faze sunt alimentate în orice moment;
- comandă asimetrică, la care numărul de faze alimentate diferă în timp.

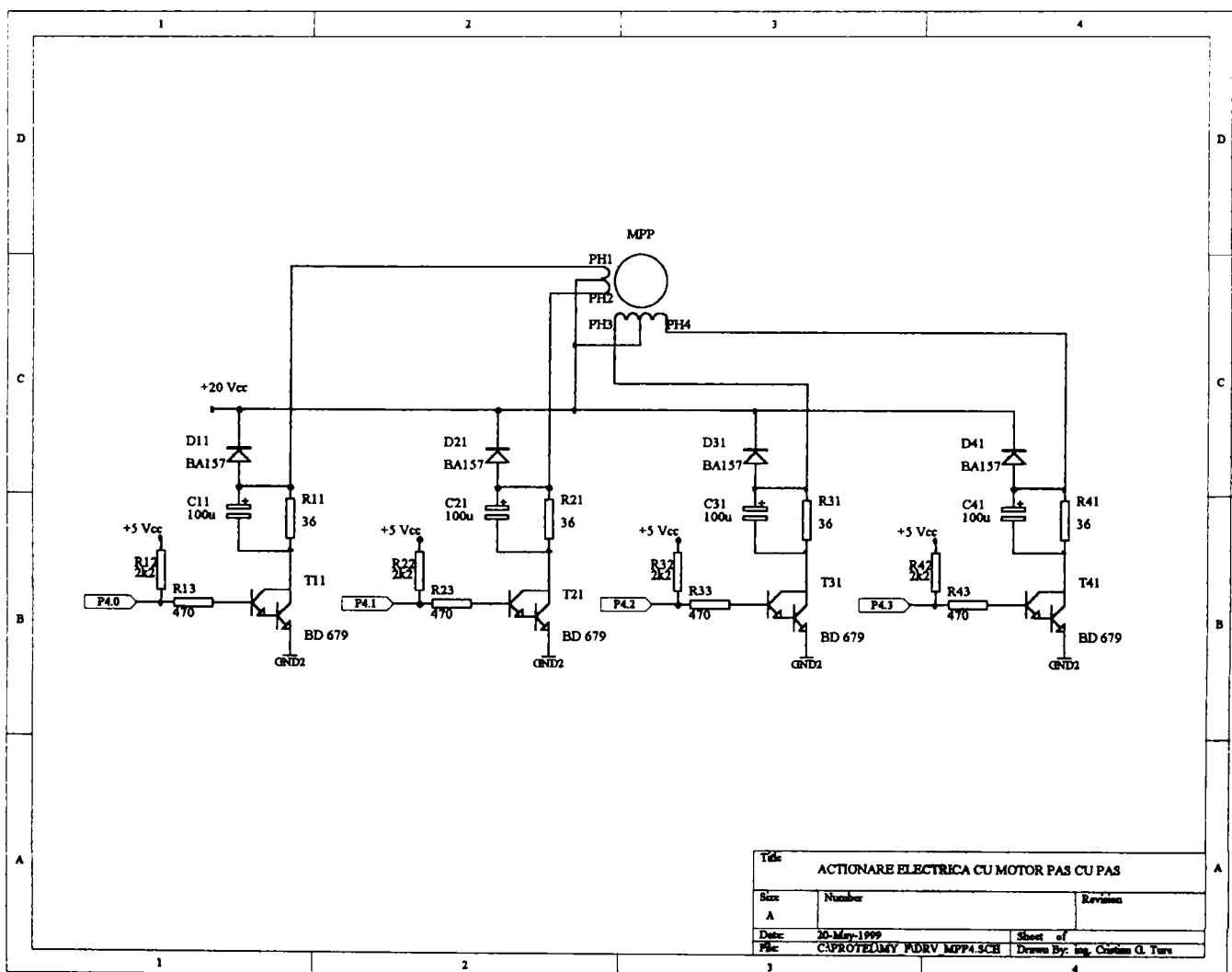
În această lucrare s-a optat pentru o comandă monopolară simetrică simplă, pentru care secvența de pășire este prezentată în figura 4.35. Schimbarea sensului de rotație se realizează prin inversarea succesiunii trenului de pulsuri prin fazele motorului. Pentru a modifica turația motorului este necesară modificarea de către

microcontroler a frecvenței pulsurilor de tensiune. Practic frecvența de pășire este determinată de timpul cât este alimentată o fază (notat cu T_p în figura 4.35). Modificarea poziției implică efectuarea unui număr determinat de pași.

În planșa 4.6 este prezentată schema electronică a montajului care alimentează motorul pas cu pas al acționării sistemului de avans. Cele patru faze ale motorului sunt alimentate prin forțare cu rezistor șuntat de condensator a curentului prin fazele motorului. Comanda fazelor se realizează prin portul 4 al microcontrolerului, pe baza unui program rezident în memoria acestuia, care determină execuția numărului de pași în sensul impus de algoritmul de comandă a procesului.

Un parametru important care caracterizează motoarele pas cu pas este cuplul maxim dezvoltat la arborele motorului la o frecvență de pășire dată fără ca motorul să piardă pași. Se cunoaște faptul că la creșterea frecvenței de pășire cuplul disponibil scade. Deoarece în procesul de găurire electrochimică pe sistemul realizat de autor mecanismul de avans trebuie să învingă o forță axială cuprinsă în intervalul $10...50 daN$, este necesară cunoașterea frecvenței maxime de pășire cu care poate opera motorul pentru a asigura forța axială necesară fără pierdere de pași. În acest scop au fost realizate o serie de măsurări pentru a determina forța axială maximă dezvoltată de mecanismul de avans pentru durate determinate ale pulsurilor de comandă a motorului. Pentru efectuarea măsurărilor a fost realizat standul din figura 4.36.

Planșa 4.6. Acționarea electrică a sistemului de avans.



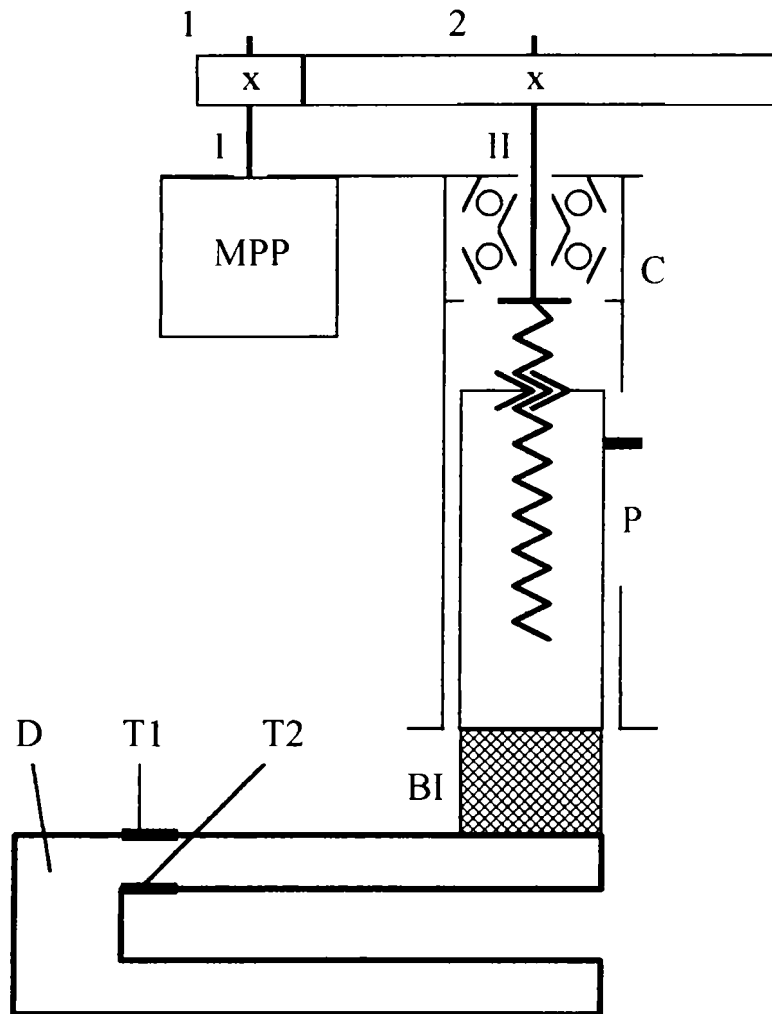


Fig. 4.36. Stand pentru determinarea forței axiale în mecanismul de avans

Forța axială dezvoltată de mecanismul de avans este măsurată cu ajutorul dinamometrului *D*. Acesta este prevăzut cu două timbre tensometrice *T1* și *T2* care sunt conectate în semipunte la o punte tensometrică tip *N 2314*. Pentru comanda motorului cu pulsuri de tensiune de diverse durate a fost scris următorul program pentru microcontroler:

```

$INCLUDE (REG552.INC)
    NAME COMANDA_DRIVER_MPP
    USING      0
;comanda driverului motorului pas cu pas utilizind timerul T0
;-----
;adrese
;-----
TFO_ADD    EQU    000BH                ;adresa vectorului TFO
;-----
;cuvinte de comanda
;-----
;programare SFR
IEN0_INIT EQU    10000010B
;          |          *----- ETO (activare Timer 0)
;          *----- EA  (activare intreruperi)
    
```

```

IPO_INIT EQU 00000010B
;
; *----- PT0 (prioritate Timer 0)
TMOD_INIT_MSK EQU 00000001B
;
; |||||*----- M0 (mod 1)\
;
; |||||*----- M1 | TIMER 0
;
; ||||*----- C/T (timer) |
;
; |||*----- Gate(not) /
;
; ||*----- M0 \
;
; ||*----- M1 | TIMER 1
;
; |*----- C/T | (nu se modifica)
;
; *----- Gate /
TCON_INIT EQU 01000000B
;
; |||*----- TR0 (stop Timer 0)
;
; ||*----- TF0 (fanion Timer 0)
;
; |*----- TR1 (start Timer 1-nemodif.!)
;
; *----- TF1 (fanion Timer 1)
POZ_INIT EQU 10001000B
;
; |||*----- faza 1
;
; ||*----- faza 2
;
; |*----- faza 3
;
; *----- faza 4
;bit de comanda
FAZA1 EQU P4.0 ;comanda faza 1
FAZA2 EQU P4.1 ;comanda faza 2
FAZA3 EQU P4.2 ;comanda faza 3
FAZA4 EQU P4.3 ;comanda faza 4
;vectorii de intrerupere
;-----
CSEG AT 0 ;"vectorul" RESET
JMP MAIN
CSEG AT TFO_ADD ;vectorul TFO
JMP TFO_ROUT
;-----
;programul principal
;-----
CSEG AT 0080H ;inceputul segmentului de cod
MAIN:
;secventa de initializare
MOV IENO,#IENO_INIT ;intreruperi
MOV IPO,#IPO_INIT ;prioritati
ORL TMOD,#TMOD_INIT_MSK ;Timer 0 in mod 1
MOV TCON,#TCON_INIT ;control intreruperi on/off
MOV POZ,#POZ_INIT ;pozitia fazelor
;pornire Timer 0
MOV TH0,TP ;incarca durata unui pas (high)
MOV TL0,TP+1 ;incarca durata unui pas (low)
SETB TR0 ;start Timer 0
;alimentare motor
MOV C,POZ.0 ;faza 1
MOV FAZA1,C
MOV C,POZ.1 ;faza 2
MOV FAZA2,C
MOV C,POZ.2 ;faza 3

```

```

    MOV  FAZA3,C
    MOV  C,POZ.3          ;faza 4
    MOV  FAZA4,C
;   INC  NP              ;incrementare numar de pasi
;bucla infinita
LOOP:
    JMP  LOOP
;-----
;rutina intreruperii TF0
;-----
TF0_ROUT:
    CLR  TR0              ;stop Timer 0
    JMP  PAS_DR
    RETI
;un pas la dreapta
PAS_DR:
    JB   SENS,PAS_ST     ;ramificare dupa sens rotire
    MOV  A,POZ            ;incarca Acc. cu pozitia fazelor
    RR   A                ;roteste Acc. la dreapta
    MOV  POZ,A           ;salveaza pozitia fazelor
    MOV  C,POZ.0         ;comanda faze
    MOV  FAZA1,C
    MOV  C,POZ.1
    MOV  FAZA2,C
    MOV  C,POZ.2
    MOV  FAZA3,C
    MOV  C,POZ.3
    MOV  FAZA4,C
    MOV  TH0,TP           ;incarca durata unui pas (high)
    MOV  TL0,TP+1        ;incarca durata unui pas (low)
    SETB TR0             ;start Timer 0
    RETI
;un pas la stinga
PAS_ST:
    MOV  A,POZ            ;incarca Acc. cu pozitia fazelor
    RL   A                ;roteste Acc. la dreapta
    MOV  POZ,A           ;salveaza pozitia fazelor
    MOV  C,POZ.0         ;comanda faze
    MOV  FAZA1,C
    MOV  C,POZ.1
    MOV  FAZA2,C
    MOV  C,POZ.2
    MOV  FAZA3,C
    MOV  C,POZ.3
    MOV  FAZA4,C
    MOV  TH0,TP           ;incarca durata unui pas (high)
    MOV  TL0,TP+1        ;incarca durata unui pas (low)
    SETB TR0             ;start Timer 0
    RETI
;-----
;zona de date RAM
;-----
    DSEG AT 21H

```

```

POZ: DS 1 ;pozitia fazelor
      DSEG AT 60H ;memoria interna de date, adr. 60H
TP: DS 2 ;durata unui pas (high, low)
      BSEG AT 0 ;memoria interna de date, adresa 0
SENS: DBIT 1 ;selectie sens rotatie: st:1; dr:0
      END
    
```

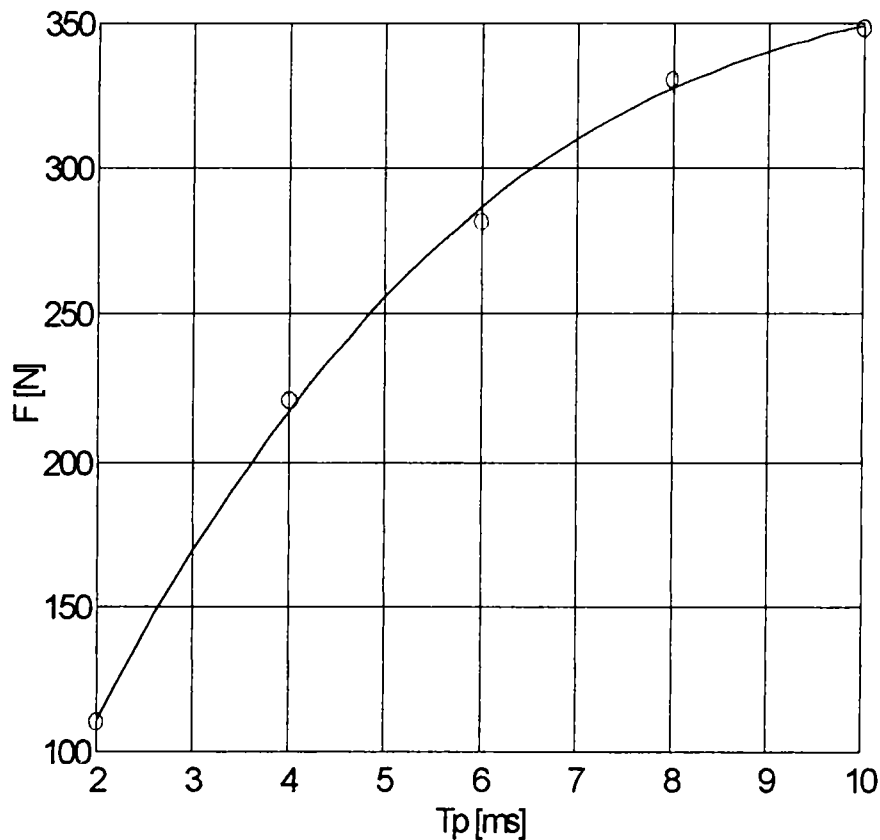


Fig. 4.37. Dependența forței axiale maxime de durata unui pas

Programul determină alimentarea fazelor în secvență simplă. Frecvența de pășire este determinată de durata efectuării unui pas, valoare memorată în variabila TP . Programul permite și reversarea sensului de rotație pentru retragerea portelectrodului în poziția superioară.

În figura 4.37 este prezentată variația forței axiale maxime în funcție de durata unui pas. Se observă faptul că se obțin forțe axiale cuprinse în intervalul necesar dacă durata unui pas nu este mai mică de 2 ms.

4.6. ALGORITMUL DE COMANDĂ AL MMGEE

Ciclul de prelucrare a unei piese se desfășoară conform schemei prezentate în figura 4.38. Inițial sistemul de comandă cuplează motorul sistemului pentru electrolit și transformatorul sursei de tensiune la rețea, după care se intră în ciclul de apropiere rapidă a electrodului-sculă de suprafața piesei. Când electrodul-sculă a ajuns aproape de suprafața semifabricatului se trece automat la ciclul de lucru propriu-zis, în care mișcarea de avans este permanent corelată cu viteza de dizolvare anodică. După atingerea adâncimii programate a cavității de prelucrat se intră în secvența de retragere rapidă a electrodului-sculă până la limita superioară de cursă și sunt decuplate de la rețea sursa de tensiune și motorul sistemului pentru electrolit.

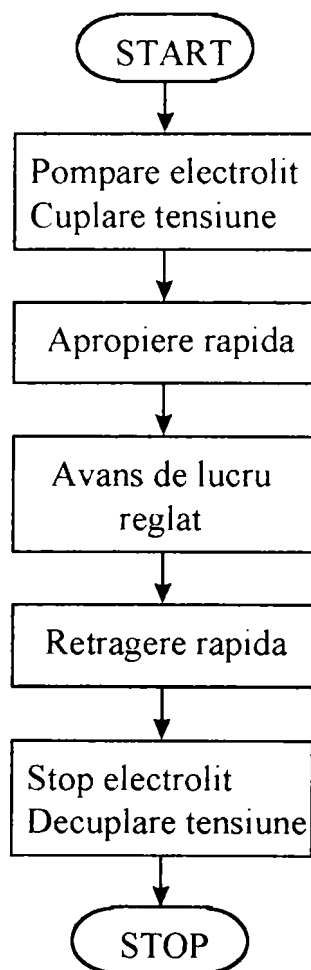


Fig. 4.38. Ciclul de prelucrare a unei piese

Durata unui ciclu de comandă în mișcările de apropiere rapidă și de lucru (figura 4.39) este de 20 ms , adică durata unei perioade a tensiunii de lucru U aplicate pe cei doi electrozi. Acest interval este marcat prin două întreruperi succesive declanșate de detectorul de zero (planșa 4.4), momente notate cu DZ_i și DZ_{i+1} . După detecția DZ_i microcontrolerul realizează o temporizare T_1 , apoi începe ciclul celor 6 rutine de măsurare a parametrilor regimului de lucru:

- la momentul T2 este măsurată presiunea electrolitului din canalul i al portelectrodului, p_i ;
- la momentul T3 este măsurată presiunea electrolitului din canalul e al portelectrodului, p_e ;
- la momentul T4 este măsurată temperatura electrolitului din canalul i al portelectrodului, t_i ;
- la momentul T5 este măsurată temperatura electrolitului din canalul e al portelectrodului, t_e ;
- la momentul T6 este măsurată intensitatea maximă a curentului de lucru, I_{max} ;
- la momentul T7 este măsurată tensiunea maximă de lucru, U_{max} .

Durata unui ciclu de măsurare, T_{MAS} , este de $50 \mu s$ la care se adaugă durata instrucțiunilor executate între întreruperi.

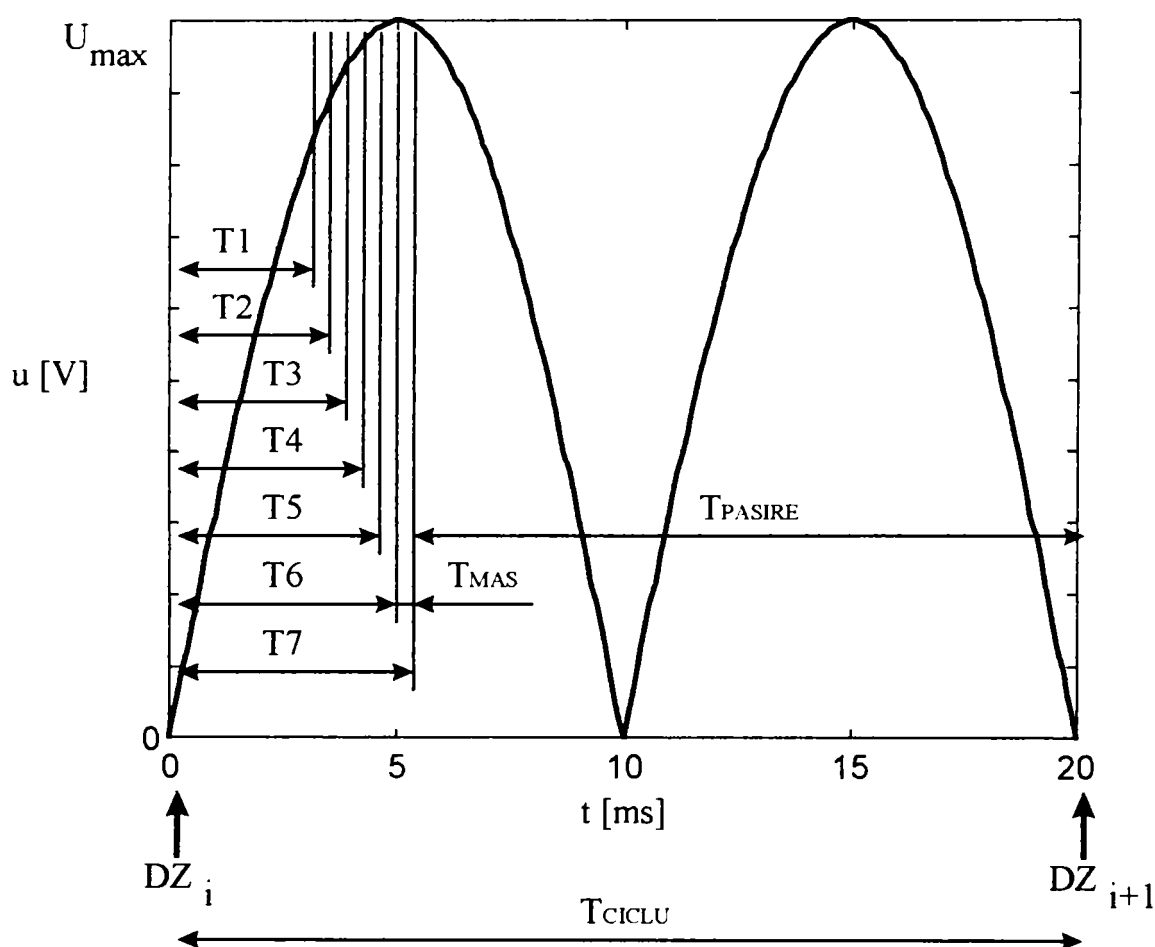


Fig. 4.39. Alocarea timpilor pe durata ciclului de comandă

Timpul rămas până la următoarea detecție de zero, T_{PASIRE} , este rezervat efectuării de către motor a unui număr determinat de pași. În secvența de apropiere rapidă (figura 4.40) numărul de pași este fix, N_{PAR} , și anume numărul maxim de pași ce se poate efectua în timpul disponibil de cca. 14,9 ms. Durata unui pas se determină în funcție de forța maximă de avans pe baza diagramei din figura 4.37. Secvența de

apropiere rapidă se încheie în momentul în care curentul de lucru a depășit un prag fixat (de exemplu 75% din curentul de referință).

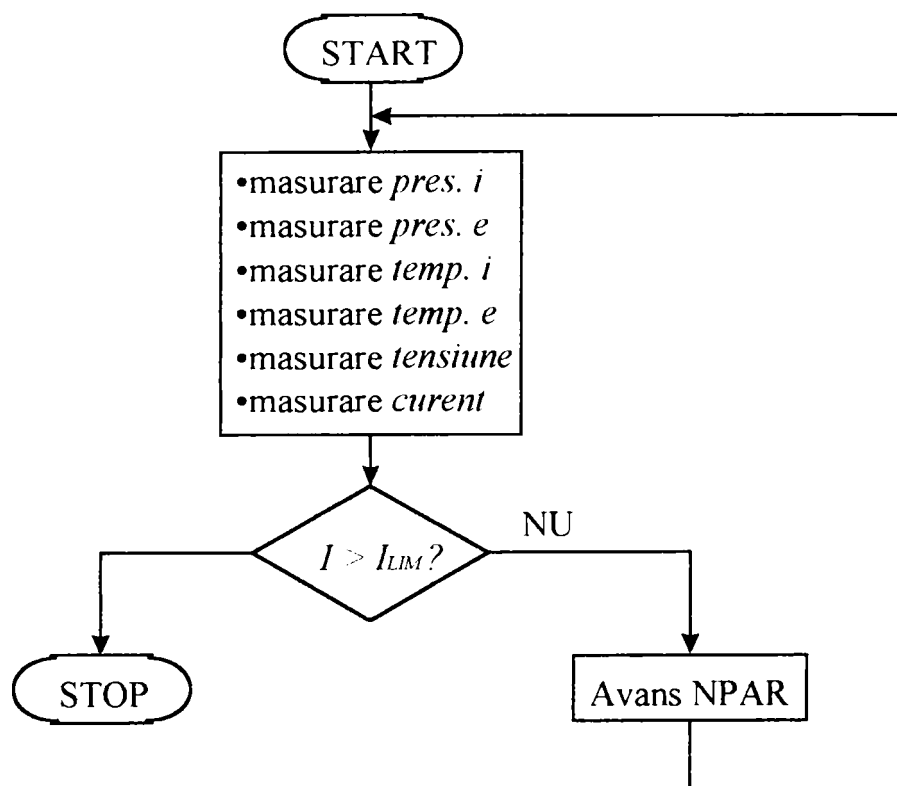


Fig. 4.40. Secvența de apropiere rapidă

În secvența de avans de lucru (figura 4.41) numărul de pași executați de motor într-un ciclu de comandă NP este variabil, fiind determinat în funcție de mărimile măsurate pe baza algoritmului de reglare. Deoarece forța axială este mai mare în secvența de avans de lucru, va trebui adoptată o valoare mai mare a duratei unui pas. Dacă numărul de pași nu se poate efectua în timpul rămas până la momentul următoarei detecții de zero, durata ciclului se va dubla, tripla, etc. Algoritmul de reglare stabilește și sensul de deplasare a electrodului-sculă. De asemenea, sistemul de comandă realizează în paralel și termostatarea temperaturii electrolitului trimis în spațiul de lucru prin comanda supapei care permite circulația apei de răcire prin schimbătorul de căldură al sistemului pentru electrolit.

Concomitent cu execuția celor NP pași sistemul de comandă contorizează pașii efectuați într-o variabilă pe care o compară după execuția fiecărui pas cu adâncimea cavității prelucrate. Această variabilă este inițializată în momentul atingerii regimului nominal de funcționare. Dacă s-a atins adâncimea de prelucrare programată se intră automat în secvența de retragere rapidă, ciclul de lucru încheindu-se după decuplarea motorului sistemului pentru electrolit și a sursei de tensiune de lucru, când port-electrodul a ajuns în punctul limită superior. O dată la 250 cicluri de comandă sistemul de comandă transmite calculatorului PC prin interfața serială cele șase mărimi măsurate în proces la ultimul ciclu de comandă și

poziția curentă a electrodului-sculă (adâncimea la care s-a ajuns). Datele transmise sunt preluate cu ajutorul aplicației *Hyper Terminal*, fiind stocate într-un fișier text pe hard-disc. Deoarece datele sunt în format hexa, pentru a putea prelucra aceste date este necesară conversia lor în format zecimal.

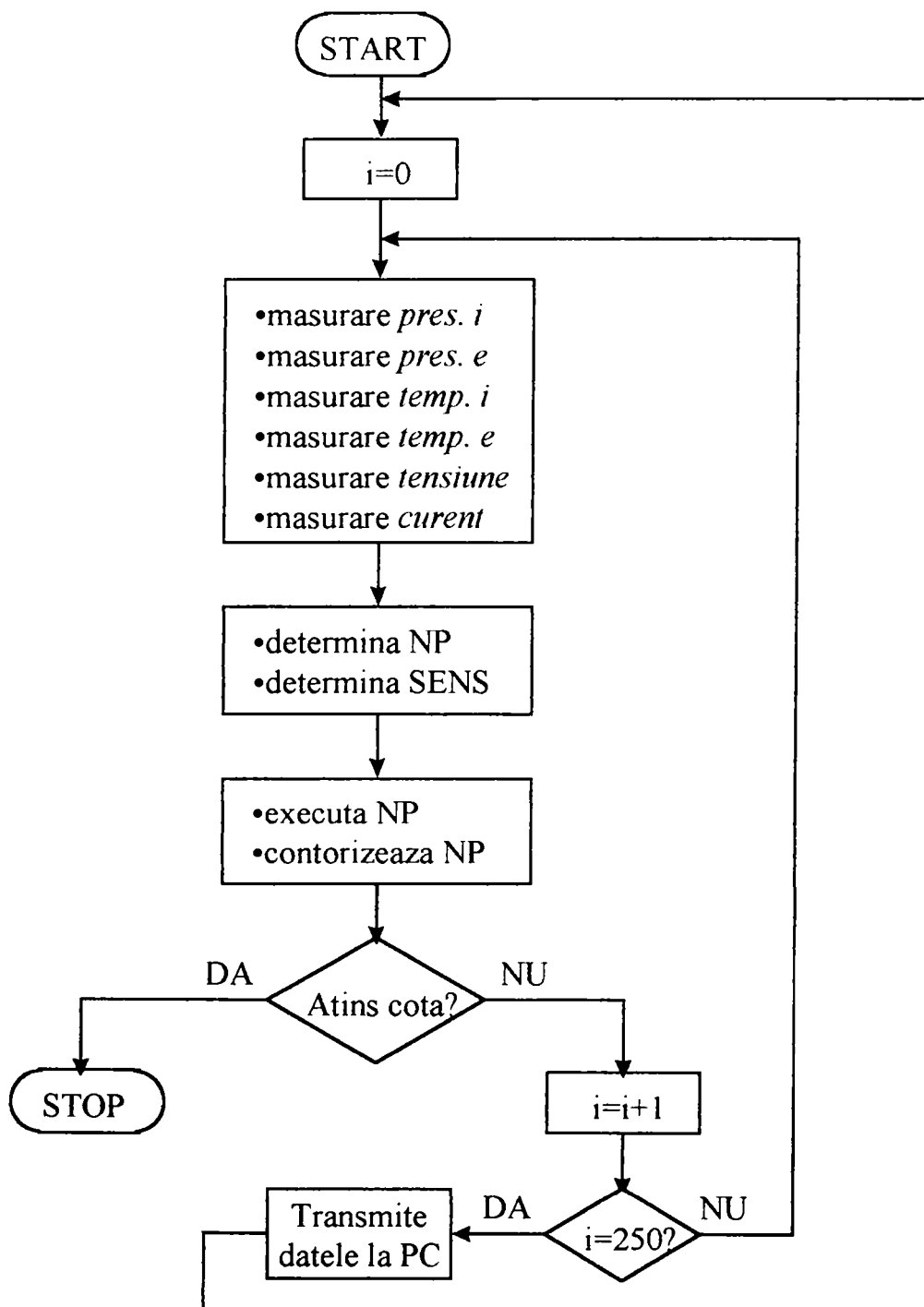


Fig. 4.41. Secvența de avans de lucru

Pentru ca procesul de prelucrare să se desfășoare corect trebuie acordată o atenție deosebită algoritmului de reglare care se desfășoară pe durata ciclului de comandă. În general, reglarea unui proces se realizează după schema prezentată în figura 4.42, care constituie un sistem cu buclă de reacție.

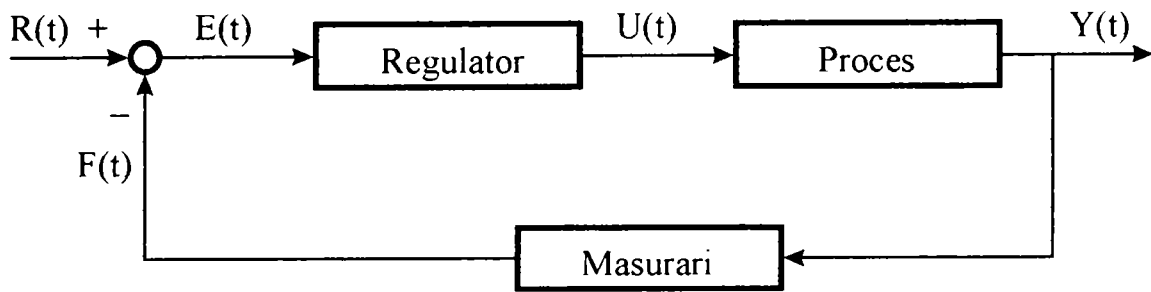


Fig. 4.42. Sistem de reglare cu buclă de reacție

Semnificația semnalelor notate în figură este următoarea:

- $R(t)$ - valoarea de referință;
- $F(t)$ - valoarea măsurată;
- $E(t)$ - eroarea;
- $U(t)$ - mărimea de comandă;
- $Y(t)$ - ieșirea.

Ultimii ani au marcat punerea la punct a unor tehnici de reglare a proceselor adaptate folosirii pe scară din ce în ce mai largă a calculatoarelor de proces. În cazul implementărilor numerice, regulatorul prelucrează eșantioane ale erorii și furnizează la ieșire eșantioane ale mărimei de comandă în conformitate cu formula generală

$$U_{k+1} = f(U_k, U_{k-1}, \dots, E_k, E_{k-1}, \dots) \quad (4.11)$$

unde:

- $U_k = U(kT_c)$;
- $E_k = E(kT_c)$;
- T_c - durata unui ciclu de comandă .

În cazul reglării mișcării de avans a electrodului-sculă regulatorul trebuie ca pe toată durata procesului de prelucrare să corecteze poziția electrodului-sculă astfel încât mărimea de referință adoptată să coincidă cu mărimea măsurată. În cazul sistemului realizat, pe durata unui ciclu de comandă mărimea de referință este comparată cu valoarea măsurată și în funcție de rezultat motorul pas cu pas efectuează un număr determinat de pași. Ca mărimi de referință poate fi adoptată una dintre următoarele:

- intensitatea curentului de lucru, I ;
- tensiunea electrică pe electrozi, U ;
- căderea de presiune pe interstițiul de lucru, Δp :

$$\text{-în cazul injecției electrolitului prin interiorul electrodului-sculă,} \\ \Delta p = p_i - p_e, \quad (4.12)$$

în care p_i este presiunea electrolitului din canalul i al portelectrodului, iar p_e este presiunea electrolitului din canalul e al portelectrodului;

$$\text{-în cazul injecției electrolitului prin exteriorul electrodului-sculă,} \\ \Delta p = p_e - p_i; \quad (4.13)$$

- variația de temperatură pe interstițiul de lucru, Δt :

$$\text{-în cazul injecției electrolitului prin interiorul electrodului-sculă,} \\ \Delta t = t_e - t_i, \quad (4.14)$$

în care t_e este temperatura electrolitului din canalul e al portelectrodului, iar t_i este temperatura electrolitului din canalul i al portelectrodului;

$$\text{-în cazul injecției electrolitului prin exteriorul electrodului-sculă,} \\ \Delta t = t_i - t_e. \quad (4.15)$$

Pentru proiectarea regulatorului este necesară determinarea unei funcții care să asigure funcționarea corectă a regulatorului, la indicii de performanță ceruți de procesul condus (eroare statică, timp de răspuns, stabilitate, robustețe, etc). Metodele clasice de proiectare utilizează un model matematic al procesului, motiv pentru care proiectarea unui regulator clasic (de tip *PID*) este imposibilă în următoarele situații:

- nu este posibilă determinarea unui model matematic al procesului;
- modelul matematic este foarte complicat;
- modelul matematic este foarte neliniar;
- nu pot fi găsite formule mai simple care să asigure indicii de performanță ceruți;
- parametrii modelului se modifică în timpul desfășurării procesului, ca urmare a unor factori de influență greu de controlat.

Pentru a putea regla un proces care are una sau mai multe din caracteristicile de mai sus s-au dezvoltat tipuri noi de regulatoare. Din această categorie fac parte regulatoarele “fuzzy”, bazate pe elemente de inteligență artificială. Această metodă de reglare își datorează numele faptului că la baza sa stă *teoria mulțimilor fuzzy*, în limba engleză *fuzzy* însemnând *neclar*. Demn de remarcat este și faptul că această metodă de reglare este un instrument prin care specialiștii din diverse domenii pot pune la punct regulatoare de proces fără sprijinul specialiștilor în automatică.

4.6.1. Mulțimi fuzzy. Logica fuzzy. Operatori logici

În teoria clasică a mulțimilor, un element x al unei mulțimi M poate sau nu să aparțină unei mulțimi A . În teoria mulțimilor fuzzy, un element x al mulțimii M aparține *mulțimii fuzzy* A cu un anumit *grad de apartenență* exprimat prin *funcția de apartenență*

$$\mu_A: M \rightarrow [0,1] \quad (4.16)$$

Deci fiecare element al mulțimii M are un anumit grad de apartenență, cuprins între 0 și 1, la *mulțimea fuzzy* A . Mulțimea fuzzy A este complet determinată de perechile element-grad de apartenență:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in M\} \quad (4.17)$$

Exemplu: elementul x_i aparține mulțimii fuzzy A cu gradul de apartenență $\mu_A(x_i)$.

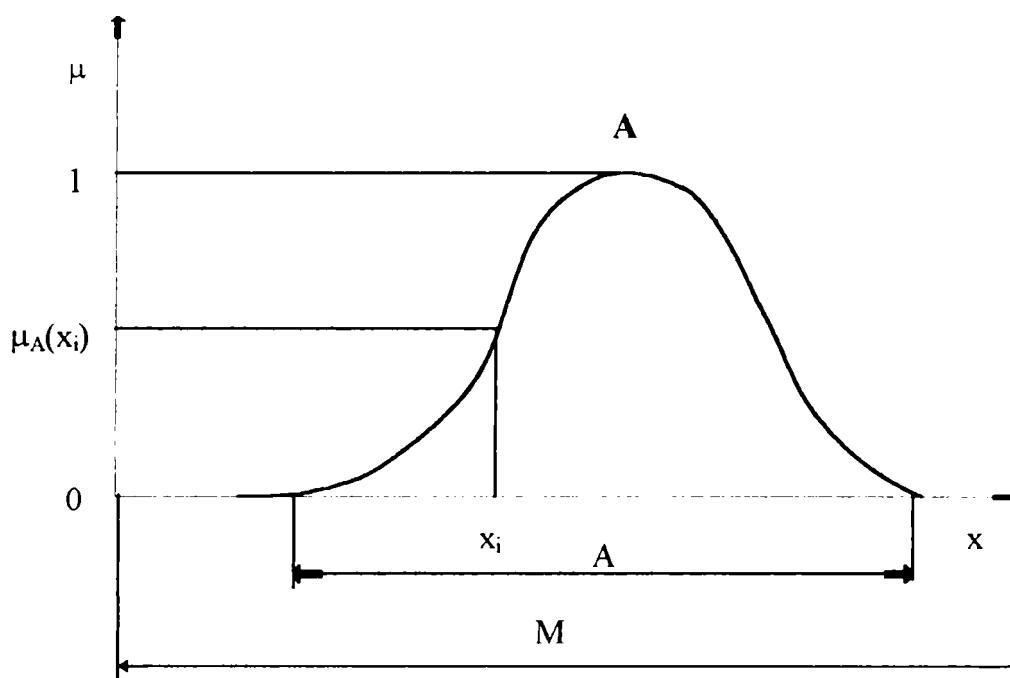


Fig. 4.43. Mulțimea fuzzy A

Logica fuzzy (*fuzzy logic*) utilizează următorii operatori:

- operatorul ȘI;
- operatorul SAU;
- operatorii de compensare λ și γ ,
- negația;
- operatori definiți pe mulțimi carteziene.

Operatorul ȘI

Se poate defini în mai multe moduri, de la caz la caz utilizându-se una dintre definițiile următoare:

$$\bullet \mu_{A\text{și}B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.18)$$

- operatorul minim

$$\bullet \mu_{A\text{și}B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (4.19)$$

- operatorul produs

$$\bullet \mu_{A\text{și}B}(x) = \max\{0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1\} \quad (4.20)$$

Operatorul SAU

De asemenea, se poate defini în mai multe moduri, de la caz la caz utilizându-se una dintre definițiile următoare:

$$\bullet \mu_{A\text{sau}B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.21)$$

- operatorul maxim

$$\bullet \mu_{A\text{sau}B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (4.22)$$

$$\bullet \mu_{A\text{sau}B}(x) = \min\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\} \quad (4.23)$$

Operatorul de compensare λ

$$\mu_{A\lambda B}(x) = \lambda \cdot \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) + (1 - \lambda) \cdot [\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)], \quad (4.24)$$

unde $\lambda \in [0,1]$. Cazuri particulare:

- $\lambda = 0$

$$\mu_{A\lambda B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) = \mu_{AsauB}(x),$$

conform definiției (4.22);

- $\lambda = 1$

$$\mu_{A\lambda B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) = \mu_{A\text{și}B}(x),$$

conform definiției (4.19).

Operatorul de compensare γ

$$\mu_{A\gamma B}(x) = [\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)]^{1-\gamma} \cdot [1 - (1 - \mu_A(x))(1 - \mu_B(x)))]^\gamma, \quad (4.25)$$

unde $\gamma \in [0,1]$. Cazuri particulare:

- $\gamma = 0$

$$\mu_{A\gamma B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) = \mu_{A\text{și}B}(x),$$

conform definiției (4.19).

- $\gamma = 1$

$$\mu_{A\gamma B}(x) = 1 - (1 - \mu_A(x))(1 - \mu_B(x)) = \mu_{AsauB}(x),$$

conform definiției (4.22).

Se observă că cei doi operatori de compensare constituie generalizări ale operatorilor ȘI/SAU.

Negația

$$\mu_A^-(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.26)$$

Operatorii ȘI/SAU definiți pe produsul cartezian a două mulțimi fuzzy

Se consideră două mulțimi fuzzy A și B reprezentate în figurile 4.44 și 4.45.

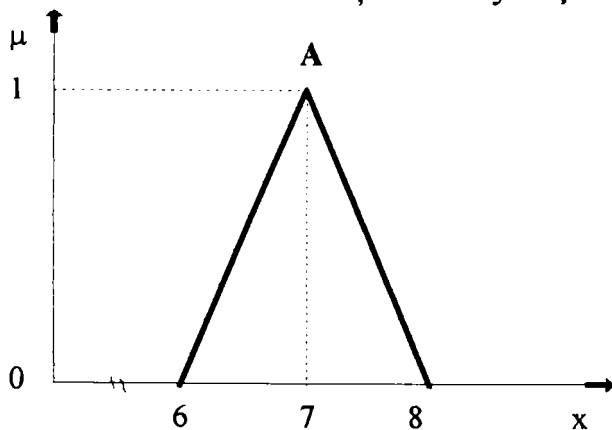


Fig. 4.44. Mulțimea fuzzy A

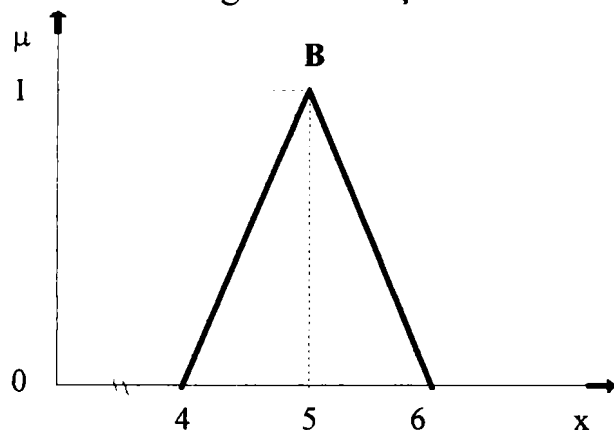


Fig. 4.45. Mulțimea fuzzy B

- $\mu_{A\text{și}B}(x, y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}, \quad (4.27)$

în care $x \in A, y \in B$. Reprezentarea grafică a acestei definiții este sugerată de figura 4.46.

- $\mu_{AsauB}(x, y) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}, \quad (4.28)$

în care $x \in A$, $y \in B$. Reprezentarea grafică a definiției este sugerată de figura 4.47.

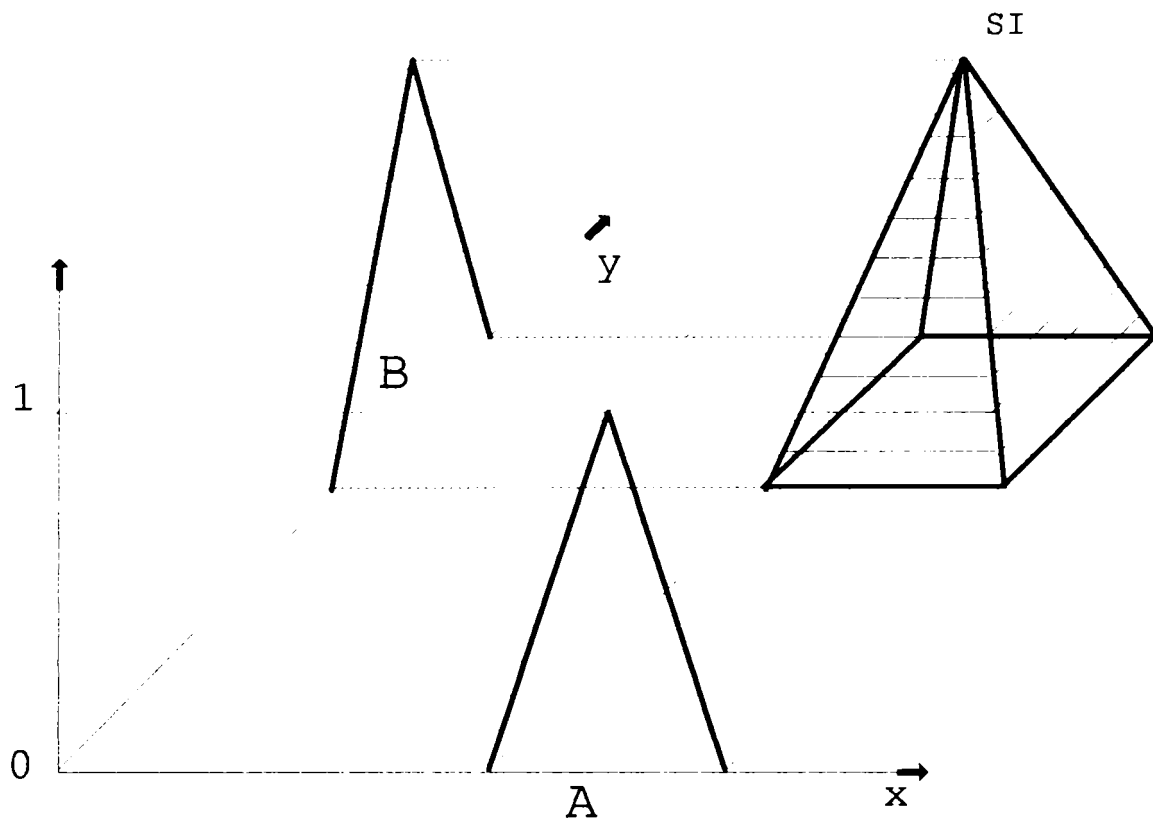


Fig. 4.46. Intersecția pe produs cartezian

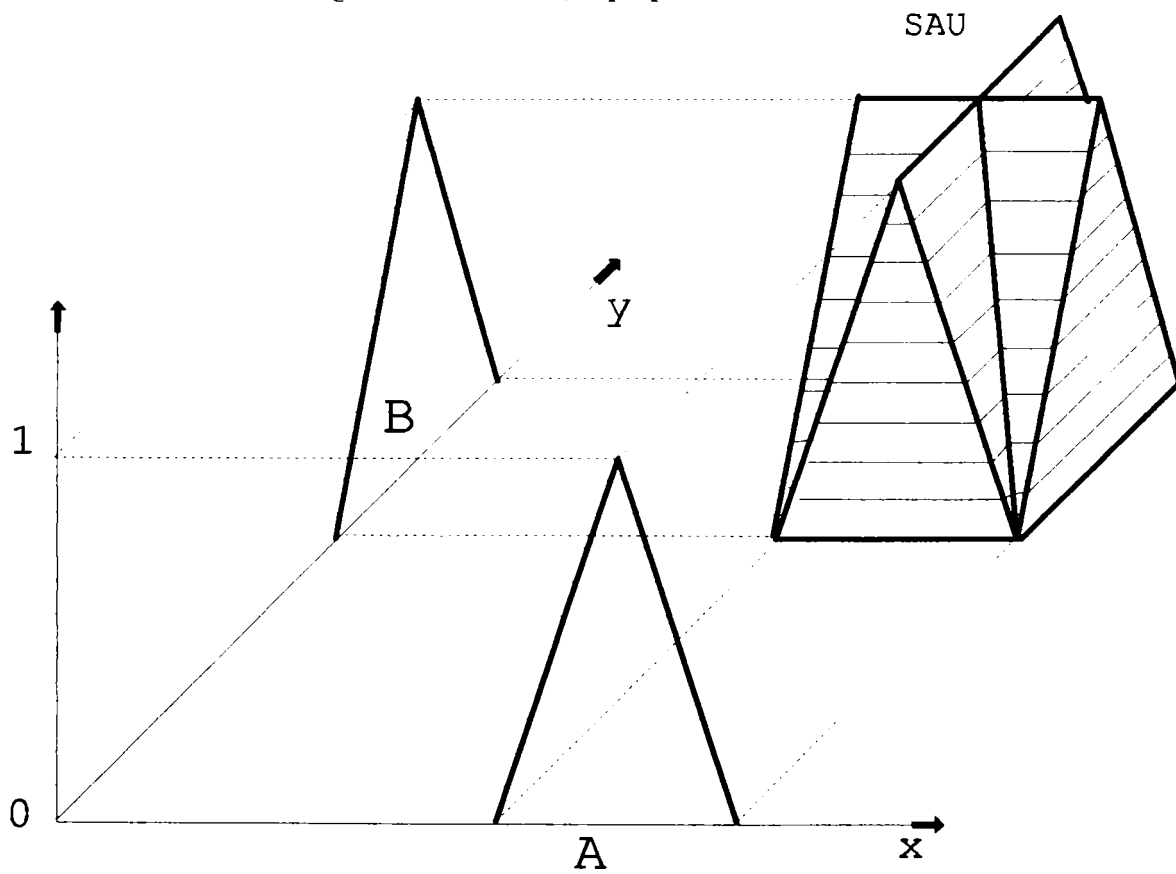


Fig. 4.47. Reuniunea pe produs cartezian

4.6.2. Reglatoarele fuzzy

Metodele clasice de proiectare a reglatoarelor utilizează un model matematic al procesului reglat, motiv pentru care proiectarea unui regulator clasic (de tip *PID*) este imposibilă în următoarele situații:

- nu este posibilă determinarea unui model matematic al procesului;
- modelul matematic este foarte complicat;
- modelul matematic este foarte neliniar;
- nu pot fi găsite formule mai simple care să asigure indicii de performanță ceruți;
- parametrii modelului se modifică în timpul desfășurării procesului, ca urmare a unor factori de influență greu de controlat.

Reglatoarele fuzzy sunt insensibile la toate aceste inconveniente. Într-un regulator fuzzy intră un anumit număr de semnale -mărimile de intrare- care sunt prelucrate conform unor algoritmi specifici, rezultând un anumit număr de mărimile de comandă -mărimile de ieșire- necesare reglării procesului. Atât fiecărei mărimi de intrare, cât și fiecărei mărimi de ieșire din regulator li se asociază câte un set de mulțimi fuzzy numit *variabilă lingvistică*.

Exemplu: Pentru o mărime numită *Forță*, putem defini un set de mulțimi fuzzy, conform figurii 4.48, care vor constitui variabila lingvistică *Forță*:

- *Forță mică*;
- *Forță medie*;
- *Forță mare*.

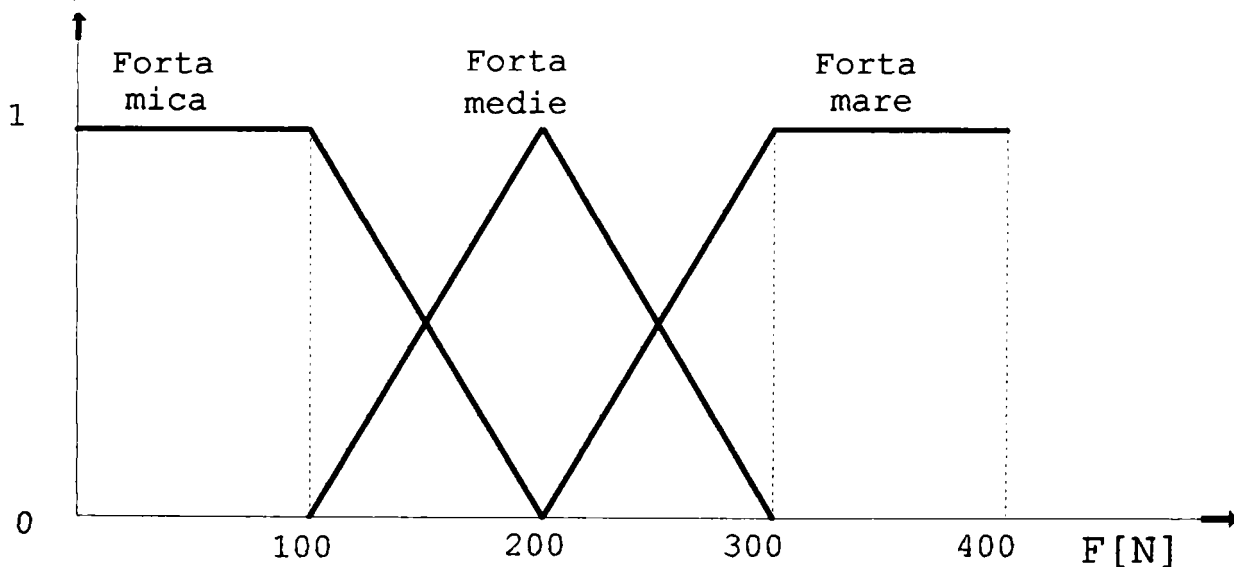


Fig. 4.48. Variabila lingvistică *Forță*

De regulă, forma mulțimilor se alege triunghiulară sau trapezoidală, cu lățimea adecvată cazului concret. Numărul de mulțimi fuzzy asociate unei variabile

lingvistice este, în cele mai multe cazuri, 5, el putând fi adoptat pe baza experienței. Un număr mare de mulțimi fuzzy conduce la o viteză de reacție mare (deci la un timp de răspuns mic) și la o reglare fină și moale, însă complică scrierea algoritmului pe baza căruia funcționează regulatorul.

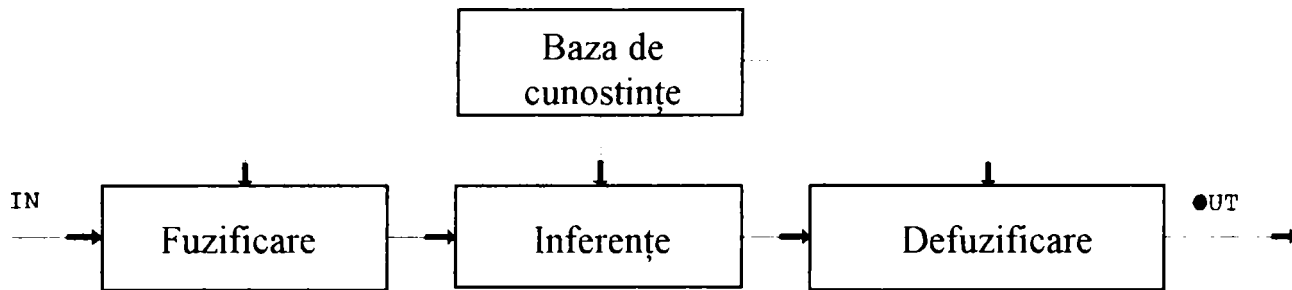


Fig. 4.49. Prelucrarea informației în regulatorul fuzzy

Prelucrarea informației într-un regulator fuzzy se realizează după schema din figura 4.49. *Baza de cunoștințe* include descrierea variabilelor lingvistice ale mărimilor de intrare și ieșire, respectiv a regulilor de inferență pe baza cărora funcționează regulatorul. *Fuzificarea* realizează conversia mărimilor de intrare în mulțimi fuzzy necesare efectuării *inferențelor* care determină concluziile. Etapa *defuzificării* realizează conversia concluziilor în mărimile de ieșire care comandă procesul.

Fuzificarea

Această etapă constă în asocierea fiecărei mărimi de intrare cu una sau mai multe mulțimi fuzzy corespunzătoare. Pentru realizarea acestei operații este necesară parcurgerea următoarelor etape:

- Se fixează mulțimile fuzzy necesare;
- Se aleg funcțiile de apartenență;
- Se "citesc" gradele de apartenență.

De exemplu, fuzificarea unei forțe de 225 N în condițiile definiției asociate figurii 4.48 presupune că:

- Mulțimile fuzzy sunt *Forță mică*, *Forță medie* și *Forță mare*;
- Funcțiile de apartenență sunt rapezoidale pentru *Forță mică* și *Forță mare*, respectiv triunghiulară pentru *Forță medie*;
- Gradele de apartenență rezultă urmărind figura 4.50:

$$\mu_{\text{Forță mică}}(225) = 0;$$

$$\mu_{\text{Forță medie}}(225) = 0,75;$$

$$\mu_{\text{Forță mare}}(225) = 0,25.$$

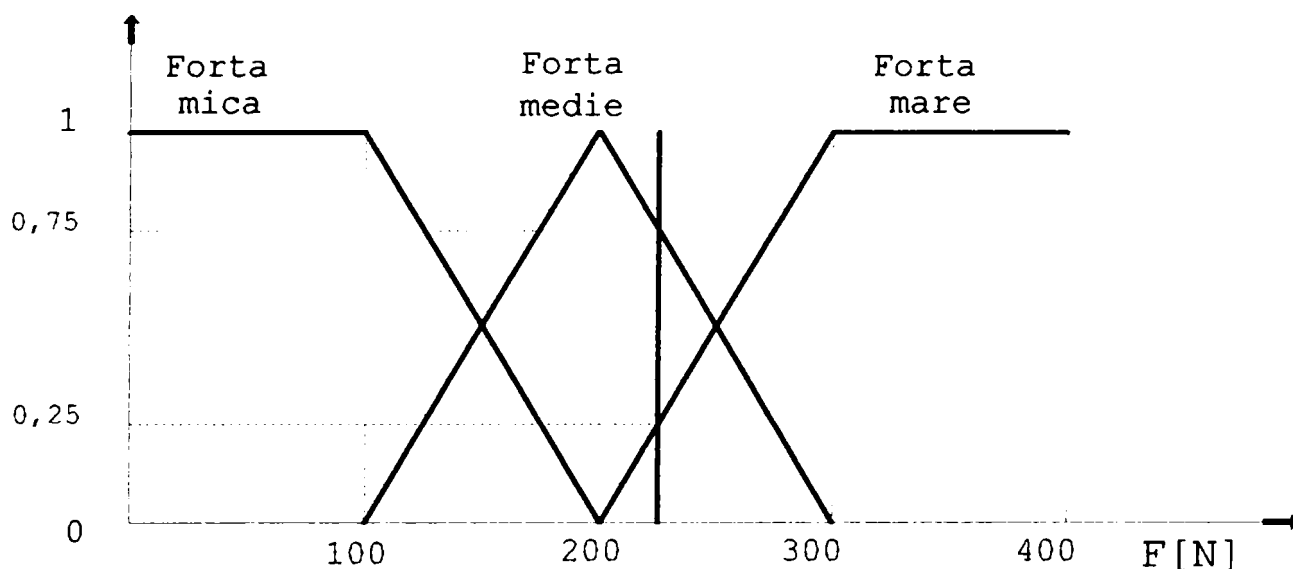


Fig. 4.50. Fuzzificarea forței de 225 N

Inferențele

Inferențele sunt un set de reguli care stabilesc legăturile dintre mărimile de intrare și cele de ieșire. Realizarea inferențelor vizează determinarea gradelor de apartenență a mărimilor de ieșire la mulțimile fuzzy corespunzătoare lor. În logica matematică raționamentele se realizează conform următoarei reprezentări:

A	\rightarrow	premiză
$DAC\ \dot{A}\ A\ ATUNCI\ B$	\rightarrow	implicație
B	\rightarrow	concluzie

În logica fuzzy raționamentele se realizează după o schemă generalizată:

$x\ este\ P$	\rightarrow	premiză
$DAC\ \dot{A}\ x\ este\ A\ ATUNCI\ y\ este\ Q$	\rightarrow	implicație
$y\ este\ C$	\rightarrow	concluzie

Problema care se pune este de a determina funcția de apartenență a mulțimii fuzzy C , cunoscând funcțiile de apartenență ale mulțimilor fuzzy P , A și Q . Se pot face următoarele observații: dacă P este egal cu A , atunci C trebuie să fie egal cu Q ; dacă P este apropiat de A , atunci C trebuie să fie apropiat de Q , și așa mai departe.

Până acum această problemă nu a fost rezolvată deplin. Soluția acceptată se numește *regula de compoziție a inferențelor*. Rezultatele acestei reguli sunt prezentate în continuare:

- Dacă se utilizează operatorul *max*, atunci formula de inferență este

$$\mu_C(y) = \min\{\mu_Q(y), \max\{\min\{\mu_P(x), \mu_A(x)\}\}\}, \quad (4.29)$$

iar reprezentarea grafică este dată în figura 4.51;

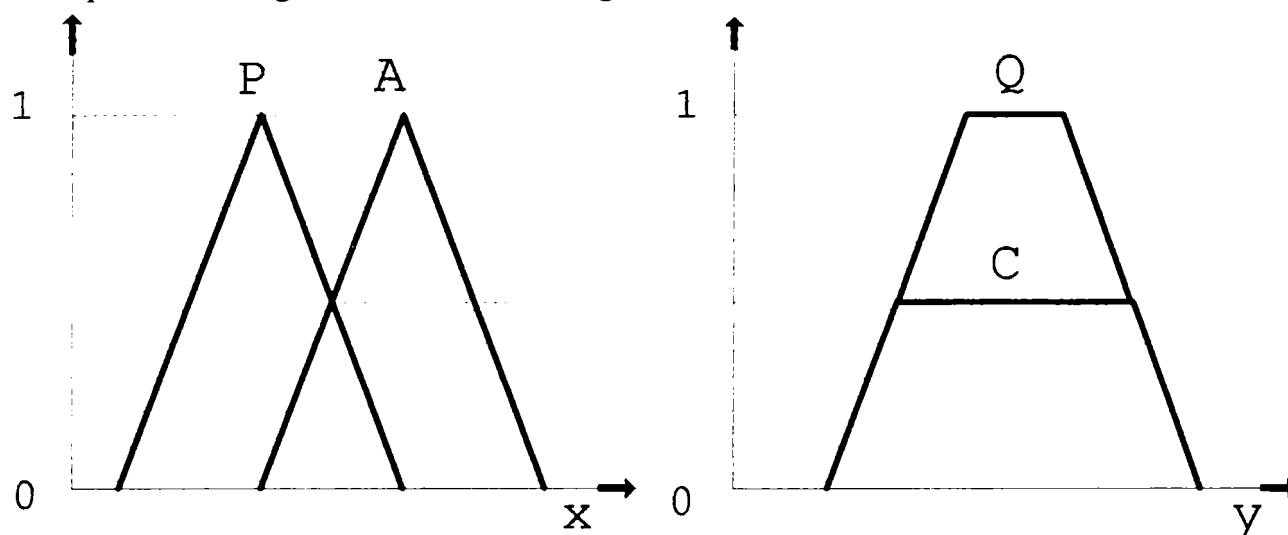


Fig. 4.51. Regula de compoziție a inferențelor prin operatorul max

- Dacă se utilizează operatorul *prod*, atunci formula de inferență este

$$\mu_C(y) = \mu_Q(y) \cdot \max\{\min\{\mu_P(x), \mu_A(x)\}\}, \quad (4.30)$$

reprezentarea grafică fiind dată în figura 4.52.

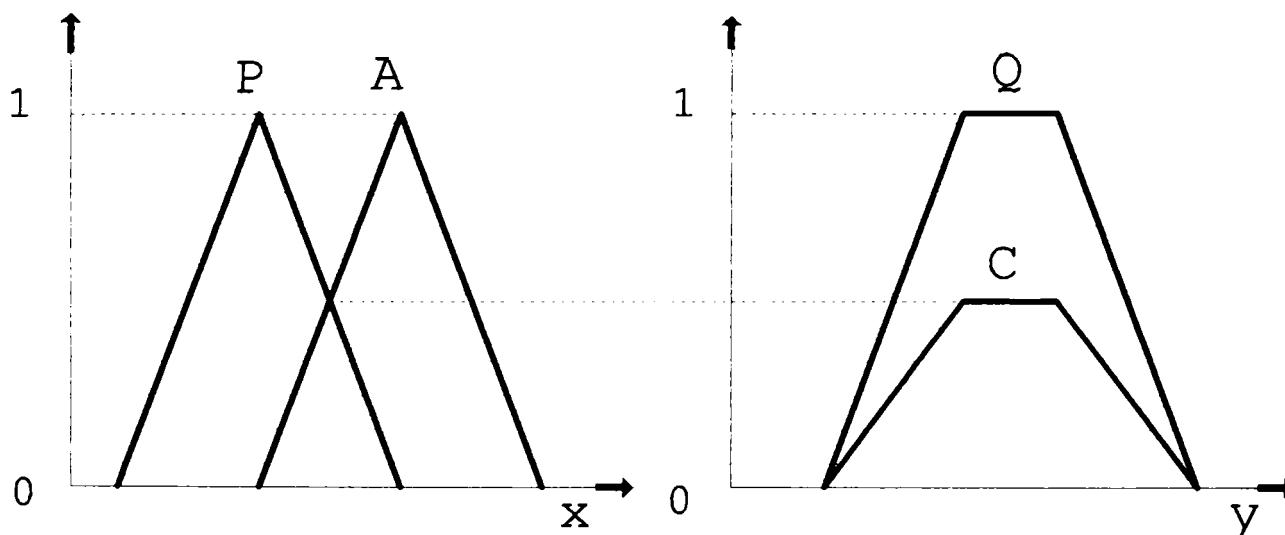


Fig. 4.52. Regula de compoziție a inferențelor prin operatorul prod

De exemplu, să presupunem că mărimii de intrare numită *Forță* îi corespunde o mărime de ieșire numită *Avans* cu mulțimile fuzzy descrise în figura 4.53:

- *Avans mic*, de formă trapezoidală;
- *Avans mediu*, de formă triunghiulară;
- *Avans mare*, de formă trapezoidală.

Realizarea inferențelor necesită parcurgerea următoarelor etape:

- Stabilirea regulilor de tip *DACĂ... ATUNCI...*, modelul general fiind următorul:
DACĂ premiză 1 OPERATOR premiză 2... ATUNCI concluzie 1, concluzie 2...;

- Fixarea operatorilor: $\&I$, SAU, λ , γ ;
- Calcularea gradelor de apartenență ale mărimilor de ieșire la mulțimile fuzzy corespunzătoare.

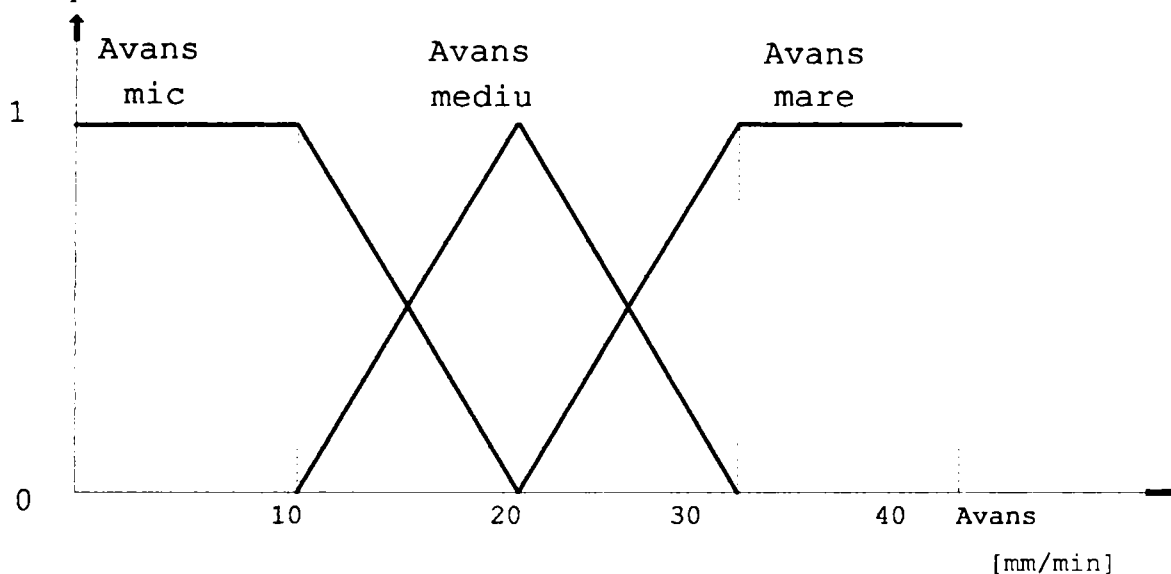


Fig. 4.53. Variabila lingvistică Avans

În cazul concret abordat, stabilirea mărimii avansului în funcție de forță presupune următoarele:

- Regulile de inferență sunt:
DACĂ Forța este mică ATUNCI Avansul este mare;
DACĂ Forța este medie ATUNCI Avansul este mediu;
DACĂ Forța este mare ATUNCI Avansul este mic;
- În acest caz nu sunt necesari operatori;
- Calculul gradelor de apartenență: Deoarece în etapa fuzzificării s-a găsit că

$$\mu_{\text{Forță mică}}(225) = 0;$$

$$\mu_{\text{Forță medie}}(225) = 0,75;$$

$$\mu_{\text{Forță mare}}(225) = 0,25,$$

vom avea, conform regulilor de compoziție a inferențelor:

$$\mu_{\text{Avans mic}}(\text{Avans}) = 0,25;$$

$$\mu_{\text{Avans mediu}}(\text{Avans}) = 0,75;$$

$$\mu_{\text{Avans mare}}(\text{Avans}) = 0.$$

Defuzzificarea

Defuzzificarea urmărește determinarea valorii concrete a mărimii de ieșire. Să presupunem că inferențele (în urma aplicării tuturor regulilor) au condus la mulțimile fuzzy care împreună compun concluzia finală C descrisă în figura 4.54. Există mai multe posibilități de calcul a mărimii de ieșire:

- *Centrul de greutate.* Mărimea de ieșire este abscisa centrului de greutate a suprafeței totale a concluziei C (conturul desenat cu linie groasă în figura 4.54):

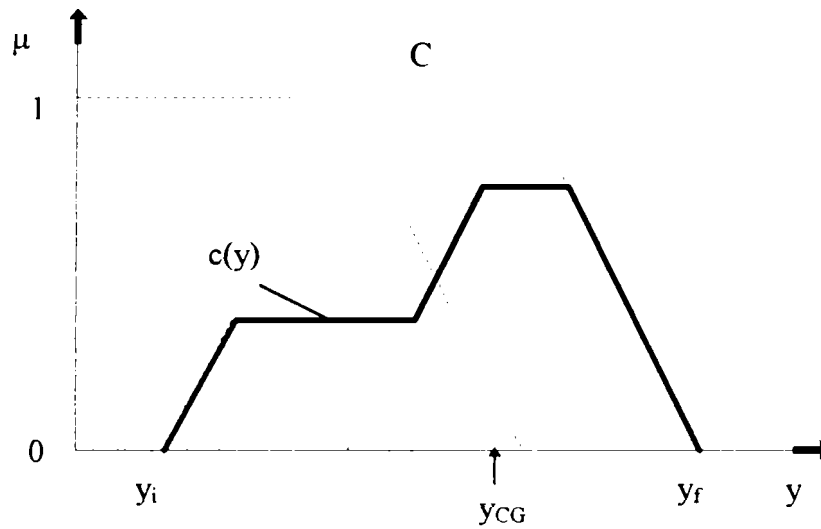


Fig. 4.54. Defuzzificarea după metoda centrului de greutate

$$y_{CG} = \frac{\int_{y_i}^{y_f} y \cdot c(y) \cdot dy}{\int_{y_i}^{y_f} c(y) \cdot dy}, \quad (4.31)$$

în care:

y_{CG} este valoarea mărimii de ieșire;

y_i este abscisa minimă a suprafeței C ;

y_f este abscisa maximă a suprafeței C ;

$c(y)$ este funcția care descrie conturul concluziei C .

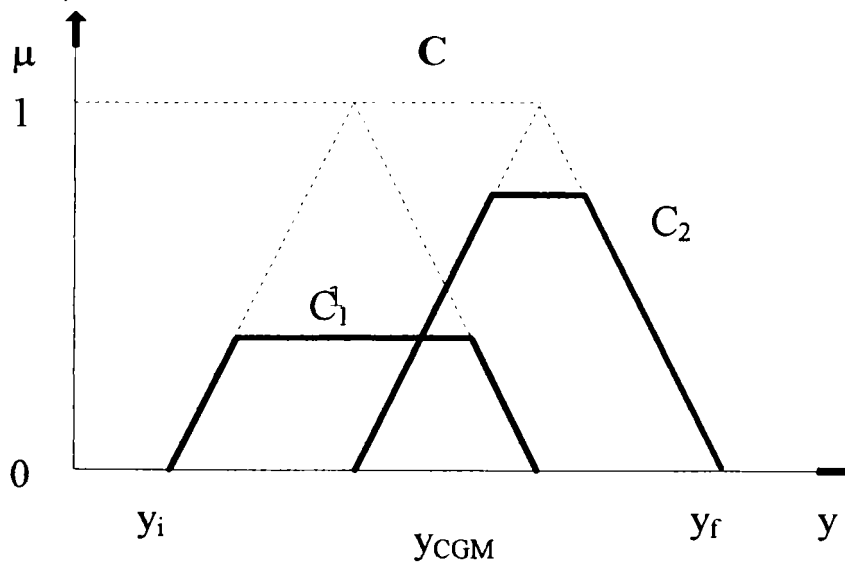


Fig. 4.55. Defuzzificarea după metoda centrului de greutate modificat

Această metodă este considerată ca fiind cea mai bună, însă necesită un mare volum de calcule.

- *Centrul de greutate modificat.* Această metodă este foarte asemănătoare cu cea a centrului de greutate, cu deosebirea că fiecare mulțime fuzzy care compune concluzia totală contribuie cu întreaga suprafață la calculul mărimii de ieșire, după cum sugerează figura 4.55. Dacă mulțimile fuzzy componente ale concluziei totale sunt trapezoidale sau triunghiulare, atunci această metodă este mai performantă decât cea a centrului de greutate;
- *Începutul maximului.* Mărimea de ieșire este cea mai mică abscisă pentru care funcția de apartenență a lui C are valoarea maximă:

$$y_{IN} = \inf\{y / \mu_C(y) = \alpha_M\} \quad (4.32)$$

$$\alpha_M = \sup \mu_C(y) \quad (4.33)$$

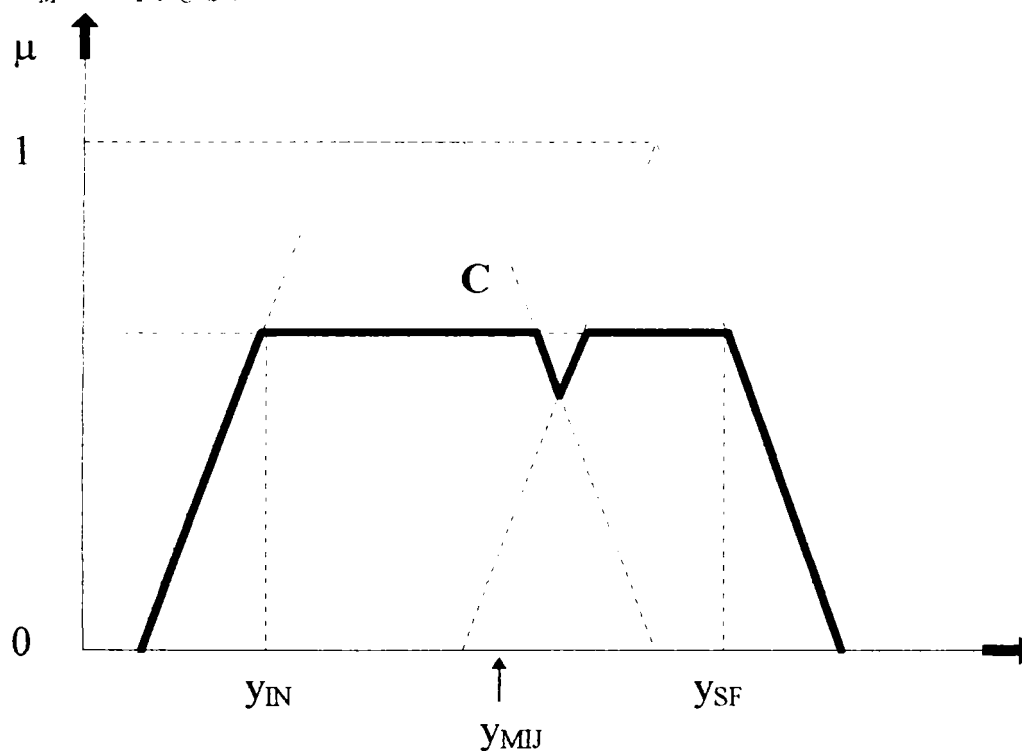


Fig. 4.56. Defuzzificarea după metodele începutului maximului, sfârșitului maximului și mijlocului maximului

- *Sfârșitul maximului.* Mărimea de ieșire este cea mai mare abscisă pentru care funcția de apartenență a lui C are valoarea maximă:

$$y_{SF} = \sup\{y / \mu_C(y) = \alpha_M\} \quad (4.34)$$

- *Mijlocul maximului.* Mărimea de ieșire este media celei mai mici și celei mai mari abscise pentru care funcția de apartenență a lui C are valoarea maximă:

$$y_{MLJ} = \frac{y_{IN} + y_{SF}}{2} \quad (4.35)$$

Aceste ultime trei metode sunt exemplificate grafic în figura 4.56. *Avantajul* lor este rapiditatea datorată simplității operațiilor pe care le necesită. *Dezavantajul* constă în reacția prea mare: o modificare mică la intrare cauzează o modificare mare la ieșire.

De aceea aceste trei metode se utilizează doar în aplicațiile care reclamă un răspuns rapid;

- *Metoda înălțimii*. Este o metodă care face un compromis între simplitate (deci viteză de calcul) și precizie. Formula de calcul amărării de ieșire este

$$y_{MI} = \frac{\sum_k y_k \cdot \mu(y_k)}{\sum_k \mu(y_k)}, \quad (4.36)$$

în care:

y_k este abscisa vârfului mulțimii k din componența concluziei C (pentru mulțimi triunghiulare este abscisa vârfului, iar pentru mulțimi trapezoidale este mijlocul bazei mici);

$\mu(y_k)$ este gradul de apartenență corespunzător.

Referindu-ne la exemplul numeric analizat, în urma aplicării operatorului *max* pentru efectuarea inferențelor, se ajunge la situația prezentată în figura 4.55.

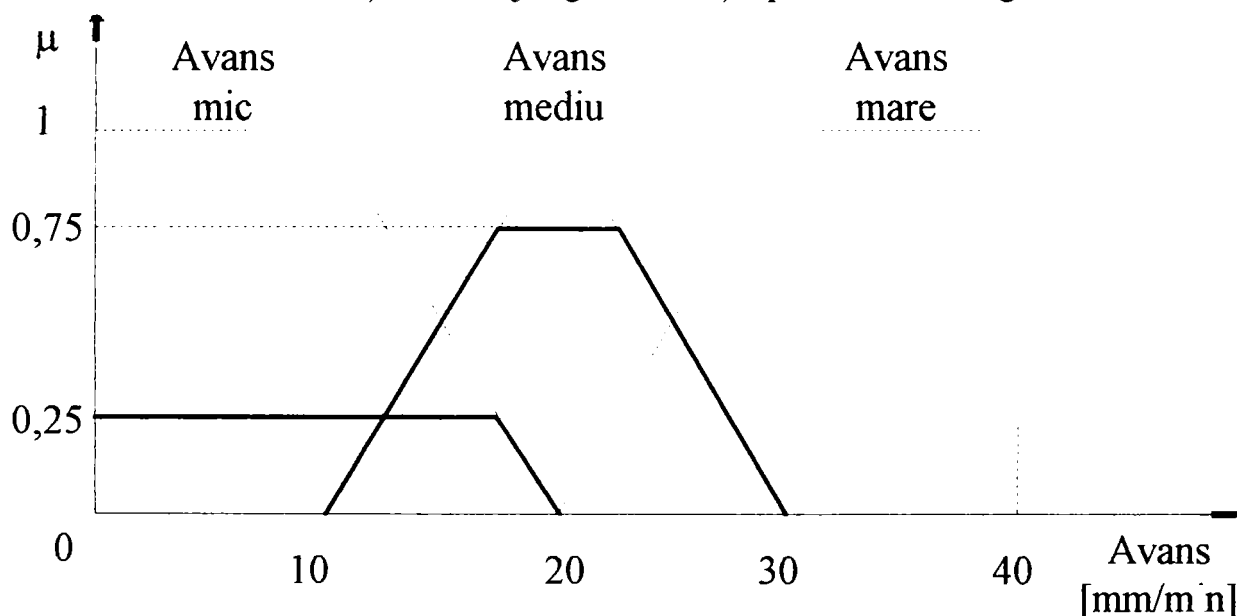


Fig. 4.57. Concluzia finală pentru variabila Avans

Aplicând metodele de defuzzificare prezentate vom obține următoarele valori ale mărimii de ieșire:

- conform metodei *centrului de greutate*, $Avans = 16,68 \text{ mm/min}$;
- conform metodei *centrului de greutate modificat*, $Avans = 18,58 \text{ mm/min}$;
- conform metodei *începutului maximului*, $Avans = 17,50 \text{ mm/min}$;
- conform metodei *sfârșitului maximului*, $Avans = 22,50 \text{ mm/min}$;
- conform metodei *mijlocului maximului*, $Avans = 20 \text{ mm/min}$;
- conform metodei *înălțimii*, $Avans = 17,18 \text{ mm/min}$.

4.6.3. Exemple de regulatoare fuzzy

Regulatoarele fuzzy au, în principiu, aceeași structură generală indiferent de parametrul de comandă adoptat. Exemplificările vor fi făcute pentru cazul în care comanda mișcării de avans a electrodului-sculă se face în funcție de curentul consumat de procesul de prelucrare electrochimică.

Regulator cu o intrare și două ieșiri

Se consideră că mărimea de intrare în regulator este eroarea curentului măsurat față de curentul de referință,

$$E_i = i_R - i_M \quad (4.37)$$

în care:

i_R este curentul de referință;

i_M este curentul măsurat în proces.

Deoarece acționarea mecanismului de avans a electrodului-sculă se face cu un motor pas cu pas, rezultă că sunt necesare două mărimi de ieșire din regulator:

- numărul de pași pe care trebuie să îi efectueze motorul într-un interval determinat de timp, n ;
- sensul de rotație a motorului: $sens=0$ pentru retragere, respectiv $sens=1$ pentru apropierea electrodului-sculă de piesă.

Fuzzificarea

Această etapă vizează descrierea variabilei lingvistice *Eroare_curent*, adică numărul și forma mulțimilor fuzzy asociate mărimii de intrare. Intensitatea curentului de lucru este dependentă de densitatea de curent adoptată, caracteristicile de prelucrabilitate, suprafața uzinată și alți factori, curentul maxim fiind limitat de caracteristicile tehnice ale mașinii. Ținând cont de aceste restricții, se propune ca fuzzificarea curentului de lucru să se facă după schema din figura 4.58.

Se observă următoarele elemente ale variabilei lingvistice *Eroare_curent*:

- variabila lingvistică este formată din 7 mulțimi fuzzy, după cum urmează: *NB* eroare negativă mare; *NM* eroare negativă medie; *NS* eroare negativă mică; *Z* eroare zero; *PS* eroare pozitivă mică; *PM* eroare pozitivă medie; *PB* eroare pozitivă mare;
- mulțimile *NB* și *PB* sunt trapezoidale, cu baza mare de $4A$ și baza mică de $2A$; mulțimile *NM*, *NS*, *Z*, *PS* și *PM* sunt triunghiulare cu baza de $4A$;
- mulțimile sunt simetrice față de zero.

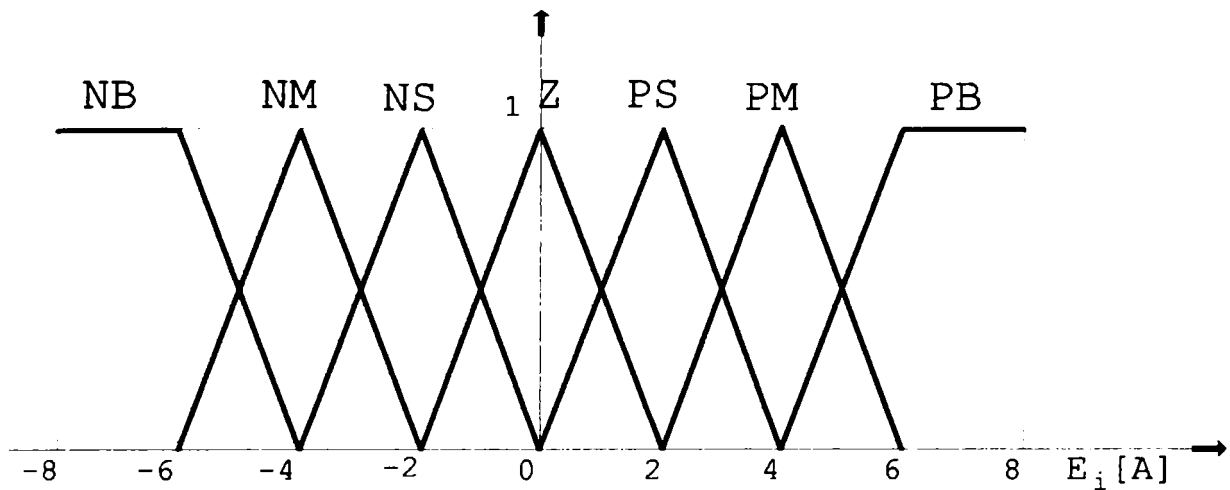


Fig. 4.58. Variabila lingvistică Eroare curent

Observație: Atât numărul cât și forma mulțimilor fuzzy se pot modifica ulterior, în etapa de punere la punct a algoritmului după care funcționează regulatorul.

Inferențele

Pentru formularea regulilor pe baza cărora funcționează regulatorul trebuie mai întâi să stabilim forma variabilelor lingvistice asociate mărimilor de ieșire. Din considerente constructive, pasul minim pe care îl poate efectua electrodul-sculă (determinat de pasul unghiular al motorului pas cu pas și rapoartele de transmisie ale mecanismului de avans) este $\Delta z = 0,001 \text{ mm}$, ceea ce reprezintă cel mult 1% dintr-un interstițiu frontal minim preconizat a se realiza $z_f = 0,1 \text{ mm}$. Dacă se admite că viteza de dizolvare anodică este $v_a = 2 \text{ mm/min} = 0,033 \text{ mm/s}$ și că durata necesară efectuării calculelor în controler este $T_c = 0,1 \text{ s}$, atunci motorul va efectua, în medie, la fiecare $0,1 \text{ s}$ un număr de pași

$$n = \frac{v_a \cdot T_c}{\Delta x} = 3,33 \rightarrow 3 \quad (4.38)$$

Ținând cont de aceste considerente pentru variabila lingvistică *Pas* asociată mării de ieșire n este propusă forma prezentată în figura 4.59.

Se observă următoarele elemente:

- variabila lingvistică se compune din 4 mulțimi fuzzy, după cum urmează: *Z* zero; *S* mic; *M* mediu; *B* mare;
- mulțimile *Z* și *B* sunt trapezoidale, cu baza mare de 6 pași și baza mică de 3 pași; mulțimile *S* și *M* sunt triunghiulare cu baza de 6 pași.

Observație: Atât numărul cât și forma acestor mulțimi se pot modifica ulterior, în etapa de punere la punct a algoritmului după care funcționează regulatorul.

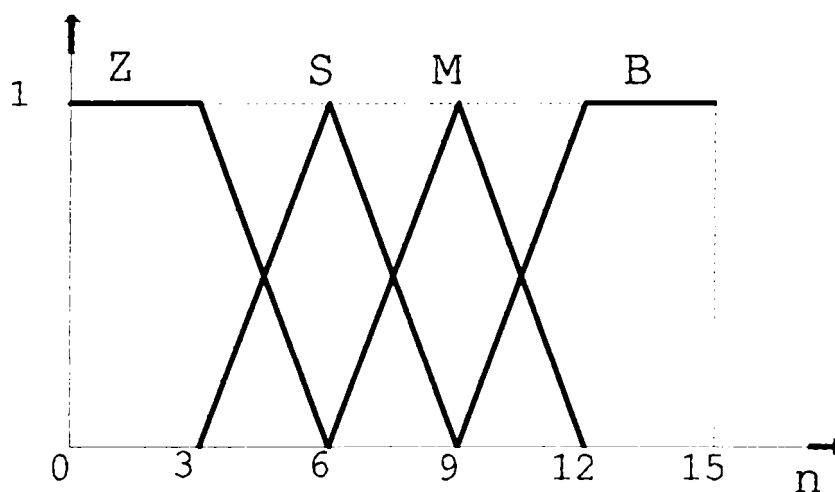


Fig. 4.59. Variabila lingvistică Pas

Acum pot fi scrise regulile care stabilesc legăturile dintre mărimea de intrare și cele două mărimi de ieșire:

DACĂ E_i este NB ATUNCI n este B

DACĂ E_i este NM ATUNCI n este M

DACĂ E_i este NS ATUNCI n este S

DACĂ E_i este Z ATUNCI n este Z

DACĂ E_i este PS ATUNCI n este S

DACĂ E_i este PM ATUNCI n este M

DACĂ E_i este PB ATUNCI n este B

DACĂ $E_i < 0$ ATUNCI $sens=0$

DACĂ $E_i \geq 0$ ATUNCI $sens=1$

Observatie: Primele 7 reguli pot fi modificate în etapa de punere la punct a funcționării regulatorului.

Exemplu numeric

Să presupunem că eroarea curentului măsurat față de cel dereferință este $E_i = +1,5A$.

Fuzzificarea. Gradele de apartenență la mulțimile fuzzy ale variabilei lingvistice asociate mărimii de intrare se determină cu ajutorul schemei din figura 4.60.

$$\mu_Z(1,5) = 0,25;$$

$$\mu_{PS}(1,5) = 0,75.$$

Inferențele. Situația existentă se încadrează în următoarele reguli:

DACĂ E_i este Z ATUNCI n este Z

DACĂ E_i este PS ATUNCI n este S

DACĂ $E_i \geq 0$ ATUNCI $sens=1$

Deci gradele de apartenență a mărimii de ieșire n la mulțimile fuzzy asociate vor fi:

$$\mu_Z(n) = 0,25;$$

$$\mu_S(n) = 0,75.$$

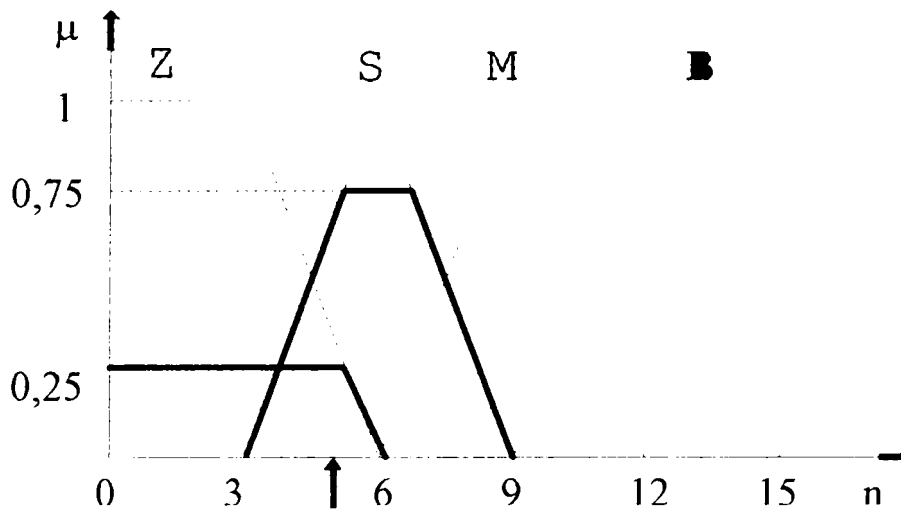


Fig. 4.60. Concluzie finală pentru regulatorul cu o intrare

Defuzzificarea. Pentru calculul numărului de pași pe care trebuie să îi efectueze motorul se utilizează schema din figura 4.60. Aplicând metoda centrului de greutate, rezultă că motorul trebuie să efectueze $n=5,006$ pași. Prin rotunjire se adoptă $n=5$ pași.

Regulator cu o intrare și două ieșiri perfecționat

Atât alegerea lățimii bazelor mulțimilor fuzzy asociate diferitelor mărimi, cât și regulile de inferență sunt influențate de caracteristica statică ce leagă mărimile de intrare și ieșire ale procesului. În exemplul prezentat caracteristica statică exprimă dependența curentului de lucru în funcție de grosimea interstițiului, conform reprezentării din figura 4.59.

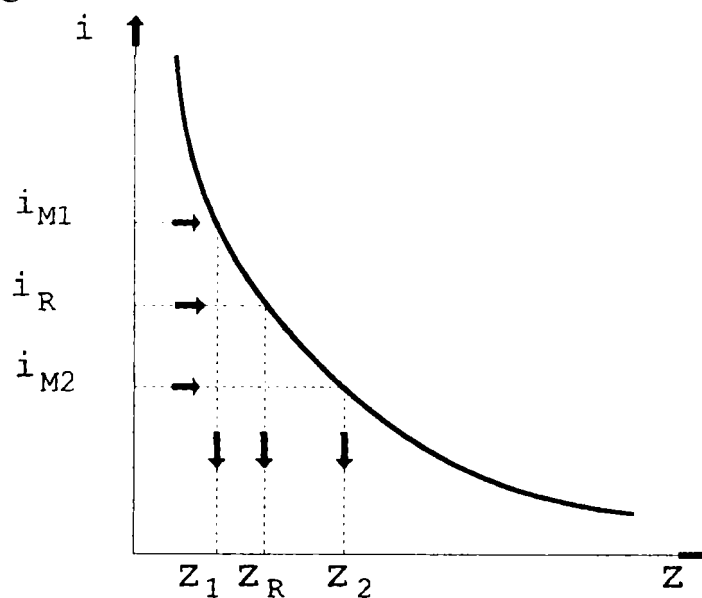


Fig. 4.61. Dependența curentului de interstițiu

Se observă că această caracteristică este neliniară, de tip hiperbolic, în conformitate cu relația

$$i = \frac{U_E \cdot \gamma \cdot S}{z}, \quad (4.39)$$

în care:

U_E este căderea de tensiune în electrolitul din interstițiu;

γ este conductivitatea electrică a electrolitului; este aria suprafeței prelucrate;

S este aria suprafeței prelucrate.

Fie i_R curentul de referință, căruia îi corespunde un interstițiu z_R . Se iau în considerare două situații posibile caracterizate prin curenții mășurați i_{M1} și i_{M2} , astfel încât

$$|\Delta i_1| = \Delta i_2, \quad (4.40)$$

în care:

$$\Delta i_1 = i_R - i_{M1}, \quad (4.41)$$

$$\Delta i_2 = i_R - i_{M2}. \quad (4.42)$$

În cazul în care curentul mășurat este i_{M1} , corecția poziției electrodului-sculă trebuie să se facă în sensul mășurii interstițiului de la z_1 la z_R , iar în cazul caracterizat prin curentul mășurat i_{M2} corecția poziției electrodului-sculă se va face prin micșorarea interstițiului de la z_2 la z_R . Se observă că datorită neliniarității caracteristicii mășurarea celor două corecții este sensibil diferită:

$$z_R - z_1 < z_2 - z_R. \quad (4.43)$$

De aici decurge necesitatea ca răspunsul sistemului să fie diferențiat, în funcție de semnul erorii E_i . Pentru a rezolva această problemă există două posibilități:

- modificarea regulilor de inferență;
- redefinirea mulțimilor fuzzy ce compun variabilele lingvistice ale mășurimilor de intrare/ieșire.

Modificarea regulilor de inferență

Poate fi testat următorul set de reguli:

DACĂ E_i este NB ATUNCI n este M

DACĂ E_i este NM ATUNCI n este S

DACĂ E_i este NS ATUNCI n este Z

DACĂ E_i este Z ATUNCI n este S

DACĂ E_i este PS ATUNCI n este M

DACĂ E_i este PM ATUNCI n este B

DACĂ E_i este PB ATUNCI n este B

Alegerea finală a setului de reguli va trebui să țină cont de rezultatele testării micromașinii în regim de lucru.

Redefinirea variabilelor lingvistice

În figura 4.62 sunt prezentate noile definiții ale mulțimilor fuzzy asociate mărimii de intrare. Se observă o creștere progresivă a mărimii bazei mulțimilor fuzzy pe măsura creșterii valorii mărimii de intrare. Fixarea definitivă a bazei mulțimilor va ține cont de performanțele practice ale regulatorului.

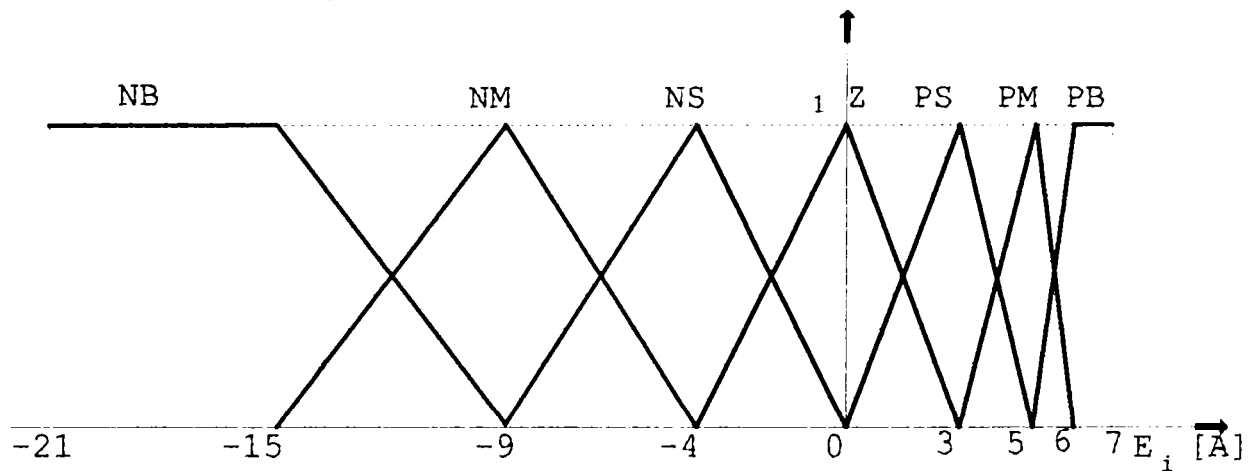


Fig. 4.62. Variabila lingvistică modificată Eroare_curent

Regulator cu două intrări și două ieșiri

Se consideră că cele două mărimi de intrare în regulator sunt:

- eroarea curentului măsurat față de curentul de referință,

$$E_i = i_R - i_M, \quad (4.44)$$

în care:

i_R este curentul de referință;

i_M este curentul măsurat în proces.

- dinamica variației curentului măsurat,

$$D_i = i_{M_k} - i_{M_{k-1}}, \quad (4.45)$$

în care:

i_{M_k} este curentul măsurat la momentul $k \cdot T_C$;

$i_{M_{k-1}}$ este curentul măsurat la momentul $(k-1) \cdot T_C$.

Mărimile de ieșire sunt cele prezentate pentru cazul anterior.

Fuzzificarea

Schema propusă pentru fuzzificarea erorii curentului este prezentată în figura 4.63.

Se remarcă următoarele elemente:

- variabila lingvistică este compusă din 5 mulțimi fuzzy;

- mulțimile NB și PB sunt trapezoidale, cu baza mare $4A$ și baza mică $2A$; mulțimile NS , Z și PS sunt triunghiulare cu baza $4A$;
- mulțimile sunt simetrice față de zero.

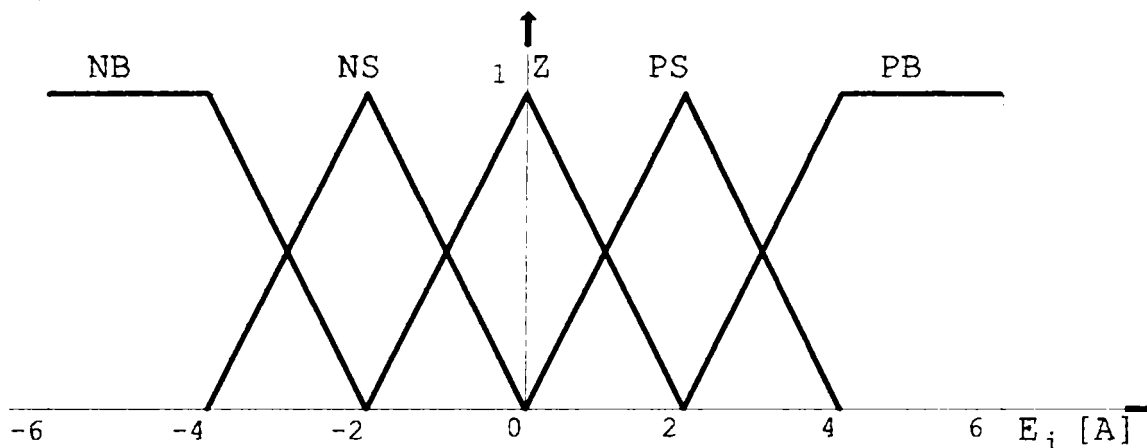


Fig. 4.63. Variabila lingvistică Eroare_curent

Pentru dinamica variației curentului măsurat este propusă schema din figura 4.64. Caracteristicile schemei sunt:

- variabila lingvistică are 5 mulțimi fuzzy;
- mulțimile NB și PB sunt trapezoidale, cu baza mare $2A$ și baza mică $1A$; mulțimile NS , Z și PS sunt triunghiulare cu baza $2A$;
- mulțimile sunt simetrice față de zero.

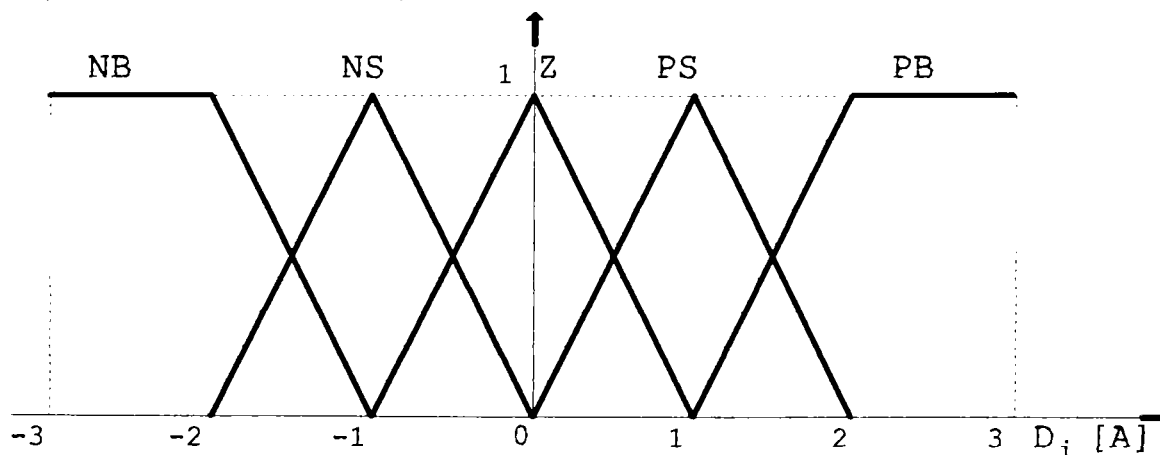


Fig. 4.64. Variabila lingvistică Dinamică_curent

Inferențele

Posibilele reguli de inferență sunt următoarele:

- DACĂ E_i este NB ȘI D_i este NB ATUNCI n este Z*
- DACĂ E_i este NB ȘI D_i este NS ATUNCI n este S*
- DACĂ E_i este NB ȘI D_i este Z ATUNCI n este M*
- DACĂ E_i este NB ȘI D_i este PS ATUNCI n este B*
- DACĂ E_i este NB ȘI D_i este PB ATUNCI n este B*
- DACĂ E_i este NS ȘI D_i este NB ATUNCI n este Z*
- DACĂ E_i este NS ȘI D_i este NS ATUNCI n este Z*

DACĂ E_i este NS ȘI D_i este Z ATUNCI n este S
 DACĂ E_i este NS ȘI D_i este PS ATUNCI n este M
 DACĂ E_i este NS ȘI D_i este PB ATUNCI n este M
 DACĂ E_i este Z ȘI D_i este NB ATUNCI n este S
 DACĂ E_i este Z ȘI D_i este NS ATUNCI n este S
 DACĂ E_i este Z ȘI D_i este Z ATUNCI n este Z
 DACĂ E_i este Z ȘI D_i este PS ATUNCI n este S
 DACĂ E_i este Z ȘI D_i este PB ATUNCI n este S
 DACĂ E_i este PS ȘI D_i este NB ATUNCI n este M
 DACĂ E_i este PS ȘI D_i este NS ATUNCI n este M
 DACĂ E_i este PS ȘI D_i este Z ATUNCI n este S
 DACĂ E_i este PS ȘI D_i este PS ATUNCI n este Z
 DACĂ E_i este PS ȘI D_i este PB ATUNCI n este Z
 DACĂ E_i este PB ȘI D_i este NB ATUNCI n este B
 DACĂ E_i este PB ȘI D_i este NS ATUNCI n este B
 DACĂ E_i este PB ȘI D_i este Z ATUNCI n este M
 DACĂ E_i este PB ȘI D_i este PS ATUNCI n este S
 DACĂ E_i este PB ȘI D_i este PB ATUNCI n este Z
 DACĂ $E_i < 0$ ATUNCI $sens=0$
 DACĂ $E_i \geq 0$ ATUNCI $sens=1$

Prezentarea sintetică a acestor reguli este dată în tabelul 4.8.

Tabel 4.8. Regulile de inferență

		D_i				
		NB	NS	Z	PS	PB
E_i	NB	$n=Z$	$n=S$	$n=M$	$n=B$	$n=B$
	NS	$n=Z$	$n=Z$	$n=S$	$n=M$	$n=M$
	Z	$n=S$	$n=S$	$n=Z$	$n=S$	$n=S$
	PS	$n=M$	$n=M$	$n=S$	$n=Z$	$n=Z$
	PB	$n=B$	$n=B$	$n=M$	$n=S$	$n=Z$

Operatorul folosit pentru ȘI este operatorul *minim*. La punerea la punct a programului aceste reguli pot fi ușor modificate. Acele reguli care se observă că practic nu sunt apelate pot fi șterse din program, ceea ce va conduce la micșorarea timpului de răspuns.

Exemplu numeric

Presupunem că cele două mărimi de intrare au valorile:

$$E_i = +1,5 A ;$$

$$D_i = -0,5 A.$$

Fuzifierea. Gradele de apartenență la mulțimile fuzzy ale celor două variabile lingvistice asociate mărimilor de intrare se determină conform schemelor din figurile 4.65 și 4.66.

- pentru E_i :

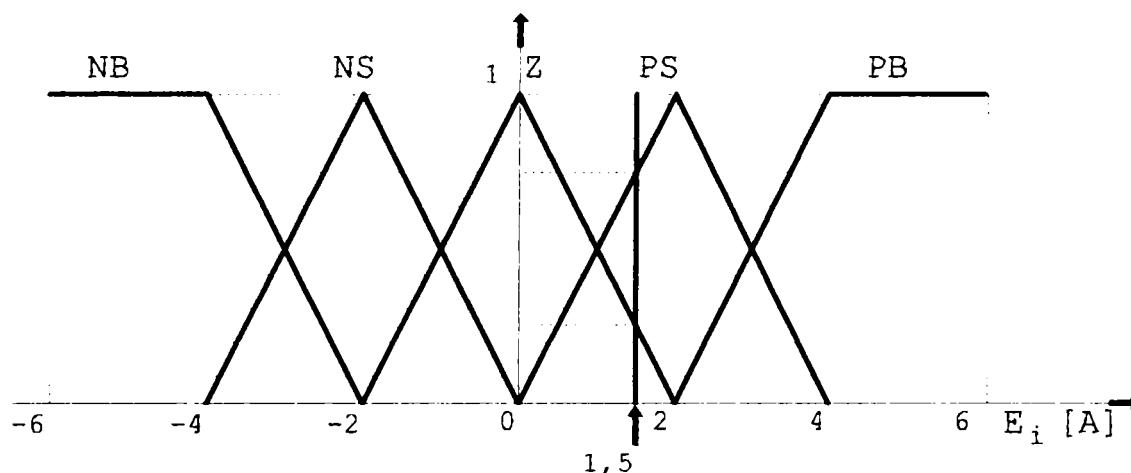


Fig. 4.65. Fuzifierea variabilei Eroare_curent

$$\mu_Z(1,5) = 0,25;$$

$$\mu_{PS}(1,5) = 0,75;$$

- pentru D_i :

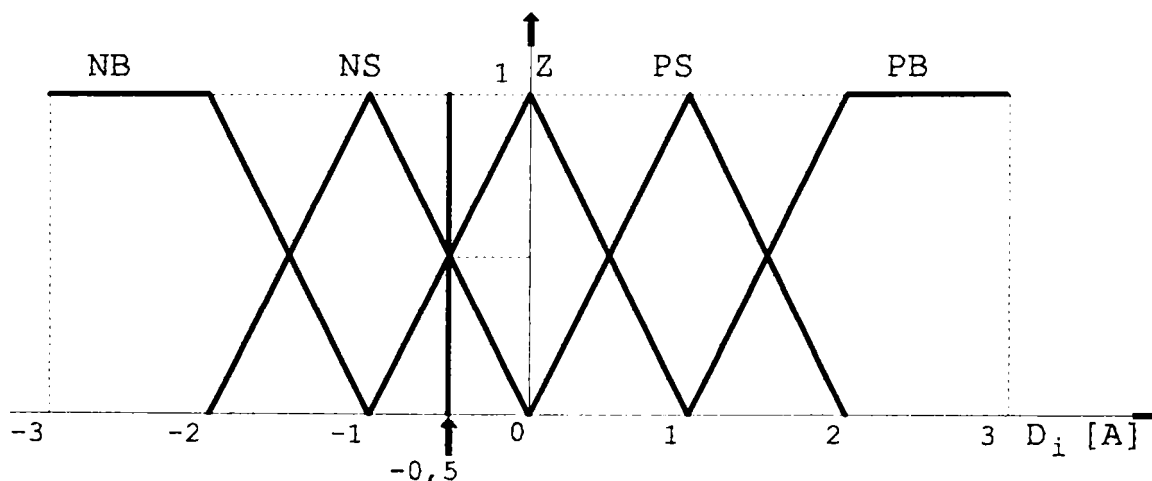


Fig. 4.66. Fuzifierea variabilei Dinamică_curent

$$\mu_Z(-0,5) = 0,50;$$

$$\mu_{NS}(-0,5) = 0,50.$$

Inferențele. Vor fi apelate următoarele reguli:

DACĂ E_i este Z ȘI D_i este NS ATUNCI n este S

DACĂ E_i este Z ȘI D_i este Z ATUNCI n este Z

DACĂ E_i este PS ȘI D_i este NS ATUNCI n este M

DACĂ E_i este PS ȘI D_i este Z ATUNCI n este S

DACĂ $E_i > 0$ ATUNCI sens=1

În consecință, gradele de apartenență a mărimii de ieșire n la mulțimile fuzzy aferente vor fi:

$$\mu_S(n) = \min\{0,25; 0,50\} = 0,25;$$

$$\mu_Z(n) = \min\{0,25; 0,50\} = 0,25;$$

$$\mu_M(n) = \min\{0,75; 0,50\} = 0,50;$$

$$\mu_S(n) = \min\{0,75; 0,50\} = 0,50.$$

Defuzzificarea. Pentru calculul mărimii de ieșire se utilizează metoda centrului de greutate pentru suprafața din figura 4.67. Va rezulta $n = 6,49$ pași, iar prin rotunjire se adoptă $n = 6$ pași (dacă motorul este comandat în regim de micropășire, atunci se adoptă $n = 6,5$ pași).

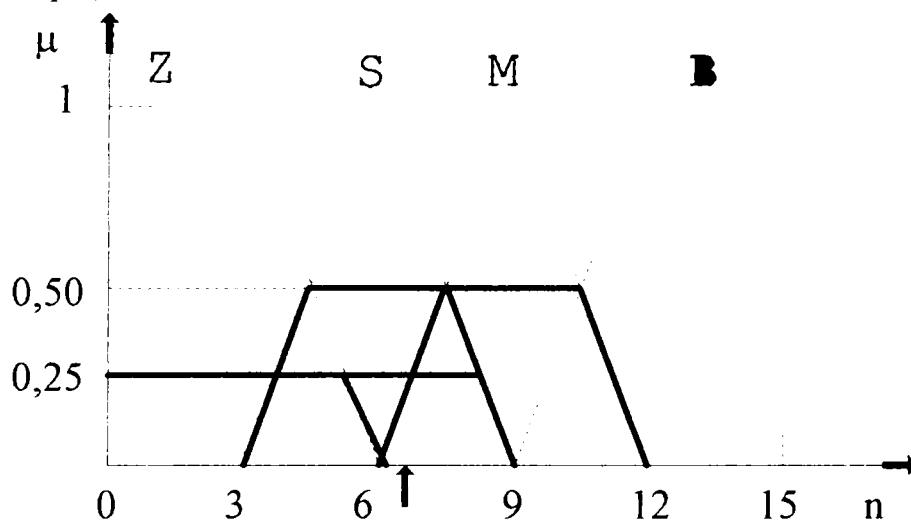


Fig. 4.67. Defuzzificarea variabilei Pas

În cazul regulatorului cu o singură mărime de intrare, pentru o eroare a curentului măsurat față de cel de referință de $1,5A$ a rezultat că poziția electrodului-sculă trebuie corectată cu $n = 5$ pași. Regulatorul cu două mărimi de intrare va corecta poziția electrodului-sculă cu $n = 6$ sau $n = 6,5$ pași. Se observă deci influența reală pe care o are luarea în considerare a dinamicii procesului reglat.

4.6.4. Programul de comandă și control

Pe baza celor dezvoltate în acest capitol a fost scris programul în limbaj de asamblare care asigură comanda și controlul procesului de găurire electrochimică. Condițiile de lucru sunt următoarele:

- semifabricatul prelucrat: oțel Rp5.. Se prelucrează o gaură cu adâncimea de 5mm;
- electrodul-sculă:
 - tip: cu fațetă, cu suprafața laterală izolată
 - material: Cu
 - diametru: ext. 7 mm, int. 5 mm
 - lungime: 30 mm

- electrolit: 10 % NaCl, 20 °C
- injecție de electrolit prin interiorul electrozudului-sculă
- mărime de referință: curentul de lucru
- tensiune de lucru: 14 V
- densitate de curent: 0,5 A/mm²
- curent de lucru: 9,5 A
- tip de regulator: cu o intrare și două ieșiri perfecționat

Regulatorul utilizat este cu o intrare și două ieșiri perfecționat, de tipul celui prezentat în paragraful anterior. Utilizând un program de calcul specializat, scris în MATLAB, s-a obținut funcția de răspuns prezentată în figura 4.68.

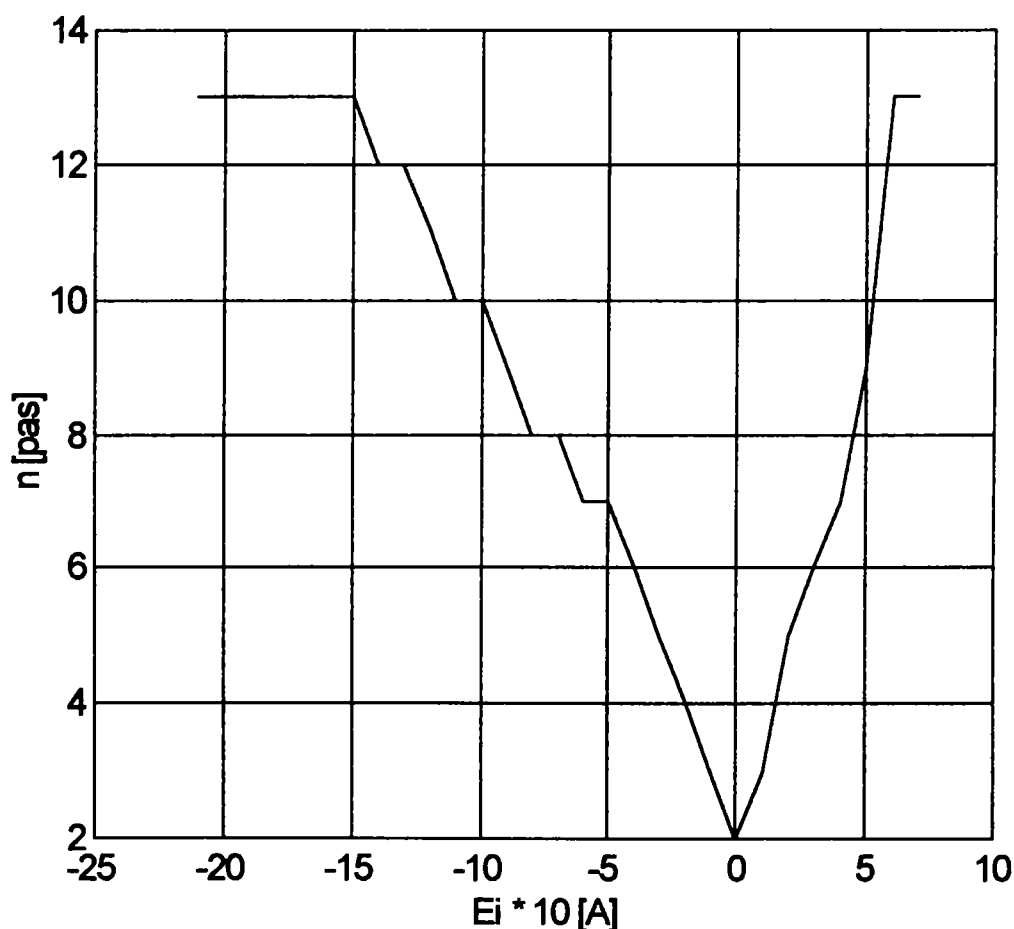


Fig. 4.68. Funcția de răspuns a regulatorului

Pentru valorile negative ale erorii curentului de lucru motorul pas cu pas execută un număr determinat de pași în sensul retragerii electrozudului-sculă, iar pentru valorile pozitive ale erorii curentului de lucru motorul pas cu pas execută un număr determinat de pași în sensul apropiării de piesă a electrozudului-sculă. Se observă alura diferită a funcției de răspuns pentru domeniul negativ și pozitiv al erorii curentului. În continuare este prezentat programul de comandă și control.

```

$INCLUDE (REG552.INC)
NAME REFERINTA_CURENT
;Prelucrare cu avans reglat dupa curentul de lucru
    
```



```

USING      0
EXTRN     CODE (COMP2, WSTART, TXHEX2, SPACE, TXCH)
;-----
;adrese
;-----
IE0_ADD   EQU    0003H           ;adresa vectorului IE0
TF0_ADD   EQU    000BH           ;adresa vectorului TF0
ADC_ADD   EQU    0053H           ;adresa vectorului ADC
;-----
;cuvinte de comanda
;-----
;programare SFR
IEN0_INIT EQU    11000011B
;          ||      |*----- EX0 (activare nINT0)
;          ||      *----- ET0 (activare Timer 0)
;          |*----- EAD (activare ADC)
;          *----- EA  (activare intreruperi)
IEN0_CUT_nINT0 EQU  11000010B
;          ||      |*----- EX0 (dezactivare nINT0)
;          ||      *----- ET0 (activare Timer 0)
;          |*----- EAD (activare ADC)
;          *----- EA  (activare intreruperi)
IPO_INIT  EQU    00000000B
;          |      |*----- PX0 (prioritate nINT0)
;          |      *----- PT0 (prioritate Timer 0)
;          *----- PAD (prioritate ADC)
TMOD_INIT_MSK EQU  00000001B
;          |||||*----- M0 (mod 1)\
;          |||||*----- M1          | TIMER 0
;          ||||*----- C/T (timer) |
;          |||*----- Gate(not) /
;          ||*----- M0 \
;          ||*----- M1  | TIMER 1
;          |*----- C/T  | (nu se modifica)
;          *----- Gate /
TCON_INIT EQU  01000001B
;          ||||      *----- IT0 (intr. pe front scaz.)
;          |||*----- TR0 (stop Timer 0)
;          ||*----- TF0 (fanion Timer 0)
;          |*----- TR1 (start Timer 1-nemodif.!)
;          *----- TF1 (fanion Timer 1)
ADCON_INIT EQU  00000000B
;          *----- ADEX (comanda ADC prin soft)
ADCON_START EQU  00001000B
;          *----- ADCS (start ADC)
POZ_INIT  EQU  10001000B
;          |||*----- faza 1
;          ||*----- faza 2
;          |*----- faza 3
;          *----- faza 4
LUNG_H    EQU  010H ;lung. gaurii prelucrate (high)
LUNG_L    EQU  010H ;lung. gaurii prelucrate (low)
CRNT_REF  EQU  116 ;curentul de referinta

```

```

TEMP_MIN      EQU  100  ;temperatura min. a electrolitului
TEMP_MAX      EQU  110  ;temperatura max. a electrolitului
T_CICLU       EQU  248  ;durata unui ciclu: (248+2)*0.02s
TH0_MAS       EQU  0ECH  ;timp intirziere masurare (high)
TL0_MAS       EQU  0A9H  ;timp intirziere masurare (low)
TH0_PAS_R     EQU  0F8H  ;durata unui pas rapid (high)\
TL0_PAS_R     EQU  02FH  ;durata unui pas rapid (low) /=2ms
TH0_PAS       EQU  0F4H  ;durata unui pas (high)\
TL0_PAS       EQU  047H  ;durata unui pas (low) /=3ms
NP_APR_R     EQU  7      ;nr. pasi pe perioada la apr. rapida
;biti de comanda
FAZA1         EQU  P4.0  ;comanda faza 1
FAZA2         EQU  P4.1  ;comanda faza 2
FAZA3         EQU  P4.2  ;comanda faza 3
FAZA4         EQU  P4.3  ;comanda faza 4
RELEU         EQU  P4.4  ;comanda releu RST
SUPAPA        EQU  P4.5  ;comanda circuitului de racire
LIM_JOS       EQU  P4.6  ;limitator de cursa inferior
LIM_SUS       EQU  P4.7  ;limitator de cursa superior
;vectorii de intrerupere
;-----
        CSEG AT  0      ;"vectorul" RESET
        JMP  MAIN
        CSEG AT  IE0_ADD ;vectorul IE0
        JMP  IE0_ROUT
        CSEG AT  TF0_ADD ;vectorul TF0
        JMP  TF0_ROUT
        CSEG AT  ADC_ADD ;vectorul ADC
        JMP  ADC_ROUT
;-----
;programul principal
;-----
        CSEG AT  0080H  ;inceputul segmentului de cod
MAIN:
;secventa de initializare
        MOV  IENO,#IENO_INIT      ;intreruperi
        MOV  IPO,#IPO_INIT        ;prioritati
        ORL  TMOD,#TMOD_INIT_MSK ;Timer 0 in mod 1
        MOV  TCON,#TCON_INIT      ;control intreruperi on/off
;alimentare motor pas cu pas
        MOV  POZ,#POZ_INIT        ;pozitia fazelor
        MOV  C,POZ.0              ;faza 1
        MOV  FAZA1,C
        MOV  C,POZ.1              ;faza 2
        MOV  FAZA2,C
        MOV  C,POZ.2              ;faza 3
        MOV  FAZA3,C
        MOV  C,POZ.3              ;faza 4
        MOV  FAZA4,C
        MOV  POZ_H,#0              ;initializeaza pozitia electrodului
        MOV  POZ_L,#0
        MOV  R2,#LUNG_L           ;lungimea gaurii prelucrate
        MOV  R3,#LUNG_H

```

```

;decuplare supapa
    CLR  SUPAPA
;momentul masurarilor
    SETB F_MAS           ;fanion masurare
    SETB F_APR           ;fanion apropiere rapida
    CLR  F_PasR          ;fanion pas rapid
    CLR  F_RETR          ;fanion retragere rapida
    CLR  SENS            ;sens de apropiere

;tabloul functiei de raspuns
    MOV  70H,#13
    MOV  71H,#13
    MOV  72H,#13
    MOV  73H,#13
    MOV  74H,#13
    MOV  75H,#13
    MOV  76H,#13
    MOV  77H,#12
    MOV  78H,#12
    MOV  79H,#11
    MOV  7AH,#10
    MOV  7BH,#10
    MOV  7CH,#8
    MOV  7DH,#8
    MOV  7EH,#7
    MOV  7FH,#7
    MOV  80H,#6
    MOV  81H,#5
    MOV  82H,#3
    MOV  83H,#0
    MOV  84H,#4
    MOV  85H,#5
    MOV  86H,#6
    MOV  87H,#7
    MOV  88H,#8
    MOV  89H,#10
    MOV  8AH,#13
    MOV  8BH,#13
    MOV  8CH,#14

;bucla infinita
LOOP1:
    JMP  LOOP1

;-----
;rutina intreruperii IE0
;-----
IE0_ROUT:
    JB   F_APR,MAS_AV_R
    DEC  DZ                ;decrem. contorul detectiei zero
    MOV  A,DZ
    JZ   ZERO
    MOV  TH0,#TH0_MAS     ;temporizare masurare (high)
    MOV  TLO,#TLO_MAS     ;temporizare masurare (low)
    SETB TR0              ;start Timer 0

```

```

MOV R0,POZ_L
MOV R1,POZ_H
CLR C
CALL COMP2
JNC RETRAGERE
MOV A,#TEMP_MAX
SUBB A,TEMP_INTR
JC START_RACIRE
MOV A,#TEMP_MIN
SUBB A,TEMP_INTR
JNC STOP_RACIRE
RETI
MAS_AV_R:
MOV TH0,#TH0_MAS ;temporizare masurare (high)
MOV TLO,#TLO_MAS ;temporizare masurare (low)
SETB TR0 ;start Timer 0
RETI
ZERO:
MOV IEN0,#IEN0_CUT_nINT0;dezactivare nINT0
MOV DZ,#T_CICLU
MOV A,POZ_H ;transmiterea datelor
CALL TXHEX2
MOV A,POZ_L
CALL TXHEX2
MOV A,#32
CALL TXCH
MOV A,TENS
CALL TXHEX2
MOV A,#32
CALL TXCH
MOV A,CRNT
CALL TXHEX2
MOV A,#32
CALL TXCH
MOV A,TEMP_IES
CALL TXHEX2
MOV A,#32
CALL TXCH
MOV A,TEMP_INTR
CALL TXHEX2
MOV A,#32
CALL TXCH
MOV A,PRES_IES
CALL TXHEX2
MOV A,#32
CALL TXCH
MOV A,PRES_INTR
CALL TXHEX2
MOV A,#13
CALL TXCH
MOV A,#10
CALL TXCH
MOV IEN0,#IEN0_INIT ;activare nINT0

```

```

    RETI
START_RACIRE:
    SETB SUPAPA
    RETI
STOP_RACIRE:
    CLR SUPAPA
    RETI
RETRAGERE:
    SETB F_RETR          ;retragere rapida
    CLR F_PasR
    MOV IENO,#IENO_CUT_nINT0;dezactivare nINT0
    SETB SENS           ;sens de retragere
    SETB TF0           ;declansare intrerupere Timer 0
    RETI
;rutina intreruperii TF0
;-----
TF0_ROUT:
    CLR TR0             ;stop Timer 0
    JB F_PasR,PASIRE_R;salt la apropiere rapida
    JB F_RETR,PAS_RETR;salt la retragere rapida
    JB F_MAS,MASURARE ;salt la rutina de masurare
    DJNZ NP,PAS_DR     ;decrem. nr. pasi & salt la pasire
    SETB F_MAS         ;permite masurarea
    RETI
PASIRE_R:
    DJNZ NP,PAS_APR    ;decrem. nr. pasi & salt pas rapid
    CLR F_PasR
    SETB F_MAS
    RETI
PAS_APR:
    MOV C,LIM_JOS     ;testare limita de cursa jos
    JNC RETRAGERE
    MOV A,POZ         ;incarca Acc. cu pozitia fazelor
    RR A              ;roteste Acc. la dreapta
    MOV POZ,A        ;salveaza pozitia fazelor
    MOV C,POZ.0      ;comanda faze
    MOV FAZA1,C
    MOV C,POZ.1
    MOV FAZA2,C
    MOV C,POZ.2
    MOV FAZA3,C
    MOV C,POZ.3
    MOV FAZA4,C
    MOV TH0,#TH0_PAS_R ;incarca durata unui pas (high)
    MOV TL0,#TL0_PAS_R ;incarca durata unui pas (low)
    SETB TR0         ;start Timer 0
    RETI
;rutina de masurare
MASURARE:
    MOV ADCON,#ADCON_INIT ;initializare ADC
    MOV R0,#60H         ;adresa primei marimi masurate
    MOV R1,#0          ;ADC este setat pt. prima
    MOV ADCON,R1       ;masurare pe intrarea ADC0

```

```

    ORL  ADCON,#ADCON_START    ;start masurare
    CLR  F_MAS                  ;blocheaza reluarea masurarii
    RETI
PAS_RETR:
    MOV  C,LIM_SUS              ;testare limita de cursa sus
    JNC  STOP_SUS
    MOV  A,POZ
    RL   A                      ;incarca Acc. cu poz. fazelor
    MOV  POZ,A                  ;roteste Acc. la stinga
    MOV  C,POZ.0                ;salveaza pozitia fazelor
    MOV  FAZA1,C                ;comanda faze
    MOV  C,POZ.1
    MOV  FAZA2,C
    MOV  C,POZ.2
    MOV  FAZA3,C
    MOV  C,POZ.3
    MOV  FAZA4,C
    MOV  TH0,#TH0_PAS_R        ;incarca durata unui pas (high)
    MOV  TL0,#TL0_PAS_R        ;incarca durata unui pas (low)
    SETB TR0                    ;start Timer 0
    RETI
;un pas la dreapta
PAS_DR:
    JB   SENS,PAS_ST           ;ramificare dupa sens rotire
    MOV  C,LIM JOS              ;testare limita de cursa jos
    JNC  RETRAGERE
    MOV  A,POZ                  ;incarca Acc. cu pozitia
fazelor
    RR   A                      ;roteste Acc. la dreapta
    MOV  POZ,A                  ;salveaza pozitia fazelor
    MOV  C,POZ.0                ;comanda faze
    MOV  FAZA1,C
    MOV  C,POZ.1
    MOV  FAZA2,C
    MOV  C,POZ.2
    MOV  FAZA3,C
    MOV  C,POZ.3
    MOV  FAZA4,C
    MOV  TH0,#TH0_PAS          ;incarca durata unui pas (high)
    MOV  TL0,#TL0_PAS          ;incarca durata unui pas (low)
    SETB TR0                    ;start Timer 0
    MOV  A,POZ_L
    ADD  A,#1
    MOV  POZ_L,A
    JC   PLUS_UNU
    RETI
PLUS_UNU:
    MOV  A,POZ_H
    ADD  A,#1
    MOV  POZ_H,A
    RETI
;un pas la stinga
PAS_ST:

```

```

MOV C,LIM_SUS ;testare limita de cursa sus
JNC STOP_SUS
MOV A,POZ ;incarca Acc. cu poz. fazelor
RL A ;roteste Acc. la dreapta
MOV POZ,A ;salveaza pozitia fazelor
MOV C,POZ.0 ;comanda faze
MOV FAZA1,C
MOV C,POZ.1
MOV FAZA2,C
MOV C,POZ.2
MOV FAZA3,C
MOV C,POZ.3
MOV FAZA4,C
MOV TH0,#TH0_PAS ;incarca durata unui pas (high)
MOV TL0,#TL0_PAS ;incarca durata unui pas (low)
SETB TR0 ;start Timer 0
MOV A,POZ_L
CLR C
SUBB A,#1
MOV POZ_L,A
JC MINUS_UNU
RETI
STOP_SUS:
CLR RELEU
CLR SUPAPA
JMP WSTART
RETI
MINUS_UNU:
MOV A,POZ_H
CLR C
SUBB A,#1
MOV POZ_H,A
RETI
;rutina intreruperii ADC
;-----
ADC_ROUT:
MOV @R0,ADCH
INC R0
MOV ADCON,#ADCON_INIT
MOV A,R1
CJNE A,#5,START_ADC
JB F_APR,APROPIERE ;salt la apropiere rapida
CALL NR_PASI
SETB TF0 ;intrerupere Timer 0
RETI
;start masurare
START_ADC:
INC R1
MOV ADCON,R1
ORL ADCON,#ADCON_START
RETI
APROPIERE:
MOV A,#CRNT_REF ;compara curentul masurat cu

```

```

CLR C ;cel de referinta
SUBB A,CRNT
JC AV_LUCRU
SETB F_PasR
MOV NP,#NP_APR_R
SETB TF0 ;declansare intrerupere Timer 0
RETI
AV_LUCRU:
CLR F_APR
CLR F_PasR
MOV NP,#1
MOV DZ,#T_CICLU
RETI
;corectarea pozitiei electrodului
NR_PASI:
MOV R0,#6FH ;adr. preced. incep.tabloului NP
MOV R1,#0 ;inainte de tablou cu 1 pas
MOV I,#29 ;nr. de elemente ale tabloului
LOOP2:
MOV A,R1 ;urcare in tablou cu 1 pas
ADD A,#29 ;(adauga valoarea hexa a 1A)
MOV R1,A
SUBB A,CRNT ;comparare tablou cu val. masurata
INC R0 ;urcare in tablou cu un pas (adr.)
DEC I ;dec. elem. de parcurs in tablou
MOV A,I
JZ IESIRE ;iesire daca s-a parcurs tot tabloul
JC LOOP2
MOV NP,@R0 ;nr. de pasi de facut
INC NP ;incrementeaza nr. de pasi
MOV A,#CRNT_REF ;compara curentul masurat cu
SUBB A,CRNT ;valoarea "centrala" a tabloului
MOV SENS,C ;stabilirea sensului de deplasare
RET
IESIRE:
MOV NP,@R0 ;nr. de pasi de facut
INC NP ;incrementeaza nr. de pasi
MOV A,#CRNT_REF ;compara curentul masurat cu
SUBB A,CRNT ;valoarea "centrala" a tabloului
MOV SENS,C ;stabilirea sensului de deplasare
RET
;-----
;zona de date RAM
;-----
BSEG AT 0 ;memoria interna de date, adr. 20H
SENS: DBIT 1 ;sens rotatie: st=1(R); dr=0(A)
F_MAS: DBIT 1 ;fanion pt. declansare masurare
F_APR: DBIT 1 ;fanion pt. declansare apr.rapida
F_RETR: DBIT 1 ;fanion pt. declansare retr. rapida
F_PasR: DBIT 1 ;fanion pt. executie pas apr. rapida
DSEG AT 25H ;memoria interna de date, adr. 21H
POZ: DS 1 ;pozitia fazelor

```



```

        DSEG AT    60H          ;memoria interna de date, adr. 60H
PRES_INTR:      DS    1          ;presiunea la intrare
PRES_IES:      DS    1          ;presiunea la iesire
TEMP_INTR:     DS    1          ;temperatura la intrare
TEMP_IES:     DS    1          ;temperatura la iesire
CRNT:         DS    1          ;curentul prin electrolit
TENS:         DS    1          ;tensiunea pe electrozi
POZ_H:        DS    1          ;pozitia electrodului (high)
POZ_L:        DS    1          ;pozitia electrodului (low)
NP:          DS    1          ;numarul de pasi de facut
I:           DS    1          ;pozitia in tablou (10,9,...0)
DZ:         DS    1          ;contor detectie de zero
        END
    
```

5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE

Utilizând micromașina MMGEE a fost realizat un experiment factorial complet de tipul 2^3 în scopul estimării influenței asupra rugozității suprafeței laterale a găurilor (Ra [μm]) a următorilor factori de influență:

- tipul de reglare a avansului:
 - după curentul de lucru \Rightarrow *Reglare=Curent*;
 - după căderea de tensiune pe electrozi \Rightarrow *Reglare=Tensiune*;
- tipul de injecție a electrolitului:
 - prin interiorul electrodului-sculă \Rightarrow *Injecție=I*;
 - prin exteriorul electrodului-sculă \Rightarrow *Injecție=E*;
- electrolitul:
 - 10 % NaCl \Rightarrow *Electrolit=NaCl*;
 - 10 % NaNO₃ \Rightarrow *Electrolit=NaNO₃*.

Semifabricatele utilizate sunt din oțel Rp3 cu grosimea de 2,8 mm, iar electrodul-sculă este de tip tubular, cu suprafața laterală izolată, având diametrul exterior $D=7$ mm, respectiv diametrul interior $d=5$ mm. Dacă se admite ca densitatea curentului de lucru să fie $j=0,75A/mm^2$, atunci curentul de lucru nominal va fi:

$$I = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} j \cong 14,1[A]. \quad (5.1)$$

Ținând cont de caracteristica de lucru a sursei de alimentare cu energie electrică determinată experimental și prezentată în figura 5.1, se determină tensiunea de lucru nominală $U \cong 13,9V$.

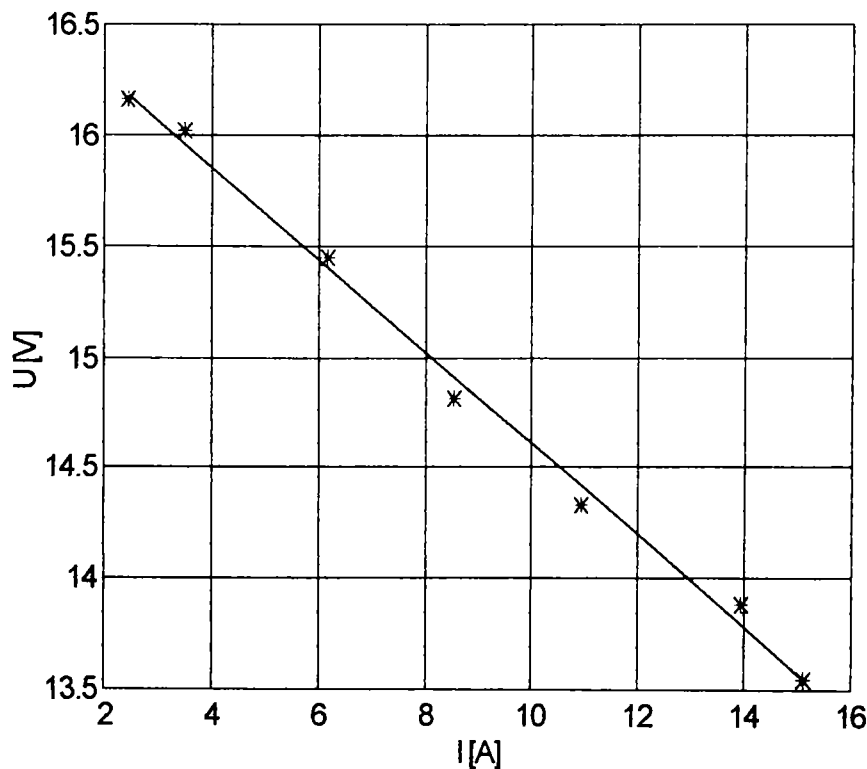


Fig. 5.1 Caracteristica de lucru a sursei de tensiune

Cele două programe pentru comanda mașinii când $Reglare=Curent$ și $Reglare=Tensiune$ sunt similare celui prezentat la sfârșitul capitolului 4.

În tabelul 5.1 este prezentată matricea-program a experimentului factorial.

Tabelul 5.1 Matricea-program a experimentului factorial

Nr. probă	Reglare	Injectie	Electrolit	Ra [μm]
1	Curent	I	NaCl	4,5
2	Tensiune	I	NaCl	6,3
3	Curent	E	NaCl	4,2
4	Tensiune	E	NaCl	5,6
5	Curent	I	NaNO ₃	2,1
6	Tensiune	I	NaNO ₃	2,7
7	Curent	E	NaNO ₃	3,2
8	Tensiune	E	NaNO ₃	4,3

Pentru fiecare probă au fost măsurate în timpul prelucrării, la intervale de 5 secunde, următoarele:

- poziția electrodului în gaură, h [μm];
- tensiunea de lucru, U [V];
- curentul de lucru, I [A];
- temperatura electrolitului în canalul E al portelectrodului, t_E [$^{\circ}\text{C}$];
- temperatura electrolitului în canalul I al portelectrodului, t_I [$^{\circ}\text{C}$];
- presiunea electrolitului în canalul E al portelectrodului, p_E [$^{\circ}\text{C}$];
- presiunea electrolitului în canalul I al portelectrodului, p_I [$^{\circ}\text{C}$].

Datele sunt prezentate în anexele 1-8, în formatul hexazecimal sub care sunt trimise de microcontroler, respectiv în valori fizice rezultate în urma conversiei.

Tabelul 5.2. ANOVA pentru experimentul factorial

ANOVA for Ra - experiment 2³ Reglare-Injectie-Electrolit

Effect	Sum of Sq.	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-Value
A:Reglare	3.001250	1	3.001250	29.64	.1141
B:Injectie	.361250	1	.361250	3.57	.3055
C:Electrolit	8.611250	1	8.611250	85.05	.0678
AB	.001250	1	.001250	.01	.9305
AC	.281250	1	.281250	2.78	.3389
BC	1.711250	1	1.711250	16.90	.1498
Total error	.101250	1	.101250		

Total (corr.) 14.068750 7

R-squared = 0.992803

R-squared (adj. for d.f) = 0.949622

Pentru estimarea influenței factorilor asupra variabilei dependente s-a utilizat programul STATGRAPHICS 6.1. Astfel, în tabelul 5.2 este prezentată sintetic

analiza dispersională a experimentului. Amplitudinea efectelor produse de cei trei factori de influență este reprezentată grafic în figura 5.2 prin diagrama Pareto.

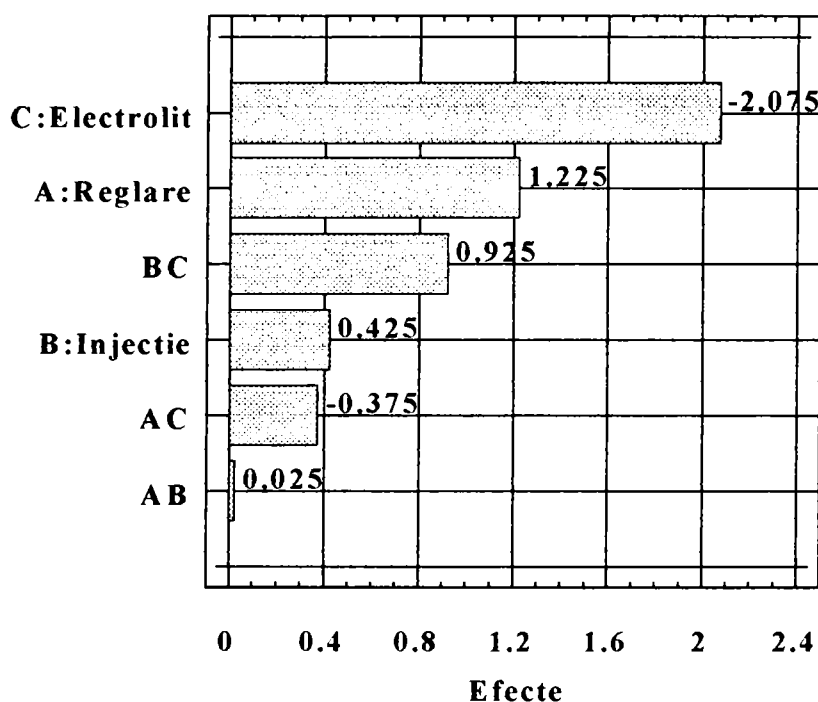


Fig. 5.2 Histograma efectelor produse de factorii de influență

Se desprind următoarele concluzii:

- electrolitul exercită cea mai mare influență asupra rugozității suprafeței prelucrate, urmat de tipul reglării;
- interacțiunea electrolit-injecție are o pondere însemnată.

Pentru evidențierea efectelor produse de factori în figura 5.3 este prezentată diagrama acestora.

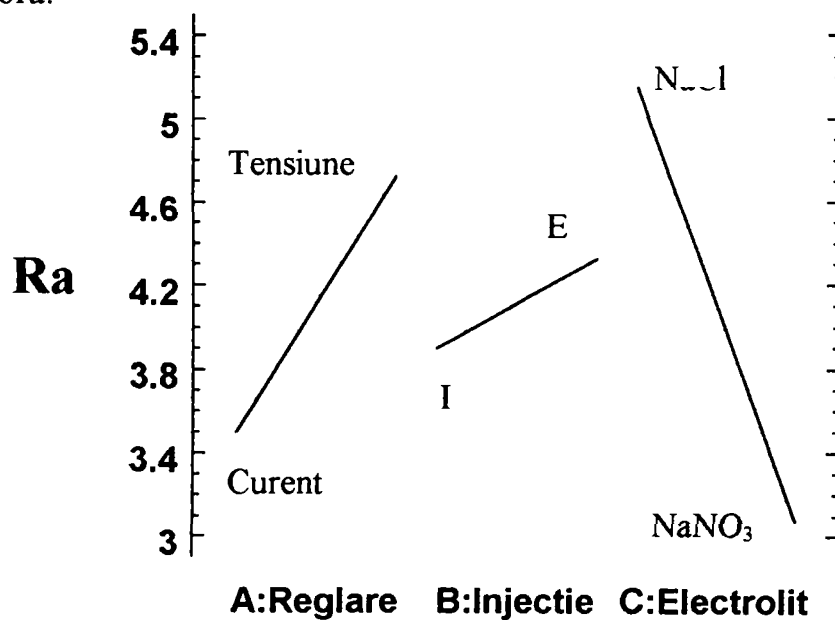


Fig. 5.3. Efectele produse de factorii de influență

Deci pentru a obține o rugozitate cât mai mică este recomandabil ca, în domeniul de lucru analizat, operația de găurire să se desfășoare în următoarele condiții:

- electrolit 10% NaNO_3 ;
- reglarea mișcării de avans după curentul de lucru;
- injecția electrolitului prin interiorul electrodului-sculă.

6. CONCLUZII

Din conținutul tezei se evidențiază următoarele concluzii și contribuții originale aduse de autor la optimizarea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrochimică:

În domeniul cercetării fundamentale:

- S-a realizat o documentare privind procedeul de prelucrare dimensională prin eroziune electrochimică, expunându-se principiile prelucrării dimensionale prin eroziune electrochimică, procesele ce au loc în interstițiul dintre electrodul-sculă și semifabricatul prelucrat, precum și un studiu privind prelucrabilitatea și calitatea suprafeței ce caracterizează acest procedeu de prelucrare;
- Se prezintă un studiu de sinteză privind procedeele de prelucrare dimensională prin eroziune electrochimică, urmat de o prezentare a stadiului actual și a perspectivelor de dezvoltare a procedeeului de prelucrare electrochimică pe plan mondial și național;
- S-a realizat un studiu privitor la tehnologia de găurire electrochimică, cu o prezentare a utilajelor specifice și a modului de stabilire a tehnologiilor de prelucrare. Este prezentată o metodă grafo-analitică de proiectare a formei electrodului-sculă;
- Sunt evidențiate direcțiile pe care se dezvoltă procesul de găurire electrochimică din punct de vedere a comenzii procesului de prelucrare.

În domeniul cercetării aplicative:

- A fost realizată o micromașină destinată studiului procesului de găurire prin eroziune electrochimică din punctul de vedere al modului de comandă a procesului de prelucrare;
- A fost conceput și realizat un sistem de avans acționat de către un motor pas cu pas;
- A fost conceput și realizat un sistem de măsurare a parametrilor de lucru ce caracterizează procesul de găurire prin eroziune electrochimică care răspunde cerințelor legate de interfațarea cu sistemul de comandă și control;
- Au fost realizate și etalonate două traductoare de presiune și două traductoare de temperatură;
- A fost conceput și realizat un sistem de comandă și control echipat cu un microcontroler 80C552 care realizează comanda întregului ciclu de prelucrare, reglarea mișcării de avans a electrodului-sculă, monitorizarea procesului de prelucrare și transmiterea datelor la un calculator PC într-un format utilizabil ulterior pentru prelucrare;
- Au fost implementați algoritmi de reglare a mișcării de avans a electrodului-sculă bazați pe teoria sistemelor fuzzy;

- Au fost concepute programe în limbaj de asamblare care asigură funcționarea sistemului de comandă și control;
- A fost realizat un experiment factorial 2^3 în scopul evidențierii influenței asupra rugozității suprafeței găurilor prelucrate a tipului de regulator, modului de injecție și a tipului de electrolit. Datele măsurate au fost prelucrate statistic cu ajutorul programului STATGRAPHICS.

O parte din rezultatele cercetărilor cuprinse în teza de doctorat au fost prezentate la o serie de sesiuni de comunicări științifice sau au fost valorificate în cadrul unor contracte de cercetare.

Prin lucrarea de față se aduce o modestă contribuție la perfecționarea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrochimică, în principal a procesului de găurire electrochimică, prin utilizarea calculatorului la comanda directă a procesului de prelucrare.

*Anexa 1.1. Date pentru prelucrarea Curent-I-NaCl
în format hexazecimal*

h	U _v	I _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	CA	77	21	14	A2	8B
00C1	CA	78	21	14	A2	8B
00ED	CA	77	21	14	A2	8B
0117	CA	77	21	14	A2	8B
013D	CA	78	21	14	A2	8A
0163	C9	78	21	14	A2	8A
0189	C9	78	21	14	A2	8A
01B4	C9	78	21	14	A2	8A
01DC	CA	78	21	14	A2	8A
0201	C9	78	21	14	A2	8A
022A	CA	78	21	14	A2	8A
024E	CA	78	21	15	A2	8A
0273	CA	78	21	15	A2	8A
029A	CA	78	21	15	A2	8A
02C4	C8	77	21	15	A2	8A
02E9	CA	78	21	15	A2	8A
030C	CA	78	21	15	A2	8A
0331	C9	77	21	15	A2	8A
0357	C9	78	21	15	A2	8A
037A	CA	78	21	15	A2	8A
03A1	CA	78	21	15	A2	8A
03C4	C9	78	21	15	A2	8A
03ED	C9	78	21	15	A2	8A
0411	C9	78	21	15	A2	8A
0438	C9	77	21	15	A2	8A
045B	C9	78	21	15	A2	8A
047C	C9	78	21	15	A2	8A
04A5	C8	78	21	15	A2	8A
04C8	C8	78	21	15	A2	8A
04EC	C8	78	21	15	A2	8A
050A	C8	77	21	15	A2	8A
0529	C9	78	21	15	A2	8A
054C	C9	78	21	15	A2	8A
0570	C9	78	21	15	A2	8A
058D	C9	78	21	15	A2	8A
05AE	C9	78	21	15	A2	8A
05D2	C9	78	21	15	A2	8A
05F1	C9	78	21	15	A2	8A
0614	C9	78	21	15	A2	8A
0636	C9	77	21	15	A2	8A
0659	C9	78	21	15	A2	8A
067E	C9	78	21	15	A2	8A
06A0	C9	77	21	15	A2	8A
06C3	C9	78	21	15	A2	8A
06E4	C9	78	21	15	A2	8A
0707	C9	78	21	15	A2	8A
0728	CA	78	21	15	A2	8A
0750	C9	78	21	15	A2	8A

Anexa 1.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0777	C9	77	21	15	A2	8A
079E	C9	77	21	15	A2	8A
07BE	CA	77	21	15	A2	8A
07E2	C9	78	21	15	A2	8A
0809	C9	78	21	16	A2	8A
0827	C9	77	21	15	A2	8A
0850	C9	77	21	16	A2	8A
086F	C9	78	21	16	A2	8A
088B	C9	78	21	16	A2	8A
08B0	CA	77	21	16	A2	8A
08CC	C9	78	21	16	A2	8A
08F6	C9	78	21	16	A2	8A
0911	C9	78	21	16	A2	8A
0930	C9	78	21	16	A2	8A
0949	C9	78	21	16	A2	8A
097A	C9	77	21	16	A2	8A
0990	C9	78	21	16	A2	8A
09B2	C9	77	21	16	A2	8A
09F9	C4	77	21	16	A2	8A
09F7	C8	78	21	16	A2	8A
0A1F	C8	78	21	16	A2	8A
0A41	C8	78	21	16	A2	8A
0A62	C7	78	21	16	A2	8A
0A81	C9	77	21	16	A2	8A
0AB7	C8	76	21	16	A2	8A
0AC7	C8	78	21	16	A2	8A

*Anexa 1.2. Date pentru prelucrarea Curent-I-NaCl
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
0	13.95	13.95	20.92	20.72	0.02	0.30
193	13.95	14.07	20.92	20.72	0.02	0.41
237	13.95	13.95	20.92	20.72	0.02	0.41
279	13.95	13.95	20.92	20.72	0.02	0.41
317	13.95	14.07	20.92	20.72	0.02	0.30
355	13.88	14.07	20.92	20.72	0.02	0.30
393	13.88	14.07	20.92	20.72	0.02	0.30
436	13.88	14.07	20.92	20.72	0.02	0.30
476	13.95	14.07	20.92	20.72	0.02	0.30
513	13.88	14.07	20.92	20.72	0.02	0.30
554	13.95	14.07	20.92	20.72	0.02	0.30
590	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
627	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
666	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
708	13.81	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
745	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
780	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
817	13.88	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
855	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
890	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
929	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
964	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1005	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1041	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1080	13.88	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
1115	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1148	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1189	13.81	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1224	13.81	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1260	13.81	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1290	13.81	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
1321	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1356	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1392	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1421	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1454	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1490	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1521	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1556	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1590	13.88	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
1625	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1662	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1696	13.88	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30

Anexa 1.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1731	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1764	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1799	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1832	13.95	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1872	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
1911	13.88	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
1950	13.88	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
1982	13.95	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
2018	13.88	14.07	21.91	20.72	0.02	0.30
2057	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2087	13.88	13.95	21.91	20.72	0.02	0.30
2128	13.88	13.95	22.88	20.72	0.02	0.30
2159	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2187	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2224	13.95	13.95	22.88	20.72	0.02	0.30
2252	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2294	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2321	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2352	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2377	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2426	13.88	13.95	22.88	20.72	0.02	0.30
2448	13.88	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2482	13.88	13.95	22.88	20.72	0.02	0.30
2553	13.54	13.95	22.88	20.72	0.02	0.30
2551	13.81	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2591	13.81	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2625	13.81	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2658	13.75	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30
2689	13.88	13.95	22.88	20.72	0.02	0.30
2743	13.81	13.84	22.88	20.72	0.02	0.30
2759	13.81	14.07	22.88	20.72	0.02	0.30

Masa prelevată: 1,41 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 2,09 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

*Anexa 2.1. Date pentru prelucrarea Tensiune-I-NaCl
în format hexazecimal*

h	U _v	I _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	C9	7C	21	16	9C	8E
003C	C9	7C	21	16	9C	8E
006C	C9	7D	21	16	9C	8D
0099	C9	7C	21	16	9B	8D
00C8	C9	7C	21	16	9D	8D
00F6	C9	7D	21	16	9D	8D
0120	C9	7D	21	16	9D	8D
0149	C9	7D	21	16	9D	8D
0172	C9	7C	21	16	9D	8D
0199	C9	7D	21	16	9D	8D
01BF	C9	7D	21	16	9D	8D
01E7	C9	7E	21	16	9C	8D
020C	C9	7C	21	16	9C	8D
0231	CA	7C	21	16	9C	8D
0253	C9	7B	21	16	9C	8D
027C	C9	7C	21	16	9C	8D
029B	C9	7B	21	16	9B	8D
02C3	C9	7C	21	16	9B	8D
02EA	CA	7B	21	17	9E	8D
0308	C9	7A	21	17	9F	8D
032D	C9	7A	21	17	A1	8D
0359	C9	7B	21	16	9E	8D
037F	CA	7B	21	17	9D	8D
039D	CA	7B	21	17	9E	8D
03CC	C9	7C	21	17	9E	8D
03E7	C9	7A	21	17	9E	8D
040C	C9	7A	21	17	9E	8D
0428	C9	79	21	17	9C	8D
0454	C9	7A	21	17	9F	8D
0479	C9	7A	21	17	9E	8D
049A	C9	79	21	17	9D	8D
04B9	C9	78	21	17	9D	8D
04DD	C9	79	20	17	9C	8D
0507	CA	79	21	17	9C	8D
052D	C9	7A	21	17	9E	8D
0552	C9	7A	20	17	9C	8D
056E	C9	7A	20	17	9D	8D
0588	C9	78	21	17	9F	8D
05A3	C9	78	20	17	9B	8D
05CC	C9	7A	20	17	A1	8D
05EF	C9	79	20	17	9F	8D
060E	C9	79	20	17	A0	8D
0634	C9	79	20	17	9E	8D
0658	C9	7B	20	17	9E	8D
066F	C9	78	21	17	9F	8D
06A7	CA	7B	20	17	9F	8D
06D5	C9	7C	20	17	9D	8D
06ED	CA	7A	20	17	9F	8D

Anexa 2.1. Continuare

h	lv	Uv	t_E	t_I	p_E	p_I
070C	CA	7A	20	18	9D	8D
0732	C9	7C	20	18	9B	8D
075D	C9	7C	20	17	9F	8D
0776	C9	7B	20	17	9F	8D
0796	C9	7A	20	17	9F	8D
07B7	C9	7A	20	18	9D	8D
07DA	C9	79	20	18	9D	8D
0800	C9	7A	20	18	9E	8D
0827	C9	7A	20	18	9E	8D
0855	C9	7B	20	18	9D	8D
087C	CA	7B	20	18	9F	8D
0890	C9	79	20	18	9F	8D
08AE	C9	79	20	18	9F	8D
08D5	C9	79	20	18	9D	8D
08F9	C9	7A	20	18	9F	8D
091C	CA	79	20	18	9F	8D
0940	C9	7A	20	18	9F	8D
0958	C9	79	20	18	9F	8D
097A	C9	7A	20	18	9F	8D
0997	C9	78	20	18	A0	8D
09C2	CA	7A	20	18	9F	8D
09D9	C9	79	20	18	9C	8D

*Anexa 2.2. Date pentru prelucrarea Tensiune-I-NaCl
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
0	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.29
60	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.29
108	13.88	14.66	21.88	20.97	0.02	0.29
153	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.29
200	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.25
246	13.88	14.66	21.88	20.97	0.02	0.25
288	13.88	14.66	21.88	20.97	0.02	0.25
329	13.88	14.66	21.88	20.97	0.02	0.25
370	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.25
409	13.88	14.66	21.88	20.97	0.02	0.25
447	13.88	14.66	21.88	20.97	0.02	0.25
487	13.88	14.77	21.88	20.97	0.02	0.29
524	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.29
561	13.95	14.54	21.88	20.97	0.02	0.29
595	13.88	14.42	21.88	20.97	0.02	0.29
636	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.29
667	13.88	14.42	21.88	20.97	0.02	0.29
707	13.88	14.54	21.88	20.97	0.02	0.29
746	13.95	14.42	22.84	20.97	0.02	0.28
776	13.88	14.31	22.84	20.97	0.02	0.40
813	13.88	14.31	22.84	20.97	0.02	0.64
857	13.88	14.42	21.88	20.97	0.02	0.28
895	13.95	14.42	22.84	20.97	0.02	0.25
925	13.95	14.42	22.84	20.97	0.02	0.28
972	13.88	14.54	22.84	20.97	0.02	0.28
999	13.88	14.31	22.84	20.97	0.02	0.28
1036	13.88	14.31	22.84	20.97	0.02	0.28
1064	13.88	14.19	22.84	20.97	0.02	0.29
1108	13.88	14.31	22.84	20.97	0.02	0.40
1145	13.88	14.31	22.84	20.97	0.02	0.28
1178	13.88	14.19	22.84	20.97	0.02	0.25
1209	13.88	14.07	22.84	20.97	0.02	0.25
1245	13.88	14.19	22.84	20.40	0.02	0.29
1287	13.95	14.19	22.84	20.97	0.02	0.29
1325	13.88	14.31	22.84	20.97	0.02	0.28
1362	13.88	14.31	22.84	20.40	0.02	0.29
1390	13.88	14.31	22.84	20.40	0.02	0.25
1416	13.88	14.07	22.84	20.97	0.02	0.40
1443	13.88	14.07	22.84	20.40	0.02	0.29
1484	13.88	14.31	22.84	20.40	0.02	0.64
1519	13.88	14.19	22.84	20.40	0.02	0.40
1550	13.88	14.19	22.84	20.40	0.02	0.52
1588	13.88	14.19	22.84	20.40	0.02	0.28

Anexa 2.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1624	13.88	14.42	21.84	20.40	0.02	0.28
1647	13.88	14.07	21.84	20.97	0.02	0.40
1703	13.95	14.42	21.84	20.40	0.02	0.40
1749	13.88	14.54	21.84	20.40	0.02	0.25
1773	13.95	14.31	21.84	20.40	0.02	0.40
1804	13.95	14.31	22.79	20.40	0.02	0.25
1842	13.88	14.54	22.79	20.40	0.02	0.29
1885	13.88	14.54	21.84	20.40	0.02	0.40
1910	13.88	14.42	21.84	20.40	0.02	0.40
1942	13.88	14.31	21.84	20.40	0.02	0.40
1975	13.88	14.31	22.79	20.40	0.02	0.25
2010	13.88	14.19	22.79	20.40	0.02	0.25
2048	13.88	14.31	22.79	20.40	0.02	0.28
2087	13.88	14.31	22.79	20.40	0.02	0.28
2133	13.88	14.42	22.79	20.40	0.02	0.25
2172	13.95	14.42	22.79	20.40	0.02	0.40
2192	13.88	14.19	22.79	20.40	0.02	0.40
2222	13.88	14.19	22.79	20.40	0.02	0.40
2261	13.88	14.19	22.79	20.40	0.02	0.25
2297	13.88	14.31	22.79	20.40	0.02	0.40
2332	13.95	14.19	22.79	20.40	0.02	0.40
2368	13.88	14.31	22.79	20.40	0.02	0.40
2392	13.88	14.19	22.79	20.40	0.02	0.40
2426	13.88	14.31	22.79	20.40	0.02	0.40
2455	13.88	14.07	22.79	20.40	0.02	0.52
2498	13.95	14.31	22.79	20.40	0.02	0.40
2521	13.88	14.19	22.79	20.40	0.02	0.29

Masa prelevată: 1,36 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 2,04 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

*Anexa 3.1. Date pentru prelucrarea Curent-E-NaCl
în format hexazecimal*

h	U _v	I _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	C6	77	24	13	A3	8A
00F2	C5	78	24	13	A3	8A
011B	C6	77	24	13	A3	8B
0142	C6	78	24	13	A3	8B
016B	C6	78	24	13	A3	8B
01A4	C7	78	24	14	A3	8B
01CE	C6	78	24	14	A3	8B
01F1	C6	78	24	14	A3	8B
021D	C6	78	24	14	A3	8B
0245	C6	78	23	14	A3	8B
0276	C5	78	24	14	A3	8B
029A	C7	78	23	14	A3	8B
02BC	C6	78	23	14	A3	8B
02DF	C7	78	23	14	A3	8B
0307	C6	78	23	14	A3	8B
0331	C7	78	23	14	A3	8B
0356	C6	78	23	14	A3	8B
0375	C5	78	23	14	A3	8B
039A	C6	78	23	14	A3	8B
03C1	C7	78	23	14	A3	8B
03E5	C6	78	23	14	A3	8B
040C	C7	77	23	14	A3	8B
042B	C6	78	23	14	A3	8B
0457	C7	78	23	14	A3	8B
0471	C7	78	23	14	A3	8B
0493	C7	78	23	15	A3	8B
04B8	C6	78	23	14	A3	8B
04D7	C6	78	23	15	A3	8C
04FC	C7	78	23	15	A3	8C
051B	C7	78	23	15	A3	8C
0542	C7	78	23	15	A3	8C
0565	C7	78	23	15	A3	8C
058A	C7	78	23	15	A3	8C
05A7	C7	77	23	15	A3	8C
05CE	C7	78	23	15	A3	8C
05EE	C7	78	23	15	A3	8C
0615	C7	78	23	15	A3	8C
063A	C6	78	22	15	A3	8C
065E	C7	78	22	15	A3	8C
067E	C6	78	22	15	A3	8C
06A3	C6	78	22	15	A3	8C
06CC	C7	78	22	15	A3	8C
06E9	C7	78	22	15	A3	8C
0711	C8	78	22	15	A3	8C
072F	C7	78	22	15	A3	8C
0758	C7	78	22	15	A3	8C
0779	C7	78	22	15	A3	8C
07A0	C7	78	22	15	A3	8C

Anexa 3.1. Continuare

h	lv	Uv	t_E	t_I	p_E	p_I
07C3	C7	78	22	15	A3	8C
07E6	C7	78	22	15	A3	8C
080B	C7	78	22	15	A3	8C
082B	C7	78	22	15	A3	8C
0856	C7	78	22	16	A3	8C
0873	C7	78	22	16	A3	8C
089A	C7	78	22	16	A3	8C
08BE	C7	78	22	16	A3	8C
08DF	C7	78	22	16	A3	8C
08FE	C7	78	22	16	A3	8C
0925	C7	77	22	16	A3	8C
094A	C7	78	22	16	A3	8C
096E	C7	78	22	16	A3	8C
0993	C6	78	22	16	A3	8C
09B2	C8	78	22	16	A3	8D
09DA	C7	78	22	16	A3	8C
09FB	C7	78	22	16	A3	8C
0A21	C7	78	22	16	A3	8C
0A3F	C7	78	22	16	A3	8C
0A61	C7	78	22	16	A3	8C
0A85	C8	77	22	16	A3	8C
0AA9	C7	78	22	16	A3	8C
0ACE	C7	78	22	16	A3	8D

*Anexa 3.2. Date pentru prelucrarea Curent-E-NaCl
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_f [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_l [MPa]
0	13.68	13.95	20.89	21.93	0.29	0.02
242	13.61	14.07	20.89	21.93	0.29	0.02
283	13.68	13.95	20.89	21.93	0.29	0.02
322	13.68	14.07	20.89	21.93	0.29	0.02
363	13.68	14.07	20.89	21.93	0.29	0.02
420	13.75	14.07	20.89	22.92	0.29	0.02
462	13.68	14.07	20.89	22.92	0.29	0.02
497	13.68	14.07	20.89	22.92	0.29	0.02
541	13.68	14.07	20.89	22.92	0.29	0.02
581	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
630	13.61	14.07	20.89	22.92	0.29	0.02
666	13.75	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
700	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
735	13.75	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
775	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
817	13.75	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
854	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
885	13.61	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
922	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
961	13.75	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
997	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
1036	13.75	13.95	20.34	22.92	0.29	0.02
1067	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
1111	13.75	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
1137	13.75	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
1171	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1208	13.68	14.07	20.34	22.92	0.29	0.02
1239	13.68	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1276	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1307	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1346	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1381	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1418	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1447	13.75	13.95	20.34	23.91	0.29	0.02
1486	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1518	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1557	13.75	14.07	20.34	23.91	0.29	0.02
1594	13.68	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1630	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1662	13.68	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1699	13.68	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1740	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1769	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02

Anexa 3.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1809	13.81	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1839	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1880	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1913	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1952	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
1987	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
2022	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
2059	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
2091	13.75	14.07	19.78	23.91	0.29	0.02
2134	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2163	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2202	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2238	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2271	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2302	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2341	13.75	13.95	19.78	24.88	0.29	0.02
2378	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2414	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2451	13.68	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2482	13.81	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2522	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2555	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2593	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2623	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2657	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2693	13.81	13.95	19.78	24.88	0.29	0.02
2729	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02
2766	13.75	14.07	19.78	24.88	0.29	0.02

Masa prelevată: 1,33 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 2,10 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

*Anexa 4.1. Date pentru prelucrarea Tensiune-E-NaCl
în format hexazecimal*

h	U _v	I _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	CA	71	1F	17	A2	8D
0045	CA	71	1F	17	A2	8D
006B	C9	71	1F	17	A2	8D
00A4	C9	75	1F	17	A1	8D
00CD	C9	75	1F	17	A1	8D
00EF	C9	75	1F	17	A1	8D
0115	CA	74	1F	17	A1	8D
0142	C9	75	1F	17	A1	8D
0164	C9	75	1F	18	A1	8D
018D	CA	75	1F	17	A1	8D
01AF	C9	75	1F	17	A1	8D
01DF	CA	76	1F	17	A1	8D
0203	C9	76	1F	17	A1	8D
0224	C9	75	1F	17	A1	8D
0247	C9	76	1F	17	A1	8D
0266	C9	75	1F	17	A1	8D
0285	CA	75	1F	17	A1	8D
02A8	C9	75	1F	17	A1	8D
02CE	C9	75	1F	17	A1	8D
02E6	C9	74	1F	17	A0	8D
030F	C9	74	1F	17	A0	8D
032E	C9	74	1F	17	A0	8D
0353	C9	74	1F	17	A0	8D
036C	C9	73	1F	17	A0	8D
0390	C9	73	1F	17	A0	8D
03B3	C9	74	1F	17	A0	8D
03DA	C9	74	1F	18	A0	8D
03FD	CA	74	1F	17	9F	8D
041A	C9	73	1F	17	9F	8D
0440	C9	74	1F	18	9F	8D
0465	C9	74	1F	18	9F	8D
0492	C9	75	1F	18	9F	8D
04B7	CA	75	1F	18	9F	8D
04D5	C9	75	1F	18	9F	8D
04DD	C9	72	1F	18	9F	8D
0503	C9	72	1E	18	9F	8D
0521	C9	72	1F	18	9F	8D
0533	C9	70	1E	18	9F	8D
054C	C9	70	1E	18	9F	8D
0586	CA	73	1E	18	9E	8D
05AA	C9	73	1E	18	A0	8D
05CA	C9	73	1E	18	A0	8D
05EB	C9	73	1E	18	A0	8D
0613	C9	74	1E	18	A0	8D
0621	C9	72	1E	18	9F	8D
0645	C9	73	1E	18	9F	8D
0669	C9	72	1E	18	9E	8D
0698	C9	73	1E	18	9D	8D

Anexa 4.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
06C7	C9	75	1E	18	9E	8D
06E4	C9	75	1E	18	9E	8D
0701	C9	74	1E	18	9E	8D
0726	C9	74	1F	18	9E	8D
0745	C9	74	1E	18	9E	8E
0771	C9	75	1E	18	9D	8E
0795	C9	76	1E	18	9D	8D
07BA	C9	77	1E	18	9D	8D
07D5	C9	75	1E	18	9D	8D
07F9	C9	75	1E	18	9D	8E
081E	C9	75	1E	18	9D	8E
0843	C9	75	1E	18	9D	8E
0862	C9	75	1E	18	9D	8E
087A	C9	74	1E	18	9D	8E
08A1	C9	75	1E	18	9C	8E
08C1	CA	74	1E	18	9D	8E
08EB	C9	75	1E	18	9D	8E
090E	C9	75	1E	18	9D	8E
0930	C9	75	1E	18	9D	8E
094A	C9	75	1E	18	9D	8E
0919	CA	6C	1E	18	9D	8E
095D	C9	6F	1E	18	9D	8E
0982	C9	70	1E	18	9D	8E
09A7	C4	6D	1E	18	9D	8D

*Anexa 4.2. Date pentru prelucrarea Tensiune-E-NaCl
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
0	13.95	13.25	20.58	21.64	0.22	0.02
69	13.95	13.25	20.58	21.64	0.22	0.02
107	13.88	13.25	20.58	21.64	0.22	0.02
164	13.88	13.72	20.58	21.64	0.22	0.02
205	13.88	13.72	20.58	21.64	0.22	0.02
239	13.88	13.72	20.58	21.64	0.22	0.02
277	13.95	13.60	20.58	21.64	0.22	0.02
322	13.88	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
356	13.88	13.72	20.58	22.59	0.30	0.02
397	13.95	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
431	13.88	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
479	13.95	13.84	20.58	21.64	0.30	0.02
515	13.88	13.84	20.58	21.64	0.30	0.02
548	13.88	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
583	13.88	13.84	20.58	21.64	0.30	0.02
614	13.88	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
645	13.95	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
680	13.88	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
718	13.88	13.72	20.58	21.64	0.30	0.02
742	13.88	13.60	20.58	21.64	0.28	0.02
783	13.88	13.60	20.58	21.64	0.22	0.02
814	13.88	13.60	20.58	21.64	0.22	0.02
851	13.88	13.60	20.58	21.64	0.22	0.02
876	13.88	13.48	20.58	21.64	0.22	0.02
912	13.88	13.48	20.58	21.64	0.22	0.02
947	13.88	13.60	20.58	21.64	0.30	0.02
986	13.88	13.60	20.58	22.59	0.30	0.02
1021	13.95	13.60	20.58	21.64	0.22	0.02
1050	13.88	13.48	20.58	21.64	0.22	0.02
1088	13.88	13.60	20.58	22.59	0.22	0.02
1125	13.88	13.60	20.58	22.59	0.22	0.02
1170	13.88	13.72	20.58	22.59	0.22	0.02
1207	13.95	13.72	20.58	22.59	0.22	0.02
1237	13.88	13.72	20.58	22.59	0.22	0.02
1245	13.88	13.37	20.58	22.59	0.22	0.02
1283	13.88	13.37	20.00	22.59	0.30	0.02
1313	13.88	13.37	20.58	22.59	0.30	0.02
1331	13.88	13.13	20.00	22.59	0.30	0.02
1356	13.88	13.13	20.00	22.59	0.30	0.02
1414	13.95	13.48	20.00	22.59	0.30	0.02
1450	13.88	13.48	20.00	22.59	0.30	0.02
1482	13.88	13.48	20.00	22.59	0.30	0.02
1515	13.88	13.48	20.00	22.59	0.30	0.02

Anexa 4.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1555	13.88	13.60	20.00	22.59	0.30	0.02
1569	13.88	13.37	20.00	22.59	0.30	0.02
1605	13.88	13.48	20.00	22.59	0.30	0.02
1641	13.88	13.37	20.00	22.59	0.30	0.02
1688	13.88	13.48	20.00	22.59	0.28	0.02
1735	13.88	13.72	20.00	22.59	0.22	0.02
1764	13.88	13.72	20.00	22.59	0.22	0.02
1793	13.88	13.60	20.00	22.59	0.22	0.02
1830	13.88	13.60	20.58	22.59	0.22	0.02
1861	13.88	13.60	20.00	22.59	0.22	0.02
1905	13.88	13.72	20.00	22.59	0.22	0.02
1941	13.88	13.84	20.00	22.59	0.22	0.02
1978	13.88	13.95	20.00	22.59	0.22	0.02
2005	13.88	13.72	20.00	22.59	0.22	0.02
2041	13.88	13.72	20.00	22.59	0.22	0.02
2078	13.88	13.72	20.00	22.59	0.22	0.02
2115	13.88	13.72	20.00	22.59	0.22	0.02
2146	13.88	13.72	20.00	22.59	0.30	0.02
2170	13.88	13.60	20.00	22.59	0.30	0.02
2209	13.88	13.72	20.00	22.59	0.30	0.02
2241	13.95	13.60	20.00	22.59	0.30	0.02
2283	13.88	13.72	20.00	22.59	0.30	0.02
2318	13.88	13.72	20.00	22.59	0.30	0.02
2352	13.88	13.72	20.00	22.59	0.30	0.02
2378	13.88	13.72	20.00	22.59	0.30	0.02
2329	13.95	12.66	20.00	22.59	0.30	0.02
2397	13.88	13.02	20.00	22.59	0.30	0.02
2434	13.88	13.13	20.00	22.59	0.30	0.02
2471	13.54	12.78	20.00	22.59	0.30	0.02

Masa prelevată: 1,35 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 2,12 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

*Anexa 5.1. Date pentru prelucrarea Curent-I-NaNO₃
în format hexazecimal*

h	U _v	I _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	C6	77	1F	12	9C	89
006A	C6	77	1F	12	9C	89
0094	C6	78	1F	12	9B	89
00B5	C6	78	1F	12	9C	89
00D9	C6	78	1F	12	9C	89
00FA	C7	78	1F	12	9B	89
011D	C6	78	1F	12	9C	89
013A	C6	77	1F	12	9C	89
015A	C6	78	1F	12	9B	89
017E	C6	78	1F	12	9C	89
019F	C7	78	1F	12	9B	89
01BD	C6	78	1F	12	9C	89
01DA	C6	77	1F	12	9C	89
01F6	C6	78	1F	12	9B	89
0213	C7	78	1F	12	9B	89
0231	C7	78	1F	12	9C	89
024D	C7	78	1F	12	9B	89
026B	C7	78	1E	12	9B	89
0288	C6	78	1E	12	9B	89
02A4	C6	78	1E	12	9B	89
02C8	C5	79	1E	12	9B	89
02E2	C6	78	1E	13	9B	89
02FB	C6	78	1E	13	9B	89
0319	C6	78	1E	13	9B	89
0332	C6	77	1E	13	9B	89
034D	C6	77	1E	13	9A	89
0366	C6	78	1E	13	9B	89
037F	C6	78	1E	13	9B	89
039B	C6	78	1E	13	9B	89
03B4	C5	78	1E	13	9A	89
03CE	C5	78	1E	13	9A	89
03E7	C5	78	1E	13	9A	89
0400	C5	78	1E	13	9A	89
0417	C6	78	1E	13	9A	89
042D	C6	78	1E	13	9C	89
0443	C6	78	1E	13	9A	89
045B	C6	77	1E	13	9B	89
0472	C6	78	1E	13	9A	89
048A	C6	78	1E	13	9C	89
04A2	C6	78	1E	13	9C	89
04BC	C6	78	1E	13	9C	89
04D7	C6	78	1E	13	9A	89
04EF	C6	78	1E	13	9D	89
050A	C5	77	1E	13	9B	89
0529	C5	77	1E	13	9D	89
0538	C6	78	1E	13	9C	89
0553	C5	78	1E	14	9B	89
056B	C5	78	1E	13	9A	89

Anexa 5.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0587	C6	78	1E	14	9E	89
059B	C6	78	1E	13	9E	89
05B2	C5	78	1E	14	9E	89
05CB	C6	78	1D	14	9D	89
05E2	C6	78	1E	14	9A	89
05FA	C5	78	1E	14	9D	89
060F	C5	78	1D	14	9D	89
0624	C6	78	1E	14	98	89
063C	C6	78	1E	14	A1	89
0652	C6	78	1D	14	9B	89
066C	C6	78	1D	14	9C	89
0683	C6	78	1D	14	9C	89
0698	C6	77	1D	14	9B	89
06B2	C6	78	1D	14	9B	89
06CB	C6	78	1D	14	9B	89
06E0	C6	78	1D	14	9C	89
06F7	C6	78	1D	14	9C	89
070F	C6	78	1D	14	9C	89
0721	C6	78	1D	14	9C	89
0738	C6	77	1D	14	9C	89
074F	C6	77	1D	14	9C	89
0766	C6	77	1D	14	9C	89
077D	C6	78	1D	14	9C	89
0794	C6	78	1D	14	9D	89
07AB	C6	78	1D	14	9D	89
07C1	C6	78	1D	14	9D	89
07D5	C5	78	1D	15	9D	89
07F0	C5	78	1D	14	9D	89
0804	C5	78	1D	14	9D	89
0819	C6	78	1D	14	9D	89
082D	C6	78	1D	14	9D	89
0841	C6	78	1D	14	9D	89
0858	C6	78	1D	15	9C	89
086E	C6	78	1D	15	9C	89
0887	C6	77	1D	15	9C	89
089E	C5	77	1D	15	9C	89
08B5	C5	78	1D	15	9C	89
08C8	C6	78	1D	15	9C	89
08DC	C6	78	1D	15	9C	89
08F2	C5	78	1D	15	9B	89
090C	C5	78	1D	15	9B	89
0922	C5	78	1D	15	9C	89
0939	C6	78	1D	15	9C	89
094D	C6	78	1D	15	9C	89
0964	C6	78	1D	15	9C	8A
097C	C5	78	1D	15	9C	89
098F	C5	78	1D	15	9C	89
09A1	C5	78	1D	15	9C	89
09B6	C5	78	1D	15	9C	8A

Anexa 5.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
09CA	C5	78	1D	15	9C	89
09E1	C5	78	1D	15	9C	89
09F5	C5	78	1D	15	9C	89
0A0D	C5	78	1D	15	9C	89
0A20	C5	78	1D	15	9C	8A
0A2E	C6	78	1D	15	9C	8A
0A49	C6	77	1D	15	9C	8A
0A5C	C6	77	1D	15	9C	89
0A73	C5	78	1D	15	9C	8A

*Anexa 5.2. Date pentru prelucrarea Curent-I-NaNO₃
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t _E [°C]	t _I [°C]	p _E [MPa]	p _I [MPa]
0	13.68	13.95	21.42	20.58	0.01	0.58
106	13.68	13.95	21.42	20.58	0.01	0.58
148	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
181	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
217	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
250	13.75	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
285	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
314	13.68	13.95	21.42	20.58	0.01	0.58
346	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
382	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
415	13.75	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
445	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
474	13.68	13.95	21.42	20.58	0.01	0.58
502	13.68	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
531	13.75	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
561	13.75	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
589	13.75	14.07	21.42	20.58	0.01	0.58
619	13.75	14.07	21.42	20.00	0.01	0.58
648	13.68	14.07	21.42	20.00	0.01	0.58
676	13.68	14.07	21.42	20.00	0.01	0.58
712	13.61	14.19	21.42	20.00	0.01	0.58
738	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
763	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
793	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
818	13.68	13.95	22.43	20.00	0.01	0.58
845	13.68	13.95	22.43	20.00	0.01	0.58
870	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
895	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
923	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
948	13.61	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
974	13.61	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
999	13.61	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1024	13.61	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1047	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1069	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1091	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1115	13.68	13.95	22.43	20.00	0.01	0.58
1138	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1162	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1186	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1212	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1239	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1263	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58

Anexa 5.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1290	13.61	13.95	22.43	20.00	0.01	0.58
1321	13.61	13.95	22.43	20.00	0.01	0.58
1336	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1363	13.61	14.07	23.42	20.00	0.01	0.58
1387	13.61	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1415	13.68	14.07	23.42	20.00	0.01	0.58
1435	13.68	14.07	22.43	20.00	0.01	0.58
1458	13.61	14.07	23.42	20.00	0.01	0.58
1483	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1506	13.68	14.07	23.42	20.00	0.01	0.58
1530	13.61	14.07	23.42	20.00	0.01	0.58
1551	13.61	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1572	13.68	14.07	23.42	20.00	0.01	0.58
1596	13.68	14.07	23.42	20.00	0.01	0.58
1618	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1644	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1667	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1688	13.68	13.95	23.42	19.41	0.01	0.58
1714	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1739	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1760	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1783	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1807	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1825	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1848	13.68	13.95	23.42	19.41	0.01	0.58
1871	13.68	13.95	23.42	19.41	0.01	0.58
1894	13.68	13.95	23.42	19.41	0.01	0.58
1917	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1940	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1963	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
1985	13.61	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
2005	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2032	13.61	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
2052	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
2073	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
2093	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
2113	13.68	14.07	23.42	19.41	0.01	0.58
2136	13.68	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2158	13.68	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2183	13.61	13.95	24.41	19.41	0.01	0.58
2206	13.61	13.95	24.41	19.41	0.01	0.58
2229	13.68	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2248	13.68	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2268	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58

Anexa 5.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
2290	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2316	13.68	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2338	13.68	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2360	13.68	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2381	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2404	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.70
2428	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2447	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2465	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2486	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.70
2506	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2529	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2549	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2573	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.58
2592	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.70
2606	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.70
2633	13.68	13.95	24.41	19.41	0.01	0.70
2652	13.68	13.95	24.41	19.41	0.01	0.58
2675	13.61	14.07	24.41	19.41	0.01	0.70

Masa prelevată: 0,89 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 0,92 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

*Anexa 6.1. Date pentru prelucrarea Tensiune-I-NaNO₃
în format hexazecimal*

h	U _V	I _V	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	C9	73	1E	15	9E	8A
0084	C9	73	1E	15	9E	8A
00CF	C9	74	1E	15	9E	8A
00F9	C9	75	1E	15	9E	8B
0112	C9	74	1E	15	9E	8A
0141	C9	73	1E	15	9E	8A
0162	C9	74	1E	15	9E	8B
018E	C9	74	1E	15	9E	8A
01A3	C9	73	1E	15	9E	8A
01C2	C9	74	1E	15	9E	8A
01EE	C9	75	1E	15	9E	8B
0214	C9	73	1E	15	9E	8A
024F	C9	74	1E	15	9E	8B
0275	C9	73	1E	15	9E	8A
0296	C9	74	1E	15	9E	8A
02AD	C9	74	1E	15	9E	8B
02C6	C9	73	1E	15	9E	8A
02DF	C9	74	1E	15	9E	8B
02E5	C9	73	1E	15	9E	8A
02F7	C9	73	1E	15	9E	8A
031F	C9	74	1E	15	9E	8B
032A	C9	73	1E	15	9E	8A
0341	C9	73	1E	15	9E	8A
0363	C9	74	1E	15	9E	8B
0384	C9	73	1E	15	9E	8A
03B6	C9	73	1E	15	9E	8A
03CF	C9	74	1E	15	9E	8B
03A4	C9	73	1E	15	9E	8A
03B6	C9	73	1E	15	9E	8A
03CF	C9	74	1E	15	9E	8B
03E9	C9	75	1E	15	9E	8B
03FB	C9	72	1E	15	9E	8B
041E	C9	74	1E	15	9E	8B
0434	C9	74	1E	15	9E	8B
044D	C9	73	1E	15	9E	8B
046A	C9	74	1E	15	9E	8A
0478	C8	72	1E	15	9E	8A
0490	C9	73	1E	15	9E	8B
04AA	C9	73	1E	15	9E	8B
04C1	C9	74	1E	15	9E	8B
04D4	C9	73	1E	15	9E	8B
04EB	C9	74	1E	15	9E	8A
04FF	C9	74	1E	15	9E	8A
0519	C9	74	1E	15	9D	8B
052D	CA	74	1E	15	9E	8B
0545	C9	74	1E	15	9D	8B
0562	CA	75	1E	15	9E	8B
0580	C9	74	1E	15	9D	8B

Anexa 6.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
059A	C9	75	1E	15	9D	8B
05A5	C9	74	1E	15	9D	8B
05BB	CA	73	1E	16	9D	8B
05D2	C8	74	1E	16	9D	8B
05EC	C9	75	1E	16	9D	8B
060C	C9	73	1E	16	9D	8B
061D	C9	73	1E	16	9D	8B
0632	C9	73	1E	16	9D	8B
0645	C8	75	1E	16	9D	8B
0658	C9	73	1E	16	9D	8B
066C	CA	73	1E	16	9D	8B
067D	C9	75	1E	16	9C	8B
0692	C9	75	1E	16	9C	8B
06A5	C9	74	1E	16	9C	8B
06BA	C9	74	1E	16	9C	8B
06CB	C9	73	1E	16	9C	8B
06DF	CA	75	1E	16	9D	8B
06F8	C9	76	1E	16	9C	8B
0707	C9	76	1E	16	9C	8B
071A	C9	75	1E	16	9C	8B
072B	C9	74	1E	16	9B	8B
073F	C9	75	1E	16	9B	8B
0750	C9	74	1E	16	9B	8B
0762	C8	74	1E	16	9B	8B
0774	C8	75	1E	16	9B	8B
0789	C9	73	1E	16	9B	8B
0799	C9	74	1E	16	98	8B
07A3	C9	72	1E	16	9C	8B
07C0	C9	74	1E	16	9C	8B
07D1	C9	73	1E	16	97	8B
07E4	C9	74	1E	16	8F	8B
07F7	C9	74	1E	16	9D	8B
0807	C9	75	1E	16	9D	8B
081B	C9	74	1E	16	9D	8B
082E	C9	74	1E	16	9C	8B
083F	C9	73	1E	16	9D	8B
0854	C9	75	1E	16	9D	8B
0864	C9	74	1E	16	9D	8B
0879	C8	74	1E	17	9D	8B
0891	C9	75	1D	16	9D	8B
08A4	C9	75	1D	16	9D	8B
08B3	C9	74	1D	17	9D	8B
08C8	C9	75	1E	16	9D	8B
08D2	C9	74	1D	17	9D	8B
08EE	C9	74	1D	17	9D	8B
08FD	C9	74	1D	17	9C	8B
0910	C9	75	1D	17	9C	8B
092A	C9	75	1D	17	9C	8B
093F	C9	77	1D	17	9C	8B

Anexa 6.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
094A	C9	74	1D	17	9C	8B
095D	CA	75	1D	17	9C	8B
0970	C9	74	1D	17	9C	8B
0985	C9	75	1D	17	9C	8B
099C	CA	77	1D	17	9C	8B
09A7	C9	75	1D	17	9C	8B
09B1	C8	74	1D	17	9C	8B
09C9	C9	74	1D	17	9B	8B
09D2	CA	73	1E	17	9C	8B
09E6	C9	74	1D	17	9B	8B
09F5	C9	72	1D	17	96	8B
0A05	C9	74	1D	17	9D	8B
0A15	CA	72	1D	17	96	8B
0A29	CA	74	1D	17	97	8B
0A35	C9	72	1D	17	9A	8B
0A41	C9	73	1D	17	98	8B
0A5C	CA	74	1D	17	A3	8B
0A6B	C9	74	1D	17	9E	8B
0A7A	C9	74	1D	17	9C	8B
0A86	CA	74	1D	17	9C	8B
0A9F	C9	76	1D	17	91	8B

*Anexa 6.2. Date pentru prelucrarea Tensiune-I-NaNO₃
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t _E [°C]	t _I [°C]	p _E [MPa]	p _I [MPa]
0	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
132	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
207	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50
249	13.88	13.72	20.91	20.00	0.01	0.61
274	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50
321	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
354	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
398	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50
419	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
450	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50
494	13.88	13.72	20.91	20.00	0.01	0.61
532	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
591	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
629	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
662	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50
685	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
710	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
735	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
741	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
759	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
799	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
810	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
833	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
867	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
900	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
950	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
975	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
932	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
950	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.50
975	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1001	13.88	13.72	20.91	20.00	0.01	0.61
1019	13.88	13.37	20.91	20.00	0.01	0.61
1054	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1076	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1101	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.61
1130	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50
1144	13.81	13.37	20.91	20.00	0.01	0.50
1168	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.61
1194	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.61
1217	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1236	13.88	13.48	20.91	20.00	0.01	0.61
1259	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50
1279	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.50

Anexa 6.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1305	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1325	13.95	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1349	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1378	13.95	13.72	20.91	20.00	0.01	0.61
1408	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1434	13.88	13.72	20.91	20.00	0.01	0.61
1445	13.88	13.60	20.91	20.00	0.01	0.61
1467	13.95	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1490	13.81	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
1516	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1548	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1565	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1586	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1605	13.81	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1624	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1644	13.95	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1661	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1682	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1701	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
1722	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
1739	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1759	13.95	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1784	13.88	13.84	21.88	20.00	0.01	0.61
1799	13.88	13.84	21.88	20.00	0.01	0.61
1818	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1835	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
1855	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1872	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
1890	13.81	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
1908	13.81	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
1929	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
1945	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
1955	13.88	13.37	21.88	20.00	0.01	0.61
1984	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
2001	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
2020	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
2039	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
2055	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
2075	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
2094	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
2111	13.88	13.48	21.88	20.00	0.01	0.61
2132	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
2148	13.88	13.60	21.88	20.00	0.01	0.61
2169	13.81	13.60	22.84	20.00	0.01	0.61

Anexa 6.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
2193	13.88	13.72	21.88	19.41	0.01	0.61
2212	13.88	13.72	21.88	19.41	0.01	0.61
2227	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2248	13.88	13.72	21.88	20.00	0.01	0.61
2258	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2286	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2301	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2320	13.88	13.72	22.84	19.41	0.01	0.61
2346	13.88	13.72	22.84	19.41	0.01	0.61
2367	13.88	13.95	22.84	19.41	0.01	0.61
2378	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2397	13.95	13.72	22.84	19.41	0.01	0.61
2416	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2437	13.88	13.72	22.84	19.41	0.01	0.61
2460	13.95	13.95	22.84	19.41	0.01	0.61
2471	13.88	13.72	22.84	19.41	0.01	0.61
2481	13.81	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2505	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2514	13.95	13.48	22.84	20.00	0.01	0.61
2534	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2549	13.88	13.37	22.84	19.41	0.01	0.61
2565	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2581	13.95	13.37	22.84	19.41	0.01	0.61
2601	13.95	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2613	13.88	13.37	22.84	19.41	0.01	0.61
2625	13.88	13.48	22.84	19.41	0.01	0.61
2652	13.95	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2667	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2682	13.88	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2694	13.95	13.60	22.84	19.41	0.01	0.61
2719	13.88	13.84	22.84	19.41	0.01	0.61

Masa prelevată: 0,95 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 0,91 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

*Anexa 7.1. Date pentru prelucrarea Curent-E-NaNO₃
în format hexazecimal*

h	U _V	I _V	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	C9	77	1E	17	A1	8D
0072	C9	77	1E	17	A0	8D
009E	C8	78	1E	18	9F	8D
00B2	C8	78	1E	18	9F	8D
00D5	C9	78	1E	18	A0	8D
00F5	C9	78	1E	17	A1	8D
0112	C9	78	1E	17	A0	8D
013E	C8	78	1E	18	9F	8D
015D	C8	78	1E	18	9F	8D
017F	C9	78	1E	18	A0	8D
01A3	C8	78	1E	18	A0	8D
01CA	C8	78	1E	18	A1	8D
01E1	C8	78	1E	18	A0	8D
021F	C9	78	1E	17	A0	8D
023D	C8	78	1E	18	9F	8D
025A	C8	78	1E	18	9F	8D
027D	C9	78	1E	18	A0	8D
0295	C8	78	1E	18	A0	8D
02BA	C8	78	1E	18	A1	8D
02CA	C8	78	1E	18	A1	8D
02E1	C8	78	1E	18	A0	8D
0301	C9	78	1E	17	A1	8D
031C	C9	78	1E	17	A0	8D
0329	C7	78	1E	18	A0	8D
033D	C8	78	1E	18	9F	8D
035A	C8	78	1E	18	9F	8D
037E	C9	78	1E	18	A0	8D
0384	C8	78	1E	18	A0	8D
03A2	C7	78	1E	18	A1	8D
03CC	C8	78	1E	18	A1	8D
03D2	C8	78	1E	18	A0	8D
040A	C9	77	1E	17	A1	8D
0420	C9	77	1E	17	A1	8D
043C	C9	78	1E	17	A1	8C
0450	C9	78	1E	17	A1	8C
0469	C9	78	1E	17	A0	8D
048C	C8	78	1E	17	A0	8D
049A	C8	78	1E	17	A0	8D
04AE	C9	78	1E	17	A0	8C
04BE	C8	78	1E	17	A0	8D
04E1	C8	77	1E	17	9F	8D
051A	C9	78	1E	17	A0	8D
052B	C7	78	1E	18	A0	8D
053E	C8	78	1E	18	9F	8D
055A	C8	78	1E	18	9F	8D
056D	C7	78	1E	18	A0	8D
057D	C9	78	1E	18	A0	8D
0584	C8	78	1E	18	A0	8D

Anexa 7.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
05A0	C7	78	1E	18	A1	8D
05CC	C8	78	1E	18	A1	8D
05E1	C8	78	1E	18	A0	8D
05F2	C8	78	1E	18	A0	8D
0627	C8	78	1E	18	A0	8D
0637	C8	78	1E	18	A0	8D
064D	C8	78	1E	18	A0	8D
065E	C8	78	1E	18	9F	8D
0672	C8	77	1E	18	A0	8D
0681	C8	78	1E	18	A1	8D
06AC	C8	78	1E	18	9F	8D
06BD	C8	78	1E	18	A1	8D
06CF	C8	78	1E	18	A1	8D
06E2	C8	77	1E	18	A1	8D
06F1	C8	78	1E	18	9F	8D
0701	C7	78	1E	18	A0	8D
0718	C8	78	1E	18	A0	8D
072A	C8	78	1E	18	A0	8D
073C	C8	78	1E	18	A0	8D
074F	C7	78	1E	18	A0	8D
075C	C8	77	1E	18	A0	8D
076D	C8	78	1E	18	A0	8D
0780	C7	78	1E	18	A0	8D
07A5	C7	78	1E	18	A0	8D
07C8	C7	78	1E	18	A0	8D
07D9	C8	77	1E	18	A0	8D
07EA	C8	78	1E	19	A0	8D
07F9	C8	78	1E	18	A0	8D
0805	C9	78	1E	19	A0	8E
0826	C9	78	1E	19	A0	8E
083C	C8	77	1E	19	A0	8E
0849	C7	78	1E	19	A0	8E
085E	C9	77	1E	19	A0	8E
0862	C9	78	1E	19	A0	8E
0873	C9	78	1E	19	A0	8E
0888	C9	78	1E	19	A0	8E
08A9	C8	78	1E	19	A0	8E
08B6	C9	78	1E	19	A0	8E
08D4	C8	78	1E	19	A0	8E
08EF	C8	78	1E	19	A0	8E
0900	C8	78	1E	19	A0	8E
0915	C7	77	1E	19	9F	8E
0931	C8	78	1E	19	9F	8E
0943	C8	78	1E	19	9F	8E
0952	C8	78	1E	19	9F	8E
0963	C7	78	1E	19	9F	8E
0971	C7	78	1E	19	9F	8E
0981	C8	78	1E	19	9F	8E
0991	C7	78	1E	19	9F	8E

Anexa 7.1. Continuare

h	I_v	U_v	t_E	t_I	p_E	p_I
09A1	C7	78	1E	19	9F	8E
09BE	C8	78	1E	19	9F	8E
09D0	C7	78	1E	19	9F	8E
09ED	C7	78	1E	19	9F	8E
09F8	C8	78	1E	19	9F	8E
0A0E	C9	78	1E	19	9F	8E
0A1D	C9	78	1E	19	9F	8E
0A2B	C9	78	1E	19	9F	8E
0A44	C7	78	1E	19	9F	8E
0A5F	C9	78	1E	19	9F	8E
0A6C	C8	78	1E	19	9F	8E
0A7A	C8	78	1E	19	9F	8E
0A8C	C8	78	1E	19	9F	8E
0A9C	C7	78	1E	1A	9F	8E
0AA5	C9	78	1E	19	9F	8E
0AB0	C9	78	1E	19	9F	8E

*Anexa 7.2. Date pentru prelucrarea Curent-E-NaNO₃
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t _E [°C]	t _I [°C]	p _E [MPa]	p _I [MPa]
0	13.88	13.95	20.00	21.14	0.50	0.01
114	13.88	13.95	20.00	21.14	0.50	0.01
158	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
178	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
213	13.88	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
245	13.88	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
274	13.88	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
318	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
349	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
383	13.88	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
419	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
458	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
481	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
543	13.88	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
573	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
602	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
637	13.88	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
661	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
698	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
714	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
737	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
769	13.88	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
796	13.88	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
809	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
829	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
858	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
894	13.88	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
900	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
930	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
972	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
978	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1034	13.88	13.95	20.00	21.14	0.50	0.01
1056	13.88	13.95	20.00	21.14	0.50	0.01
1084	13.88	14.07	20.00	21.14	0.38	0.01
1104	13.88	14.07	20.00	21.14	0.38	0.01
1129	13.88	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
1164	13.81	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
1178	13.81	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
1198	13.88	14.07	20.00	21.14	0.38	0.01
1214	13.81	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
1249	13.81	13.95	20.00	21.14	0.50	0.01
1306	13.88	14.07	20.00	21.14	0.50	0.01
1323	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01

Anexa 7.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1342	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1370	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1389	13.88	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1405	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1412	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1440	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1484	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1505	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1522	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1575	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1591	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1613	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1630	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1650	13.81	13.95	20.00	22.09	0.50	0.01
1665	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1708	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1725	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1743	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1762	13.81	13.95	20.00	22.09	0.50	0.01
1777	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1793	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1816	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1834	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1852	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1871	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1884	13.81	13.95	20.00	22.09	0.50	0.01
1901	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1920	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1957	13.75	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
1992	13.81	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
2009	13.81	13.95	20.00	22.09	0.50	0.01
2026	13.81	14.07	20.00	23.02	0.50	0.01
2041	13.88	14.07	20.00	22.09	0.50	0.01
2053	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2086	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2108	13.75	13.95	20.00	23.02	0.61	0.01
2121	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2142	13.88	13.95	20.00	23.02	0.61	0.01
2146	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2163	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2184	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2217	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2230	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2260	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01

Anexa 7.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t _F [°C]	t _I [°C]	p _E [MPa]	p _I [MPa]
2287	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2304	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2325	13.81	13.95	20.00	23.02	0.61	0.01
2353	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2371	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2386	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2403	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2417	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2433	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2449	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2465	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2494	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2512	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2541	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2552	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2574	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2589	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2603	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2628	13.75	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2655	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2668	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2682	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2700	13.81	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2716	13.75	14.07	20.00	23.94	0.61	0.01
2725	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01
2741	13.88	14.07	20.00	23.02	0.61	0.01

Masa prelevată: 0,95 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 0,92 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

*Anexa 8.1. Date pentru prelucrarea Tensiune-E-NaNO₃
în format hexazecimal*

h	U _v	I _v	t _E	t _I	p _E	p _I
0000	C9	7F	1F	19	9F	8E
00C9	CA	80	1F	19	9F	8E
00F2	CA	7F	1F	19	9F	8E
012F	C9	80	1F	19	9F	8E
0153	C9	7F	1F	19	9F	8E
0182	CA	81	1F	19	9F	8E
01A5	CA	80	1F	19	9F	8E
01CD	C9	80	1F	19	9F	8E
01E6	C9	7F	1F	19	9F	8E
0207	CA	81	1F	19	9F	8E
021F	CA	80	1F	19	9F	8E
0231	C9	80	1F	19	9E	8E
0254	C9	81	1F	19	A1	8E
0266	C9	80	1F	19	A0	8E
0279	C9	7F	1F	19	9F	8E
028F	C9	7F	1F	19	9F	8E
02AA	C9	80	1F	19	A2	8E
02C2	C9	80	1F	1A	9F	8E
02EC	C9	80	1F	1A	9D	8E
0307	CA	80	1F	1A	9A	8E
031F	C9	80	1F	1A	A0	8E
0333	C9	7F	1F	1A	A0	8E
035D	C9	80	1F	1A	9F	8E
0377	C9	80	1F	1A	A0	8F
038D	C9	80	1F	1A	9F	8E
03A5	C9	81	1F	1A	9F	8E
03BE	C9	81	1F	1A	9F	8E
03CF	C9	81	1F	1A	9F	8F
03E3	C9	81	1F	1A	9F	8F
040E	C9	81	1F	1A	9F	8F
0422	CA	80	1F	1A	9F	8F
0434	CA	80	1F	1A	9F	8F
0447	C9	7F	1F	1A	9E	8F
0459	C9	80	1F	1A	9D	8F
046E	C9	80	1F	1A	9F	8F
0486	CA	80	1F	1A	9F	8F
0497	C9	7F	1F	1A	9F	8F
04AF	C9	80	1F	1A	9F	8F
04BF	C9	7F	1F	1A	A0	8F
04DC	C9	80	1F	1A	A0	8F
04EC	C9	7F	1F	1A	A0	8F
0501	C9	7F	1F	1A	9F	8F
0516	C9	7F	1F	1A	9D	8F
0531	C9	80	1F	1A	A0	8F
0542	C9	80	1F	1A	A0	8F
0550	C9	7F	1F	1A	A0	8F
0568	C9	80	1F	1A	A0	8F
057B	C9	7F	1F	1A	9F	8F

Anexa 8.1. Continuare

h	I _v	U _v	t _E	t _I	p _E	p _I
058B	C9	7F	1F	1A	A0	8F
059F	C9	80	1F	1A	A0	8F
05AF	C9	7F	1F	1A	9F	8F
05C6	C9	7F	1F	1A	9F	8F
05D7	C9	7F	1F	1A	9F	8F
05FE	C9	7F	1F	1B	A0	8F
0616	C9	80	1F	1A	A1	8F
062C	CA	80	1F	1B	A1	8F
0640	C9	80	1F	1A	A1	8F
0660	C9	81	1F	1B	A1	8F
0673	C9	80	1F	1A	A1	8F
0694	C9	7F	1F	1A	A1	8F
06A5	C9	7F	1F	1A	A0	8F
06B9	CA	80	1F	1B	A0	8F
06CC	C9	7F	1F	1B	A0	8F
06DC	C9	7F	1F	1B	A0	8F
06EE	C9	7E	1F	1B	A0	8F
071F	C9	7F	1F	1B	A0	8F
0735	C9	80	1F	1B	9F	8F
0746	C9	7F	1F	1B	9F	8F
075A	C9	80	1F	1B	A0	8F
0777	C9	81	1F	1B	9F	8F
0752	C9	79	1F	1B	A0	8F
0727	C9	71	1F	1B	A2	90
0731	C9	70	1F	1B	9E	8F
0735	C9	71	1F	1B	9F	90
0743	C9	70	1F	1B	9F	90
0762	C9	72	1F	1B	9F	90
0772	C9	71	1F	1A	A6	90
0796	C9	72	1F	1B	9E	90
07A2	C9	72	1F	1B	A0	90
07BA	C9	71	1F	1B	9F	90
07C9	C9	70	1F	1B	A3	90
07D1	C9	70	1F	1B	A2	90
07E7	C9	70	1F	1B	A2	90
07F1	CA	70	1F	1B	9F	90
0806	CA	70	1F	1B	9F	90
081F	C9	6F	1F	1B	A0	90

*Anexa 8.2. Date pentru prelucrarea Tensiune-E- NaNO_3
în valori fizice*

h [μm]	U [V]	I [A]	t _E [°C]	t _I [°C]	p _E [MPa]	p _I [MPa]
0	13.88	14.89	20.58	21.72	0.50	0.01
201	13.95	15.01	20.58	21.72	0.50	0.01
242	13.95	14.89	20.58	21.72	0.50	0.01
303	13.88	15.01	20.58	21.72	0.50	0.01
339	13.88	14.89	20.58	21.72	0.50	0.01
386	13.95	15.13	20.58	21.72	0.50	0.01
421	13.95	15.01	20.58	21.72	0.50	0.01
461	13.88	15.01	20.58	21.72	0.50	0.01
486	13.88	14.89	20.58	21.72	0.50	0.01
519	13.95	15.13	20.58	21.72	0.50	0.01
543	13.95	15.01	20.58	21.72	0.50	0.01
561	13.88	15.01	20.58	21.72	0.50	0.01
596	13.88	15.13	20.58	21.72	0.74	0.01
614	13.88	15.01	20.58	21.72	0.62	0.01
633	13.88	14.89	20.58	21.72	0.50	0.01
655	13.88	14.89	20.58	21.72	0.50	0.01
682	13.88	15.01	20.58	21.72	0.87	0.01
706	13.88	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
748	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
775	13.95	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
799	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
819	13.88	14.89	20.58	22.64	0.62	0.01
861	13.88	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
887	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
909	13.88	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
933	13.88	15.13	20.58	22.64	0.50	0.01
958	13.88	15.13	20.58	22.64	0.50	0.01
975	13.88	15.13	20.58	22.64	0.50	0.01
995	13.88	15.13	20.58	22.64	0.50	0.01
1038	13.88	15.13	20.58	22.64	0.50	0.01
1058	13.95	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
1076	13.95	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
1095	13.88	14.89	20.58	22.64	0.62	0.01
1113	13.88	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
1134	13.88	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
1158	13.95	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
1175	13.88	14.89	20.58	22.64	0.50	0.01
1199	13.88	15.01	20.58	22.64	0.50	0.01
1215	13.88	14.89	20.58	22.64	0.62	0.01
1244	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
1260	13.88	14.89	20.58	22.64	0.62	0.01
1281	13.88	14.89	20.58	22.64	0.50	0.01
1302	13.88	14.89	20.58	22.64	0.50	0.01

Anexa 8.2. Continuare

h [μm]	U [V]	I [A]	t_E [$^{\circ}\text{C}$]	t_I [$^{\circ}\text{C}$]	p_E [MPa]	p_I [MPa]
1329	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
1346	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
1360	13.88	14.89	20.58	22.64	0.62	0.01
1384	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
1403	13.88	14.89	20.58	22.64	0.50	0.01
1419	13.88	14.89	20.58	22.64	0.62	0.01
1439	13.88	15.01	20.58	22.64	0.62	0.01
1455	13.88	14.89	20.58	22.64	0.50	0.01
1495	13.88	14.89	20.58	22.64	0.50	0.01
1534	13.88	14.89	20.58	23.55	0.62	0.01
1558	13.88	15.01	20.58	22.64	0.74	0.01
1580	13.95	15.01	20.58	23.55	0.74	0.01
1600	13.88	15.01	20.58	22.64	0.74	0.01
1632	13.88	15.13	20.58	23.55	0.74	0.01
1651	13.88	15.01	20.58	22.64	0.74	0.01
1684	13.88	14.89	20.58	22.64	0.74	0.01
1701	13.88	14.89	20.58	22.64	0.62	0.01
1721	13.95	15.01	20.58	23.55	0.62	0.01
1740	13.88	14.89	20.58	23.55	0.62	0.01
1756	13.88	14.89	20.58	23.55	0.62	0.01
1774	13.88	14.77	20.58	23.55	0.62	0.01
1823	13.88	14.89	20.58	23.55	0.62	0.01
1845	13.88	15.01	20.58	23.55	0.50	0.01
1862	13.88	14.89	20.58	23.55	0.50	0.01
1882	13.88	15.01	20.58	23.55	0.62	0.01
1911	13.88	15.13	20.58	23.55	0.50	0.01
1874	13.88	14.19	20.58	23.55	0.62	0.01
1831	13.88	13.25	20.58	23.55	0.62	0.01
1841	13.88	13.13	20.58	23.55	0.50	0.01
1845	13.88	13.25	20.58	23.55	0.50	0.01
1859	13.88	13.13	20.58	23.55	0.50	0.01
1890	13.88	13.37	20.58	23.55	0.50	0.01
1906	13.88	13.25	20.58	22.64	0.62	0.01
1942	13.88	13.37	20.58	23.55	0.50	0.01
1954	13.88	13.37	20.58	23.55	0.62	0.01
1978	13.88	13.25	20.58	23.55	0.50	0.01
1993	13.88	13.13	20.58	23.55	0.62	0.01
2001	13.88	13.13	20.58	23.55	0.62	0.01
2023	13.88	13.13	20.58	23.55	0.62	0.01
2033	13.95	13.13	20.58	23.55	0.50	0.01
2054	13.95	13.13	20.58	23.55	0.50	0.01
2079	13.88	13.02	20.58	23.55	0.62	0.01

Masa prelevată: 0,75 g

Echivalent electrochimic volumic efectiv: $k_v = 0,92 \text{ mm}^3/(\text{A min})$

BIBLIOGRAFIE

1. Altrock, C.von: *Fuzzy Logic*. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1993.
2. Baron, T., ș.a.: *Calitate și fiabilitate*. Editura Tehnică, București, 1988.
3. Borangiu, T., ș.a.: *Structuri moderne de conducere automată a mașinilor-unelte*. Editura Tehnică, București, 1982.
4. Borangiu, T., ș.a.: *Conducerea multiprocesor în timp real a structurilor flexibile de fabricație*. Editura Tehnică, București, 1989.
5. Box, G.E.P., Draper, N.R.: *Operarea evolutivă*. Editura Tehnică, București, 1975.
6. Cheșa, I., ș.a.: *Mărci și produse din oțel*. Editura Tehnică, București, 1989.
7. Ciugudean, M., ș.a.: *Circuite integrate liniare*. Editura Facla, Timișoara, 1986.
8. Ciugudean, M.: *Proiectarea unor circuite electronice*. Editura Facla, Timișoara, 1983.
9. Ciugudean, M., ș.a.: *Electronică aplicată cu circuite integrate analogice - Dimensionare*. Editura de Vest, Timișoara, 1991.
10. Conrad, H., Krampitz, R.: *Elektrotechnologie*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1983.
11. Constantinescu, I., ș.a.: *Prelucrarea datelor experimentale cu calculatoare numerice*. Editura Tehnică, București, 1980.
12. Crețu, M., Turc, C.: *Cercetări privind intensificarea cu ajutorul ultrasunetelor a procesului de eroziune electrochimică*. Al VII-lea Simpozion TEHNOMUS, Suceava, 1991.
13. Cristea, V., ș.a.: *Dicționar de informatică*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1981.
14. Cristea, V., ș.a.: *Turbo PASCAL*. Editura Teora, București, 1992.
15. Datta, M., Landolt, D.: *On the influence of electrolyte concentration, pH and temperature on surface brightening of Nickel under ECM conditions*. Journal of Applied Electrochemistry 7 (1977), p. 247/52.
16. Davidoviciu, A., Bărbat, B.: *Limbaje de programare pentru sisteme în timp real*. Editura Tehnică, București, 1986.
17. DeBarr, A.E., Oliver, D.A.: *Electrochemical Machining*. Elsevier, New York, 1968.
18. Deutsch, I.: *Rezistența materialelor*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
19. Deutsch, I., ș.a.: *Probleme de rezistența materialelor*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
20. Dorn, W.S., McCracken, D.D.: *Metode numerice cu programe în FORTRAN IV*. Editura Tehnică, București, 1976.
21. Drăghici, I., ș.a.: *Îndrumar de proiectare în construcția de mașini - vol I*. Editura Tehnică, București, 1981.
22. Drăghici, I., ș.a.: *Îndrumar de proiectare în construcția de mașini - vol II*. Editura Tehnică, București, 1982.
23. Drăghici, I., ș.a.: *Organe de mașini - probleme*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980.

24. Drăgulănescu, N.: *Agenda radioelectronistului*. Editura Tehnică, București, 1989.
25. Falniță, E.: "Studiul prelucrării prin eroziune electrochimică cu depasivare abrazivă a suprafețelor de revoluție din aliaje extradure". Teză de doctorat, Timișoara, 1980.
26. Florea, S., ș.a.: *Electronică industrială și automatizări*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
27. Gavrițaș, I., Marinescu, N.I.: *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini*. Editura Tehnică, București, 1991.
28. Gavrițaș, I., ș.a.: *Prelucrarea prin electroeroziune și electrochimic-abrazivă. Vol. I, II*. Editura Tehnică, București, 1984.
29. Gavrițaș, I., ș.a.: *Prelucrări electrice în construcția de mașini*. Editura Tehnică, București, 1968.
30. Ghinea, M., Fireșteanu, V.: *MATLAB-Calcul numeric-Grafică-Aplicații*. Editura Teora, București, 1997.
31. Haasis, G.: *Handbuch der Fertigungstechnik; Band 3/2:Spanen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1980.
32. Hătărăscu, O., ș.a.: *Îndreptar de metalurgie*. Editura Tehnică, București, 1988.
33. Heler, A.: *Electrotehnică și mașini electrice - vol I*. Litografia IPTVT, Timișoara, 1981.
34. Heler, A.: *Electrotehnică și mașini electrice - vol II*. Litografia IPTVT, Timișoara, 1982.
35. Hoar, T.P.: *The Production and Breakdown of the Passivity of Metals*. Corrosion Science 7 (1967), p. 341/355.
36. Hoar, J.P., LaBoda, M.A., McMillan, M.L., Wallace, A.J.: *Differences between NaCl and NaClO₃ as Electrolytes in Electrochemical Machining*. J. Electrochem. Soc. 116 (1969) 2, p. 199.
37. Hofstede, A.: *Noi rezultate în domeniul strunjirii electrochimice*. Prelucrarea metalelor prin tehnologii neconvenționale nr. 4, 1975.
38. Ivan, M.: *Contribuții la studiul teoretic și experimental al prelucrării electrochimice și al mașinilor-unelte cu avans autoreglabil*. Teză de doctorat, Brașov, 1970.
39. König, W.: *Fertigungsverfahren; Band 3: Abtragen*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
40. König, W.: *Handbuch der Fertigungstechnik; Band 4/1: Abtragen, Beschichten*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1987.
41. König, W., Neubauer, J.: *Mechanismen der Oberflächenausbildung beim elektrochemischen Senken*. Industrie-Anzeiger 104 (1982) 78, p. 42/45.
42. Kuo, B.C., ș.a.: *Sisteme de comandă și reglare incrementală a poziției*. Editura Tehnică, București, 1981.
43. Landült, D.: *Power management during high rate nickel dissolution under active and transpassive conditions*. Journal of Applied Electrochemistry. Vol. 119, no.6, 1972.
44. Livovschi, L., ș.a.: *Bazele informaticii*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.

45. Mao, K.W., Haare, J.P.: *The anodic dissolution of mild steel in solutions containing both Cl^- and NO_3^- -ions*. Corrosion Science 13 (1973), p. 709/803.
46. Mao, K.W.: *ECM-Study in a Closed-Cell-System II NaCl, $NaClO_4$ and $NaNO_3$* . J. Electrochem. Soc. 118 (1971) 11, p. 1876/1879.
47. Marinescu, N.I.: *Utilizarea prelucrării electrochimice în industria constructoare de mașini*. Editura Tehnică, București, 1981.
48. Marinescu, N.I., Gavrilaş, I., Marinescu, R.D., Petre, M.: *Tehnologii de prelucrare a sculelor din materiale dure și extradure*. Editura Tehnică, București, 1985.
49. McGeogh, J.A.: *Principles of electrochemical machining*. Chapman and Hall, London, 1974.
50. Micșa, I.: *Tehnologia construcției de mașini - Vol I*. Litografia I.P.T.V.T., Timișoara, 1980.
51. Micșa, I.: *Tehnologia construcției de mașini - Vol II*. Litografia I.P.T.V.T., Timișoara, 1984.
52. Millea, A.: *Cartea metrologului*. Editura Tehnică, București, 1985.
53. Mincă, M.: *Contribuții la studiul interstițiului sculă-piesă la prelucrarea electrochimică cu depasivare hidrodinamică*. Teză de doctorat, Timișoara, 1974.
54. Miron, C.: *Introducere în circuite electronice*. Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1983.
55. Montgomery, D. C.: *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, New York, 1991.
56. Moraru, F., Atodiroaei, M.: *Programarea microcalculatoarelor în sistemul de operare CP/M*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1989.
57. Nanu, A.: *Tehnologia materialelor*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
58. Nanu, A., Popovici, V.: *Manualul inginerului mecanic. Tehnologia construcțiilor de mașini. Prelucrarea prin eroziune electrochimică.*, p.667/722.
59. Nenițescu, C.: *Chimie generală*. Editura Tehnică, București, 1972.
60. Nica, M.: *Contribuții la studiul teoretic și experimental al prelucrării oțelurilor slab aliate prin procedeul electrochimic în regim hidrodinamic*. Teză de doctorat, Timișoara, 1978.
61. Nica, M., ș.a.: *Bazele cercetării experimentale*. Litografia U.P.T., Timișoara, 1996.
62. Nica, M., Turc, C.: *Studiul influenței principalilor factori asupra procesului de eroziune electrochimică*. Al VII-lea Simpozion TEHNOMUS, Suceava 1991.
63. Nica, M., Turc, C.: *Influența temperaturii electrolitului la eroziunea electrochimică naturală*. A VI-a Conferință CNTN, Timișoara, 1993.
64. Nichici, A., Nica, M. ș.a.: *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*. Editura Facla, Timișoara, 1983.
65. Nicolau, E., ș.a.: *Manualul inginerului electronist. Măsurări electronice*. Editura Tehnică, București, 1979.
66. Oniciu, L., Constantinescu, E.: *Electrochimie și coroziune*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.

67. Oprean, A.: *Hidraulica mașinilor-unelte*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977.
68. Opreșor, M.S.: *Tehnologii electrice speciale*. Litografia I.P. Iași, 1981.
69. Pauling, L.: *Chimie generală*. Editura Științifică, București, 1972.
70. Platon, V.: *Sisteme avansate de producție*. Editura Tehnică, București, 1990.
71. Pletcher, D., Walsh, F.C.: *Industrial Electrochemistry*. Chapman and Hall, London, New York, 1990.
72. Popescu, C.: *Materiale electrotehnice, proprietăți și utilizări*. Editura Tehnică, București, 1976.
73. Popescu, N.: *Studiul aplicării procesului de hounire electrochimică la prelucrarea de netezire a suprafețelor cilindrice interioare*. Teză de doctorat, Timișoara, 1976.
74. Rădoi, I., ș.a.: *Electrochimie*. Editura Facla, Timișoara, 1974.
75. Rădoi, I.: *Introducere în coroziunea și protecția metalelor și aliajelor*. Editura Facla, Timișoara, 1982.
76. Rădulescu, Gh. ș.a.: *Îndrumar de proiectare în construcția de mașini - vol III*. Editura Tehnică, București, 1986.
77. Râpeanu, R., ș.a.: *Circuite integrate analogice*. Editura Tehnică, București, 1983.
78. Ristea, I., Popescu, C.A.,: *Stabilizatoare de tensiune*. Editura Tehnică, București, 1983.
79. Sabin, I., Munteanu, R.: *Introducere practică în electronică*. Editura Facla, 1988.
80. Savii, Gh., Nica, M.: *Mașină de putere medie pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrochimică*. Sesiune de comunicări științifice, IPTVT, Timișoara, 1977.
81. Savii, Gh., Nica, M.: *Cercetări privind prelucrarea prin eroziune electrochimică hidrodinamică a oțelului 41MC11*. Sesiune de comunicări științifice, IPTVT, Timișoara, 1977.
82. Sălăgean, T., ș.a.: *Aplicațiile statisticii în domeniul construcțiilor de mașini*. OIDICM, București, 1987.
83. Slătineanu, L.: *Tehnologii neconvenționale*. Litografia I.P. Iași, 1983.
84. Sora, C.: *Bazele electrotehnicii*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
85. Theocaris, P.S., ș.a.: *Analiza experimentală a tensiunilor - vol I*. Editura Tehnică, București, 1976.
86. Theocaris, P.S., ș.a.: *Analiza experimentală a tensiunilor - vol II*. Editura Tehnică, București, 1977.
87. Toacșe, Gh.: *Introducere în microprocesoare*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986.
88. Traeger, D.H.: *Einführung in die Fuzzy-Logik*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1993.
89. Turc, C., Nica, M.: *Sistem de avans folosit la prelucrarea prin eroziune electrochimică*. A VII-a Conferință internațională TEHNOMAN, Timișoara, 1995.
90. Turc, C., Nica, M.: *Micromașină pentru prelucrări electrochimice*. Conferința internațională de comunicări științifice TMCM, Iași, 1996.

91. Turc, C.: *Sistem de comandă asistată a procesului de prelucrare electrochimică*. Conferința internațională de comunicări științifice TMCM, Iași, 1996.
92. Turc, C.: *Aționarea electrică a sistemului de avans la micromașini pentru operații de găurire electrochimică*. A VIII-a Conferință internațională TEHNOMAN, Timișoara, 1998.
93. Turc, C.: *Sisteme de măsurare a parametrilor tehnologici ai procesului de găurire electrochimică*. A VIII-a Conferință internațională TEHNOMAN, Timișoara, 1998.
94. Vardeman, S.B.: *Statistics for engineering problem solving*. PWS Publishing Company, Boston, 1994.
95. Vasii Roșculeț, S., ș.a.: *Proiectarea dispozitivelor*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
96. Văleanu, I., Hîncu, M.: *Elemente de statistică generală*. Editura Litera, București, 1990.
97. Voloșencu, C.: *Reglare fuzzy și neuronală*. Editura Eurobit, Timișoara, 1997.
98. Wilson, J.F.: *Practice and Theory of Electrochemical Machining*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1971.
99. *** *80C51-based 8-bit Microcontrollers Data Handbook*. Philips Semiconductors, 1992.
100. *** *Software development under control*. Tasking BV, Amersfoort, 1991.
101. *** *Burr-Brown Integrated Circuits Data Book. Data Conversion Products*. Burr-Brown Corporation, Tucson, 1995.
102. *** *Burr-Brown Integrated Circuits Data Book. Linear Products*. Burr-Brown Corporation, Tucson, 1995.
103. *** *Electrochemical Machine*. Prospect Hitachi.
104. *** *Electrochemical Machines*. Prospect Mitsubishi.
105. *** *Gegenüberstellung der funkenerosiven und elektrochemischen Metallbearbeitung*. Prospect BOSCH.
106. *** *Introduction of Hitachi ECM*. Prospect Hitachi.
107. *** *Maschinen und Anlagen für die elektrochemischen Metallbearbeitung*. Prospect BOSCH.
108. *** *Maschinen für die elektrochemischen Metallbearbeitung*. Prospect Nassovia.
109. *** *Organe de mașini. Colecție STAS*.
110. *** *Sistemul internațional de unități (SI)*. Editura Academiei RSR, București, 1989.