

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC " TRAIAN VUIA " TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA

Ing. AUREL MARCUSANU

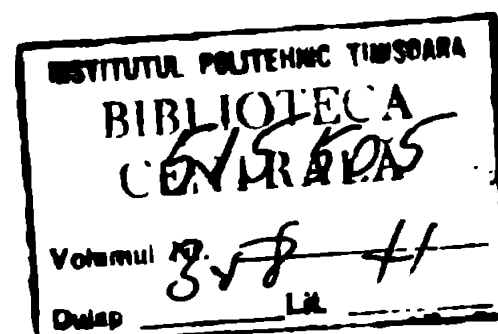
SISTEM DE AVANS AUTOMAT CU MOTOR PAS CU PAS LA
MASINILE DE PRELUCRAT PRIN EROZIUNE ELECTRICA

TEZA DE DOCTORAT

CONDUCATOR STIINTIFIC
Prof.dr.doc.ing. AUREL MANU

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

T I M I S O A R A
1 9 8 6



C O N T I N U T

1.	INTRODUCERE	5
2.	CONSIDERAȚII ASUPRA PROCESELOR ELEMENTARE CE POȚ AVEA LOC ÎN TIMPUL PRELUCRĂRII.....	11
2.1.	Procese elementare pasive (N_G).....	12
2.2.	Procese elementare de lucru (N_L).....	12
2.3.	Procese elementare fictive (N_F).....	15
2.4.	Procese elementare de scurtcircuit (N_S).....	16
2.5.	Concluzii	16
3.	MĂRIMI SPECIFICE DIN PROCES	18
3.1.	Mărimi specifice implicate în proces	18
3.2.	Mărimi specifice de comandă a procesului.....	21
3.2.1.	Mărimi electrice analogice.....	21
3.2.2.	Mărimi electrice discrete.....	24
3.2.3.	Mărimi electrice hibride.....	25
4.	ANALIZA SISTEMELOR AUTOMATE DE REGLARE A AVANSULUI LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU COPIEREA FORMEI ELECTRODULUI.....	28
4.1.	Clasificarea sistemelor de reglare auto- mată a avansului.....	28
4.2.	performanțele de bază ale sistemelor de reglare automată a avansului.....	30
4.2.1.	Viteza de deplasare a obiectului de transfer.....	30
4.2.2.	Precizia de reglare a interstițiului eroziv.....	31
4.2.3.	Rapiditatea de răspuns.....	31
4.2.4.	Precizia de ghidare a binolei portelectrod.....	31
4.2.5.	Alegera elementului de execuție.....	32

4.2.6.	Stabilitatea sistemelor de reglare auto-	
	mată a avansului.....	32
4.3.	Particularități constructiv-funcționale ale	
	sistemelor stabilizatoare.....	33
4.3.1.	SRA electromecanic cu element de execuție	
	solenoidal.....	33
4.3.2.	SRA electromecanic cu element de execuție	
	motor de curent continuu.....	36
4.3.3.	SRA electromecanic cu element de execuție	
	motor electric liniar pas cu pas.....	36
4.3.4.	SRA electromecanic cu element de execuție	
	motor electric rotativ pas cu pas.....	40
4.3.5.	SRA electrohidraulice.....	43
5.	UTILAJUL TEHNOLOGIC REALIZAT.....	47
5.1.	Subansamblurile utilajului tehnologic conce-	
	put și realizat.....	47
5.2.	SRA experimentate.....	52
5.2.1.	Sistemul SRA - I.....	52
5.2.2.	Sistemul SRA - II.....	56
5.3.	Considerații privind dispozitivul de comandă	
	a mișcării de poziționare.....	61
6.	CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE.....	65
6.1.	Verificarea rapidității de răspuns a siste-	
	mului electro-mecanic.....	65
6.2.	Funcțiile de transfer ale elementelor imple-	
	mentate în sistemele automate adonate.....	70
6.2.1.	Modelul matematic al prelucrării prin ero-	
	ziona electrică.....	71
6.2.2.	Funcția de transfer a convertorului	
	timp/frecvență.....	75
6.2.3.	Funcția de transfer a convertorului	
	tensiune/frecvență.....	77
6.2.4.	Funcția de transfer a regulatorului AO 1....	77
6.2.5.	Funcția de transfer a elementului de execu-	
	ție.....	77
6.2.6.	Funcția de transfer a reductorului.....	80
6.2.7.	Funcția de transfer a mecanismului	
	de transmisie.....	81

7. FUNCȚIILE DE TRANSFER SI STABILITATEA SRA ADOPTATE.	82
7.1. Funcția de transfer a sistemului SRA - I.....	82
7.2. Funcția de transfer a sistemului SRA - II.....	85
7.3. Studiul de stabilitate al sistemului SRA-I....	88
7.4. Studiul de stabilitate al sistemului SRA-II...	94
8. OPTIMIZAREA SISTEMULUI DE REGLARE AUTOMATA A AVANSULUI.....	102
8.1. Optimizarea experimentală a mărimilor de reglare.....	102
8.2. Cercetări asupra soluției adoptate.....	109
9. CONCLUZII.....	123
BIBLIOGRAFIE.....	129

C A P I T O L U L 1

I N T R O D U C E R E

Programul actual și de perspectivă privind dezvoltarea complexă a țării are în vedere aplicarea celor mai noi cuceriri ale revoluției tehnico - științifice, cu scopul de a asigura creșterea substanțială a productivității muncii și a calității produselor /1/. Realizarea scopului propus impune dezvoltarea prioritară a unor direcții de cercetare direct implicate în asigurarea obiectivelor propuse ca automatizarea, ciberneticizarea și robotizarea producției.

În acest context, lucrarea elaborată abordează domeniul automatizării, prezentând noi posibilități de conducere automată a avansului la prelucrarea prin eroziune electrică.

Tehnologiile neconvenționale și utilajele aferente acestor tehnologii au cunoscut și cunosc, în ultimii ani, un ritm ridicat de dezvoltare. Rolul acestor noi metode de prelucrare crește tot mai mult în sfere tehnologiilor de prelucrare a organelor de mașini și anume, acolo unde acestea completează și/sau devin concurente tehnologiilor de prelucrare prin așchiere ca urmare a creșterii preciziei de execuție și a productivității acestora.

Cercetările efectuate până în prezent au fost orientate în toate direcțiile de aplicație ale domeniului neconvențional, fiind repartizate cantitativ diferentiat funcție de importanța ierarhică a procedurii considerate.

Programul actual și viitor de dezvoltare al tehnologiilor neconvenționale prevede alocarea unor investiții importante pentru activitatea de cercetare - proiectare, iar repartiția lor globală, pe grupe de utilaje, corespunde strategi-

ei de dezvoltare prioritară a acestora și anume : 70 % eroziune electrică, 20 % eroziune electrochimică și 10 % eroziune cu fascicul de fotoni, eroziune ultrasonică și eroziune cu radiații corpusculare. Interesul prioritar, pentru domeniul de prelucrare prin eroziune electrică, este cauzat atât de posibilitățile multiple de aplicație ale procesului, cât și de evoluția istorică a realizărilor teoretico - aplicative. Evoluția în domeniu este caracterizată prin trei etape importante :

- etapa achiziționării utilajelor din import și a fundamentării teoretice a procesului de prelucrare prin eroziune electrică (1953 - 1970);

- etapa de proiectare și realizare a unor utilaje de prelucrare cu electrod masiv sau cu electrod filiform (1970 - 1985);

- etapa actuală și viitoare de perfecționare, diversificare și dispozitivare a utilajelor.

Programul viitor de cercetare are ca scop realizarea unor utilaje cu performanțe superioare, comparabile cu utilajele produse pe plan mondial, destinate atât pentru nevoile interne cât și pentru export.

Infaptuirea strategiei de dezvoltare stabilită presupune eforturi deosebite din partea tuturor factorilor care lucrează în domeniu. În această direcție se înscrie și prezenta lucrare, care prin elementele de noutate obținute își aduce un modest aport la programul complex de automatizare a procesului de prelucrare prin eroziune electrică. Cercetarea abordată este axată pe elaborarea unui sistem de reglare automată a avansului, de tip stabilizator, echipat cu un element de execuție incremental (motor electric rotativ pas cu pas).

Soluțiile de sisteme automate stabilizatoare, realizate până în prezent, au în structură elemente de execuție de tipurile : solenoidale, motoare de curent continuu și hidromotoare liniare. Dintre elementele specificate utilizarea cea mai importantă și cunoscută este hidromotorele liniare, recomandate, în special, pentru mașinile de puteri mari și mijloacii.

În ultima perioadă există o preocupare tot mai

largă referitoare la implementarea motoarelor electrice rotative pas cu pas în structurile sistemelor de reglare a avansului la mașinile de prelucrat prin eroziune electrică. Interesul actual și de perspectivă pentru aceste motoare are la bază atât caracteristicile lor deosebite de funcționare cât și posibilitățile multiple de adaptare la necesitățile impuse de proces. Printre avantajele specifice acestor elemente se pot evidenția următoarele:

- posibilități de corelare a funcționării discrete a motorului cu evoluția discretă a procesului de prelucrare prin eroziune electrică;

- posibilități largi de reglare a vitezelor prin simpla modificare a frecvenței de comandă a motorului;

- poate realiza inversări de sensuri de deplasare foarte rapide;

- memorarea poziției prin blocarea electrostatică a rotorului la ultimul impuls de comandă aplicat, elimină dispozitivele auxiliare de blocare;

- posibilități de utilizare a motorului atât în regim de element de execuție, cât și în regim de transductor de deplasare;

- necesită un lanț cinematic simplu pentru adaptarea mișcărilor cinematice de la rotor la mișcările cinematice reclamate de către proces;

- având o funcționare pur numerică poate fi integrat direct într-un sistem automat numeric;

- preț de cost redus.

Avantajele menționate au stimulat alegerea motorului pas cu pas ca element de execuție implementat în structura utilajului tehnologic realizat.

Intrucât instalația testată este destinată prelucrării atât cu generatorul de impulsuri comandate, cât și cu generatorul de relaxare RC, s-au proiectat, realizat și experimentat două sisteme de reglare automată a avansului, diferențiate prin tipul mișcării de comandă a procesului și prin structura regulatorului electronic.

Analiza procesului de prelucrare, realizarea sistemelor de reglare automată a avansului, determinarea funcțiilor de transfer ale acestor sisteme, verificarea teoretică și experimentală a stabilității funcționării și modelarea matematică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică sînt principalele probleme care alcătuiesc cadrul lucrării de doctorat.

Teza de doctorat este organizată pe 9 capitole, are o extensie de 137 pagini, cu 51 figuri, 6 tabele și cuprinde 95 referiri bibliografice dintre care 9 sînt lucrări publicate sau comunicate de autor și în colaborare.

În prima parte a lucrării (cap. 2) sînt prezentate sintetic unele considerații referitoare la principalele procese elementare dezvoltate în zona de lucru. Sînt analizate în detaliu toate tipurile de procese elementare, modul lor de evoluție în timp și efectele produse de către acestea în decursul prelucrării.

Capitolul trei evidențiază, sub formă vectorială, totalitatea mărimilor implicate în proces. Au fost prezentate principalele componente ale vectorilor de intrare / ieșire, analizîndu-se, în special, vectorul mărimilor electrice de comandă a procesului. Analize efectuate evidențiază forma mărimilor electrice de reglare, problemele specifice pe care le pun și posibilitățile de utilizare a acestor mărimi în cadrul sistemelor cercetate.

În capitolul patru se prezintă clasificarea sistemelor de reglare automată utilizate în domeniul prelucrării prin eroziune electrică, performențele de bază ale acestor sisteme și o analiză critică referitoare la majoritatea sistemelor de reglare automată a avansului, existente pe plan mondial, care fac parte din categoria sistemelor automate stabilizatoare.

Capitolul cinci se referă la conceperea și realizarea stîndului experimental. Structural, stîndul este constituit din utilajul tehnologic realizat și aparatura necesară diverselor măsurători.

O parte însemnată din material se referă la pre-

zentarea schemelor constructiv-funcționale ale utilajului tehnologic realizat și ale sistemelor componente din structura acestuia. Referirile realizate, asupra sistemelor concepute, sînt completate cu diagrame funcționale care redau fidel modul de evoluție a semnalelor în diverse puncte ale buclelor de reglare automată.

În capitolul șase s-au făcut cercetări teoretice și experimentale referitoare la verificarea rapidității de răspuns a sistemului realizat și la determinarea, sau adoptarea, funcțiilor de transfer ale elementelor componente din bucla de reglare automată.

Verificarea rapidității de răspuns s-a efectuat la funcționarea în gol a mașinii, prin aplicarea unui semnal treaptă la intrarea buclei de reglare și înregistrarea semnalelor electrice în diverse puncte ale acesteia.

Determinarea modelelor matematice asociate elementelor din bucla de reglare considerată s-a realizat prin aplicarea metodei de identificare experimentală.

Capitolul șapte se ocupă cu modul de obținere a funcțiilor de transfer ale sistemelor de reglare automată deschise asociate sistemelor automate închise cu reacție unitară și de verificarea teoretică a stabilității sistemelor. Verificarea teoretică a stabilității s-a realizat atât prin studierea pozițiilor polilor zero și ecuației caracteristice, cât și prin aplicarea criteriului grafic de stabilitate Nyquist. Din analiza efectuată sînt evidențiate atât elementele restrictive, impuse sistemelor studiate, cât și modalitățile tehnice de realizare a acestor restricții.

În capitolul opt se prezintă, în cea mai mare parte, o metodă de optimizare experimentală a mărimilor de reglare din bucla de prelucrare a semnalelor, iar în partea a doua, sînt prezentate rezultatele obținute prin cercetări experimental-teoretice pe unul dintre sistemele adoptate. În ultimul caz s-a abordat o soluție de modelare matematică a datelor experimentale obținute la prelucrarea prin eroziune electrică.

În capitolul de concluzii, sînt prezentate principalele contribuții originale aduse de autor în domeniul cerce-

tării teoretice și al cercetării experimentale.

Cu prilejul finalizării lucrării, autorul își exprimă profunde prețuire și recunoștință față de conducătorul științific, prof.dr.doc.ing. Aurel Manu, pentru modul competent ^{cu} care l-a îndrumat în toată perioada de elaborare a prezentei lucrări.

De asemenea, mulțumește conducerii catedrei de Tehnologie mecanică, tuturor colegilor din cadrul colectivului catedrei Tehnologie Mecanică și din alte colective ale Institutului Politehnic "Traian Vuia" din Timisoara, care l-au sprijinit în perioada elaborării prezentei lucrări.

CAPITOLUL 2

CONSIDERATII ASUPRA PROCESELOR ELEMENTARE CE POT AVER LOC IN TIMPUL PRELUCRĂRII

Generarea suprafețelor prin eroziune electrică, se realizează, în principel, prin intermediul acțiunilor termice discrete ale descărcărilor electrice produse în mediul de lucru LD (lichidul dielectric), între obiectul de transfer OP și obiectul prelucrării OP. Acțiunea integrală de generare se produce prin acțiuni elementare succesive ale căror durate de existență cuprind evenimentele: amorzarea descărcării electrice, evoluția ei în timpul de impuls, efectele fizico-chimice în mediul de lucru și prelevarea de material din electrozi. Fiecare eveniment, constituent al procesului elementar, se derulează într-un anumit interval de timp și într-o anumită succesiune (fig. 2.1), iar diagrame lor temporare conduce la identificarea diferitelor procese elementare caracteristice /40,45,60,61/.

Procesele elementare, în zona de lucru, se derulează cu o rapiditate foarte mare, într-un timp extrem de scurt și în condițiile acționării unui număr mare de factori cu caracter aleator, care pot afecta negativ desfășurarea procesului în timp. Funcție de starea complexă din zona de lucru, procesele elementare pot avea forme, durate de acțiune și efecte total diferite, situație ce explică necesitatea identificării acestor procese și realizarea unor strategii de conducere automată capabile să realizeze maximizarea proceselor elementare pozitive și să evite pe cele negative. Realizarea strategiei de conducere implicită cunoașterea cu încredință a tuturor caracteristicilor proceselor elementare probabile din zona de lucru și a efectelor produse de către acestea.

2.1. Procese elementare pasive (N_G)

Procesele elementare de acest tip sînt caracterizate de existența tensiunii de mers în gol a generatorului ($u=U_0$) și lipsa curentului de descărcare ($i=0$). Aceste procese nu produc efecte erozive, fiind înfrînute în timpul realizării mișcărilor de poziționare, sau în decursul prelucrării cînd interstițiul eroziv se află la limita superioară, sau depășește momentenaceastă limită, situație cînd există probabilitatea ca gradientul cîmpului electric (E) să posede o valoare inferioară valorii critice E_c .

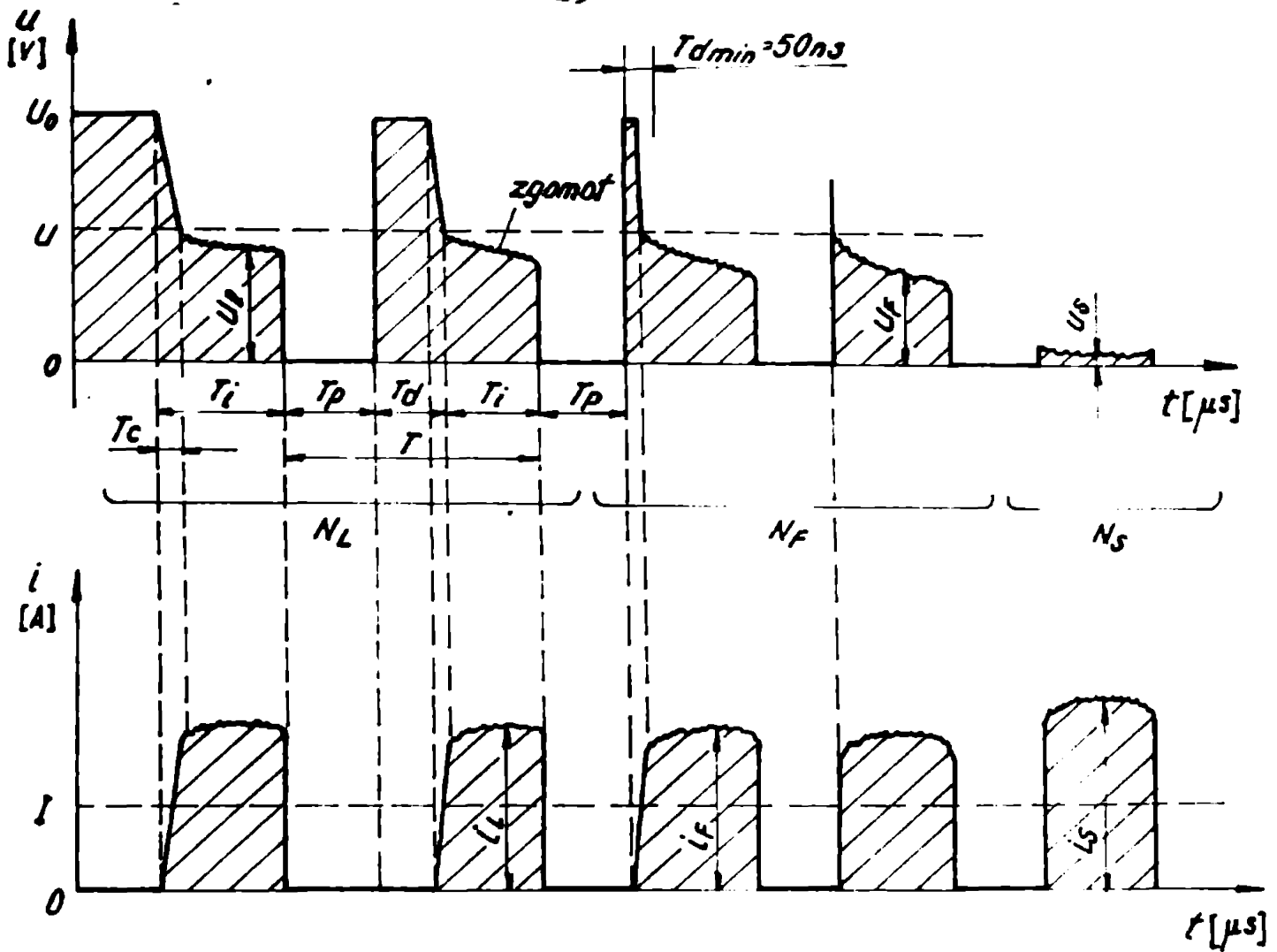
2.2. Procese elementare de lucru (N_L)

Procesele elementare de lucru sînt caracterizate de prezența a trei zone care se succed pe durata de existență a acestora:

- zona fără transformări : $u=U_0$, $T_d \neq 0$, $i=0$;
- zona cu transformări dinamice : $t=T_c$, $u_i=U_0$, $U_f=U_L$, $i_i=0$, $i_f=i_L$ (i -inițial, f -final);
- zona de stabilizare a descărcării : $t=T_1-T_c$.

Analizînd fiecare zonă în parte, se constată că în prima zonă nu se produc transformări energetice, în consecință influențează în mod indirect procesul de prelucrare, deoarece timpul de întârziere la amorsare a descărcării (T_d) este o mărime aleatoare ce poate lua orice valoare în intervalul considerat. Acest lucru conduce la creșterea exagerată a duratei de pauză (T_p) anterioară, deci crește exagerat timpul de bază de ansamblu prelucrării, iar în cazul generatorilor de tip izofrecvență, conduce la durate de impulsuri (T_i) de valori diferite, fapt ce are repercursiuni asupra mecanismului de prelevare-evacuare, asupra calității suprafeței prelucrate și asupra performențelor dispozitivului automat de reglare a avansului.

În zona a doua se produce preîncălzirea și formarea canalului de conductibilitate electrică, în poziția dinastoria



Notații :

- U_0 - tensiunea de mers în gol
- U - tensiunea medie de lucru
- U_e - tensiunea proceselor elementare de lucru
- U_f - tensiunea proceselor elementare fictive
- U_o - tensiunea proceselor elementare de scurtcircuit
- I - curentul mediu de lucru
- i_L - curentul proceselor elementare de lucru
- i_F - curentul proceselor elementare fictive
- i_S - curentul proceselor elementare de scurtcircuit
- T_i - durata de ardere a proceselor elementare de lucru
- T_p - durata pauzei
- T_d - durata de întârziere la amorsare
- T - perioada de repetiție a proceselor elementare

Fig. 2.1 Procese elementare caracteristice din zona de lucru

corespunzătoare valorii critice a intensității câmpului electric. În această zonă se produc evenimentele: luminos-formarea coloanei pozitive (efect corona la anod) și descărcarea efectivă (când coloana pozitivă atinge catodul).

Utilizarea unui mediu de lucru impur, conduce la creșterea interstițialului eroziv de cca. 10 ori comparativ cu un mediu de lucru pur. Particulele orientate de-a lungul câmpului electric formează un lanț de condensatoare legate în serie la cei doi electrozi. La un gradient critic al intensității câmpului electric se produce distrugerea în salturi a mediului dielectric dintre electrozi.

Există posibilitatea realizării unor amorași de descărcări și prin intermediul unor scurtcircuite momentane ce se pot produce în condițiile:

- vibrarea obiectului de transfer;
- particule de dimensiuni mari în zona de lucru;
- bavuri de cratere foarte înalte.

Zona a treia (zona de descărcare) este caracterizată de existența unui canal ionizat, bun conducător de electricitate, care se încălzește continuu, mărirându-și diametrul. În această fază apar stadiile ^(scintilă) ($\Delta P = 10^{-8} \dots 10^{-4}$ s, $\Delta U = 30$ V) în care energia din canal se repartizează preponderent la anod, datorită transformării în căldură a energiei electronilor frânați; scintilă-arc; arc staționar ($\Delta U \approx 30$ V), când curentul și diametrul canalului se stabilizează, iar repartizarea câmpului electric de-a lungul acestuia, se produce în mod neuniform ($U_A < U_C$).

Baza procesului de prelevare efectivă o formează efectul termic al descărcării electrice în impuls, ce conduce la transformarea chimică a mediului de lucru (piroliză) aflând în contact cu coloana descărcării și prelevarea unor volume elementare de material din electrozi, majoritar din obiectul preținerii și minoritar din obiectul de transfer.

Cantitatea de material prelevată depinde de:

- caracteristicile termofizice ale electrozilor (conductibilitate termică, temperatura și căldura specifică de topire și vaporizare);
- caracteristicile lichidului dielectric utilizat;
- parametrii electrici (polaritate, tip și amplitudine).

ne de impuls).

Impulsurile de lucru menționate pot fi de prelevare și de transport. Primele produc prelevări elementare de material din cei doi electrozi, iar ultimele se produc între obiectul de transfer și înrămădiri de particule de material prelevat, divizând aceste particule și prin aceasta se asigură condiții îmbunătățite de evacuare. Pentru desfășurarea efectivă a procesului interesează primul tip de impulsuri, însă din cauza stării complexe din interstițiu există și posibilitatea producerii celui de-al doilea tip.

În majoritatea lucrărilor de specialitate se arată că acțiunea termică a descărcării electrice, produce topirea și/sau vaporizarea unor volume elementare de material, iar evacuarea acestor volume se realizează atât sub acțiunea forței dezvoltate de fascicolul de electroni (sau ioni) /32/, cât și sub acțiunea forței de presiune a gazului din coloana descărcării. Cercetările efectuate /27/ pe descărcări singulare, cu energiile acestora cuprinse în domeniul 0,2...8 J, au stabilit că la o descărcare se produc cca.10000 de particule metalice, acestea au formă sferică și au tendința să se repartizeze după legea statistică a lui Weibul.

Particulele cu dimensiunea mai mare de 60 μm depind aproape liniar de energia descărcării ($d = k \cdot W_1$), demonstrând că, la creșterea energiei descărcării, crește numărul particulelor prelevate, mărimea acestora și distanța de expulzare a lor din crater.

2.3. Procese elementare fictive (U_p)

Procesele elementare fictive sînt caracterizate fie prin lipsa tensiunii de amorțire, fie prin existența acesteia, însă neexistența zgomotului de pe relieful tensiunii de descărcare /40/. În ambele cazuri tensiunea și curentul de descărcare au valori apropiate de cele ale impulsurilor de lucru ($U_p \approx U_2$).

Aceste procese elementare apar prin: formări de particule, realizîndu-se punți conductoare stabile între

electrozi și care, în absența undei de șoc și a circulației mediului de lucru, favorizează apariția procesului de zpurificare.

Procesele elementare analizate produc efecte erozive reduse, degajări mari de gaze, distrugerea locală a electrozilor și efectul de zpurificare.

2.4. Procese elementare de scurtcircuit (α_3)

Procesele elementare de scurtcircuit pot fi evidențiate prin parametri electrici: $U_S \approx 0$ V, $i_S > i_L$.

Aceste procese elementare apar la contactul metalic dintre electrozi (la începutul prelucrării), sau prin intermediul particulelor de dimensiuni mari din zona de lucru (în decursul prelucrării). Acestea nu produc prelevare de material și nici unde de șoc. Linse turbocanelor și a curenților de evacuare determină încălzirea intensă a zonei de contact și prin aceasta accentuându-se procesul de piroliză a mediului de lucru. Particulele solide ale pirolizei conduc la apariția fenomenului de zpurificare. Dacă procesul nu este întrerupt în timp util, se produce o deteriorare importantă a electrozilor, iar continuarea procesului putându-se asigura numai după îndepărtarea zonelor afectate.

2.5. Concluzii

Analizând tipurile de evenimente elementare probabile din proces rezultă că interesează, în punct de vedere al desfășurării stabile a procesului și al caracteristicilor tehnologice, maximizarea proceselor elementare de lucru (α_L) și eliminarea sau minimizarea proceselor elementare accidentale ($\alpha_{G, P}$) și pasive (α_G). Bilanțul total al numărului de procese elementare (n), caracterizate pe durata unei secvențe t , a ciclului de lucru, este de forma:

$$|n|_t = \max. [(n_L)_t] + \min. [(n_G)_t] + \min. [(n_P)_t] + \min. [(n_G)_t] \quad (3.1)$$

Experimental s-a constatat că utilizând instalații echipate cu structuri automate complexe (calculatoare de proces) /37,38,40/, care folosesc ca mărime de control - coeficientul de eficiență:

$$\lambda_t = [(N_L)_t / (N)_t] \cdot 100 \quad (3.2)$$

Productivitatea prelucrării crește cu creșterea acestui coeficient, atingând un maxim pentru $\lambda \approx 85 \dots 90 \%$, după care, se produce o reducere pronunțată a acestuia, cauzată de creșterea numărului de particule prelevate din zona de lucru și a înrăutățirii condițiilor de evacuare a acestora. Pe baza afirmațiilor făcute se impune ca procesele elementare neefective să respecte restricția :

$$\frac{(N_G)_t + (N_F)_t + (N_S)_t}{(N)_t} \cdot 100 \leq 10 \% \quad (3.3)$$

515 505
358 H

CAPITOLUL 3

MĂRIMI SPECIFICE DIN PROCES

3.1. Mărimi specifice implicate în proces

În cazul concret al procesului de prelucrare prin eroziune electrică, evidențierea mărimilor specifice implicate în proces prezintă o importanță majoră pentru identificarea și estimarea procesului în ansamblu.

Se consideră procesul din fig.3.1 ca un sistem multivariabil la intrare și ieșire. Multitudinea mărimilor, orientate înspre proces sau în exteriorul acestuia, a fost grupată prin acțiuni globale vectoriale a căror semnificație este: vectorul mărimilor de intrare constante (X_c), vectorul mărimilor de intrare programabile (X_p), vectorul mărimilor perturbatoare (P), vectorul mărimilor de ieșire tehnologice (Y_T) și vectorul mărimilor de ieșire, de control (Y_R).

Componentele vectorului de intrare x_c sînt: obiectul prelucrării (dimensiuni, masă, material, starea suprafețelor, configurație), obiectul de transfer (dimensiuni, masă, material, precizie dimensională, calitatea suprafeței, configurația părții active etc.), utilajul (precizia de deplasare a pinolei, precizia de poziționare, rigiditatea, caracteristicile dispozitivului de automatizare), mărimi electrice (tensiunea de mers în gol, forma impulsului de curent, forma impulsului de tensiune), mărimi hidraulice (tipul sistemului de lichid dielectric, tipul lichidului dielectric, filtrare, sistem de răcire etc.):

$$x_c = (x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{cn}) \in X_c \subset R^n \quad (3.1)$$

Componentele vectorului de intrare x_p sînt: mărimi de pregătire a generatorului (tensiunea de aprindere, forma impulsului, durata impulsului, durata pauzei, trânta de curent

etc.), măriți de reglare a dispozitivului de automatizare (tensiunea de referință, coeficientul de amplificare etc.), măriți de reglare a circulației lichidului dielectric (tipul de circulație, tipul de evacuare a produselor erodate, modalități de spălare etc.), măriți de reglare a sistemului de evacuare forțată a produselor prelevate din zona de lucru (vibrarea, rotația, deplasarea orbitală, relaxarea obiectului de transfer etc.):

$$x_D = (x_{D1}, x_{D2}, \dots, x_{Dm}) \in X_D \subset R^m \quad (3.2)$$

Vectorul de ieșire y_t are componentele: productivitatea prelucrării, uzura, calitatea suprafeței, precizia dimensională, precizia forței geometrice:

$$y_t = (y_{t1}, y_{t2}, \dots, y_{tk}) \in Y_T \subset R^k \quad (3.3)$$

Componentele vectorului de ieșire y_r sînt date de: tensiunea medie din zona de lucru, curentul mediu, măriți electrice discrete (tensiune, curent):

$$y_r = (y_{r1}, y_{r2}, \dots, y_{rl}) \in Y_R \subset R^l \quad (3.4)$$

Procesul este nerturbat de o serie de factori care se manifestă atât în sistemul elastic echivalent SSS (vibrații, surse termice, forțe inerțiale, mase variabile, oscilații ale tensiunii rețelei de alimentare, frecarea în cuplurile cinematice, jocuri în cuplurile cinematice etc.), cât și în procesul de lucru (uzura obiectului de transfer, concentrații aletoare ale particulelor erodate în zona de lucru, condiții de evacuare deficiente de adîncimea de lucru, gradul de impurificare al mediului de lucru, variații locale de temperatură, neomogenitatea materialului, variația suprafeței de lucru etc.):

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_s) \in P \subset R^s \quad (3.5)$$

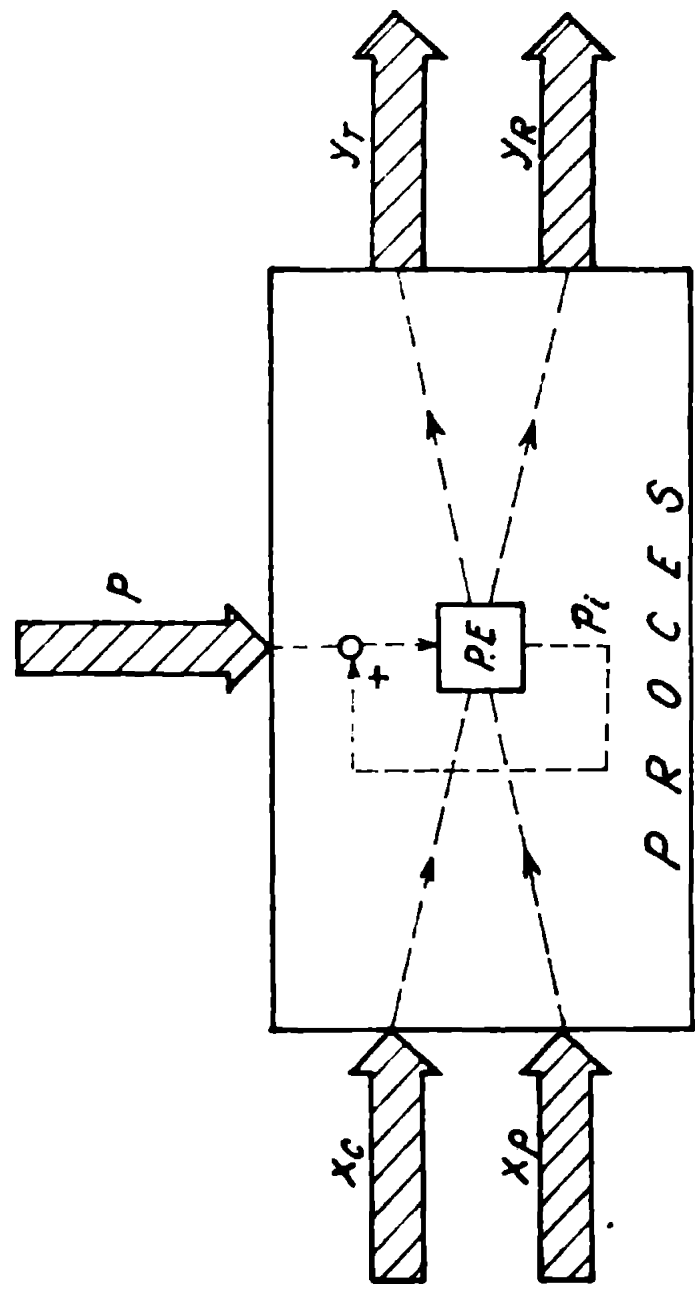


Fig. 3.1 Interdependența mărimilor specifice din proces

3.2. Mărimi specifice de comandă a procesului

Dezafectarea stabilă a procesului de prelucrare prin eroziune se realizează prin capacitatea utilajului de a menține interstițiul electric dintre electrozi la valori apropiate de mărimea optimă de lucru, pe toată durata prelucrării.

Deoarece accesul direct la măsurarea interstițiului este imposibil, se impune obținerea unor semnale electrice din proces, a căror formă, mărime și mod de variație, să prezinte suficiente informații privind evoluția în timp a interstițiului și prin aceasta să se poată acționa asupra procesului în vederea conducerii acestuia în domeniul de stabilitate maximă.

Mărimile de comandă din proces pot fi obținute și utilizate sub aspectele: mărimi electrice analogice, discrete și hibride.

3.2.1. Mărimi electrice analogice

Mărimea de comandă, identificată prin valoarea medie a tensiunii (curentului) din proces, are o răspândire largă, datorită simplității dispozitivului electric de prelucrare și adaptare a mărimii electrice din proces. Dispozitivul amintit este constituit, în general, dintr-un element divizor urmat de o celulă de integrare (celulă tip RC), a cărei constantă de timp este calculată pentru un număr n de perioade de repetiție ale proceselor elementare. Stabilirea unei constante de timp redusă este impusă din considerentul creșterii fidelității semnalului prelucrat față de starea reală din proces.

Tensiunea medie din zona de lucru poate caracteriza stări distincte ale procesului, iar valoarea ei este dependentă de parametrii de durată ai proceselor elementare. Astfel, pot fi evidențiate stările:

$$U_G = K \cdot U_0 \quad \text{pentru procese elementare pasive;}$$

$$U_{med} = K \cdot U_L \quad \text{pentru procese elementare de lucru;}$$

$U_F \approx U_I$ pentru procese elementare fictive;

$U_S = K \cdot U_S$ pentru procese elementare de scurtcircuit.

Coeficientul de umplere K pune în evidență influența parametrilor de durată (T_d, T_i, T_p) asupra mărimilor medii analizate (U_G, U_2, U_F, U_S). Dependenta dintre tensiunea medie din zona de lucru și mărimea interstițiului este prezentată în fig. 3.2 /83/. Pentru un interstițiu redus $s \leq s_1$, care reprezintă o stare premergătoare scurtcircuitării, tensiunea medie nu mai depinde de mărimea interstițiului, însoțindu-se creșterea valorii acestuia cu urmarea a aplicării mărimi electrice $-U_1$. Prin această acțiune se produce o mărire a interstițiului $s > s_5$, respectiv în afara domeniului de desfășurare a prelucrării. În intervalul $s_4 \dots s_3$, tensiunea de lucru crește sau scade instantaneu, având o caracteristică de tip releu, situație prin care sistemul poate intra în regim de autooscilație cu o amplitudine ce depășește mărimea interstițiului geometric. Acest mod de funcționare conduce la tensionarea periodică a sistemului mecanic, la scăderea stabilității procesului și implicit la reducerea randamentului prelevării. Înlăturarea neajunsului menționat se poate realiza prin reducerea pragului de saturație al regulatorului, limitând tensiunea de referință U_{ref} la valoarea $+U_2$, corespunzătoare regiunii de mers în gol. Astfel, caracteristica regulatorului este de forma /83/:

$$U_{reg.} = \begin{cases} -U_1 & \text{pentru } s \leq s_1 \\ K_{reg.} \cdot (U_{med} - U_{ref}) & \text{pentru } s_1 < s < s_4 \\ +U_2 & \text{pentru } s \geq s_4 \end{cases} \quad (3.6)$$

În zona $s_1 < s < s_4$, dependența este aproape liniară, putându-se considera, cu suficientă precizie, modelul ei liniarizat.

Utilizând, ca mărime electrică de comandă, tensiunea (curentul) medie din zona de lucru, conduce la următoarele neajunsuri:

- nu pot fi distinse procesele elementare fictive de cele de lucru;

- necesită dispozitive suplimentare de corecție pentru a compensa dependența valorii medii de coeficientul de umplere al impulsurilor;

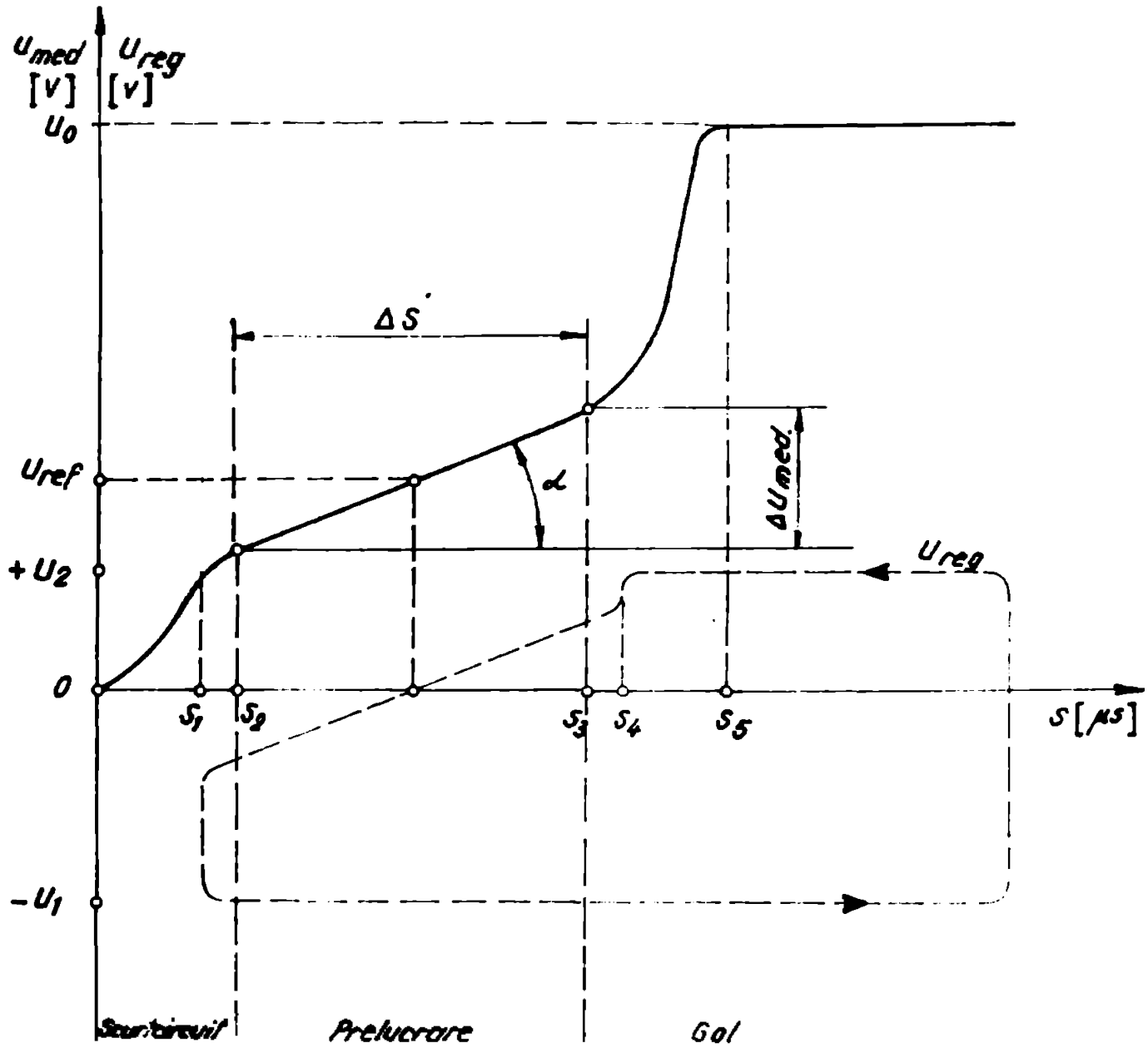


Fig. 3.2. Caracteristica tensiune - interstitiu

- în domeniul prelucrării efective, variația tensiunii medii este relativ redusă, fapt ce implică o amplificarea corespunzătoare pentru distingerea anumitor valori în diferite etape ale prelucrării.

Dezavantajele prezentate au fost parțial înlăturate prin următoarele echipamente suplimentare:

- introducerea unor detectoare suplimentare pentru de-
bitarea proceselor elementare fictive;
- introducerea unor circuite de corecție pentru compensarea variației coeficientului de amplere;
- utilizarea unor amplificatoare cu reacție tip PID cu selectivitate mărită pentru procesele elementare de lucru.

Mărimile electrice de comandă analizate a fost utilizată, în cadrul lucrării, în bucle de reglare a sistemului automat SRA-II, destinat pentru cazul prelucrării cu generatorul RC.

3.2.2. Mărimi electrice discrete

Elementul discriminator utilizat poate distinge patru tipuri de procese elementare (fig.3.3, fig.3.4) /40/ și anume:

- procese elementare pasive (N_G);
- procese elementare de lucru (N_L);
- procese elementare fictive (N_F);
- procese elementare de scurtcircuit (N_S).

Detectarea mărimilor specificate se realizează prin analiza a două semnale: durata de existență a impulsurilor de tensiune ($T_d + T_i$), utilizată pentru sincronizare și valoarea momentană a tensiunii din interstițiu U_p . Ultimele element analizat se compară cu nivelele de tensiune: U_H - valoare cuprinsă între tensiunea de mers în gol, dată de generator ($U_G = 60 \dots 300V$) și U_L - valoare cuprinsă între tensiunea de lucru U_L și tensiunea de scurtcircuit ($U_S = 0,1 \dots 5V$).

Discriminatorul prezentat analizează următorii parametri:

- duratele proceselor elementare ($T_d + T_i$), constituite din duratele de întârziere la amorsare T_d și duratele efective ale proceselor elementare T_i ($i_i = 0$ pentru procesele elementare

tere pasive, fictive și de scurtcircuit);

- duratele relative ale proceselor elementare efective individuale $Y = T_i / (T_d + T_i)$. Mărimile relative Y se anulează pentru procesele elementare pasive, fictive și de scurtcircuit;

- duratele tuturor proceselor elementare din zona de lucru.

Totalitatea informațiilor specificate sînt aplicate, prin interfațare corespunzătoare, microprocesorului μP care printr-o software specială analizează, cu o anumită frecvență de control, poziția performanțelor reale comparativ cu strategia impusă și emite decizii de modificare discretă a parametrilor controlabili, constituiți din tensiunea de referință $U_R = f(X, Y)$ a regulatorului electronic și a timpului de pauză dintre impulsuri $T_D = g(X, Y)$.

Din analiza efectuată se observă că structura în ansamblu este foarte complexă (se pretează pentru comanda adaptivă), implicînd echipamente electronice și informatice neaccesibile pentru autor, motiv pentru care nu s-a abordat acest mod de prelucrare a informației.

3.2.3. Mărimi electrice hibride

Avînd în vedere rolul important al dăratei de întîrziere la amorsare (T_d) în asigurarea stabilității și optimizării procesului de prelucrare prin eroziune electrică, s-au conceput și realizat dispozitive electronice destinate selectării și utilizării acestei componente la elaborarea mărimii de comandă a elementului de execuție din structura sistemului de avans automat [56, 57, 59, 60, 61, 62]. Bazat pe acest lucru, în lucrare se prezintă un dispozitiv electronic, prin care, se separă componenta de întîrziere la amorsare T_d , aceasta se compară cu o mărime prestabilită T_R , iar diferența rezultată este utilizată la comanda unui element integrator (convertor timp/tensiune). Mărimile de ieșire a elementului integrator este convertită într-o succesiune de semnale discrete, de frecvență variabilă (convertor tensiune/frecvență), dependentă de durata efectivă de integrare, respectiv o dată ce semnalul integrat atinge nivelul tensiunii de referință U_R (fig.3.5).

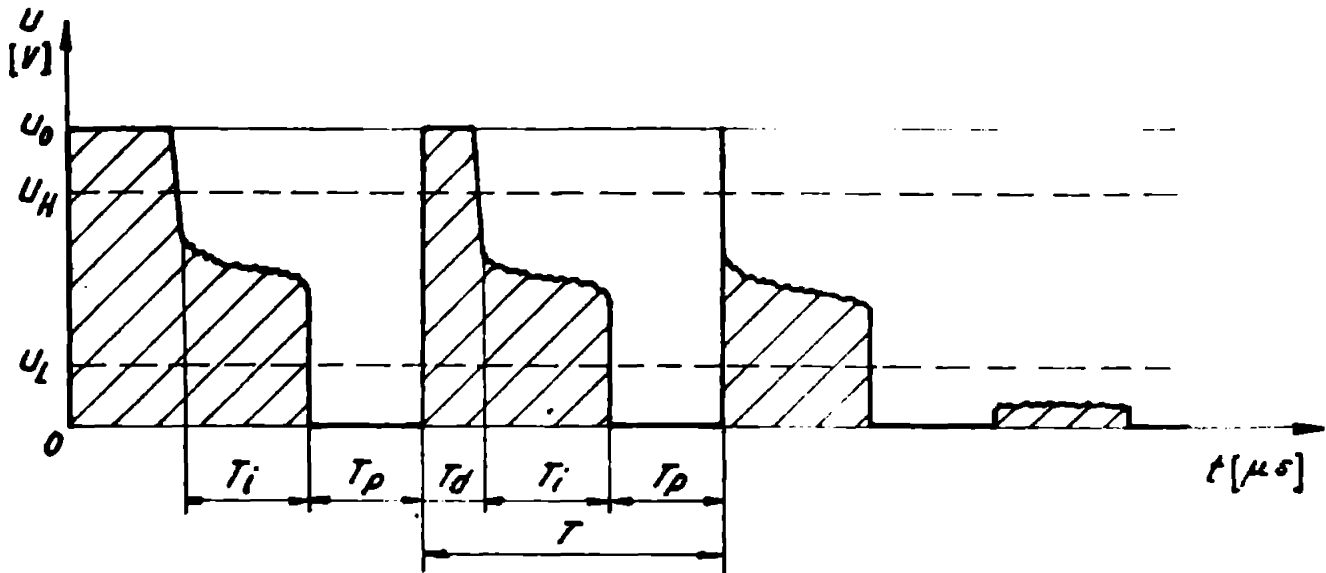


Fig. 3.3 Variante de caracteristici dinamice specifice diferitelor procese elementare

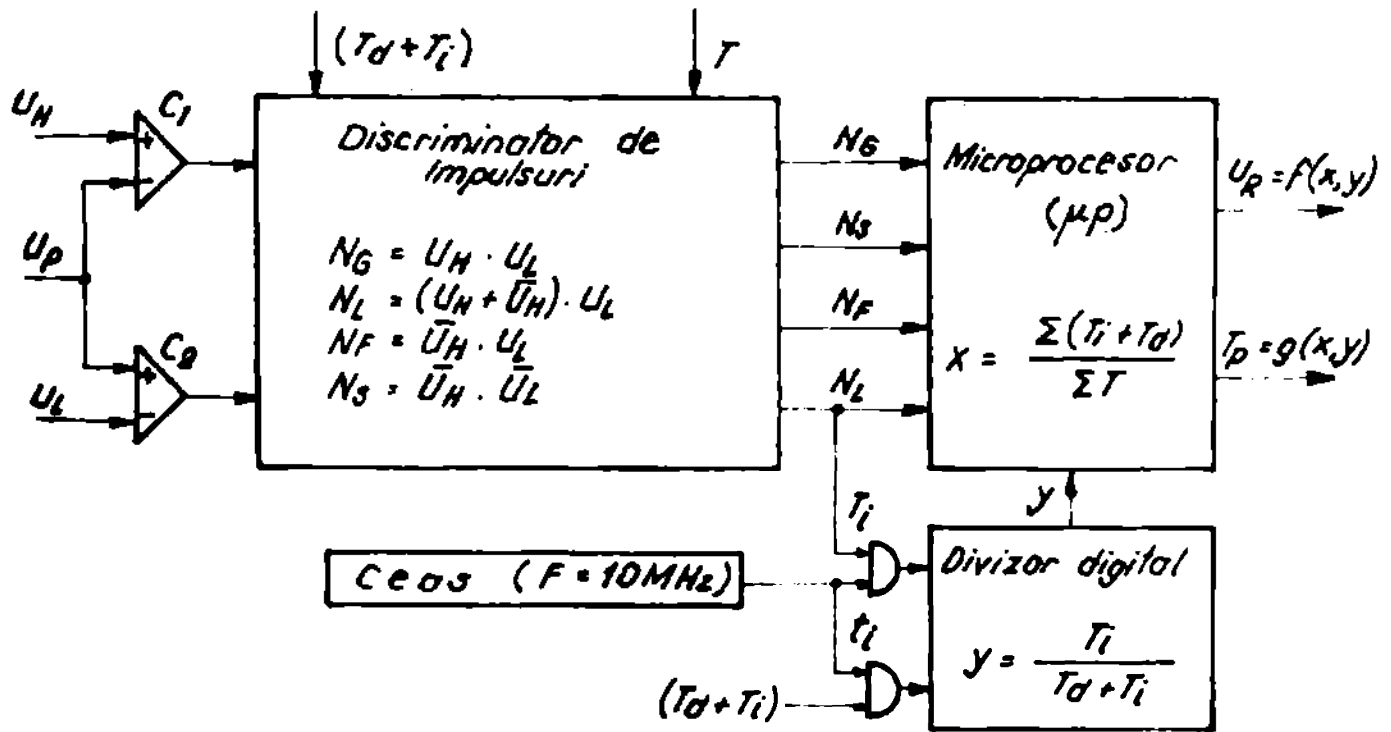


Fig. 3.4 Structură complexă de prelucrare a mărimilor electrice discrete din proces

Frecvența impulsurilor, generate de către acest element, poate fi variată în intervalul $(0 \dots f_{\max})$, limita superioară fiind stabilită în funcție de performanțele elementului de execuție utilizat. De remarcat că valoarea maximă a frecvenței se obține pe duratele de poziționare relativă OI/OP și în situații retragerii obiectului de transfer pentru a evita stările de scurtcircuit.

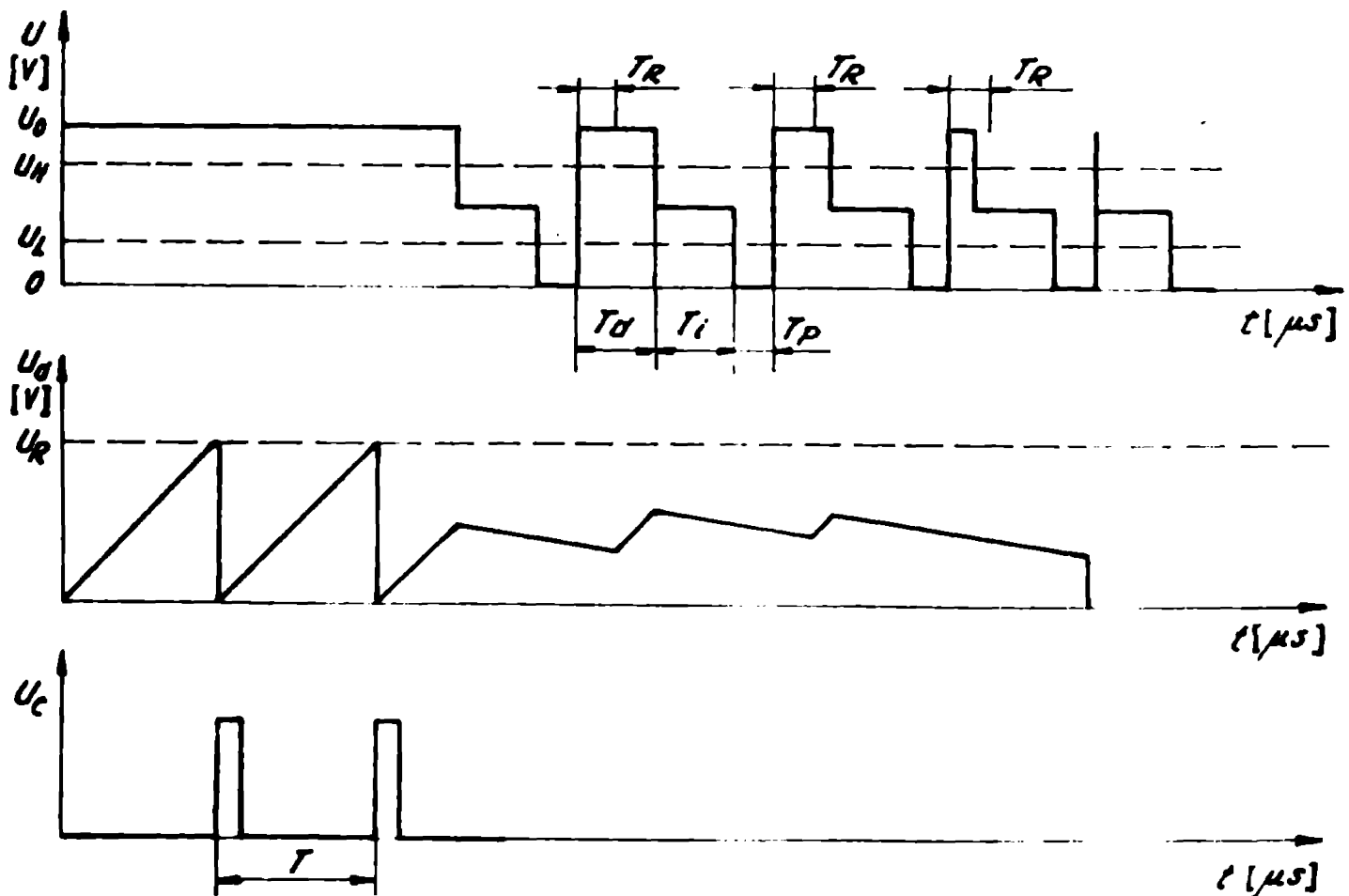


Fig. 3.5 Principiul formării semnalelor de comandă

C A P I T O L U L 4

ANALIZA SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ A AVANSULUI LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU COPIEREA FORŢEI ELECTRODULUI

4.1. Clasificarea sistemelor de reglare automată a avansului

Asigurarea condițiilor optime de prelucrare reflectate prin: productivitate maximă, randament ridicat, calitate corespunzătoare a suprafețelor prelucrate etc., impune menținerea constantă sau asigurarea variației, după o anumită lege, a unora dintre parametrii care influențează procesul (interstițiul electric dintre electrozi, produsele eroziunii din zona de lucru, temperatura mediului de lucru, intensitatea spălării forțate a interstițiului, amplitudinea vibrațiilor obiectului de transfer etc.).

Apariția procedurii de prelucrare prin eroziune electrică a cunoscut, de-a lungul timpului, soluții diferite de conducere a procesului. S-a început cu un operator uman și apoi, funcțiile acestuia au fost preluate de către dispozitive automate din ce în ce mai evoluate, astfel încât, în perioada actuală, structura acestora permite conducerea automată a procesului după majoritatea parametrilor de influență, producându-se mașini echipate cu comandă adaptivă combinată cu echipamente de comandă program /83/.

Clasificarea sistemelor de reglare automată a avansului (SRA) are în vedere aspectele:

1. funcția specifică pe care o realizează sistemul:
 - SRA stabilizatoare;
 - SRA de urmărire;
 - SRA cu comandă program;
 - SRA optimale;

- SAA extremeale;
- SAA adaptive.

2. structura elementelor de prelucrare a informației și a elementului de execuție:

- SAA electromecanice cu elemente de execuție solenoidale;
- SAA electromecanice cu elemente de execuție-motoare electrice de curent continuu;
- SAA electromecanice cu elemente de execuție-motoare electrice pas cu pas liniare;
- SAA electromecanice cu elemente de execuție-motoare electrice rotative pas cu pas;
- SAA electrohidraulice.

Rezultat de clasificarea efectuată, SAA conceput și realizat se încadrează în categoria SAA stabilizatoare, de tip electromecanic, cu element de execuție - motor electric rotativ pas cu pas.

De remarcat că, majoritatea mașinilor produse pe plan mondial sînt echipate cu SAA electrohidraulice, rîndîndu-se motivată de următoarele avantaje:

- posibilitatea de obținere a unor viteze foarte reduse;
- raport de reținer foarte mare (1:250);
- Precizie de reținer ridicată (de ordinul 10^{-3} mm);
- durate de reversare mici (10^{-2} ... 10^{-3} s);
- zonă de insensibilitate foarte mică;
- pot dezvolta forțe de acțiune mari;
- nu necesită elemente suplimentare pentru transformarea mișcării;

- sînt eliminate frecările uscate.

SAA electrohidraulice au, pe lângă avantajele menționate, și câteva dezavantaje importante, referitoare la:

- complexitatea ridicată a instalației;
- gabarit mare;
- precizie ridicată de execuție a elementelor componente;
- compresibilitatea fluidului de lucru;
- dependențe fluidului de lucru de temperatură;
- preț de cost ridicat [22];
- sensibilitatea elementului convertor electric/hidraulic.

ulic (electrovalve).

În ultimul timp, foarte multe firme producătoare de acest tip de utilaje, sînt interesate în utilizarea de SRA electromecanice și în special cele prevăzute cu elemente de execuție de tipul: motor de curent continuu cu inerție redusă (cu rotor disc), și motor electric rotativ pas cu pas. Motorul pas cu pas asigură unele performanțe superioare referitoare la corelarea deplasării discrete a acestuia cu procesul discret de prelucrare prin eroziune electrică și în același timp, prin asigurarea unei bucle de reacție de validare a pasilor discreți, poate constitui chiar traductorul de deplasare numerică al obiectului de transfer, respectiv posibilitatea de programare a adîncimii de prelucrare.

4.2. Performanțe de bază ale sistemelor de reglare automată a avansului

4.2.1. Viteza de deplasare a obiectului de transfer

Acest parametru cinematic poate lua orice valoare din intervalul prestabilit (0..... v_{max}). Valoarea maximă a vitezei este necesară în cazurile deplasărilor de poziționare relativă a obiectului de transfer în raport cu obiectul prelucrării și de îndepărtare relativă a celor două elemente, prin acțiuni de eliminare a stărilor accidentale din proces.

Valorile intermediare ale vitezei sînt utilizate pentru asigurarea gamei necesare de viteze liniare de eroziune a obiectului prelucrării (v_{OP}) și a obiectului de transfer (v_{OT}):

$$v_e = v_{OP} + v_{OT} \quad (4.1)$$

Din literatura de specialitate [82], rezultă că valoarea maximă a vitezei necesare pentru scopurile menționate este limitată la cca. 4...5 mm/s. Creșterea vitezei peste această limită are o influență nesemnificativă, motiv pentru care în aplicațiile practice sînt utilizate elemente de execuție și organe

de reglare care pot asigura pragul menționat.

4.2.2. Precizia de reglare a interstițiului eroziv

Precizia de reglare se stabilește în funcție de mărimea interstițiului eroziv, care în mod obișnuit are valori cuprinse în intervalul $s = 5 \dots 500 \mu\text{m}$. Acțiunea de modificare a mărimii trebuie să fie astfel stabilită încît să nu provoace abateri importante ale procesului de prelucrare în ansamblu.

Sistemul de reglare automată a șvansului trebuie să asigure precizii ridicate, reprezentînd valori de (10%...15%).s, iar acestea să fie astfel realizate încît să nu fie influențate de imperfecțiunile elementelor din sistem.

4.2.3. Rapiditatea de răspuns

Rapiditatea de răspuns se definește prin decalajul temporal dintre momentul aplicării unui semnal standard (semnal treaptă unitară), la intrarea sistemului și momentul modificării poziției obiectului de transfer, ca reacție la semnalul aplicat.

Asigurînd un timp minim de răspuns ($t < 50\text{ms}$) se poate reduce substanțial decalajul temporal din bucla proces-decizie-acțiune, asigurîndu-se astfel, o îmbunătățire a stabilității prelucrării. Reducerea duratei de răspuns se poate realiza atît prin proiectarea corespunzătoare a regulatorului electronic, cît și prin adoptarea unui sistem mecanic adecvat. Sistemul mecanic trebuie prevăzut cu elemente speciale, cu preluare de joc între elementele aflate în mișcare relativă, cu scopul de a elimina zonele de insensibilitate din lanțul cinematic adoptat.

4.2.4. Precizia de ghidare a pinolei portoelectrod

Ghidarea obiectului de transfer în proces, are o in-

fluență deosebită asupra preciziei de prelucrare a suprafețelor. Din acest motiv se impune utilizarea unor soluții de ghidare care să permită deplasări relative axiale cu frecare cât mai redusă, să conțină mecanisme speciale cu preluare de joc, iar poziția relativă a elementelor de orintare trebuie să fie riguros determinată pentru a asigura perpendicularitatea între suprafața de ghidare a pinolei și suprafața mesei de lucru a mașinii. Datele din literatură arată că sînt necesare precizii de deplasare de cca. 0,005 mm/200 mm.

Se impun, de asemenea, restricții referitoare la deplasarea unghiulară a pinolei portelectrod într-un plan perpendicular pe axa acestuia. Deplasarea menționată trebuie să fie nulă, cu excepția cazurilor cînd prelucrarea se realizează fie prin rotirea obiectului de transfer, fie prin mișcări orbitale.

4.2.5. Alegera obiectului de execuție

Alegera elementului de execuție se face ținînd seama de următoarele aspecte: solicitarea maximă din sistemul mecanic antrenat, asigurarea preciziei necesare de deplasare a obiectului de transfer și posibilitatea de realizare a mărimilor cinematice impuse.

Sarcina maximă de calcul este constituită din greutatea pinolei portelectrod, greutatea obiectului de transfer, forța de presiune a lichidului dielectric utilizat la spălarea forțată a zonei de lucru și forțele de frecare dezvoltate între elementele cuplelor cinematice.

4.2.6. Stabilitatea sistemului de reglare automată a avansului

Stabilitatea se referă la capacitatea unui sistem automat de a realiza un regim staționar, sau de a readuce sistemul în stare staționară în urma intervenției unei acțiuni perturbatoare. Aprecierea stabilității sistemelor se poate realiza pe

cale analitică sau grafică.

Determinarea analitică a stabilității sistemelor se poate realiza prin cunoașterea rădăcinilor ecuației caracteristice rezultată din ecuație diferențială a sistemului, fără termenul liber, sau prin analiza polilor zero-uri ai ecuației caracteristice rezultată din funcția de transfer a sistemului. Dacă rădăcinile sau poli ecuațiilor menționate se situează în semiplanul stâng, al planului complex, sistemul analizat este stabil. Metoda analitică asigură informații importante în legătură cu stabilitatea absolută și relativă a sistemelor, putându-se aplica cu succes la ecuațiile de grad $n \leq 3$, deoarece la ecuații de grad mai mare metoda se aplică anevoios. Pentru a lărgi domeniul de studiu al stabilității sistemelor de reglare automată și pentru ecuații de grad superior, au fost elaborate mai multe criterii de stabilitate, care permit aprecierea stabilității sistemelor fără a necesita rezolvarea ecuațiilor caracteristice, ci prin utilizarea caracteristicilor de frecvență (metode grafice).

În cadrul lucrării, stabilitatea sistemelor studiate a fost analizată cu ajutorul criteriului grafic de stabilitate Nyquist [4,7,11,12,51,67,75,77,85].

4.3. Particularități constructiv-funcționale ale SRA stabilizatoare

Având în vedere că soluție de sistem de reglare automată la avansului adoptată este inclusă în categoria sistemelor stabilizatoare, în continuare se vor prezenta câteva aspecte generale referitoare la sistemele din această grupă de automatizare.

4.3.1. SRA electro mecanic cu element de execuție solenoidal

O variantă constructivă de acest tip de sistem este prezentată în fig.4.1., cu precizarea că această categorie de sisteme a fost utilizată în perioada de încercut a aplicării

eroziunii electrice în producție. Sistemul are ca funcție de bază menținerea constantă a curentului de lucru din circuitul generatorului. Pentru îndeplinirea funcției prezentate, se utilizează un element de execuție solenoidal, constituit dintr-un miez feromagnetic, solidar cu pinola portelectrod, iar partea statorică este realizată din două bobine alimentate de la surse de energie diferite. Una din surse este independentă de procesul de lucru, iar cea de-a doua o constituie căderea de tensiune produsă la bornele rezistenței de balast K , a cărei valoare este proporțională cu intensitatea curentului din circuitul de lucru ($u_x = i_x \cdot K$).

Corespunzător valorilor momentane ale semnalelor de tensiune prestabilite, la un anumit nivel mediu, cu ajutorul potențioanelor p_1 și p_2 , sînt create două forțe electromagnetice, în miezul feromagnetic al pinolei, orientate în sens invers forței de greutate a acesteia (F_p). Astfel, apare o forță electromagnetică constantă F_c al cărui modul este prestabilit cu ajutorul potențioanelor p_1 și o forță cu modul variabil, dependent de curentul din circuitul de lucru (u_x).

În vederea prelucrării se reglează o forță F_c ($F_x = 0$), inferioară forței de greutate a pinolei F_p , situație în care pinola se deplasează în sensul vectorului forței predominante (F_p), iar în momentul dezvoltării proceselor elementare dintre electrozi, apare și componenta F_x a cărei acțiune este îndreptată în sensul menținerii unui echilibru de forțe dat de egalitatea:

$$F_p = F_c + F_x \quad (4.2)$$

Orice modificare a mărimilor electrice din zona de lucru conduce la dezechilibrarea egalității (4.2), avînd ca efect modificarea poziției relative a celor două elemente în sensul forței dominante din sistem.

Intrucît sistemul mecanic acționează direct și nu necesită elemente intermediare ca reductor, mecanism șurub-piuliță etc., face ca acesta să posede o rapiditate de răspuns ridicată, determinată de absența jocurilor mecanice, însă prezintă dezavantajul că are o stabilitate redusă, cauzată de amplitudinea oscilațiilor aleatoare, care în majoritatea cazurilor dăunează interstițiului normal de eroziune, reducînd prin aceasta randamentul prelucrării.

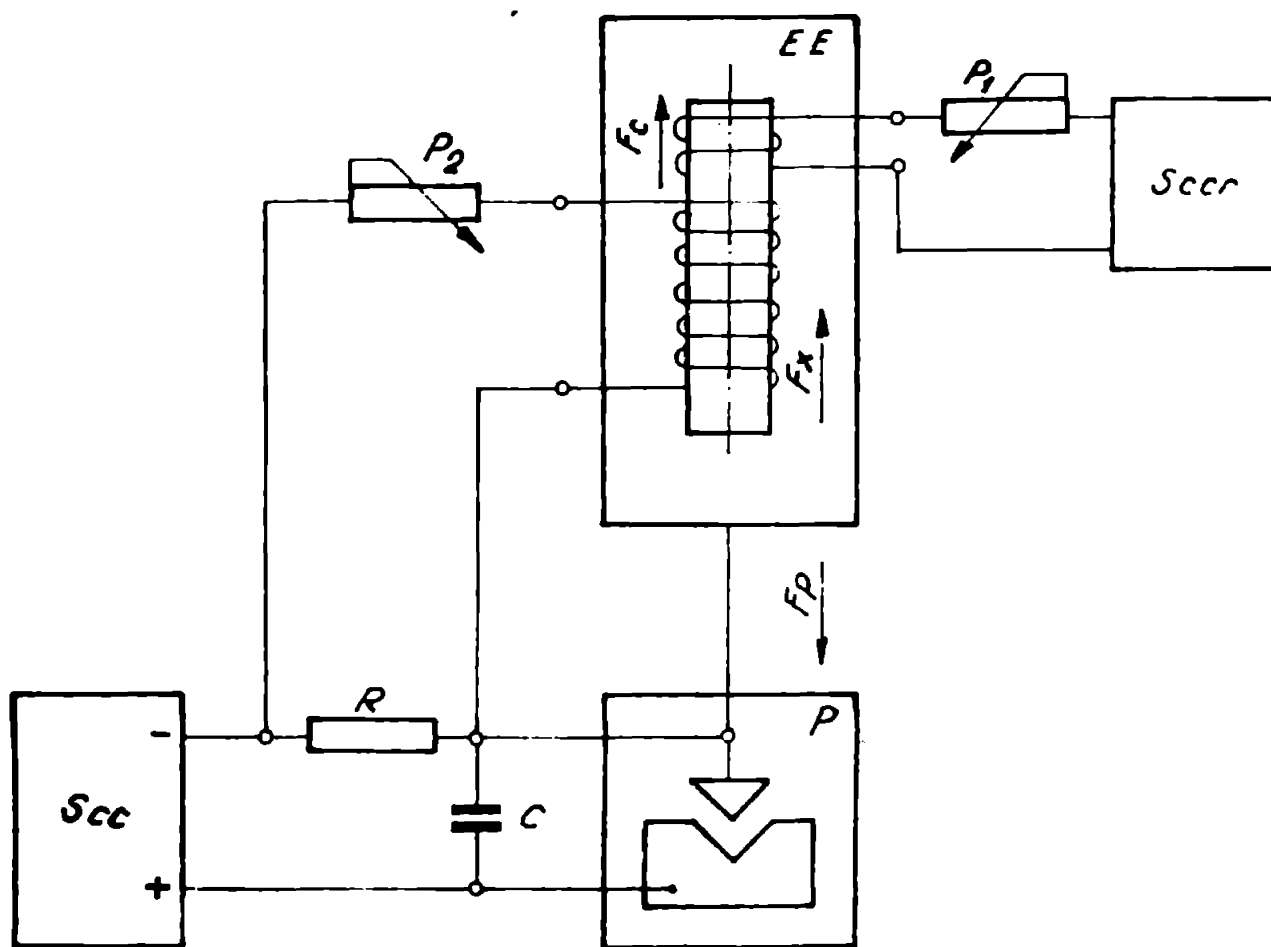


Fig. 4.1 S.R.A electromecanic cu element de execuție solenoidal

4.3.2. SMA electromecanic cu element de execuție motor de curent continuu

Sistemul prezentat în fig.4.2. are rolul de a asigura proporționalitatea între curentul din circuitul de lucru și deplasarea momentară a obiectului de transfer. Căderea de tensiune pe rezistența de balast R (U_{cx}) este însumată algebric cu o tensiune de referință U_r , iar rezultatul operației efectuate este aplicat pe indusul elementului de execuție (motor de curent continuu cu excitație separată), care acționează asupra procesului de prelucrare în sensul minimizării acestei componente. De remarcat că acțiunea elementului de execuție se realizează, în procesele tranzitorii de schimbări de sens, cu o zonă de insensibilitate (fig.4.3), al cărui valier este determinat de corespondența dintre tensiunea aplicată și cuplu motor realizat a cărui valoare trebuie să depășească cuplul rezistent din sistemul mecanic antrenat.

Adaptarea mărimii cinematice, de la ieșirea elementului de execuție, la nivelul necesităților din proces se realizează cu ajutorul unor elemente suplimentare ca: reductor, mecanisme curb-pialită etc. Acestea trebuie să prezinte o construcție specială pentru a asigura eliminarea jocurilor dintre elementele aflate în mișcare relativă, pentru a nu diminua rapiditatea de răspuns a sistemului.

În ultima perioadă s-a remarcat o utilizare din ce în ce mai largă a elementelor de execuție cu inerție redusă de tipul: motor de curent continuu cu rotor disc și motor de curent continuu cu rotor bobor. Acestea au circuitul indusului realizat sub formă de circuit imprimat, contribuind prin aceasta la creșterea vitezei de reacție a sistemului, ca rezultat al reducerii momentului de inerție al rotorului.

4.3.3. SMA electromecanic cu element de execuție motor electric liniar pas cu pas

Sistemul prezentat în figura realizarea

reglare a interstițiului eroziv, utilizând ca măsură de comandă tensiunea medie din zona de lucru (U_{med}). Informația din proces este prelucrată de un detector de nivel DN, ale cărui măsuri de ieșire (semnalele detectate) pot asigura decizii de înaintare SI ($U_{med} > U_R$), retragere SR ($U_{med} < U_R$), sau stop ($U_{med} = U_R$).

Numărătorul NR este declanșat de baza de timp BT și de prezența unuia dintre semnalele SI sau SR. Informațiile conținute pe celulele elementelor numărătorului NR sînt decodificate separat pentru electromagneții de fixare MAS (fixare superioară) și MII (fixare inferioară), prin intermediul decodificatoarelor DES și DEI și separat pentru bobinele B ale elementului de execuție, prin intermediul decodicatorului DEB. Decodificatoarele DES și DEI primesc suplimentar și informația asupra sensului în care trebuie efectuat pasul. Pentru comanda numărului de bobine B de conectat, sistemul este prevăzut cu un element suplimentar DNB.

Elementul activ al motorului este realizat dintr-o bară de nichel (sau alt material metalic cu proprietăți magnetostrictive) amplasată într-un câmp magnetic variabil, sub acțiunea căruia dimensiunile geometrice ale barei se vor modifica în funcție de modificarea câmpului magnetic. În cazul existenței unei preamagnetizări H_0 , unei perioade de variație a câmpului magnetic îi corespunde o variație similară a lungirii barei. Sensul deformării barei nu depinde de sensul câmpului magnetic H , ci de natura materialului din care este constituită bara. Câmpul magnetic de preamagnetizare se va alege, pe grafic, în zona de curbură a caracteristicii, înainte de palierul de saturație.

Variația relativă a dimensiunii geometrice depinde de valoarea magnetostricțiunii a materialului utilizat și de intensitatea câmpului magnetic, putîndu-se calcula cu relație:

$$\Delta l/l = - \frac{\delta \cdot B}{E} \quad (4.3)$$

unde: δ - constanta efectului magnetostrictiv, E - modulul lui Young pentru materialul considerat și B - inducția magnetică.

Utilizarea nichelului ca element activ (magnetostrictiv) prezintă inconveniente că permite deformări relative reduse și are punctul Curie scăzut, avînd însă avantajele că nu

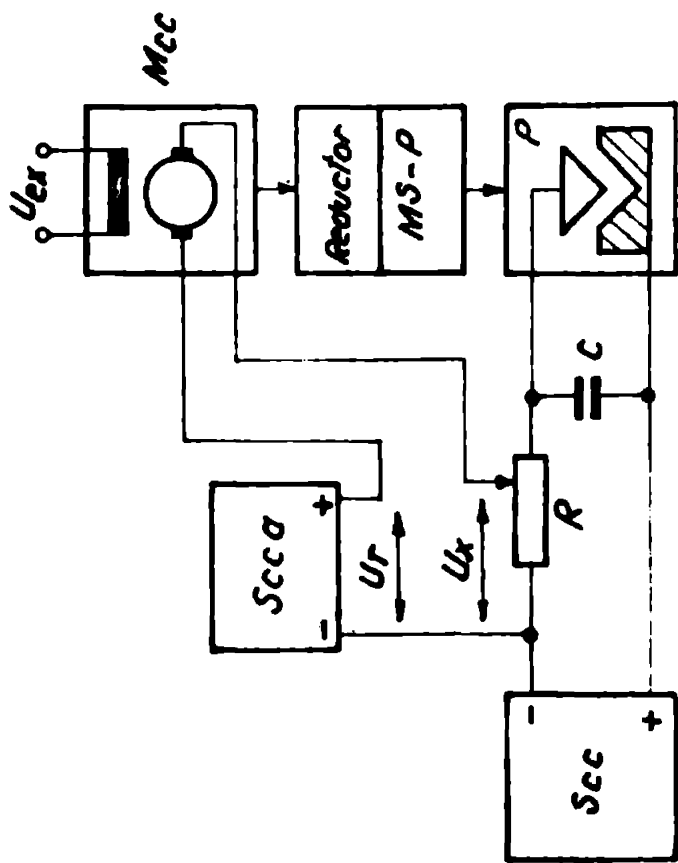


Fig. 4.2. SRA. electromecanic cu element de executie motor electric de curent continuu

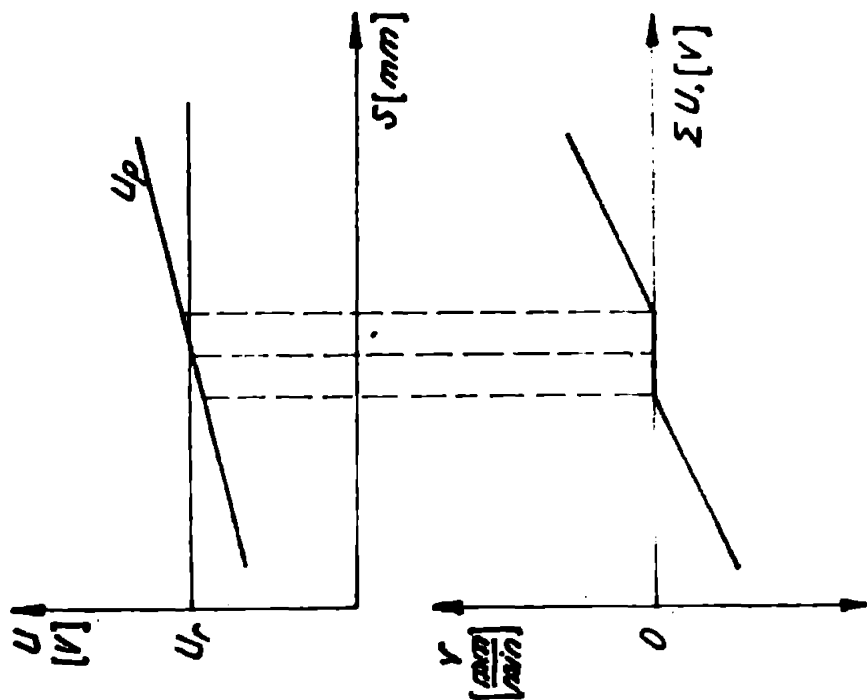


Fig. 4.3 Caracteristica de functionare a motorului

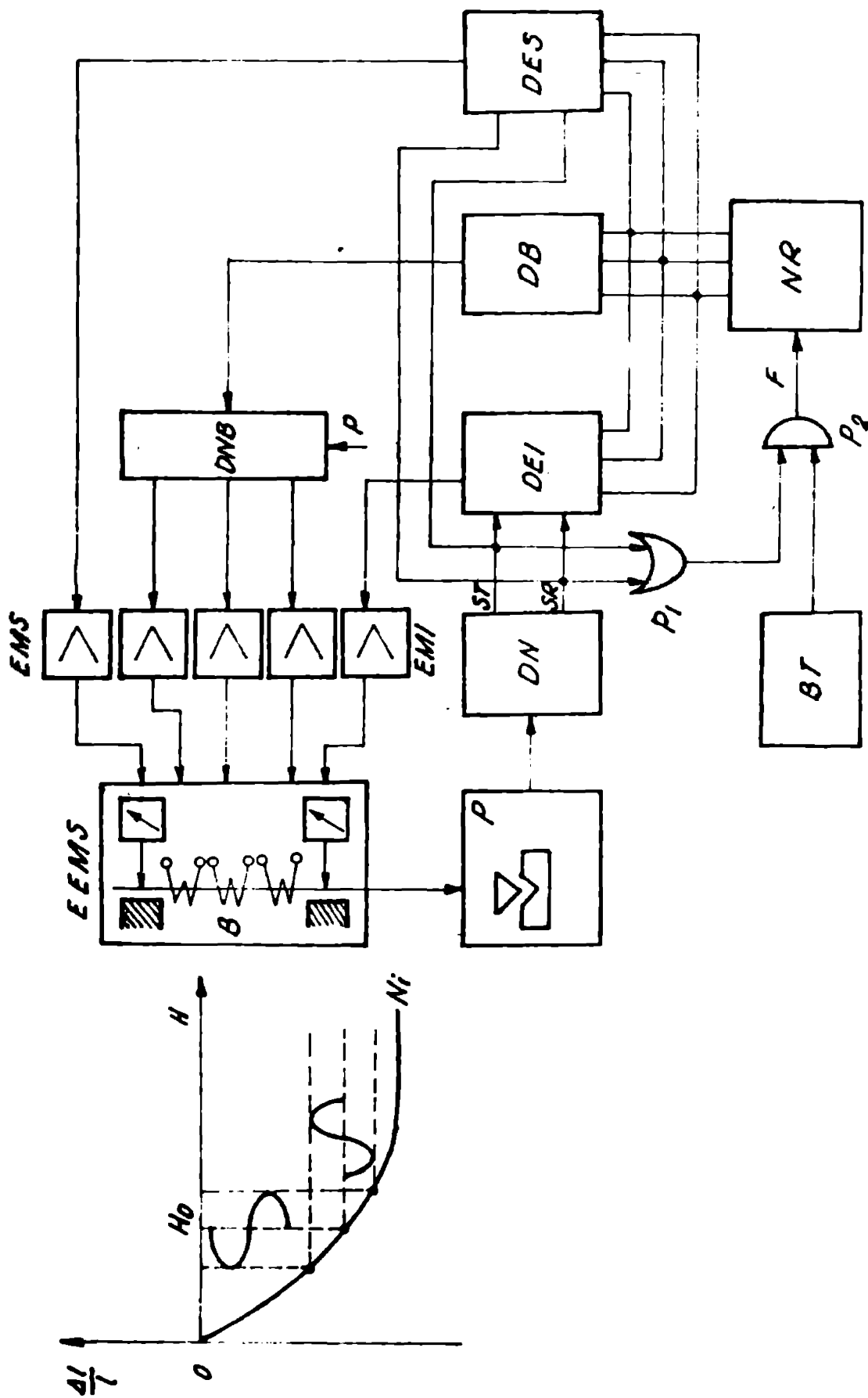


Fig. 4.4 S.R.A electromecanic cu element de executie motor electric liniar pas cu pas

este sfârșnicios, se prelucurează ușor, are proprietăți mecanice bune și se găsește în cantități suficiente.

Cu creșterea frecvenței de lucru a elementului activ, cresc pierderile prin curenți turbionali, ducând în final la încălzirea acestuia. În scopul reducerii acestor pierderi, elementul activ se execută sub formă tubulară, cu diametrul cuprins în intervalul 10...50 mm, fiind secționat pe generatoare, iar pentru frecvențe reduse (sub 10 KHz) acesta poate fi realizat din bară cilindrică plină.

Utilizarea acestor motoare prezintă avantajul realizării a unor pași liniari de amplitudine variabilă $\Delta z = 0,001...0,01$ mm/pas, putând lucra cu frecvență variabilă $F \leq 10$ Hz, limitată de capacitatea de funcționare a electromagneților de fixare EMS, EM1 și nu necesită elemente suplimentare pentru modificarea mărimii cinematice (rotație \rightarrow translație), eliminându-se astfel jocurile din sistemul mecanic.

Motorul pas cu pas liniar prezintă dezavantajele: pi-nola de lucru (inclusiv elementul activ) necesită elemente de echilibrare, vitezele realizate au valori reduse, fixarea elementului activ, prin șoc, pe direcția perpendiculară pe axa acestuia constituie surse importante de vibrații care pot influența negativ precizia de prelucrare.

4.3.4. SSM electromecanic cu element de execuție motor electric rotativ pas cu pas

Intrucât în capitolul următor va fi tratat în detaliu un sistem de replare automată a șansului de acest tip, în continuare se vor prezenta unele considerații referitoare la motoarele electrice rotative pas cu pas și posibilitatea de implementare a lor în bucla de replare automată.

Motorul electric pas cu pas este caracterizat printr-o construcție și un sistem de alimentare adecvat funcționării discrete.

Fazele motorului sînt alimentate cu impulsuri de curent, rezultînd o repartiție discretă a cîmpului magnetic din în-trețier.

Rotorul are o construcție specială, astfel încât să se poată situa, în raport cu repartiția cîmpului magnetic în întrefier, numai în anumite poziții corespunzătoare fie după direcția reluctanței minime (raportul dintre tensiunea magnetică U_m dintr-o porțiune de circuit magnetic și fluxul magnetic ce-l străbate), fie după componenta tangențială a forței de atracție magnetică a polilor de sens contrar. Trecerea de la o poziție la alta (pasu unghiular θ) se realizează direct sub influența repartiției discrete a cîmpului magnetic, adică motorul convertește impulsul electric primit într-o deplasare unghiulară discretă bine determinată. Deplasarea unghiulară totală se obține printr-un tren de impulsuri de comandă aplicate pe fazele motorului, definind motorul ca un integrator numeric. Poziția finală a rotorului corespunde ultimului impuls de comandă, iar aceasta se memorează pînă la aplicarea impulsului următor. Motorul electric pas cu pas poate realiza porniri, opriri și reversări de mișcare bruște, fără pierdere de pași.

Parametrii cinematici ai sistemului constituit din elementul de execuție și organul de reglare:

1. unghiul de pas al rotorului se calculează cu relația:

$$\theta = 360 / z_r \cdot m \quad (4.4)$$

unde: z_r - numărul dinților rotorici și m - numărul de faze ale motorului;

2. deplasarea liniară incrementală a obiectului de transfer (Δs), pentru cazul utilizării a unui lanț cinematic compus dintr-un reductor (i) și un mecanism șurub - piuliță (p), se obține:

$$\Delta s = \theta \cdot p / 360 \cdot i \quad (4.5)$$

Rezoluția deplasării discrete (Δs) se stabilește în funcție de interstițiul eroziv s ($s = 5 \dots 500 \mu m$), astfel încât modificarea incrementală a acestuia să nu provoace abateri importante în procesul de prelucrare. Valoarea admisibilă a rezoluției este accentată /29/ în intervalul :

$$\Delta s = (5\% \dots 10\%) \cdot s \quad (4.6)$$

3. viteza maximă de deplasare se poate calcula în funcție de frecvența de lucru F , cu relația:

$$v_{\text{MAX}} = \Delta s \cdot F \quad (4.7)$$

Alegera elementului de execuție se realizează în următoarele etape:

a. Date inițiale:

- rezoluție Δs , în m;
- curse maximă H , în m;
- structura organului de reglare (reductor, mecanism șurub - piuliță);
- tipul ghidajelor;
- sarcina proprie a pinolei Q_p și sarcina suplimentară Q_s , în N;
- viteza maximă de deplasare v , în m/min.

b. Calculul elementului de execuție necesar:

- se alege din catalog /35/ unghiul de pas θ , în grade;
- se calculează pasul șurubului conducător

$$p = 360 \cdot \Delta s / \theta \quad \text{m} \quad (4.8)$$

- se adoptă dimensiunile șurubului;
- calculul frecvenței maxime la comandă:

$$F = v / \Delta s \quad \text{nași/s} \quad (4.9)$$

- calculul momentului rezistent la arborele mașinii:

$$M_T = (Q + Q_p) \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\beta + \epsilon) \quad (4.10)$$

unde: $Q = Q_p + Q_s$ - sarcina totală, Q_p - sarcina de frecare, $\tan \beta = p / \pi \cdot d_2$ - unghiul de inclinare al elicei filetului,

$\epsilon = \arctg \mu$ - unghiul de frecare;

- calculul momentului de inerție total:

$$J_T = J_{\text{APP}} + J_{\text{reductor}} + J_{\text{șurub}} + J_{\text{translație}} \quad (4.11)$$

Din catalogul de motoare electrice pas cu pas se alege motorul din serie cu unghiul de pas θ , modelul care are caracteristica de sarcină $M_T = f(F)$ peste punctul $A(F, M_T)$. Caracteristicile sînt date pentru o inerție externă neglijabilă, cînd

s-ar obține frecvențe maxime de start/stop (F_p) și de mers F ($F > F_p$). Dacă momentul de inerție extern are o valoare importantă ($J_{ext.} \neq 0$), se vor efectua unele corecții, rezultând valoarea frecvenței de pornire corectată de forma:

$$F_{pc} = \sqrt{\frac{J_{mPP}}{J_{mPP} + J_{ext.}}} \cdot F_D \quad (4.12)$$

Avantajele motoarelor electrice rotative pas cu pas:

- convertirea impulsurilor electrice de comandă în deplasări incrementale determinate permite realizarea unor poziționări pe distanțe determinate;
- schimbarea ordinei de distribuție a impulsurilor asigură schimbarea corespunzătoare a sensului de rotație;
- pot fi realizate rezoluții reduse;
- funcționează în regim fără pierderi de pași;
- blocarea rotorului la ultimul impuls de comandă asigură memorarea poziției fără a necesita dispozitive de blocare;
- aceste motoare pot fi implementate în sisteme complexe de conducere prin calculator.

4.3.5. SRA electrohidraulice

Utilizarea acționării hidraulice s-a impus, în special, la mașinile de prelucrare prin eroziune electrică de puteri mijlocii și mari, răspundere motivată de avantajele acestor acționări prezentate la începutul capitolului. Din aceste considerente, sistemele electrohidraulice au cunoscut o largă utilizare pe plan mondial.

Principial, un sistem de acest tip are structura asemănătoare cu cea prezentată în fig.4.5. Realizarea funcției de menținere a interstițiului eroziv, la valori corespunzătoare intervalului probabil de descărcare se realizează prin selectarea proceselor elementare caracteristice, din zona de lucru, cu ajutorul comparatoarelor C1 - pentru nivel superior și C2 - pentru nivel inferior și utilizarea acestor semnale la elaborarea

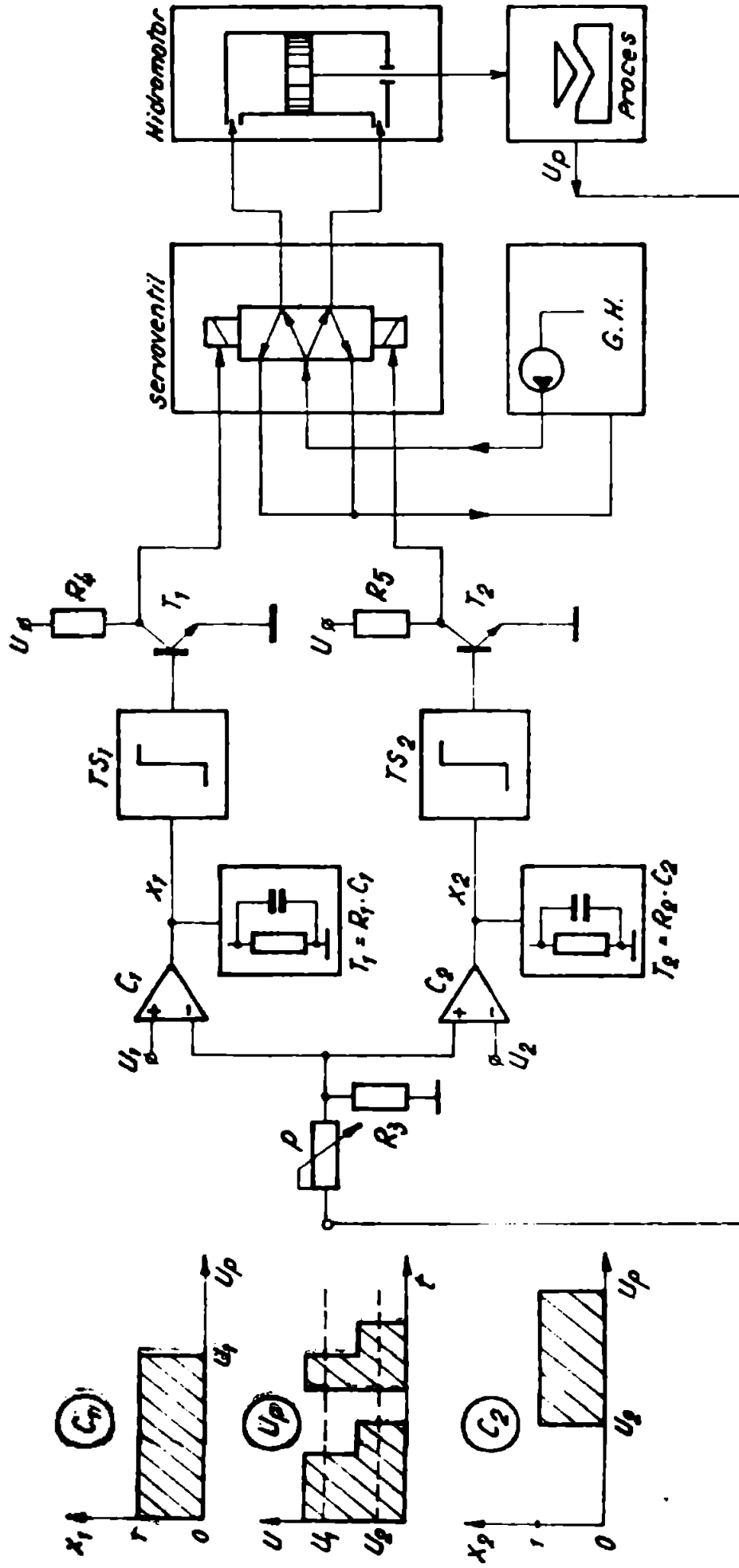


Fig. 4.5 S.R.A electrohydraulic

deciziei de deplasare relativă a obiectului de transfer OT în raport cu obiectul prelucrării OP. Astfel, pentru $U_1 > U_1$, ieșirea comparatorului C_1 devine 0 ($X_1 = 0$), semnalul care acționează asupra triggerului Schmidt TS_1 , cu o întârziere prestabilită prin constanta de timp T_1 a celulei de întârziere de tip RC. Constanta de timp T_1 este astfel calculată încît să corespundă cu o valoare maximă admisă a timpului de întârziere la amorțare T_{dmax} . La durate T_2 , superioare pragului T_{dmax} , tensiunea aplicată la intrarea lui TS_1 atinge nivelul de basculare, producîndu-se, la ieșirea acestuia, un semnal pentru finitarea obiectului de transfer.

Pe durata pauzei dintre procesele elementare, nivelul de tensiune aplicat la intrarea comparatorului C_2 scade, sub valoarea prestabilită prin tensiunea de referință U_2 , rezultînd la ieșirea acestuia un semnal logic $X_2 = 0$. Constanta de timp T_2 , a celulei de întârziere C_2R_2 , este prestabilită pentru o durată de pauză optimă ($T_p opt.$). În situația cînd $T_p > T_p opt.$ se produce bascularea triggerului TS_2 , asigurînd prin aceasta un semnal de îndepărtare relativă a obiectului de transfer în raport cu obiectul prelucrării.

Prin soluția descrisă de sistem se poate face o distincție între procesele elementare efective și cele neproductive. Astfel, pentru mărimile aplicate la intrarea comparatorului C_1 , caracterizate prin inegalitatea $U_1 > U_1$, pe durate superioare duratei prestabilite, sînt puse în evidență fie procesele elementare cu durate exagerate de întârziere la amorțare, fie funcționarea în gol a generatorului.

Pentru mărimile de intrare aplicate comparatorului C_2 , caracterizate prin inegalitatea $U_1 < U_2$, pe durate superioare duratei prestabilite, sînt puse în evidență procesele elementare de scurtcircuit.

Semnalele electrice elaborate, prin logica descrisă sînt aplicate unui servovalvă, prin intermediul căruia se dirijează debitul necesar de fluid motor spre cele două camere de lucru ale hidromotorului liniar (elementul de execuție), prin care se asigură menținerea distanței de scinteiere la valori corespunzătoare. Vitezele de deplasare a pistonului (v), în cele două sensuri, sînt determinate pornind de la ecuația continuității li-

chidelor în conducte:

$$v = Q / S_a \quad (4.13)$$

unde: Q - debitul fluidului de lucru introdus în motor și S_a - secțiunea activă a pistonului.

Calculul hidromotoarelor liniare constă în determinarea presiunii și a debitului necesare dezvoltării forței active la piston și respectiv asigurarea vitezelor de lucru și de poziționare.

CAPITOLUL 5

UTILAJUL TEHNOLOGIC REALIZAT

5.1. Subansamblurile utilajului tehnologic conceput și realizat

Stendul de încercări, prezentat în fig.5.1, este constituit din sistemul mecanic, sistemul generator de impulsuri (GEP-50F), sistemul de lichid dielectric (SLD), sistemele de reglare automată (SRA - I, SRA - II) și sistemul de comandă a poziționării (SCP).

Sistemul mecanic (fig.5.2) este conceput în variantă turnată din fontă cenușie $F_c 200$, avînd rolul de a asigura mișcările necesare de poziționare sau de prelucrare.

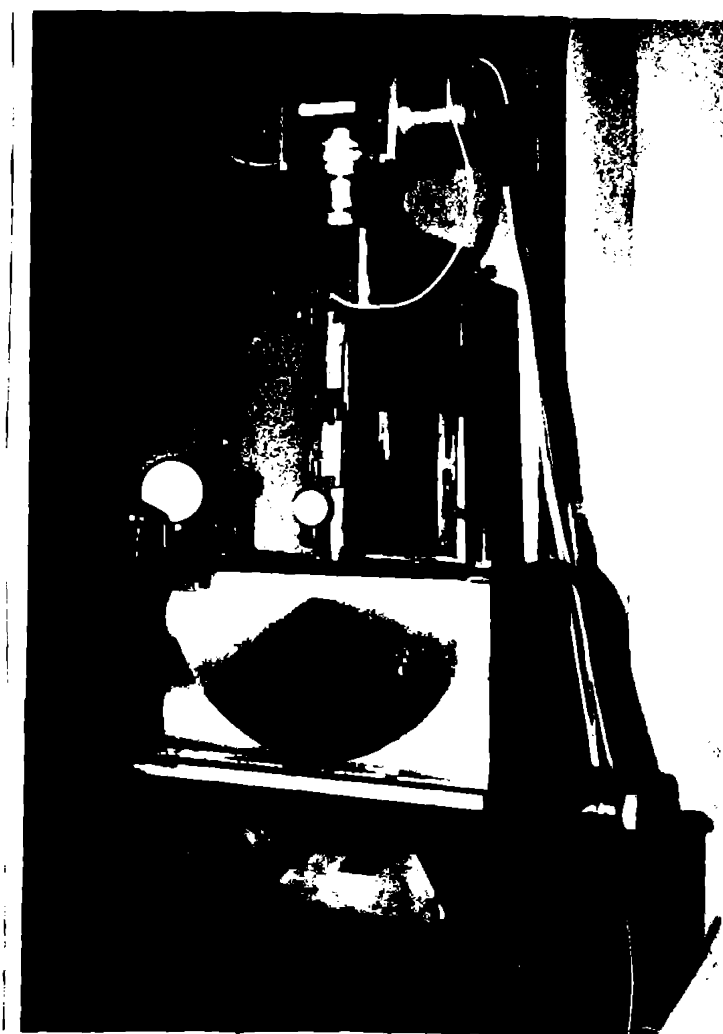


fig.5.2. Sistemul mecanic al mașinii SRC-1.

Mișcarea de poziționare relativă manuală se realizează prin intermediul unui angrenaj pinion - cremalieră, prin care se transformă mișcarea de rotație, a roții de lină corespunzătoare, în mișcare de translație a saniei verticale pe ghidajele unghiulare ale montentului mașinii.

Mișcările de poziționare relativă automată și de lucru sunt efectuate printr-un lanț cinematic comun, constituit din reductorul melcat cu intrare dublă M_1 ($i=40$) și mecanismul șurub-piașiță M_{SP} ($p=4\text{ mm}$), prin care se transformă mișcarea de rotație a șurubului în mișcare de translație a pinolei P, după direcția axei oz (cursa $H=120\text{ mm}$).

Poziționarea semifabricatului, în planul oxy , se realizează manual cu ajutorul săniilor longitudinale (cursa $L_1 = 100\text{ mm}$) și transversale (cursa $l=100\text{ mm}$).

Sistemul de lichid dielectric (SLD), asigură lichidul dielectric necesar atât pentru iberarea zonei de lucru cât și pentru spălarea forțată a acesteia.

Pentru realizarea programului de experimentări s-a conceput, proiectat și parțial realizat un utilaj de prelucrare prin eroziune electrică a cărei execuție finală a fost înteruptă, din lipsa unor elemente importante din structura acestuia, astfel încât s-a recurs la completarea utilajului cu subansambluri din componența mașinii ELSA - ol. Astfel, sistemul de lichid dielectric din dotarea mașinii ELSA - ol, a fost conectat, în paralel, la ambele mașini (fig. 5.3, fig. 5.4), evind posibilitatea de separare a circuitului de umplere, prin robinetii RCL 1 și RCL 2 și a circuitului de spălare forțată a zonei de lucru, prin robinetii RLC 1 și RLC 2. Pentru măsurarea presiunii de spălare s-a prevăzut manometrul M. Conectarea sistemului de lichid dielectric la unul din cele două utilaje se poate realiza într-un timp foarte scurt cu ajutorul robinetilor amintiți.

Sistemele de reglare automată analizează măsurile electrice din zona de lucru și funcție de starea acestora adoptă deciziile necesare pentru evoluția viitoare a procesului. Sistemul SMA - I este destinat conducerii automate a procesului, pentru cazul prelucrării cu impulsuri comandate, iar sistemul SMA - II este destinat conducerii automate a procesului pentru cazul când prelucrarea se realizează cu impulsuri de

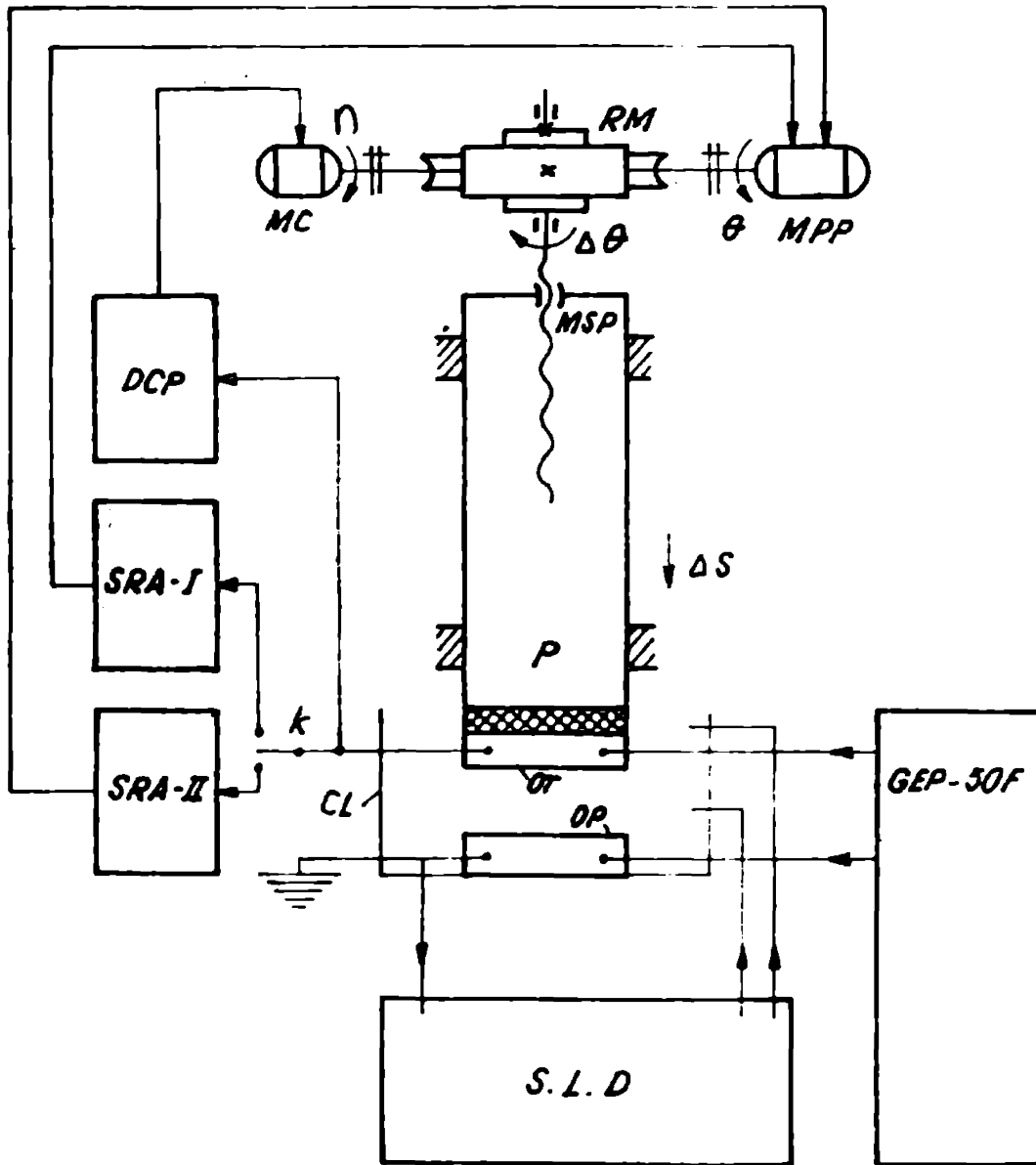


Fig. 5.1 Schema de principiu a mașinii ERO-1

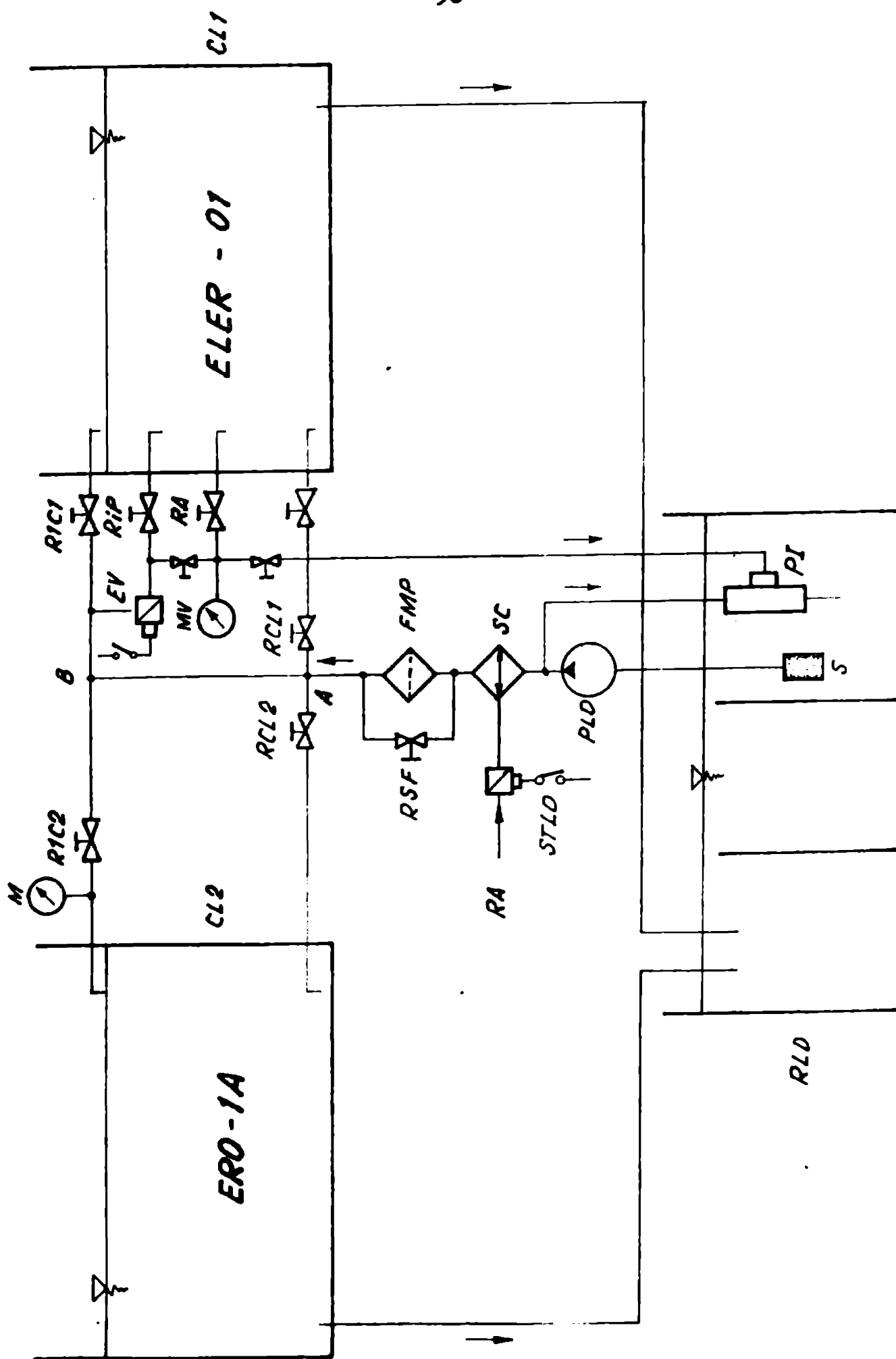


Fig. 5.3 Schema alimentării cu lichid dielectric a utilajului de prelucrare prin eroziune electrică.



Fig.5.4. Modul de alimentare a utilajului tehnologic cu lichid dielectric.

relaxare. In primul caz se utilizează ca mărime de măsurare o tensiune integrată pe duratele de întârziere la amorțare (mărime electrică hibridă), iar în cazul al doilea se utilizează tensiunea medie din interstițiu (mărime electrică analogică).

Sistemul de poziționare asigură deplasarea rapidă a binolei, cu ajutorul unui motor de curent continuu (M_{cc}), până ce distanța dintre O_1 și OP ajunge în domeniul interstițiului de lucru, poziție în care se anulează această mișcare și are loc comutarea automată a comenzii de avans la lucru.

In ansamblu, standul mai conține trei numărătoare electronice, tip 4-0202 A (A3A), destinate numărării procedurilor elementare de lucru și a deplasărilor încercate ale elementului de execuție și un osciloscop cu spot luminos, tip 4-11/1 (U330), necesar pentru oscitografiera procedurilor rapide și încercate nunc-

te ale sistemului. vederea generală a standului este redată în fig.5.5, iar în fig.5.6, se prezintă schema constructiv funcțională a acestuia.

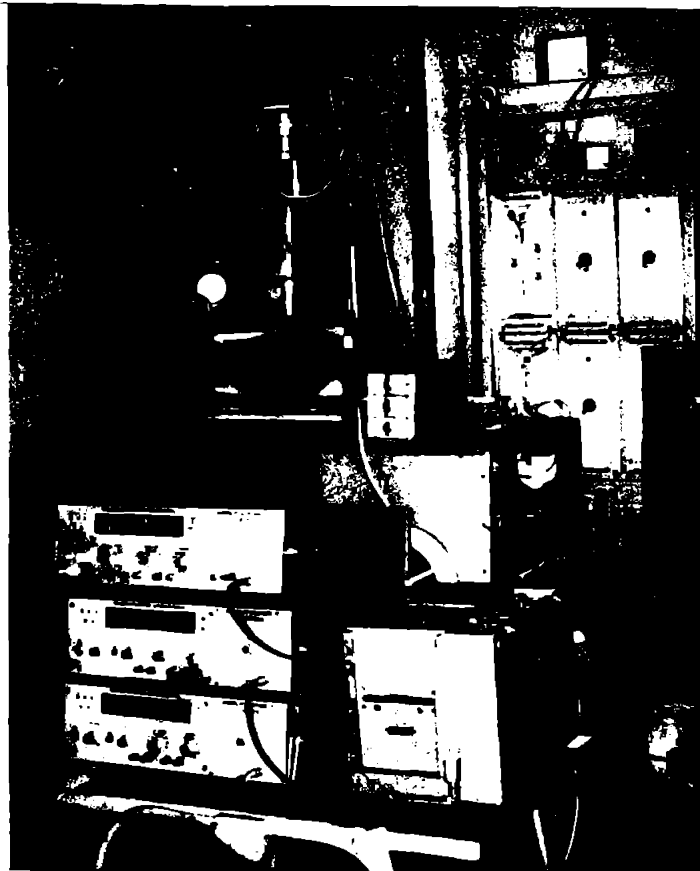


Fig. 5.5. Vedere generală a standului experimental.

5.2. SRĂ experimentată

5.2.1. sistemul SR. - 1

Amplitudinile electrice discrete din proces U_n (fig.5.6), sînt selectate, în amplitudine, cu ajutorul diodelor Zener D_{z1} ($U_D \geq 40 \text{ V}$) și D_{z3} ($U_D \geq 6,2 \text{ V}$) și convertite la nivelul U_H (5 V) prin divizorul rezistiv $R_1 R_2$ și dioda Zener D_{z2} , pentru nivelul superior U_H și divizorul rezistiv $R_3 R_4$ și dioda Zener D_{z4} pentru nivelul inferior U_L . Semnalele obținute sînt aplicate la intrările triggerelor Schmitt TS_1 și TS_2 (cu 413 s) rezultînd la ieșirile acestora semnalele negate $\overline{U_H}$ și $\overline{U_L}$. Semnalul $U_L = \overline{U_L}$ negat, prin portul logic P_1 (SI-NU), este aplicat la intrarea de set a circuitului basculant bistabil tip K-5, iar la intrarea de reset fiind conectat semnalul $\overline{U_H}$. Funcție de succesiunea logică a acestor semnale sînt selectate următoarele stări:

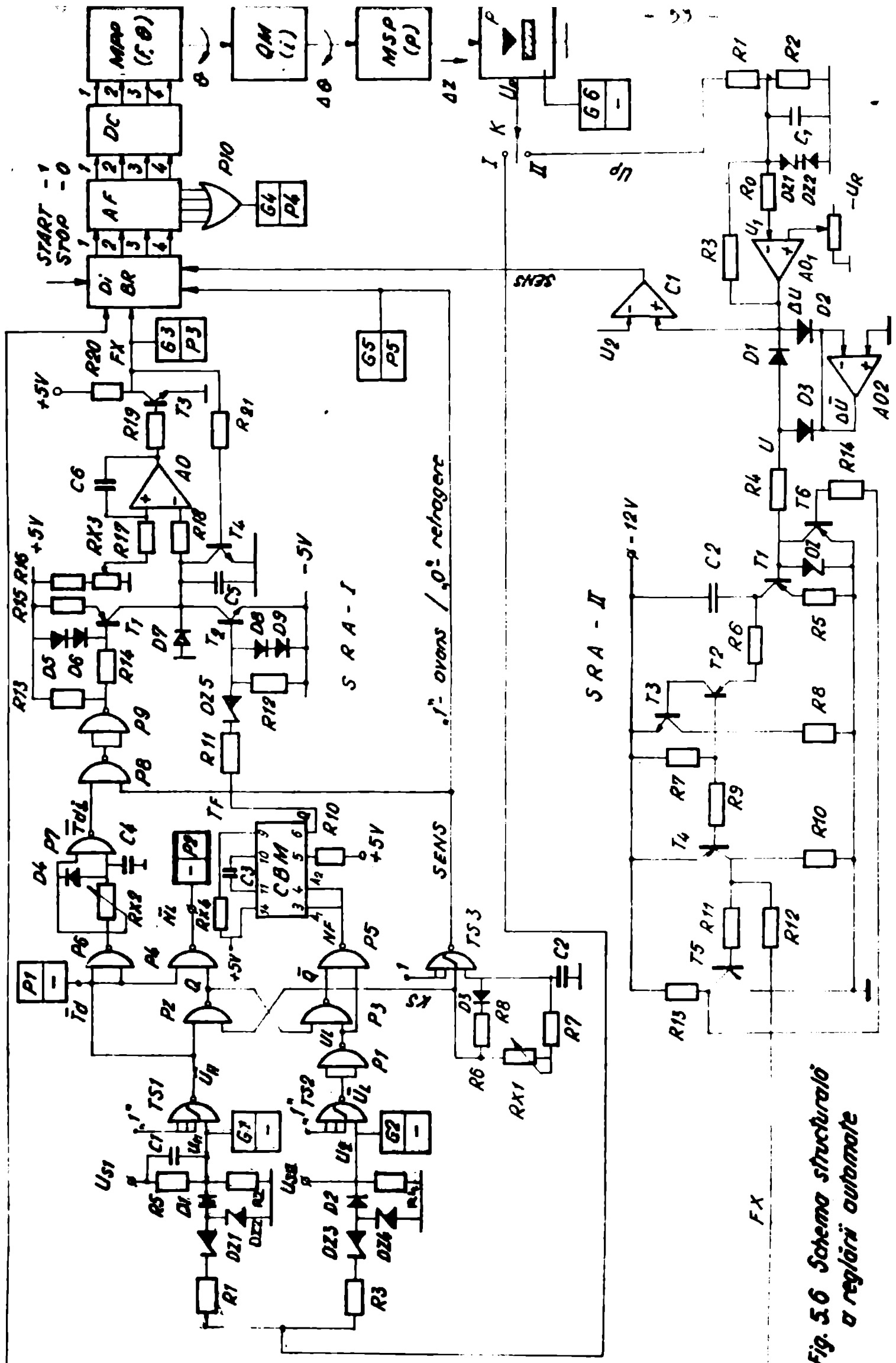


Fig. 5.6 Schema structură a reglării automate

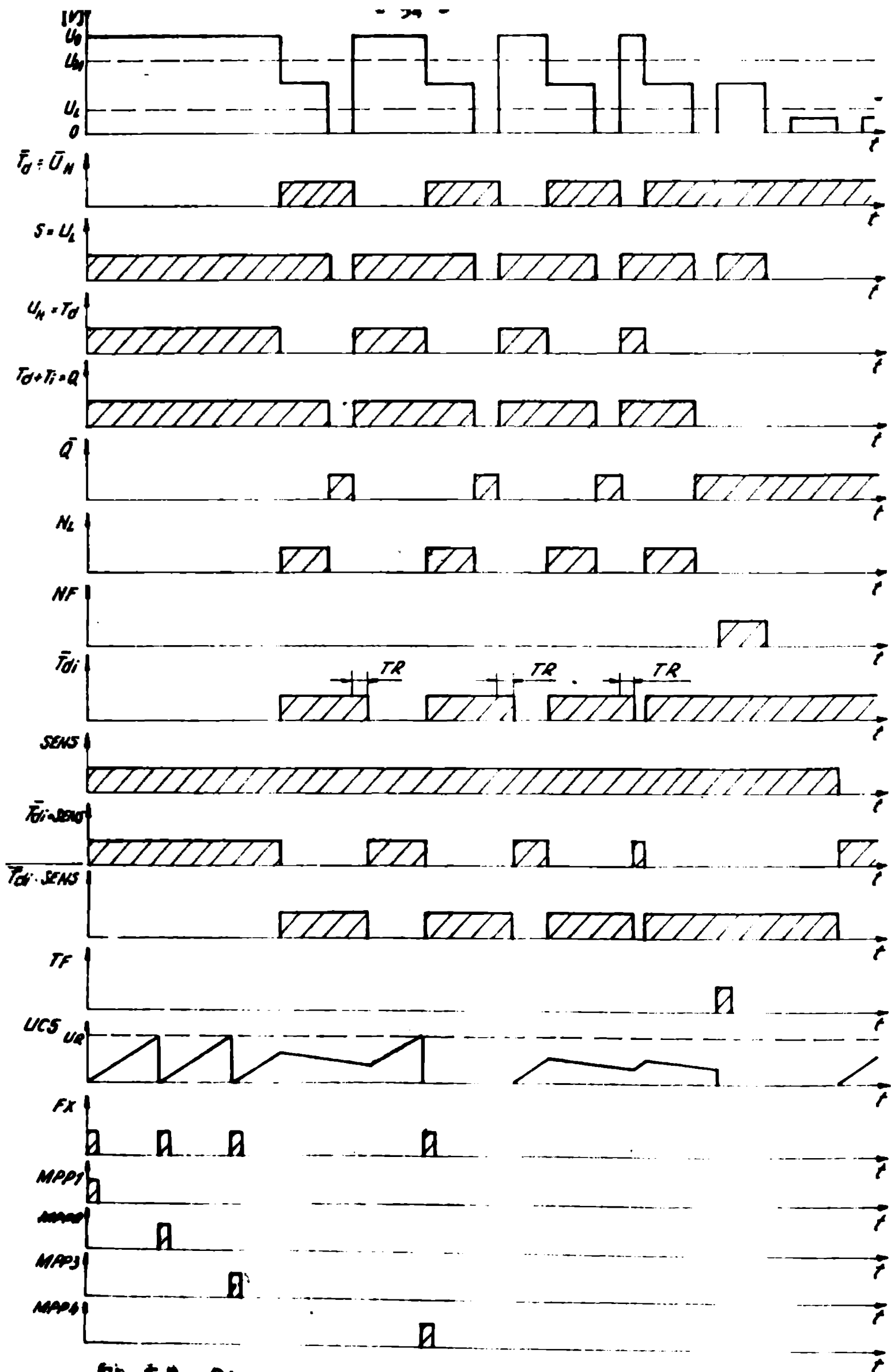


Fig. 5.8 Diagrama prelucrării semnalelor în sistemul SRA-I

- $\overline{N}_L = \overline{C \cdot U_H}$ - procese elementare de lucru;
- $\overline{N}_F = \overline{C \cdot U_L}$ - procese elementare fictive;
- $\overline{N}_S = \overline{C}$ - procese elementare de scurtcircuit

(pentru $T_p > T$).

Semnalul $\overline{T_d} = \overline{U_H}$ este negat prin poarta logică P_6 ($T_d = \overline{\overline{T_d}}$), și apoi întârziat prin celula de integrare $R_{x2}-C_4$, obținându-se, la ieșirea porții logice P_7 , semnalul $\overline{T_{di}}$ întârziat cu mărimea T_R prestabilită experimental. Durata întârzierii $T_R = k \cdot R_{x2} \cdot C_4$, a fost optimizată experimental în funcție de stabilitatea și performanțele sistemului de prelucrare.

Semnalul $\overline{T_{di}}$.SEKS, obținut la ieșirea porții logice P_9 , este aplicat convertorului timp-tensiune (CT/U) constituit dintr-o sursă de curent constant ($T_1, R_{13}, \dots, R_{15}, D_5, D_6$) și condensatorul C_5 . Tensiunea integrată pe condensatorul C_5 este aplicată la intrarea inversoare a amplificatorului operațional AO ($\mu A 741$), utilizat în montaj de comparator. Intrarea neinversoare a comparatorului este conectată la tensiunea de referință U_R , de amplitudine reglabilă, prin divizorul rezistiv $R_{16}-R_{x3}$. Tensiunea de referință U_R stabilește frecvența maximă de lucru a convertorului tensiune-frecvență (CU/F_x), constituit din elementele $C_5, AO, C_6, T_3, T_4, R_{x3}$ și R_{16}, \dots, R_{21} .

Pentru semnale $U_{c5} < U_R$, semnalul de la ieșirea AO este pozitiv și produce saturarea tranzistorului T_3 (BC 171), obținându-se, pe colectorul acestuia, un semnal logic "0" (0 V). În momentul când semnalul $U_{c5} = U_R$, ieșirea amplificatorului AO basculează la un nivel negativ, producând blocarea tranzistorului T_3 , pe o durată modulată de procesele tranzitorii din condensatorul din bucla de reacție C_6 , obținându-se pe colectorul tranzistorului T_3 un semnal logic "1" (5 V). Acest semnal este utilizat atât la descărcarea condensatorului C_5 , cu ajutorul tranzistorului T_4 , cât și la blocul de comandă al elementului de execuție - motor electric rotativ pas cu pas.

Blocul de comandă al motorului este constituit din distribuitorul de impulsuri (DI), prin intermediul căruia trenul impulsurilor de comandă, de frecvență F_x , este transformat într-un sistem n fazat de impulsuri, a căror succesiune este comandată de către blocul de reverșare (BR) al motorului de rotație al motorului.

lui. Impulsurile astfel obținute sînt aplicate, prin intermediul unor amplificatoare formatoare (AF), dispozitivului de comutație (DC), care realizează cuplarea succesivă a înfășurărilor de comandă la sursa de tensiune continuă a motorului.

Pentru modificarea succesiunii impulsurilor, în scopul inversării sensului de rotație al motorului, sînt utilizate semnalele Q, integrate pe o durată prestabilită experimental prin constanta de timp C_2R_{x1} , și apoi aplicate la intrarea porții logice TS_3 (trigger Schmitt), care stabilește la ieșire semnalele: "1" logic - pentru mișcarea de avans de lucru și "0" logic - pentru mișcarea de retragere. Ieșirea lui TS_3 este aplicată atât blocului de reversare BR, pentru asigurarea sensului necesar de deplasare, cît și porții logice P_8 , pentru asigurarea funcționării corespunzătoare a elementelor din bucla de formare a semnalelor de comandă F_x .

Impulsurile fictive K_F , obținute la ieșirea porții logice P_5 (SI-NU), sînt aplicate circuitului basculant monostabil CMB (CDB 4121) care emite la ieșire un semnal de durată T_F , prestabilită experimental cu ajutorul elementelor pasive R_{x4} și C_3 . Acest semnal are rolul de a pune la masă condensatorul C_5 , de durată impulsului T_F , prin intermediul tranzistorului T_2 (BC 171), asigurînd prin aceasta, mărirea forțată a duratei de integrare a tensiunii pe condensatorul C_5 și deci menținerea poziției relative inițiale dintre OT și OP.

Schema bloc a sistemului descris este prezentată în fig.5.7, iar modul de prelucrare a semnalelor, în diverse puncte ale schemei electronice (fig.5.6), este redat în fig.5.8.

5.2.2. Sistemul SMA - 11

Sistemul SMA - 11 (fig.5.6) este destinat conducerii automate a procesului în condițiile prelucrării cu impulsuri de relaxare. Sistemul analizat utilizează ca mărime de referență tensiunea medie pe interstițiu, convertită la nivel TTL (semnalul u_1) prin intermediul divizorului rezistiv R_1R_2 și diodele Zener de protecție D_{z1} și D_{z2} . Mărirea u_1 , împreună cu tensiunea de referință,

sunt aplicate, prima la intrarea inversoare, iar ultima la intrarea neinversoare a regulatorului constituit din amplificatorul operațional AO₁, de tip proporțional (cu reacție rezistivă).

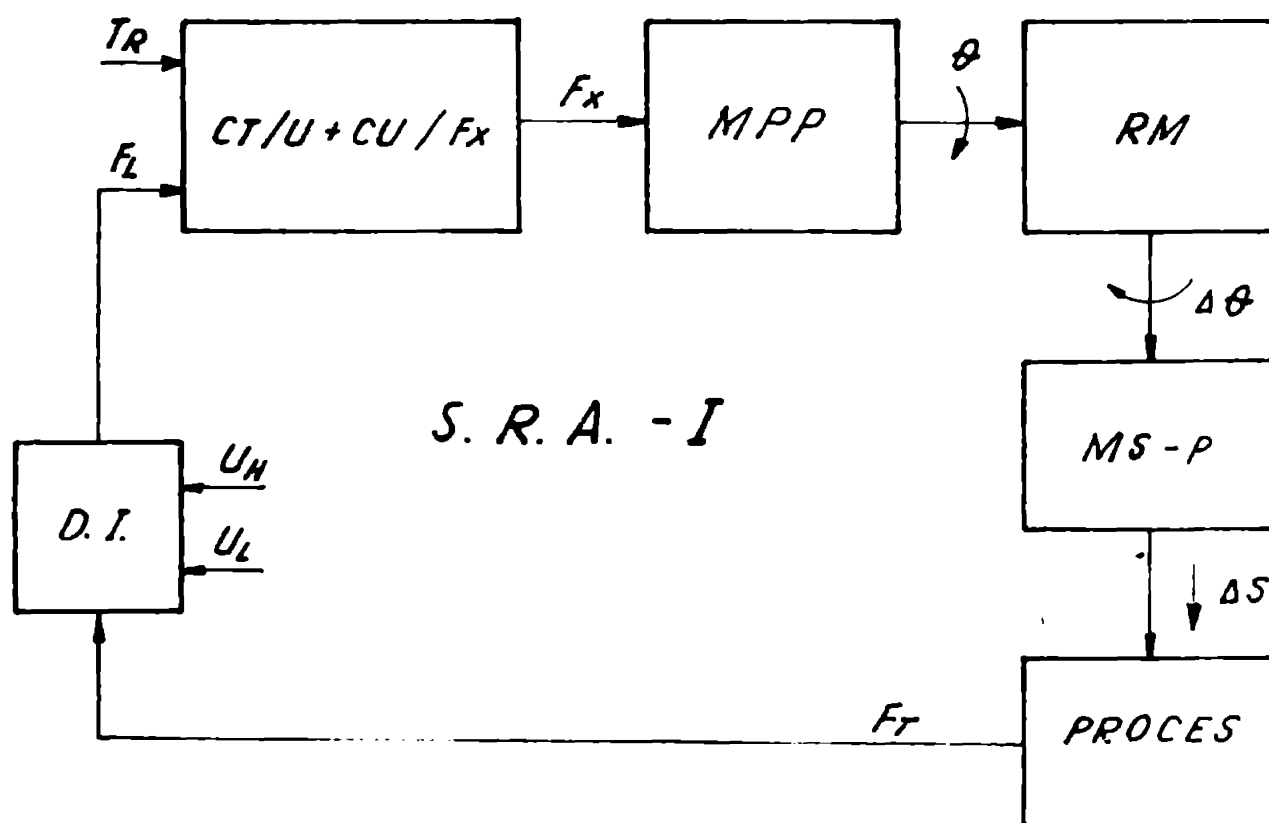


Fig.5.7 Schema bloc a sistemului SRA - I.

Semnalul și amplitudinea măsurii de ieșire θ sunt determinate de poziția momentană a măsurii U_1 în raport cu mărimea de referință U_R și dau informații referitoare la sensul de deplasare și la viteza instantanee de variație a măsurii interstițiului pentru a conduce procesul în domeniul de stabilitate maximă.

Decizia de deplasare este stabilită prin semnalul SENS (1 - AVANS; 0 - RETRAGERE), rezultat din compararea măsurii ΔU cu mărimea de referință U_2 , în circuitul comparator C_1 (CLS 2711). Pentru valoarea $\Delta U > 0$ se obține decizia de avans de lucru (SENS), iar pentru $\Delta U < U_2$, decizia de îndepărtare relativă a OP în raport cu OP.

Viteza instantanee de deplasare a OP, în decursul

desfășurării procesului, este determinată de amplitudinea mărimii $\Delta U > 0$. Mărimea ΔU poate avea fie valori negative fie valori pozitive. Valorile pozitive sînt dirijate la amplificatorul operațional μO_2 , conectat în montaj de inversor, la ieșirea căruia se regăsește semnalul de la intrare cu semn schimbat.

Transformarea mărimii analogice ΔU într-un semnal discret, necesar pentru funcționarea elementului de execuție, se realizează cu ajutorul convertorului tensiune - frecvență CU/F_x (fig.5.6). Semnalul de intrare U deschide tranzistorul T_1 și prin aceasta se stabilește circuitul electric al condensatorului C_2 . Creșterea exponențială a tensiunii pe condensator atinge pragul de deschidere al tranzistoarelor T_2 și T_3 . Saturarea lui T_3 produce blocarea tranzistorului T_4 , obținându-se, de pe colectorul ultimului un semnal discret de frecvență F_x ($F_x = 0 \dots \dots 160 \text{ Hz}$), dependentă de amplitudinea semnalului ΔU . Potențialul de pe colectorul tranzistorului T_4 , produce blocarea tranzistorului T_5 , a cărei tensiune negativă (-12 V), de pe colector, pune la masă baza tranzistorului T_1 blocîndu-l și prin aceasta se întrerupe circuitul electric al condensatorului C_2 , pînă în momentul în care T_3 este din nou saturat și respectiv tranzistoarele T_4 și T_5 sînt blocate. Durata de blocare a tranzistoarelor T_4 și T_5 este condiționată de nivelul tensiunii integrate pe condensatorul C_2 , care, la depășirea pragului inferior, produce blocarea tranzistoarelor T_2 și T_3 .

Schema bloc a sistemului descris este prezentată în fig.5.9, schema prelucrării semnalelor, în diverse puncte ale sistemului este redată în fig.5.10, iar vederea de ansamblu a materializării schemei electronice (fig.5.6) este prezentată în fotografia din fig.5.11.

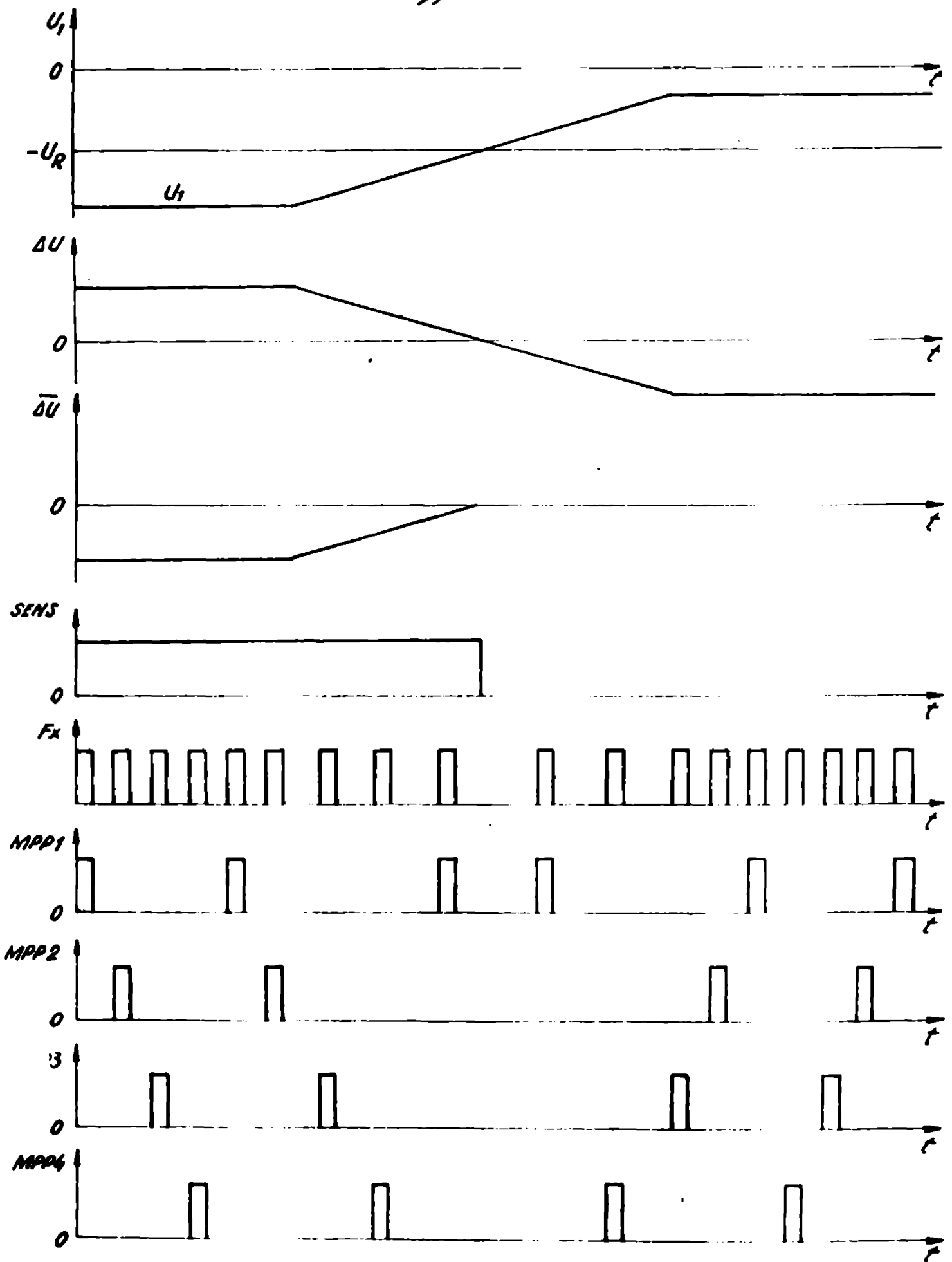


Fig. 5.10 Diagrama prelucrării semnalelor în sistemul SRA-II.

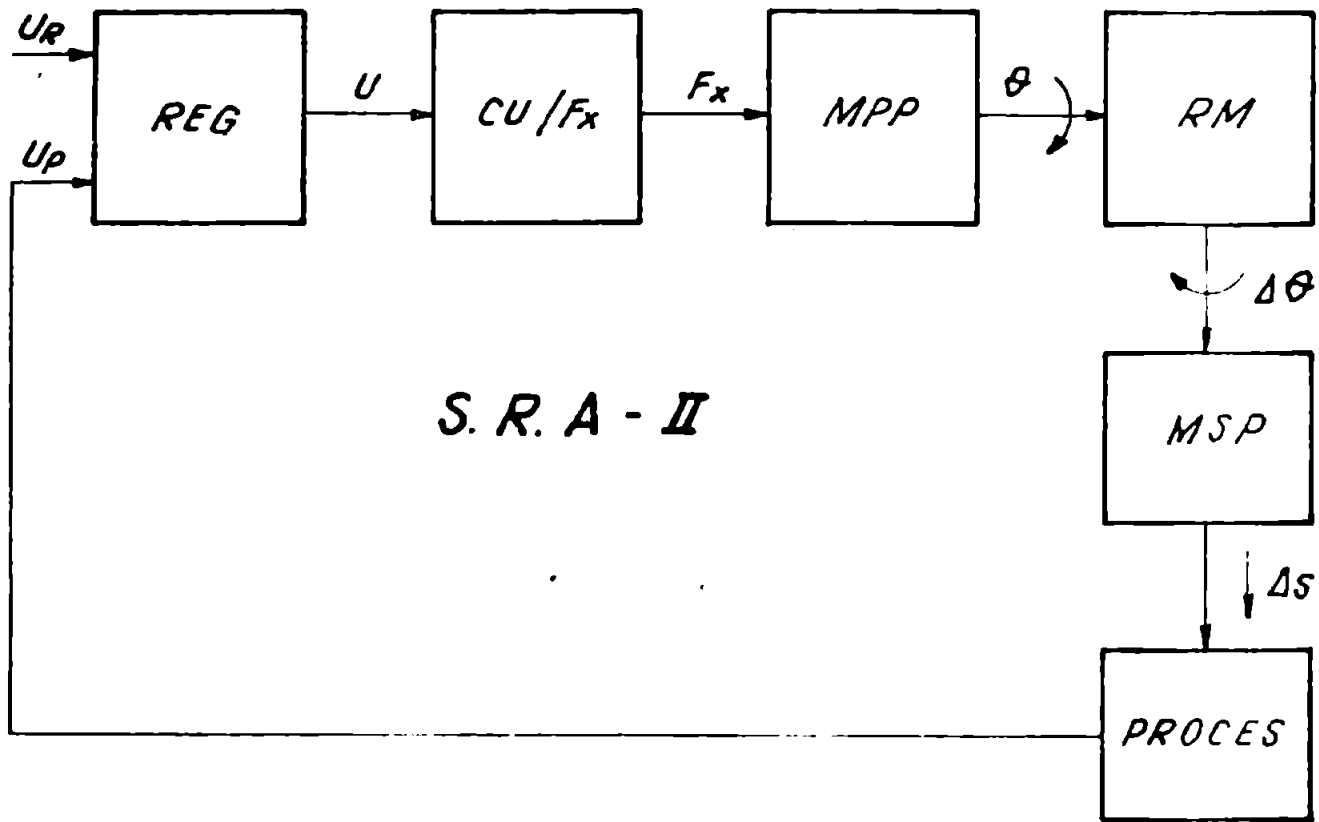


Fig. 5.9 Schema bloc a sistemului S. R. A - II.



Fig. 5.1 . Vedere de ansamblu a sistemului S. R. A - II.

5.3. Considerații privind dispozitivul de comandă a mișcării de poziționare

Schema bloc a dispozitivului este redată în fig. 5.12. Acesta este conceput pentru a efectua un ciclu automat constituit din mișcările: apropierea rapidă a obiectului de transfer de la obiectul prelucrării, sesizarea momentului modificării parametrilor electrice din proces și îndepărtarea elementară a celor doi electrozi, pe o distanță prestabilită prin elementele structurale ale dispozitivului. Indepărtarea relativă elementară se realizează cu scopul de a asigura un spațiu care să corespundă cu valoarea maximă a distanței de scinteiere dintre electrozi, poziție în care are loc trecerea automată a controlului procesului pe unul dintre sistemele automate de avans (SMA - I sau SMA - II) din structura mașinii. Funcțiile menționate sunt realizate cu ajutorul semnalelor X_3 și X_5 , dependente de poziția relativă a elementelor OT - OP și de valorile prestabilite ale rețelei de întârziere RT, prin intermediul cărora poate fi acționat unul dintre cele două rele de sens de mișcare: R_1 - apropiere, R_2 - îndepărtare. Astfel, prin realizarea inițială a contactului K, semnalul \bar{X}_1 determină starea bistabilului BA al cărui semnal de ieșire X_2 este amplificat în amplificatorul A_1 și apoi este aplicat elementului de comutație EC₁ prin care se alimentează releele R_1 , asigurându-se astfel comanda de deplasare pentru apropierea elementelor OT - OP.

În momentul modificării parametrilor electrice din proces (tensiunea), semnalul X_1 sesizează această stare și produce schimbarea stării bistabilului BA, asigurându-se astfel comanda pentru decuplarea releului R_1 ($X_3 = 0$). Concomitent cu decizia de întrerupere a mișcării OT, semnalul X_1 este aplicat și rețelei de întârziere RT (de tip RC), care după întreruperea unei anumite amplitudini de tensiune, prestabilite prin constante de timp a elementului respectiv, modifică starea triggerului Schmitt TS, care prin semnalul X_4 , obținut la ieșire, asigură conectarea releului R_2 de inversare a sensului de mișcare pentru

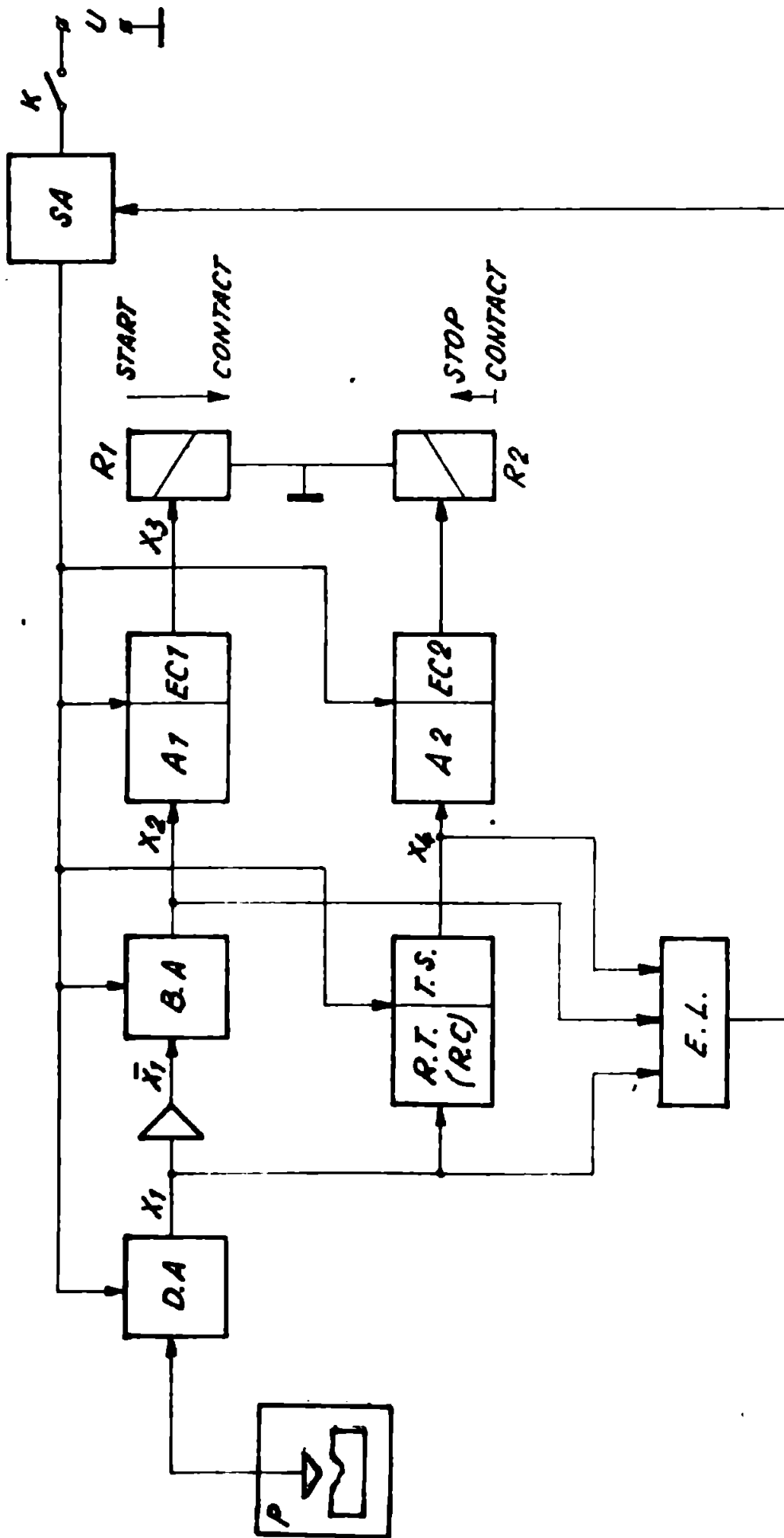


Fig. 5.12 Schema bloc a dispozitivului de comandă a deplasării

îndeștarea relativă a obiectului de transfer OT de obiectul prelucrării OP . Valoarea acestei deplasări este limitată de constanta de timp a rețelei de întârziere. O dată cu îndeștarea electrozilor are loc refacerea parametrilor electrici din proces, la valoarea inițială, ceea ce conduce la scăderea lentă a tensiunii din elementul MT , cu o constantă de timp prestabilită și la o anumită amplitudine a acestei tensiuni se produce bascularea triggerului în starea inițială, întrerușind prin aceasta alimentarea releului K_2 și deci oprirea mișcării de poziționare și comutarea controlului procesului pe bucla de reglare automată a avansului.

Elementul logic EL sesizează, prin semnalele X_1, X_2, X_4 , terminarea ciclului de poziționare și acționează asupra sursei de alimentare SA pentru întreruperea alimentării circuitului de poziționare.

C A P I T O L U L 6

CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE

6.1. verificarea rapidității de răspuns a sistemului electro-mecanic

Standul destinat acestui scop este prezentat, sub formă de schemă bloc, în fig.6.1.

Înregistrarea semnalelor produse în punctele G_i ($i=1, \dots, 6$) s-a realizat pe hîrtie fotosensibilă specială, cu ajutorul unui oscilograf cu spot luminos tip H 117/1 (BRSS), utilizat pentru înregistrarea proceselor rapide a căror frecvență nu depășește 15 KHz. Modul concret de conectare a galvanometrelor oscilografului, este prezentat în fig.5.6, în care s-au respectat aceleași notații G_i , pentru punctele de testare, corepunzătoare ambelor figuri de referință.

Intrucît procesele tranzitorii și staționare (momentane) decurg cu rapiditate ridicată ($f = 100$ Hz pentru condițiile de testare a mașinii în gol), s-a necesitat adoptarea unor viteze mari de deplasare a hîrtiei fotosensibile ($v = 1000 \dots 5000$ mm/s), și în plus, hîrtia fotosensibilă utilizată nu a avut termenul de garanție depășit, motiv pentru care nu s-a putut realiza o reproducere prin fotografiere a mărimilor înregistrate, ci s-a recurs la reproducerea, la scară, a acestor mărimi, prezentate concentrat în fig.6.2.

Testarea în gol a sistemelor electronic și mecanic se realizează prin aplicarea, la intrarea sistemului, unui semnal tip treaptă unitară ($G_1 \equiv U_1, G_2 \equiv U_2$) și înregistrarea evoluției acestuia în diverse puncte G_i ale sistemului de lucru considerat.

Semnalul treaptă unitar a fost obținut cu ajutorul

unui generator de impulsuri GI, care a fost proiectat pentru realizarea unor impulsuri cu coeficientul de amplere $K_g = 0,5$ și frecvența de repetiție $f = 50$ Hz. Cele două măriri de proiectare au avut ca scop obținerea a două semnale de comandă, pentru fiecare nivel al semnalului aplicat la intrare. Astfel, pentru $G_{1,2} = 1$, semnalul SENS = 1 (evens de lucru), sînt realizați doi pași de înaintare a obiectului de transfer înspre obiectul prelucrării. Pentru semnalul $G_{1,2} = 0$ (retragere), semnalul SENS = 0, asigurîndu-se doi pași în sens invers cazului anterior. Prin logica descrisă s-a căutat să se obțină trenuri de impulsuri, în sensuri opuse, pe direcția de deplasare oz, putîndu-se astfel evidenția comportarea dinamică însumată a sistemelor electronic, electric și mecanic. Comportarea dinamică globală, a sistemului, se analizează prin evoluția caracteristicii dinamice a poziției relative OT - OP, pe duratele de acțiune ale mărimilor de comandă generate de sistem. Poziția relativă a elementelor mecanice din proces a fost analizată cu ajutorul unui traductor inductiv tip TIC - 16.10, care, împreună cu puntea tensoelectrică E - 2301, transformă deplasarea discretă relativă în semnale electrice (G_6) proporționale cu aceasta.

Graficul $G_6 = f(t)$ arată că răspunsul este de tip oscilatoriu amortizat, cu amplitudinea monoton descrescătoare. De remarcat că oscilațiile amortizate au frecvența egală cu cea a fundamentalei nefiind evidențiate armonici ale acestuia.

Forțele de amortizare, din structura elastică a sistemului considerat, sînt determinate de disiparea energiei vibrațiilor în materialele pieselor componente (amortizare internă) și de forțele de frecare din îmbinările acestora (amortizare de frecțiune) /15,52/.

Amortizarea internă, cauzată de deformările plastice ale grăunților structurii metalice, absoarbe numai o parte relativ mică din energia totală disipată în sistemul elastic considerat.

Amortizarea de frecțiune, depinde de natura lubrifiantului utilizat în cuplurile cinematice (crește cu viscozitatea lubrifiantului), de presiunea de contact (crește cu creșterea frecării), de calitatea suprafețelor conjugate (există o rugozitate optimă pentru o presiune dată, valorile extreme ale

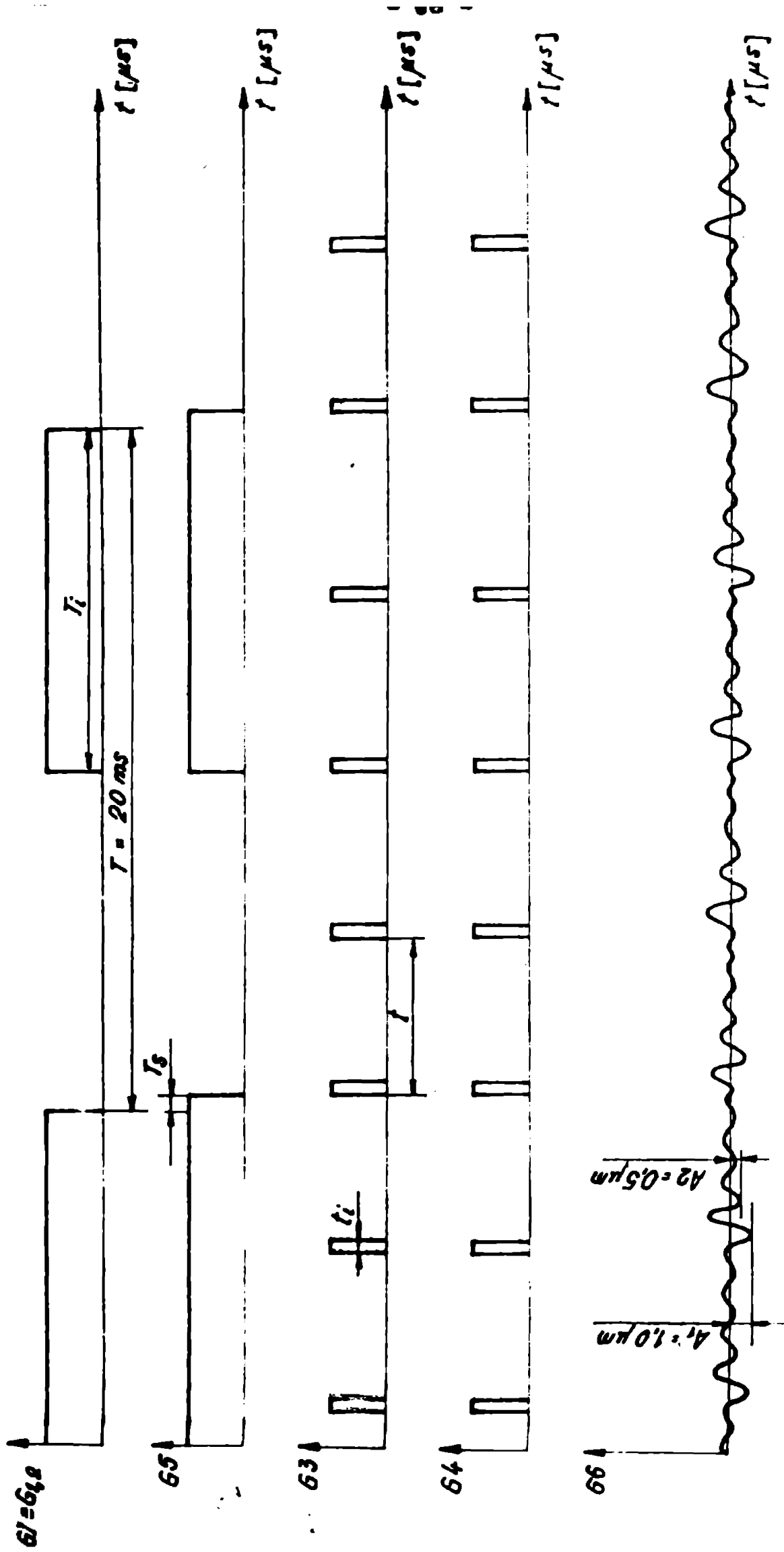


Fig. 6.2 Diagrama semnalelor obținute la verificarea rapidității de răspuns a sistemului

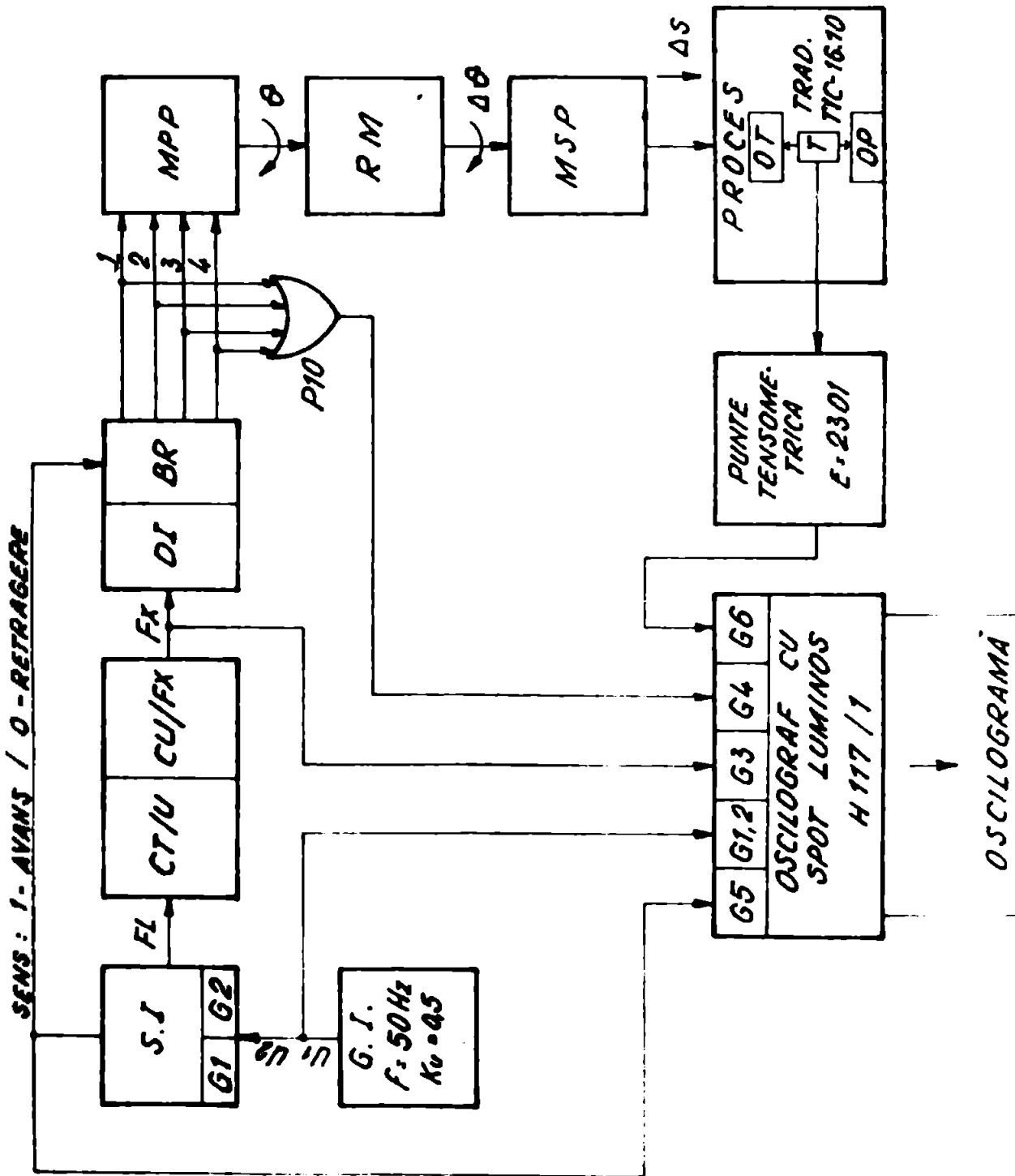


Fig. 6.1 Schema bloc a standului experimental

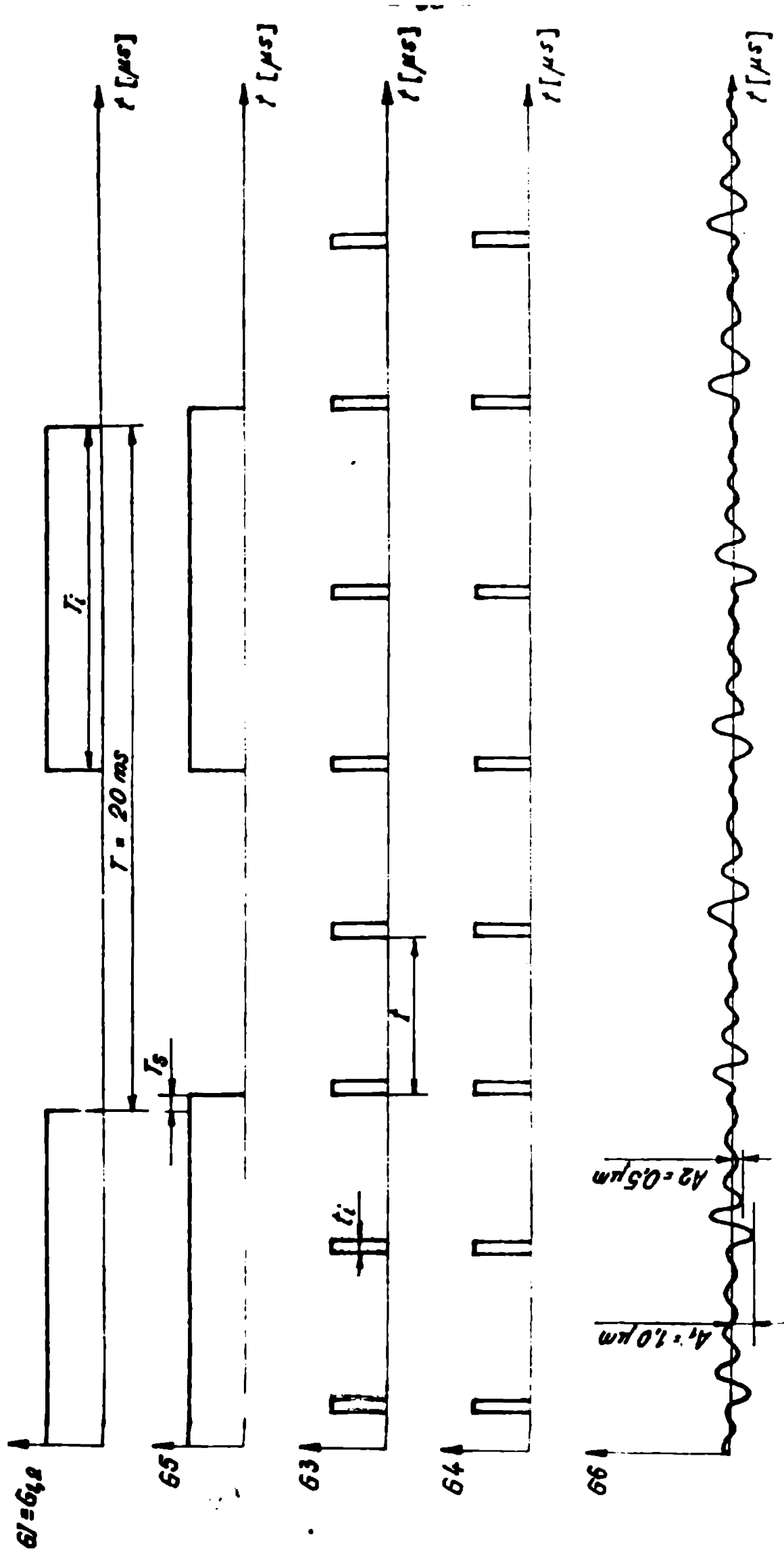


Fig. 6.2 Diagrama semnalelor obținute la verificarea rapidității de răspuns a sistemului

rugozității conducând la amortizări reduse), de perechea de materiale ale cuplului cinematic considerat și de alți factori.

Calculul coeficientului de amortizare se realizează în mod indirect, cu ajutorul oscilogramelor vibrațiilor libere înregistrate (pornirea motorului electric, accelerarea și frinarea mișcării subansamblurilor mobile etc.) se calculează decrementul logaritmic:

$$\lambda = \ln(A_1/A_2) = 0,693 \quad (6.1)$$

iar din expresiile dependenței dintre acesta și mărimile ce caracterizează amortizarea în sistemul elastic, se obține coeficientul de amortizare. Determinarea cu precizie a coeficientului de amortizare, necesită cunoștințe teoretice și experimentale suplimentare analizei efectuate, motiv pentru care s-au făcut referiri numai la decrementul logaritmic și la concluziile care au în vedere amortizarea în instalația prezentată.

Valoarea decrementului logaritmic, obținută din relația (6.1), arată că sistemul mecanic adoptat are o influență pozitivă asupra amortizării vibrațiilor dezvoltate. Pentru comparare, se consideră decrementul logaritmic al unui strung

$\lambda = 0,25$, valoare specificată în /52/. Amortizarea bună, din sistemul mecanic, s-a obținut în condițiile: cuplurile cinematice au fost realizate din perechea de materiale oțel/teflon, elementele cu deplasare relativă au fost unse cu ulei și vaselină, rugozitatea suprafețelor mobile conjugate a fost asigurată la $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, presiunea adecvată din cuplurile cinematice a fost stabilită experimental etc.

Continuarea sistemului vibrator, pe durata dintre deplasările discrete, nu are efecte negative deoarece amplitudinea oscilațiilor este relativ mică ($A < 0,6 \mu\text{m}$), fiind insuficientă pentru a deplasa obiectul de transfer în afara domeniului optim de eroziune. Astfel, sînt evitate atât stările de scurtcircuit momentan, la deplasarea pozitivă (avans de lucru), cit și stările de intreruperi momentane ale procesului eroziv, la deplasări negative (retragerea obiectului de transfer). Faptul de motivația prezentată se poate afirma că această stare are un efect favorabil (reduc), prin vibrarea produsă, determinîndu-se un anumit grad de pompare a lichidului dielectric, cu efect de

îmbunătățire a evacuirii produselor eroziunii din zona de lucru.

Analizând materialul grafic din fig.6.2, se constată că semnalul G_5 este întârziat, pe frontul căzător, cu valoarea dată de constanta de timp a circuitului detector de sens (triggerul Schmitt TS_3) $T_s = K \cdot R_{x1} \cdot C_2$ (fig.5.6).

Semnalele, de comandă F_x (G_3) și de la ieșirea blocului de reversare BR (G_4), au întârzieri foarte reduse, cauzate de întârzierile produse în diversele circuite electronice din bucla de reglare automată considerată.

Semnalul G_6 , cules de pe traductor, arată că decalajul temporar redus dintre acesta și semnalul G_4 este determinat de constanta de timp electromecanică și nu de neliniaritățile din sistemul mecanic. Neliniaritățile de tip treaptă de întârziere (tipică unor fribinări cu joc) și de tip histerezis (caracteristică cuplurilor cinematice cu forțe de frecare mai mari decât forțele exterioare) au fost eliminate prin prefecțiuni corespunzătoare, utilizate pentru îmbunătățirea caracteristicilor de funcționare. Astfel, s-au folosit soluții tipice cu preluare de joc, atât în reductorul melcat cât și la mecanismul șurub - piuliță. Soluțiile respective sînt materializate prin secționarea roții melcate, într-un plan normal pe axa acestuia și solăcitarea celor două elemente de roată, cu o forță tangențială care să deosească forța tangențială dezvoltată la roată, și respectiv, realizarea unui mecanism șurub-piuliță la care piulița este realizată din două părți solicitate axial, în sensuri opuse, cu ajutorul unui element elastic, care dezvoltă o forță superioară forței determinate de partea mobilă antrenată. Ambele soluții au ca scop solicitarea permanentă a elementelor secționate ale mecanismelor adontate, asigurându-se contacte permanente pe flancurile opuse ale elementelor nesecționate, eliminându-se astfel jocurile mecanice din mecanismele de transmitere și transformare a mișcării.

6.2. Funcțiile de transfer ale elementelor implementate în sistemele automate adoptate

În scopul determinării funcțiilor de transfer

de unele elemente specifice din structura sistemelor automate descrise, s-au conceput și realizat standuri experimentale cu ajutorul cărora au fost obținute datele necesare experimentale pentru determinarea modelelor matematice asociate ale acestor elemente. În acest scop s-au utilizat două metode de analiză:

- metoda experimental-teoretică, aplicată elementelor speciale din sistem, prin care datele experimentale obținute au fost interpretate matematic cu un anumit grad de aproximație;

- metoda teoretică, aplicată elementelor de uz general, prin care s-a recurs la prelucrarea și adaptarea corespunzătoare a unor modele matematice din literatura de specialitate /4,7,11,12,68,69,75/.

Observații: 1. Pentru a facilita scrierea expresiilor matematice, atât în text cât și în limbajul de programare utilizat, se vor opera unele modificări ale notațiilor consacrate în teoria reglării automate, după cum urmează: frecvența de lucru $\omega = F$, frecvența proprie $\omega_c = F_0$ și coeficientul de amortizare $\xi = B$.

2. La deducerea sau utilizarea modelelor matematice, se recurge la metode și expresii simplificate, la liniarizări și la neglierea timpilor morți de valori reduse.

6.2.1. Modelul matematic al prelucrării prin eroziune electrică

Având în vedere numărul mare de parametri care intervin în proces, determinarea modelului matematic al acestuia se poate realiza, în toate cazurile, numai pe cale experimentală.

În cazul prelucrării cu generatorul RC, procesul de prelucrare este descris de dependența $U_{med} = f(s)$, prezentată în 3.2.1 (fig.3.2), pentru care au fost analizate principalele zone ale caracteristicii respective. Pentru intervalul optim de prelucrare (s_2-s_3), dependența $U_{med} = f(s)$ este aproape liniară (fig.6.3), putându-se accepta modelul său liniarizat, fără a comite, prin aceasta, o abatere importantă a modelului prezentat de la modelul real. În aceste condiții, funcția de transfer respec-

tivă, reprezintă panta porțiunii liniare a dependenței $U_{med} = f(s)$, dată de expresia:

$$Y_p = \operatorname{tg} \alpha = \Delta U_m / \Delta s = K_m \quad (6.2)$$

Funcția de transfer, descrisă de relația (6.2), a fost utilizată, în scopuri similare, în lucrările /3,47,83/, iar în lucrarea /83/ a fost determinată valoarea concretă a pantei dreptei respective $Y_p = 42 \text{ V/mm}$.

În cazul prelucrării cu generatorul de impulsuri comandate, funcția de transfer a procesului a fost determinată cu ajutorul standului din fig.6.4. Acesta conține un oscilograf cu spot luminos tip H 117/1, care captează semnalele electrice din punctele P_i ($i = 1, \dots, 6$) ale sistemului SMA - I, înregistrându-le pe hîrtie fotosensibilă. Punctele P_i , din fig.6.4, au notații identice cu punctele P_i din schema electronică (fig.5.6).

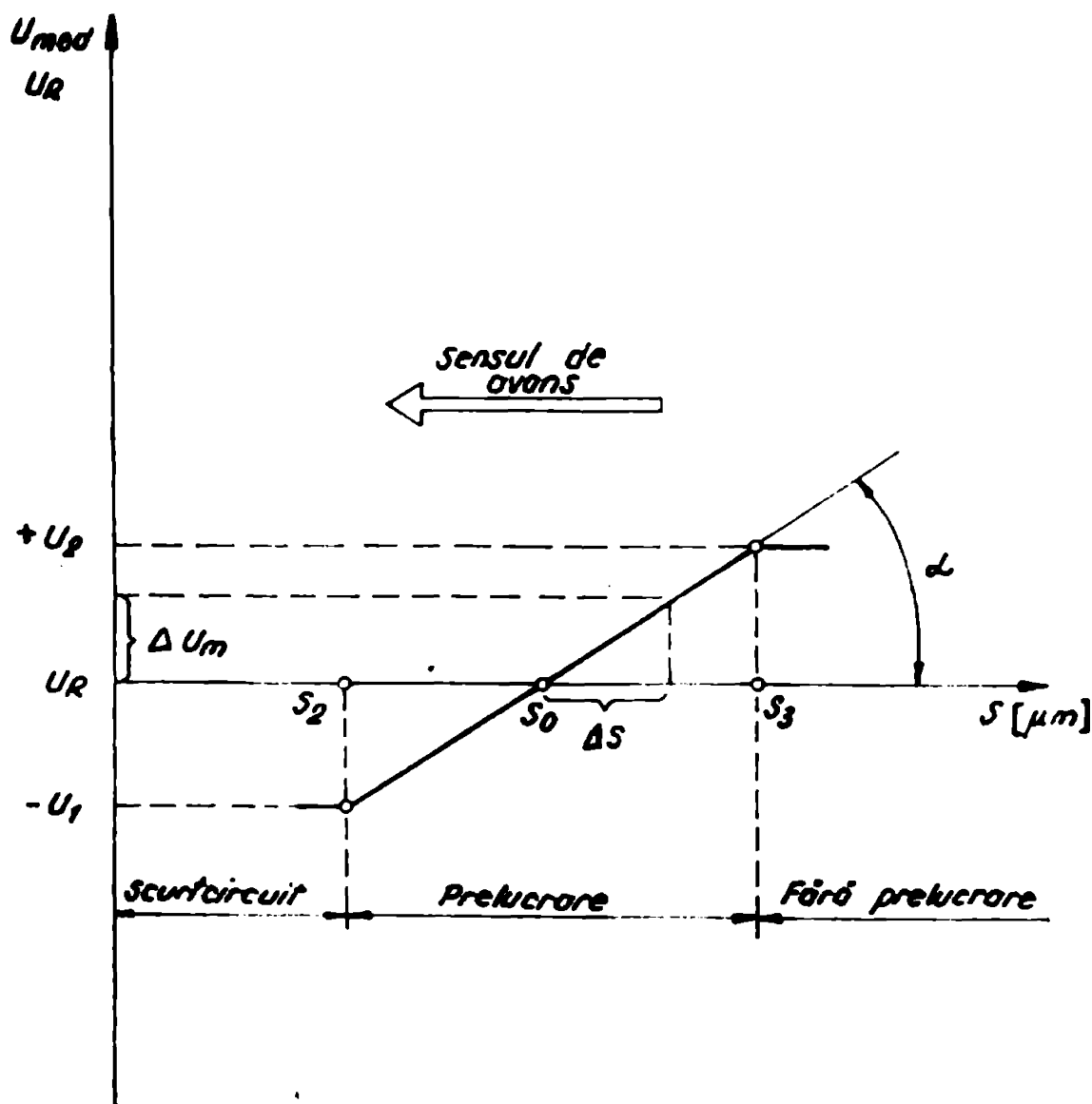


Fig. 6.3 Variația tensiunii medii pe spațiul de lucru

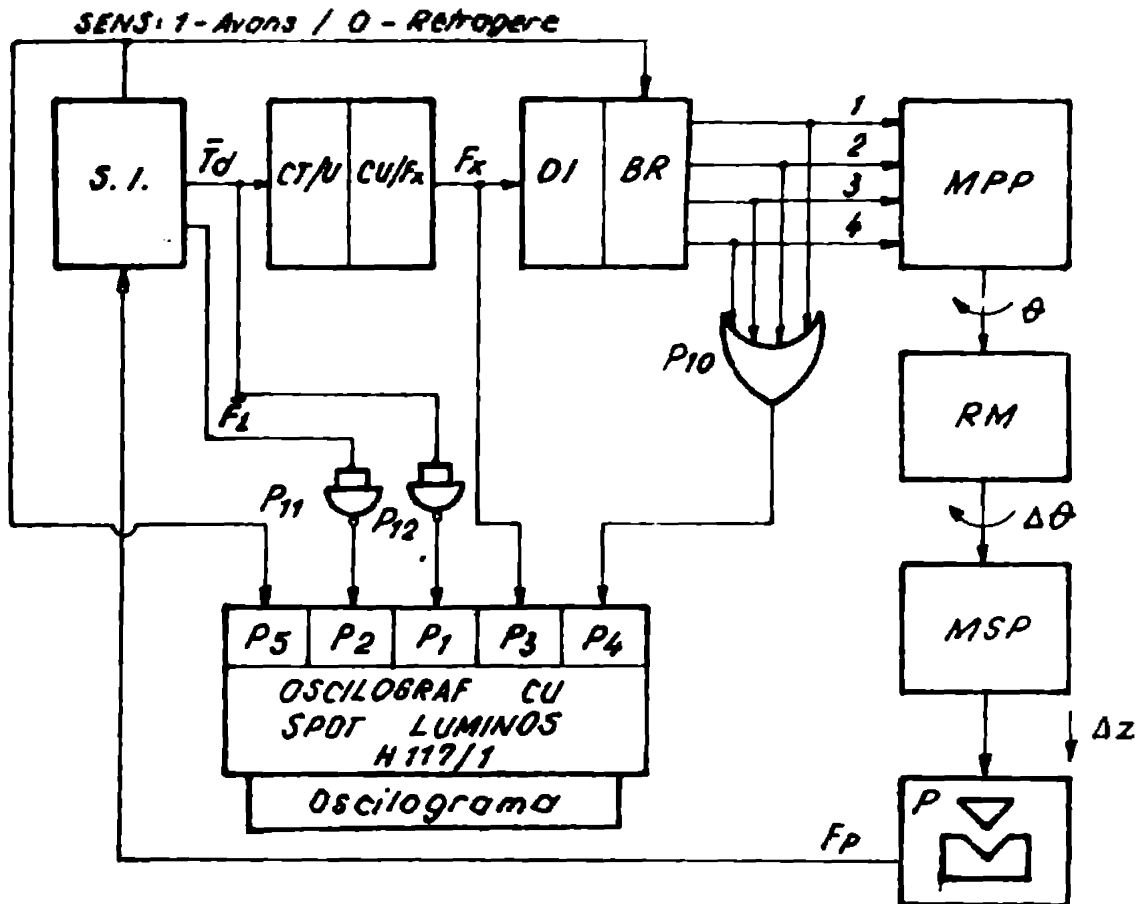


Fig. 6.4 Stand pentru determinarea caracteristicii dinamice a procesului.

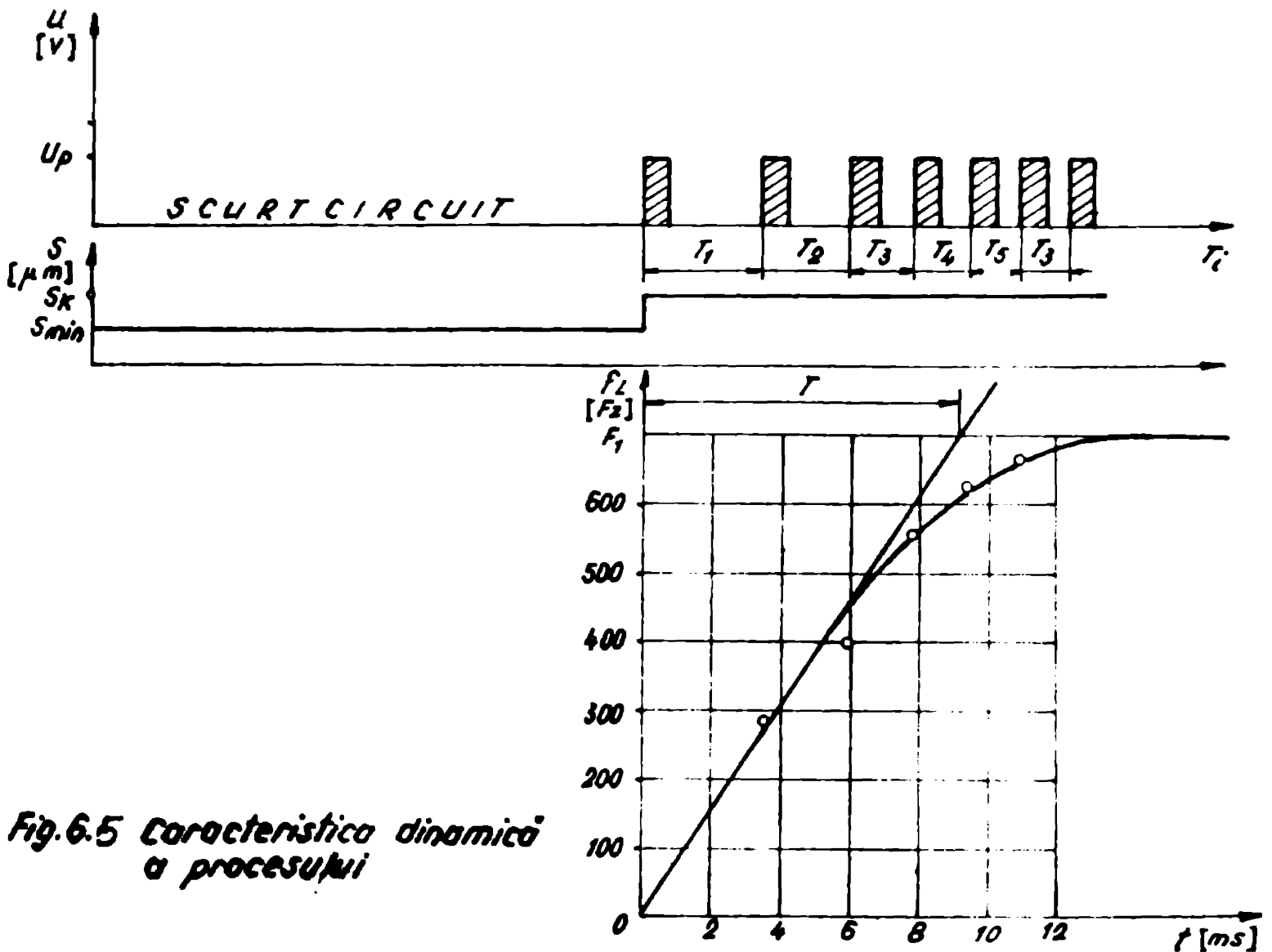


Fig. 6.5 Caracteristica dinamică a procesului

Dependența grafică obținută (fig.6.5) evidențiază situația proceselor elementare de lucru (selectate pe duratele T_i), modificarea interstițiului eroziv și semnalele de comandă aplicate elementului de execuție. Pentru identificarea procesului prezintă importanță înregistrarea proceselor elementare de lucru, pe durata procesului tranzitoriu, limitat în timp de starea de scurtcircuit momentan (s_{\min}) și starea următoare de regim de lucru stabilizat, corespunzător noii poziții a obiectului de transfer OT (poziția s_k). Deplasarea OT din starea de scurtcircuit momentan (poziția s_{\min}) în starea s_k , se realizează prin acțiunea sistemului de a evita starea accidentală de scurtcircuit. Pentru cazul considerat, deplasarea relativă tip treaptă s-a realizat prin retragerea obiectului de transfer pe o distanță egală cu rezoluția liniară.

Pe durata procesului tranzitoriu, impulsurile de lucru N_L se succed cu perioade variabile T_k ($k = 1, \dots, 6$), respectiv cu frecvențe variabile F_k ($k = 1, \dots, 6$), a căror reprezentare în planul ($F_L, 0, t$), dau în evidență caracteristica unui element aperiodic de ordinul 1, descris de un model matematic a cărui expresie, în domeniul operațional, este de formă:

$$Y_p(s) = \frac{K_p}{T_p \cdot s + 1} \quad (6.3)$$

unde: $K_p = \frac{\Delta f}{\Delta s} = \frac{f_1 - f_0}{s_k - s_{\min}} = 7 \cdot 10^5$ - reprezintă carac-

teristica statică a procesului, în Hz/mm; $T_p = 9,2 \cdot 10^{-3} s$ - este constanta de timp a procesului (fig.6.5); $s = \sqrt{-1}$ - operatorul imaginar. Introducând aceste elemente în relația (6.3), se obține forma finală a funcției de transfer a procesului de prelucrare de formă:

$$Y(s) = \frac{7 \cdot 10^5}{9,2 \cdot 10^{-3} \cdot s + 1} \quad (6.4)$$

Relația (6.3) poate fi scrisă și sub formă:

$$Y_P(s) = \frac{K_P}{s - s_1} \quad (6.5)$$

unde : $s_1 = -1/T_P$ reprezintă polul funcției de transfer $Y_P(s)$.

Expresia funcției de transfer a procesului, în domeniul frecvențial $Y_P(jF)$, se obține din relația (6.3), prin înlocuirea variabilei complexe s cu jF , rezultând:

$$Y_P(jF) = \frac{K_P}{j \cdot T_P \cdot F + 1} \quad (6.6)$$

6.2.2. Funcția de transfer a convertorului Timp / frecvență

Pentru identificarea experimentală a convertorului timp/frecvență (CI/F_x) s-a utilizat un stand constituit dintr-un simulator de impulsuri, cu posibilități multiple de modificare a parametrilor programabili (durata impulsurilor T_i și frecvența acestora F_L), dispozitivul electronic testat (convertorul timp/frecvență) și un numărător electronic universal, tip E - 0202 A (fig.6.6).

Prin menținerea constantă a duratei T_i ($T_i =$ parametru) și modificarea corespunzătoare a frecvenței F_L , aplicată la intrarea convertorului, au fost înregistrate măsurile de ieșire cu ajutorul numărătorului menționat. Datele experimentale obținute au fost reprezentate în fig.6.7. De remarcat că dependența $F_x = f(F_L)$ reprezintă o familie de drepte care au coeficienți unghiulari diferiți. Pentru definirea funcției de transfer se ia în considerare dreapta corespunzătoare duratei de impuls $T_i = 95 \mu s$, care ocupă o poziție mediană în familia de drepte considerate. Funcția de transfer a convertorului se exprimă în funcție de panta dreptei considerate și anume:

$$Y_{CT} = tg \beta = \frac{\Delta F_x}{\Delta F_L} = K_{CT} = 0,009 \quad (6.7)$$

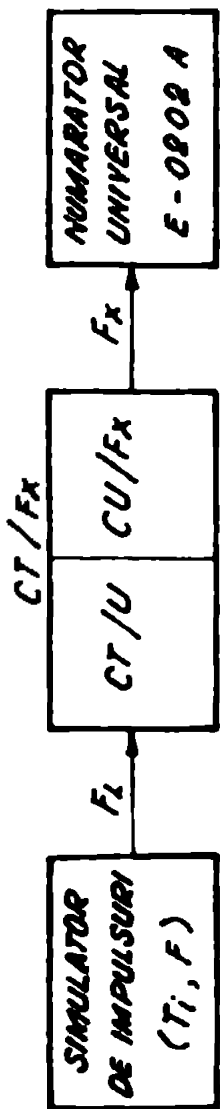


Fig. 6.6 Stand pentru determinarea funcției de transfer a convertorului timp / frecvență.

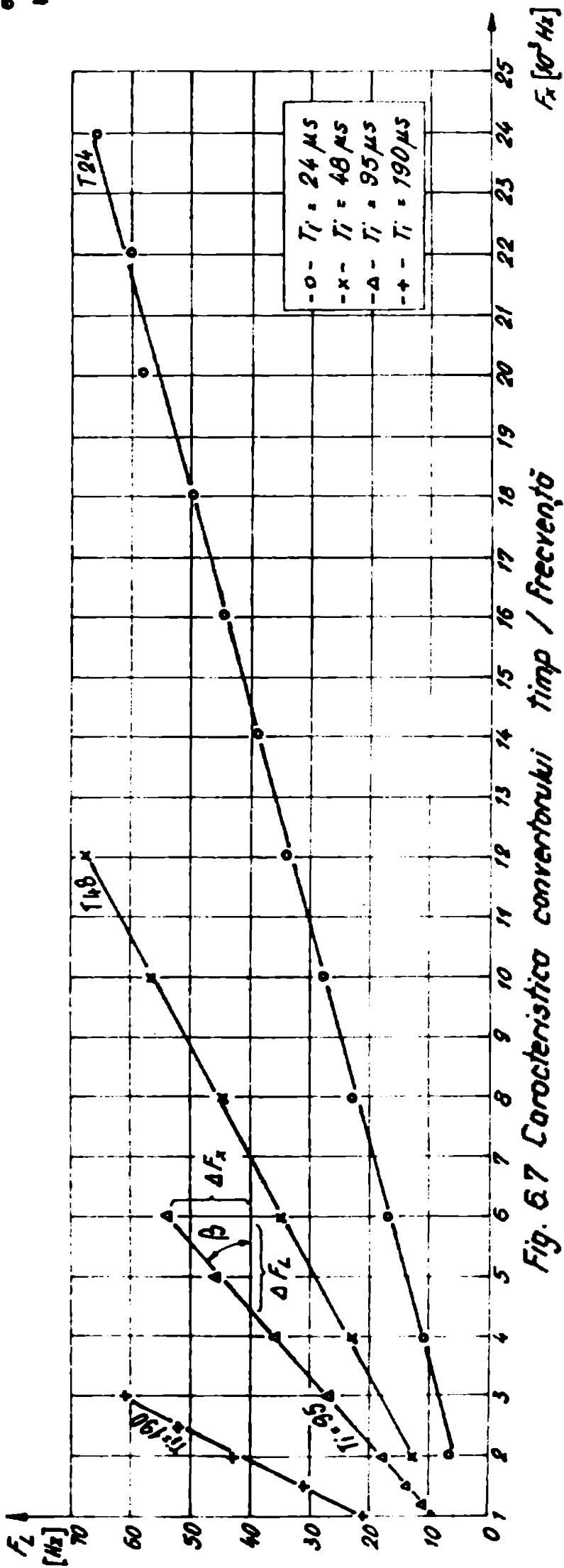


Fig. 6.7 Caracteristica convertorului timp / frecvență

6.2.3. Funcția de transfer a convertorului tensiune/frecvență

Convertorul tensiune/frecvență (CU/F_x), prezentat în fig.6.8, are o funcționare liniară, între punctele A(-0,5;0) și B(-5;160), punctul B corespunzând cu frecvența maximă de lucru a elementului de execuție.

Obținerea experimentală a dependenței F_x = f(ΔU), s-a realizat cu ajutorul unui stand (fig.6.9) constituit dintr-o sursă de tensiune continuă negativă (reglabilă în domeniul 0, .., -15 V), convertorul testat și un numărător electronic universal, tip E - 0202 A.

Funcția de transfer a convertorului este dată de panta dreptei considerate, și anume:

$$Y_{CU} = K_{CU} = \frac{\Delta F_x}{\Delta U} = \operatorname{tg} \gamma = 32 \quad (6.8)$$

6.2.4. Funcția de transfer a regulatorului AO₁

Regulatorul AO₁, utilizat în structura sistemului de reglarea automată SRM-11 (fig.5.6), este de tip proporțional (cu reacție rezistivă), pentru care funcția de transfer are structura:

$$Y_{REG} = K_A = \frac{R_3}{R_0} = 10 \quad (6.9)$$

6.2.5. Funcția de transfer a elementului de execuție

Funcția de transfer a elementului de execuție a fost

determinată /34,41,4σ,ωσ/ considerînd motorul ca un bloc cîruia i se aplică la intrare impulsuri unitare (Direc) $I(s) = 1$, rezultînd la ieşire incremenţi de unghi $\Theta(s)$ care sînt stabilizaţi după oscilaţii amortizate. Funcţia de transfer, în domeniul operaţional, este de forma :

$$Y_{LPP}(s) = \frac{K_E \cdot F_0^2}{s^2 + 2 \cdot B \cdot F_0 \cdot s + F_0^2} \quad (6.10)$$

Relaţia (6.10) poate fi scrisă şi sub forma :

$$Y_{LPP}(s) = \frac{K_E}{(s - s_2) \cdot (s - s_3)} \quad (6.11)$$

unde: K_E - constantă egală cu unghiul electric;

B - coeficientul de amortizare;

$$s_{2,3} = -B \cdot F_0 \pm F_0 \cdot \sqrt{B^2 - 1} \quad (6.12)$$

F_0 - pulsaţia proprie a motorului, care se calculează cu expresia:

$$F_0 = \sqrt{\frac{P_{max}}{J}} = 190 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6.13)$$

în care:

$P = 34$ - numărul de poli rotorici;

$M_{max} = 3 \text{ Nm}$ - momentul maxim al motorului;

$J = J_{LPP} + J_{EXT}$ - momentul total de inerţie redus la arborele motorului, în daN.m.s^2 .

momentul total de inerţie (J) se calculează ca sumă a momentelor de inerţie parţiale ale elementelor: motorul pas cu pas (J_{LPP}), motorul de curent continuu (J_{LCC}), melcul reductorului ($J_{...}$), roata melcată (J_{RM}), şurubul de transformare a mişcării de rotaţie în mişcare de translaţie (J_S) şi pinola port-electrod a maşinii (J_P) (fig.5.1), pentru care expresia anterioară devine: /10,41/ :

$$J = J_{LPP} + J_{LCC} + J_{...} + \frac{1}{i^2} (J_{RM} + J_S + J_P) \quad (6.14)$$

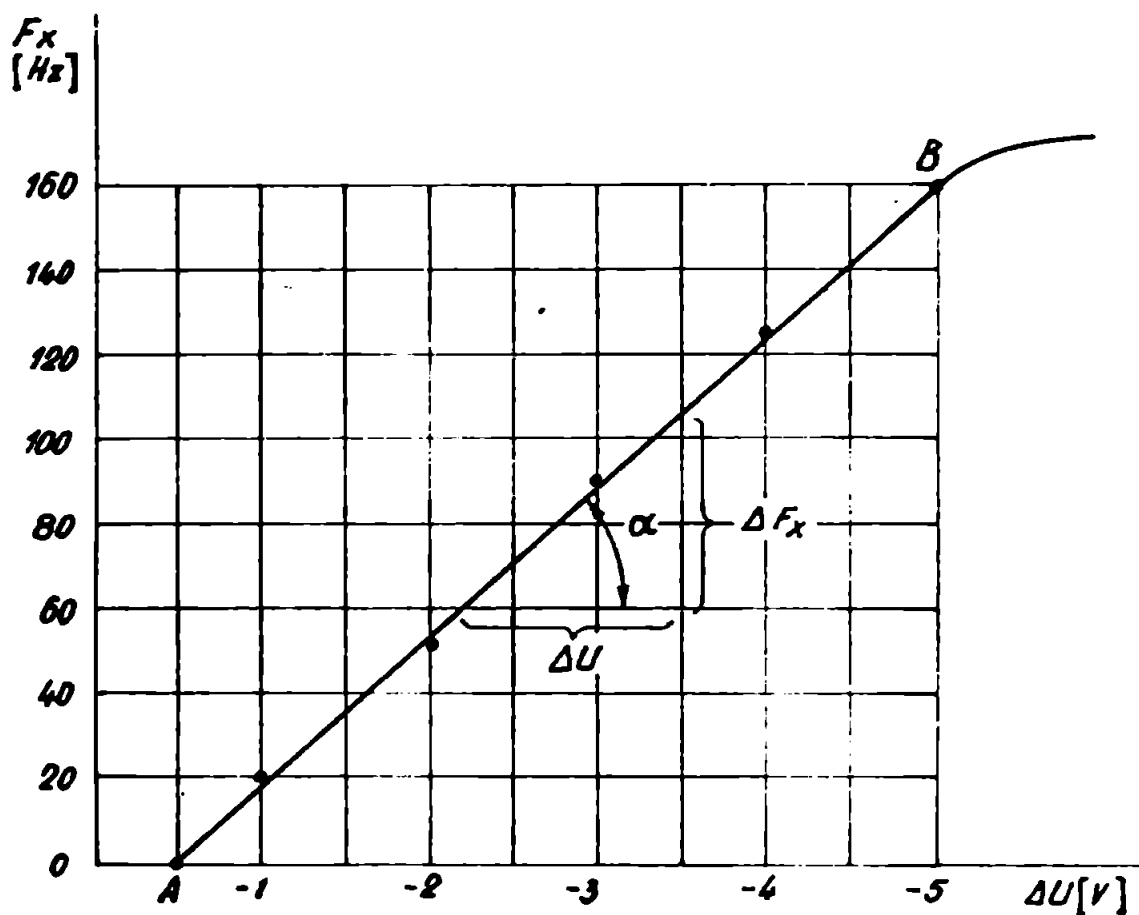


Fig. 6.8 Caracteristica convertorului tensiune / frecvență

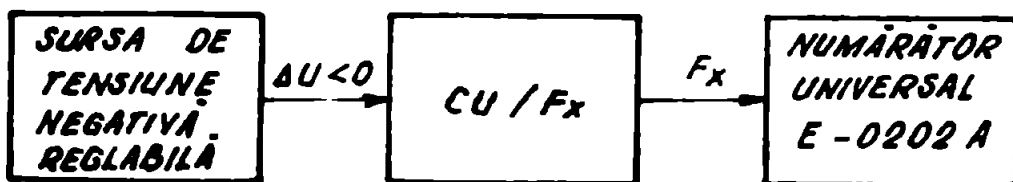


Fig. 6.9 Stand pentru identificarea convertorului tensiune / frecvență

Înlocuind momentele de inerție parțiale, în relația de mai sus, cu expresiile lor de definiție, se obține forma finală a momentului de inerție total:

$$J = J_{LPP} + J_{LCC} + \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_d^4}{32} \cdot L_m + \frac{1}{i^2} \left[\frac{\pi \cdot D_d^4}{32} \cdot L_r + \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_2^4}{32} \cdot L_s + m_s \left(\frac{p}{2 \cdot \pi} \right)^2 \right] = 282,264 \cdot 10^{-6} \quad (6.15)$$

- unde: ρ - densitatea oțelului, în kg/m^3 ;
 i - raportul de transmitere al reductorului;
 d_d - diametrul de divizare al melcului, în m;
 L_m - lungimea melcului, în m;
 D_d - diametrul de divizare al roții melcate, în m;
 L_r - lățimea roții melcate, în m;
 d_2 - diametrul mediu al șurubului, în m;
 L_s - lungimea șurubului, în m;
 m_s - masa părții mobile, în kg;
 p - pasul șurubului, în m.

Momentul de inerție total poate fi calculat, cu suficientă precizie, utilizând relația /41/:

$$J = J_{LPP} + J_{EXT} = J_{LPP} + 3 \cdot J_{LPP} \quad \text{dak.m.s}^2 \quad (6.16)$$

Trecerea funcției de transfer a elementului de execuție, din domeniul complex, în domeniul frecvențial, se realizează prin înlocuirea variabilei complexe s cu $j \cdot F$, în oricare din relațiile (6.10) sau (6.11), obținându-se funcția:

$$Y_{LPP}(j \cdot F) = \frac{K_E}{F_0^2 - F^2 + j \cdot 2 \cdot B \cdot F \cdot F_0} \quad (6.17)$$

6.2.6. Funcția de transfer a reductorului

Funcția de transfer a reductorului este considerată,

sub formă simplificată, ca fiind dată de raportul de transmitere i , sub forma :

$$Y_{RM} = \frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{1}{i} = K_{RM} \quad (6.18)$$

6.2.7. Funcția de transfer a mecanismului surub - piuliță

Funcția de transfer a mecanismului, sub formă simplificată, este dedusă în funcție de pasul șurubului utilizat, fiind de forma:

$$Y_{SP} = \frac{\Delta s}{\Delta \theta} = \frac{p}{2 \cdot \pi} = K_{SP} \quad (6.19)$$

C A P I T O L U L 7

FUNCTIILE DE TRANSFER SI STABILITATEA SRA ADOPTATE

7.1. Funcția de transfer a sistemului SRA - I

Funcția de transfer a sistemului automat deschis, asociat sistemului automat închis cu reacție unitară, se obține prin produsul funcțiilor de transfer parțiale ale elementelor componente ale sistemului (fig.7.1):

$$Y(s) = Y_{CT} \cdot Y_{LPP}(s) \cdot I_{Rm} \cdot I_{SP} \cdot I_P(s) \quad (7.1)$$

Înlocuind, în (7.1), funcțiile de transfer parțiale cu expresiile lor de definiție, se obține:

$$Y(s) = K_{CT} \cdot \frac{K_E \cdot F_o^2}{(s - s_2) \cdot (s - s_3)} \cdot K_{Rm} \cdot K_{SP} \cdot \frac{K_P}{(s - s_1)} \quad (7.2)$$

Produsul constantelor, din relația (7.2), se înlocuiește cu o constantă globală K , rezultând forma finală a funcției de transfer:

$$Y(s) = \frac{K}{(s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3)} \quad (7.3)$$

Expresia funcției de transfer, în domeniul frecvențial, se obține înlocuind variabila complexă s cu $j.F$, rezultând:

$$Y(j.F) = \frac{K}{(1 + j.T_D.F).(F_0^2 - F^2 + j.2.B.F.F_0)} \quad (7.4)$$

Eliminând parantezele și ordonând termenii în părțile reală și imaginară, relația (7.4) devine:

$$Y(j.F) = \frac{K}{F_0^2 - F^2 - 2.B.F_0.F^2.T_P + j.F.(2.B.F_0 + T_P.F_0^2 - T_P.F^2)} \quad (7.5)$$

Părțile reală și imaginară, de la numitorul expresiei (7.5), se vor nota sub forma:

$$D(F) = F_0^2 - F^2 - 2.B.F_0.F^2.T_P \quad (7.6)$$

$$C(F) = F.(2.B.F_0 + T_P.F_0^2 - T_P.F^2) \quad (7.7)$$

care introduse în (7.5), conduc la obținerea unei funcții simplificate:

$$Y(j.F) = \frac{K}{D(F) + j.C(F)} \quad (7.8)$$

Relația (7.8) se înmulțește cu fracția unitară, constituită cu conjugata numitorului și separând partea reală de cea imaginară, obținem:

$$Y(j.F) = \frac{K.D(F)}{D^2(F) + C^2(F)} - j \frac{K.C(F)}{D^2(F) + C^2(F)} \quad (7.9)$$

respectiv:

$$Y(j.F) = P(F) + j.Q(F) \quad (7.10)$$

unde:

$$P(F) = \frac{K.D(F)}{D^2(F) + C^2(F)} \quad (7.11)$$

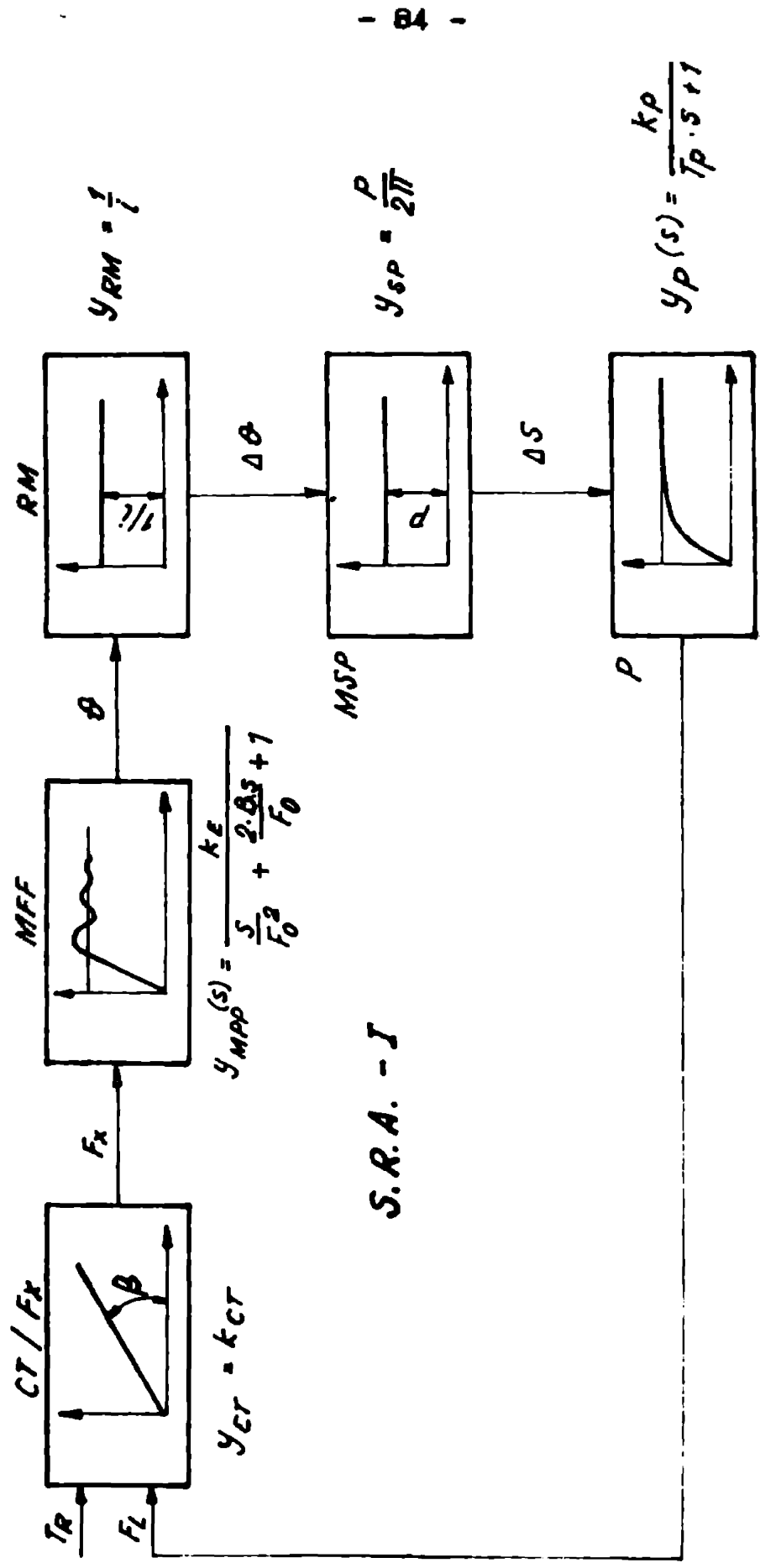


Fig. 7.1 Schema bloc a sistemului SRA - I

$$Q(F) = - \frac{C(F) \cdot K}{D^2(F) + C^2(F)} \quad (7.12)$$

7.2. funcția de transfer a sistemului SRA - II

Funcția de transfer a sistemului automat deschis, asociat sistemului automat închis cu reacție unitară, se obține din produsul funcțiilor de transfer parțiale ale elementelor componente ale sistemului considerat (fig.7.2):

$$Y(s) = Y_{REG} \cdot Y_{CU} \cdot Y_{MPP}(s) \cdot Y_{RM} \cdot Y_{SP} \cdot Y_P \quad (7.13)$$

Înlocuind, în (7.13), funcțiile de transfer parțiale cu expresiile lor de definiție se obține:

$$Y(s) = K_A \cdot K_{CU} \frac{K_E \cdot F_0^2}{(s - s_2) \cdot (s - s_3)} \cdot K_{RM} \cdot K_{SP} \cdot K_M \quad (7.14)$$

Produsul mărimilor constante, din relație de mai sus, se înlocuiește cu o constantă globală K, rezultând forma finală a funcției de transfer în planul complex s:

$$Y(s) = \frac{K}{(s - s_2) \cdot (s - s_3)} \quad (7.15)$$

Expresia funcției de transfer, în domeniul frecvențial, se obține înlocuind variabila complexă s cu j.F, obținându-se:

$$Y(j.F) = \frac{K}{F_0^2 - F^2 + j \cdot 2 \cdot B \cdot F \cdot F_0} \quad (7.16)$$

Părțile reală și imaginară, de la numitorul expresiei (7.16), se vor nota cu:

$$D(F) = F_0^2 - F^2 \quad (7.17)$$

$$C(F) = 2.B.F.F_0 \quad (7.18)$$

Funcția de transfer, sub formă simplificată, se obține prin introducerea expresiilor (7.17) și (7.18) în expresia (7.16), rezultând:

$$Y(j.F) = \frac{K}{D(F) + j.C(F)} \quad (7.19)$$

Relația (7.19) se multiplică și se divide cu conjugata numitorului, iar prin separarea părții reale de cea imaginară se obține:

$$Y(j.F) = \frac{K.D(F)}{D^2(F) + C^2(F)} - j \frac{K.C(F)}{D^2(F) + C^2(F)} \quad (7.20)$$

respectiv sub formă redusă :

$$Y(j.F) = P(F) + j.Q(F) \quad (7.21)$$

unde părțile reală $P(F)$ și imaginară $Q(F)$ au expresiile:

$$P(F) = \frac{K.D(F)}{D^2(F) + C^2(F)} \quad (7.22)$$

$$Q(F) = \frac{-K.C(F)}{D^2(F) + C^2(F)} \quad (7.23)$$

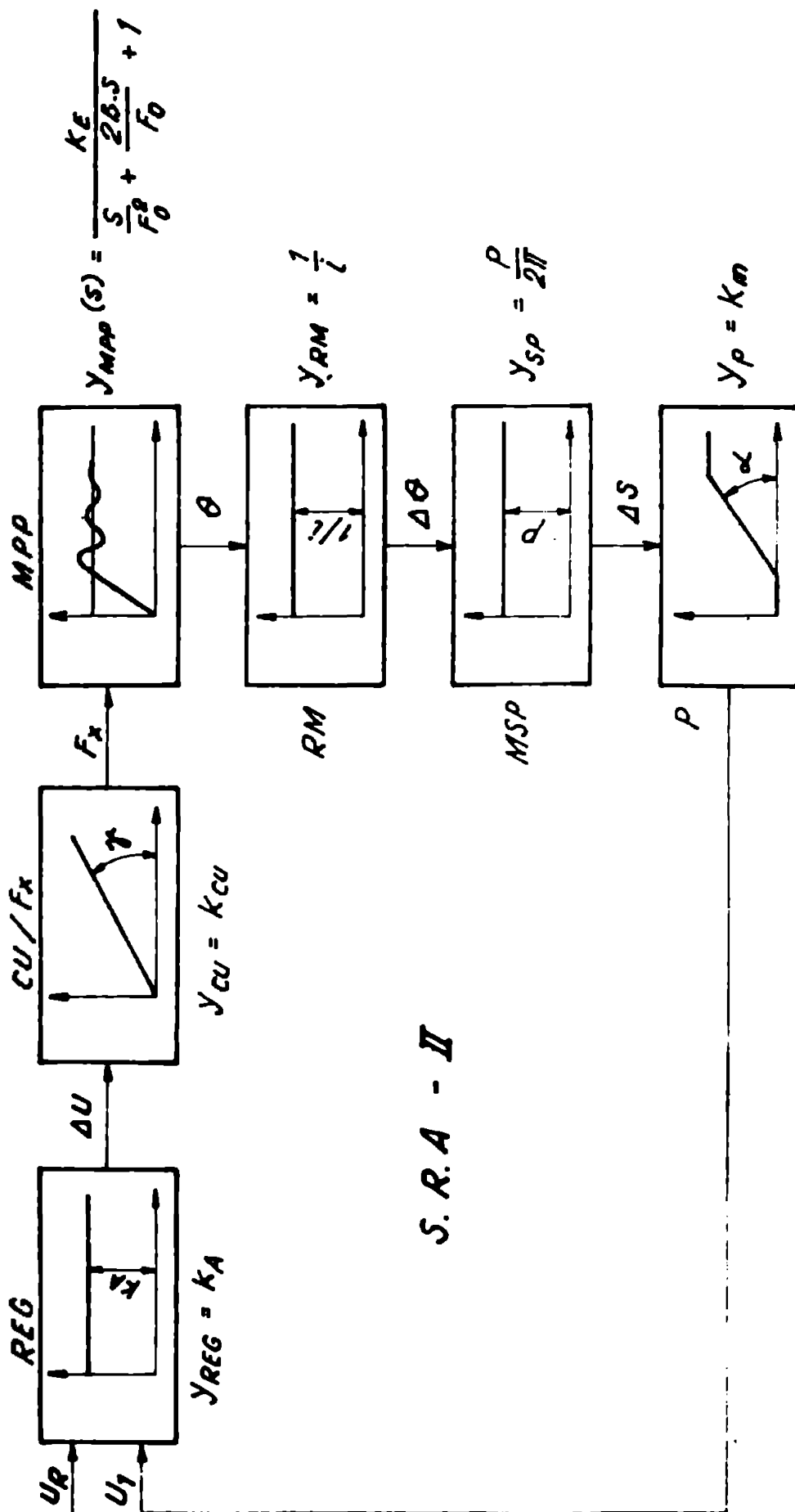


Fig. 7.2 Schema bloc a sistemului S. R. A. II

7.3. Studiul de stabilitate al sistemului SRA-I

Analizând funcția de transfer a sistemului deschis, prezentată în relația (7.3), se constată că toate zerourile ecuației caracteristice sînt situate în semiplanul stîng al planului complex s (fig.7.3), avînd valorile:

$$s_1 = -108,69$$

$$s_{2,3} = -19 \pm 189.j \quad \text{pentru } B = 0,1$$

.....

$$s_{2,3} = -121,6 \pm 114.j \quad \text{pentru } B = 0,8$$

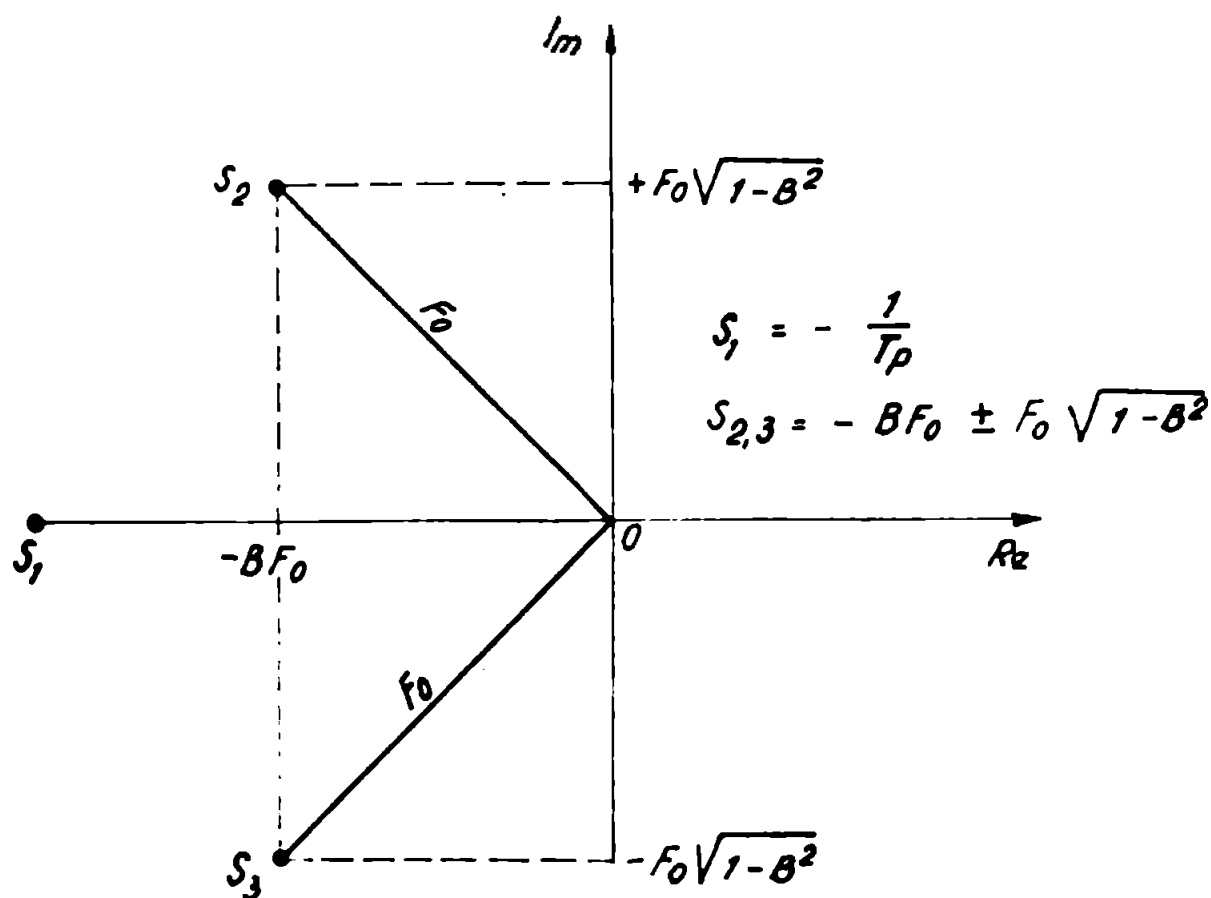


Fig. 7.3. Reprezentarea polilor zerouri în planul complex.

Pozițiile efective ale zerourilor s_i pun în evidență faptul că sistemul analizat are o stabilitate corespunzătoare, iar pentru confirmarea acestei afirmații se va prezenta, în continuare, rezultatele obținute prin aplicarea criteriului grafic de stabilitate Nyquist. Pentru aceasta au fost utilizate relațiile (7.6), (7.7) și (7.9), transpuse în limbajul de programare BASIC - SINCLAIR /94/, care a fost rulat pe calculatorul SINCLAIR - ZX 81.

Programul BASIC elaborat corespunde schemei logice din fig.7.4 și are următoarea structură de calcul:

```
10 REM "CALCULUL STABILITATII SISTEMULUI SRA-1"
20 LET K = 122564.77
30 LET F0 = 196
40 LET TP = 9.2 E-3
50 DIM P(25)
60 DIM Q(25)
70 FOR B = .1 TO .8 STEP .1
80 FOR I = 1 TO 25
90 LET F = 20 * I
100 LET D = F0 ** 2 - F ** 2 - 2 * B * F0 * TP * F ** 2
110 LET C = F * (2 * B * F0 + TP * (F0 ** 2 - F ** 2))
120/LET P(I) = K * D / (D ** 2 + C ** 2)
130 LET Q(I) = -K * C / (D ** 2 + C ** 2)
140 PRINT TAB (1);B;TAB (5);F;TAB (10);P(I);
      TAB (21);Q(I)
150 NEXT I
160 NEXT B
RUN
NEWLINE
```

Calcululele sînt efectuate pentru opt valori ale coeficientului de amortizare ($B = 0,1 \dots 0,8$), cu un pas de 0,1 și pentru douăzeci și cinci de valori ale frecvenței de lucru ($F = 20 \dots 500$ Hz), cu un pas de 20 Hz, iar rezultatele obținute sînt prezentate în tabelul 7.1. Pe baza informațiilor din tabel au fost selectate valorile coeficienților de amortizare pentru care sistemul este stabil, respectiv acele valori pentru care locurile geometrice trasate (fig.7.5) nu înconjoară punctul cri-

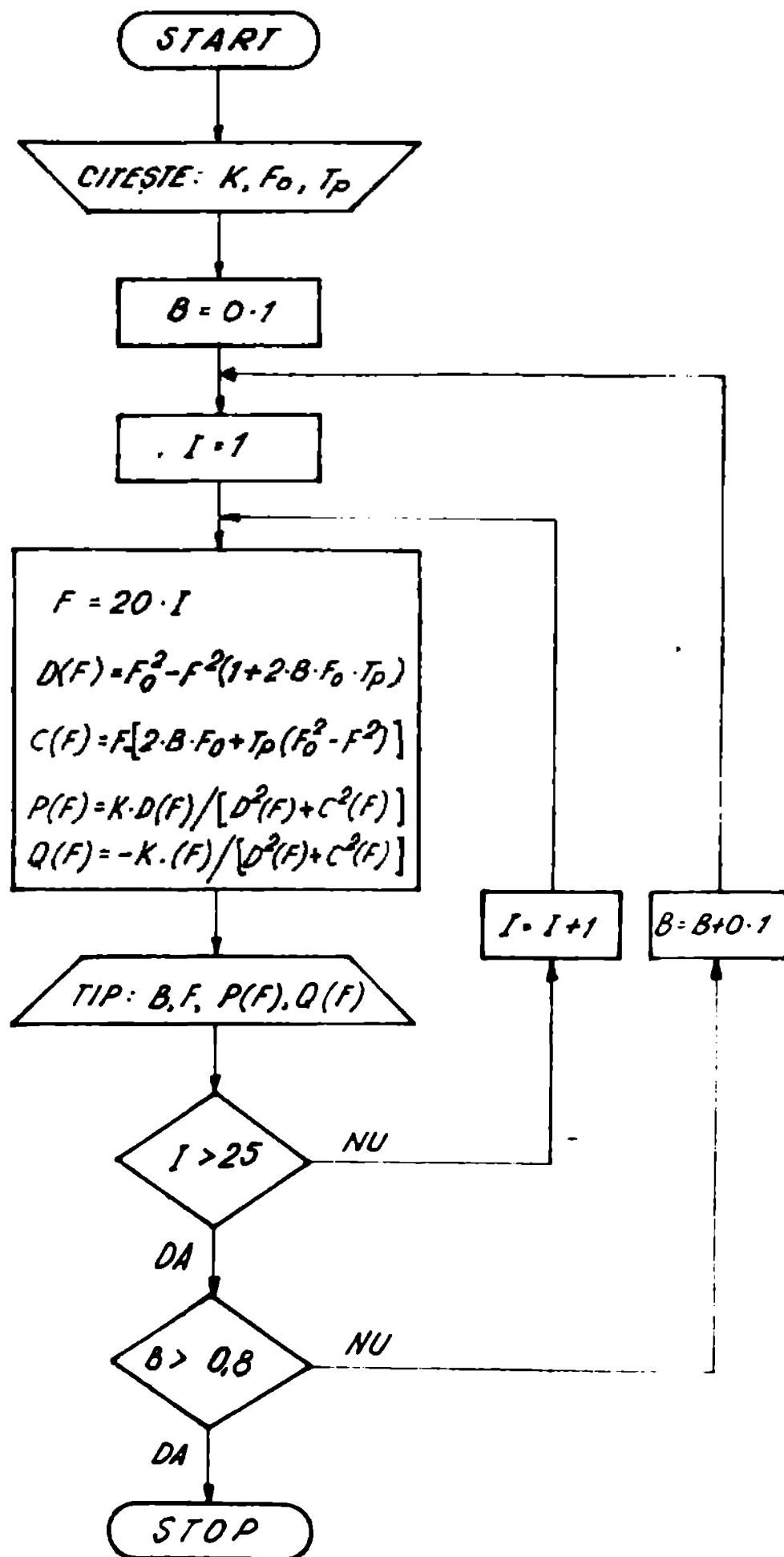


Fig. 7.4 Schema logică de calcul a stabilității sistemului SRA - 1

TABELUL 7.1

B	F	P	Q
1	2	3	4
0,1	20	3,3067	-0,6815
0,1	40	3,0720	-1,2069
0,1	60	2,7653	-1,7098
0,1	80	2,4438	-2,2211
0,1	100	2,1572	-2,6543
0,1	120	1,8720	-3,2042
0,1	140	1,4799	-4,0759
0,1	160	0,4076	-5,6627
0,1	180	-4,1311	-7,0235
0,1	200	-6,6505	-8,1624
0,1	220	-3,1776	1,7981
0,1	240	-1,5927	1,4671
0,1	260	-0,9225	1,0955
0,1	280	-0,5082	0,6297
0,1	300	-0,4000	0,6437
0,1	320	-0,2849	0,5108
0,1	340	-0,2101	0,4130
0,1	360	-0,1592	0,3394
0,1	380	-0,1233	0,2820
0,1	400	-0,0972	0,2384
0,1	420	-0,0779	0,2030
0,1	440	-0,0632	0,1744
0,1	460	-0,0519	0,1511
0,1	480	-0,0431	0,1318
0,1	500	-0,0361	0,1157
0,2	20	3,2893	-0,7511
0,2	40	3,0045	-1,4163
0,2	60	2,6155	-1,9627
0,2	80	2,1823	-2,4171
0,2	100	1,7187	-2,8401
0,2	120	1,1590	-3,2382
0,2	140	0,3343	-3,5144
0,2	160	-1,1097	-4,1415
0,2	180	-3,0914	-3,2305

TABELUL 7.1 (Continuare)

B	F	P	Q
0,2	200	-3,6173	-0,9107
0,2	220	-2,5750	0,4563
0,2	240	-1,6213	0,7672
0,2	260	-1,0988	0,7331
0,2	280	-0,6953	0,6270
0,2	300	-0,4052	0,5231
0,2	320	-0,3506	0,4344
0,2	340	-0,2607	0,3624
0,2	360	-0,1986	0,3046
0,2	380	-0,1544	0,2501
0,2	400	-0,1221	0,2204
0,2	420	-0,0979	0,1876
0,2	440	-0,0790	0,1643
0,2	460	-0,0654	0,1432
0,2	480	-0,0543	0,1256
0,2	500	-0,0455	0,1100
0,3	20	3,2009	-0,8198
0,3	40	2,9260	-1,5383
0,3	60	2,4467	-2,1107
0,3	80	1,8335	-2,5518
0,3	100	1,2777	-2,9383
0,3	120	0,5539	-3,1599
0,3	140	-0,3520	-3,2555
0,3	160	-1,4287	-2,9477
0,3	180	-2,2014	-2,5076
0,3	200	-2,3053	-0,162
0,3	220	-1,1430	-0,0050
0,3	240	-1,4114	0,3465
0,3	260	-0,1982	0,4455
0,3	280	-0,7110	0,1404
0,3	300	-0,5176	0,3099
0,3	320	-0,3346	0,3914
0,3	340	-0,2016	0,3050
0,3	360	-0,2283	0,1630
0,3	380	-0,2253	0,1630

TABELUL 7.1 (Continuare)

1	2	3	4
0,3	400	-0,1410	0,1904
0,3	420	-0,1139	0,1730
0,3	440	-0,1410	0,1904
0,3	460	-0,0703	0,1333
0,3	480	-0,0639	0,1170
0,3	500	-0,0537	0,1046
0,4	20	3,2457	-0,0075
0,4	40	2,0302	-1,6510
0,4	60	2,2040	-2,2313
0,4	80	1,6019	-2,6262
0,4	100	0,0017	-2,0537
0,4	120	0,1074	-2,9010
0,4	140	-0,6935	-2,7042
0,4	160	-1,3956	-2,1942
0,4	180	-1,7000	-1,4390
0,4	200	-1,7004	-0,6910
0,4	220	-1,5153	-0,1610
0,4	240	-1,1074	0,1279
0,4	260	-0,0000	0,2558
0,4	280	-0,6774	0,2960
0,4	300	-0,5120	0,2944
0,4	320	-0,3020	0,2740
0,4	340	-0,3040	0,2490
0,4	360	-0,2337	0,2224
0,4	380	-0,1300	0,1974
0,4	400	-0,1530	0,1748
0,4	420	-0,1253	0,1540
0,4	440	-0,1031	0,1374
0,4	460	-0,0050	0,1222
0,4	480	-0,0710	0,1000
0,4	500	-0,0004	0,0774
0,5	20	3,2107	-0,9530
0,5	40	2,7420	-1,7557
0,5	60	2,0757	-2,3239
0,5	80	1,3224	-2,6472
0,5	100	0,5091	-2,7399

TABELUL 7.1 (Continuare)

1	2	3	4
0,5	120	-0,1935	-2,6073
0,5	140	-0,8356	-2,2515
0,5	160	-1,2016	-1,7160
0,5	180	-1,4053	-1,1163
0,5	200	-1,4140	-0,5904
0,5	220	-1,2270	-0,2141
0,5	240	-1,0030	0,0153
0,5	260	-0,7951	0,1370
0,5	280	-0,6232	0,1937
0,5	300	-0,4882	0,2121
0,5	320	-0,3043	0,2105
0,5	340	-0,3050	0,1993
0,5	360	-0,2442	0,1041
0,5	380	-0,1973	0,1670
0,5	400	-0,1610	0,1515
0,5	420	-0,1305	0,1365
0,5	440	-0,1099	0,1220
0,5	460	-0,0910	0,1105
0,5	480	-0,0774	0,0995
0,5	500	-0,0657	0,0097
0,6	20	3,1911	-1,0107
0,6	40	2,6404	-1,0496
0,6	60	1,0052	-2,3093
0,6	80	1,0052	-2,0240
0,6	100	0,2032	-2,5876
0,6	120	-0,3053	-2,3249
0,6	140	-0,0700	-1,0006
0,6	160	-1,1004	-1,3051
0,6	180	-1,2397	-0,9079
0,6	200	-1,1717	-0,5127
0,6	220	-1,0264	-0,2278
0,6	240	-0,0590	-0,0437
0,6	260	-0,7013	0,0650
0,6	280	-0,5059	0,1235
0,6	300	-0,4552	0,1507
0,6	320	-0,3007	0,1594

TABELUL 7.1 (Continuare)

1	2	3	4	1	2	3	4
0,6	340	-0,2565	0,1577	0,6	40	2,4225	-2,0054
0,6	360	-0,2417	0,1505	0,6	60	1,5173	-2,4474
0,6	380	-0,1981	0,1407	0,6	80	0,6367	-2,4918
0,6	400	-0,1636	0,1299	0,6	100	-0,0772	-2,2502
0,6	420	-0,1360	0,1190	0,6	120	-0,5695	-1,0532
0,6	440	-0,1139	0,1086	0,6	140	-0,8478	-1,4119
0,6	460	-0,0960	0,0989	0,6	160	-0,9551	-1,0020
0,6	480	-0,0814	0,0900	0,6	180	-0,9465	-0,6626
0,6	500	-0,0695	0,0819	0,6	200	-0,8718	-0,4038
0,7	20	3,1600	-1,0628	0,6	220	-0,7660	-0,2183
0,7	40	2,5332	-1,9328	0,6	240	-0,6585	-0,0919
0,7	60	1,6970	-2,4295	0,6	260	-0,5556	-0,0093
0,7	80	0,8361	-2,5695	0,6	280	-0,4647	0,0423
0,7	100	0,0778	-2,4195	0,6	300	-0,3873	0,0729
0,7	120	-0,5021	-2,0721	0,6	320	-0,3227	0,0095
0,7	140	-0,6743	-1,6253	0,6	340	-0,2692	0,0371
0,7	160	-1,0504	-1,1686	0,6	360	-0,2253	0,0909
0,7	180	-1,0736	-0,7670	0,6	380	-0,1893	0,0372
0,7	200	-0,3998	-0,4521	0,6	400	-0,1590	0,0935
0,7	220	-0,6794	-0,2261	0,6	420	-0,1354	0,0086
0,7	240	-0,7469	-0,0752	0,6	440	-0,1154	0,0031
0,7	260	-0,6218	0,0115	0,6	460	-0,0987	0,0776
0,7	280	-0,5123	0,0754	0,6	480	-0,0849	0,0721
0,7	300	-0,4205	0,1057	0,6	500	-0,0733	0,0668
0,7	320	-0,3451	0,1190	=====			
0,7	340	-0,2840	0,1240	tic (+1, j ₀). Se evidentiază			
0,7	360	-0,2347	0,1223	că sistemul este stabil			
0,7	380	-0,1950	0,1172	pentru valori ale coeficien-			
0,7	400	-0,1629	0,1104	tului de amortizare $B \geq 0,6$.			
0,7	420	-0,1360	0,1029	Asigurarea unui coefici-			
0,7	440	-0,1150	0,0953	ent de amortizare $B \geq 0,6$ se			
0,7	460	-0,0981	0,0870	poate realiza atât prin alege-			
0,7	480	-0,0838	0,0807	rea unei soluții adecvate de			
0,7	500	-0,0712	0,0741	sistem mecanic, cât și prin			
0,8	20	3,1205	-1,1435	aplicarea unor mijloace auxi-			

liere de amortizare a oscilațiilor rotorice ale motorului materializate prin : amortizoare mecanice externe, amortizoare electrice și amortizare prin proiectarea motorului /41,86/.

În cazul sistemului studiat, amortizarea a fost asigurată atât prin construcția adecvată a structurii mecanice a sistemului cât și prin aplicarea unei scheme electrice de amortizare de tip capacitiv.

Amortizarea, prin structura mecanică adoptată, se realizează prin alegerea adecvată a perechilor de materiale ale cuplurilor cinematice, prin încercarea coresunzătoare a elementelor aflate în mișcare relativă și prin utilizarea unui reductor melcat, în structura lanțului cinematic, care permite transmiterea într-un singur sens a oscilațiilor torsionale (melc → roată melcată) /52/.

Amortizarea prin condensatoare a fost asigurată de către producătorul de motoare nes cu pas și constă din controlul pantei de descărcare a curentului din fazele deconectate cu ajutorul condensatoarelor. Pentru aceasta condensatoarele sînt conectate peste fazele motorului, iar cînd acestea sînt deconectate, curentul de descărcare cauzează apariția unui cuplu de frinare asupra rotorului, care reduce sau elimină supra-reglarea din răspunsul motorului.

7.4. Studiul de stabilitate al sistemului SRA-11

Studiul de stabilitate al sistemului închis se realizează prin analiza stabilității sistemului în circuit deschis asociat sistemului automat închis cu reacție unitară. Funcția de transfer a acestui sistem, prezentată în relația (7.15), are doi poli, dați de zerourile ecuației caracteristice, amplasați în semiplanul stînga al planului complex s , de valori identice cu polii funcției de transfer a sistemului SRA - 1 ($s_{2,3}$ din fig.7.3). Și în acest caz se constată că sistemul prezintă o stabilitate ridicată, confirmîndu-se aceasta prin aplicarea criteriului grafic de stabilitate Nyquist. În acest sens sînt considerate relațiile (7.17), (7.18) și (7.20), transpuse în limbajul de programare BASIC - Sla-

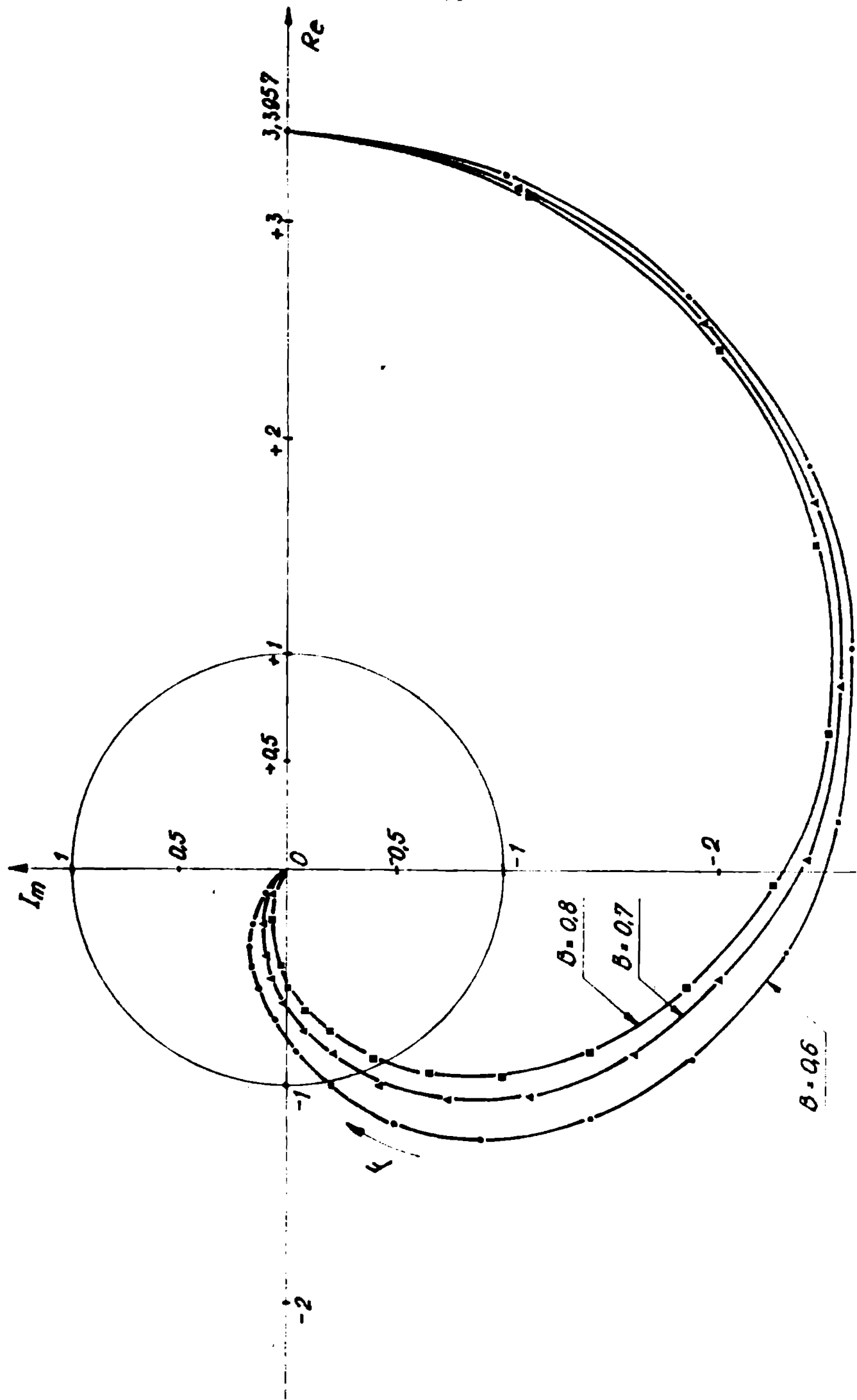


Fig. 7.5 Hodograful Nyquist pentru sistemul S. R. A. - I

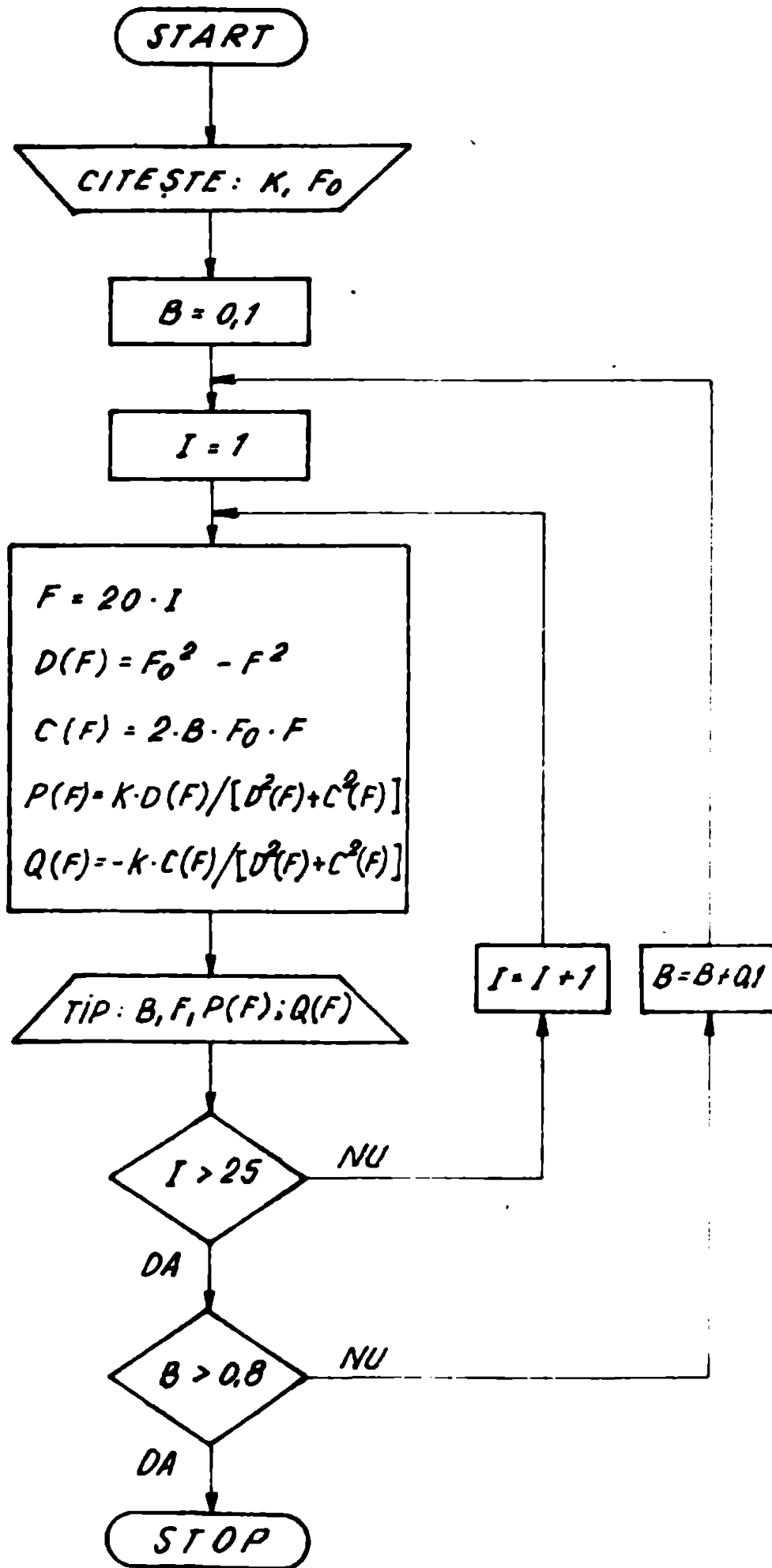


Fig. 7.6 Schema logică de calcul a stabilității sistemului SRA-II

CLAIR și rulat pe calculatorul SINCLAIR - ZX_01. Programul BASIC elaborat corespunde schemei logice din fig.7.5 și are următoarea structură:

```
10 REM "CALCULUL DE STABILITATE AL SISTEMULUI SRA-II"
20 LET K = 261514.15
30 LET F0 = 190
40 DIM P(25)
50 DIM Q(25)
60 FOR B = .1 TO .8 STEP .1
70 FOR I = 1 TO 25
80 LET F = 20 * I
90 LET D = F0 ** 2 - F ** 2
100 LET C = 2 * B * F0 * F
110 LET P(I) = K * D / (D ** 2 + C ** 2)
120 LET Q(I) = -K * C / (D ** 2 + C ** 2)
130 PRINT TAB(1);B; TAB(5);F; TAB(10);P(I); TAB(21);Q(I)
140 NEXT I
150 NEXT B
RUN
RESUME
```

Calculule sînt efectuate în condiții similare cu sistemul SRA - 1, iar rezultatele sînt concentrate în tabelul 7.2. Cu datele obținute s-au construit locurile geometrice corespunzătoare pentru fiecare coeficient de amortizare (fig.7.7), luat ca parametru, constatîndu-se că sistemul este stabil pentru toată gama de valori testate. Întrucît locurile geometrice trasate nu intersectează axa reală, în domeniul negativ, sistemul prezintă o rezervă bună de stabilitate a modulului. Pentru a obține o rezervă de stabilitate corespunzătoare a fazei, se impune adoptarea unor valori mai ridicate a coeficientului de amortizare ($B \geq 0,4$). Asigurarea acestor restricții s-a realizat prin metodele prezentate în paragraful anterior.

În concluzie se poate aprecia că sistemul analizat are o comportare stabilă, posedînd o rezervă acceptabilă de stabilitate atât în fază cît și în amplitudine.

TABELUL 7.2

B	F	P	Q
1	2	3	4
0,1	20	7,3220	-0,1558
0,1	40	7,5654	-0,3333
0,1	60	8,0071	-0,5617
0,1	80	8,7138	-0,8919
0,1	100	9,6117	-1,4285
0,1	120	11,5416	-2,4253
0,1	140	14,3568	-4,6289
0,1	160	18,6521	-10,8004
0,1	180	15,9998	-29,5781
0,1	200	-13,9770	-27,2373
0,1	220	-14,5430	-9,8845
0,1	240	-10,3085	-4,3727
0,1	260	-7,5584	-2,3707
0,1	280	-5,6144	-1,4625
0,1	300	-4,6440	-0,7822
0,1	320	-3,8160	-0,6998
0,1	340	-3,2048	-0,5200
0,1	360	-2,7383	-0,4006
0,1	380	-2,3725	-0,3163
0,1	400	-2,0793	-0,2550
0,1	420	-1,8401	-0,2033
0,1	440	-1,6419	-0,1743
0,1	460	-1,4754	-0,1469
0,1	480	-1,3341	-0,1252
0,1	500	-1,2130	-0,1077
0,2	20	7,3120	-0,3113
0,2	40	7,5217	-0,6627
0,2	60	7,8912	-1,1072
0,2	80	8,4510	-1,7300
0,2	100	9,2365	-2,6895
0,2	120	10,2422	-4,3045
0,2	140	11,1943	-7,2186
0,2	160	10,6302	-12,3201
0,2	180	4,8179	-17,8134

TABELUL 7.2 (Continuare)

1	2	3	4
0,2	200	-4,1417	-16,1421
0,2	220	-7,4657	-10,1486
0,2	240	-7,0728	-6,0004
0,2	260	-5,9570	-3,7372
0,2	280	-4,9337	-2,4820
0,2	300	-4,1154	-1,7408
0,2	320	-3,4766	-1,2752
0,2	340	-2,8751	-0,9070
0,2	360	-2,5703	-0,7538
0,2	380	-2,2544	-0,6011
0,2	400	-1,9908	-0,4884
0,2	420	-1,7722	-0,4032
0,2	440	-1,5887	-0,3373
0,2	460	-1,4338	-0,2855
0,2	480	-1,3001	-0,2440
0,2	500	-1,1859	-0,2105
0,3	20	7,2959	-0,4659
0,3	40	7,4499	-0,9846
0,3	60	7,7052	-1,6216
0,3	80	8,0464	-2,4708
0,3	100	8,4144	-3,6752
0,3	120	8,6289	-5,4366
0,3	140	8,1882	-7,9202
0,3	160	6,1300	-10,7600
0,3	180	2,2255	-12,3430
0,3	200	-1,9061	-11,1430
0,3	220	-4,1223	-8,4054
0,3	240	-4,6435	-5,9092
0,3	260	-4,4033	-4,1433
0,3	280	-3,9372	-2,9725
0,3	300	-3,4591	-2,1940
0,3	320	-3,0277	-1,6659
0,3	340	-2,6577	-1,2957
0,3	360	-2,3450	-1,0233
0,3	380	-2,0810	-0,8320

TABELUL 7.2 (Continuare)

1	2	3	4
0,3	400	-1,6500	-0,6041
0,3	420	-1,6695	-0,5697
0,3	440	-1,5075	-0,4001
0,3	460	-1,3679	-0,4007
0,3	400	-1,2470	-0,3511
0,3	500	-1,1415	-0,3041
0,4	20	7,2725	-0,6169
0,4	40	7,3517	-1,2956
0,4	60	7,4592	-2,0931
0,4	80	7,5410	-3,0075
0,4	100	7,4020	-4,3573
0,4	120	7,0619	-5,9359
0,4	140	5,9509	-7,6749
0,4	160	3,9131	-9,0635
0,4	180	1,2093	-9,3066
0,4	200	-1,0057	-0,4631
0,4	220	-2,5337	-6,6084
0,4	240	-3,1357	-5,3205
0,4	260	-3,2253	-4,0464
0,4	280	-3,0722	-3,0911
0,4	300	-2,6270	-2,3923
0,4	320	-2,5642	-1,8812
0,4	340	-2,3123	-1,5031
0,4	360	-2,0033	-1,2192
0,4	380	-1,0709	-1,0026
0,4	400	-1,7010	-0,0347
0,4	420	-1,5442	-0,7226
0,4	440	-1,4067	-0,5973
0,4	460	-1,2050	-0,5123
0,4	480	-1,1790	-0,4429
0,4	500	-1,0055	-0,3057
0,5	20	7,2432	-0,7709
0,5	40	7,2203	-1,5925
0,5	60	7,1650	-2,5132
0,5	80	6,9775	-3,5710
0,5	100	6,5400	-4,7675

TABELUL 7.2 (Continuare)

1	2	3	4
0,5	120	5,7279	-6,0103
0,5	140	4,4030	-7,0996
0,5	160	2,6545	-7,6055
0,5	180	0,8170	-7,5501
0,5	200	-0,6909	-6,8102
0,5	220	-1,6942	-5,7577
0,5	240	-2,2122	-4,6919
0,5	260	-2,3098	-3,7635
0,5	280	-2,3940	-3,0116
0,5	300	-2,2904	-2,4221
0,5	320	-2,1425	-1,9640
0,5	340	-1,9812	-1,6099
0,5	360	-1,8219	-1,3320
0,5	380	-1,6717	-1,1144
0,5	400	-1,5330	-0,9407
0,5	420	-1,4003	-0,8010
0,5	440	-1,2954	-0,6076
0,5	460	-1,1939	-0,5946
0,5	480	-1,1020	-0,5176
0,5	500	-1,0211	-0,4535
0,6	20	7,2077	-0,3206
0,6	40	7,0050	-1,8720
0,6	60	6,8355	-2,8772
0,6	80	6,3030	-3,9266
0,6	100	5,6020	-4,9644
0,6	120	4,6035	-5,8673
0,6	140	3,3420	-6,4652
0,6	160	1,9054	-6,6202
0,6	180	0,5000	-6,3200
0,6	200	-0,4009	-5,6033
0,6	220	-1,2059	-4,9170
0,6	240	-1,6200	-4,1400
0,6	260	-1,0200	-3,4401
0,6	280	-1,0001	-2,8406
0,6	300	-1,8500	-2,3506
0,6	320	-1,7000	-1,9632

TABELUL 7.2 (Continuare)

1	2	3	4
0,6	340	-1,6862	-1,6442
0,6	360	-1,5736	-1,3866
0,6	380	-1,4723	-1,1779
0,6	400	-1,3689	-1,0076
0,6	420	-1,2715	-0,8679
0,6	440	-1,1811	-0,7523
0,6	460	-1,0979	-0,6561
0,6	480	-1,0217	-0,5755
0,6	500	-0,9521	-0,5074
0,7	20	7,1661	-1,0679
0,7	40	6,9217	-1,1347
0,7	60	6,4831	-3,1837
0,7	80	5,8182	-4,1607
0,7	100	4,9147	-5,0089
0,7	120	3,8032	-5,6032
0,7	140	2,6008	-5,8700
0,7	160	1,4289	-5,7920
0,7	180	0,4195	-5,4294
0,7	200	-0,3504	-4,8894
0,7	220	-0,8995	-4,2797
0,7	240	-1,2330	-3,6791
0,7	260	-1,4283	-3,1316
0,7	280	-1,5077	-2,6548
0,7	300	-1,5200	-2,2504
0,7	320	-1,4874	-1,9121
0,7	340	-1,4338	-1,6311
0,7	360	-1,3650	-1,3980
0,7	380	-1,2905	-1,2044
0,7	400	-1,2140	-1,0432
0,7	420	-1,1406	-0,9083
0,7	440	-1,0697	-0,7949
0,7	460	-1,0026	-0,6890
0,7	480	-0,9400	-0,6177
0,7	500	-0,8817	-0,5482
0,8	20	7,1158	-1,2123

TABELUL 7.2 (Continuare)

1	2	3	4
0,8	40	6,7424	-2,3764
0,8	60	6,1191	-3,4342
0,8	80	5,2709	-4,3161
0,8	100	4,2516	-4,9521
0,8	120	3,1497	-5,2950
0,8	140	2,0709	-5,3417
0,8	160	1,1089	-5,1371
0,8	180	0,3216	-4,7573
0,8	200	-0,2747	-4,2835
0,8	220	-0,6956	-3,7822
0,8	240	-0,9718	-3,2979
0,8	260	-1,1378	-2,8551
0,8	280	-1,2243	-2,4638
0,8	300	-1,2559	-2,1251
0,8	320	-1,2510	-1,8356
0,8	340	-1,2510	-1,6356
0,8	360	-1,1801	-1,3813
0,8	380	-1,1295	-1,2048
0,8	400	-1,0751	-1,0551
0,8	420	-1,0195	-0,9276
0,8	440	-0,9646	-0,8132
0,8	460	-0,9114	-0,7262
0,8	480	-0,8605	-0,6462
0,8	500	-0,8123	-0,5772

=====

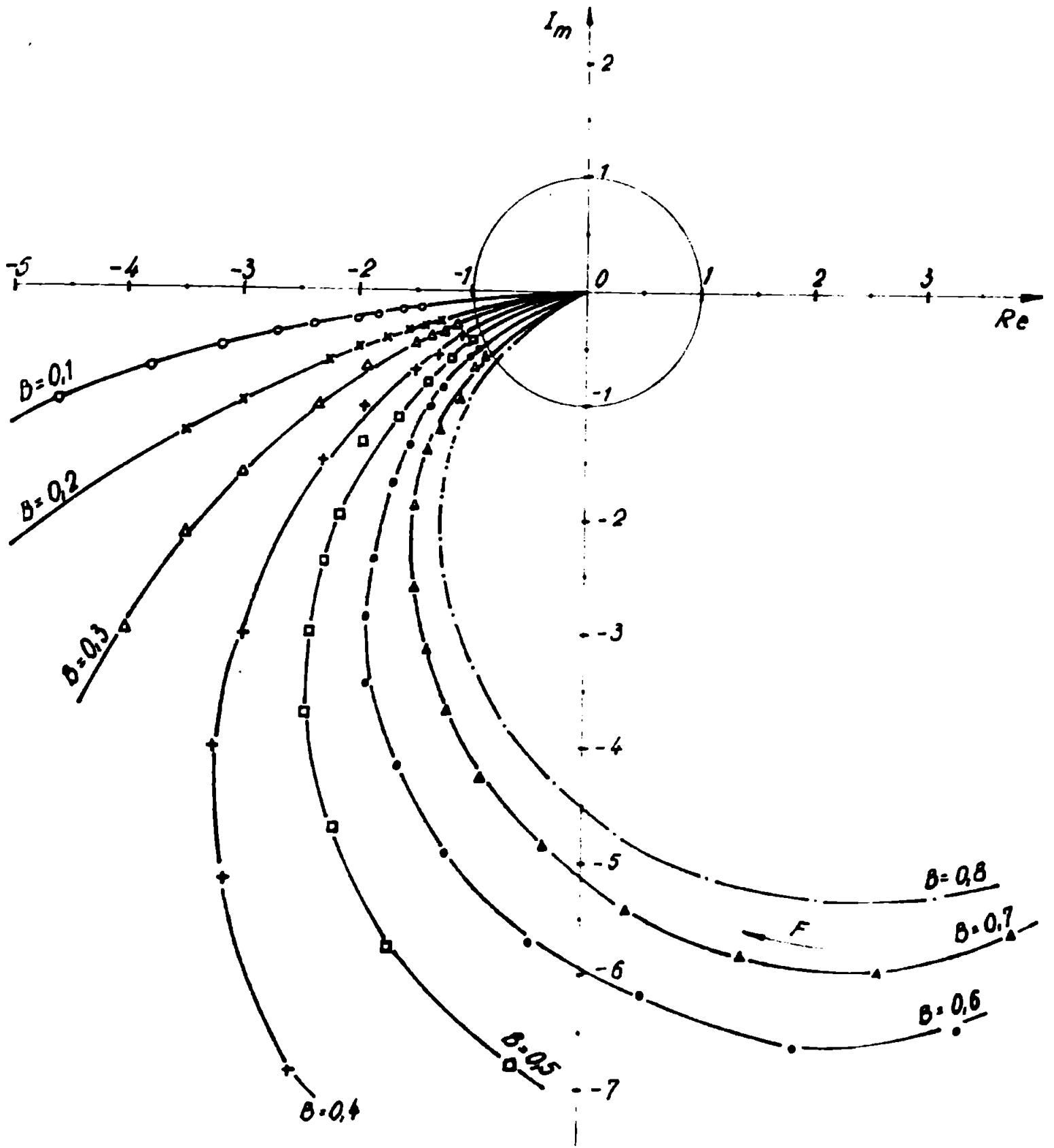


Fig. 7.7 *Hoțul Nyquist pentru sistemul S.R.A - II.*

C A P I T O L U L 8

OPTIMIZAREA SISTEMULUI DE REGLARE AUTOLATA A AVANSULUI

8.1. Optimizarea experimentală a mărimilor de reglare

Cercetările experimentale efectuate asupra soluției de sistem adoptat au fost axate, în exclusivitate, pe soluția de sistem SKA - 1, destinat conducerii procesului de prelucrare în condițiile utilizării generatorului de impulsuri comandate GSP 50 F. În acest sens s-a stabilit un program de încercări experimentale prin care s-a testat influența celor patru mărimi de reglare (F_x , T_G , T_F , T_R) asupra caracteristicilor tehnologice ale mașinii (Q_p , Q_g , u), urmărindu-se, în mod special, nivelul productivității prelucrării, ca reacție principală a optimizării mărimilor de reglare specificate.

Condițiile de încercări experimentale au fost stabilite în conformitate cu normele CIRP, ținându-se cont de restricțiile de ordin tehnic implicate în sistem. Durata încercărilor a fost stabilită la 15 minute.

Structura reală a vectorilor de intrare utilizați în programul de experimentări are în vedere următoarele:

- a) Vectorul mărimilor de intrare constante (x_c) cuprinde următoarele componente particulare x_{ci} :
 - obiectul prelucrării este de formă cilindrică, cu diametrul $d = 45$ mm și înălțimea $h = 15$ mm, fiind realizat din oțelul 200 Cr 120 (C 120), aflat în stare cilită la 62 HRC;
 - obiectul de transfer este confecționat din cupru, avînd formă cilindrică cu dimensiunile $d = 15$ mm, $h = 60$ mm și un orificiu central cu diametrul $d_1 = 3$ mm, necesar pentru asigurarea spălării forțate, prin injecție, a spațiului de lucru;

- mărimile electrice de lucru sînt caracteristice generatorului electric GEP - 50 F (sistem izopuls cu tensiunea de mers în gol $U_0 = 05$ V, asigurînd impulsuri electrice de lucru de formă dreptunghiulară) /93/;

mărimile hidraulice sînt specifice sistemului hidraulic din dotarea mașinii ELAK - 01 /93/.

b) Vectorul mărimilor de intrare programabile include componentele x_{pi} de forma:

- mărimi de programare a generatorului (T_i, T_p, I_i);
- mărimi de reglare a dispozitivului de automatizare (T_R, T_S, T_F, F_X).

Structura vectorului de ieșire se prezintă sub forma:

a) Vectorul mărimilor de ieșire tehnologice y_T este apreciat prin valoarea componentelor (tabelul 8.1):

- productivitatea prelucrării Q_p , în mm^3/min ;
- debitul uzării Q_u , în mm^3/min ;
- uzura relativă volumică u , în %.

b) Vectorul mărimilor de ieșire, de control, y_R este reprezentat de o succesiune de mărimi electrice discrete din proces (semnale de tensiune).

Încercările experimentale s-au efectuat în condițiile modificării parametrilor de durată ai proceselor elementare de lucru (T_i, T_p), în treptele de valori prezentate în tabelul 1 și a menținerii constante a următoarelor mărimi de intrare:

- carentul de lucru $I = 25$ A;
- tensiunea de mers în gol $U_0 = 05$ V;
- presiunea de soluțare forțată prin injecție

$n_s = 0,3$ bar.

Pe baza programului de experimentări elaborat s-a stabilit corespondența dintre valorile maxime ale productivității prelucrării și parametrii de reglare ai dispozitivului automat care au concurat la obținerea acestor rezultate. Valorile optime găsite au stat la baza programului lărgit de încercări prezentat în capitolul care urmează.

Analizînd datele experimentale din tabelul 8.1 și reprezentarea grafică a acestora din fig.8.1....fig.8.5, se

TABELUL 8.1

nr. exp.	GEP-50 F		Parametri de reglaro				Parametri tehnologici		
	T _i [μs]	T _p [μs]	F _x [Hz]	T _S [ms]	T _F [μs]	T _R [μs]	Q _p [mm ³ /min]	Q _E [mm ³ /min]	u [%]
o	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	24	6	100	2,0	5,0	0,4	26,9700	7,5183	27,0766
	95	24					53,4706	4,6504	8,7108
	420	95					67,9940	0,4711	0,6929
	1000	420					40,2037	0,1992	0,4346
2	24	6	100	2,0	5,0	1,0	30,0145	8,4059	28,0064
	95	24					55,3307	4,0576	0,7793
	420	95					72,5427	0,5078	0,7000
	1300	420					41,9222	0,2406	0,5331
3	24	6	100	2,0	5,0	4,0	24,4692	5,6440	23,0695
	95	24					47,2097	5,2601	11,1401
	420	95					57,2054	0,4172	0,7203
	1000	420					35,5111	0,1273	0,3505
4	24	6	100	2,0	5,0	7,0	24,2000	5,6344	23,1904
	95	24					40,1060	3,9505	8,2245
	420	95					50,3042	0,4464	0,7057
	1800	420					35,0453	0,1110	0,3184
5	24	6	100	3,0	5,0	1,0	33,2706	14,6230	43,9620
	95	24					50,4666	7,0620	12,5001
	420	95					67,7302	0,4674	0,6034
	1000	420					40,3603	0,1347	0,4024
6	24	6	100	4,0	5,0	1,0	34,7407	9,4007	27,0535
	95	24					55,0470	4,8002	0,7340
	420	95					72,6683	0,8374	1,1524
	1000	420					41,0302	0,2337	0,5721
7	24	6	100	4,5	5,0	1,0	32,8000	4,6037	14,0073
	95	24					54,5196	7,4524	13,0092

TABELUL 5.1 (Continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	420	95					62,7786	0,8913	1,1524
	1000	420					30,7239	0,1528	0,5721
8	24	6	100	4,0	10	1,0	34,6846	0,0357	23,1686
	95	24					55,7299	4,9917	0,9570
	420	95					67,4213	0,6546	0,9710
	1000	420					45,0230	0,1677	0,3661
9	24	6	100	4,0	5,0	4,0	60,7011	16,9413	24,0316
	95	24					75,0440	7,2050	9,6002
	420	95					77,2106	0,5123	0,6635
	1000	420					32,3269	0,0752	0,2320
10	24	6	75	4,0	5,0	4,0	34,5173	9,8507	20,5305
	95	24					56,4555	7,9430	14,0707
	420	95					74,0264	0,5242	0,7003
	1000	420					44,6794	0,1505	0,3369

constată că productivitatea maximă se obține pentru următoarele măriri de reglare concrete ale dispozitivului de reglare automată :

- $f_x = 100$ Hz, frecvența de lucru a elementului de execuție;

- $T_{\int} = 4$ ms, constanta de integrare a proceselor elementare de scurtcircuit;

- $T_F = 5$ μ s, durata de ștergere limitată a informației memorate pe condensatorul C al convertorului tensiune/ f_x (fig.5.6) ;

- $t_R = 4$ μ s, timpul de referință al duratei de întârziere la amorsare a descărcării.

Analizând fiecare mărime de reglare în parte, se precizează că frecvența de lucru a elementului de execuție trebuie să respecte restricția $f_x \leq 100$ Hz, impusă de performanțele reduse ale motorului utilizat, iar durata T_F are o influență

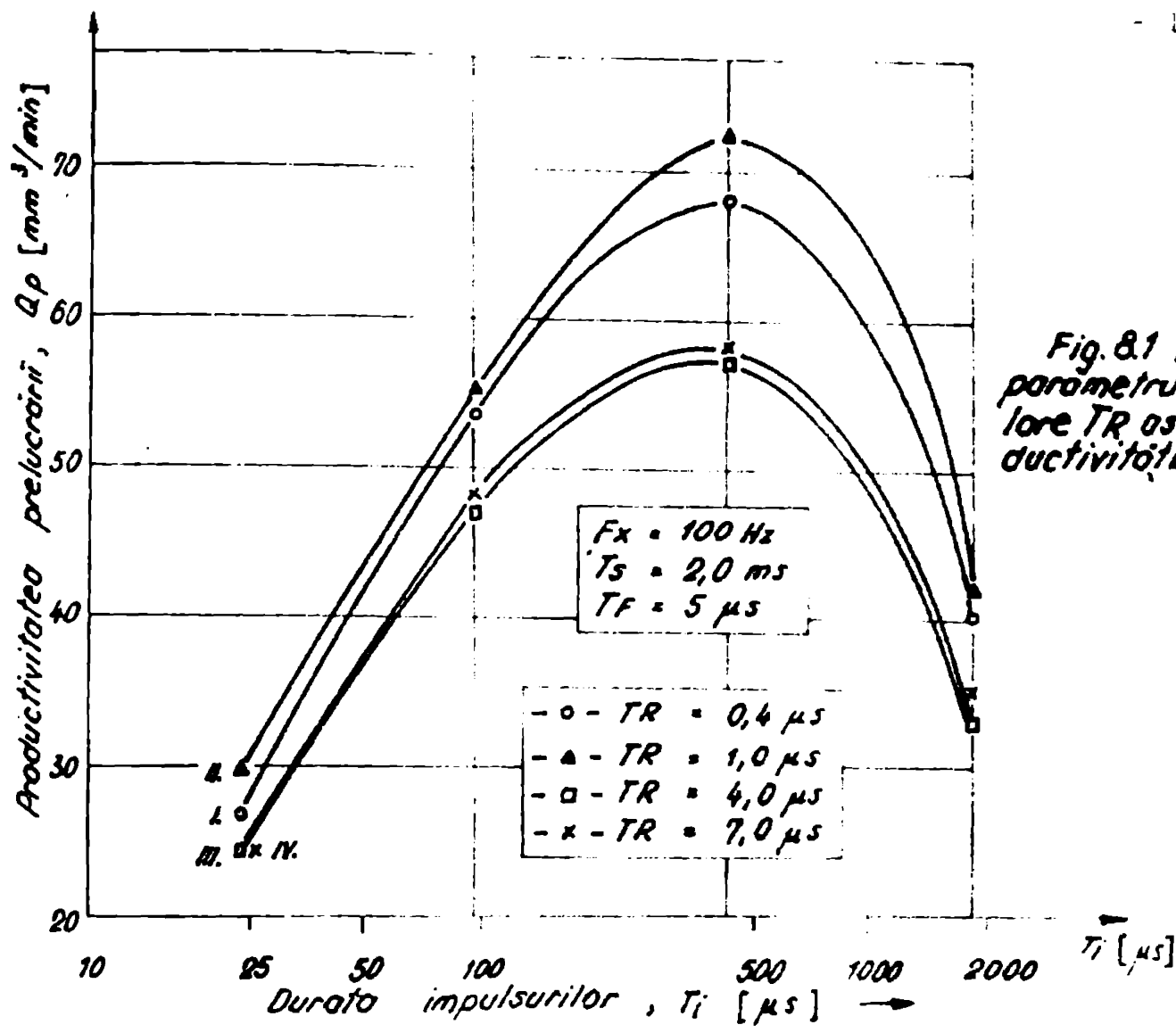


Fig. 8.1 Influenta parametrului de reglare TR asupra productivității.

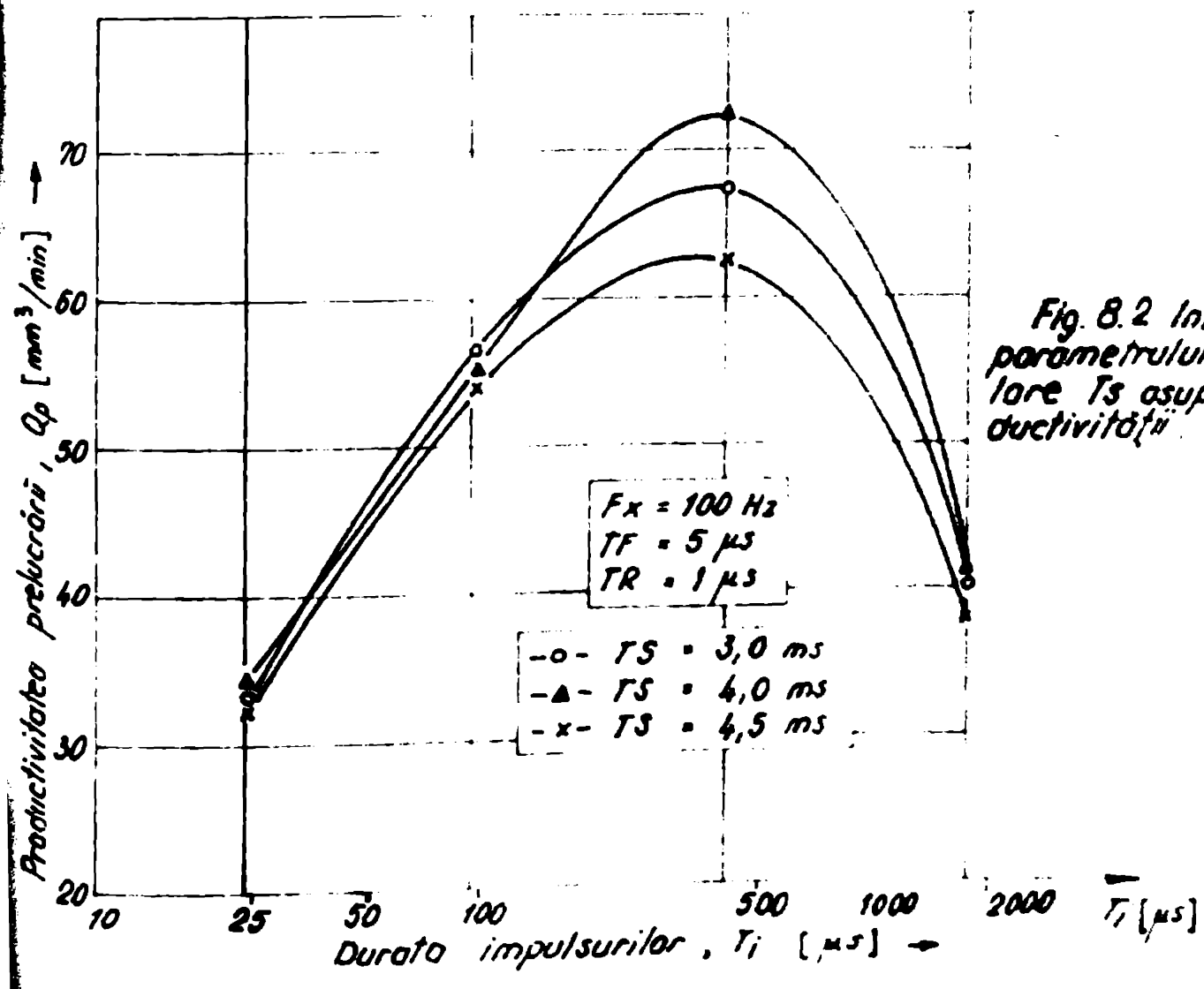


Fig. 8.2 Influenta parametrului de reglare T_s asupra productivității.

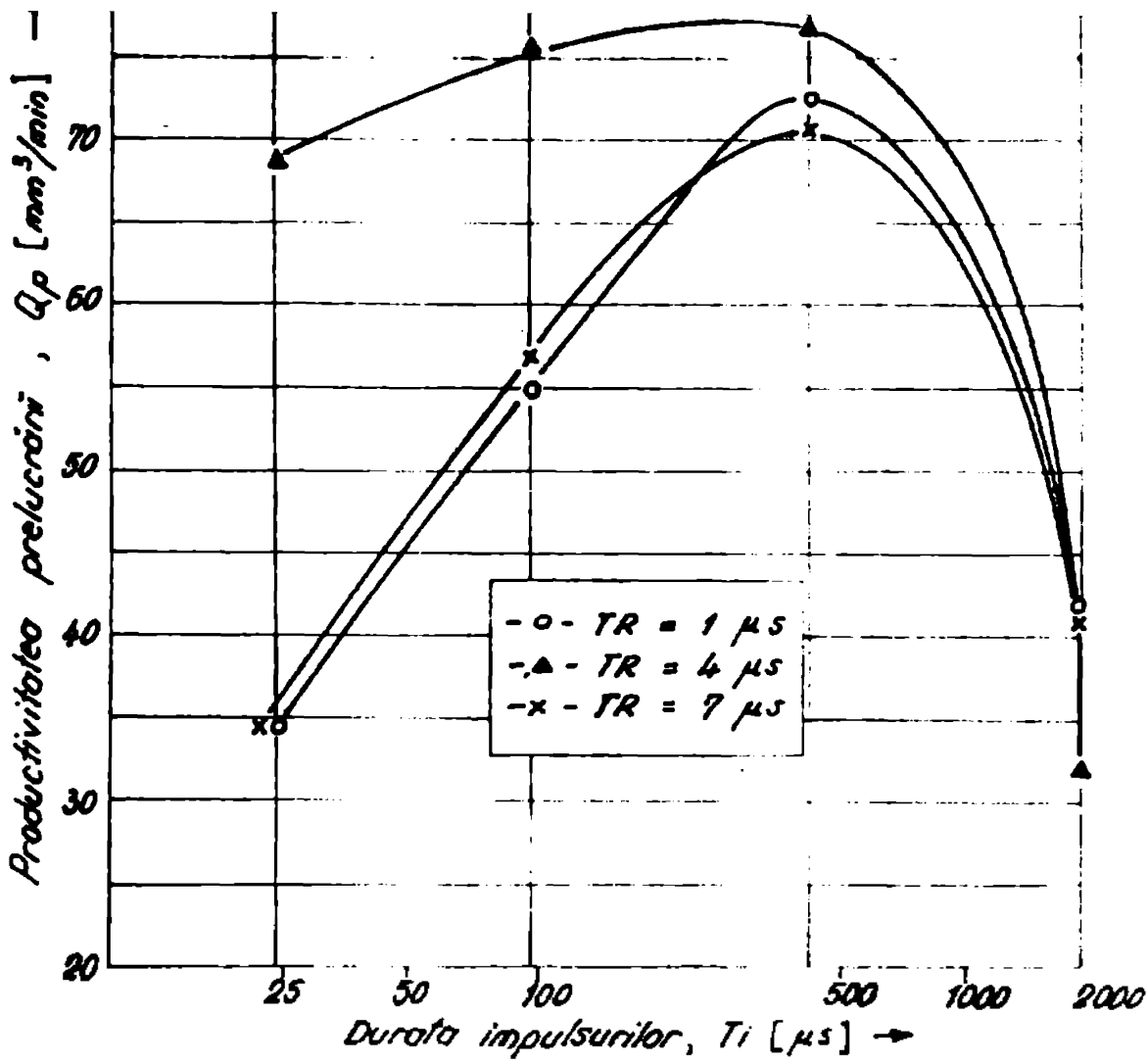


Fig. 8.3 Influența parametrului de reglare TR asupra productivității

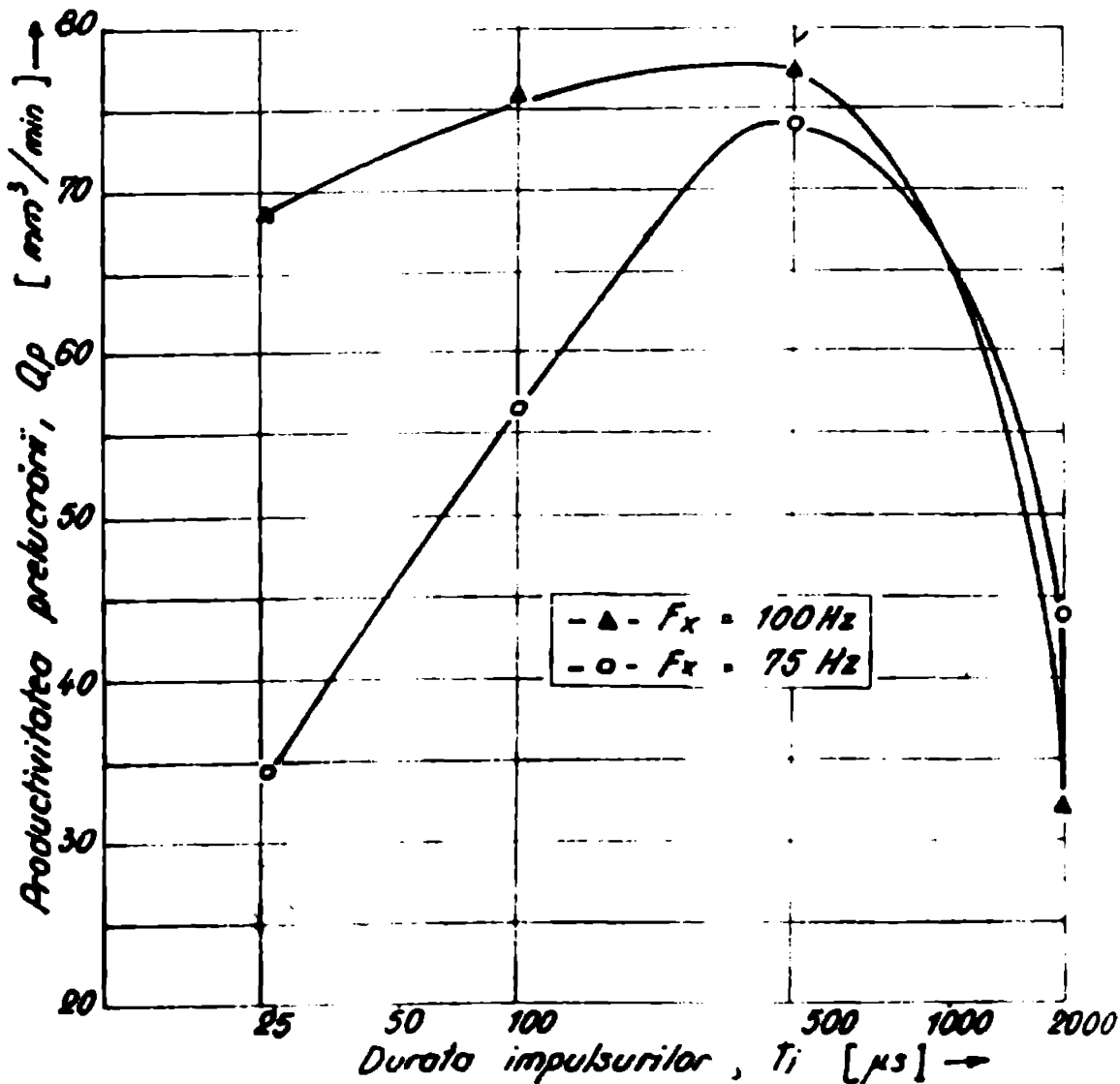


Fig. 8.4 Influența parametrului de reglare F_x asupra productivității

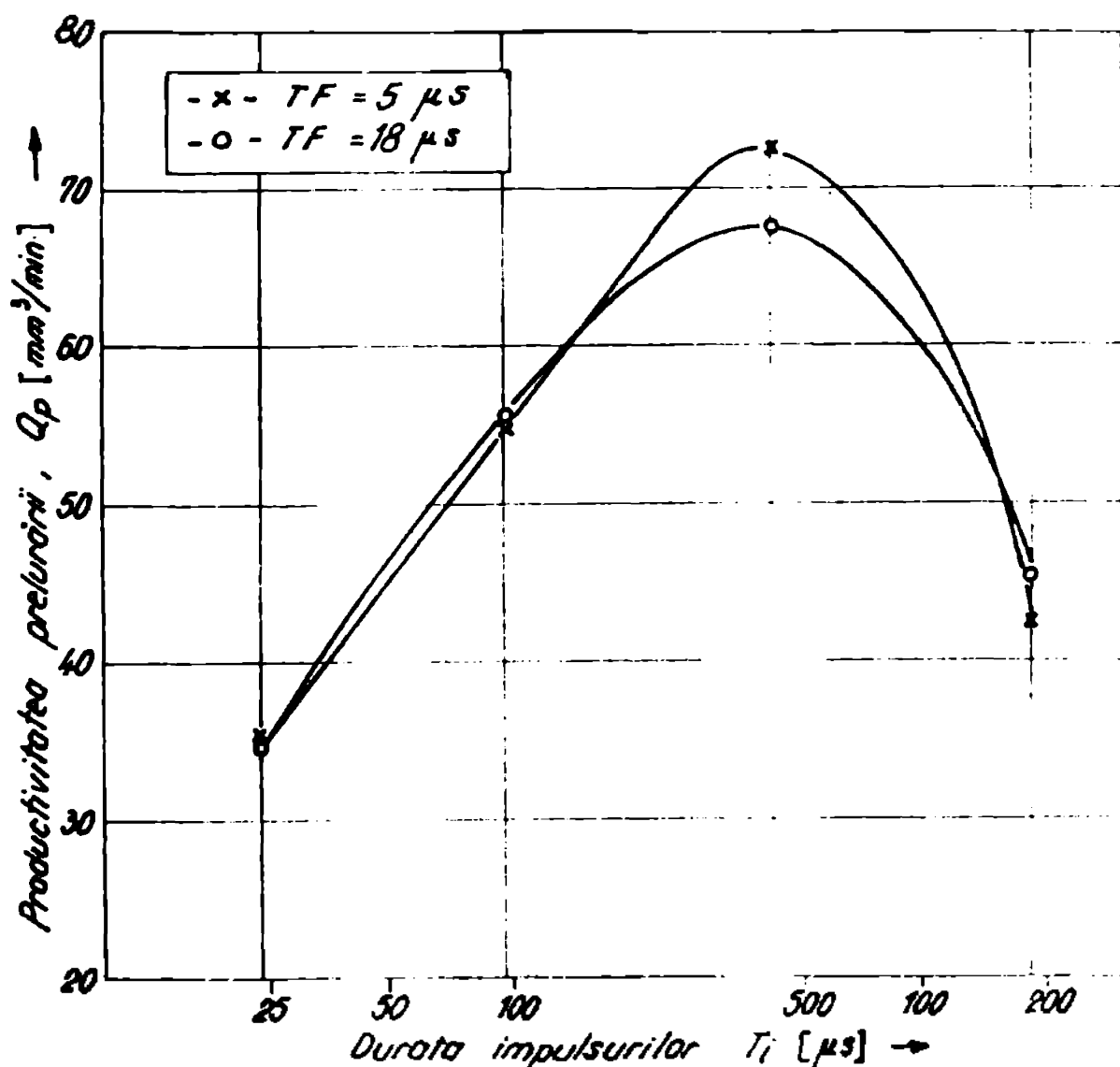


Fig. 8.5 Influența parametrului de reglare T_F asupra productivităților

mai redusă în comparație cu mărimile T_S și T_R , care au rol hotărâtor în asigurarea stabilității sistemului și în îmbunătățirea performanțelor de lucru ale acestuia.

Cercetările experimentale efectuate au avut ca scop optimizarea mărimilor de reglare prezentate și menținerea lor constantă în cadrul programului lărgit de încercări care urmează.

Rezultatele obținute pot fi mult îmbunătățite în condițiile utilizării a unor elemente de execuție cu performanțe ridicate (frecvența de lucru superioară cazului prezentat) și

prin realizarea unor reglaje adecvate ale mărimilor de primă importanță (T_S, T_R), pentru fiecare experiment în parte, prin punerea în corespondență a acestor mărimi cu gradul de stabilitate în timp al prelucrării.

Acordarea regulatorului, pentru fiecare caz concret de prelucrare, are în vedere asigurarea unor durate optime de integrare (T_S) ale proceselor elementare de scurtcircuit pentru diversele perechi ale duratelor proceselor elementare de lucru (T_i, T_o). Astfel, pentru condițiile optime selectate, sistemul inversează mișcarea obiectului de transfer, prin integrarea unui număr variabil de procese elementare de scurtcircuit. Numărul proceselor elementare de scurtcircuit, integrate pe durata T_S , este mai mare la durate mici ale parametrilor (T_i, T_o) și este mai mic la durate mari ale acestor parametri. Optimizarea, pe fiecare experiment, a acestor mărimi creează condiții de mărire a stabilității prelucrării și deci de ridicare a performanțelor în ansamblu.

Durata de referință T_R a timpului de întârziere la amorsare se consideră ca optimă pînă la cca. 10 % din durata efectivă T_i a impulsului /40/, motiv pentru care și această mărime trebuie modificată corespunzător cu condițiile concrete de lucru, asigurîndu-se prin aceasta o desfășurare corectă și la performanțe ridicate ale procesului.

c.2. Cercetări asupra soluției adoptate

În urma optimizării parametrilor de reglare ai dispozitivului de automatizare (T_S, T_R, T_F, F_X), s-a urmărit testarea mașinii în condiții similare stanei anterioare, lărgindu-se plaja componentelor vectorului (T_i, T_o) și gama de măsurători asupra mărimilor de ieșire. Astfel, componentele vectorului mărimilor de durată au fost stabilite în treptele:

$$T_i = (24, 40, 95, 190, 420, 900, 1800) \mu s$$

$$T_o = (6, 12, 24, 40, 95, 190, 420) \mu s$$

respectiv aproximativ raportul $T_i/T_n = 4$.

Mărimile de ieşire analizate sînt reprezentate prin componentele vectorului (Q_p, Q_E, u, N_L) , identificate prin productivitatea prelucrării (Q_p), debitul uzării (Q_E), uzura relativă volumică (u) şi numărul proceselor elementare de lucru (N_L). Datele experimentale obţinute sînt prezentate în tabelul 8.2 şi reprezentate grafic în fig. 8.6, fig. 8.7 şi fig. 8.8.

TABELUL 8.2

nr. crt.	I [A]	T_i [μ s]	T_p [μ s]	Q_p [mm^3/min]	Q_E [mm^3/min]	u [%]	nr. imp. de lucru N_L [imp./15 min]
1	12,5	24	6	22,5500	7,3006	32,6415	16 423 920
2		48	12	24,3017	4,3333	20,3003	10 455 235
3		95	24	32,4649	1,4393	4,4334	4 165 030
4		190	48	37,7290	0,3779	1,0016	2 406 100
5		420	95	32,9482	0,1827	0,5547	1 436 109
6		900	190	22,6042	0,0602	0,2067	572 713
7		1800	420	10,0050	0,0314	0,2000	253 745
8	25	24	6	60,7011	10,9419	24,0316	12,709 079
9		48	12	71,3649	13,1201	18,3972	7 900 146
10		95	24	75,8440	7,2057	9,6062	3 333 060
11		190	48	73,0753	1,3041	2,4079	2 002 290
12		420	95	77,2106	0,5123	0,6035	1 077 604
13		900	190	57,2050	0,2464	0,4307	404 720
14		1800	420	32,3269	0,0752	0,2320	100 566
15	50	24	6	161,2232	40,2050	24,9752	9 701 606
16		48	12	160,5331	40,1284	23,0092	6 150 470
17		95	24	186,0369	31,3507	16,7739	3 405 060
18		190	48	102,0053	20,3140	11,1615	1 959 306
19		420	95	163,6549	10,0303	6,2097	934 411
20		900	190	133,1700	2,3104	1,7394	342 093
21		1800	420	107,5502	1,5050	1,3009	102 197

În fig. 8.6, se constată că dependențele $Q_p = f(T_i)$ sînt de tip narcotic, prezentînd un maxim, pentru toate treptele de curent considerate, corespunzător intervalului de durată

(100 us.....200 us). Din cercetările efectuate asupra exprimării acestor curbe prin funcții matematice, rezultă ca modelul matematic cel mai apropiat de dependențele prezentate este de forma unei funcții polinomiale de ordinul doi [71].

Considerăm funcția $f_i(a_0, a_1, a_2)$, ca fiind funcție polinomială care descrie cu suficientă precizie curbale prezentate, avînd forma :

$$y_i = f_i(a_0, a_1, a_2) = a_0 + a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot x_i^2 \quad (3.1)$$

unde vectorii (x_i, y_i) sînt cunoscuți din datele experimentale, punîndu-se problema determinării parametrilor a_j ($j = 0, 1, 2$), a căror rezolvare se realizează prin metoda celor mai mici pătrate. Pentru aceasta se prezintă condiția de minimă sub forma :

$$g(a_j) = \sum_{i=1}^7 [(a_0 + a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot x_i^2) - y_i]^2 = \min. \quad (3.2)$$

În care anulînd derivatele parțiale ale funcției $g(a_j)$ în raport cu parametri a_j se obține sistemul de ecuații normale :

$$\frac{\partial g(a_j)}{2 \cdot \partial a_j} = \sum_{i=1}^7 [(a_0 + a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot x_i^2) - y_i] \cdot \frac{\partial f_i(a_j)}{\partial a_j} = 0 \quad (3.3)$$

unde:

$$\frac{\partial f_i(a_j)}{\partial a_0} = 1 ; \quad \frac{\partial f_i(a_j)}{\partial a_1} = x_i ; \quad \frac{\partial f_i(a_j)}{\partial a_2} = x_i^2$$

Cu notațiile efectuate sistemul de ecuații normale devine :

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \sum x_i + a_2 \cdot \sum x_i^2 = \sum y_i \\ a_0 \cdot \sum x_i + a_1 \cdot \sum x_i^2 + a_2 \cdot \sum x_i^3 = \sum y_i \cdot x_i \\ a_0 \cdot \sum x_i^2 + a_1 \cdot \sum x_i^3 + a_2 \cdot \sum x_i^4 = \sum y_i \cdot x_i^2 \end{cases} \quad (3.4)$$

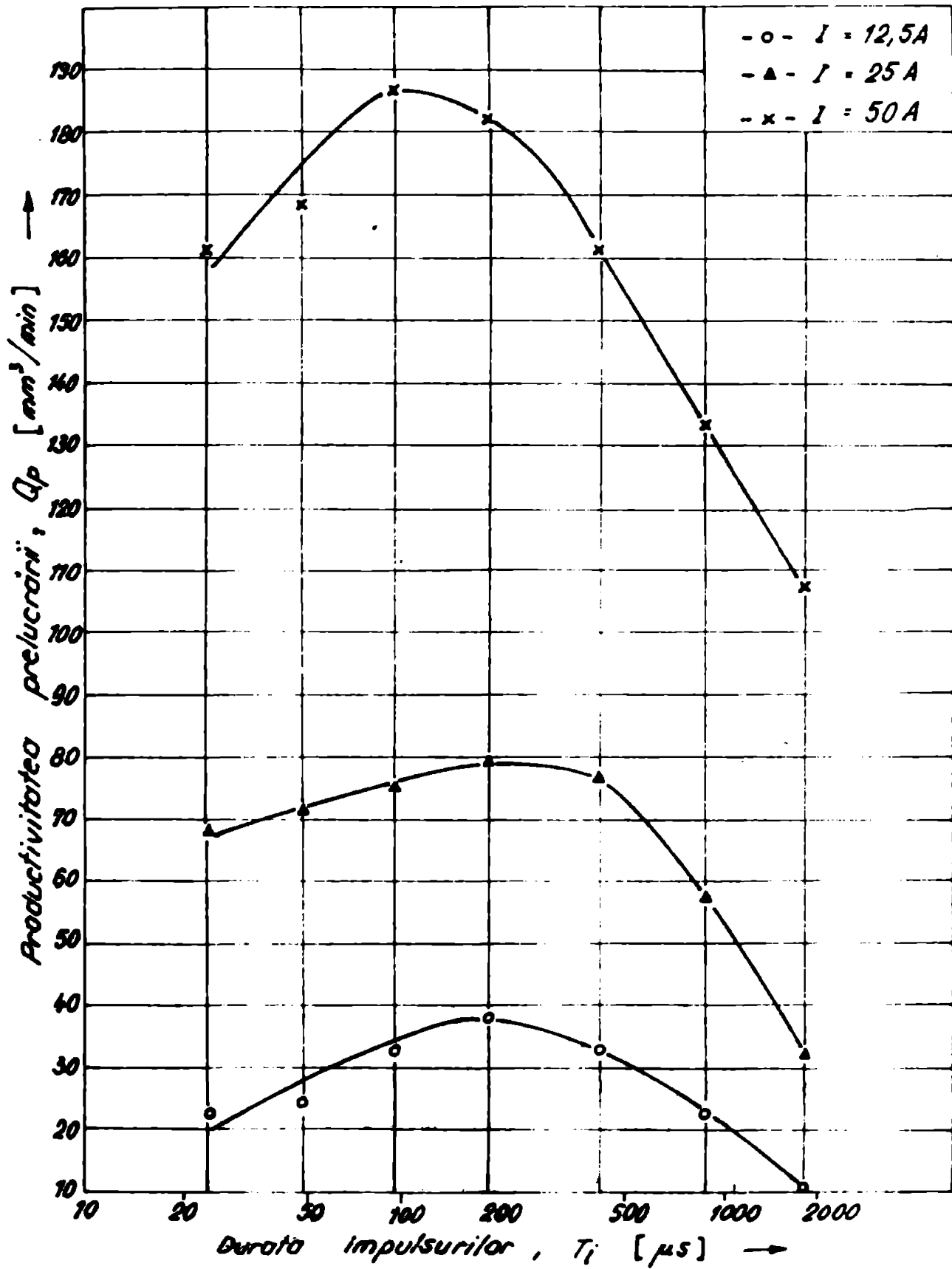


Fig. 8.6 Influența duratei proceselor elementare și a treptei de curent asupra productivității prelucrării

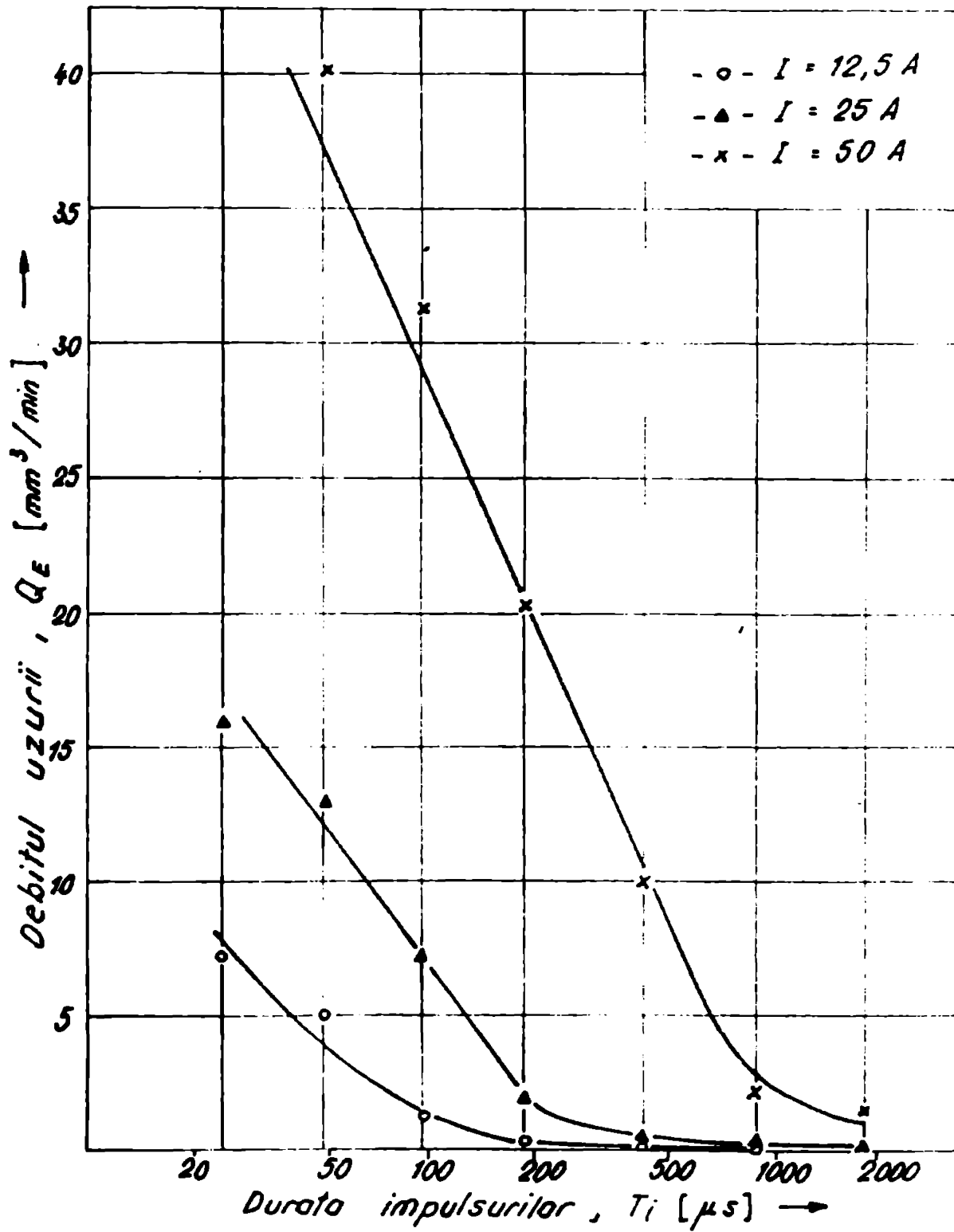


Fig. 8.7 Influența duratei proceselor elementare și a treptei de curent asupra debitului uzorū

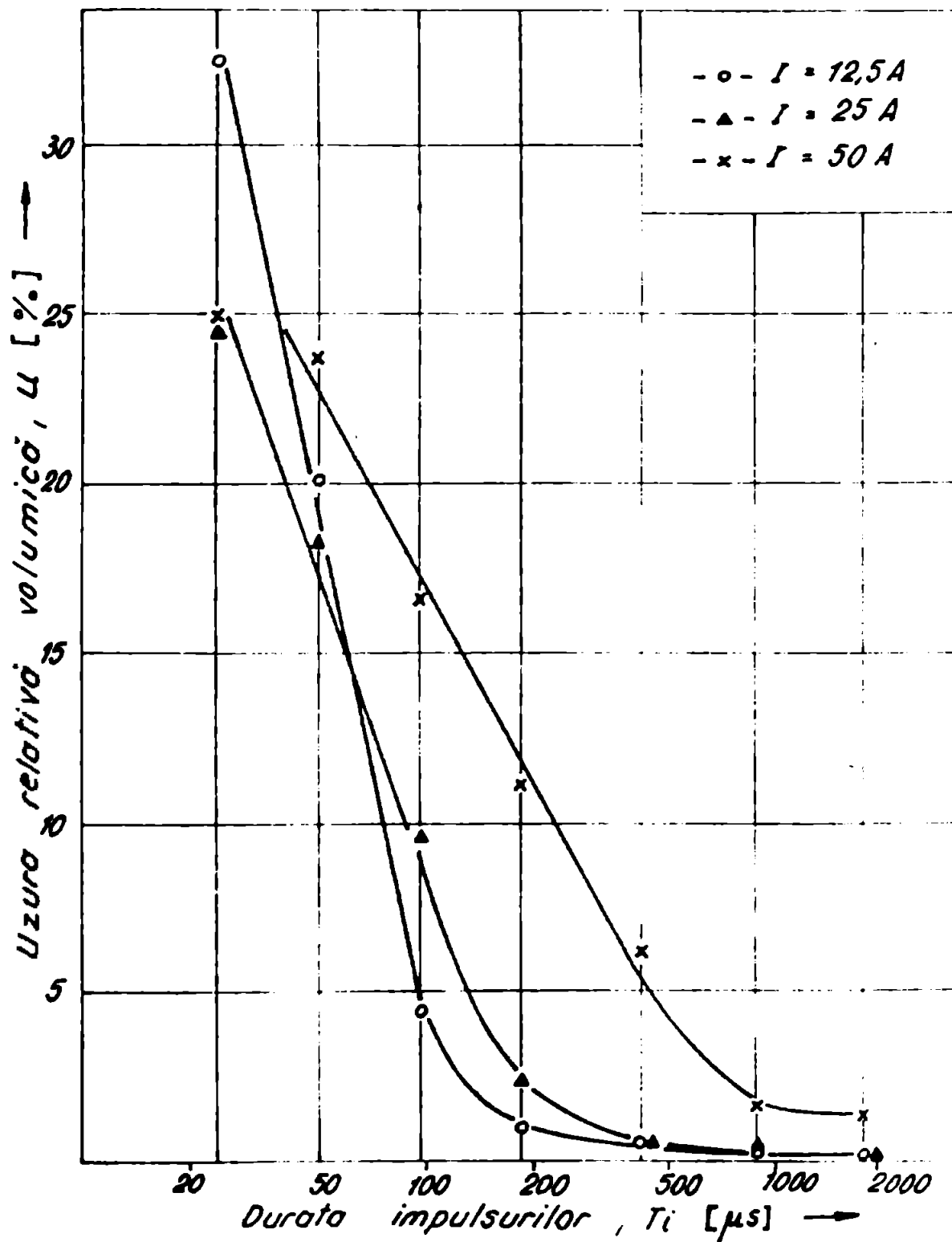


Fig. 8.8 Influența duratei proceselor elementare a treptei de curent asupra uzurii relative volumice.

Sistemul de ecuații normale (8.3) poate fi scris sub formă simplificată, utilizată la determinarea necunoscute-
lor a_j pe calculator :

$$\begin{cases} a_0 \cdot S_0 + a_1 \cdot S_1 + a_2 \cdot S_2 = Y_0 \\ a_0 \cdot S_1 + a_1 \cdot S_2 + a_2 \cdot S_3 = Y_1 \\ a_0 \cdot S_2 + a_1 \cdot S_3 + a_2 \cdot S_4 = Y_2 \end{cases} \quad (8.5)$$

a căruia soluție unică este dată de regula lui Cramer sub forma unui vector cu trei componente (a_0, a_1, a_2) , care reprezintă coeficienții funcției polinomiale de aproximare :

$$P(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (8.6)$$

Obținerea soluției sistemului de ecuații normale (8.5), precum și estimarea funcției polinomiale, în punctele corespunzătoare variabilei independente x_i ($i = 1, \dots, 7$), cu indicarea erorii produse între acestea și variabilele dependente y_i ($i = 1, \dots, 7$), s-a efectuat pe un calculator SIBUR-2X 81, programabil în limbajul BASIC. Schema logică de calcul este prezentată în fig. 8.9, iar programul realizat are structura :

```
10 REM "CALCULUL FUNCȚIEI POLINOMIALE DE ORDINUL 2OI"  
13 REM "PRIN METODA CELOR MAI MICI PATRATE PENTRU DATELE"  
16 REM "EXPERIMENTALE OBTINUTE CU SISTEMUL SRA - 1"  
20 LET S0 = 0  
30 LET S1 = 0  
40 LET S2 = 0  
50 LET S3 = 0  
60 LET S4 = 0  
70 LET Y0 = 0  
80 LET Y1 = 0  
90 LET Y2 = 0  
100 DIM X(8)  
110 DIM Y(8)  
120 DIM P(8)  
130 DIM E(8)
```

```
140 FOR I = 1 TO 7
150 INPUT X(I)
160 INPUT Y(I)
170 PRINT TAB(1); "X="; X(I); TAB(16); "Y="; Y(I)
180 NEXT I
190 SCROLL
200 FOR I = 1 TO 7
210 LET S0 = I
220 LET S1 = S1 + X(I)
230 LET S2 = S2 + X(I) ** 2
240 LET S3 = S3 + X(I) ** 3
250 LET S4 = S4 + X(I) ** 4
260 LET Y0 = Y0 + Y(I)
270 LET Y1 = Y1 + Y(I) * X(I)
280 LET Y2 = Y2 + Y(I) * X(I) ** 2
290 NEXT I
300 SCROLL
310 LET D = S0 * S2 * S4 + 2 * S1 * S2 * S3 + (S2 ** 3 +
+ S0 * S3 ** 2 + S4 * S1 ** 2)
315 IF D = 0 THEN GOTO 450
320 LET D1 = Y0 * S2 * S4 + Y1 * S2 * S3 + Y2 * S1 * S3 -
- (Y2 * S2 ** 2 + Y0 * S3 ** 2 + Y1 * S1 * S4)
330 LET D2 = S0 * Y1 * S4 + S1 * S2 * Y2 + S2 * S3 * Y0 -
- (Y1 * S2 ** 2 + S0 * Y2 * S3 + S1 * S4 * Y0)
340 LET D3 = S0 * S2 * Y2 + S1 * S3 * Y0 + S1 * S2 * Y1 -
- (Y0 * S2 ** 2 + Y1 * S0 * S3 + Y2 * S1 ** 2)
350 LET A0 = D1 / D
360 LET A1 = D2 / D
370 LET A2 = D3 / D
380 PRINT
390 PRINT TAB(1); "A0 ="; A0; TAB(16); "A1="; A1; TAB(26);
" A2="; A2
400 FOR I = 1 TO 7
410 LET P(I) = A0 + (A1 + A2 * X(I)) * X(I)
420 LET E(I) = 100 * (P(I) - Y(I)) / P(I)
430 PRINT TAB(1); "P="; P(I); TAB(16); "E="; E(I)
440 NEXT I
450 PRINT "SYSTEM INCOMPATIBLE D ="; D
      FOR
```

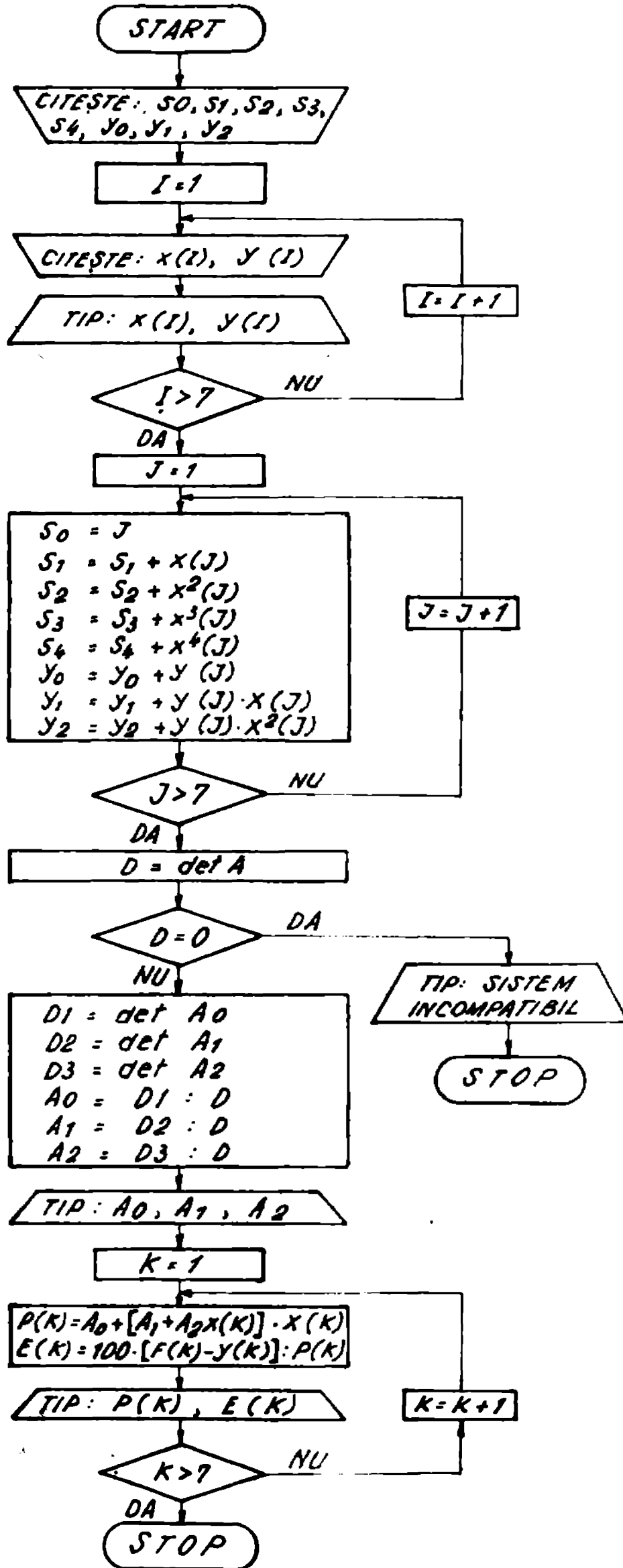


Fig. 8.9 Schema logică de calcul a funcției polinomiale de gradul doi.

Rezultatele obținute, prin metoda de calcul elaborată, sînt prezentate în tabelul 8.3.

TABELUL 8.3

Nr. crt.	T_i [μs]	Q_p [mm^3/min]	$P(x)$ [mm^3/min]	$S(x)$ [$\%$]	Funcția polinomială $P(x)$
1	24	22,5500	20,5209	20,9353	
2	48	24,3117	20,7112	15,3503	
3	95	32,4649	21,0408	-11,7595	$P(x)=20,31852+0,00060 \cdot x - 0,00001 \cdot x^2$
4	190	37,7290	23,5094	-27,5004	
5	420	32,9402	30,1120	- 9,4108	
6	900	22,6042	27,6186	10,1561	
7	1800	10,8850	9,8826	-10,1511	
8	24	68,7011	74,1724	7,2607	
9	48	71,3049	74,1309	3,7312	
10	95	75,0440	74,0060	-2,4024	$P(x)=74,1309-0,0008 \cdot x - 0,00001 \cdot x^2$
11	190	73,0152	73,5030	-7,4030	
12	420	77,2106	71,5992	-7,0371	
13	900	57,2059	63,0917	9,3290	
14	1800	32,3209	31,2243	-3,5311	
15	24	161,2232	176,4705	0,6443	
16	48	160,5331	175,4551	3,3452	
17	95	100,9369	173,4566	-7,7715	$P(x)=177,50933-0,04276 \cdot x + 1,0507 \cdot x^2$
18	190	102,0053	169,4399	-7,4150	
19	420	101,0549	159,0417	-1,1343	
20	900	133,1709	140,3070	5,1407	
21	1800	107,5502	106,0146	-1,4404	

Abaterile calculate $S(x)$ au valori situate sub 10 %, la experimentările efectuate în treptele de curent de 25 A și 50 A și valori ceva mai ridicate pentru treapta de curent de 12,5 A. În ansamblu se poate aprecia că modelul matematic prezentat descrie cu suficientă precizie dependența experimentală de formă $Q_p = f(T_i)$.

Dependențele $Q_E = f(T_1)$ și $u = f(T_1)$ au o caracteristică coborîtoare, aceasta reducîndu-se continuu cu creșterea duratelor T_1 și T_D , atîngînd o amplitudine minimă la valoarea maximă a parametrului variabil T_1 . Alura caracteristicilor ridicate prezintă importanță din punct de vedere al alegerii corespunzătoare a duratelor de impuls și de pauză care să asigure un anumit scop tehnologic dorit.

Tabelul 8.4 prezintă informații experimentale referitoare la numărul efectiv de procese elementare de lucru N_L și numărul deplasărilor incrementale ale elementului de execuție reprezentat prin vectorul (N_{AV}, N_{RE}, N_{AL}) . Componentele vectorului specificat sînt simboluri referitoare la deplasarea de avans (N_{AV}), orientată în sensul aronierii obiectului de transfer de obiectul deplasării, deplasarea de retragere (N_{RE}), definită prin îndepărtarea relativă a celor două elemente, ca urmare a apariției stărilor accidentale și deplasarea efectivă de avans ($N_{AL} = N_{AV} - N_{RE}$).

În scopul măsurării proceselor elementare de lucru s-a procedat la conceperea și realizarea unei scheme electronice adecvate, căreia i se aplică la intrare mărimile T_D și Q , obținîndu-se la ieșire numărul acestor mărimi discrete, însumate pe durata programată de experimentare de 15 minute. Întrucît numărătoarele electronice universale de tipul E-0202 A au o precizie redusă, respectiv ele sînt influențate chiar de surse de semnale discrete izolate galvanic de acestea, s-a realizat o rețea de filtre tip RC, unde pentru o capacitate constantă C dată se poate modifica, în trepte, rezistența circuitului prin intermediul unui comutator decadic cu ajutorul căruia se poate selecta constanta de timp corespunzătoare. Numărul treptelor de rezistențe este identic cu numărul treptelor variabilelor independente (T_1, T_D), iar acestea sînt astfel concepute încît numărătorul să funcționeze la semnale a căror durată reprezintă cea. $2.T_1/3$ (fig. 8.10). Semnalele cu durate inferioare pragului menționat sînt tăiate, obținîndu-se prin aceasta o reducere însemnată a influențelor exterioare procesului studiat asupra numărului de procese elementare însumate din zona de lucru:

Măsurarea deplasărilor incrementale ale organu-

TABLELA 8.4

Nr. crt.	I [A]	T _i [μs]	Q _p [μm ³ /min]	N _L [imp/15min]	N _{AV} [imp/15min]	N _{RE} [imp/15min]	N _{AL}
1	12,5	24	22,5500	16 423 920	3976	1 012	2 964
2		40	24,3017	10 455 235	3 374	516	2 858
3		95	32,4649	4 165 030	3 240	40	3 192
4		190	37,7290	2 496 100	3 603	127	3 562
5		420	32,9402	1 436 109	3 446	330	3 116
6		900	22,6042	572 713	2 550	304	2 174
7		1800	10,0058	253 745	1 505	443	1 062
8	25	24	60,7011	12 769 079	9 933	1015	0 110
9		40	71,3649	7 966 146	10 701	2 915	7 066
10		95	75,0440	3 333 000	0 041	075	7 070
11		190	79,0752	2 002 290	7 390	500	7 432
12		420	77,2106	1 077 604	7 440	309	7 004
13		900	57,2053	404 720	5 924	140	5 270
14		1800	32,3269	100 506	3926	350	2 376
15	50	24	101,2232	9 701 606	20 612	25	20 507
16		40	160,5331	6 150 470	20 325	305	13 930
17		95	100,9369	3 465 000	20 320	325	19 995
18		190	102,0053	1 353 300	19 417	327	10 490
19		420	101,6549	934 411	16 507	002	15 605
20		900	133,1709	342 003	13 045	390	12 055
21		1800	107,5502	102 337	11 037	1002	9 955

lui de reglare s-a realizat prin contarea semnalelor de la ieșirea distribuitorului de impulsuri (1,2,3,4) și respectiv, intrarea acestora în dispozitivul de contajie al motorului pas cu pas. Datele experimentale prezentate în tabel au fost obținute cu ajutorul standului schematicizat în fig. 8.11. Numărătoarele NR₁ și NR₂ formează împreună un numărător reversibil, care asigură numărarea semnalelor F_x, din secvențele (1,2,3,4), în corelație directă cu valoarea logică a semnalului sens. Astfel, pentru semnalul de sens sens = 1, acesta deschide poarta logică

P_{13} (SI), putându-se însumă semnalele corespunzătoare deplasării obiectului de transfer în sensul apropierii acestuia de obiectul prelucrării (avans de lucru). Dacă semnalul de sens $\overline{SENS} = 0$, acesta este negat prin poarta logică P_{14} (SI - NU), obținându-se semnalul $SENS = 1$, care deschide poarta logică P_{15} (SI), prin care sînt transmise semnalele r_x la numărătorul NR_2 , destinat numărării semnalelor discrete de retragere (N_{RE}). Rezultatele obținute, cu ajutorul standului prezentat, sînt afectate de erori cauzate de precizia redusă a numărătoarelor electronice utilizate și de incertitudinea realizării evenimentelor electrice, aplicate la intrarea motorului, în evenimente mecanice. Eliminarea ultimului tip de erori se poate realiza prin asigurarea funcționării elementului de execuție în buclă minoră (fig. 8.12) /41,88/. Acest mod de funcționare se realizează cu ajutorul unui traductor simolu rotativ (disc cu fante și LED-uri), care sesizează atât sensul de rotație cît și realizarea efectivă a evenimentului discret aplicat la intrare, asigurînd, prin intermediul buclei de reacție suplimentară, o corespondență între semnalele aplicate la intrarea motorului și cele mecanice rezultate la rotorul acestuia.

Prin aplicarea metodelor suplimentare de ecranare a influențelor exterioare asupra sistemului considerat (filtrarea semnalelor) și de confirmare a realizării evenimentelor amorțate (asigurarea funcționării în buclă minoră), motorul pas cu pas poate juca un rol dublu, și anume, atât rol de element de execuție, pentru asigurarea deplasării discrete a obiectului de transfer, cît și rol de traductor de deplasare, prin conectarea acestuia într-o structură similară cazului asociat.

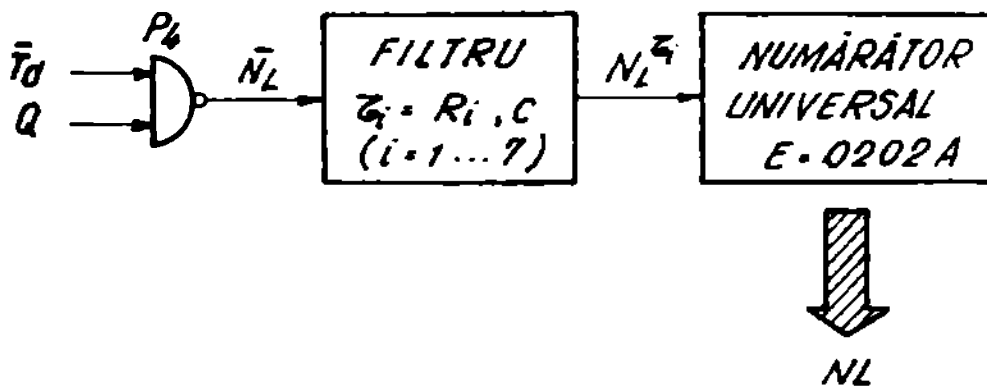


Fig. 8.10 Schemă măsurării proceselor elementare de lucru

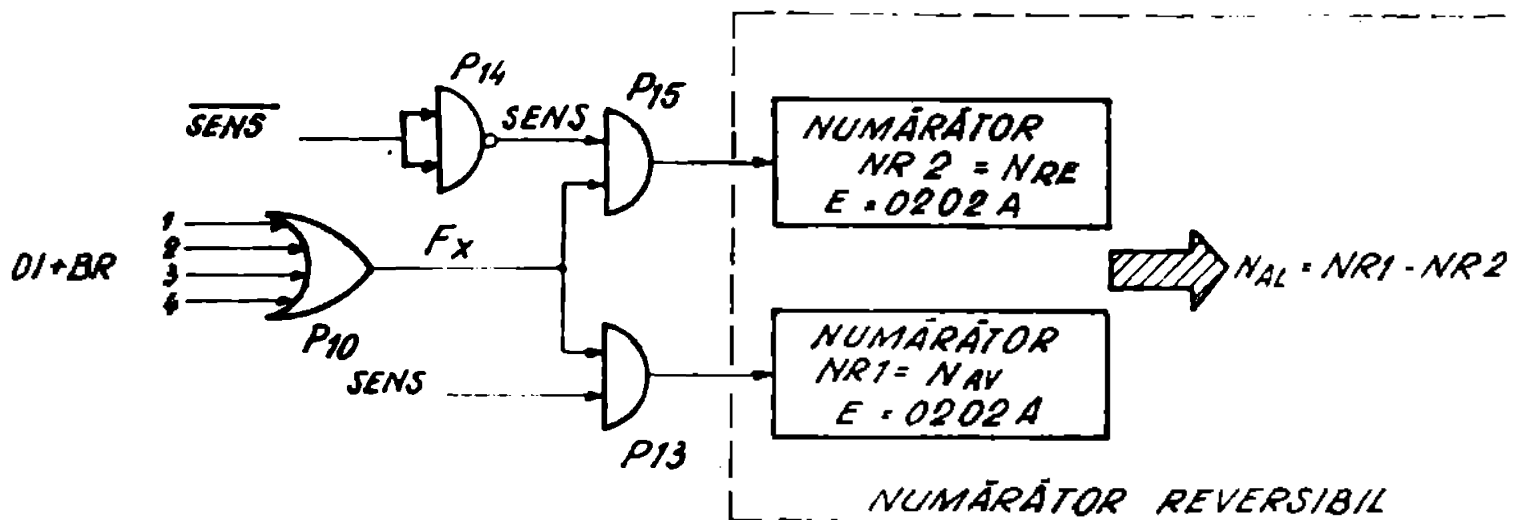


Fig. 8.11 Funcționarea MPP în regim de traductor de deplasare

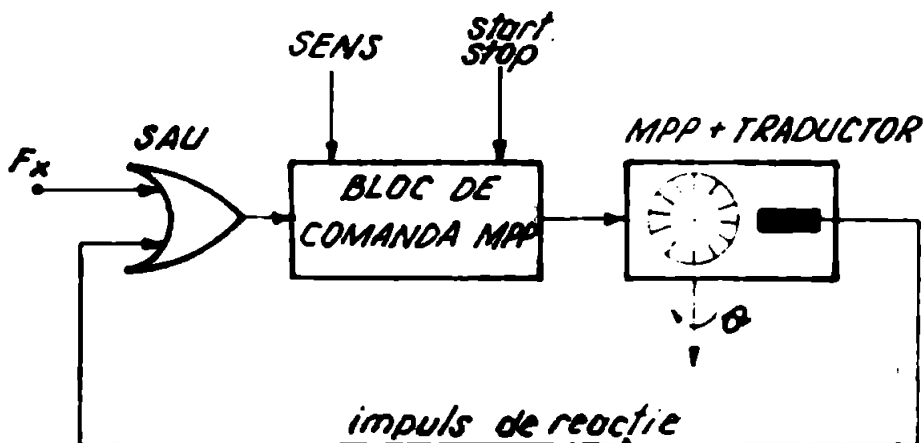
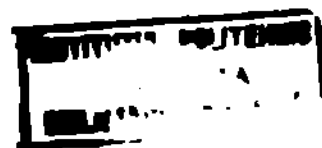


Fig. 8.12 Funcționarea MPP în buclă minoră



C A P I T O L U L 9

C O N C L U Z I I

Instalația de prelucrare prin eroziune electrică este constituită din patru sisteme interconectate, identificate prin : sistemul de generare a secțiunilor discrete, sistemul de lichid dielectric, sistemul mecanic și sistemul de conducere automată a procesului de prelucrare. Îmbunătățirea performanțelor oricărui sistem menționat, are drept consecință ridicarea corespunzătoare a eficacității globale a instalației, cu implicații favorabile asupra tuturor parametrilor care caracterizează prelucrarea. Bazat pe aceasta, lucrarea tratează problema sistemului de reglare automată a avansului, ca parte importantă în menținerea stabilității prelucrării și implicit în creșterea performanțelor instalației.

Analizând evoluția istorică a sistemelor de reglare automată se constată că, cea mai mare răspândire o au sistemele electrohidraulice, urmate de sistemele electro mecanice. Primul tip de sisteme este recomandat la mașini de puteri mari și mijlocii, iar tioul al doilea la mașini de puteri mici și mijlocii.

Utilizarea sistemelor electrohidraulice prezintă câteva neajunsuri referitoare la : sensibilitatea elementului convertor electric/hidraulic (electrovalva), precizia ridicată de prelucrare a elementelor hidraulice, instalații hidraulice complexe, dificultăți de etanșare etc., ceea ce a făcut ca în ultimul timp să crească ponderea sistemelor electro mecanice, echipate cu elemente de execuție cu inerție redusă (motoare electrice cu rotor disc), sau cu elemente de execuție discrete (motoare electrice pas cu pas). Ultimul tip de elemente de execuție asigură avantaje suplimentare, referitoare la : corelarea

dublei funcționări discrete (element de execuție - proces), domeniu larg de reglare a vitezelor, inversări de sensuri foarte rapide, posibilități de utilizare a elementului de execuție în regim de traductor de deplasare, lanț cinematic simplu (motor-reductor-mecanism șurub/piuliță), posibilități de comandă numerică, preț de cost mult mai redus comparativ cu sistemele electrodraulice /92/ etc.

Având în vedere avantajele menționate în cadrul sistemelor de reglare automată echipate cu elemente de execuție discrete, lucrarea tratează, într-o formă completă, sistemele de acest tip. În scopul realizării programului de cercetare, s-a adoptat metoda experimental-teoretică, respectiv s-a procedat la conceperea și realizarea sistemului, în condițiile testării elementelor componente și a sistemului integral, cu mărimi de comandă simulate și verificarea teoretică a stabilității sistemului prin aplicarea metodei grafice de analiză Nyquist.

Realizarea programului propus a necesitat cercetări importante, atât în domeniul teoretic cât și în domeniul experimental, evidențiindu-se astfel următoarele contribuții originale:

A. În domeniul cercetării fundamentale

1. Analiza proceselor elementare din zona de lucru în strânsă dependență cu mărimile implicate în proces.
2. Analiza mărimilor electrice de comandă a procesului. Sunt prezentate principalele tipuri de mărimi de comandă, posibilitățile de utilizare generale și locale acestora în cadrul soluției adoptate. Analiza are în vedere complexitatea structurale a dispozitivului de prelucrare a informației, respectiv posibilitățile momentane de dotare tehnică a cercetării.
3. Stabilirea performanțelor de bază ale sistemelor de reglare automată a avansului. Performanțele prezentate au caracter restrictiv, fiind deosebit de importante în etapele de proiectare, realizare și exploatare a sistemelor din

categoria celui analizat.

4. Determinarea modelului matematic al procesului prin metoda identificării experimentale. Informațiile înregistrate au condus la stabilirea expresiei analitice a procesului de prelucrare.

5. Stabilirea modelelor matematice ale elementelor componente din buclele de reglare automată. Determinarea sau adaptarea funcțiilor de transfer ale tuturor elementelor din structura buclelor de reglare automată prezintă o importanță majoră pentru obținerea funcțiilor de transfer ale sistemelor în ansamblu și respectiv pentru verificarea teoretică a stabilității acestora.

6. Determinarea funcțiilor de transfer ale sistemelor de reglare automată a avansului SRA - I și SRA - II.

7. Verificarea stabilității sistemelor de reglare automată SRA - I și SRA - II prin aplicarea criteriului grafic de stabilitate Nyquist. În acest sens s-a elaborat un program de calcul scris în limbaj BASIC și rulat pe un calculator SINCLAIR - ZX 81. Programul a fost conceput pentru a se obține răspunsul sistemului în condițiile modificării atât a coeficientului de amortizare, cât și a frecvenței de lucru.

8. Determinarea modelelor matematice, asociate datelor experimentale, referitoare la dependențele $\omega_p = f(T_1, I_1)$. Pentru aceasta a fost elaborat un program de calcul, scris în limbaj BASIC și rulat pe calculatorul SINCLAIR - ZX 81.

B. In domeniul cercetării aplicative

1. Realizarea sistemelor de reglare automată a avansului SRA - I și SRA - II.

Sistemul SRA - I, utilizat în cazul prelucrării cu generatorul de impulsuri comandate, asigură selectarea duratelor de întârziere la amorsare ale proceselor elementare de lucru, compensarea acestor întârzieri datorate cu o precizie prestabilită, iar diferențele rezultate stăpinesc duratele de întârziere

efective de integrare pentru elaborarea deciziei de deplasare a obiectului de transfer.

Sistemul SKA - II, utilizat la prelucrarea cu generatorul de relaxare, asigură integrarea mărimilor electrice din zona de lucru, compararea mărimei medii rezultate cu o mărime de referință iar rezultatul obținut este utilizat la elaborarea deciziei de deplasare a obiectului de transfer.

2. Conceperea și realizarea standului de încercări. În acest sens s-a realizat o instalație hibridă, constituită din sistemul electro-mecanic, special proiectat pentru mașina BRO - 1, iar generatorul și sistemul de lichid dielectric fac parte din dotarea mașinii de prelucrare prin eroziune electrică SIER - 01.

3. Realizarea standului pentru verificarea rapidității de răspuns a sistemului, în condițiile aplicării la intrarea acestuia a unui semnal standard de tip treaptă unitară.

4. Realizarea unor standuri destinate identificării experimentale atât a procesului de prelucrare cât și a elementelor componente din buclele de reglare ale sistemelor studiate.

5. Elaborarea unui program de încercări pentru optimizarea experimentală a parametrilor de reglare din bucla de reglare automată a sistemului SKA - I.

6. Stabilirea unui program de testare tehnologică a instalației realizate, urmărindu-se dependențele Q_p , Q_g și u . Datele obținute au fost prelucrate în tabele și grafice, iar pentru dependența $Q_p = f(T_1, I_1)$ s-a elaborat un program de calcul, rulat pe calculator, pentru determinarea modelelor matematice asociate datelor experimentale.

7. Proiectarea, în cadrul unui micro-proiect de cercetare-proiectare din catedră, a unui utilaj de prelucrare prin eroziune electrică.

8. Rezultatele cercetării au fost valorificate parțial /99/ printr-un contract încheiat cu ICR - ICR București.

În încheiere se poate aprecia că lucrarea prezintă un studiu complet referitor la conducerea automată a avansului la prelucrarea prin eroziune electrică, particulari-

zat pentru cazul sistemelor electromecanice adoptate. Analiza efectuată are caracter general, putându-se aplica unei game mari de sisteme automate similare.

Rezultatele teoretico-experimentale obținute atestă că soluțiile de sisteme automate adoptate sînt adecvate scopului propus. Studiul de stabilitate efectuat tratează comportarea sistemelor automate în regim dinamic de funcționare și modalitățile practice de obținere a unor rezerve de stabilitate corespunzătoare asigurării funcționalității corecte a acestora.

Cercetările viitoare trebuie orientate în direcția prelucrării numerice a mării de comandă, prin utilizarea unui calculator de proces capabil să analizeze, în timp real, mărimile implicate în proces și să elaboreze decizii optime pentru conducerea procesului de prelucrare. Realizarea programului menționat va asigura o valorificare superioară a rezultatelor cercetării în care lucrarea de față și-a adus o modestă contribuție.

B I B L I O G R A F I E

1. x x x Directivile Congresului al XIII - lea al Partidului Comunist Român cu privire la dezvoltarea economico-socială a României în cincinalul 1986-1990 și orientările de perspectivă până în anul 2000, Ed. Politică, București, 1984.
2. Albinski, K., Liebeskind, A. Sterowanie adaptacyjne druzerek elektroerozyjnych, mechnik, 53, Nr.10, 1980.
3. Antoni, S. Badania regulatora grubosci szczeliny miedzyelektrodowej w obrabiarkach elektroerozyjnych, mechnik, Nr.2, 1982.
4. Babuția, I., Merius, P. Automatizări electronice în construcția de mașini, Ed. Facla, Timișoara, 1983.
5. Balleys, F.g.a. Etude de la distribution spatiale de decharges, Annals of Clm, Vol. 22/1.
6. Balleys, F. Bearbeitungsverfahren mit elektrischen grossen Entladungen, Ateliers des Charmilles, Deutsche Offenlegungsschrift 2.362.924, 1974.
7. Beseckeraki, V.a.g.a. Teoria reglării automate. Colegere de probleme, Ed. Tehnică, București, 1964.
8. Bițoiu, A. g.a. Practica electronistului actor, Ed. Albatros, București, 1984.
9. Botaz, B. Mașini - unelte, Ed. Tehnică, București, 1972.
10. Buzulick, D. Considerații asupra controlabilității procesului de prelucrare prin eroziune electrică, Simpozionul Mecanica și transmisii mecanice, Reșița, 1976.
11. Călin, S. g.a. Automatizări electronice, Ed. Didactică și

- Pedagogică, București, 1972.
12. Cezar, M. Elemente de reglaj și automatizare, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1975.
 13. Constantin, P. ș.a. Electronică industrială, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1976.
 14. Cornelissen, H. ș.a. Technological Surfaces - and Objective Criterion for Comparing EDM - systems, Annals of the CIRP, vol. 27/1, 1978.
 15. Deacu, L., Pavel, Gh. Vibrații la mașini - unelte, Ed. Dacia, Cluj - Napoca, 1977.
 16. Dragnea, O. Momente de inerție, Ed. Tehnică, București, 1956.
 17. Drăghici, I. ș.a. Indrumător de proiectare în construcția de mașini, vol. 1, Ed. Tehnică, București, 1981.
 18. Drăghici, I. ș.a. Indrumător de proiectare în construcția de mașini, volumul II, Ed. Tehnică, București, 1982.
 19. Drimer, D. Asupra pregătirii specialiștilor în domeniul tehnologiilor neconvenționale, C.T.N. 3, Sibiu, 1982.
 20. Drimer, D. Asupra izvoarelor și resurselor științifice ale tehnologiilor neconvenționale, Construcția de mașini, 36, nr. 9, 1984.
 21. Enring, H.J. Einflub der schnellen prozebabblängigen Einstellung der Pausendauer auf das Arbeitsergebnis beim funkenerosiven Senken, HGF 133, Fertigungungsverfahren, 70, 1982.
 22. Esin, V.I. ș.a. vlianie parametrov electroghidovlicescovo privođa na ustojcivost elektroerozionnovo stanka, Iz kaz mašinostroenie, nr.1, 1980.
 23. Fransa, Al., Teodorescu, D. Servomotoare electrice în sistemele automate, Ed. Tehnică, București, 1966.
 24. Gavrilăș, I., Marinescu, M.I. Prelucrarea prin electroeroziune și electrochimic - abrazivă, vol. 1,

- Vol. II, Ed. Tehnică, București, 1960.
25. Gavrilag, I., Marinescu, N.I. Tehnologii neconvenționale, Institutul Politehnic București, 1984.
 26. Gerhard, J., Udo, S. Grundlagen der technologischen Optimierung der elektroerosiven Senkbearbeitung, Dissertation, TH Laxdeburg, 1976.
 27. Shevorkian, G.G. Unele legături ale prelucrării materialelor prin eroziune electrică, Metode de prelucrare electroerozive și electrochimice, Nr.2, 1970.
 28. Gough, P.O.C. ș.a. Regelung des Funkenwalts beim Erodieren, A.C.B., Nr.6, 1960.
 29. Gutkin, B.C. Avtomatizaciia elektroerozionnih stankov, Izdatestvo, Leningrad, 1971.
 30. Merșcovici, M. Circuite integrate în aparatura de automatizare, Ed. Tehnică, București, 1976.
 31. Meymann, D., Knauff, U. Die Stabilität des funkenerosiven Bearbeitungsprozesses und Probleme der Vorschubeinrichtung, Elektrische, Nr.29, 1975.
 32. Iasin, P.S. ș.a. Analiza mecanismului de prelucrare prin eroziune electrică, Prelucrarea electronică a materialelor, Nr. 3, 1975.
 33. Ivan, I., Rosen, G. Studiul posibilităților de autoreglare a vitezei de avans pe cale hidrolică la mașini - unelte de prelucrare electrochimic, Buletin științific și tehnic I. P. Brașov, Seria A Mecanică, Vol. XII, 1970.
 34. Kalenen, A., Crivi, M. Lotoare electrice nas cu nas, Ed. Tehnică, București, 1975.
 35. Knauff, U., Rothe, F. Die Regelung des Prozesses der funkenerosiven Metallbearbeitung, Elektrische, Nr. 12, Nr. 20, 1975.
 36. Knauff, U., Rothe, F. Verhinderung Stationärer Zustände bei der funkenerosiven Metallbearbeitung, Elektrische, Nr.20, 1975.

37. König, W., Kurr, R. Grundlagen zur Regelung des funkerosiven Bearbeitung, CFTK 1, Timișoara, 1971.
38. König, W., Kurr, R. Grundlagen zur selbsttätigen Regelung der funkerosiven Bearbeitung, CFTK 1, Timișoara, 1971.
39. Krecht, W., Kurr, R. Möglichkeiten zur selbsttätigen Optimierung der Erosionprozesses, Industrie Anzeiger, Nr. 3, 1971.
40. Kruth, J.P. Adaptive control optimization of electrodischarge machining, Dissertation, Leuven, 1979.
41. Kuo, B.C. ș.a. Sisteme de comandă și reglare incrementale a poziției, Editura Tehnică, București, 1961.
42. Kurr, R. ș.a. Die Auswirkung der Energiererteilung auf Abtrag und Verschleiß bei der funkerosiven Bearbeitung, Industrie Anzeiger, 94, Nr. 31, 1972.
43. Kurr, R., Barz, E. Adaptive Control - Systeme für die Funkenerosion, VDI - Zeitschrift, 115, Nr.10, 1973.
44. Levinson, E.S. ș.a. Elektrodicrovie ustanovali, Mashiz, 1951.
45. Livshits, A.L. ș.a. Elektrodolobnena obrabotka metalov, Izd. Mashinostroenie, Moskva, 1967.
46. Livshits, A. L. Fizicheskaia model process obshchaelektroerozionnoi obrabotki. Stenki i instrument, Nr.9, 1977.
47. Marendaz, G.A. Le servo - mecanismes, Informations techniques, Charvilles, Nr.11, 1968.
48. Mărgureanu, M. Mașini electrice speciale pentru sisteme automate, Ed. Tehnică, București, 1960.
49. Mărgureanu, M. Unele probleme ale calculului sistemelor de circulație a lichidelor dielectrice la prelucrarea prin eroziune electrică, An. 11 - A sesiune de comunicări științifice a tinerilor

ingineri din Timișoara, 1974.

50. Mărcușanu, A. Considerații privind desfășurarea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică în condițiile utilizării unui sistem de reglare automată a avansului echipat cu element de execuție Lotor pas cu pas, Sesiunea de comunicări tehnico - științifice a cadrelor didactice și studenților, Festivalul "Cântare României", 1977.
51. Mihoc, D. Teoria și elementele sistemelor de reglare automată, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1964.
52. Moraru, V. Vibrațiile și stabilitatea mașinilor-unelte, Ed. Tehnică, București, 1982.
53. Moraru, V. a.s. Mașini unelte speciale, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982.
54. Ianu, A. Perspectivele tehnologiilor neconvenționale în industrie, CMI 2, București, 1977.
55. Nanu, A., Buzulică, D. Posibilități de optimizare a programării parametrilor electrici la prelucrarea prin eroziune electrică, CMI 1, Timișoara, 1971.
56. Nanu, A., Mărcușanu, A., Nanu, D., Reviczky, A. Un nou sistem de avans automat utilizând motoare electrice pas cu pas pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică, Sesiunea de comunicări "Cântare României", Timișoara, 1977.
57. Nanu, A., Mărcușanu, A., Nanu, D., Reviczky, A. Contribuții privind realizarea unui sistem de avans automat pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică, Conferința "Tehnologii noi de fabricație în construcția de mașini", Galați, 1977.

58. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Dragomir, E., Reviczky, A. Cercetări experimentale cu privire la comportarea în exploatarea a maşinilor de prelucrat prin eroziune electrică tip ERO - 1, Buletinul ştiinţific şi tehnic, I.P.Timişoara, Seria Mecanică, Tom 25/39, Fasc. 1/1980.
59. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A. Sistem hibrid pentru conducerea procesului de prelucrare prin eroziune electrică, Buletinul ştiinţific şi tehnic, I.P.Timişoara, Seria Mecanică, Tom 25/39, Fasc. 2/1980.
60. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A. Consideraţii privind conducerea numerică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică, Buletinul ştiinţific şi tehnic, I.P.Timişoara, Seria Mecanică, Tom 25/39, Fasc. 2/1980.
61. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A. Sistem de reglare automată la maşina de prelucrare prin eroziune electrică ERO - 1, CNTM - 4, Timişoara, 1983.
62. Nanu, A., Mărcuşanu, A., Reviczky, A. Implementarea elementelor componente în structura sistemului de reglare automată, CNTM - 4, Timişoara, 1983.
63. Nanu, A., Nanu, D. Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic, Ed. Facla, Timişoara, 1981.
64. Nanu, D. s.a. Maşini de prelucrat prin eroziune electrică cu avans modulat pe direcţiile X, Y, Z, CNTM - 4, Timişoara, 1983.
65. Nichici, Al. Tendinţe actuale în modelarea proceselor de prelucrare prin eroziune electrică, CNTM - 2, Bucureşti, 1987.
66. Nichici, Al. s.a. Prelucrarea prin eroziune în construcţia de maşini, Editura Facla, Timişoara, 1983.
67. Nichici, Al., Popa, H. Analiza energetică - informaţională a proceselor de prelucrare prin eroziune,

CNTM - 4, Timișoara, 1983.

68. Papadache, I. Alegerea și acordarea reguletoarelor, Ed. Tehnică, București, 1975.
69. Pelegrin, M. ș.a. Elementele sistemelor de reglare automată, Ed. Tehnică, București, 1963.
70. Popilov, D. I. Elektrofizicheskaia i elektrohimicheskaia obrabotka materialov, Mașinostroenie, Moscova, 1982.
71. Reșea, D. I. ș.a. Probleme de statistică rezolvate pe calculator, Ed. Facla, Timișoara, 1984.
72. Robert, L. M., John, L. M. Proiectarea cu circuite integrate TTL, Ed. Tehnică, București, 1974.
73. Rumgiski, L. Z. Prelucrarea matematică a datelor experimentale, Indrumar, Ed. Tehnică, București, 1974.
74. Sauer, L. ș.a. Angrenaje. Proiectare. Materiale, Ed. Tehnică, București, 1970.
75. Savant, C. J. Calculul sistemelor automate, Ed. Tehnică, București, 1967.
76. Savii, Gh. Studiu asupra prelucrabilității fontelor nodulare prin procedee electroerozive, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Timișoara, 1970.
77. Sebastien, L. Autometica, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1973.
78. Selon, G. Guide pratique d'usinage par étincelage, Ateliers des Charilles, 1974.
79. Sosenko, M. B. Davlenie v mejelektroodnom zazorie pri elektroerozionnoi obrabotke, Stanki i instrument, Nr. 1, 1976.
80. Sprinceană, M. ș.a. Automatizări discrete în industrie. Culegere de probleme, Ed. Tehnică, București, 1978.

81. Stupel, F. A. Traductoare și convertoare electromecanice, Ed. Tehnică, București, 1967.
82. Sveşnikov, B. K. Necotorie osobesnosti regulirovania processa pereameşcenia elektroda v elektroimulsiivnyh stankah, Elektrofiziceskie i elektrohidrauliceskie metodî obrabotki materialov, nr. 9, 1977.
83. Sveşnikov, B. K. Elektrohidrauliceschie slediascie privodî dlia elektroerozionnyh stankob, Stanki i instrument, Nr. 3, 1977.
84. Taev, I. Appareils électriques d'automatisme et de commande, Éditions de Moscou, 1977.
85. Teodorescu, D. Sisteme automate, Ed. Racla, Timişoara, 1975.
86. Tiron, M. Teoria erorilor de măsurare și metoda celor mai mici pătrate, Ed. Tehnică, București, 1972.
87. Tiron, M. Prelucrarea statistică și informatică a datelor de măsurare, Ed. Tehnică, București, 1976.
88. Trifa, V. Sisteme de reglare a poziției cu motoare electrice pas cu pas, teză de doctorat, Timişoara, 1970.
89. Trifa, M. Rezistența Materialelor, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1967.
90. Weigand, A. Procese de descărcare și eroziune precum și reglarea avansului la mașinile de prelucrat prin electroeroziune, Industrie Anzeiger, 91, nr. 42, 1969.
91. Zolotykh, B. A. Phenomenologische Theorie der funkerosiven Massbearbeitung, ISEM, 1970.
92. x x x Studii și cercetări pentru realizarea unui model experimental de sistem de avans pentru mașini de prelucrat prin eroziune electrică

utilizând motor pas cu pas, Contract ICP-TC
București, 1977

93. x x x Instrucțiuni de folosire pentru mașini de prelucrat prin electroeroziune ELER - 01, Intreprinderea Electrotimiș, Timisoara, 1978.
94. x x x Sinclair - ZX 81 BASIC Programmierhandbuch, 1981.
95. x x x Motoare pas cu pas, Seria LPP, Intreprinderea Electromotor, Timisoara, 1984.