

INSTITUTUL POLITEHNIC „TRAIAN VUIA” DIN TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA

Ing. GEORGE DRAGHICI

TEZA DE DOCTORAT

CERCETARI PRIVIND CONSTRUCTIA UTILAJULUI SI STABILIREA
TEHNOLOGIEI DE PRELUCRARE A MICROALEZAJELOR PRIN
EROZIUNE ELECTRICA

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific :

Prof. Emerit Dr. ing. GHEORGHE SAVII

1980

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA	
CENTRALA	
Volumul Nr.	380325
Dulap	299 Lit. F

C U P R I N S

1. INTRODUCERE	6
2. STADIUL ACTUAL AL CERCETARILOR PRIVIND PROCEDEELE TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE A MICROALEZAJELOR	12
2.1. Prelucrarea prin aşchiere	12
2.2. Prelucrarea prin eroziune electrochimică.	13
2.3. Prelucrarea prin eroziune cu radiații	15
2.4. Prelucrarea prin eroziune abrazivă ultrasonoră.	18
2.5. Prelucrarea prin eroziune electrică	19
2.5.1. Particularitățile procesului și parametri tehnologici de prelucrare	19
2.5.2. Caracteristicile constructive și funcționale ale utilajelor de prelucrare	23
2.6. Concluzii.	32
3. CONDITIILE DE ABORDARE, OBIECTIVELE SI METODICA DE CERCETARE	
3.1. Condițiile de abordare și obiectivele cercetării	34
3.2. Metodica de cercetare	35
4. UNELE CONSIDERATII CU PRIVIRE LA PROCESELE FUNDAMENTALE CE AU LOC LA PRELUCRAREA MICROALEZAJELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA	
4.1. Fenomene fizico-chimice la prelucrarea prin eroziune electrică	38
4.2. Modelul termic al procesului de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor	42
5. PRINCIPII DE PROIECTARE A UNOR SUBANSAMBLE SPECIFICE UTILAJELOR DE PRELUCRARE A MICROALEZAJELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA	
5.1. Sistemul de reglare automată a avansului electrodului scoulă	49
5.1.1. Rolul funcțional	49
5.1.2. Structura, elementele și funcționarea sistemului de reglare automată a avansului.	50
5.1.3. Calitatea statică a sistemului de reglare automată a avansului	53
5.1.4. Stabilitatea dinamică a sistemului de reglare automată a avansului	54
5.1.4.1. Stabilirea ecuațiilor diferențiale ale elementelor sistemului automat.	55

5.1.4.2.	Stabilirea funcțiilor de transfer ale elementelor sistemului automat	59
5.1.4.3.	Stabilirea funcției de transfer a sistemului automat	61
5.1.4.4.	Studiul stabilității dinamice a sistemului automat	61
5.1.4.5.	Imbunătățirea stabilității dinamice a sistemului automat.	62
5.2.	Dispozitivul de antrenare și ghidare a electrosculă	64
5.3.	Vibratorul electromagnetic.	67
5.3.1.	Compunerea vibratorului electromagnetic. . . .	67
5.3.2.	Stabilirea funcției de transfer a vibratorului electromagnetic.	68
5.3.3.	Studiul dinamic al vibrațiilor	70
5.3.4.	Calculul arcurilor lamelare.	72
5.3.5.	Determinarea forței produse de electromagnet .	73
5.4.	Concluzii	75
6.	CONTRIBUTII LA REALIZAREA UNOR MODELE EXPERIMENTALE DE UTILAJE ÎNTRU PRELUCRAREA MICROALEZAJELOR PRIN ERCZIUNE ELECTRICA	
6.1.	Considerații generale	77
6.2.	Construcția batiului, mecanismului de poziționare a capului de prelucrare și a dispozitivului de instalare a obiectului prelucrării	80
6.3.	Construcția și încercarea sistemului de reglare automată a avansului electrosculă	82
6.3.1.	Compunerea sistemului de reglare automată a avansului electrosculă	83
6.3.2.	Dispozitivul de automatizare	84
6.3.3.	Reductorul de turație.	86
6.3.4.	Dispozitivul de antrenare și ghidare a electrosculă.	88
6.3.5.	Verificarea stabilității dinamice a sistemului de reglare automată a avansului electrosculă .	91
6.4.	Construcția și încercarea vibratorului electromagnetic	91
6.5.	Construcția generatorului de impulsuri.	95
6.6.	Construcția dispozitivului de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrosculă . . .	97

6.7. Construcția instalației de circulare a lichidului dielectric	101
7. CERCETARI EXPERIMENTALE IN VEDEREA STABILIRII PARAMETRILOR TEHNOLOGICEI OPTIMI DE PRELUCRARE A MICROALEZAJELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA	
7.1. Condiții inițiale	103
7.2. Ordonarea influenței parametrilor procesului de prelucrare asupra indicilor tehnologici.	104
7.2.1. Seria de încercări experimentale	104
7.2.2. Stabilirea variabilei cu influența de ordinul I	105
7.2.3. Stabilirea variabilei cu influența de ordinul II	109
7.2.4. Stabilirea variabilei cu influența de ordin III	110
7.2.5. Stabilirea variabilelor cu influența de ordinul IV și V.	114
7.3. Variația indicilor tehnologici sub influența parametrilor procesului de prelucrare.	121
7.3.1. Influența parametrilor regimului electric.	121
7.3.1.1. Influența energiei descărcărilor electrice	124
7.3.1.2. Influența frecvenței descărcărilor electrice	132
7.3.2. Influența parametrilor oscilațiilor forțate ale electrozudului sculă	134
7.3.3. Influența conductibilității electrice a lichidului de lucru	145
7.3.4. Influența adâncimii de prelucrare.	147
7.4. Concluzii	147
8. APLICAREA INDUSTRIALA A CERCETARILOR	
8.1. Unele considerații generale	149
8.2. Contribuții la proiectarea și realizarea unor utilaje experimentale pentru prelucrarea prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor.	152
8.2.1. Dispozitivul de instalare și indexare a pulverizatorului montat pe micromașina de prelucrare prin eroziune electrică	152
8.2.2. Mașina semiautomată cu un post de prelucrare	152
8.2.2.1. Compunerea și funcționarea mașinii.	152
8.2.2.2. Construcția capului de prelucrare	157
8.2.2.3. Pupitrul electric	157

8.2.2.4. Instalația de circulare, filtrare și deionizare a lichidului dielectric. . .	159
8.2.3. Mașina automată cu patru posturi de prelucrare .	159
8.3. Analiza procesului tehnologic de prelucrare a orificiilor pulverizatorului RODLLA 150 s 720	162
8.3.1. Considerații generale	162
8.3.2. Controlul statistic în timpul desfășurării procesului de prelucrare.	162
8.3.2.1. Controlul ritmicității	163
8.3.2.2. Controlul preciziei dimensionale . . .	169
8.3.3. Precizia formei geometrice a orificiilor. . . .	177
8.3.4. Calitatea suprafeței orificiilor.	178
8.4. Concluzii	180
9. CONCLUZII FINALE.	181
BIBLIOGRAFIE	184
	196

1. INTRODUCERE

Din ce în ce mai mult, în diferite domenii industriale, își face apariția tehnologiile neconvenționale. Noțiunea de tehnologie neconvențională este înțeleasă în sensul de tehnologie nouă, modernă, eficientă, ca o consecință a progresului tehnic și care completează sau înlocuiește tehnologiile aplicate până în prezent, deosebindu-se de acestea prin fenomenele fizico-chimice diferite pe care se bazează.

În industria constructoare de mașini, tehnologiile neconvenționale sînt acelea care folosesc energii concentrate în vederea efectuării unor operații de prelucrare dimensională de tipul: găuririi, adîncirii, strunjirii, frezării, rectificării, rabotării, etc. În ultima perioadă, aceste tehnologii cunosc o extindere vertiginosă, constituind procedee de bază la prelucrarea unor produse. Astfel, se poate spune că, eroziunea electrică, în special, dar și eroziunea electrochimică, ultrasonică sau cu radiații au devenit, datorită sferei largi de cuprindere, tehnologii clasice.

Importanța deosebită acordată tehnologiilor neconvenționale este argumentată de faptul că Directivele Congresului al XII-lea al P.C.R. acordă prioritate „fabricației mașinilor unelte de prelucrat metale prin electroeroziune, electrochimie și alte procedee moderne”. Tema tezei de doctorat răspunde astfel cerințelor actuale, permițînd diversificarea producției de mașini de prelucrat prin eroziune electrică, cu modele destinate industriei de mecanică fină. În acest fel, se aduce o modestă contribuție la îndeplinirea prevederilor programului-directivă de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului tehnic, ale cărui orientări de bază, după cum sublinia tovarășul Nicolae Ceaușescu în Raportul Comitetului Central cu privire la activitatea P.C.R. în perioada dintre Congresul al XI-lea și Congresul al XII-lea și sarcinile de viitor ale partidului, „constituie afirmarea revoluției tehnico-științifice în toate domeniile de activitate, creșterea rolului științei în modernizarea economiei naționale, a întregii vieți sociale, în conducerea societății, legarea tot mai strîns a cercetării de producție, accentuarea contribuției creației științifice românești la progresul multilateral și

dinamic al țării noastre".

x
x x

In condițiile actualei crize energetice, dar în același timp al imposibilității de renunțare la motoarele termice, ceea ce nici nu se prevede într-un viitor apropiat, apar o serie de cerințe imediate, cum sînt reducerea consumului de combustibil și creșterea randamentului. Realizarea acestor deziderate presupune adoptarea unor soluții îmbunătățite în sistemul de injecție, respectiv de carburare. În tabelul 1.1 se prezintă sintetizat [126], cerințele care se impun pe plan mondial motoarelor Diesel, soluțiile tehnice și constructive prin care se pot realiza, căile și mijloacele de obținere a acestora, din punct de vedere tehnologic.

Tabelul 1.1

Cerințe impuse	Soluții tehnice	Soluții constructive	Sol. tehnolog.
Creșterea randamentului motorului	Mărirea presiunii de injecție la 300 daN/cm ² și a temperaturii la 500°C	Folosirea unor materiale mai rezistente la temperaturi ridicate, presiuni mari, deformări și oxidări	Utilizarea materialelor speciale: stelit, carburi met. Prelucrare după tratam. term.
Putere ridicată a motorului	Creșterea nr. orif. pulveriz.	Nr. orif. peste 6	
Reducerea gazelor de eșapament	Orificii de pulverizare de diametru mai mic, precizie ridicată	Diametrul orificiilor mai mic de 0,3 mm, variația debitului de injecție sub 1%	Prelucrarea prin procedee neconvenționale

Pulverizatoarele injectoarelor de la motoarele Diesel se recomandă să se realizeze cu orificii de diametru sub 0,3 mm, considerându-se căptim 0,125 mm și numărul de 8. Varietatea mare de motoare necesită însă un studiu amănunțit pentru găsirea celei mai

corespunzătoare soluții. Câteva variante constructive de pulverizatoare sînt prezentate în figura 1.1.

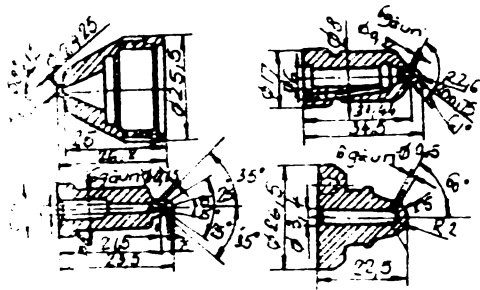


Fig. 1.1 Tipuri de pulverizatoare pentru injectoarele motoarelor Diesel.

Cercetările specialiștilor din acest domeniu au fost îndreptate și înspre îmbunătățirea carburanției, prevăzîndu-se în acest sens o multitudine de diafragme de forme geometrice diferite, a căror realizare oferă un câmp larg de aplicare a microprelucrărilor, în funcție de condițiile concrete urmînd a se stabili procedeele tehnologice optime din punct de vedere tehnico-economic.

Si în domeniul motoarelor de aviație există preocupări pentru atingerea unor performanțe superioare. Se cunoaște însă, că puterea turbinelor cu gaz este limitată de temperatura pe care o admit în timpul funcționării diferitele elemente componente. Cu toate că, datorită progreselor importante realizate în metalurgie a fost posibilă obținerea unor aliaje refractare (nimonic, renes, etc.) și temperatura de funcționare a putut fi ridicată la 1000°C , o depășire a acesteia cu 50°C numai, determină reducerea la jumătate a fiabilității motorului.

pentru a se evita producerea unui asemenea impediment este necesar a se realiza o răcire intensă în etajul de înaltă presiune al motorului. În acest scop sînt prevăzute orificii de diametru mic și în număr mare, de-a lungul bordului de atac și de scurgere, precum și în fusul paletelor rotorului turbinei. În figura 1.2 este prezentată o paletă de turbina cu orificii de răcire.

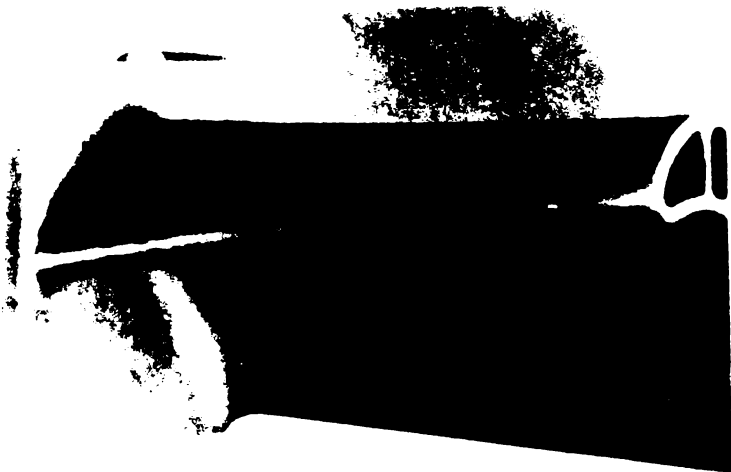


Fig.1.2. paletă de turbina.

Aparatura hidraulică și pneumatică are în componență o serie de elemente prevăzute cu diafragme, ferestre, orificii de amortizare și circuite de comandă, a căror prelucrare se cere realizată cu precizie ridicată.

In electronica sînt necesare numeroase orificii ; la grilele tuburilor electronice, plăcile de trecere a firelor microcomponentelor circuitelor integrate sau alte elemente miniaturale, inelele de ferita pentru memoriile calculatoarelor, etc.

Un domeniu privilegiat al microprelucrărilor îl constituie orlogeria, alezajele lagarelor din rubin, safir sau carburi metalice, pe care se găsesc roțile dințate ale mecanismului, avînd diametrul de 0,05...0,1 mm.

La fabricarea firelor sintetice se folosesc filiere din tantal, cu circa 10000 de orificii de diametru 0,07...0,12 mm. Asemenea filiere se mai folosesc și pentru trefilarea firelor metalice.

O mare varietate de microalezaje se găsesc la arzătoarele de gaz, ace speciale chirurgicale, etc.

Varietatea mare dimensională, forma geometrică, materialul obiectului prelucrării, condițiile de precizie impuse, fac necesar ca în vederea stabilirii procedurii tehnologice adecvat și a parametrilor optimi de prelucrare, să fie analizați toți factorii ce intervin și pe baza concluziilor desprinse în urma cercetărilor, a analizei tehnico-economice, să se decidă asupra soluției de aplicare industrială.

Pornind de la aceste considerente, teza de doctorat încearcă să rezolve problema realizării orificiilor de diametru mai mic de 0,4 mm, folosind procedeul electroeroziv. În acest scop s-a urmărit a se pune bazele construcției unor utilaje specializate pentru prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică, inexistente în momentul de față în întreprinderile din țara noastră, iar în paralel cu aceasta, stabilirea parametrilor tehnologici optimi de desfășurare a procesului.

Teza de doctorat este extinsă pe 196 de pagini, fiind împărțită în 9 capitole, cuprinzînd 149 figuri (desene explicative, fotografii, diagrame), 28 de tabele și 164 referiri bibliografice, dintre care 10 lucrări proprii.

În capitolul al doilea se prezintă stadiul actual al cercetărilor privind procedeele tehnologice utilizate pentru prelucrarea microalezajelor întîlnite în diferite domenii industriale, scoțîndu-se în evidență particularitățile procesului de prelucrare, condițiile de realizare, parametrii tehnologici specifici, di-

recițiile și limitele de aplicare.

Pornind de la concluziile ce se desprind în urma analizei critice a stadiului realizărilor pe plan mondial, în capitolul al treilea sunt arătate condițiile de abordare a cercetării, obiectivele urmărite și metodică întrebuintată.

În capitolul 4 sunt prezentate fenomenele fizico-chimice care au loc sub acțiunea descărcărilor electrice, fundamentându-se un model termic al procesului de prelucrare prin eroziune electrică, particularizat efectuării microalezajelor.

Capitolul 5 al tezei de doctorat tratează aspecte referitoare la principiile de proiectare a unor subansamble specifice utilajelor de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică. Pentru sistemul automat de reglare a avansului electrodului se analizează calitatea statică și dinamică, deducându-se ecuațiile diferențiale și funcțiile de transfer ale elementelor acestuia, cu ajutorul cărora se formulează condițiile de stabilitate în funcționare. Este tratat de asemenea dispozitivul de antrenare și ghidare a electrodului sculă și sunt stabilite principiile constructive ale vibratorului electromagnet.

În capitolul 6 sunt prezentate contribuțiile aduse la realizarea unor modele experimentale de utilaje pentru prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică, arătându-se și justificându-se soluțiile adoptate pentru construcția batiului, mecanismului de poziționare a capului de prelucrare și a dispozitivului de instalare a obiectului prelucrării, sistemului automat de reglare a avansului electrodului sculă, vibratorului electromagnet, generatorului de impulsuri, dispozitivului de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrodului sculă, instalației de producere, circulare și filtrare a lichidului dielectric.

Cercetările experimentale efectuate în vederea stabilirii parametrilor de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică sunt redată în capitolul 7. Acestea au fost grupate în două părți distincte, în prima parte urmărindu-se stabilirea ordinii de influență a parametrilor procesului asupra indicilor tehnologici luați în considerare, prin folosirea unor metode statistice de prelucrare a rezultatelor, iar în cea de-a doua parte efectuându-se un studiu al variației indicilor tehnologici sub influența parametrilor cei mai importanți ai procesului de prelucrare, în

vederea stabilirii condițiilor optime de realizare a microalezajelor. Un număr mare de diagrame redată aici ilustrează variația vitezei de erodare, a mărimei interstițiului lateral și a concitației orificiilor, în funcție de energia și frecvența descărcărilor electrice, amplitudinea și frecvența oscilațiilor forțate ale electrodului sculă, adâncimea de prelucrare și conductibilitatea electrică a lichidului dielectric folosit.

Capitolul 8 se referă la aplicarea industrială a cercetărilor, spre care este orientat, de altfel, întregul conținut al tezei de doctorat. Se prezintă în acest sens rezultatele înregistrate în cadrul colaborării existente între Colectivul de cercetare-proiectare în tehnologii neconvenționale de la Institutul Politehnic "Traian Vuia" din Timișoara și Intreprinderea de mecanică fină din Sinaia, având ca scop înlocuirea actualului proces tehnologic de prelucrare, prin aşchiere, a orificiilor pulverizatoarelor de la injectoarele motoarelor Diesel, cu procedeul de prelucrare prin eroziune electrică.

Concluziile rezultate în urma cercetărilor întreprinse sînt enunțate în ultimul capitol al tezei de doctorat.

x

x x

Cu prilejul finalizării tezei de doctorat, autorul își exprimă și pe această cale, cele mai sincere mulțumiri și profunde recunoștințe conducătorului științific, Prof.em.Dr.ing. GHEORGHE SAVII, pentru îndrumarea competentă, de zi cu zi, a întregii activități, pentru insuflarea pasiunii în cercetare și canalizarea acesteia spre domeniile de vîrf ale tehnologiei. Totodată, autorul aduce mulțumiri colaboratorilor apropiați, studenților, cu care a lucrat în colectivul de cercetare și a materializat unele aspecte ale problemei abordate. De asemenea, adresează mulțumiri cadrelor didactice din catedrele de Tehnologia construcțiilor de mașini și Tehnologie mecanică, care, în mod colegial, prin sugestiile și observațiile formulate pe parcursul elaborării lucrării, au contribuit la finalizarea acesteia.

2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND PROCEEDELE TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE A MICROALEZAJELOR.

Prelucrarea microalezajelor a constituit în permanență un domeniu important de cercetare, cu atât mai mult cu cât cerințele actuale sînt tot mai numeroase și diverse. În concordanță cu ansamblul condițiilor concrete au fost dezvoltate tehnologii de prelucrare adecvate.

2.1. Prelucrarea prin așchiere.

Folosirea procedeelor de prelucrare clasice, prin așchiere este condiționată, după cum se știe, în mare parte, de duritatea materialului obiectului prelucrării. În cazul microalezajelor, aplicarea procedeeului mai este limitată și de posibilitățile de realizare a unor scule suficient de rigide la astfel de dimensiuni, precum și de antrenarea acestora în mișcare de rotație cu valori ale turației extrem de ridicate, necesare pentru obținerea unei viteze de așchiere corespunzătoare.

Burghiile folosite pentru prelucrarea microalezajelor au o construcție specială (figura 2.1), avînd coada de diametru D și lungime L , cu valori ce le conferă rigiditatea necesară, iar partea activă de diametru d și lungime l , în raport $l/d < 20$.

Din motivele amintite, prelucrarea prin așchiere a microalezajelor este posibilă pînă la un diametru minim de circa 0,1 mm. În cazul producției individuale operația este executată sub microscop, de către muncitori cu înaltă calificare. Consecințele folosirii în producția de serie a procedeeului de gaurire mecanică la prelucrarea microalezajelor atrage după sine următoarele dezavantaje mai importante [58]:

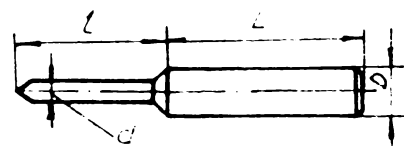


Fig. 2.1. Burghiu pentru prelucrarea microalezajelor.

- obținerea unui procent apreciabil de rebuturi, ca urmare a ruperii burghiilor în material;
- consumul ridicat de burghie, datorită durabilității reduse,

dificultății sau chiar imposibilității de reascuțire, ruperii cu ușurință;

- necesitatea efectuării după gaurire a unor operații suplimentare de debavurare, care ocupa 60 % din durata totală a prelucrării, respectiv de netezire, pentru care revine 10 % din timp, doar 30 % fiind practic afectat gauririi propriu-zise;

- prețul de cost ridicat.

În cazul prelucrării prin aschiere a orificiilor unui tip de pulverizator al injectoarelor de la motoarele Diesel, cu diametrul de 0,12 mm și adâncimea de 1,1 mm sînt necesari 60 de muncitori calificați, prețul de cost al sculelor se ridică anual la 200000 \$, rebuturile fiind în proporție de 19 %, la o producție de 42 milioane bucăți.

2.2. Prelucrarea prin eroziune electrochimică.

Procedeul electrochimic, bazat pe dizolvarea anodică a metalului din care este constituit obiectul prelucrării, cunoaște în cazul microalezajelor unele variante specifice, caracterizate prin:

- modul de depasivare a peliculei anodice;
- natura electrolitului folosit;
- construcția obiectului de transfer;
- parametrii electrici și hidrodinamici ai regimului.

În acest sens se deosebesc [105],[126] următoarele variante ale procedurii electrochimice prin care pot fi realizate microalezaje:

- ECH - electrochimic cu depasivare hidrodinamică;
- STEM - Shaped tube electrolytic machining;
- ECF - Electrochemical fine drilling;
- ESD - Electro-stream drilling;
- EJD - Electro-jet drilling.

Schemele de principiu ale variantelor amintite sînt prezentate în figura 2.2, iar în tabelul 2.1 sînt date particularitățile acestora, parametrii caracteristici și gama orificiilor realizate.

La prelucrarea electrochimică hidrodinamică - ECH, hidroxidul fieros rezultat în urma reacțiilor chimice care au loc în celula formată din cei doi electrozi și lichidul electrolitic este îndepărtat cu dificultate pe măsura creșterii adîncimii de pătrundere, volumul

sau fiind de 10 ori mai mare decit a metalului dizolvat. Incercarile de intensificare a circulației produselor eroziunii prin mișcări vibratorii nu au dat rezultate corespunzătoare, determinind apariția scurtcircuitelor și cauzind abateri de prelucrare.

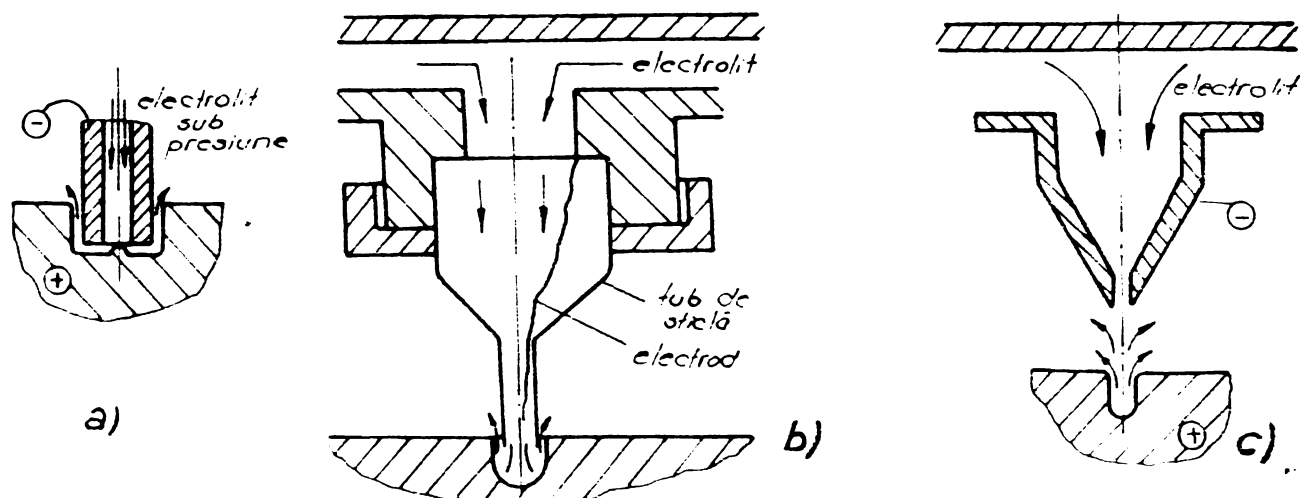


Fig. 4.4. variantele procedurii electrochimice utilizate la prelucrarea microalezajelor.

a- LCH, STEM; b- ECF, ESD; c- EJD.

Dezavantajele variantei electrochimice cu depasivare hidrodinamică sînt înlaturate la varianta STEM prin folosirea electrolitului acid, fapt ce permite creșterea adîncimii de prelucrare și micșorarea diametrului minim al orificiilor realizate. Degajarea excesivă a hidrogenului impune însă precauții în ceea ce privește evacuarea sa. Variația concentrației ionilor de metal în soluția de electrolit este nedorită, aceasta influențind conductibilitatea electrică și modificînd valoarea interstițiului lateral. O creștere a concentrației ionilor de metal poate cauza formarea depunerilor pe suprafața electrodului, motiv pentru care este necesar ca la intervale de timp de 8...20 s să se inverseze polaritatea tensiunii pe o durată de 0,3...0,4 s. Pentru ca procesul să decurgă constant și să nu influențeze în mod negativ precizia de prelucrare, nu se admit variații ale parametrilor regimului electric și hidrodinamic. Atenție deosebită trebuie acordată și execuției obiectului de transfer. Astuparea accidentală a orificiului acestuia poate duce la strîngerea izolației de pe suprafața cilindrică exterioară.

Construcția obiectului de transfer utilizat în cazul variantelor LCH, ESD și EJD determină folosirea unor tensiuni de lucru mai ridicate. Sistemului de reglare a avansului i se impune o sensibilitate marită, iar pentru parametrii regimului de prelucrare se cere menținerea lor riguros constantă.

Tabelul 2.1

Caracteristici	ECH	STEM	ECF	ESD	EJD
Natura lichidului electro-litic	NaNO ₃ NaNO ₂	H ₂ SO ₄ HNO ₃	H ₂ SO ₄ HNO ₃	H ₂ SO ₄ HCl	H ₂ SO ₄ HCl
Presiunea electrolitului [bar]	4...8	4...6	4...8	4...6	4...8
Obiectul de transfer	tub din oțel inoxidabil sau titan, izolat	tub capilar din sticlă cu fila- ment metalic	tub capilar din sticlă cu fila- ment metalic	duză din oțel ino- xidabil	duză din oțel ino- xidabil
Tensiunea [V]	15...25	20...100	100...500	300...600	100...500
Diametrul minim [mm]	0,8	0,5	0,2	0,125	0,125
Raportul max. h/d	100	200	100	50	20
Viteza de prelucrare [mm/min]	1...4	1...3,5	1...2	1...3	1...2

Procedul electrochimic își găsește aplicabilitate la prelucrarea orificiilor de răcire din paletetele turbinelor cu gaz ale motoarelor.

2.3. Prelucrarea prin eroziune cu radiații

Radiațiile utilizate în scop tehnologic pentru prelucrarea microalezajelor sînt de natură corpusculară (electroni) sau electro-

magnetică (laser), energia primară a acestora transformându-se la suprafața obiectului prelucrării în energie termică, concentrată la valori ale densității de $10^8 \dots 10^{15} \text{ W/cm}^2$.

Procesul de eroziune, care se desfășoară prin acțiunea succesivă a unor impulsuri ce aduc materialul în stare de topire și vaporizare determină atât în cazul procedeului cu fascicul de fotoni (LBM), cât și al celui cu fascicul de electroni (EBM), o zonă relativ mare influențată termic și abateri de la forma cilindrică a orificiilor [36], [73], [79].

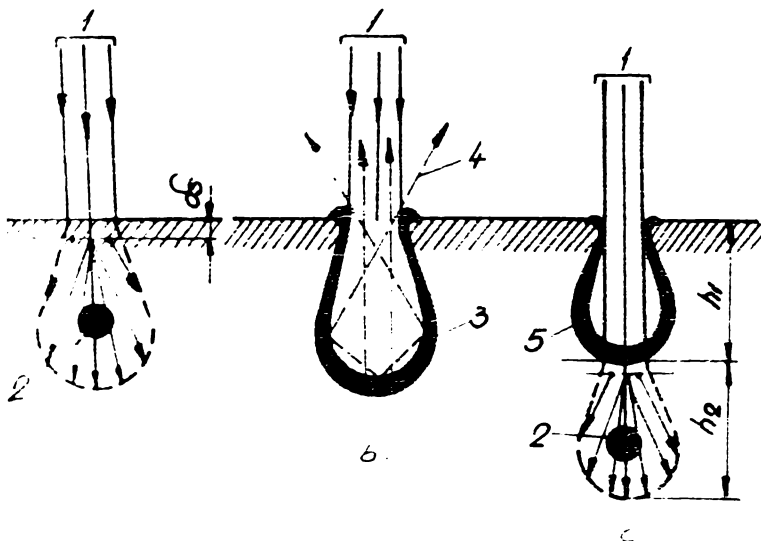


Fig. 2.3. Mecanismul prelucrării cu fascicul de electroni. a-formarea sursei termice; b-formarea craterului; c-acțiunea impulsului următor.

1-fascicul de electroni; 2-sursa termică; 3-fază lichid; 4-jet de vapori; 5-zona solidificată.

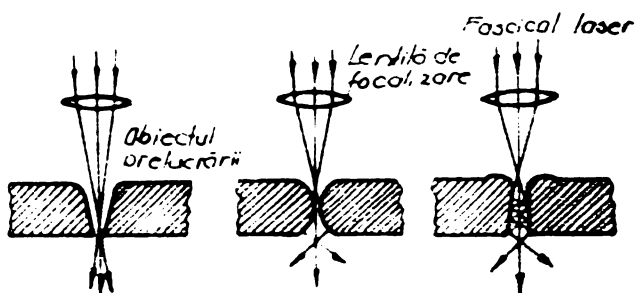


Fig. 2.4. Forma orificiilor prelucrate cu fascicul de fotoni.

La prelucrarea cu fascicul de fotoni, datorită densității mari de energie, stratul ce absoarbe radiația este supraîncălzit și volatilizat cu viteză ridicată. O parte din energia fascicului incident se transformă în energie cinetică a particulelor vaporizate, norul format de acestea constituind un paravan absorbant pentru fascicul, reducându-se în acest fel randamentul prelucrării.

În cazul prelucrării cu fascicul de electroni pot apărea pierderi energetice datorită dispersiei fluxului în mediul înconjurător, cât și prin termoconductibilitate. Diminuarea pierderilor cauzate de dispersia fascicului se realizează prin vidarea incintei în care se desfășoară procesul de prelucrare, soluție care

380 325
299 F

determină însă mărirea timpului auxiliar de schimbare a piesei și complică construcția instalației.

Dintre generatoarele cuantice, la prelucrarea cu fascicul laser a microalezajelor, cea mai largă utilizare o au cele cu semiconductori și cele cu mediu solid, constituit din cristale de rubin, sticlă cu neodim, wolfram de calciu, YAG (yttrium-aluminium-garnet) [106], [126].

Particularitățile și performanțele celor două procedee sînt prezentate comparativ în tabelul 2.2 [105].

Tabelul 2.2

Caracteristici	EBM	LBM
Diametrul minim al orificiilor [mm]	0,025	0,025
Raportul maxim dintre adîncimea și diametrul orificiilor	50	10
Adîncimea maximă a orificiilor [mm]	15	6
Toleranța diametrului [mm]	0,2·d	0,4·d
Tensiunea [V]	> 1500	> 1500
Durata prelucrării [s]	10 ⁻⁵ ...20	10 ⁻³ ...20

Cele două procedee de prelucrare prin eroziune cu radiații și găsesc aplicabilitate la realizarea orificiilor filtrelor fine, diaframelor și grilelor tuburilor electrocnice, filierelor pentru fire metalice sau fibre sintetice, lagărelor din cristale, etc. [5], [26], [34], [160].

În diagrama redată în figura 2.5 se observă dimensiunile realizate la prelucrarea cu fascicul de electroni a orificiilor în

oțeluri de duritate ridicată (refractare, inoxidabile, înalt aliate), iar în figura 2.5. se prezintă la scară mărită o grilă cu orificii [26].

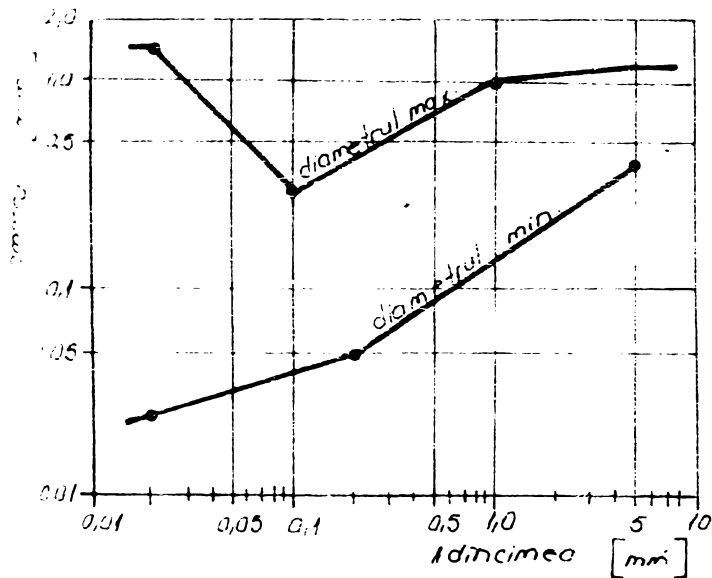


Fig. 2.5. Dimensiunile orificiilor prelucrate cu fascicul de raze X.

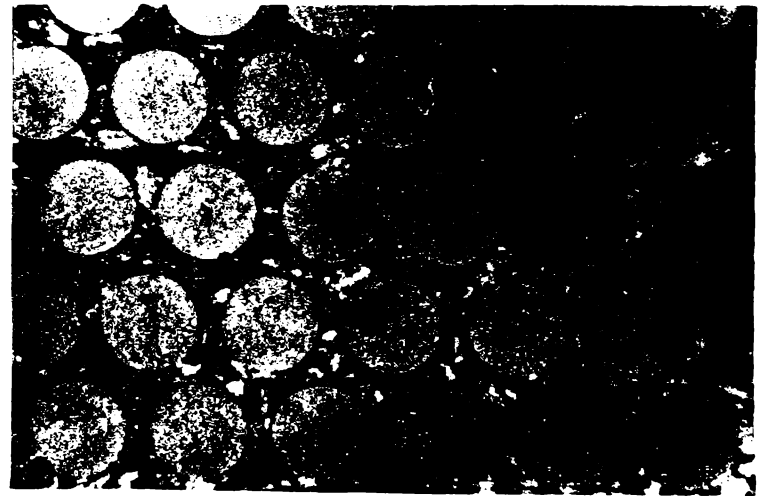


Fig. 2.6. Grilă cu orificii prelucrate cu fascicul de electroni.

Deși eroziunea cu radiații prezintă mari perspective de dezvoltare, procesele nu sînt încă suficient de bine studiate, motiv pentru care rezultatele înregistrate în domeniul prelucrării microalezajelor sînt doar parțial corespunzătoare. Pe de altă parte, costul ridicat al instalațiilor și întreținerea pretențioasă limitează pînă în prezent extinderea pe scară industrială a acestor procedee.

2.4. prelucrarea prin eroziune abrazivă ultrasonoră.

Procedeele de prelucrare prin eroziune abrazivă ultrasonoră sînt utilizate cu precădere pentru materiale dure și fragile, cum sînt: sticla, cuarțul, ceramica, diamantul, rubinul, safirul, feritele, carburile metalice [43], [146].

Prelucrarea are loc în urma acțiunii abrazive a unor particule de duritate ridicată (carbură de bor, carbură de siliciu, diamant), aflate în suspensie lichidă sau impregnate în sculă. Scula, fixată de concentratorul blocului ultrasonic vibrează cu frecvență de 20...25 kHz. Schema de principiu a prelucrării este redată

in figura 2.7.

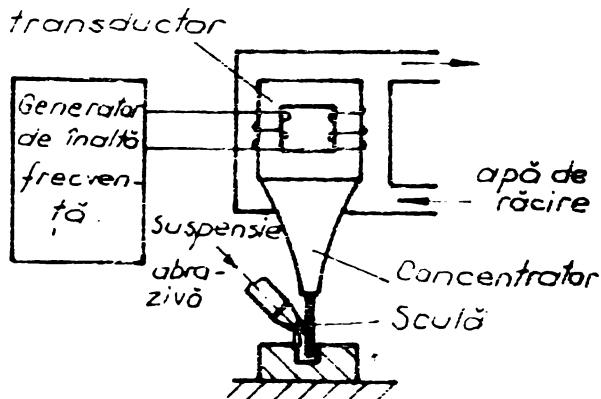


Fig. 2.7. Schema prelucrării prin eroziune abrazivă ultrasonoră.

Dată fiind presiunea necesară între scula și obiectul prelucrării ($0,5 \dots 4 \text{ daN/cm}^2$), diametrul minim ce poate fi obținut este limitat la circa $0,3 \text{ mm}$, de rigiditatea sculei și sensibilitatea ridicată impusă sistemului de reglare a avansului. De aceea, procedeul este utilizat în special în vederea finisării suprafeței microalezajelor realizate prin alte metode (eroziune cu radiații), folosindu-se în acest scop particule abrazive cu granulație foarte fină și regimuri de lucru corespunzătoare.

2.5. Prelucrarea prin eroziune electrică.

Dintre procedeele neconvenționale, eroziunea electrică este cea mai utilizată în industrie pentru prelucrarea microalezajelor în materiale bune conductoare de electricitate [4], [31], [32], [34], [35], [36], [37], [56], [57], [62], [63], [69], [102], [103], [104], [113], [117], [119], [120], [121], [126], [127], [131], [144].

2.5.1. Particularitățile procesului și parametri tehnologici de prelucrare.

Față de prelucrarea prin eroziune electrică la dimensiuni obișnuite, procesul diferă prin natura lichidului dielectric folosit și prin valorile parametrilor descrierilor electrice.

După cum se cunoaște, prelevarea materialului este determinată în primul rând de procese termice, care se desfășoară în două etape: încălzirea locală a materialului peste punctul de topire și evacuarea particulelor erodate, în stare de vapori sau lichid [5], [23], [49], [54], [62], [68], [69], [74], [98], [103], [136], [142], [143], [144], [152], [153], [154].

In mod de sebit la prelucrarea prin eroziune electrică a

microalezajelor, cînd regimul electric este caracterizat printr-o energie redusă a impulsurilor, capacitatea de erodare scade pe măsură ce crește adîncimea de prelucrare, din cauza dificultăților de evacuare a particulelor erodate, din interstițiu. Pentru a se asigura menținerea unor condiții constante de desfășurare a procesului de prelucrare pe întreg parcursul său, se folosesc diferite sisteme prin care se imprimă mișcări suplimentare electrozului scule. Oscilațiile forțate utilizate în acest scop favorizează pătrunderea lichidului dielectric în interstițiul de mărime foarte redusă, antrenînd odată cu el particulele de material erodate din obiectul prelucrării și din electrozului scule. Rolul oscilațiilor forțate în procesul de prelucrare este în realitate mai complex, acționînd asupra diferitelor laturi ale sale, în concordanță cu ansamblul condițiilor de desfășurare. Oscilațiile forțate ale electrozului scule asigură stabilitatea reglării automate a interstițiului, realizîndu-se prin aceasta o distribuire uniformă a descărcărilor electrice după energia lor și permițîndu-se astfel amorsarea la parametrii inițiali [62], [75], [76], [84], [85], [89].

Parametrii oscilațiilor forțate ale electrozului scule, amplitudinea și frecvența, pot fi reglați într-un domeniu larg, corelîndu-se cu valorile parametrilor regimului electric. Astfel, amplitudinea are valori cuprinse între 0,001...0,2 mm, iar frecvența este încadrată în două domenii - joasă (16...400 Hz) și ultrasonice (20...25 MHz). Domeniul frecvențelor ultrasonice este recomandat în cazul utilizării regimurilor electrice cu energie mică, corelîndu-se frecvența oscilațiilor cu frecvența descărcărilor și reglîndu-se valoarea amplitudinii la jumătate din mărimea interstițiului mediu.

Materialele folosite pentru electrozului scule la prelucrarea microalezajelor sînt: wolframul, cuprul, alama, oțelul, sub formă de fire de lungime nedeterminat [57], [62], [63], [104], [109], [119], [144]. Electrozii din wolfram au o uzură redusă (5...10%), cei din cupru se uzează mai puțin decît cei din alama, dar nu sînt suficient de rigizi. Deși uzura electrozilor din alama este accentuată (50...130%), utilizarea pe scară largă este determinată de prețul de cost mai scăzut și de capacitatea productivă ridicată a prelucrării.

La prelucrarea prin eroziune electrică a microalezajelor se pot folosi următoarele lichide dielectrice: hidrocarburi (petrol, kerosin, spirt alb), alcooli și apă (deionizată, demineralizată,

distilată) [34], [36], [62], [63], [102], [109], [119], [144].

Deși hidrocarburile au proprietăți dielectrice mai bune decât apa, datorită viscozității mai mari pătrund cu dificultate în interstițiul de marime redusă, evacuarea produselor eroziunii făcându-se în condiții grele. Apa prezintă ca avantaje: viscozitate redusă, tensiune de vapori scăzută, nu este inflamabilă, produsele de descompunere sînt neutre. Dipolii acesteia se orientează după direcția cîmpului electric, accelerînd fenomenul de străpungere. Ca urmare, durata de la apariția impulsului de tensiune, pînă la amorsarea descărcării electrice este de numai 10 ns, față de 2000 ns în cazul hidrocarburilor. După străpungerea lichidului dielectric condițiile inițiale se restabilesc rapid, putîndu-se admite regimuri electrice cu densități de energie mari și frecvențe ridicate. Pentru ca fenomenele electrochimice să se producă în măsura cît mai redusă este necesar ca apa să fie trecută printr-o instalație de deionizare cu schimbători de ioni, cu scopul menținerii unei valori optime a conductibilității electrice.

Parametrii tehnologici ai regimului de prelucrare au diferite valori, în funcție de condițiile concrete de desfășurare ale procesului. Generalizînd valorile particulare recomandate pentru diferite cazuri de prelucrare, se poate considera că pentru orificii cu diametrul cuprins între 0,02...0,4 mm și adîncimea de 0,2...2 mm se utilizează următoarea gamă de regimuri de prelucrare [36], [57], [62], [63], [102], [119], [126], [131] :

- tensiunea de amorsare $U_0 = 25...300$ V;
- capacitatea condensatorilor din circuitul generatorului de impulsuri $C = 0,001...5$ μ F;
- rezistențele din circuitul de încărcare al generatorului de impulsuri $R = 0,1...10$ K Ω ;
- intensitatea curentului de scurtcircuit $I = 0,01...1,5$ A;
- energia descărcărilor electrice $W = 0,01...1500$ μ J.

Pentru acești parametri, interstițiul lateral este cuprins între 0,002...0,08 mm, iar durata de prelucrare este de 10...300 ns. Mărimea interstițiului lateral este influențată de tensiunea de amorsare și de capacitatea condensatorilor. În figura 2.8 este reprezentată grafic această dependență [34]. Luînd în considerare numai aceste elemente s-ar trage concluzia că este avantajos ca valoarea tensiunii de amorsare să fie cît mai scăzută, în această situație, datorită interstițiului lateral redus, putîndu-se folosi

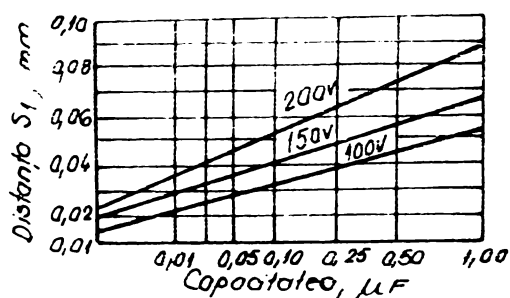


Fig. 2.8. Variația mărimii interstițiului lateral.

electrozi de diametru mai mare, deci mai rigizi din punct de vedere mecanic.

În tabelul 2.3 se prezintă câteva exemple de prelucrare a unor microalezaje și parametri utilizați (tensiunea de amorsare $U_0 = 120$ V, lichid dielectric petrol) [62].

Tabelul 2.3

Dimens. orif. [mm]	Diam. elect. [mm]	Param. regimului [A]	capacit. [μF]	durata prelucr. [s]	Inter- Material [mm]	Material				
diam. adinc.				otel	bronz	electrod				
0,02	0,2	0,015	0,01	0,001	90	15	0,002			
0,03	0,3	0,025	0,01	0,001	120	20	0,003			
0,035	0,2	0,03	0,01	0,001	130	25	0,003			
	0,3							0,005	welfram	
0,05	0,3	0,04	0,01	0,01	180	45	0,005			
0,08	0,2	0,07	0,25	0,01	30	10	0,01			
	0,3							120	5	0,015
	0,5							135	15	0,02
0,1	1	0,08	0,25	0,05	75	-	0,01			
0,15	0,65	0,125	0,3	0,2	25	-	0,01			
0,2	1	0,17	0,3	0,25	35	-	0,01			
0,25	1	0,22	0,3	0,25	40	-	0,01			
								2	130	-
0,3	1	0,26	0,35	0,25	45	-	0,01			
								2	150	-

La anumite valori ale energiei și frecvenței descărcărilor electrice pot rezulta orificii de formă conică, datorită descărcărilor laterale produse între electrodul secul și obiectul prelucrării, prin intermediul punților conductoare formate de particulele erodate neevacuate din interstițiu în pauze dintre impulsuri.

Precizia formei circulare a orificiilor obținute este determinată de precizia formei circulare a electrodului scul și de ghidarea acestuia. Abaterile minime de la circularitate sînt de 0,8 μm , iar neuniformitatea muchiilor este sub 0,2 μm . Precizia dimensională este de 2...5 % din diametrul orificiului.

În afara datelor de felul celor prezentate, literatura de specialitate nu oferă rezultate mai ample ale cercetărilor experimentale, diagrame de variație a indicilor tehnologici, din care să se poată desprinde unele concluzii. Sporadic, în unele articole referitoare la construcția utilajelor mai apar performanțe înregistrate la prelucrarea orificiilor din pulverizatoarele injecatoarelor de la motoarele Diesel, din paletele turbinelor cu gaz sau din domeniul electronicii.

2.5.2. Caracteristicile constructive și funcționale ale utilajelor de prelucrare.

Utilajele de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor sînt alcătuite din următoarele ansamble:

- mașină propriu-zisă, constituită dintr-un ansamblu de unități și mecanisme modulate - batiu, cap de prelucrare, dispozitive și mecanisme de instalare;
- generatorul de impulsuri, care oferă posibilitatea de alimentare a unuia sau mai multor electrozi;
- ansamblul funcțiilor logice de comandă, reglare și programare a diferitor faze ~~incluse~~ incluse în ciclul de prelucrare, respectiv o succesiune de cicluri;
- instalația de circulare și filtrare a lichidului dielectric

În comparație cu utilajele destinate prelucrărilor dimensionale obișnuite, cele pentru prelucrarea microalezajelor prezintă unele particularități constructive determinate de condițiile de desfășurare ale procesului, parametri tehnologici specifici, dimensiunile și precizia ce se impun în aceste situații.

Firmele producătoare de mașini de prelucrat prin eroziune electrică, recunoscute pe plan mondial, cum sînt AGIE și Charmilles din Elveția, AEG Eltherm din R.F. Germanie, RayCon din S.U.A. Vuma din R.S. Cehoslovacia, VEB Steremat Hermann Schlimme din R.D. Germanie, precum și din Uniunea Sovietică, au în programul de fabricație modele de mașini destinate prelucrării microalezajelor.

Ac acestea sînt fie universale, fie specializate, dintre care cea mai mare dezvoltare o au mașinile de prelucrat orificiile din pulverizatoarele injectoarelor de la motoarele Diesel [40], [62], [63], [102], [113], [131], [156], [157], [158], [159].

Chiar și alte firme, neprofilate pe acest domeniu, cum este Philips din Olanda, din necesitatea de realizare, în cadrul producției sale curente de aparate electronice, a unor microalezaje și-a construit modele proprii de mașini de prelucrat prin eroziune electrică [144].

Dintre mașinile universale de prelucrat microalezaje prin eroziune electrică se prezintă în continuare câteva modele semnificative prin soluțiile constructive adoptate: în figura 2.9- mașina AGIETRON KS [157], în figura 2.10- mașina VUMA [131], iar în figura 2.11- mașina PHILIPS [144].

AGIETRON KS

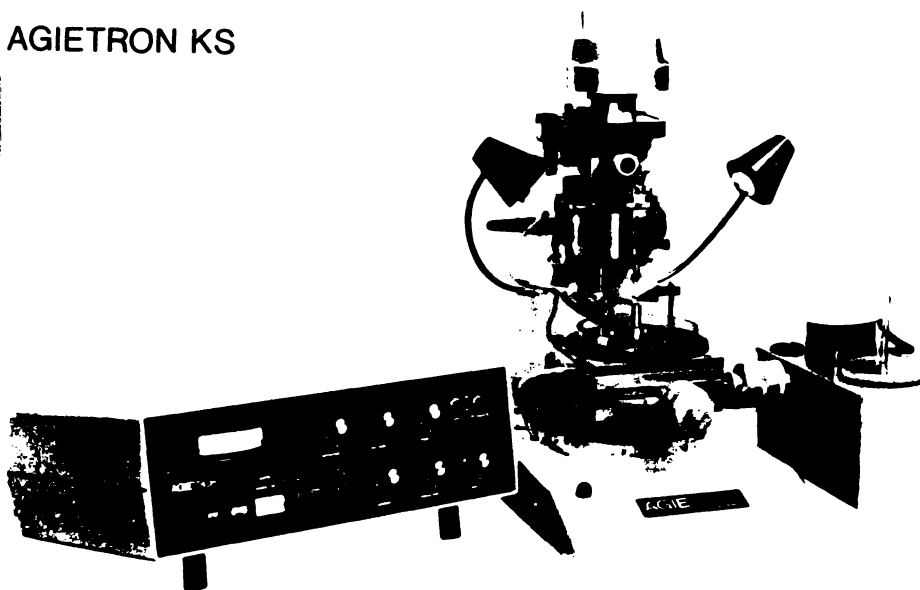


Fig. 2.9. Mașina AGIETRON KS

Generatoarele ce echipază aceste mașini sînt de tip dependent, fiind mai avantajose din punct de vedere tehnico-economic față de generatoarele de impulsuri independente, întrucît procesul de prelucrare impune descărcări electrice cu energie redusă, frecvență ridicată și coeficient de umplere mic.

Sistemele de reglare automată a avansului electrodului sculei sînt realizate pe principiul electromecanic, folosind motoare electrice de curent continuu sau motoare electrice pas cu pas, electrotermice, electrehidraulice sau combinate, folosind două ase-

menea variante, una în vederea executării deplasărilor foarte fine pe distanțe mici și alta care permite curse mai lungi, pentru prelucrarea crificiilor adânci. O astfel de soluție a fost adoptată la mașina WILLIS și este prezentată în figura 2.12 [144].

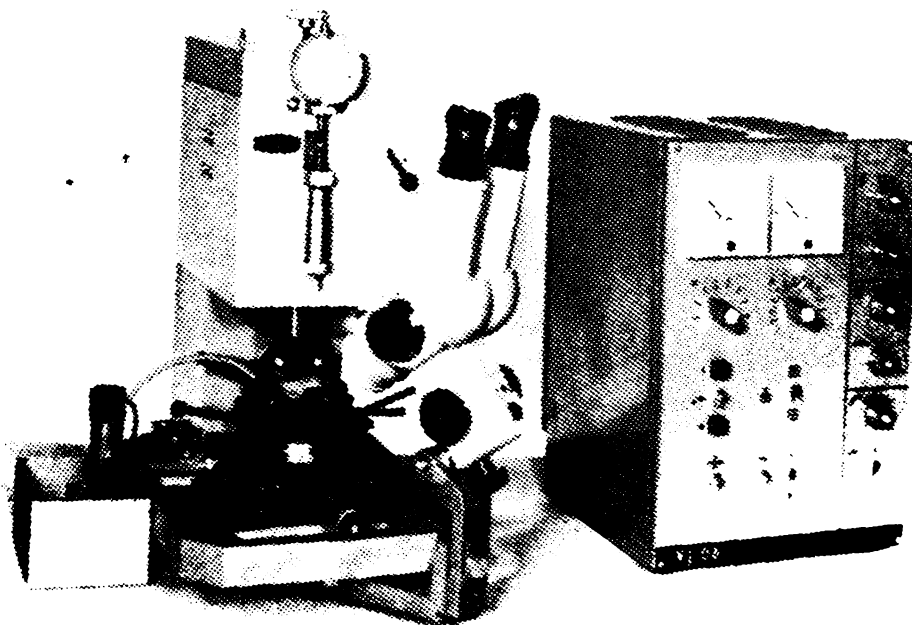


Fig. 2.10. Mașina WILLIS

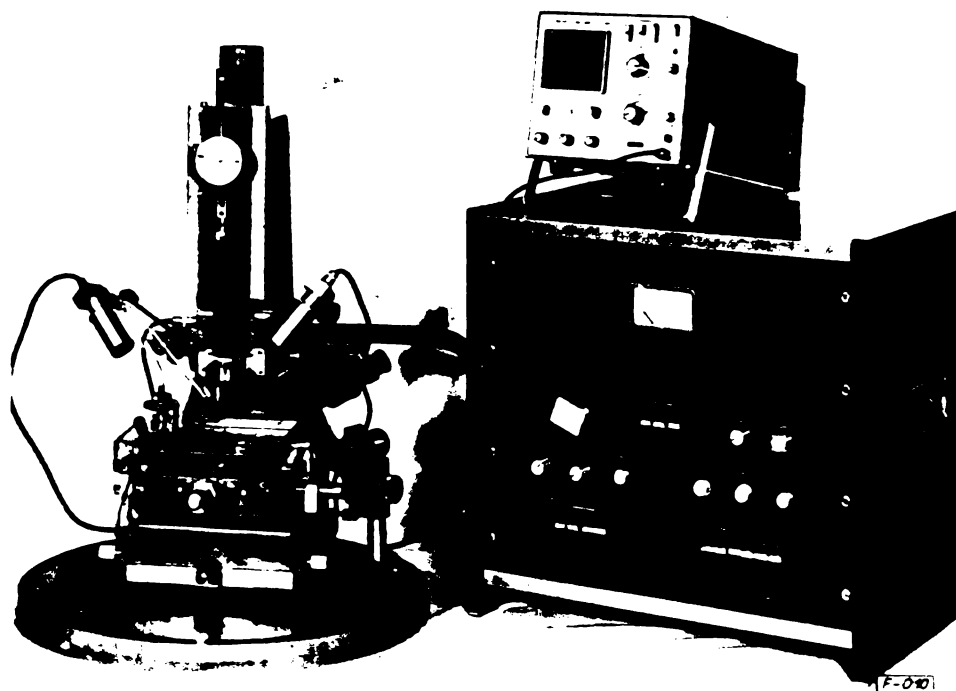


Fig. 2.11. Mașina HILLI 2

În carcasa 2 a capului de prelucrare, pe două membrane 3 și 3' este suspendat tubul 6, în interiorul căruia este introdus filamentul metalic 5, care în partea inferioară este fixat de tub,

iar în cea superioară, de carcasă. Firul este întins sub acțiunea arcului elicoidal 7, care împinge în jos tubul.

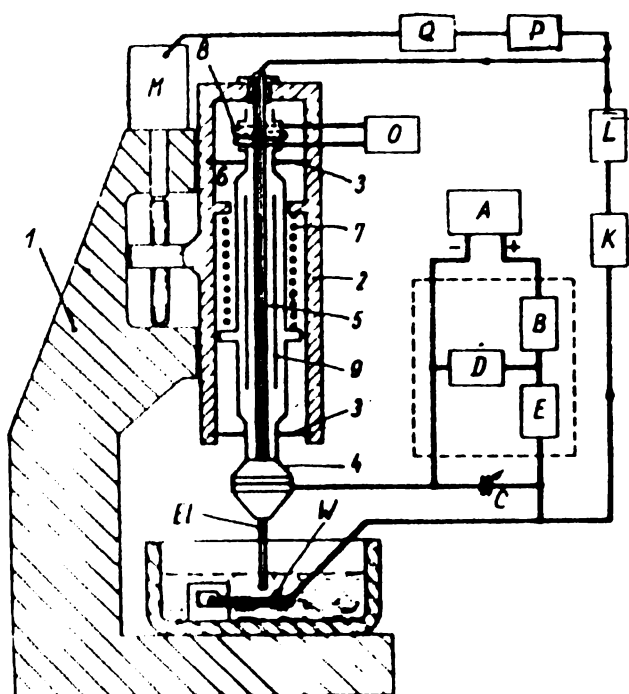


Fig. 2.12. Schema constructivă a mașinii PHILIPS.

bucșa elastică 4 este oscilat forțat prin vibratorul electromagnetic 8.

Sistemul electrotermic de reglare a avansului permite o reglare fină a deplasării electrodului, pe o distanță limitată în sensul dilatarea liniară a filamentului. Pentru a avea posibilitatea de prelucrare a orificiilor de adâncime mai mare este prevăzut un al doilea sistem de avans, electromecanic, compus din motorul electric pas cu pas M și mecanismul șurub-piuliță, prin care este acționat capul de prelucrare.

Deși, în ceea ce privește mașinile universale, modelele realizate folosesc diferite soluții constructive pentru elementele componente specifice, mașinile specializate pentru prelucrarea orificiilor din pulverizatoarele injectoarelor de la motoarele Diesel prezintă în general unele asemănări, diferite aparținând doar datorită tipului de pulverizator pentru care sunt realizate. Cele mai reprezentative utilaje de prelucrare a orificiilor pulverizatoarelor sunt de construcție sovietică [40], [62], [63] și americană [113], [126]. Variantele cunoscute diferă prin gradul de

Prin filament trece un curent electric de intensitate variabilă, în funcție de intensitatea curentului care circulă prin spațiul de lucru, determinând prin efect termic alungirea sau contractia acestuia, reglându-se în acest fel mărimea interstițiului la valoarea optimă de amorsare a descărcărilor electrice.

În jurul filamentului se găsește o manta răcită 9, care are rolul de a proteja celelalte elemente ale capului de căldura degajată de filament.

Electrodul E1, instalat în

automatizare sau caracteristicile determinate de tipul de pulverizator a căror orificii se prelucrează. În tabelul 2.4 se face o prezentare comparativă a acestor mașini.

Tabelul 2.4

Modelul mașinii	Generatorul de impulsuri	Sistemul de avans	Gama orif. prelucrate	Vibrator	Gradul de automatiz.
CHARMILLES	Relaxare	Electrohidr.			
RAYCON (S.U.A.)	101 W=4..400 μJ		d=0,08...1 mm	-	parțială
E1-5M (U.R.S.S.)	Relaxare	Electromec.	d=0,15...0,6 mm	electromagnetic	parțială
62 M (U.R.S.S.)	Relaxare	Electromec.	d=0,125 mm	electromagnetic	completă
159 (U.R.S.S.)	Relaxare	Electromec.	d=0,15 mm	electromagnetic	parțială
150 (U.R.S.S.)	Relaxare	Electromec.	d=0,15...0,4 mm	electromagnetic	parțială
34 M 2 (U.R.S.S.)	Relaxare	Electromec.	d=0,15...0,4 mm	electromagnetic	parțială

Capul de prelucrare al mașinilor realizate în U.R.S.S. este construit în una din următoarele variante, prezentate în figura 2.13 [62], având sistemul de reglare automată a avansului de tip electromecanic, cu motor electric de curent continuu. Ca element comun se remarcă existența vibratorului electromagnetic, compus dintr-o bobină, prin a cărei înfășurare trece un curent de intensitate variabilă și frecvență reglabilă, tija și armatura fiind suspendate pe lamele elastice. Armatura vibratorului electromagnetic susține mecanismul cu role de antrenare a electrodului (fig. 2.13 a și b) sau bușca elastică de instalare a acestuia (fig. 2.13 c). Soluția constructivă cu role de antrenare are avantajul că

permite compensarea continuă a uzurii acestuia, fără a necesita reinstalarea electrodului după prelucrarea fiecărui orificiu. La varianta cu bușă elastică, sania portelectrod cu vibratorul electromagnetic este antrenată în mișcarea de avans prin mecanism șurub-piuliță. În ceea ce privește dispozitivul de ghidare a electrodului, acesta poate fi fix în carcasă (fig. 2.13 a și c), sau poate oscila, fiind montat de armătura vibratorului electromagnetic (fig. 2.13 b), soluție ce poate cauza abateri de prelucrare, datorită oscilațiilor transversale.

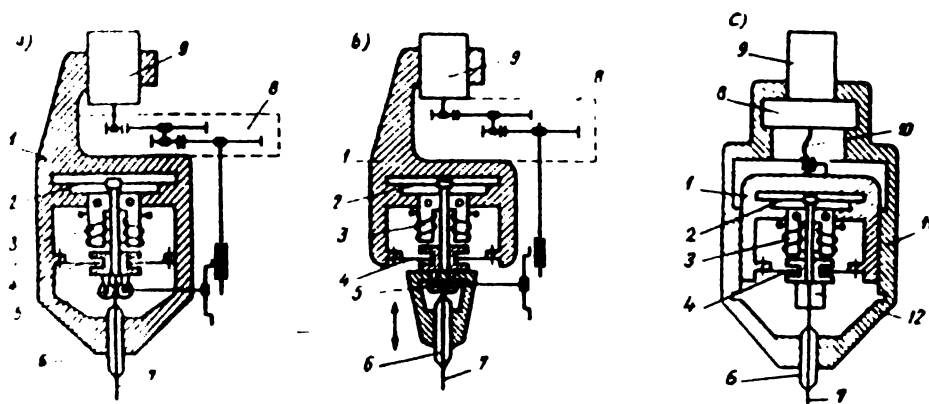


Fig. 2.13. Soluții constructive ale capului de prelucrare.

1-carcasa saniei capului de lucru; 2-arc lamelar; 3-electromagnet; 4-arc lamelar; 5-role de antrenare; 6-dispozitiv de ghidare a electrodului; 7-electrod; 8-reductor de turație; 9-motor electric de curent continuu; 10-șurub; 11-carcasă; 12-bușă elastică.

Ciclul de prelucrare a orificiilor pulverizatorului cuprinde următoarele faze:

- instalarea pulverizatorului;
 - cuplarea generatorului, a sistemului de reglare automată a avansului și a instalației de alimentare cu lichid dielectric, în vederea prelucrării unui orificiu;
 - decuplarea generatorului și a sistemului de reglare automată a avansului, după străpungerea orificiului;
 - retragerea electrodului din orificiu;
 - indexarea pulverizatorului pentru prelucrarea orificiului următor;
 - continuarea fazelor pentru prelucrarea celorlalte orificii.
- Fazele ciclului de prelucrare, în totalitate sau numai par-

șial pot fi executate de mașină, fără intervenția operatorului, în funcție de gradul de automatizare al acesteia.

În figura 2.14 este redată schema cinematică, iar în figura 2.15 schema electrică a mașinii semiautomate EP-5M [40].

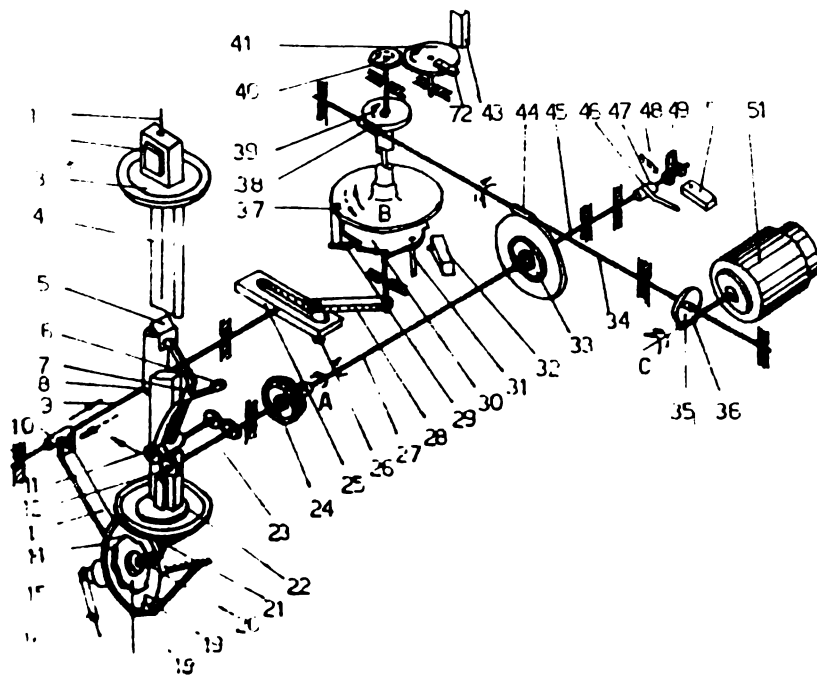


Fig. 2.14. Schema cinematică a mașinii EP-5M.

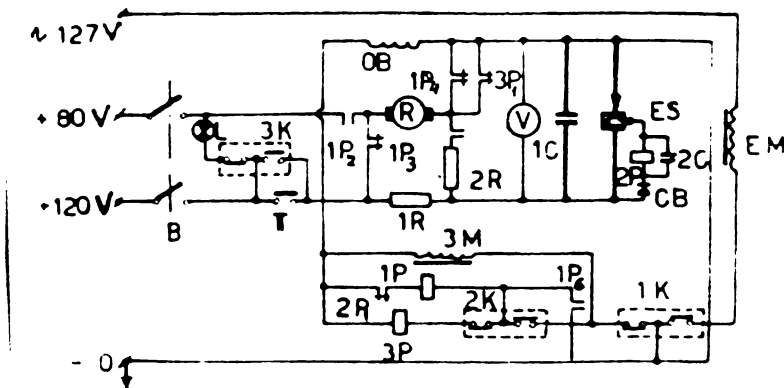


Fig. 2.15. Schema electrică a mașinii EP-5M.

Fazele ciclului de prelucrare la care intervine operatorul sînt instalarea pulverizatorului și conectarea mașinii, celelalte fiind realizate automat.

Pulverizatorul este instalat în dispozitivul cu mecanism clichet-roata de clichet 14,17,18,19, care realizează indexarea la unghiurile corespunzătoare orificiilor. Conectarea

mașinii se face prin acționarea butonului II, care comandă în prealabil readucerea dispozitivului în poziția de prelucrare a primului orificiu. După străpungerea acestuia, electrodul sculă atingînd un electrod suflant ES introdus în pulverizator, conec-

tează releul 2P. Aceasta comandă decuplarea generatorului și reversarea sensului de rotație a motorului electric, pentru retragerea electrodului sculă din orificiul prelucrat. Urmează a se face indexarea dispozitivului în vederea prelucrării următorului orificiu, cu ajutorul mecanismelor din lanțul cinematic, a căror mișcări sînt comandate de același motor electric. Ciclul continuă prin reluarea fazelor, pînă la prelucrarea tuturor orificiilor, fiind este conectată lampa de semnalizare L, care atrage atenția operatorului. După schimbarea pulverizatorului, ciclul de prelucrare se reia prin apăsarea butonului II.

Mașina descrisă este folosită în producție de serie, pentru prelucrarea orificiilor de diametru $0,25$ mm și adîncime de 2 mm ale unui tip de pulverizator. Durata prelucrării unui orificiu este de 70 s, cu o precizie de $0,01$ mm.

În figura 2.16 se prezintă mașina 62 M, care are ciclul de prelucrare complet automatizat, atribuțiile operatorului rezumîndu-se la supravegherea liniei tehnologice [62].

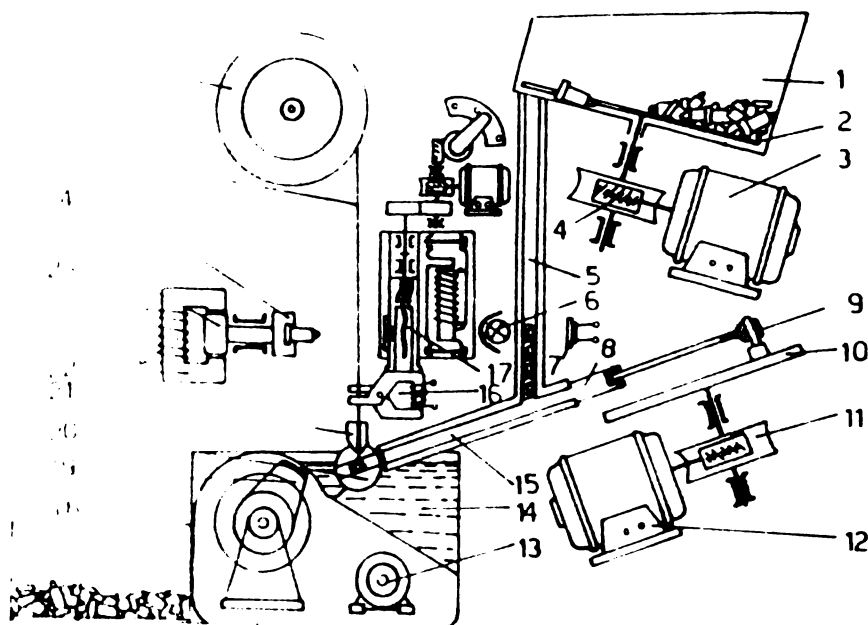


Fig. 2.16. Schema constructivă a mașinii 62 M.

Mașina prezintă o particularitate a dispozitivului de antrenare a electrodului sculă, acesta fiind compus dintr-o clemă acționată electromagnetice. Alimentarea cu pulverizatoare se realizează automat, cu un dispozitiv de ordine comandat printr-o fotocelulă. Pulverizatoarele a căror orificii au fost executate

sint aruncate in cuva cu lichid dielectric, de unde, cu ajutorul unui electromagnet rotativ sint transportate intr-un buncar.

O problema importanta care trebuie realizata la masinile de prelucrat orificiile de pulverizare este decuplarea procesului dupa ce orificiul a fost strapus si calibrat. Exista diferite solutii constructive realizate in acest scop [40], singurele acceptabile sint insa acelea la care decuplarea se produce in mod independent de uzura electrodului scula. Acestea se bazeaza fie pe introducerea unui electrod suplimentar, care la atingerea de catre electrodul scula decupleaza procesul de prelucrare, fie pe urmarirea variatiilor tensiunii medii din spatiul de lucru, a doua sonda a acesteia, corespunzatoare amorsarii descărcărilor electrice in peretele opus indicind momentul de comanda a intreruperii.

Retragerea electrodului scula din orificiul prelucrat trebuie sa se faca pe o distanta bine determinata. Aceasta functie se realizeaza cu mecanisme limitatoare de cursa, care actioneaza microcomutatoare electrice. In figura 2.17 se prezinta doua variante, utilizate la sistemele de reglare a avansului prin role de antrenare a electrodului scula, respectiv prin cleme [40].

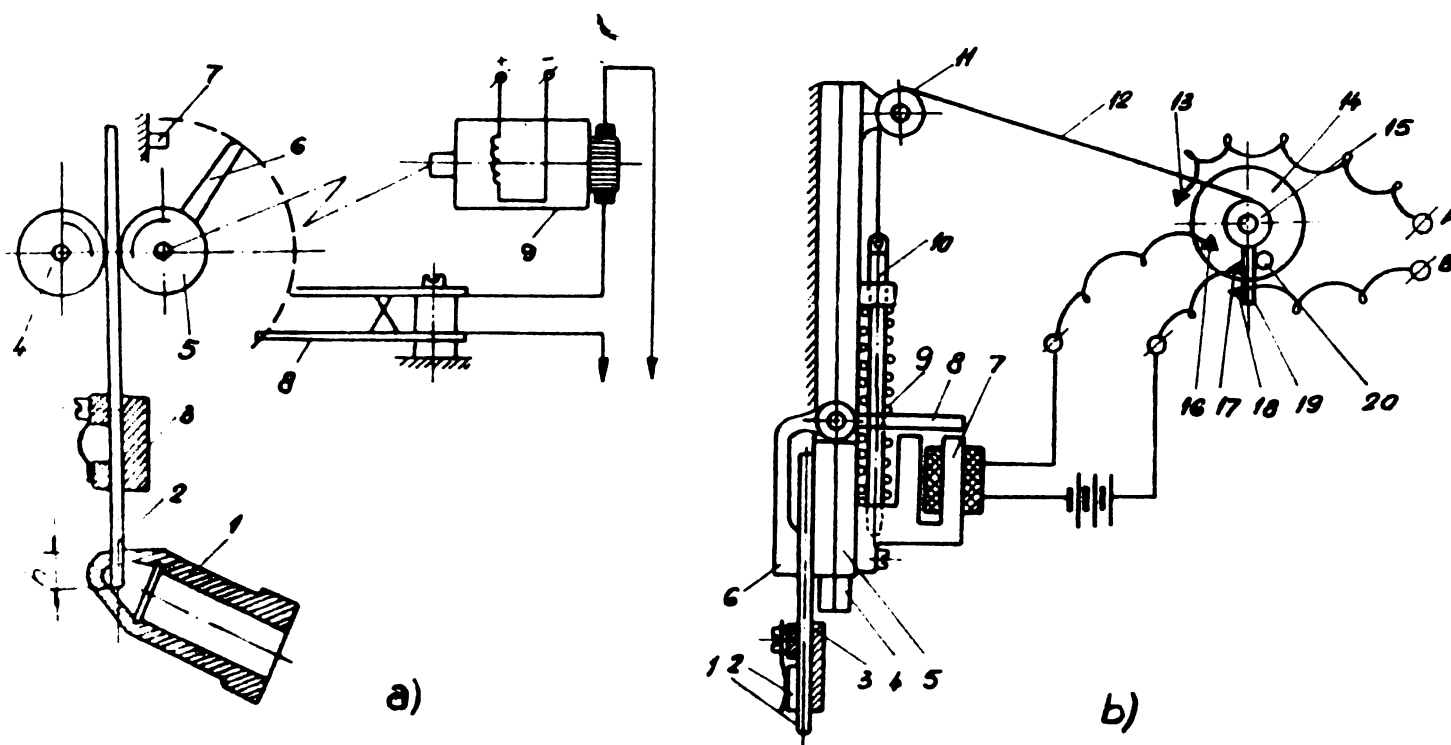


Fig. 2.17. Dispozitive de retragere a electrodului din orificiu utilizate la sisteme de reglare a avansului prin role de antrenare (a), respectiv prin cleme (b).

a): 1-pulverizator; 2-electrod; 3-ghidaj; 4,5-role de antrenare;

6-tijă; 7-limitator; 8-contact; 9-motor electric;

b): 1-electrod; 2-arc lamelar; 3-ghidaj; 4-șină; 5-cursor; 6-contact; 7-electromagnet; 8-pirghis; 9-arc spiral; 10-tijă; 11-relă; 12-cablu; 13-contact; 14,15-role; 16,17,18-contacte; 19-tijă; 20-opritor.

Dispozitivul de instalare a pulverizatorului este conceput în funcție de unghiurile de dispunere a orificiilor de pulverizare, la care trebuie indexat în vederea prelucrării.

Mașinile de prelucrat orificiile pulverizatoarelor de la injectoare, prin posibilitățile de automatizare pe care le oferă, permit adaptarea lor la condițiile producției de serie. În țări cu tradiție în privința construcției motoarelor termice, cum sînt U.R.S.S., S.U.A., R.S.Cehoslovacia procedeul de prelucrare prin eroziune electrică a fost introdus în fabricația de serie a pulverizatoarelor, în locul gauririi mecanice a orificiilor [63], [102], [113], [126].

2.6. Concluzii

Fașind o analiză critică asupra procedeelor tehnologice de prelucrare a microalezajelor se poate considera că dezvoltarea fiecăruia dintre acestea a fost impusă și extinsă în funcție de necesitățile de soluționare a unor probleme concrete.

Fără a minimaliza posibilitățile și perspectivele de dezvoltare și aplicare în domeniul prelucrării microalezajelor a oricăruia dintre procedeele cunoscute, în industria constructoare de mașini, a motoarelor termice în special, eroziunea electrică se poate considera că a cîștigat un teren larg, ajungînd în stadiul de aplicare industrială la nivelul producției de serie, stadiu la care nu a ajuns nici un alt procedeu neconvențional, iar procedeul de prelucrare clasic, prin așchiere, tinde să fie înlocuit.

Nu se ascunde faptul că există încă rezerve din partea unor uzine producătoare de echipament de injecție pentru motoare DIESEL în ceea ce privește introducerea procedeului de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor. Aceste rezerve s-ar datora afirmațiilor potrivit cărora calitatea suprafeței

rezultate la prelucrarea prin eroziune electrică favorizează depunerile de calamină, ce provoacă infundarea mai rapidă a orificiilor. Este posibil însă ca aceste concluzii să fie determinate de o insuficientă punere la punct a tehnologiei de prelucrare prin eroziune electrică, dovadă că firme de specialitate cu renume, ca de exemplu BOSCH, continuă cercetările, neabandonând ideea schimbării tehnologiei clasice, costisitoare și limitată. Accepțiunea, pe de altă parte, a unor uzine din U.R.S.S., S.U.A., R.S.Cehoslovacia, de a introduce eroziunea electrică la prelucrarea orificiilor pulverizatoarelor, denotă că această tehnologie este mai avantajoasă din punct de vedere tehnico-economic în comparație cu tehnologia de prelucrare prin așchiere.

Se poate afirma faptul că, în prezent, eroziunea electrică a devenit la fel de indispensabilă la prelucrarea microalezajelor ca și la prelucrarea cavităților de matrițe sau a altor suprafețe.

3. CONDIȚIILE DE ABORDARE, OBIECTIVELE ȘI METODICA DE CERCETARE.

3.1. Condițiile de abordare și obiectivele cercetării.

Problema prelucrării microalezajelor în diferite domenii industriale a crescut în intensitate pe plan național în ultimul deceniu. O serie de întreprinderi și instituții (Întreprinderea de fire și fibre sintetice Savinești, Întreprinderea optică română București, Întreprinderea de mecanică fină Sinaia, etc.) au solicitat colectivul nostru pentru soluționarea prelucrării unor orificii de diametru redus, ca urmare a imposibilității de realizare prin procedeele tehnologice clasice, a rezultatelor necorespunzătoare obținute sau a dependenței de import.

Principalele preocupări în acest sens au avut ca obiectiv încercarea obținerii prin eroziune electrică a orificiilor filierelor pentru fabricarea firelor sintetice. Dimensiunile reduse (circa 0,03...0,12 mm), precizia și calitatea suprafeței nu au putut fi realizate intrutotul, cu dotarea existentă în acel moment. Un punct de plecare în abordarea în continuare a cercetărilor l-a constituit însă materializarea unui dispozitiv de prelucrare a microalezajelor, cu care au fost efectuate unele încercări.

Cercetările au fost dezvoltate și amplificate începând din anul 1975, când Întreprinderea de mecanică fină din Sinaia, specializată în fabricația aparatului de injecție pentru motoarele Diesel a manifestat interes față de rezultatele noastre, considerându-le ca promițătoare și încurajând continuarea cercetărilor, în vederea aplicării procedeului pentru prelucrarea orificiilor din corpul pulverizator al injectorului. În acest scop, au fost încheiate începând din anul 1977, contracte de colaborare, în cadrul cărora au fost efectuate studii și cercetări în vederea prelucrării prin eroziune electrică a orificiilor de diametru 0,27 mm ale pulverizatorului RODLLA 150 s 720. Pentru îndeplinirea obiectivelor colaborării au fost realizate în primă etapă două modele experimentale de utilaje destinate încercării diferitelor soluții ale elementelor constructive specifice și stabilirea parametrilor de

prelucrare. Pe baza acestora s-a trecut la finalizarea unui model experimental de utilaj destinat prelucrării prin eroziune electrică a orificiilor unor tipuri de pulverizatoare, diferite prin dimensiunea și dispunerea geometrică a orificiilor, iar în continuare, s-a abordat concepția unor mașini specializate, cu ciclu de lucru automat, care să compună linii tehnologice de prelucrare.

Ca urmare a necesității de introducere în producție a rezultatelor cercetărilor, obiectivele urmărite în cadrul tezei de doctorat au fost orientate în scopul rezolvării în termen cât mai scurt a înlocuirii tehnologiei existente în prezent, care este dependentă de impertul de scule așchietoare, consumul acestora fiind, pe deasupra, apreciabil. Din acest motiv, unele aspecte de cercetare teoretică au fost abordate în proporție mai redusă, numai în măsura necesității de elucidare a fenomenelor de bază, pentru facilitarea conducerii procesului de prelucrare, cunoașterii influenței diferitor parametri și alegerii celor optimi, în situația dată.

O pondere mare în cadrul cercetărilor o ocupă proiectarea constructivă, încercarea diferitelor variante. În cadrul studiului experimental al influenței parametrilor procesului s-a urmărit restrângerea în mod tratat a acestora la valorile optime, determinate de condițiile cerute orificiilor din corpul pulverizator. O atenție deosebită s-a acordat în final analizei stabilității procesului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor, preciziei formei geometrice a acestora.

3.2. Metodica de cercetare.

În capitolul 2 al tezei s-a prezentat sistematizat stadiul actual al cercetărilor cunoscute pe plan mondial, cu privire la procedeele tehnologice de prelucrare a microalezajelor întâlnite în diferite domenii industriale.

În concordanță cu obiectivele urmărite în cadrul tezei de doctorat, un accent mai mare în documentare s-a pus pe construcția utilajelor și tehnologia de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor, cu precădere a celor de la pulverizatoarele injectoarelor motoarelor Diesel.

Deși literatura de specialitate furnizează suficiente date, totuși, acestea sînt limitate din punct de vedere al posibilității

de utilizare directă. În ceea ce privește construcția utilajelor, variantele prezentate constituie mai mult sau mai puțin, soluții de principiu, în care se evita enumerarea parametrilor funcționali, sau aceasta se face incomplet, sumar, creînd dificultăți chiar și pentru compararea lor. Față de aspectele constructive, cele tehnologice sînt și mai puțin întîlnite, rezumîndu-se la tabele ce prezintă diferite cazuri de prelucrare a unor orificii, dar și acestea sînt incomplete, necuprinzînd în întregime parametrii procesului și nici indicii tehnologici importanți, ce caracterizează capacitatea productivă, calitatea prelucrării.

În aceste condiții, pe baza experienței colectivului s-a trecut la realizarea în primă etapă, a unui model experimental simplu, de marime redusă, cu ajutorul căruia au fost testate diferite soluții pentru elementele constructive caracteristice acestui gen de mașini. Folosind concluziile desprinse, analizînd în mod critic variantele cunoscute pe plan mondial s-a continuat prin materializarea celui de-al doilea model, perfecționat în unele direcții, dar păstrînd caracterul de experimental, prin unele soluții noi adoptate în vederea testării lor, unei game largi de regimuri, care să permită studiarea influenței parametrilor tehnologici, într-o diversitate cît mai mare de situații admise.

În paralel au fost efectuate cercetări teoretice asupra sistemului de reglare automată a avansului, rezultatele acestora contribuînd în mod substanțial la îmbunătățirea construcției. Au fost realizate și încercate, de asemenea, diferite soluții de ghidare a electrodului scula, precum și dispozitive de intrerupere a prelucrării după străpungerea orificiului, cu ajutorul cărora se poate aborda problema automatizării ciclului de lucru.

În comparație cu mașinile de prelucrat microalezaje prin eroziune electrică, realizate de unele firme recunoscute pe plan mondial, se poate aprecia că modelele experimentale rezultate în urma cercetărilor întreprinse se disting prin aceea că prezintă o fiabilitate marită, ca urmare a simplificării subansamblurilor mecanice, a căror execuție cu precizie ridicată reclama costuri mai mari, motiv pentru care automatizarea diferitelor funcțiuni a fost soluționată cu ajutorul componentelor electronice.

În cadrul cercetărilor experimentale, posibilitățile largi oferite pentru reglarea parametrilor procesului de prelucrare au

constituit dificultăți în selectarea valorilor acestora. Metodica folosită în această situație a fost aceea de restrângere a influenței parametrilor asupra indicilor tehnologici ce caracterizează capacitatea productivă și precizia de prelucrare, ordonându-se după importanța pe care o prezintă, pe baza interpretării statistice a rezultatelor unei serii de încercări experimentale. Studiind în continuare influența celor mai importanți parametri au fost stabilite condițiile optime de efectuare a orificiilor, în concordanță cu obiectivele urmărite în cadrul tezei de doctorat.

Rezultatele cercetărilor întreprinse cu privire la construcția utilajului de prelucrare prin eroziune electrică a micrcalzeajelor s-au finalizat prin definitivarea soluției pentru mașina specializată de prelucrare a orificiilor pulverizatoarelor de la injectoarele motoarelor Diesel.

Avantajele tehnico-economice oferite de procedeul electroeroziv de prelucrare a orificiilor pulverizatoarelor determină o eficiență ridicată, fapt ce justifică aplicarea pe scară industrială.

4. UNELE CONSIDERATII CU PRIVIRE LA PROCESELE FUNDAMENTALE CE AU LOC LA PRELUCRAREA MICROALEZAJELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA.

4.1. Fenomene fizico-chimice la prelucrarea prin eroziune electrică.

Procesul de prelucrare prin eroziune electrică este determinat de acțiunea erozivă complexă, localizată și discontinuă a unor descărcări electrice DE în impuls, amorsate între obiectul prelucrării CP și electrodul scula ES, în prezența unui mediu lichid dielectric LD (figura 4.1)

Condițiile fizice de realizare practică a procedurii de prelucrare dimensională prin eroziune electrică sînt următoarele:

- introducerea directă a energiei primare la suprafața obiectului prelucrării și a electrodului scula, prin conectarea lor la sursa de energie electrică; în acest scop, materialele din care sînt constituiți electrodul scula și obiectul prelucrării trebuie să fie electroconductoare;

- dozarea temporară în impulsuri a energiei primare în zona de interacțiune formată de electrodul scula, agentul eroziv (descărcarea electrică) și obiectul prelucrării;

- restabilirea continuă a stării inițiale în interstițiul eroziv, pentru ca descărcările electrice să se producă în mod repetat, în condiții practic identice;

- asigurarea unui caracter polarizat descărcărilor electrice în impuls, în vederea obținerii unei prelevări maxime de material la obiectul prelucrării și a unei uzuri minime pe suprafața electrodului scula.

Prelevarea de material are loc în condițiile în care concentrarea energiei în spațiu și în timp permite constituirea sursei termice, la gradienti de temperatură suficient de ridicați

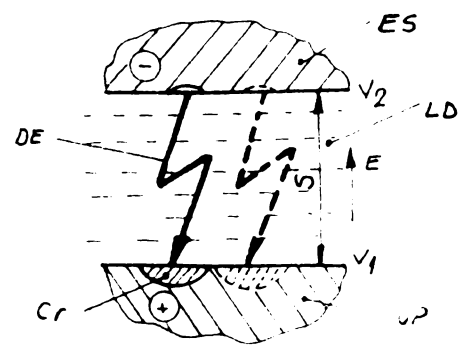


Fig. 4.1. Schema de principiu a procedurii de prelucrare prin eroziune electrică.

pentru a determina transformările locale de stare ale materialului, distrugerea integrității sale și îndepărtarea produselor eroziunii din zona de prelucrare [27], [45], [50], [54], [61], [62], [68], [74], [78], [79], [98], [99], [103], [110], [136], [142], [143], [152], [153], [154].

Concentrarea în spațiu a energiei primare se realizează prin lichidul dielectric, caracterizat de rigiditatea sa:

$$R_d = \frac{U_s}{s} \quad \left[\frac{V}{m} \right] \quad (4.1)$$

unde U_s este tensiunea necesară pentru strapungerea interstițiului s dintre electrozi. Prin conectarea electrozilor la sursa de energie electrică, rezulta un câmp electric de intensitate E , determinat de diferența de potențial existentă și de mărimea interstițiului dintre aceștia:

$$E = \frac{V_1 - V_2}{s} \quad \left[\frac{V}{m} \right] \quad (4.2)$$

Condiția pentru amorsarea descărcărilor electrice prin strapungerea lichidului dielectric este ca intensitatea câmpului electric să fie mai mare decât rigiditatea lichidului:

$$E > R_d \quad (4.3)$$

Concentrarea în timp a energiei și amorsarea descărcărilor electrice în mod repetat, la duratele și intervalele stabilite este condiționată de reglarea mărimii interstițiului în limitele ce permit strapungerea lichidului dielectric:

$$s_{\min} < s < s_{\max} \quad (4.4)$$

Energia electrică introdusă în spațiul de lucru prin intermediul celor doi electrozi este transformată, ca urmare a acțiunii descărcărilor electrice, în energie termică, determinând procese complexe la suprafața obiectului prelucrării, la suprafața electrodului scul și în lichidul dielectric (figura 4.2).

Fluxul termic, concentrat pe o suprafață limitată a obiectului prelucrării, într-un timp extrem de scurt, cauzează încălzirea puternică a materialului, topirea și vaporizarea lui. La energii mici ale descărcărilor electrice, metalul este prelevat sub formă de vapori și picături mici lichide, iar la creșterea ener-

giei predomină pierderile mari de lichid. Pentru o anumită valoare a energiei, dacă frecvența este prea redusă, puterea utilă se micșorează, metalul se încălzește mai lent pînă la punctul de topire, rezultînd pierderi prin termoconductibilitate. Dacă în schimb, frecvența descărcărilor electrice este prea mare, materialul se va supraîncălzi și vor apărea pierderi energetice la crearea fazei de vaporii.

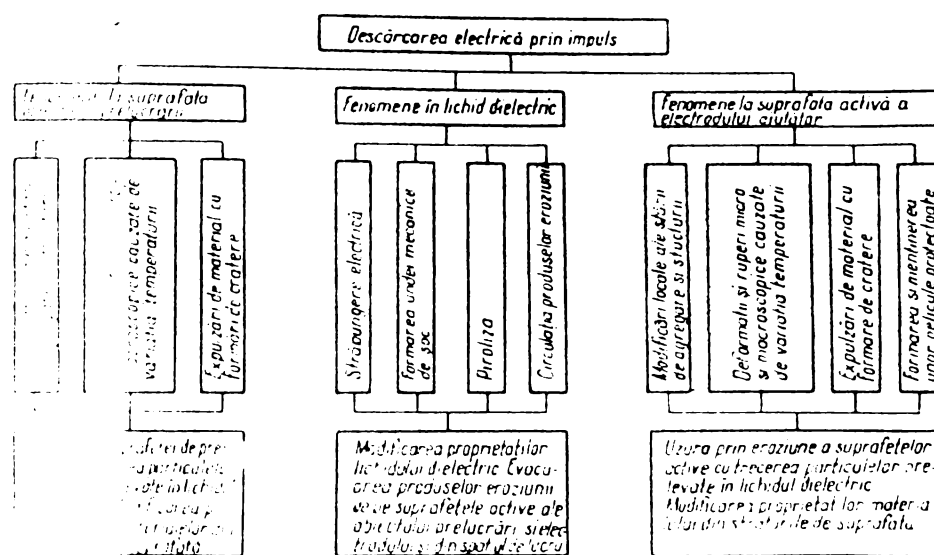


Fig. 4.2. Fenomene fizico-chimice caracteristice la prelucrarea prin eroziune electrică.

Acțiunea descărcărilor electrice se rasfrînge și asupra electrodului sculă, determinînd două procese diferite, dar interdependente, cel termic, care contribuie la uzarea sa și cel termochimic care acționează în mod invers, formînd o peliculă protectoare, fenomen ce apare cu precădere la durate mari ale impulsurilor și frecvențe joase.

Prelevarea de material din obiectul prelucrării și uzarea electrodului sculă sînt influențate de o multitudine de factori, dintre care un rol important îl au proprietățile fizice ale acestora: căldura specifică, conductibilitatea termică, temperatura de topire. Polaritatea conectării electrozilor influențează repartizarea energiei, determinînd prelevarea cu preferință la unul dintre aceștia. Îndepărtarea materialului la obiectul prelucrării este predominantă în raport cu uzarea electrodului sculă, pentru polaritatea directă (electrodul sculă la polul negativ) la durate mici ale descărcărilor electrice, iar pentru polaritatea inversă, la durate mari.

În cazul prelucrării microalezajelor prin eroziune electrică, descărcările fiind de scurtă durată, densitatea de curent atinge valori importante, iar potențialul anodic este ridicat, fapt ce impune adoptarea polarității directe, iar pentru electrodul sculei, materiale cu proprietăți fizice superioare [144].

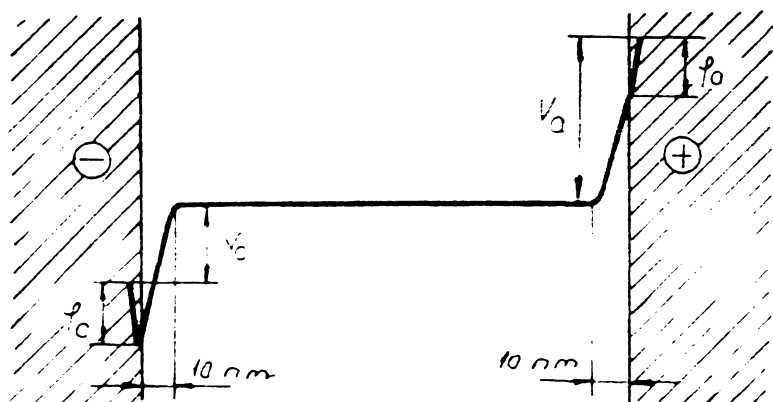


Fig. 4.3. Distribuția tensiunii în canalul de descărcare la prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică.

microexplozie, se formează unde de șoc, care antrenează produsele eroziunii, evacuându-le din spațiul de lucru.

Stratul superficial de material al obiectului prelucrării, sub influența cîmpului termic ridicat și în contact cu lichidul dielectric, suferă transformări structurale. La prelucrarea oțelurilor, în primul strat se obține o structură martensitică de duritate ridicată. Al II-lea strat este constituit din martensit și austenit rezidual, avînd o duritate mai redusă. Zona a III-a este formată din martensit și ferit (cementit), iar în stratul IV se întîlneste materialul de bază [14]. În cazul carburilor metalice se remarcă existența unei zone suplimentare în preajma stratului de bază, în care sînt carburi precipitate, conferindu-i o duritate mai ridicată [116]. Tot la prelucrarea carburilor metalice, cu regimuri de degroșare, în stratul superficial pot apărea microfisuri, ce constituie defecte de calitate.

Cunoașterea principiilor de bază ce caracterizează prelucrarea prin eroziune electrică este absolut necesară pentru dirijarea

În zona de interacțiune a canalului descărcării cu lichidul dielectric au loc procese de piroliză, care determină modificarea proprietăților și descompunerea acestuia în produse lichide, solide și gazoase. Cantitatea mare de gaze din spațiul de lucru, sub formă de bule, în interiorul cărora presiunea înregistrează salturi bruște datorită fluxului termic variabil, cauzează apariția fenomenului de cavitație. La distrugerea bulelor, cu caracter de

corespunzătoare a procesului în funcție de particularitățile concrete, în scopul realizării preciziei impuse.

4.2. Modelul termic al procesului de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor.

Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică este guvernată de procese complexe, determinate de acțiunea descărcărilor electrice. Multitudinea de factori care intervine la un moment dat creează dificultăți în fundamentarea unui model matematic universal, capabil să descrie mecanismul de prelevare a materialului. Din acest motiv este necesară particularizarea condițiilor și recurgerea în paralel la experimentari.

Pentru a concepe un model al procesului termic de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor au fost admise următoarele condiții:

- electrodul scul - alama, cu diametrul $0,19$ mm;
- obiectul prelucrării - oțel aliat 18 CrNi 20 carbonitrat, cu grosimea $1,1$ mm;
- lichidul dielectric - apă deionizată, cu conductibilitatea electrică 15 μ S/cm;
- regimul electric - tensiunea de amorsare $U_0 = 280$ V, rezistența $R = 540$ Ω , capacități $C = 12,5 \dots 125$ nF;
- regimul oscilațiilor forțate ale electrodului scul - amplitudinea $A = 3$ μ m, frecvența $\nu = 90$ Hz.

În vederea determinării efectului repartiției în timp și în spațiu a energiei termice generate de descărcarea electrică se consideră sursa termică de dimensiuni infinite (în realitate, canalul descărcării are o valoare finită); de asemenea se admite că pentru o durată constantă a descărcării electrice corespunde o valoare constantă a puterii specifice introduse în spațiul de lucru. În baza acestor ipoteze, se deduce, spre exemplu, pentru regimul cu capacitatea $C = 50$ nF, căruia îi corespunde durata de descărcare $t = 10,8$ μ s, o putere specifică $P_s = 0,1$ W/ μ m², aceasta constituind valoarea fluxului termic P_0 , care determină transformările de stare la suprafața obiectului prelucrării ($x = 0$) [144]. Temperatura rezultată poate fi calculată pe baza relației ce urmează:

$$T(t)_{x=0} = \frac{2 F_0}{\lambda} \sqrt{\frac{a t}{\pi}} \quad (4.5)$$

unde λ este conductibilitatea termică (pentru oțel $\lambda = 13,9 \text{ W/m}^\circ\text{K}$)
 $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ și reprezintă coeficientul de difuzibilitate termică, ρ
 fiind densitatea (pentru oțel $\rho = 8190 \text{ kg/m}^3$) și c , căldura spe-
 cifică (pentru oțel $c = 607 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$).

Curbele de variație a temperaturii atinse la suprafața obiec-
 tului prelucrării în funcție de energia, respectiv frecvența des-
 cărcărilor electrice sînt reprezentate în diagramele din figurile
 4.3 și 4.4.

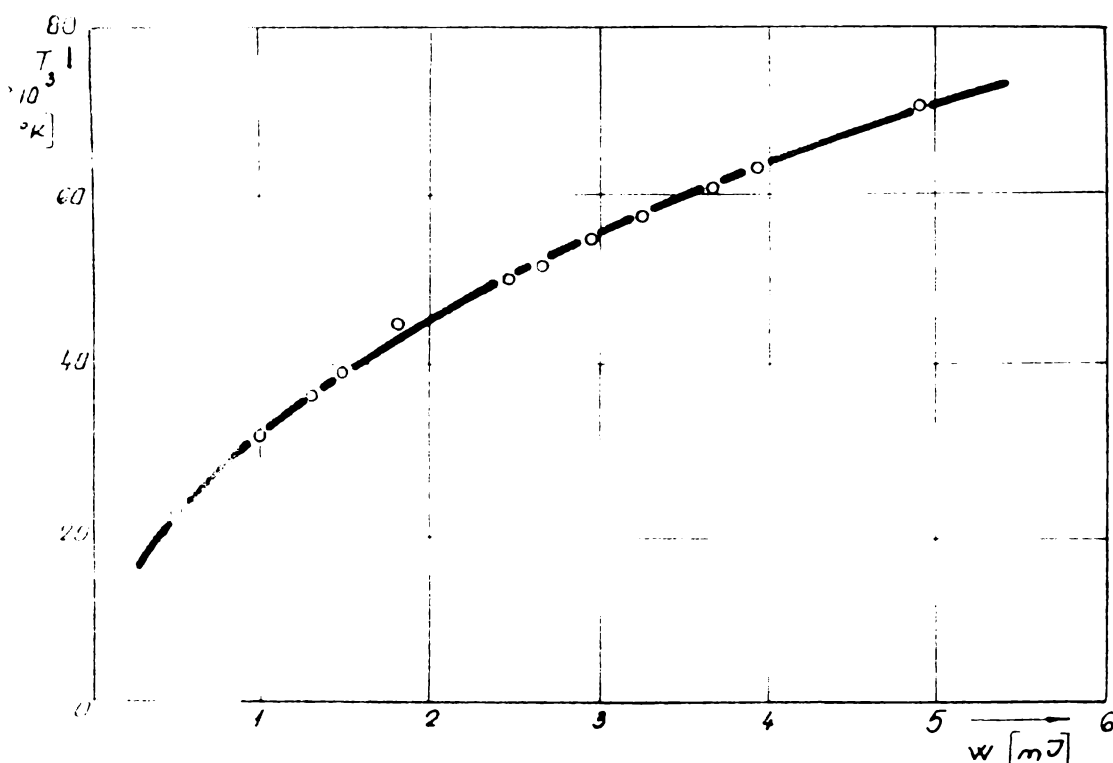


Fig. 4.3. Variația temperaturii la suprafața
 obiectului prelucrării, în funcție de energia des-
 cărcărilor electrice.

Temperatura la o adâncime x , determinată de acțiunea fluxu-
 lui termic F , considerat constant pentru o anumită durată a des-
 cărcării electrice, este dată de expresia:

$$T(t, x) = \frac{2 F \sqrt{a t}}{\lambda} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 a t}\right) - \frac{x}{\sqrt{4 \pi a t}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4 a t}}} e^{-\xi^2} d\xi \right] \quad (4.6)$$

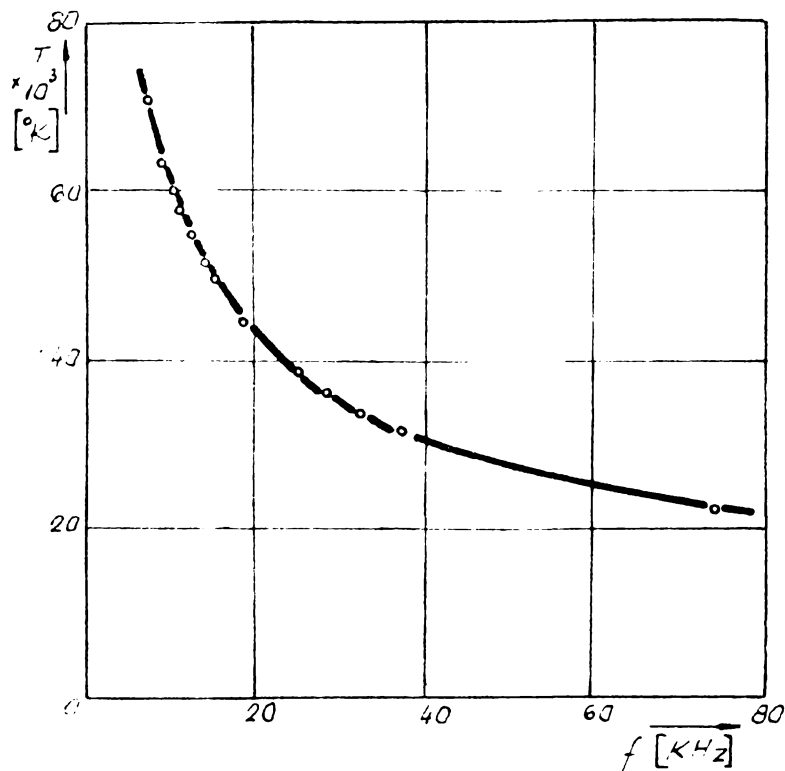


Fig. 4.4. Variația temperaturii la suprafața obiectului prelucrării, în funcție de frecvența descărcărilor electrice.

Rezolvarea integralei fiind dificilă, întrucât nu admite primitivă, se va descompune în două integrale:

$$\int_0^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi = \int_0^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi - \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4at}}} e^{-\xi^2} d\xi$$

Prima integrală conduce la soluția:

$$\int_0^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-(x^2 + y^2)} dx dy = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} e^{-\rho^2} \rho d\rho = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

iar cea de-a doua integrală se rezolvă prin dezvoltare în serie, păstrându-se din aceasta doar primii trei termeni,

$$\int_0^{\frac{x}{\sqrt{4at}}} e^{-\xi^2} d\xi = 1 - \frac{\xi^2}{1!} + \frac{\xi^4}{2!} \Bigg|_0^{\frac{x}{\sqrt{4at}}}$$

Făcând înlocuirile în expresia (4.6), aceasta devine:

$$T(t,x) = \frac{2F\sqrt{at}}{\lambda} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) - \frac{x}{4\sqrt{at}} - \frac{x^3}{8\sqrt{(\pi at)^3}} + \frac{x^5}{32\sqrt{(\pi at)^5}} \right] \quad (4.7)$$

Din relația (4.7), considerând temperatura de vaporizare a oțelului $T(t,x) = T_v = 3000 \text{ }^\circ\text{K}$, iar în funcție de aceasta efectuând corecția coeficientului de difuzibilitate termică,

$$a' = \frac{\lambda}{\rho c'}$$

în care

$$c' = c + \frac{m+n}{T_v} = 2510 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$$

m fiind căldura specifică de topire, iar n - căldura specifică de vaporizare, se obține adâncimea până la care materialul este vaporizat.

Sub stratul vaporizat, metalul se află în stare lichidă. Pe baza legilor termodinamicii se poate considera că, din energia termică transmisă obiectului prelucrării, 70% determină vaporizarea materialului, iar 30% cauzează topirea lui.

Admitând temperatura de topire a oțelului $T(t,x) = T_t = 1500 \text{ }^\circ\text{K}$, aplicând corecția coeficientului de difuzibilitate termică,

$$a'' = \frac{\lambda}{\rho c''}$$

unde

$$c'' = c + \frac{m}{T_t} = 653 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$$

se obține adâncimea pe care metalul se află în stare lichidă.

În diagramele din figurile 4.5 și 4.6 s-a reprezentat variația adâncimii pe care materialul se află în stare lichidă, în funcție de energia, respectiv frecvența descărcărilor electrice.

Metalul topit și vaporizat este evacuat de către unda de șoc generată de forțe electrodinamice, care acționează până la o anumită adâncime în timpul descărcării electrice și de forțe mecanice, care apar în pauza dintre impulsuri, ca urmare a variației bruște a presiunii în spațiul de lucru, pe suprafața obiectului prelucrării formându-se cratere. Volumul unui crater este:

$$V = \frac{1}{6} \pi h (h^2 - 3r^2) \quad (4.8)$$

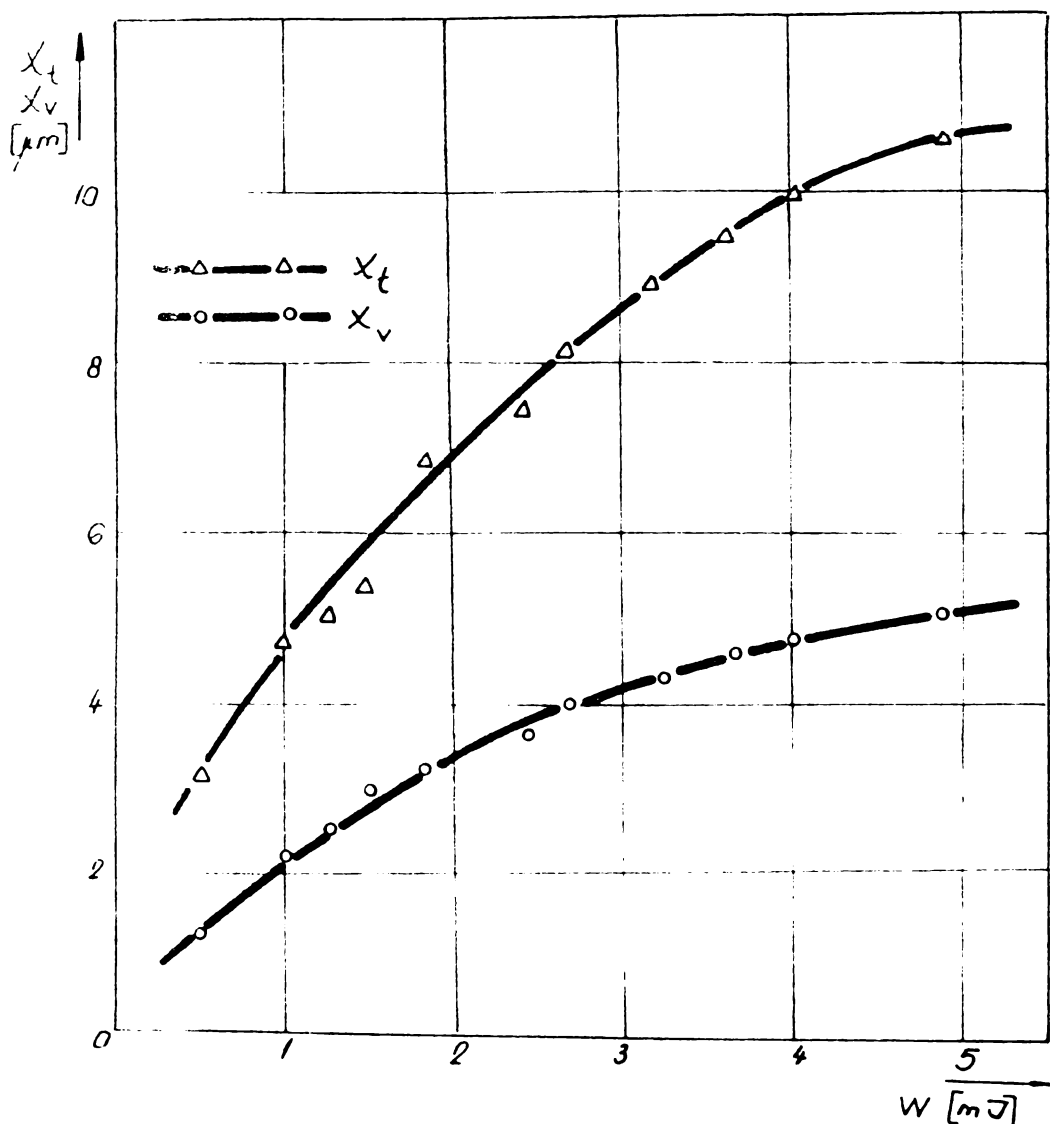


Fig. 4.5. Variația adâncimii pe care metalul se află în stare lichidă, respectiv de vapori, în funcție de energia descărcărilor electrice.

unde h este adâncimea craterului rezultat în urma evacuării materialului topit și vaporizat, iar r este raza acestuia. Pentru condițiile admise, cunoscând ca aria canalului de descărcare la suprafața obiectului prelucrării este $S = 60 \dots 100 \mu\text{m}^2$ [144], și aproximând diametrul canalului descărcării cu diametrul craterului, se deduce raza acestuia.

Admițând ipoteza simplificatoare ca, în cazul prelucrării microalezajelor, datorită suprafeței mici de interacțiune existentă între electrodul scula și obiectul prelucrării, prelevarea are loc printr-o succesiune de descărcări electrice singulare, de energie W , frecvență f și coeficient de umplere τ , se poate determina capacitatea productivă, cu relația:

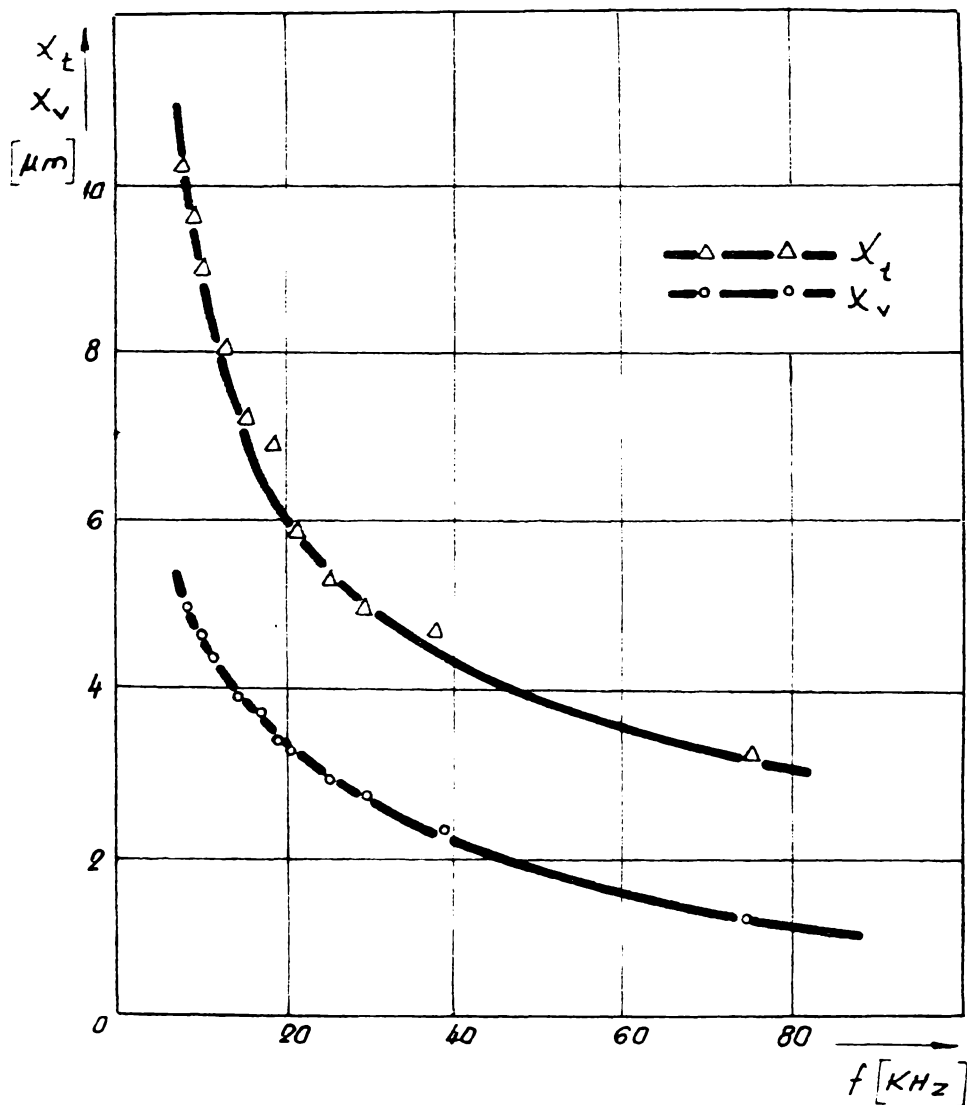


Fig. 4.6. Variația adîncimii pe care metalul se afl. în stare lichidă, respectiv de vapori, în funcție de frecvența descărcărilor electrice.

$$Q = \eta \pi f \tau \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right] \quad (4.9\phi)$$

în care factorul de proporționalitate η este exprimat ca raport între volumul craterului și energia descărcării electrice. Reprezentînd grafic (figurile 4.7 și 4.8) capacitățile productive obținute pe cale analitică, respectiv experimentală, în funcție de energia și frecvența descărcărilor electrice, se constată concordanța existentă între acestea, fapt ce confirmă valabilitatea modelului termic stabilit în condițiile particulare ale prelucrării microalezajelor prin eroziune electrică.

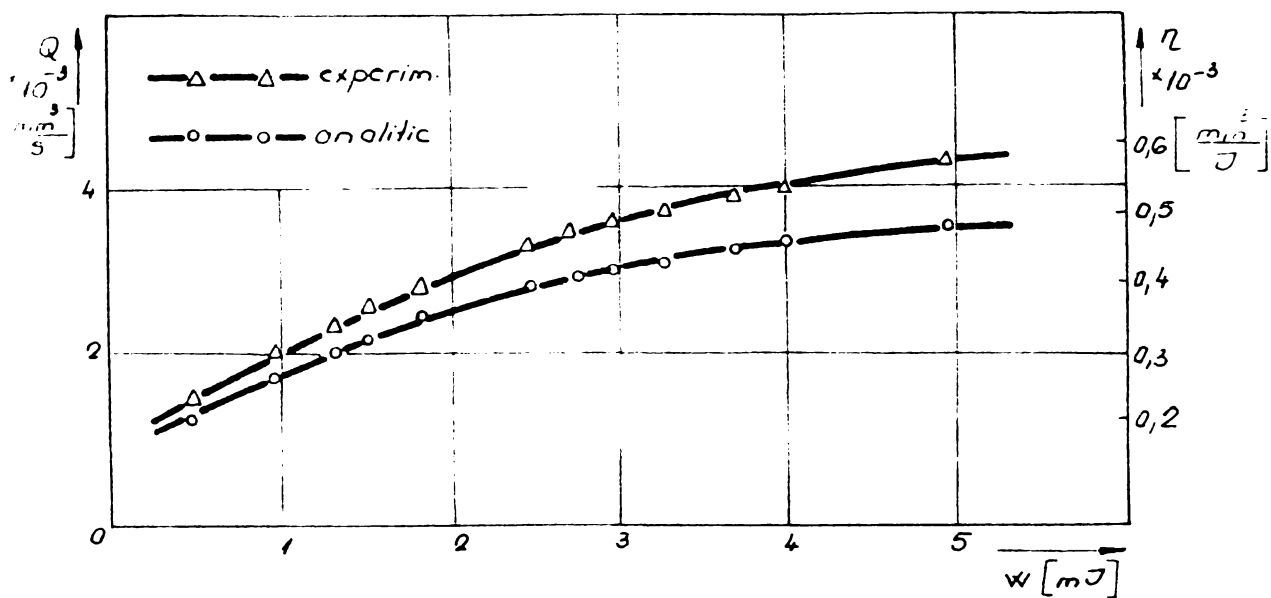


Fig. 4.7. Variația capacității productive și a factorului de proporționalitate, în funcție de energia descărcărilor electrice.

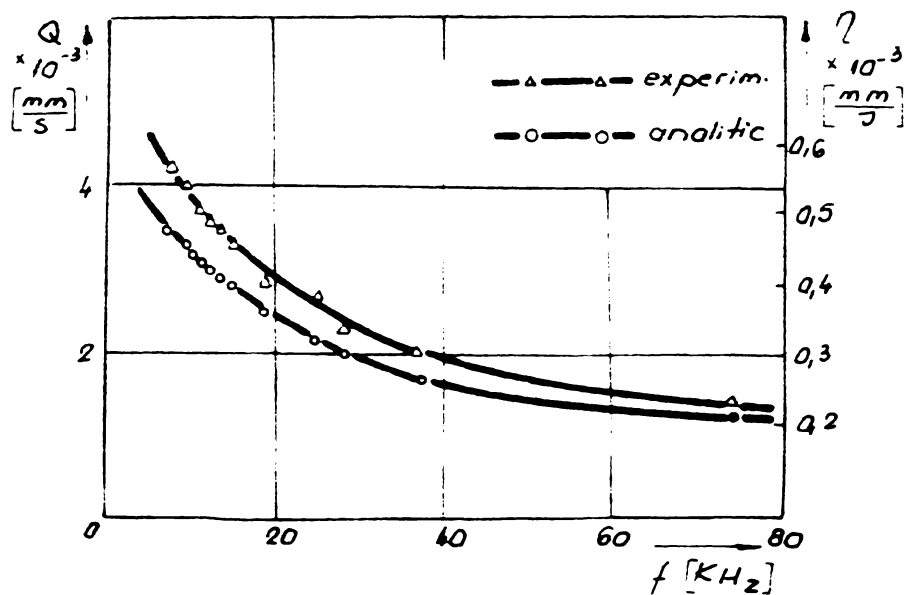


Fig. 4.8. Variația capacității productive și a factorului de proporționalitate, în funcție de frecvența descărcărilor electrice.

5. PRINCIPII DE PROIECTARE A UNOR SUBANSAMBLE SPECIFICE
UTILAJELOR DE PRELUCRARE A MICROALEZAJELOR PRIN EROZIUNE
ELECTRICA.

5.1. Sistemul de reglare automată a avansului electrodului
sculă.

5.1.1. Rolul funcțional.

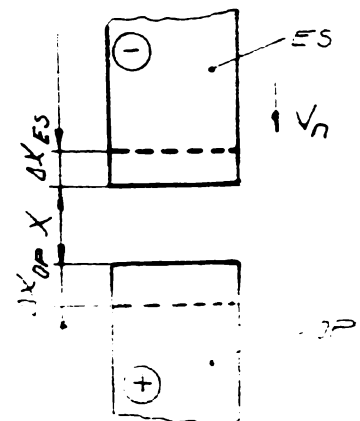
În procesul de prelucrare prin eroziune electrică, concentra-
rea în timp a energiei electrice și amorsarea descărcărilor la du-
ratele și intervalele stabilite este condiționată de reglarea mă-
rimii interstițiului, între limitele ce permit străpungerea lichidului
dielectric. La un moment dat, electrodul sculă și obiectul
prelucrării se găsesc la o distanță x . Ca urmare a prelevării de
material din obiectul prelucrării Δx_{CP} și a uzurii electrodului
sculă Δx_{ES} , mărimea interstițiului frontal variază (figura 5.1),
într-un interval de timp Δt fiind:

$$\Delta x = \Delta x_{ES} + \Delta x_{CP} - v_n \cdot \Delta t \quad (5.1)$$

sau

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x_{ES}}{\Delta t} + \frac{\Delta x_{CP}}{\Delta t} - v_n \quad (5.2)$$

în care, $\frac{\Delta x_{ES}}{\Delta t} = v_{ES}$ reprezintă viteza de
erodare din electrodul sculă, iar $\frac{\Delta x_{CP}}{\Delta t} =$



$= v_{CP}$ reprezintă viteza de erodare din
obiectul prelucrării.

Dacă vitezelor de erodare din elec-
trodul sculă și din obiectul prelucrării $v_{ES} + v_{CP} = v_e$ și repre-
zintă viteza de erodare totală în procesul de prelucrare. Operind
în relația (5.2), aceasta devine:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_e - v_n \quad (5.3)$$

Fig. 5.1. Variația
mărimei interstițiului
frontal dintre electrozi.

entru ca procesul de prelucrare să se desfășoare în mod continuu este necesar ca :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = 0, \quad \text{adică} \quad v_e = v_n, \quad (5.4)$$

deci, viteza de erodare să fie compensată de viteza de avans a electrodului sculă. Aceasta înseamnă că mărimea interstițiului să fie menținută practic între limitele:

$$x_{\min} < x < x_{\max} \quad (5.5)$$

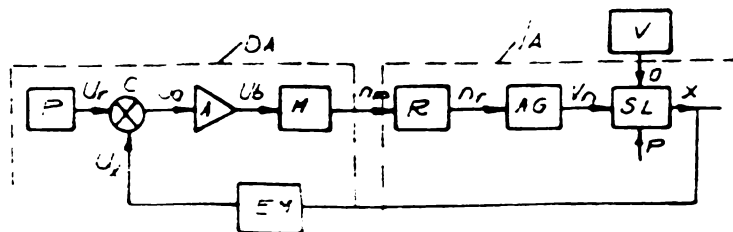
Pe parcursul desfășurării procesului de prelucrare viteza de erodare nu este constantă, înregistrând variații pe intervale restrinse și micșorându-se pe măsura creșterii adâncimii de patrundere a electrodului sculă. Prin urmare, condiția de reglare a mării interstițiului frontal poate fi îndeplinită numai de către un sistem automat, care trebuie să satisfacă următoarele cerințe:

- eroare statică redusă, pentru a avea sensibilitate ridicată în urmărirea parametrilor ce caracterizează mărimea interstițiului ;
- stabilitate dinamică bună, pentru ca procesele tranzitorii să fie de durată cât mai mică și amortizate ;
- posibilitați de realizare în condiții economice ;
- fiabilitate.

5.1.2. Structura, elementele și funcționarea sistemului de reglare automată a avansului.

Sistemul de reglare automată a avansului electrodului sculă, conceput pentru utilajul de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică este de tip electromecanic, în circuit închis, cu acțiune în funcție de abatere, având schema bloc redată în figura 5.2.

Fig. 5.2. Schema bloc a sistemului de reglare automată a avansului.



Reglarea mărimii interstițiului frontal dintre electrozi x , în limitele ce asigură amorsarea descărcărilor electrice prin strapungerea lichidului dielectric se realizează prin reglarea tensiunii U_x ce caracterizează mărimea acestuia, ca urmare a acțiunii dispozitivului de automatizare DA asupra instalației automatizate IA.

Dispozitivul de automatizare își exercită funcțiunea prin intermediul elementului de execuție, constituit din motorul electric de curent continuu cu excitație separată M. Acțiunea este determinată de controlul permanent pe care dispozitivul de automatizare, prin elementul de măsurare M' de pe calea de reacție, compus dintr-un divizor de tensiune, îl realizează asupra mărimii reglate U_x , care este comparată în comparatorul C, cu tensiunea de referință U_r , prescrisă prin potenționetrul reglabil P. Abaterea rezultată, tensiunea U_a este amplificată în amplificatorul A, care joacă rolul de regulator, constituind tensiunea de comandă a motorului electric M. Turația acestuia n_m este înmulțită în reductorul R, la arborele de ieșire al cărui se găsește dispozitivul de antrenare și ghidare a electrodului AG, care transformă mișcarea de rotație cu turația n_p a rozelor, în mișcare rectilinie cu viteza v_n a electrodului. Reductorul, împreună cu dispozitivul de antrenare și ghidare a electrodului constituie organul de reglare al instalației automatizate. Organul reglat este spațiul de lucru SL, format din electrodul sculă, lichidul dielectric și obiectul prelucrării, caracterizat prin mărimea interstițiului frontal x .

La modificarea mărimii interstițiului frontal x , diferența de potențial între electrozi U_x suferă variații, comparatorul însumând algebric valoarea instantanee a acesteia cu tensiunea de referință U_r prescrisă. Abaterea rezultată U_a poate fi pozitivă, în cazul în care $U_x > U_r$ ($x > x_{max}$), polaritatea tensiunii U_b aplicate la bornele motorului electric M determinând rotirea arborelui acestuia în sensul care asigură apropierea electrodului sculă de obiectul prelucrării. La o abatere U_a negativă, provocată de micșorarea mărimii interstițiului ($x < x_{min}$), tensiunea aplicată la bornele motorului electric de curent continuu are polaritatea inversă, comandând retragerea electrodului sculă. Ciclul oscilațiilor proprii ale electrodului, cauzate de procesul ce se

desfășoară în spațiul de lucru la prelucrarea unui orificiu străpuns, poate fi redat prin ciclograma din figura 5.3. În prima fază electrodul se deplasează rapid pe distanța L_a , pînă la suprafața obiectului prelucrării. Procesul de prelucrare a orificiului de lungime L se desfășoară printr-o succesiune de avansuri de lucru,

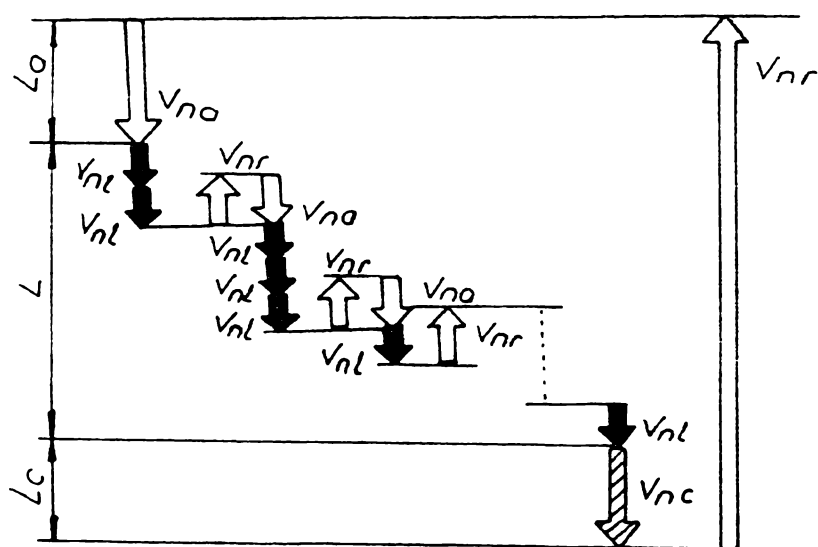


Fig. 5.3. Ciclograma mișcărilor electrodului sculă în procesul de prelucrare a unui orificiu străpuns.

- schimbarea continuă a condițiilor de străpungere a lichidului dielectric, datorită modificării concentrației produselor eroziunii ;

- înrăutățirea condițiilor de evacuare a produselor eroziunii odată cu creșterea adâncimii de ptrundere a electrodului sculă ;

- modificarea suprafeței de interacțiune și a proprietăților fizico-chimice ale materialului obiectului prelucrării, electrodului sculă și lichidului dielectric ;

- variația tensiunii de alimentare ;

- modificarea parametrilor mecanici ai mașinii, ca urmare a jocurilor, deformațiilor, alunecărilor, frecărilor.

Du toate că sistemul de reglare automat este conceput pentru a menține constantă mărimea interstițiului, datorită acțiunii factorilor perturbatori, acesta poate fi scos din echilibru. Sistemul răspunde la acțiunea factorilor perturbatori în următoarele moduri:

- prin apariția unor oscilații de amplitudine mereu crescând (figura 5.4.a) pînă la scurtcircuitarea electrozilor ; fenomenul

retrageri și apropieri ale electrodului. După străpungerea orificiului electrodul avansează în continuare pe lungimea L_c , în vederea calibrării orificiului, după care se retrage rapid.

Sistemul de reglare automată a avansului trebuie să asigure desfășurarea stabilă a procesului de prelucrare. Asupra spațiului de lucru acționează însă o serie de factori perturbatori, cum sînt :

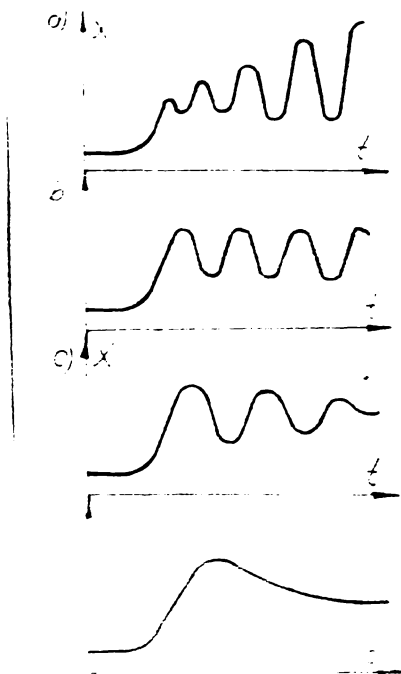


Fig. 5.4. Diagramele variației mrimii de reglare a sistemului automat.

5.1.3. Calitatea statică a sistemului de reglare automată a avansului.

Calitatea statică a unui sistem automat constă în capacitatea de menținere a mrimii reglate la valoarea prescrisă în regim staționar de funcționare și se apreciază după caracteristica statică. Grafic, aceasta apare reprezentată printr-o zonă, datorită insensibilității elementelor componente, cum sînt în cazul de față : alunecarea electrodului pe rola de antrenare, jocurile din lanțul cinematic, frecarea electrodului în ghidaj și frecările din lanțul cinematic.

O creștere a mrimii de perturbație Δp va determina o variație corespunzătoare a mrimii reglate x , care la rîndul ei va provoca variația mrimii de execuție v_n , a cărei consecințe va fi o nouă modificare a mrimii reglate, de sens opus celei provocate de variația mrimii de perturbație. Rezultă deci, că variația mrimii reglate este rezultatul acțiunii diferențiate a două cauze, variația mrimii perturbației și variația mrimii de execuție :

se repeta, constituind în permanență o instabilitate, neacceptată în proces ;

- prin apariția unor oscilații de amplitudine constantă (figura 5.4.b) ; chiar dacă aceasta este mică, instabilitatea provocată nu poate fi admisă ;

- prin amortizarea oscilațiilor aparute (figura 5.4.c) ; amplitudinea oscilațiilor se reduce, sistemul reintrînd în starea de echilibru ;

- prin revenirea imediată a mrimii reglate la valoarea prescrisă (figura 5.4 d) fără apariția oscilațiilor ; această situație caracterizează funcționarea stabilă a sistemului.

$$\Delta x = (\Delta x)_p - (\Delta x)_{v_n} \quad (5.6)$$

Tinând seama de liniaritatea elementelor sistemului,

$$(\Delta x)_p = (K_{IA})_p \cdot \Delta p$$

$$(\Delta x)_{v_n} = (K_{IA})_{v_n} \cdot \Delta v_n = (K_{IA})_{v_n} \cdot K_{DA} \cdot \Delta x$$

unde : - $(K_I)_p$ este coeficientul de transfer al instalației automatizate, relativ la mărimea de perturbație;

- $(K_{IA})_{v_n}$ este coeficientul de transfer al instalației automatizate, relativ la mărimea de execuție;

- K_{DA} este coeficientul de transfer al dispozitivului de automatizare.

Făcând substituțiile în relația /5.6/, aceasta devine :

$$\Delta x = (K_{IA})_p \cdot \Delta p - (K_{IA})_{v_n} \cdot K_{DA} \cdot \Delta x$$

de unde,

$$\Delta x = \frac{(K_{IA})_p \cdot \Delta p}{1 + (K_{IA})_{v_n} \cdot K_{DA}} \quad (5.7)$$

Relația (5.7) arată că la o variație a mărimei de perturbație Δp , eroarea statică a mărimei de reglare Δx va fi cu atât mai mică, cu cât coeficientul de transfer al dispozitivului de automatizare K_{DA} va fi mai mare. Pentru ca eroarea statică a mărimei de reglare, în regim staționar să fie nulă, trebuie ca dispozitivul de automatizare să conțină elemente integratoare, care determină valoarea infinită a coeficientului de transfer K_{DA} . Pentru reducerea zonei de insensibilitate trebuie acționat asupra componentelor mecanice din lanțul cinematic de transmitere a mișcării de la motorul electric de curent continuu la electrodul sculă, micșorându-se frecvențele.

5.1.4. Stabilitatea dinamică a sistemului de reglare automată a avansului.

Studiul stabilității sistemului automat se face pe baza carac-

teristiilor dinamice ale elementelor componente, stabilite analitic, prin ecuațiile diferențiale și funcțiile de transfer.

5.1.4.1. Stabilirea ecuațiilor diferențiale ale elementelor sistemului automat.

Pentru deducerea ecuațiilor diferențiale, ținând seama de realizarea practică a sistemului automat, schema bloc din figura 5.2 se reduce la o schemă bloc echivalentă, redată în figura 5.5.

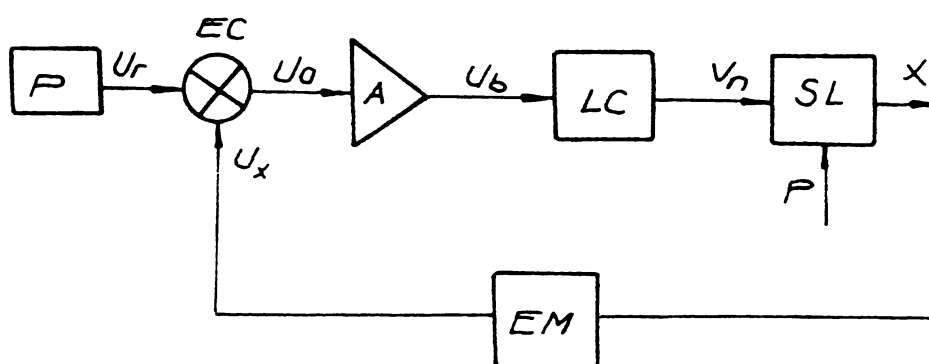


Fig. 5.5. Schema bloc echivalentă a sistemului automat.

Urmează să se stabilească în continuare ecuațiile diferențiale ale elementelor cuprinse în schema bloc echivalentă a sistemului de reglare automat a avansului electrodului scula.

a) Lanțul cinematic LC

În lanțul cinematic au fost considerate următoarele elemente (figura 5.6) :

- Rot - rotorul motorului electric de curent continuu, caracterizat prin momentul de inerție J_{Rot} ;
- C - cuplajul rigid dintre arborele rotorului și arborele de intrare în reductor, caracterizat prin momentul de inerție J_C ;
- M_1, M_2 - melcii reductorului, caracterizați prin momentele de inerție J_{M_1} și J_{M_2} ;
- R_{M_1}, R_{M_2} - roțile melcate, caracterizate prin momentele de inerție $J_{R_{M_1}}$, respectiv $J_{R_{M_2}}$;

- R_1 - rola de antrenare a electrodului sculă ; caracterizată prin momentul de inerție J_{R_1} ;
- I - arborele motorului electric, cu momentul de inerție J_I ;
- II..IV - arborii reductorului, avînd momentele de inerție $J_{II}..J_{IV}$;
- V - arborele rolei de antrenare, cu momentul de inerție J_V ;
- $\mu_1.. \mu_5$ - coeficienții de frecare în lagare ;
- C' - cuplajul dintre arborele de ieșire al reductorului și arborele rolei de antrenare, caracterizat prin momentul de inerție J_C .

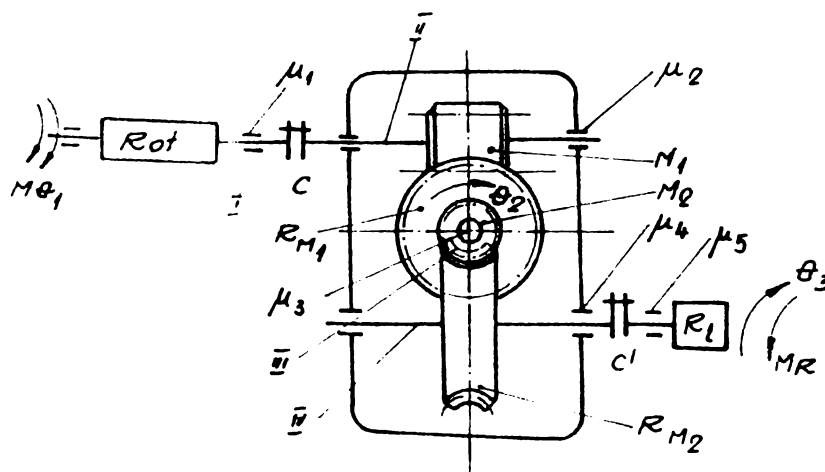


Fig.5.6. Lanțul cinematic al sistemului automat.

Ecuația diferențială a lanțului cinematic va fi :

$$\begin{aligned}
 (J_{Rot} + J_C + J_{M_1} + J_I + J_{II})\ddot{\theta}_1 &= M - (J_{R_{M_1}} + J_{M_2} + J_{III})\ddot{\theta}_2 - (J_{R_{M_2}} + \\
 + J_{R_1} + J_{C'} + J_{IV} + J_V)\ddot{\theta}_3 - \mu_1 G_{Rot} R_I - \mu_2 G_{M_1} R_{II} - \mu_3(G_{R_{M_1}} + G_{M_2}) \\
 R_{III} - \mu_4 G_{R_{M_2}} R_{IV} - \mu_5 G_{R_1} R_V - M_{R_1} - M_{R_2} - M_R
 \end{aligned} \quad (5.8)$$

unde,

- $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ - unghiurile de rotire ;
- M - momentul motor al arborelui rotorului ;
- $R_I..R_V$ - razele arborilor I...V ;
- $M_1..M_5$ - momentele rezistente la cele două angrenaje melcate ;
- G - greutatea elementelor, în care au fost incluse și greutatea arborilor respectivi.

Considerînd raportul total de transmitere al reductorului 1, iar raportul de transmitere al celui de-al doilea angrenaj i_2 , se

obține :

$$\theta_2 = i_2 \theta_3 \quad \text{și} \quad \theta_1 = i_1 \theta_3$$

și notînd suma tuturor momentelor rezistente cu M_{R_t} , ecuația (5.8) devine :

$$\begin{aligned} & [(J_{Rot} + J_C + J_{R_1} + J_I + J_{II})i_1 + (J_{R_{M_1}} + J_{M_2} + J_{III})i_2 + (J_{R_{M_2}} + \\ & + J_{R_1} + J_{C'} + J_{IV} + J_V)] \ddot{\theta}_3 = M - M_{R_t} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Expresia din paranteză se notează cu J și cu aceasta, ecuația (5.9) devine :

$$J \ddot{\theta}_3 = M - M_{R_t} \quad (5.10)$$

Momentul motor la arborele rotorului motorului electric de curent continuu cu excitație separată fiind [40] :

$$M = \frac{C \phi}{30 \cdot R_r} (30 U_b - n_m \Pi^2 C \phi) \quad (5.11)$$

unde $C\phi$ - constanta motorului electric,

R_r - rezistența circuitului rotoric,

Făcînd și substituțiile

$$\theta_3 = \frac{1}{R} \dot{v}_n \quad \text{și} \quad n_m = \frac{1}{2 \Pi R} v_n$$

în care R este raza rolei de antrenare a electrodului scula, ecuația diferențială a lanțului cinematic, care exprimă legătura dintre mărimea de intrare U_b și mărimea de ieșire v_n , va fi :

$$\frac{J}{R} \ddot{v}_n + \frac{\Pi^2 (C\phi)^2}{60 R R_r} v_n + M_{R_t} = \frac{C\phi}{R_r} U_b \quad (5.12)$$

b) Spațiul de lucru SL

Pentru stabilirea ecuației diferențiale a spațiului de lucru se pornește de la considerațiile enunțate în cap. 5.1.1, referitor la variația mării interstițiului dintre electrodul scula și obiectul prelucrării. Viteza de variație a mării interstițiului, determinat de viteza de erodare și viteza de avans a electrodului este :

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} \quad (5.13)$$

Relația de legatură dintre viteza de avans a electrodului v_n și mărimea interstițiului este dată prin :

$$v_n = v_e - \dot{x} \quad (5.14)$$

viteza de erodare v_e fiind o funcție de interstițiu, ce se poate reprezenta grafic (figura 5.7).

Din punct de vedere al capacității productive, prezintă avantaj curba 1, ceea ce ar impune însă desfășurarea procesului cu reglarea interstițiului spre valoarea minimă. În acest caz, efectul oscilațiilor forțate ale electrodului scula, produse de vibratorul electromagnetic, ar putea fi negative, determinând o variație a interstițiului cu $\pm \Delta x$ față de valoarea reglată, care poate conduce la scurteir-

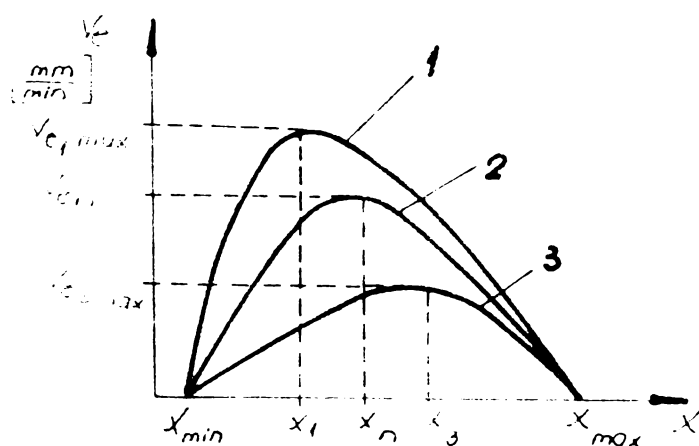


Fig. 5.7. Variația vitezei de erodare în funcție de mărimea interstițiului.

suitarea electrozilor și la instabilitatea procesului. Curba 3 este de asemenea neacceptată, pe de o parte datorită capacității productive scăzute, pe de altă parte faptului că de această dată oscilațiile forțate ale electrodului pot duce la creșteri ale interstițiului peste limita care asigură amorsarea descărcărilor electrice, diminuând și mai mult viteza de erodare. Cazul convenabil, cu condiția ca amplitudinea oscilațiilor forțate ale electrodului scula să fie corelată cu mărimea reglată a interstițiului astfel ca în permanență $x_{min} < x < x_{max}$, este reprezentat prin curba 2, pentru care,

$$x_n = \frac{x_{max} + x_{min}}{2} \quad (5.15)$$

Aproximând curba 2 cu o parabolă și considerând originea în punctul x_{min} , ecuația acesteia este :

$$v_e = - \frac{v_{en}}{x_n^2} x^2 + \frac{2 v_{en}}{x_n} x \quad (5.16)$$

Inlocuind în relația (5.14) se obține :

$$\ddot{x}_n = - \frac{v_{en}}{x_n} x^2 + \frac{2 v_{en}}{x_n} x - \dot{x} \quad (5.17)$$

reprezentând ecuația diferențială a spațiului de lucru.

c) Amplificatorul A

Amplificatorul de curent continuu este de tip proporțional, având ecuația diferențială :

$$U_b = K_A U_a \quad (5.18)$$

unde K_A reprezintă factorul de amplificare.

d) Elementul de măsură EM

Divizorul de tensiune folosit pe calea de reacție ca element de măsură, transformă mărimea x în semnal electric U_x și are ecuația diferențială :

$$U_x = K_{EM} x \quad (5.19)$$

unde K_{EM} este factorul de proporționalitate al elementului de măsură.

5.1.4.2. Stabilirea funcțiilor de transfer ale elementelor sistemului automat.

Funcțiile de transfer ale sistemului automat se obțin prin aplicarea operatorului Laplace ecuațiilor diferențiale ale elementelor componente.

a) Lanțul cinematic LC

Aplicând operatorul Laplace ecuației diferențiale a lanțului cinematic, exprimat prin relația (5.12) se obține :

$$\left[\frac{J}{R} s + \frac{\pi l (C\ell)^2}{60 R R_r} \right] E(s) = \frac{C\ell}{R_r} I(s) \quad (5.20)$$

Funcția de transfer a lanțului cinematic este

$$G_{LC}(s) = \frac{E(s)}{I(s)}$$

rezultind

$$F_{LC}(s) = \frac{\frac{C\phi}{R_f}}{\frac{J}{R}s + \frac{\pi^2(C\phi)^2}{60 R R_f}} \quad (5.21)$$

b) Spațiul de lucru SL

Spațiul de lucru fiind un element neliniar, este necesar a se efectua întâi liniarizarea ecuației diferențiale (5.17), folosindu-se în acest scop metoda trecerii la abatere, considerind că mărirea interstițiului este reglată în jurul valorii x_n , cu o abatere Δx mică. Trecind la variabilele Δv_n și Δx , ecuația diferențială a spațiului de lucru devine :

$$\Delta v_n + v_{nom} = - \frac{v_{en}}{x_n^2} (x_n + \Delta x)^2 + \frac{2 v_{en}}{x_n} (x_n + \Delta x) - (x_n + \Delta x)' \quad (5.22)$$

unde v_{nom} reprezintă viteza nominală de avans a electrodului sculă, la care mărirea interstițiului are valoarea x_n . Efectuind calculele și neglijind termenul Δx^2 se obține

$$\Delta v_n + v_{nom} = - \Delta \dot{x} + v_{en} \quad (5.23)$$

careia i se aplică operatorul Laplace și rezulta funcția de transfer a spațiului de lucru :

$$F_{SL}(s) = - \frac{1}{s} \quad (5.24)$$

c) Amplificatorul A

Din ecuația operațională $E(s) = K_A I(s)$, obținută prin aplicarea operatorului Laplace în ecuația diferențială (5.18), rezulta funcția de transfer a amplificatorului :

$$F_A(s) = K_A \quad (5.25)$$

d) Elementul de măsură EM

Elementul de măsură fiind de tip proporțional, funcția sa de transfer este :

$$F_{EM}(s) = K_{EM} \quad (5.26)$$

5.1.4.3. Stabilirea funcției de transfer a sistemului automat

Amplificatorul A, lanțul cinematic LC și spațiul de lucru SL fiind legate în serie pot fi substituite printr-un element echivalent Y_{Ech} , a cărui funcție de transfer este :

$$Y_{Ech}(s) = Y_A(s) Y_{LC}(s) Y_{SL}(s) = - \frac{K_A \frac{C\phi}{R_r}}{\frac{J}{R} s^2 + \frac{\pi_1(C\phi)^2}{60 R R_r} s} \quad (5.27)$$

Funcția de transfer pentru un sistem automat închis cu reacția pozitivă este :

$$Y(s) = \frac{Y_{Ech}(s)}{1 - Y_{Ech}(s) Y_{EM}(s)} \quad (5.28)$$

de unde rezultă

$$Y(s) = - \frac{\frac{K_A(C\phi)}{R_r}}{\frac{J}{R} s^2 + \frac{\pi_1(C\phi)^2}{60 R R_r} s + \frac{K_A(C\phi) K_{EM}}{R_r}} \quad (5.29)$$

5.1.4.4. Studiul stabilității dinamice a sistemului automat

Întru a analiza stabilitatea dinamică a sistemului automat de reglare a avansului electroodului, se anulează numitorul funcției de transfer (5.29) :

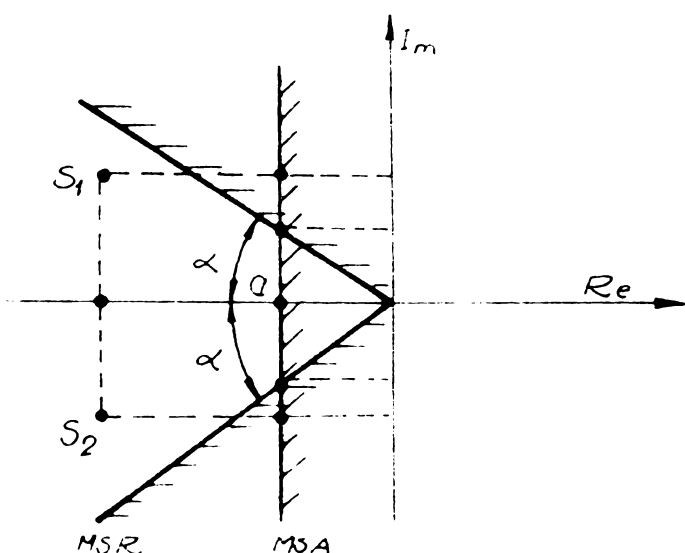
$$\frac{J}{R} s^2 + \frac{\pi_1(C\phi)^2}{60 R R_r} s + \frac{K_A(C\phi) K_{EM}}{R_r} = 0 \quad (5.30)$$

obținându-se o ecuație de gradul II în s, ale cărei rădăcini sînt

$$s_{1,2} = \frac{- \frac{\pi_1(C\phi)^2}{60 R R_r} \pm \sqrt{\frac{\pi_1^2(C\phi)^4}{60^2 R^2 R_r^2} - \frac{4 J K_A(C\phi) K_{EM}}{R R_r}}}{\frac{2 J}{R}} \quad (5.31)$$

Întru ca sistemul automat să fie stabil este necesar ca rădă-

cinile s_1 și s_2 să fie reale negative sau complex conjugate, cu partea reală negativă, numai în acest caz componenta liberă tinzînd în timp către zero. Reprezentînd rădăcinile s_1 și s_2 într-un sistem de axe (Re, Im), acestea pot fi încadrate într-un domeniu delimitat de două margini, marginea de stabilitate absolută MSA și marginea de stabilitate relativă MSR (figura 5.8).



Pentru ca răspunsul tranzitoriu să fie cît mai rapid, se impune ca marginea de stabilitate absolută să fie situată cît mai la stînga originii, iar pentru ca procesul tranzitoriu să fie suficient de amortizat, unghiul α care caracterizează marginea de stabilitate relativă, trebuie să fie cît mai mic. Cele două limite pot fi folosite ca indici de apreciere a stabilității dinamice a sistemului.

Fig. 5.8. Reprezentarea soluțiilor s_1 și s_2 ale ecuației.

Condiția de stabilitate a sistemului de reglare automată a avansului electroscul, de tip electromecanic, în circuit închis, cu acțiune în funcție de abetere, conform schemei bloc din figura 5.2 este

$$\frac{\pi^2 I^2 (C\phi)^4}{60^2 R^2 R_r^2} < \frac{4 J K_A (C\phi) K_{EM}}{R R_r} \quad (5.32)$$

pentru a obține rădăcinile ecuației complex conjugate, respectiv

$$\frac{\pi I (C\phi)^2}{60 R R_r} > \sqrt{\frac{\pi^2 I^2 (C\phi)^4}{60^2 R^2 R_r^2} - \frac{4 J K_A (C\phi) K_{EM}}{R R_r}} \quad (5.33)$$

pentru a obține rădăcinile ecuației reale negative.

5.1.4.5. Îmbunătățirea stabilității dinamice a sistemului automat

Fiind găsită condiția de stabilitate dinamică a sistemului automat, pot fi utilizate totodată modalități de îmbunătățire. Astfel, limite de stabilitate absolută fiind date de ter-

menul

$$\frac{\pi i (C\phi)^2}{120 R_r J} = a \quad (5.34)$$

inseamna ca raportul de transmitere al reductorului i și constanta motorului electric ($C\phi$) trebuie să aiba valori cât mai mari, iar rezistența circuitului rotoric al motorului electric R_r și momentul de inerție al elementelor lanțului cinematic să fie cât mai mici. Aceste cerințe sînt într-un fel contradictorii, întrucît cu creșterea lui i va crește și J , iar cu creșterea lui ($C\phi$) se va mari și R_r . De aceea, în funcție de situația concretă se vor admite valorile corespunzătoare în așa fel încît termenul a să rezulte cât mai mare.

Limita de stabilitate relativă fiind determinată de

$$\alpha = \arctg \frac{\sqrt{\frac{\pi^2 i^2 (C\phi)^4}{60^2 R^2 R_r^2} - \frac{4 J K_A (C\phi) K_{EM}}{R R_r}}}{\frac{\pi i (C\phi)^2}{60 R R_r}} \quad (5.35)$$

rezultă că pentru ca unghiul α să fie cât mai mic, termenul

$$\frac{4 J K_A (C\phi) K_{EM}}{R R_r}$$

trebuie să fie cât mai mic, dar diferit de zero. Dacă termenul are valoarea zero, una dintre rădăcini fiind nulă, sistemul devine instabil. Reducerea valorii termenului se poate realiza fie prin mărirea razei rolei de antrenare a electrozului, R sau a rezistenței circuitului rotoric al motorului electric R_r , fie prin micșorarea momentului de inerție J , a factorului de amplificare K_A , a factorului de proporționalitate al elementului de măsură K_{EM} sau a constantei motorului electric ($C\phi$).

Practic, pentru asigurarea unei bune stabilități a sistemului de reglare automată a avansului electrozului scula, la proiectarea acestuia, ținînd cont de cei doi indici stabiliți, trebuie să se admită valori mari pentru raportul de transmitere al reductorului, raza rolei de antrenare a electrozului scula și constanta motorului electric, iar pentru momentul de inerție o valoare cât mai mică. Factorul de amplificare va fi ales la limita minimă care asigură o funcționare stabilă a sistemului automat.

În studiul stabilității dinamice a sistemului automat nu a fost luat în considerare aportul vibratorului electromagnetic. Acesta determină o mișcare oscilatorie sinusoidală, de o anumită amplitudine și frecvență, a electrodului sculă, care se suprapune peste mișcarea de avans, contribuind la îmbunătățirea stabilității dinamice, ca urmare a reducerii acțiunii unor factori perturbatori, cum sînt : variația concentrației produselor eroziunii în spațiul de lucru și înrăutățirea condițiilor de evacuare a acestora la adîncimi mari de prelucrare.

5.2. Dispozitivul de antrenare și ghidare a electrodului sculă

Electrodul sculă utilizat la prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică este sub formă de fir, înfășurat pe o bobină. Firului i se transmite mișcarea de avans, comandată de sistemul automat. Întrucît în procesul de prelucrare, datorită efectului termic al descărcărilor electrice, electrodul sculă se uzează, la antrenarea sa în mișcarea de avans trebuie avut în vedere ca dispozitivul să asigure compensarea lungimii de fir uzate.

Dispozitivele de antrenare a electrodului în mișcarea de avans pot fi prevăzute, în funcție de diametrul firului, cu bușă elastică, clemă sau role (figura 5.9).

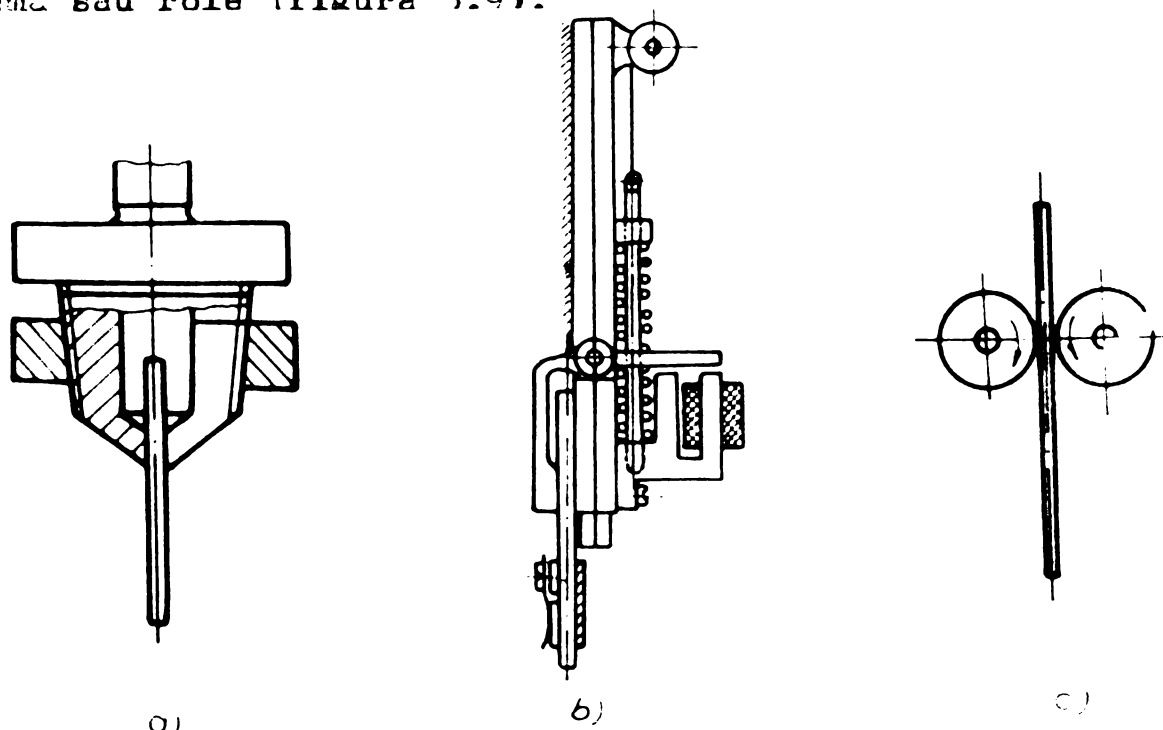


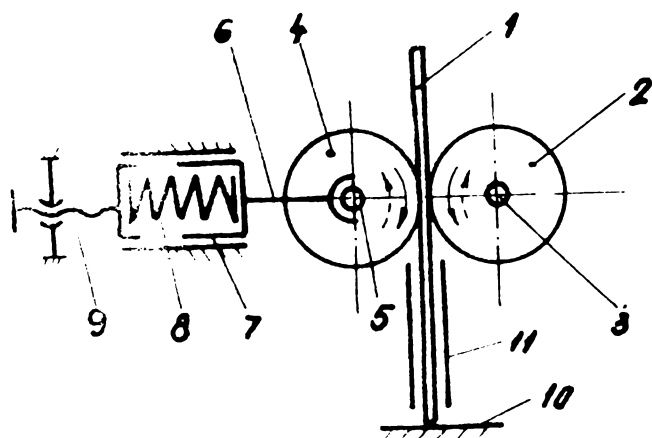
Fig. 5.9. Dispozitive de antrenare a electrodului sculă.
a-cu bușă elastică; b-cu clemă; c-cu role.

Dispozitivele cu bușă elastică sau clemă permit efectuarea

compensăției uzurii electrodului sculă în intervalul de prelucrare a două orificii succesive, consumându-se pentru aceasta un timp suplimentar. Aceste dispozitive se utilizează pentru diametre de electrod mai mari de 0,4 mm, firele avînd o lungime limitată.

La prelucrarea microalezajelor cu diametru mai mic de 0,4 mm este indicat a se folosi dispozitivul de antrenare cu role, care permite utilizarea unui fir de lungime nelimitată, înfășurat pe bobină, iar uzura sa este compensată continuu.

Mecanismul de antrenare cu role a electrodului sculă 1 se compune din (figura 5.10): rola motoare 2, montată pe arborele 3, cuplat de arborele de ieșire al reductorului de turație.



Contactul dintre electrodul sculă și rola de antrenare se realizează cu ajutorul rolei 4, a cărui arbore 5 este introdus în lagorul furcii 6 și care este împinsă în ghidajul 7 de către arcul 8, a cărui forță elastică este reglată prin șurubul 9. Electrosculă este condus pînă la suprafața obiectului prelucrării 10, prin ghidajul 11.

Fig. 5.10. Compunerea dispozitivului de antrenare cu role.

Dispozitivul de antrenare și ghidare a electrodului sculă făcînd parte din sistemul de reglare automată a avansului, trebuie să asigure funcționarea stabilă a acestuia. Condițiile de stabilitate sînt satisfăcute prin adoptarea unui diametru mic al rotelor. La reversările bruște repetate ale sensului de rotație, pentru a nu se produce patinări între rola motoare și electrod, se impune realizarea unei forțe de apăsare suficiente prin arcul dispozitivului, exprimată prin relația:

$$F_a = \frac{c F_t}{\mu} \quad [N] \quad (5.35)$$

unde, F_t - forța periferică transmisă de rola motoare prin frecare,

μ - coeficientul de frecare dintre rolă și electrod;
 c - coeficientul de siguranță împotriva patinării.

Forța periferică F_t transmisă de rola motoare este:

$$F_t = \frac{2 M_t}{D} = \frac{2 P_t}{\omega D} = \frac{P_t}{\pi n D} \quad [N] \quad (5.36)$$

unde, M_t - momentul la arborele motor, în Nm ;
 P_t - puterea la arborele motor, în W ;
 D - diametrul rolei motoare, în m ;
 ω - viteza unghiulară a arborelui motor, în rad/s ;
 n - turația arborelui motor, în rot/s.

Forța nominală dezvoltată de arcul elicoidal, în funcție de caracteristicile sale constructive este dată de expresia :

$$F_a = \frac{G d^4 f}{8 D_m^3 z} \quad [N] \quad (5.37)$$

unde, G - modulul de elasticitate transversal, în N/m² ;
 d - diametrul spirei arcului ; în m ;
 f - deformația arcului, în m ;
 D_m - diametrul mediu al arcului, în m ;
 z - numărul de spire ale arcului.

Plecând înlocuirile în relația (5.35) se deduce săgeata cu care trebuie deformat arcul elicoidal, prin șurubul de reglare al dispozitivului de apăsare, astfel ca să se realizeze condiția de antrenare prin frecare a electrodului :

$$f = \frac{3 c D_m^3 z}{\mu \pi n G d^4} t \quad [m] \quad (5.38)$$

precizia de prelucrare a orificiilor depinde în mare măsură de asigurarea rectilinității deplasării electrodului în mișcarea dată avans. În acest scop s-a folosit un tub de ghidare din oțel, coeficientul de frecare impunându-se a fi cât mai redus. Jocul dintre electrod și tub trebuie să fie de asemenea mic, dar la limita

la care ar apare frinarea mișcării firului. Practic, pot apare situații de blocare accidentală, la un moment dat, a electrodului în tubul de ghidare, provocate în special de deformațiile pe care le prezintă firul derulat de pe bobina. În acest caz se impune evitarea flambajului și îndoirii firului pe porțiunea liberă dintre rolele de antrenare și tubul de ghidare.

Din expresia :

$$F_{cr} = c_f F_t \quad [N] \quad (5.39)$$

unde c_f este coeficientul de siguranță la flambaj, iar F_{cr} este forța critică la flambaj dată de relația lui Euler,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l_f^2} = \frac{\pi^3 E d_0^4}{64 l_f^2} \quad [N] \quad (5.40)$$

în care, E - modulul de elasticitate, în N/m^2 ;

d_0 - diametrul electrodului, în m ;

l_f - lungimea de flambaj, în m ,

înlocuind valoarea forței F_t ce acționează asupra firului, rezultă condiția necesară în vederea evitării flambajului :

$$l_f = \frac{\pi^2 d_0^2}{12} \sqrt{\frac{n D}{c_f - t}} \quad [m] \quad (5.41)$$

Condițiile exprimate prin relațiile (5.33) și (5.41) sînt utile pentru efectuarea reglajului dispozitivului de antrenare și ghidare a electrodului, astfel încît să se asigure stabilitatea dinamică a sistemului de reglare automată a avansului și implicit desfășurarea corespunzătoare a procesului, obținerea unei precizii de prelucrare ridicată a orificiilor.

5.3. Vibratorul electromagnetic.

5.3.1. Compunerea vibratoarei electromagnetice.

Varianta constructivă concepută pentru vibratoarea electromagnetică este prezentată în figura 5.11. Masa vibratoare 1, pe care se află montat dispozitivul cu role de antrenare a electrodului

2 este suspendată pe arcurile lamelare curbate 3. Bobina electromagnetului 4 este alimentată

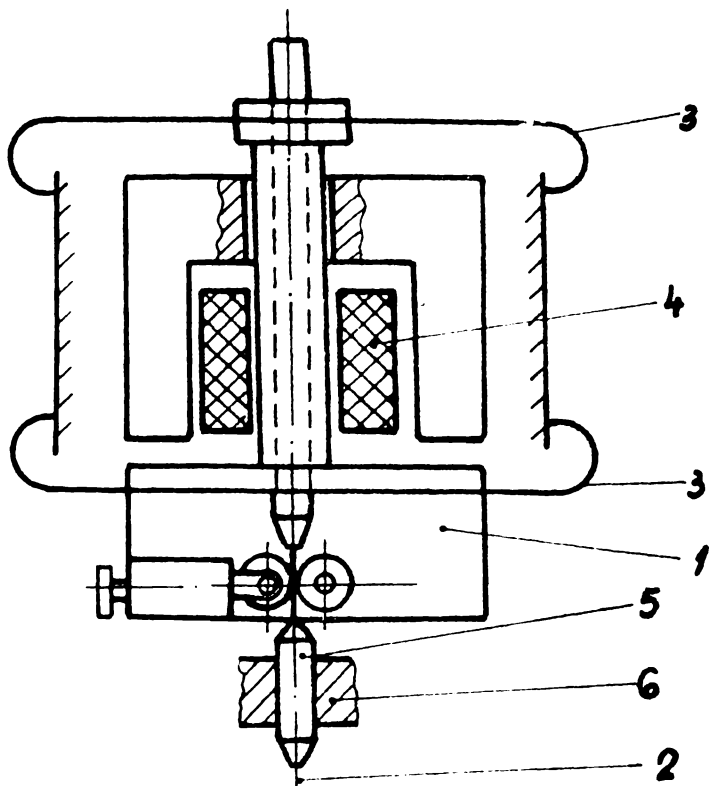


Fig. 5.11. Schema constructivă a vibratorului electromagnetic.

cu un curent rectangular de frecvență și amplitudine variabilă obținut de la un generator (figura 5.12) compus din oscilatorul de frecvență variabilă 1, divizorul de tensiune formator 2 și amplificatorul de putere 3.

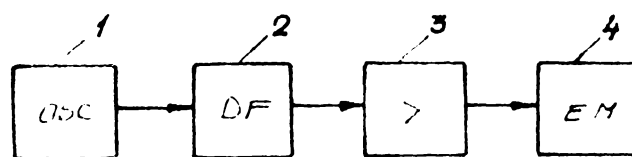


Fig. 5.12. Schema bloc a generatorului de frecvență și amplitudine reglabilă.

Așadar, vibratorul electromagnetic se compune dintr-o parte mecanică oscilatoare și o parte electrică de alimentare a bobinei.

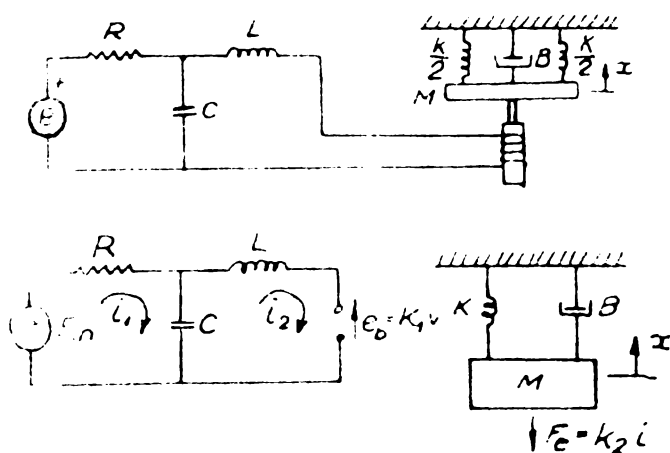
5.3.2. Stabilirea funcției de transfer a vibratorului electromagnetic.

Schema echivalentă a vibratorului electromagnetic și separarea acesteia în cele două părți, cea electrică și cea mecanică, se prezintă în figura 5.13.

Partea electrică se rezolvă prin metoda curenților ciclici, folosind doi asemenea curenți. Utilizând transformarea Laplace în condiții inițiale nule, se obțin ecuațiile:

$$U_{in} = (R + \frac{1}{sC})I_1 + (-\frac{1}{sC})I_2$$

(5.45) Fig. 5.13. Schema echivalentă a VB.



$$0 = \left(-\frac{1}{sC}\right)I_1 + \left(Ls + \frac{1}{sC}\right)I_2 + k_1 V \quad (5.47)$$

Ecuatia transformata a sistemului mecanic este

$$0 = k_2 I_2 + \left(Ms + B + \frac{K}{s}\right)V \quad (5.48)$$

Literele mari reprezinta transformatele Laplace ale marimilor variabile in timp.

Bobina induce o tensiune proportionala cu viteza in ecuatia sistemului ~~sistemului~~ electric si o forta proportionala cu curentul, in ecuatia sistemului mecanic.

Determinantul coeficientilor ecuatiilor este :

$$D = \begin{vmatrix} R + \frac{1}{sC} & -\frac{1}{sC} & 0 \\ -\frac{1}{sC} & Ls + \frac{1}{sC} & k_1 \\ 0 & k_2 & Ms + B + \frac{K}{s} \end{vmatrix}$$

care prin dezvoltare devine

$$D = \left(R + \frac{1}{sC}\right) \left[\left(Ls + \frac{1}{sC}\right) \left(Ms + B + \frac{K}{s}\right) - k_1 k_2 \right] - \left(\frac{1}{sC}\right)^2 \left(Ms + B + \frac{K}{s}\right) \quad (5.49)$$

Funcția de transfer a vibratorului electromagnetic va fi :

$$Y_s(s) = \frac{1}{sD} \left(-\frac{1}{sC} k_2\right) = -\frac{k_2}{s^2 C D}$$

in care, prin inlocuirea expresiei determinantului rezulta :

$$Y_s(s) = -\frac{k_2}{s^2 C \left(R + \frac{1}{sC}\right) \left[\left(Ls + \frac{1}{sC}\right) \left(Ms + B + \frac{K}{s}\right) - k_1 k_2 \right] - \frac{1}{s^2 C^2} \left(Ms + B + \frac{K}{s}\right)} \quad (5.50)$$

Pentru determinarea condițiilor de stabilitate dinamică ale vibratorului electromagnetic se anuleaza numitorul funcției de transfer, rezultind ecuația de gradul 6 :

$$\begin{aligned}
 & C^3 R L M s^6 + L C^2 (M + C R B) s^5 + C^2 (C A L K + R M - C R k_1 k_2 + L B) s^4 + C (C R B - \\
 & - R L + C L K + M - C k_1 k_2) s^3 + (C^2 R K + C R B + C B - M) s^2 + C (R K + K - B) s - \\
 & - R = 0
 \end{aligned} \tag{5.51}$$

a cărei soluții trebuie să fie reale negative sau complex conjugate cu partea reală negativă.

5.3.3. Studiul dinamic al vibrațiilor.

Masa vibratoare suspendată pe arcurile lamelare curbate constituie un sistem mecanic cu un singur grad de libertate, având vibrații forțate cu amortizare [134].

Forța perturbatoare F_e generată de electromagnet este o forță armonică de forma :

$$F_e(t) = F_0 \sin \omega t \tag{5.52}$$

unde : F_0 - amplitudinea forței perturbatoare ;
 ω - pulsația forței perturbatoare ;

Asupra sistemului de masă m acționează forța elastică $-kx$, forța de amortizare viscoasă $-cx$ și forța perturbatoare $F_e(t)$. Ecuația diferențială a vibrațiilor este :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_e(t) \tag{5.53}$$

unde : m - masa corpului vibrator ;
 c - coeficient de amortizare viscoasă ;
 k - constanta elastică a sistemului.

Soluția acestei ecuații este o sumă de doi termeni,

$$x = x_1 + x_f \tag{5.54}$$

x_1 fiind soluția ecuației omogene $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0$.

Pentru $c \geq c_{cr}$, rădăcinile $r_{1,2}$ sînt reale și distincte sau egale, negative în ambele cazuri. Mișcarea este aperiodică amortizată, efectuîndu-se după legea :

$$x = e^{r_1 t} (C_1 + C_2 t) \tag{5.55}$$

unde C_1 și C_2 sînt două constante de integrare, iar

$$c_{cr} = 2m\sqrt{\frac{K}{m}} = 2m\omega_n$$

ω_n fiind pulsația proprie a sistemului vibrator.

Pentru $c < c_{cr}$, integrala ecuației diferențiale a mișcării devine :

$$x = e^{-\frac{c}{2m}t} (C_1 \cos pt + C_2 \sin pt) = A e^{-\lambda t} \sin(pt + \varphi) \quad (5.56)$$

A și φ fiind constante de integrare.

Mișcarea este oscilatorie amortizată, cu factorul de amortizare $\lambda = \frac{c}{2m}$, iar pseudopulsația acestei mișcări este :

$$p = \sqrt{\frac{K}{m} - \lambda^2} = \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} = \omega_n \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_{cr}}\right)^2} \quad (5.57)$$

Valoarea lui x_1 nu se ia în considerare, deoarece se amortizează în timp, admitându-se prin urmare $x = x_f$, x_f fiind vibrația forțată dată de ecuația :

$$x_f = \frac{1}{mp} \int_0^t e^{-\frac{c}{2m}(t-\tau)} F(\tau) \sin p(t-\tau) d\tau \quad (5.58)$$

Cum $F_0(t)$ este o funcție armonică și ecuația diferențială a mișcării are expresia

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad , \quad (5.59)$$

vibrația forțată va fi :

$$x_f = x_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (5.60)$$

unde

$$x_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = \frac{\frac{F_0}{K}}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{K}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{K}\right)^2}} = \frac{x_{st}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2 \frac{c}{c_{cr}} \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

iar

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} = \frac{2 \frac{c}{c_{cr}} \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

Pentru o valoare dată a coeficientului de amortizare c , maximul amplitudinii se obține pentru

$$\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 = 1 - 2 \left(\frac{c}{c_{cr}}\right)^2$$

Amplitudinea maximă va fi deci :

$$x_{0 \text{ max}} = \frac{x_{st}}{2 \frac{c}{c_{cr}} \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_{cr}}\right)^2}} \quad (5.61)$$

5.3.4. Calculul arcurilor lamelare

Masa vibratoare este suspendată pe arcuri lamelare curbate preformate în U. Pentru determinarea caracteristicilor arcurilor se folosește schema din figura 5.14 [24].

Pentru cazul general, se consideră acțiunea forței F_e dezvoltate de electromagnetul vibratorului, sub unghiul α .

Calculul sageții arcului se face considerînd trei zone : lungimea U de variabilă x_1 , arcul de cerc de variabilă θ și lungimea V de variabilă x_2 . Exprîmînd momentele încovoietoare în cele trei zone, se deduce sageata după direcția y :

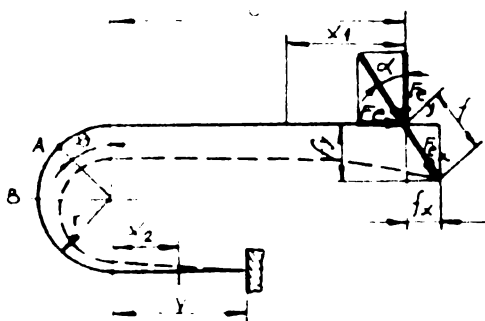


Fig. 5.14. Arcul lamelar curbat preformat în U.

$$f_y = \frac{1}{EI} \int_{(I)} \frac{M_y}{F_{ey}} ds = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^U F_{ey} x_1 dx_1 + \int_0^\pi [F_{ey} (U - r \sin \theta) + F_{ex} r(1 - \cos \theta)] (U - r \sin \theta) r d\theta + \int_0^V [F_{ey} (U - x_2) - F_{ex} 2r] (U - x_2) dx_2 \right\} \quad (5.62)$$

care poate fi scrisă sub forma

$$f_y = A_1 \frac{F_{ex} r^3}{EI} + A_2 \frac{F_{ey} r^3}{EI} \quad (5.63)$$

respectiv

$$f_x = A_3 \frac{F_{ex} r^3}{EI} + A_4 \frac{F_{ey} r^3}{EI} \quad (5.64)$$

Coeficienții A_1, A_2, A_3, A_4 se exprimă în funcție de rapoartele

$$m = \frac{U}{r} \quad \text{și} \quad n = \frac{V}{r}$$

Sageata totală a arcului va fi :

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (5.65)$$

Efortul unitar maxim în punctul B este :

$$\sigma_1 \max = \frac{6 F_{ey} (U + r)}{b h^2} = \frac{6 F_e (U + r) \cos \alpha}{b h^2} \quad (5.66)$$

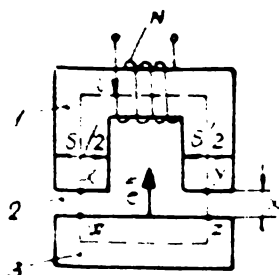
iar forța maximă admisă,

$$F_e \max = \frac{b h^2}{6(U + r)} \sigma_{ai} \quad (5.67)$$

b și h fiind dimensiunile secțiunii arcului lamelar.

5.3.5. Determinarea forței produse de electromagnet.

În figura 5.15 se prezintă schema circuitului magnetic, format din miezul de fier 1, pe care este înfășurată bobina de excitație cu N spire, între fierul 2 și masa mobilă 3. Energia câmpului magnetic este dată de expresia [13] :



$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (5.68)$$

în care i este curentul de excitație, iar inductanța L este :

Fig. 5-15. Schema circuitului magnetic al electromagnetului.

$$L = \frac{N^2}{\frac{2l_f}{\mu_s} + \frac{4x}{\mu_0 S_0}} = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{\frac{2l_f S_0}{\mu_r S} + 4x} \quad (5.69)$$

unde $l_f = MN - ZN$ este lungimea fierului, $2x = YZ + WX$ este lungimea intrefierului, iar S_0 este suprafața intrefierului.

Forța portanta a electromagnetului este :

$$F_e = \frac{dW_m}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \left(- \frac{2 L^2}{N^2 \mu_0 S_0} \right) = - \frac{B^2 S_0}{2 \mu_0} \quad (5.70)$$

unde semnul minus indică o forță de atracție, iar $B = \frac{2 Li}{N S_0}$ este inducția magnetică în intrefier.

Inducția magnetică creată de un curent de excitație de forma

$$i = I_0 + I_1 \cos \omega t$$

este

$$B = B_0 + B_1 \cos \omega t,$$

care produce o forță :

$$F_e = - \frac{(B_0 + B_1 \cos \omega t)^2 S_0}{2 \mu_0} = F_0 + F_1 \cos \omega t + F_2 \cos^2 \omega t \quad (5.71)$$

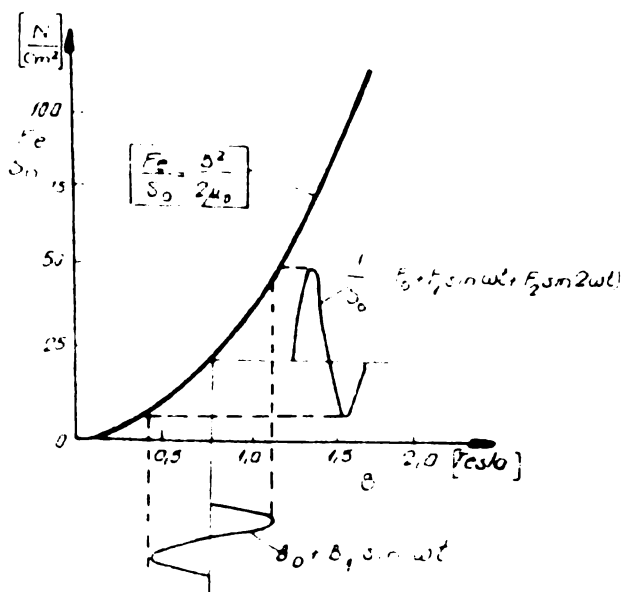


Fig. 5.16. Caracteristica electromagnetului.

Dupa cum se deduce din figura 5.16, relația (5.71) este rezultatul neliniarității caracteristicii (5.70). Considerind că masa vibratoare are o mișcare de translație sinusoidală $x_1 \cos \omega t$, înseamnă că,

$$YZ = MN = x_0 + x_1 \cos \omega t$$

Neglijind reluctanța fierului față de cea a intrefierului, se poate scrie :

$$L \approx \frac{N^2 \mu_0 S_0}{4} \frac{1}{x} = \frac{K}{x} \quad \text{și} \quad \frac{dL}{dx} = - \frac{K}{x^2}$$

iar

$$F_e = -\frac{1}{2} I^2 \frac{K}{x^2} = -\frac{K}{2} \frac{(I_0 + I_1 \cos \omega t)^2}{(x_0 + x_1 \cos \omega t)^2} =$$

$$= -\frac{K I_0^2}{2 x_0^2} \left(1 + \frac{I_1}{I_0} \cos \omega t\right)^2 \left(1 + \frac{x_1}{x_0} \cos \omega t\right)^2 \quad (5.72)$$

Dacă $I_0 \gg I_1$ și $x_0 \gg x_1$, păstrînd doar primii doi termeni din dezvoltarea în serie a puterii binomului, rezultă :

$$F_e \approx -\frac{K}{2} \frac{I_0^2}{x_0^2} \left(1 + 2 \frac{I_1}{I_0} \cos \omega t\right) \left(1 - 2 \frac{x_1}{x_0} \cos \omega t\right)$$

și neglijînd termenul în $\cos^2 \omega t$ se obține

$$F_e = -\frac{K I_0^2}{2 x_0^2} - \frac{K I_0 I_1}{x_0^2} \cos \omega t + \frac{K I_0^2}{x_0^3} x_1 \cos \omega t \quad (5.73)$$

în care primul termen reprezintă componenta statică, al doilea componenta alternativă, proporțională cu I_1 și de aceeași pulsație, iar ultimul termen, proporțional cu amplitudinea vibrației armăturii x_1 , are forma unei forțe elastice, indicînd apariția unei rigidități negative, care se adaugă la rigiditatea structurii excitate. Armonicele superioare ale forței nu mai apar în expresia (5.73), fiind eliminate prin simplificările efectuate.

5.4. Concluzii

La proiectarea utilajelor de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică, acestea prezentînd particularități constructive față de utilajele clasice de prelucrare dimensională prin eroziune electrică, este necesar a se acorda atenție următoarelor aspecte :

- alegerea unor soluții adecvate pentru elementele componente specifice ale sistemului de reglare automată a avansului electrodului scul, astfel încît să se asigure satisfacerea condițiilor privind calitatea statică și stabilitatea dinamică ;

- realizarea practică a elementelor componente ale sistemului de reglare automată a avansului folosind soluții constructive care să asigure o fiabilitate ridicată ;

- reglarea corectă a elementelor componente ale sistemului automat, astfel încât acesta să îndeplinească condițiile funcționale ;

- stabilirea parametrilor constructivi și funcționali ai vibratorului electromagnetic în concordanță cu ansamblul sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă și parametrii descărcărilor electrice.

6. CONTRIBUTII LA REALIZAREA UNOR MODELE EXPERIMENTALE DE UTILAJE PENTRU PRELUCRAREA MICROALEZAJELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA

6.1. Considerații generale.

In vederea studierii unor soluții constructive pentru elementele componente specifice ale utilajelor de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică, au fost proiectate, realizate și încercate două modele experimentale : primul, de dimensiuni reduse, în anul 1975, al doilea, constituind premisele unui viitor prototip, în anul 1978.

Demararea cercetărilor pentru construcția micromodelului s-a făcut în condițiile unei documentări relativ sumare asupra realizărilor existente pe plan mondial, având la bază în mare parte experiența colectivului și capacitatea de concepție a acestuia. Aceste considerente au avut pe de o parte un efect pozitiv, lăsând posibilitatea de materializare a unor soluții proprii, încercarea și îmbunătățirea pe parcurs a acestora. Din motive de adaptare la condițiile de realizare practică, dar totodată și de asigurare a unei fiabilități ridicate și a unui preț de cost redus, s-a avut în vedere în permanență a se folosi soluții constructive cât mai simple, în limita îndeplinirii condițiilor funcționale.

Abordarea pe parcurs a cercetărilor teoretice asupra problemelor de proiectare a condus la fundamentarea principiilor ce stau la baza construcției elementelor specifice ale utilajelor de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică. Alături de aceasta, documentarea mai amplă a permis perfecționarea continuă a soluțiilor constructive și realizarea celui de-al doilea model experimental.

În comparație cu utilajele de acest fel produse în U.A.S.S., J.A., R.F. Germania, R.D. Germană, R.S. Cehoslovacia, Olanda, modelele experimentale realizate prezintă o simplitate mai mare în ceea ce privește componentele mecanice ale sistemului de reglare automată a avansului electrodului scula, partea electronică fiind însă mai complexă, conferind în ansamblu o fiabilitate mărită.

Pentru automatizarea ciclului de prelucrare a orificiilor străpunse se folosesc în exclusivitate elemente electronice, eliminându-se în acest fel mecanismele complicate, a căror execuție și reglare ar fi necesitat o precizie ridicată.

Construcția modelelor experimentale realizate este compusă din :

- elemente mecanice modulate ce alcătuiesc mașina (batiul ; capul de prelucrare cu mecanismul de avans și dispozitivele de antrenare, ghidare și vibrare a electrodului scule; mecanismul de poziționare a capului de prelucrare; dispozitivul de instalare a obiectului prelucrării);

- componente electronice, ce au rolul de a doza temporar energia electrică în impulsuri, a asigura menținerea condițiilor inițiale de desfășurare a procesului de prelucrare, a comanda succesiunea fazelor cuprinse în ciclul de prelucrare (generatorul de impulsuri, dispozitivul de automatizare al sistemului de reglare automată a avansului, generatorul de frecvență al vibratorului electromagnetic, dispozitivul de intrerupere a procesului de prelucrare și de retragere a electrodului scule);

- o instalație de producere, circulare și filtrare a lichidului dielectric.

În figurile 6.1 și 6.2 se prezintă fotografiile celor două modele experimentale realizate.

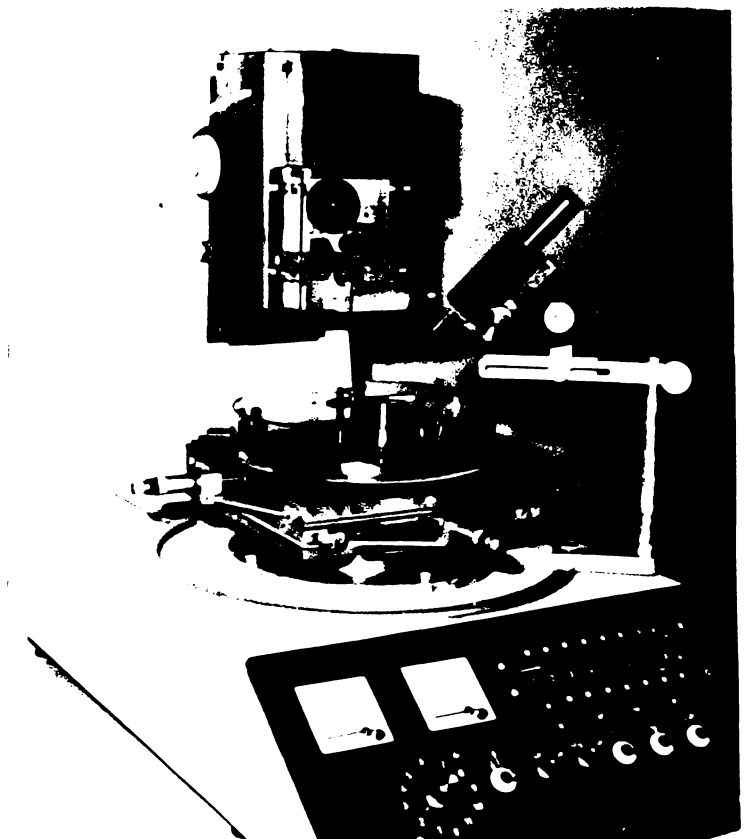
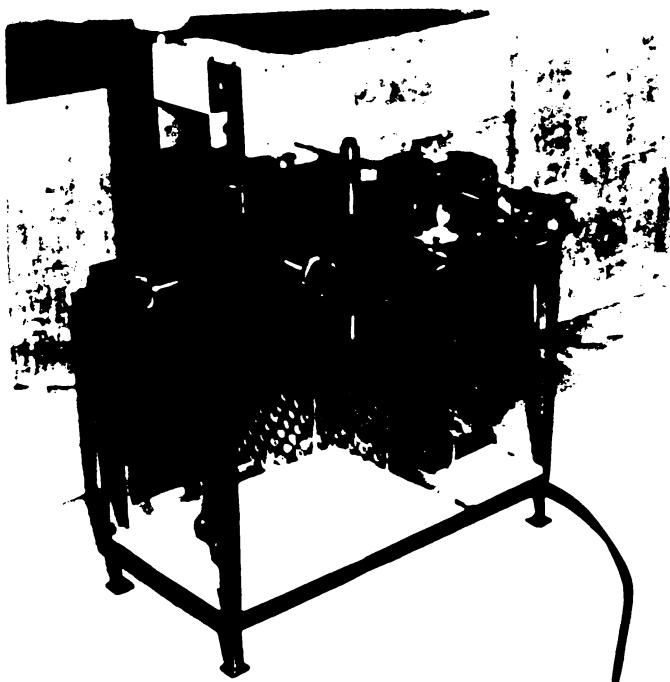


Fig. 6.1. Modelul experimental Fig. 6.2. Modelul experimental

Caracteristicile constructive ale celor două modele experimentale sînt prezentate în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1

Subansamble componente, caracteristici Micromodel exp. Model exp.

a) MASINA

gabaritul, mm	325x225x140	700x440x730
greutatea, kg	23	86
batiul	montat	sudat
masa în coordonate:		
ghidajele	bile	bile
deplasarea (x,y), mm	55	50
rotirea, grade	-	90
cuva - gabaritul, mm	140x140x80	∅250x50
capul de prelucrare:		
ghidajul de deplasare	cilindric	coadă de rîndunică
mecanismul de deplasare	şurub-piuliţa	r.d.-cremalieră
deplasarea (z), mm	100	180
rotirea, grade	90	-
motorul electric	URAN	EA-244
rap.de transm.al reductorului	324	425
diam.rolelor de antrenare,mm	4	9
ghidajul electrodului	tub capilar	tub capilar
vibratorul electromagnetic:		
frecvenţa oscilaţiilor, Hz	-	0 ... 200
amplitudinea oscilaţiilor,mm	-	0 ... 0,025

b) GENERATORUL DE IMPLUSURI

tensiunea de alimentare, V/Hz	220/50	220/50
tensiunea de amorsare, V	300	70 ... 400
energia descărcărilor, mJ	0,27...9,9	0,031...109,4
frecvenţa descărcărilor, kHz	0,6...66,6	0,33...400

c) INSTALAȚIA DE CIRCULARE A LICHIDULUI DIELECTRIC

gabaritul, mm	500x250x400
motorul electric	MG-4
pompa: presiunea, bar	0,1...0,8
debitul, l/min	0,5...1,5
rezervorul: gabaritul, mm	300x200x250
capacitatea, l	15

6.2. Construcția batiului, mecanismului de poziționare a capului de prelucrare și a dispozitivului de instalare a obiectului prelucrării.

Schema constructivă a mașinii micromodelului experimental este prezentată în figura 6.3.

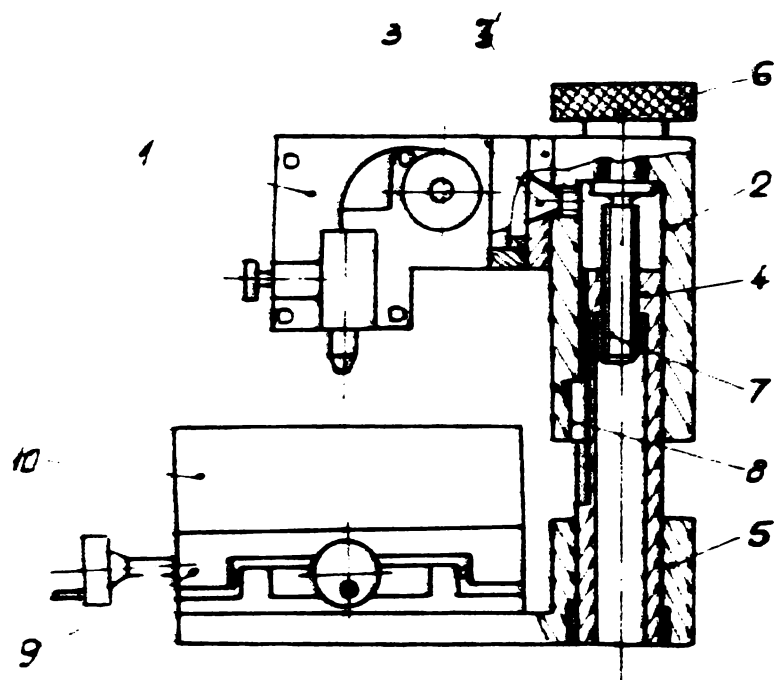


Fig. 6.3. Schema constructivă a mașinii micromodelului experimental. 1-cap de prelucrare; 2-buș; 3-șurub special cu cap conic; 3'-disc; 4-coloană; 5-placă de bază; 6-roată; 7-șurub de mișcare; 8-pană; 9-masă în coordonate; 10-cuvă.

Construcția mașinii micromodelului experimental permite realizarea orificiilor a căror axă este perpendiculară pe masa în coordonate, sau dispusă sub un unghi de $0...30^\circ$, capul de prelucrare având posibilitatea de a se roti în acest scop.

Instalarea obiectului prelucrării se poate face direct pe masă sau prin intermediul unor dispozitive ce se montează pe aceasta. Reglarea poziției electrozbului se face în raport cu obiectul prelucrării în vederea realizării orificiilor dorite se realizează prin deplasarea în direcția celor trei coordonate a capului de prelucrare, respectiv a mesei. Construcția mesei în coordonate este redată în figura 5.4, deplasarea acesteia fiind realizată pe ghidaje de rostogolire cu bile, cu ajutorul șuruburilor cu pas fin.

Al doilea model experimental realizat are compunerea mașinii reprezentată schematic în figura 6.5. În postamentul batiului se află sertarul pe care sînt montate componentele electronice și panoul de comandă. Obiectul prelucrării poate fi instalat și la acest model experimental, direct pe masă sau într-un dispozitiv special. Masa în coordonate are posibilitatea de a se roti în jurul axei

verticale, permițind realizarea unor orificii ce sînt dispuse pe diferite arce de cerc. Deplasarea în coordonate, pe ghidaje de rotogolire cu bile, cu ajutorul unor șuruburi micrometrice, precum și coborîrea capului de prelucrare pe ghidajul coadă de rîndunică fac posibilă reglarea poziției electrodului sculă în raport cu obiectul prelucrării.

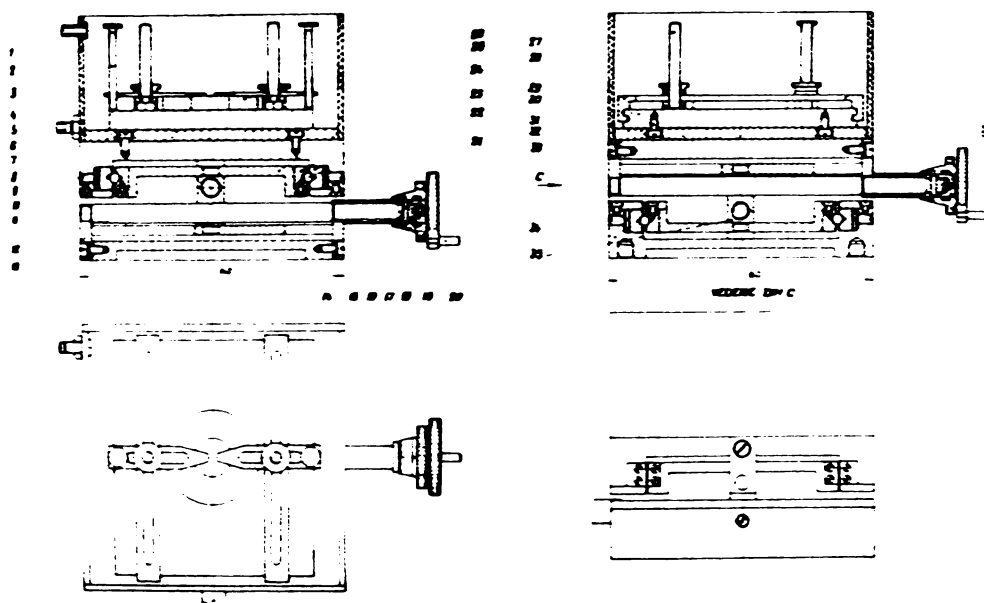


Fig. 6.4. Masa în coordonate a micromodelului experimental.

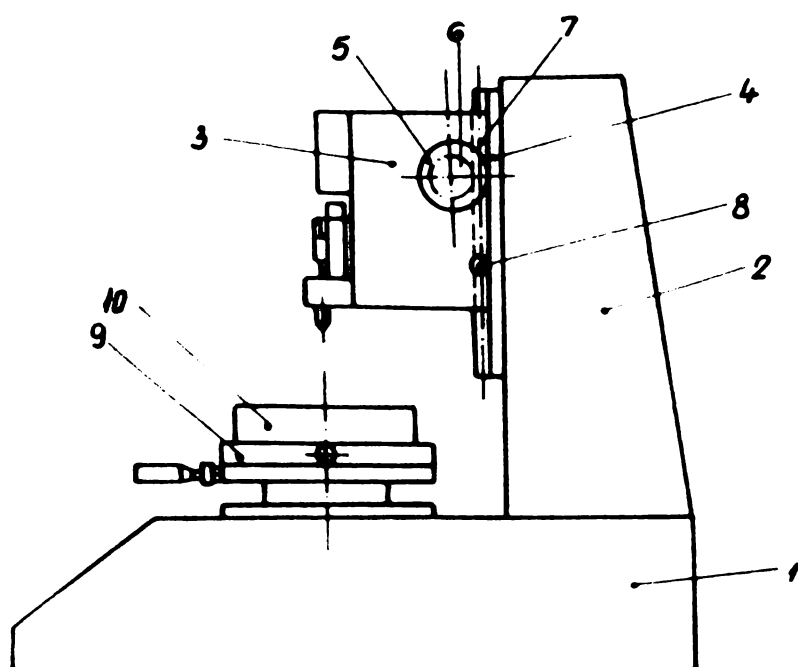


Fig. 6.5. Schema constructivă a mașinii modelului experimental.

1-postament; 2-montant; 3-cap de prelucrare; 4-ghidaj; 5-roată; 6-roată dințată; 7-cremalieră; 8-șurub de blocare; 9-masa în coordonate; 10-ouă.

Construcția mecanismului de deplasare a capului de prelucrare, precum și a mesei în coordonate este redată în figurile 6.6,

respectiv 6.7.

Fig. 6.6. Mecanismul de deplasare a capului de prelucrare

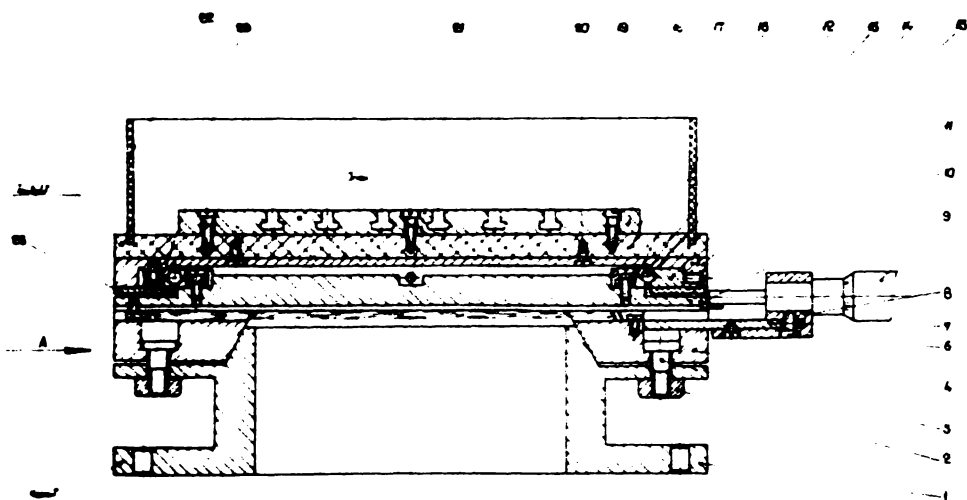
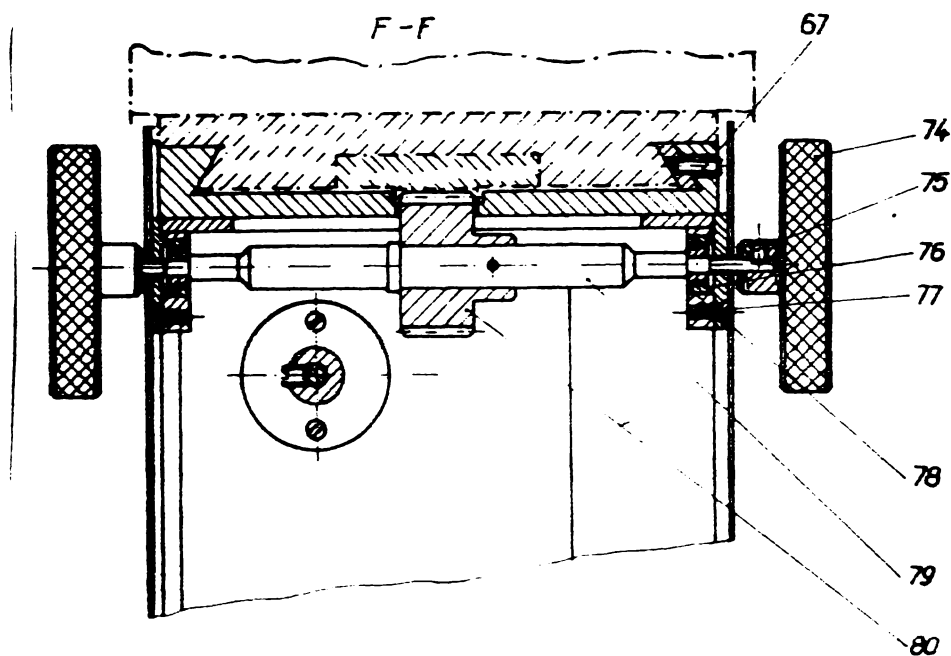


FIG.6.7. Masa în coordonate a modelului experimental.

6.3. Construcția și încercarea sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă.

Dintre tipurile de sisteme de reglare automată a avansului electrodului sculă, existente la mașinile de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică (electromecanic, electrohidraulic, electrotermic), aria cea mai largă o au variantele electromecanice.

Datorită simplității constructive, a posibilității de reali-

zare tehnologică în condiții economice, s-a considerat că un sistem automat electromecanic poate satisface și celelalte cerințe, cu condiția adoptării unor soluții corespunzătoare pentru elementele sale componente. Prin cele două modele experimentale realizate s-a căutat a se testa unele soluții constructive, pentru a se desprinde concluzii primare care să folosească în continuare la perfecționarea acestor mașini, în vederea introducerii lor în fabricație.

6.3.1. Compunerea sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă.

Structura și elementele componente ale sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă corespund schemei bloc prezentate în figura 5.2 din cap.5.

Schema de principiu a sistemului de reglare a avansului realizată la micromodelul experimental este redată în figura 6.8. Aceasta folosește un dispozitiv de automatizare electronic simplu, compus dintr-un etaj comparator, prevăzut cu potențiometre de reglare a tensiunii medii pe interstițiul dintre electrozi și a sensibilității, precum și un amplificator diferențial de curent continuu, care asigură tensiunea de comandă a motorului electric de curent continuu. În lanțul cinematic de realizare a mișcării de avans se folosește o transmisie mecanică formată dintr-un angrenaj melcat și unul cilindric.

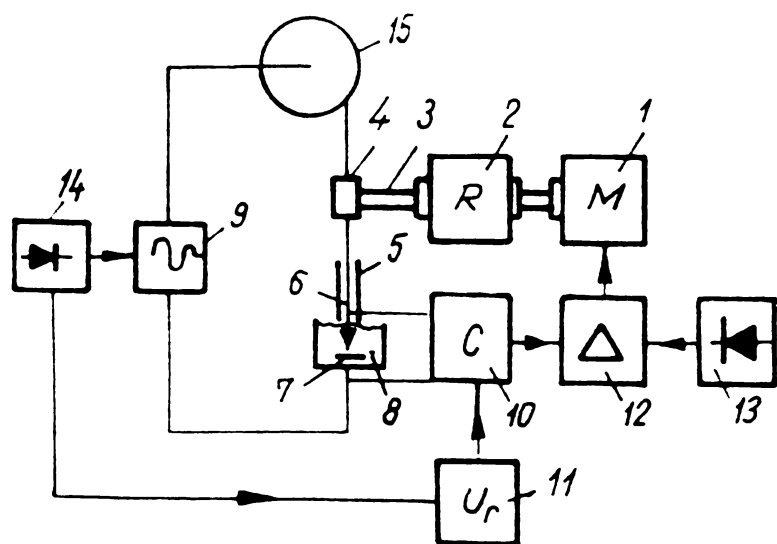


Fig. 6.8. Schema de principiu a sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă de la micromodelul experimental.

1-motor electric de curent continuu; 2-reductor de turație; 3-arbore de ieșire; 4-rol de antrenare; 5-ghidaj tubular; 6-electrod sculă; 7-obiectul

prelucrării; 8-cuva; 9-generator de impulsuri; 10-comparator; 11-sursă de tensiune; 12-amplificator; 13,14-redresoare.

Schema de principiu a construcției sistemului de reglare automată a avansului de la cel de-al doilea model experimental este prezentată în figura 6.9.

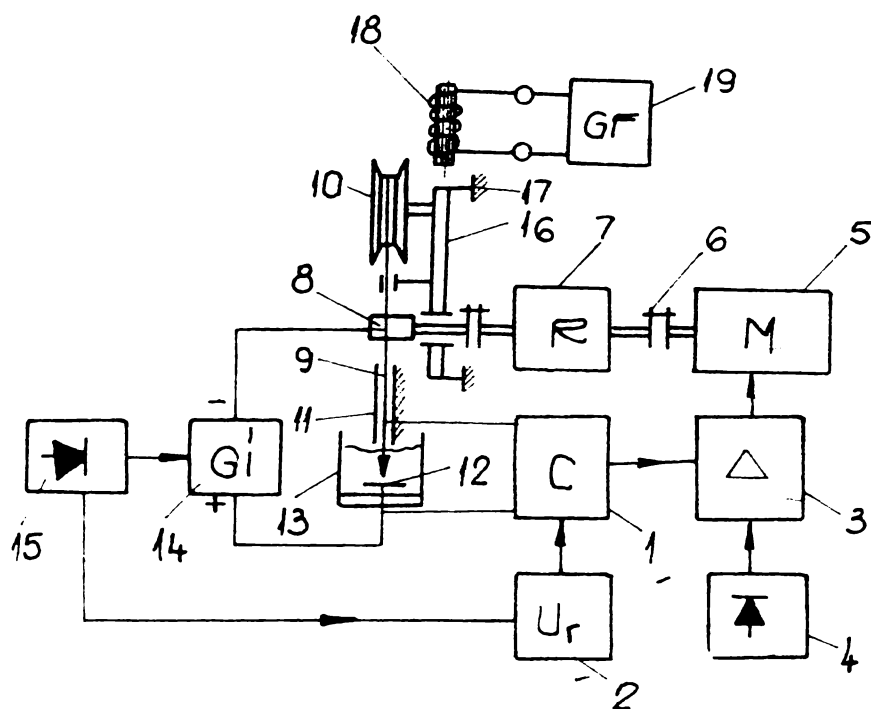


Fig. 6.9. Schema de principiu a construcției sistemului de reglare automată a avansului electrosculă de la modelul experimental.

1-comparator; 2-sursa de tensiune de referință; 3-amplificator diferențial de curent continuu; 4-redresor; 5-motor e-

lectric de curent continuu; 6-cuplaj; 7-reductor de turație; 8-rola de antrenare; 9-electrod sculă; 10-bobină; 11-ghidaj; 12-obiectul prelucrării; 13-cuvă; 14-generator de impulsuri; 15-redresor; 16-masă vibratoare; 17-arcuri lamelare; 18-bobină; 19-generator de frecvență.

Față de primul model experimental, la cel de-al doilea s-au adus îmbunătățiri la soluția de principiu, prin introducerea vibratorului electromagnetic. Oscilațiile forțate sînt transmise electrodului sculă prin intermediul rolei de antrenare montate rigid de masă vibratoare, sus ținute de arcuri lamelare, care constituie armatura electromagnetului.

6.3.2. Dispozitivul de automatizare.

Dispozitivul de automatizare din cadrul sistemului de reglare automată a avansului are în componența sa elementul de măsură, comparatorul, potenționetrul de reglare a tensiunii de referință, amplificatorul și elementul de execuție, constituit din motorul electric de curent continuu cu excitație separată.

Elementele componente ale dispozitivului de automatizare au fost adoptate în așa fel încît caracteristicile acestora să asi-

gure funcționarea în condițiile stabilite. În ceea ce privește alegerea motorului electric, au fost încercate două tipuri, la primul model fiind folosit un motor electric de curent continuu URAN, din import, având o putere de 1 W, o turație maximă de 3200 rot/min la o tensiune de alimentare de 9 V. La cel de-al doilea model experimental s-a utilizat un motor electric de curent continuu cu magnet permanent LA-244, fabricat de I.E.E. Pitești, având o putere de 27 W și o turație maximă de 3000 rot/min la tensiunea de 12 v. Schema electronică de comandă a motorului electric de curent continuu a fost concepută, realizată, încercată și îmbunătățită ulterior, ținându-se seama de caracteristicile diferite ale celor două motoare folosite. Este de menționat faptul că nici unul dintre cele două motoare electrice nu sînt construite pentru a fi incluse în componența sistemelor de reglare automată. Cu toate acestea, se poate aprecia faptul că s-au obținut rezultate satisfăcătoare, datorate adoptării unor soluții corespunzătoare pentru elementele electronice de comandă. Schemele constructive ale dispozitivului electronic de automatizare a celor două modele experimentale sînt prezentate în figurile 6.10 și 6.11.

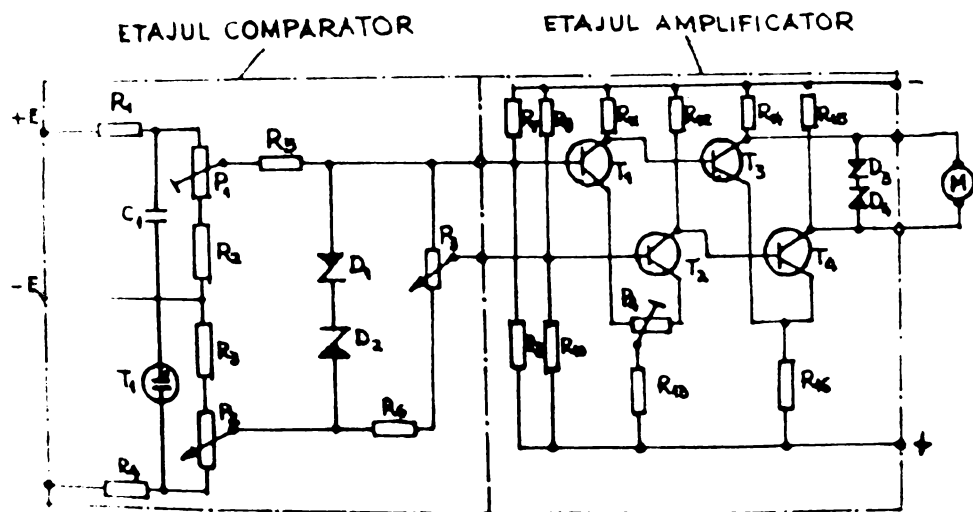


Fig.6.10.Sche-
ma dispozitivului de
automatizare al sis-
temului de reglare
automată a avansului
de la micromodelul
experimental.

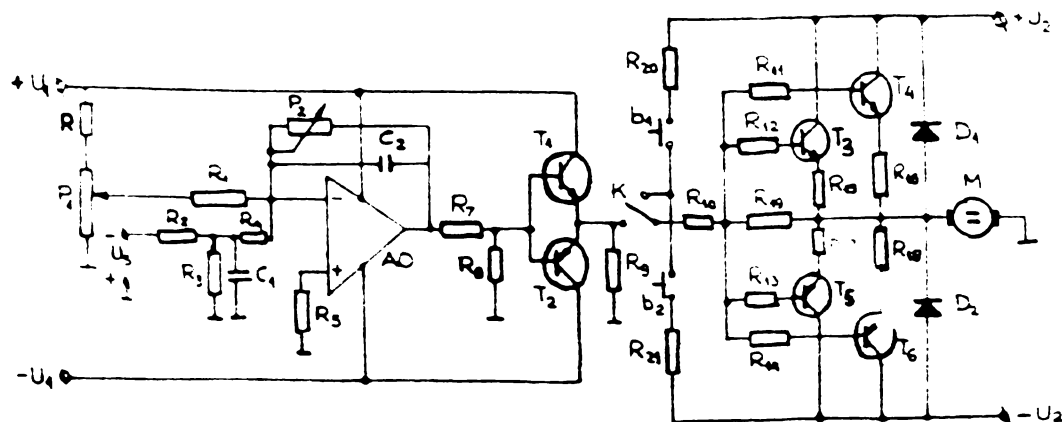


Fig.6.11.Sche-
ma dispozitivu-
lui de automati-
zare al sistemu-
lui de avans al
modelului expe-
rimental.

6.3.3. Reductorul de turație.

Mișcarea de rotație a motorului electric de curent continuu este demultiplicată printr-un reductor de turație.

Calitatea statică a sistemului de reglare automată este condiționată, în regim staționar de funcționare, din punct de vedere a construcției lanțului cinematic, de existența unor frecări cât mai reduse și de eliminarea jocurilor la reversarea sensului de mișcare, astfel încât zona de insensibilitate să fie minimă.

Pentru asigurarea stabilității dinamice a sistemului automat, ținând seama de condițiile impuse, trebuie adoptat un raport mare de transmitere, iar elementele componente ale reductorului să fie caracterizate prin momente de inerție mici.

În vederea reducerii frecărilor în lanțul cinematic s-a prevăzut lăgărirea pe rulmenți a arborilor și ungerea angrenajelor reductorului de turație. Eliminarea jocului la reversarea sensului de rotație s-a realizat prin asigurarea contactului permanent între flancurile danturii, roțile conduse fiind secționare transversal și decalate cu ajutorul unor arcuri. Pentru ca arborii și roțile dințate să aibă momente de inerție reduse s-au adoptat diametre cât mai mici, iar pentru a se obține un raport mare de transmitere s-au folosit angrenaje melcate cu modul mic și număr mare de dinți. La micromodelul experimental, reductorul de turație este realizat în două trepte, prima formată dintr-un angrenaj melcat, iar cea de-a doua dintr-un angrenaj cilindric cu dinți dreți (fig.6.12)

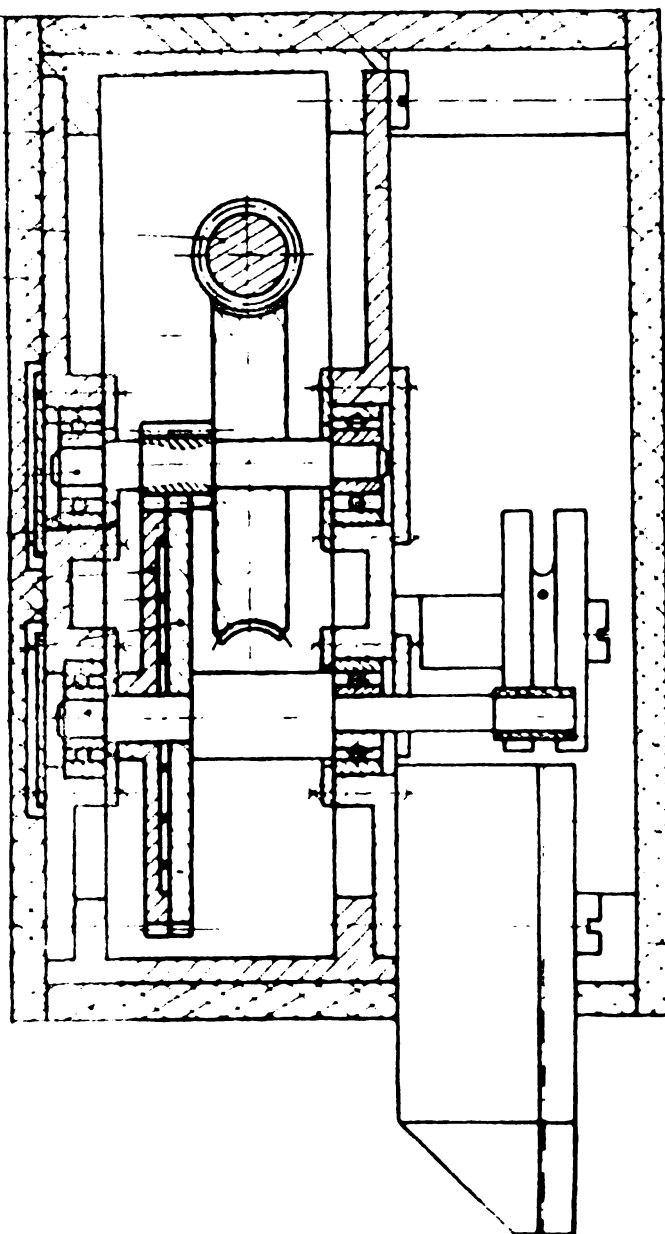


Fig.6-12. Reductorul de turație al micromodelului.

Reductorul de turație al modelului experimental este compus din două trepte melcate (figura 6.13).

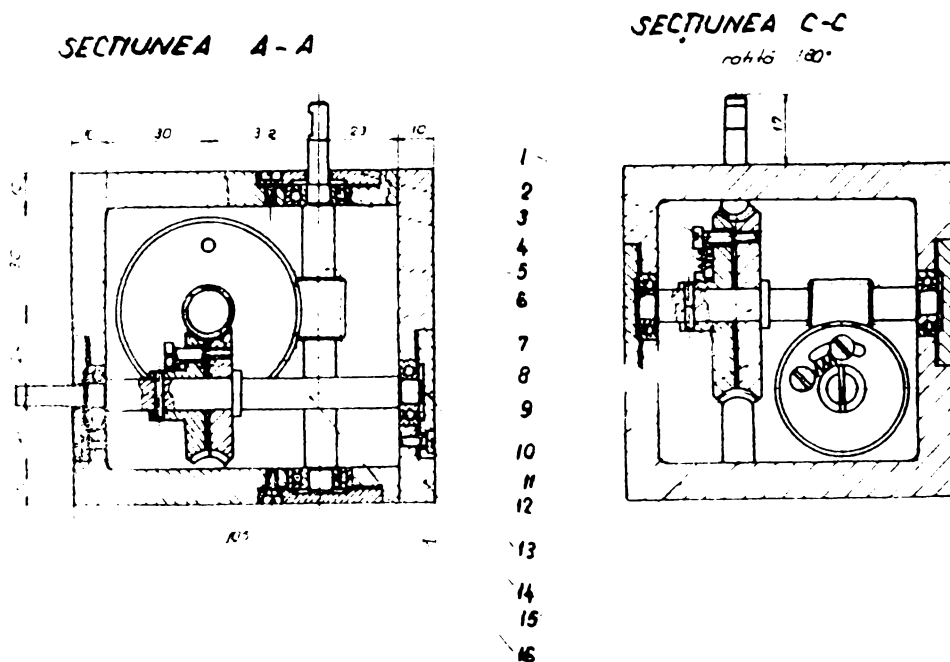


Fig. 6.13. Reductorul de turație al modelului experimental.

Reductorul de turație este montat în capul de prelucrare, fiind cuplat cu arborele motorului electric, după cum se observă în figurile 6.14.

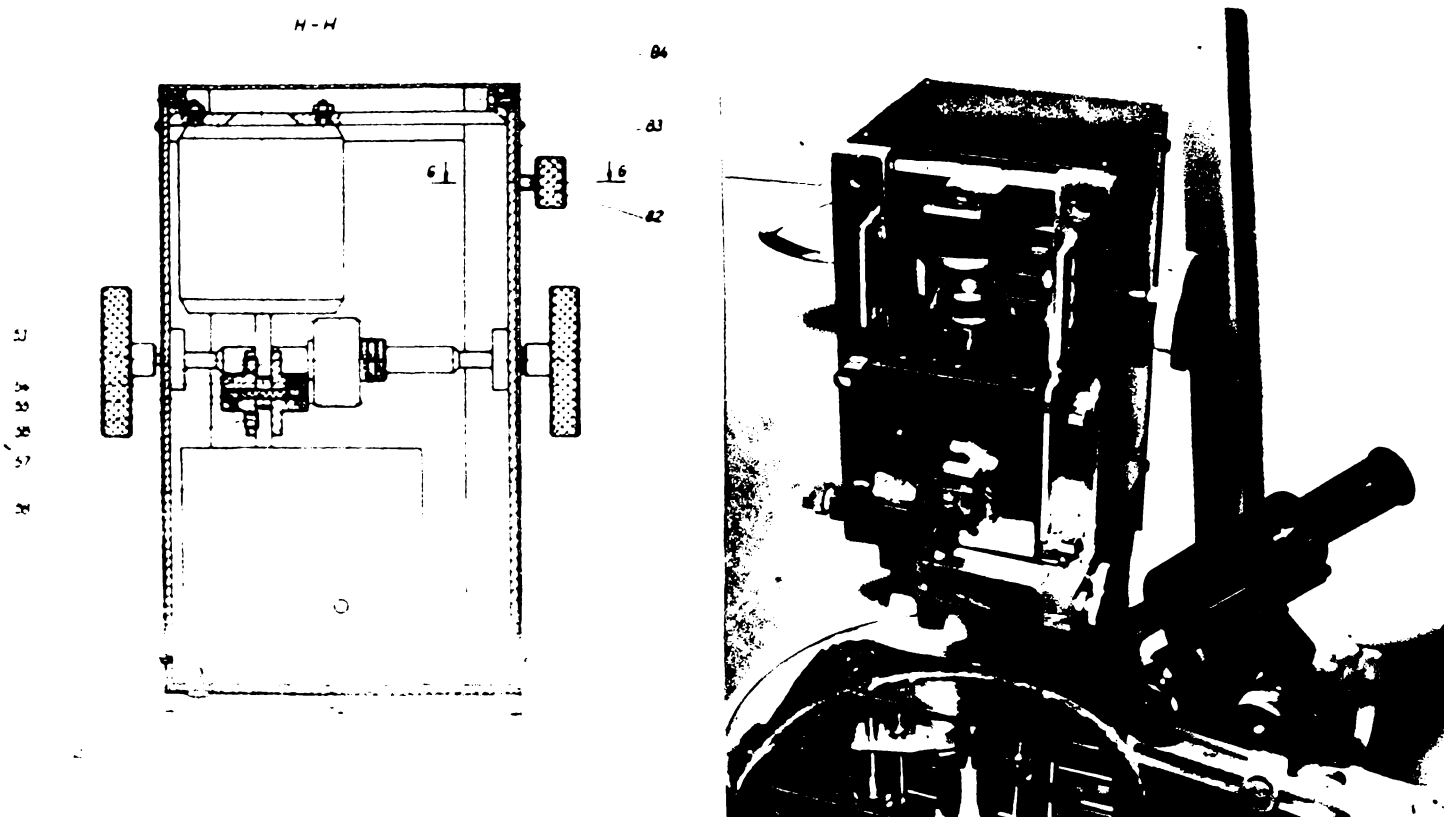


Fig. 6.14. Cuplarea reductorului de turație cu motorul electric, în carcasa capului de prelucrare a modelului experimental.

6.3.4. Dispozitivul de antrenare și ghidare a electrodului sculă.

La mașinile de prelucrat microalezaje prin eroziune electrică, diametrul mic al electrodului sculă și necesitatea de compensare continuă a uzurii sale impun folosirea unui dispozitiv de antrenare cu role, schema de principiu a acestuia fiind redată în figura 5.10. Firul electrod având rigiditate redusă, trebuie ghidat pînă la suprafața obiectului prelucrării, pentru a se asigura menținerea direcției de avans. Precizia de prelucrare a orificiilor depinzînd în mare măsură de acest lucru, jocul în ghidaj al electrodului trebuie să fie minim. Deoarece antrenarea electrodului este realizată prin fricțiune, este necesar ca valoarea coeficientului de frecare rezultat între fir și rolă să fie mare. În ceea ce privește dispozitivul ce acționează rola de contact, forța elastică dezvoltată de arc se reglează astfel încît electrodul să nu aibă tendința de patinare la reversarea bruscă a sensului de rotație a rolei de antrenare. Se impune de asemenea ca frecările între elementele dispozitivului să fie reduse. În mișcarea de avans, electrodul nu trebuie să se flambeze pe distanța dintre role și tubul de ghidare, condiție satisfăcută prin reducerea frecărilor dintre cele două elemente.

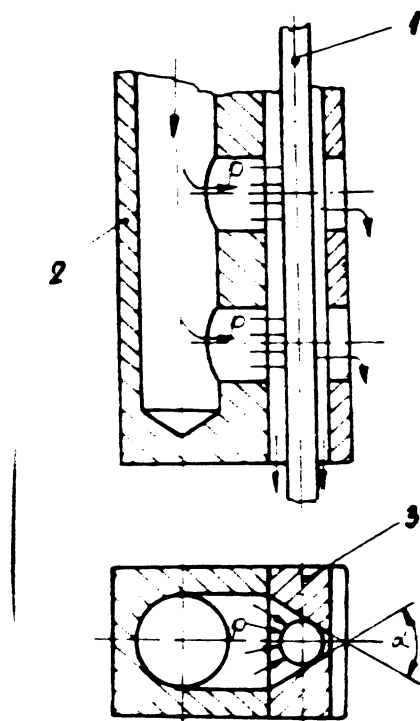
Din punct de vedere a funcționării sistemului de reglare automată a avansului, sensibilitatea acestuia este asigurată în cazul în care frecarea firului în ghidaj este redusă, iar reversarea sensului de rotație a rolei de antrenare nu provoacă alunecarea electrodului.

Condiția de stabilitate dinamică a sistemului automat este satisfăcută prin adoptarea unui diametru mai mare al rotelor, limitat însă de valoarea admisă a momentului de inerție.

Pentru realizarea antrenării și ghidării electrodului sculă au fost încercate diferite soluții, ajungîndu-se la concluzia că firul trebuie să fie condus atît de la role la suprafața obiectului prelucrării, cît și în partea anterioară rotelor. Folosirea acelor de seringă în acest scop nu s-a dovedit a fi eficientă, suprafața alezajului acestora fiind rugoasă și prin urmare, coeficientul de frecare ridicat.

Pentru electrozi de diametru mai mare de 0,3 mm a fost conceput, realizat și încercat un dispozitiv de ghidare hidrostatică

a cărui soluție constructivă este prezentată în figura 6.15.



Asupra electrodului sculă 1 se exercită presiunea lichidului dielectric refulat prin corpul dispozitivului 2, prevăzut cu un orificiu longitudinal și un număr corespunzător de orificii transversale, determinând ghidarea pe suprafața prismatică 3. Pentru ca diametral opus acțiunii jetului să nu se formeze o pernă de lichid care să îndepărteze electrodul de suprafața prismatică, trebuie realizată o depresiune. În acest scop, în ghidajul prismatic au fost prevăzute fante pentru scurgerea lichidului. O altă soluție posibilă de realizare a ghidării electrodului sculă, cu același dispozitiv, constă în absorbția lichidu-

Fig. 6.15. Dispozitivului prin fantele ghidajului prismatic.

de ghidare hidrostatică

In cazul producției de serie, efec-

a electrodului sculă.

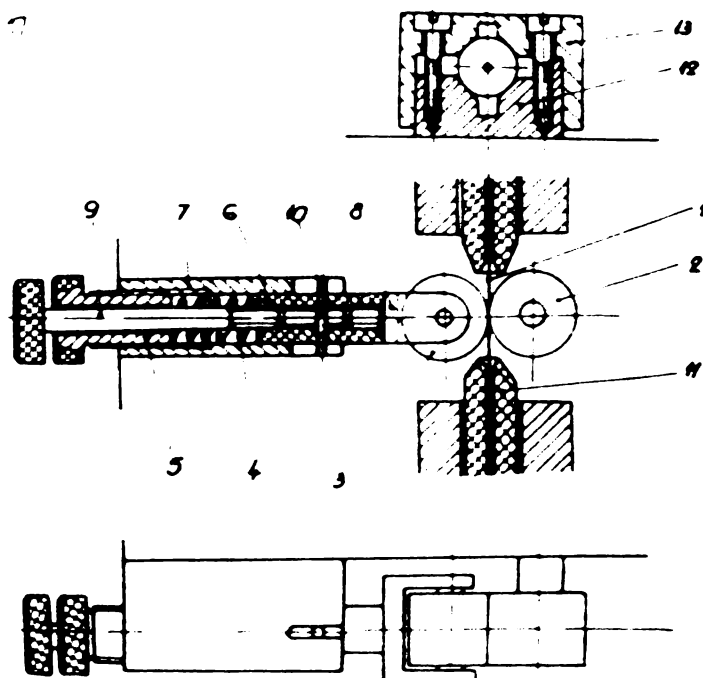
tuindu-se prelucrarea cu electrozi de

același diametru, se pot folosi seturi

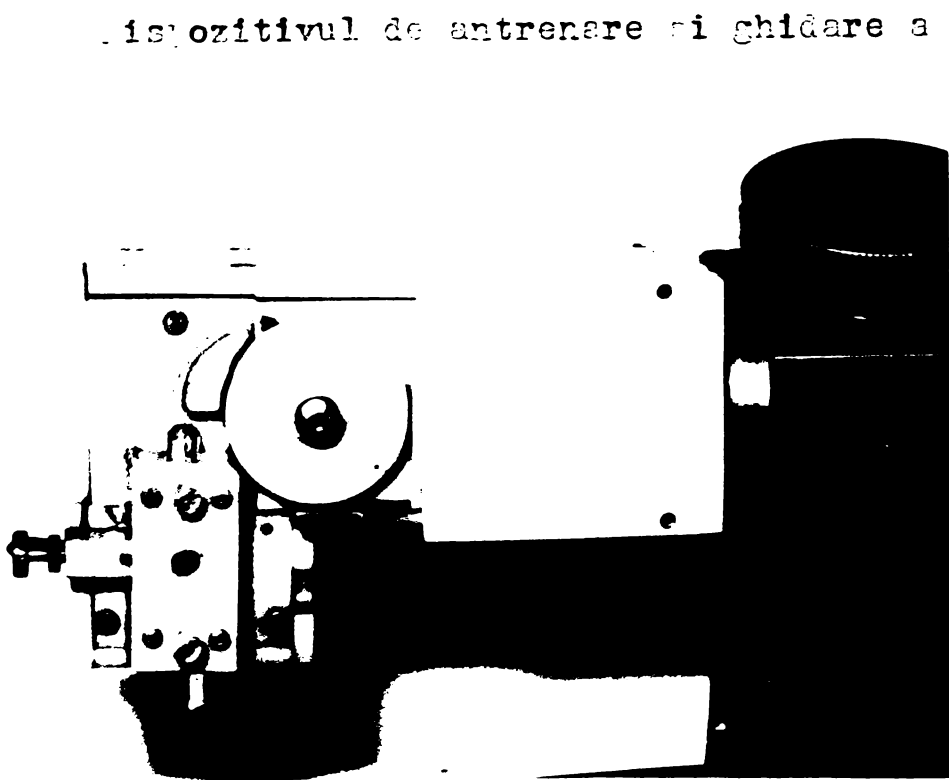
de tuburi capilare din sticla, avind jocul dintre alezaj și fir la limita permisă din punct de vedere a valorii admisibile a forței de frecare ce rezulta. În perspectiva aplicării industriale a fost adoptată această soluție pentru ghidarea electrodului sculă. În figura 6.16 se prezintă construcția dispozitivului de antrenare și ghidare a electrodului

Fig. 6.16. Construcția dispozitivului de antrenare și ghidare a electrodului sculă.

1-electrod sculă; 2-rolă motoare; 3-rolă contact; 4-arc elicoidal; 5-bucșă de reglare; 6-bucșă de ghidare; 7-corp; 8-furcă; 9-tijă; 10-tift; 11-tub capilar; 12-13-prisme.



In fotografia din figura 6.17 se observa construcția dispozitivului realizat la micromodelul experimental.



Dispozitivul de antrenare și ghidare a electrodului al celui de-al doilea model experimental prezintă unele deosebiri, determinate în primul rând de existența vibratorului electromagnetic. Deoarece oscilațiile forțate transmise electrodului scula prin intermediul roletelor de antrenare au și o componentă transversală, care

trebuie anulată, pentru a nu influența precizia de prelucrare a orificiilor, ghidajul electrodului este fix în raport cu masa vibratoare. Schema constructivă este redată în figura 6.18, iar în fotografia din figura 6.19 se observă realizarea practică.

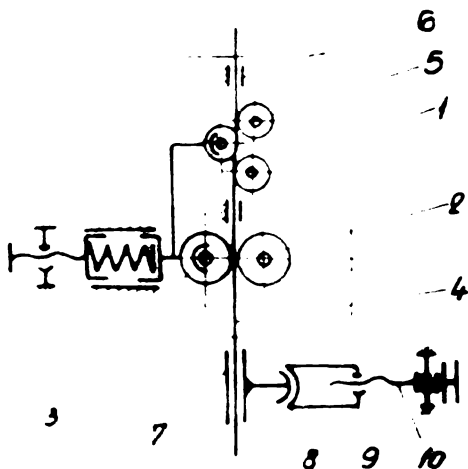


Fig. 6.18. Schema constructivă a dispozitivului de antrenare și ghidare a electrodului, al modelului experimental.

1-masa vibratoare; 2-rola de antrenare; 3-rola de contact; 4-

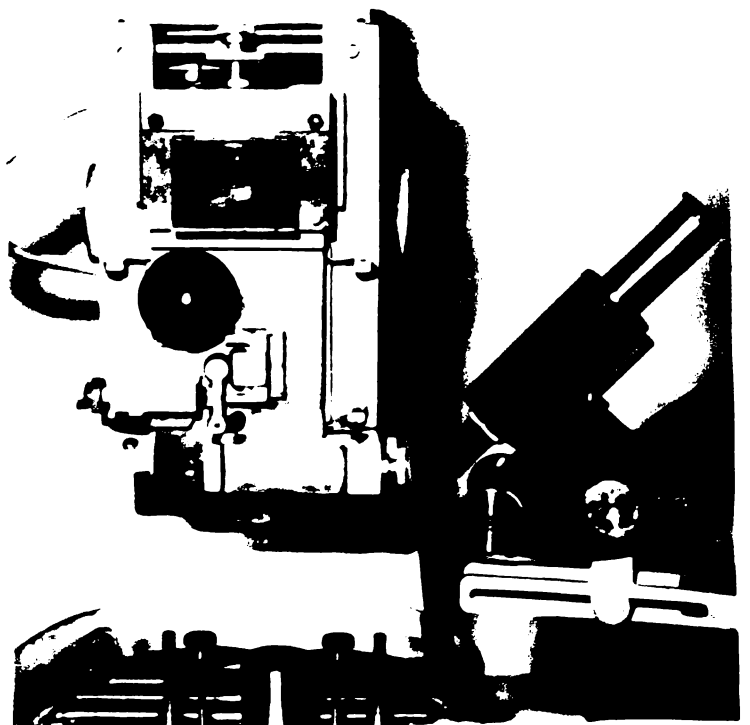


Fig. 6.19. Capul de prelucrare

electrodul scula; 5-role de îndreptare; 6-orificii de conducere; 7-tub capilar; 8-articulație sferică; 9-sanie longitudinală; loșurub de reglare.

Articulația sferică și sania longitudinală permit reglarea perpendicularității axei electrodului pe suprafața mesei, respectiv a rectilinității deplasării acestuia în mișcarea de avans.

6.3.5. Verificarea stabilității dinamice a sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă.

Pentru a se verifica stabilitatea dinamică a sistemului de reglare automată a avansului, au fost determinate analitic sau experimental mărimile ce intervin în ecuație (5.30). Pentru cel de-al doilea model experimental, acestea sînt:

- raportul de transmitere al reductorului $i = 425$;
- constanta motorului electric $C\phi = 0,6$ s/rot ;
- rezistența circuitului rotoric al motorului electric $R_r = 2,8\Omega$
- momentul de inerție $J = 0,674 \cdot 10^{-3}$ Js²;
- raza rolei de antrenare $R = 9 \cdot 10^{-3}$ m ;
- factorul de proporționalitate al elementului de măsură
 $K_{EM} = 4 \cdot 10^5$;
- factorul de amplificare $K_A = 5 \cdot 10^4$;

Radăcinile ecuației sînt complex conjugate, cu partea reală negativă:

$$s_{1,2} = a \pm bj = -7070 \pm 15100 j$$

îndeplinindu-se deci condiția de stabilitate. Termenul $a = -7070$ definește limita de stabilitate absolută . Limita de stabilitate relativă este dată prin unghiul $\alpha = 64,8^\circ$. Se poate aprecia însă, ca datorită acțiunii vibratorului electromagnetic, indicii de stabilitate dinamică se îmbunătățesc, regimul tranzitoriu fiind amortizat în timp scurt.

6.4. Construcția și încercarea vibratorului electromagnetic.

Vibratorul electromagnetic transmite oscilațiile forțate electrodului sculă prin intermediul rozelor de antrenare. Ca părți distincte, acesta cuprinde masa vibratoare, care constituie armă-

tura electromagnetului și a cărei bobină este alimentată de la un generator de frecvență. Elementele vibratorului electromagnetic se disting în fotografia din figura 6.19. Generatorul de frecvență este compus dintr-un oscilator de frecvență variabilă, un divizor de frecvență formator și un amplificator, avînd schema redată în figura 6.20.

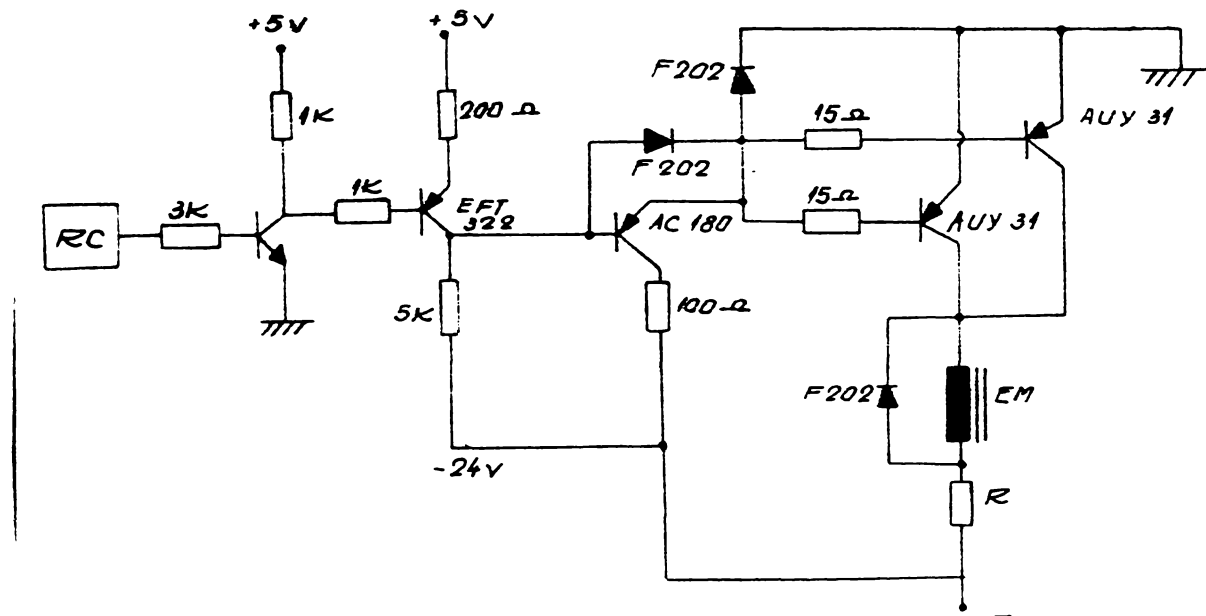


Fig. 6.20. Schema generatorului de frecvență.

Oscilatorul de frecvență este de tip RC, realizînd o gamă de la 0 la 400 Hz. Divizorul de frecvență formator este realizat cu un circuit basculant bistabil și funcționează în regim de divizare, cu scopul de a se obține impulsuri dreptunghiulare cu factorul de umplere 1:2. Amplificatorul este construit cu tranzistoare de putere și funcționează în regim de comutație.

Forța portantă dezvoltată de electromagnet este $F_e = 8,7 \text{ N}$, determinînd o amplitudine maximă $x_{\text{omax}} = 0,186 \text{ mm}$ a masei vibratoare, montată pe două perechi de arcuri lamelare curbate preformate în U. Frecvența de rezonanță și armonicele acesteia corespund la 40 Hz, 80 Hz și 160 Hz.

În vederea trasării caracteristicii vibratorului electromagnetic s-a utilizat montajul redat schematic în figura 6.21 și în fotografia din figura 6.22.

Traductorul folosit, de tip electrodinamic cu magnet permanent fix și bobină mobilă, face parte din trusa vibrometrului portabil V1-3. Traductorul acestuia este în contact cu masa vibratoare.

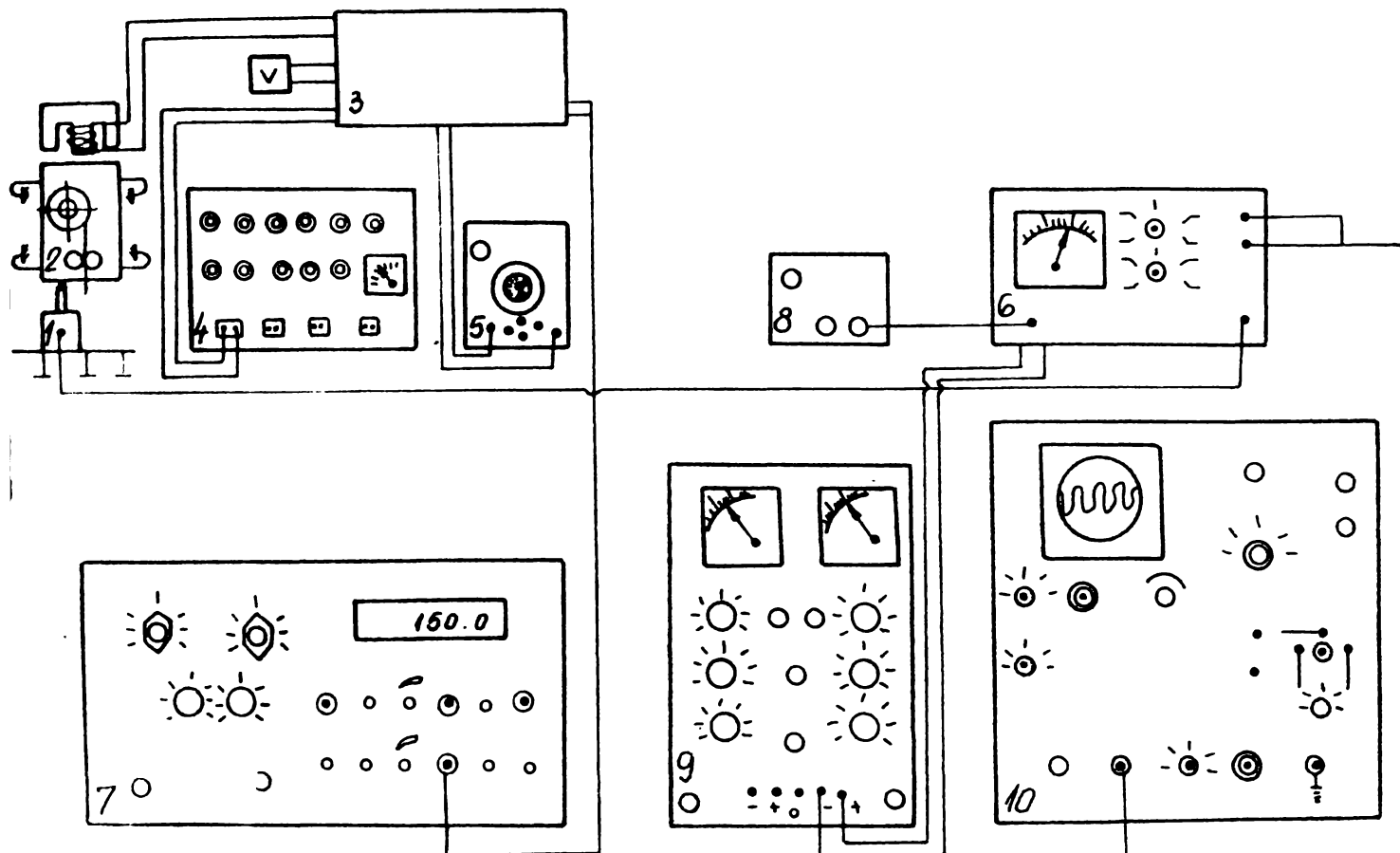


Fig. 6.21. Schema montajului pentru trasarea caracteristicii vibratorului electromagnetic.

1-traductor; 2-masa vibratoare; 3-generator de frecvență; 4-sursă de tensiune stabilizată cu autoprotejare; 5-redresor; 6-vibrometru portabil V.-3; 7-numărător universal BM 445 E; alimentator N 21o2; 9-sursă dublă de tensiune stabilizată; 10-osciloscop.

Semnalul dat de traductor, proporțional cu viteza de vibrație, este transformat în semnal amplitudine de vibrație, de către un amplificator integrator, care primește semnalul prin intermediul unui atenuator, care îi reduce nivelul. Alimentatorul N 21o2 este folosit în timpul operațiilor de calibrare a scării aparatului de măsură al vibrometrului. Pentru efectuarea măsurărilor, acesta este alimentat de la sursa dublă de tensiune stabilizată. La vibrometru este legat un osciloscop, pe ecranul căruia se urmărește forma oscilațiilor. Amplificatorul de putere al generatorului de frecvență este alimentat de la redresor, iar cu ajutorul sursei de tensiune stabilizată cu autoprotejare se reglează amplitudinea oscilațiilor forțate. Frecvența acestora este urmărită la

numărătorul universal.

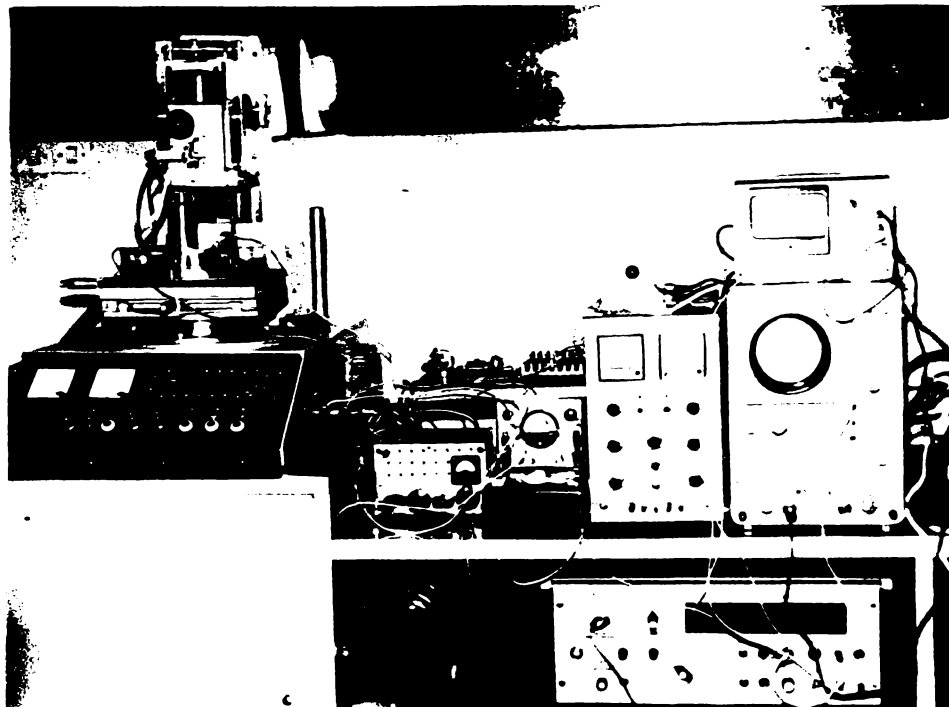


Fig. 6.22. Aparatura folosită pentru trăsarea caracteristicii vibratorului electromagnetic.

Diagramele caracteristicii vibratorului electromagnetic sînt prezentate în figurile 6.23 și 6.24.

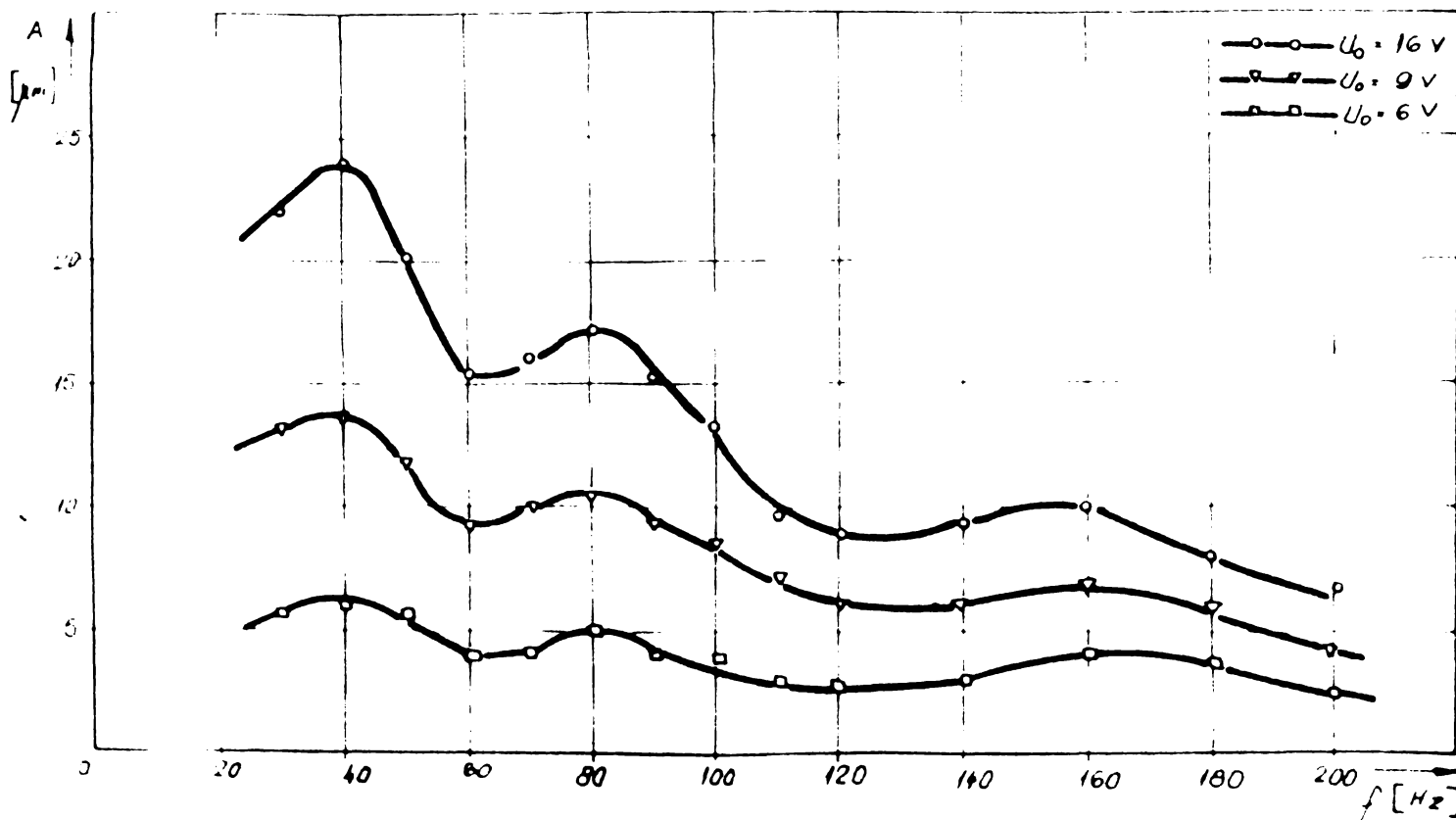


Fig. 6.23. Amplitudinea vibrațiilor în funcție de frecvență.

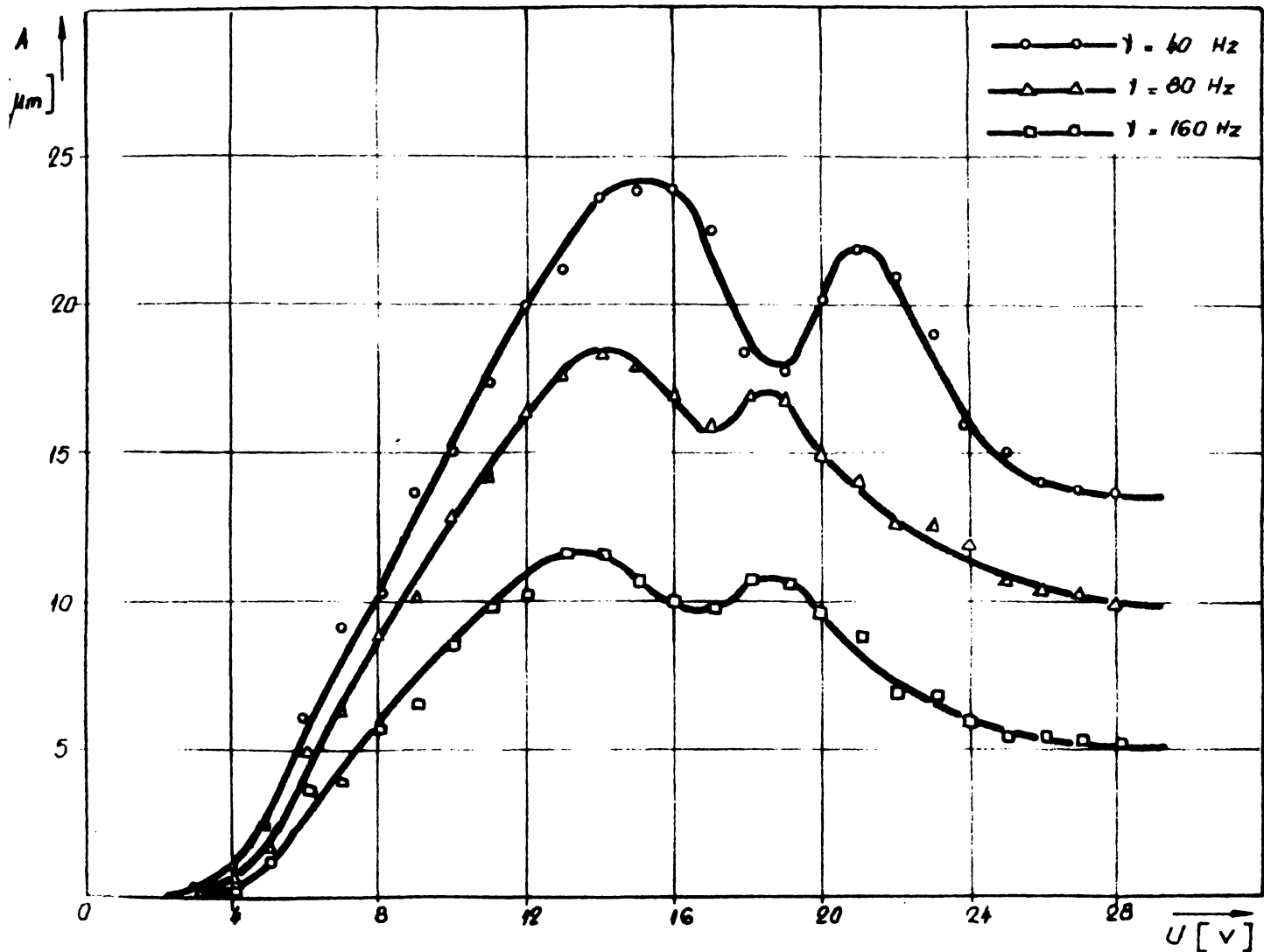


Fig. 6.24. Amplitudinea vibrațiilor în funcție de tensiunea de alimentare a bobinei electromagnetului.

În diagrame de variație a amplitudinii vibrațiilor în funcție de frecvența acestora se observă că valorile maxime se obțin la frecvența de rezonanță și la armonicile ei. Curbele de variație a amplitudinii vibrațiilor în funcție de tensiunea de alimentare a bobinei electromagnetului au fost trasate pentru frecvența de rezonanță și armonicile sale. Cele două puncte de maxim se datorează pe de o parte rezonanței masei vibratoare pe cele două arcuri lamelare și pe de altă parte, rezonanței suportului de fixare a bobinei.

6.5. Construcția generatorului de impulsuri.

Generatorul de impulsuri folosit la prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică trebuie să asigure o capacitate productivă suficient de ridicată, în condițiile unei calități bune a suprafeței. Aceste cerințe pot fi satisfăcute utilizând impulsuri de energie redusă și frecvență mare. Din acest motiv,

cit și datorită simplității constructive și prețului de cost scăzut, s-a considerat a fi mai avantajos un generator de relaxare.

Pentru a avea posibilitatea de variație a parametrilor electrici ai regimului de prelucrare într-o gamă largă, în vederea studierii influenței acestora asupra indicilor tehnologici urmăriți, au fost prevăzute mai multe trepte de reglare a tensiunii de amorsare, capacității și rezistenței, care pot fi cuplate independent. În figura 6.25 este prezentată schema transformatorului și redresorului, iar în figura 6.26, treptele RC ale generatorului.

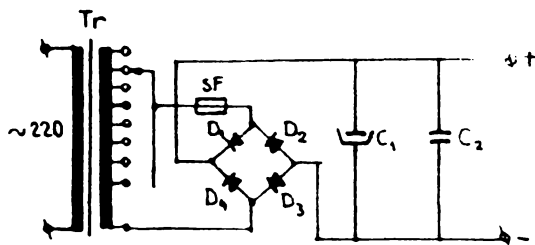


Fig.6.25. Schema electrică a transformatorului și redresorului.

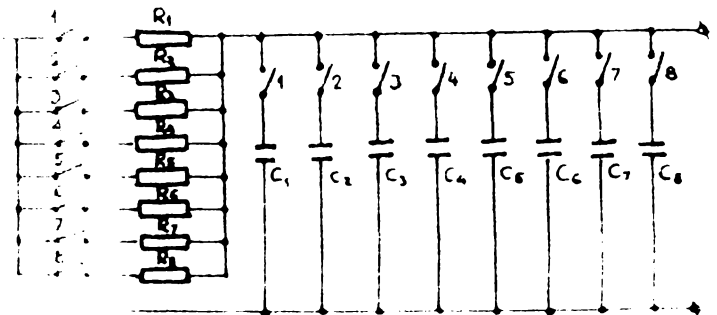


Fig.6.26. Schema treptelor RC ale generatorului de impulsuri.

Generatorul de impulsuri al micromodelului experimental are tensiunea de amorsare $U_0 = 300$ V, iar valoarea capacităților și rezistențelor corespunzătoare treptelor este dată în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2

Treapta	1	2	3	4	5	6
R [kΩ]	15	25	33	47	100	330
C [nF]	1,5	1	0,5	-	-	-

Fig. 6.27. Generatorul de impulsuri al micromodelului experimental.



INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

În tabelul 6.3 se dau valorile tensiunii de amorsare, rezistenței și capacității corespunzătoare treptelor existente la generatorul de impulsuri al modelului experimental, ale cărui elemente se observă în fotografia prezentată în figura 6.28.

Tabelul 6.3

Trapta	1	2	3	4	5	6	7	8
U_0 [V]	70	115	140	170	210	280	350	400
R [k Ω]	0,1	0,2	0,47	0,74	0,62	0,7	0,75	1,08
C [nF]	750	330	100	68	50	33	25	12,5

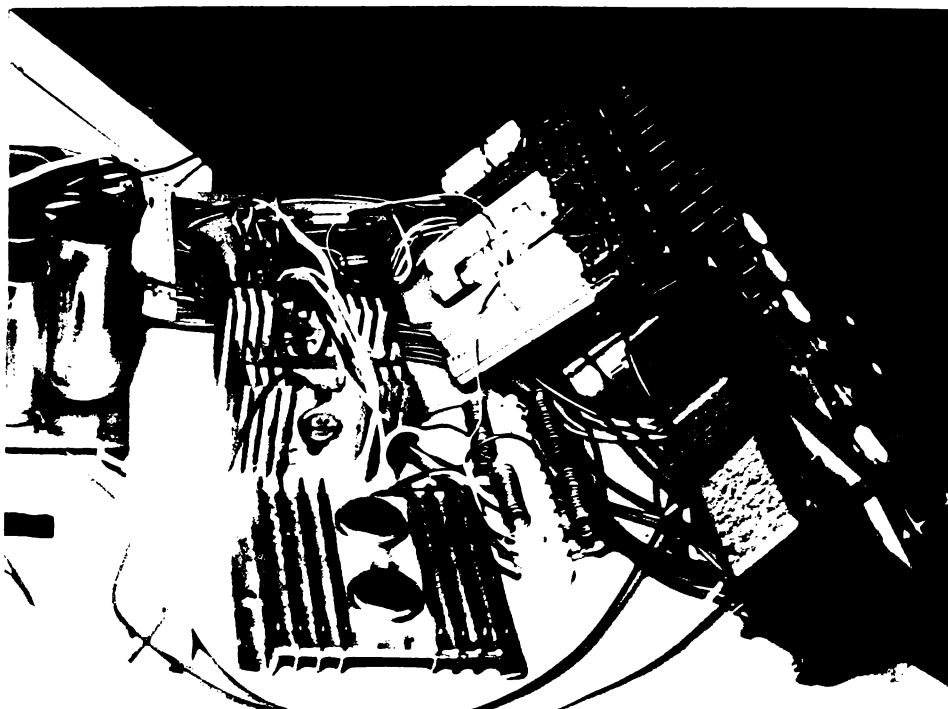


Fig. 6.28. Generatorul de impulsuri al modelului experimental.

6.6. Construcția dispozitivului de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrodului scula.

Ciclul de prelucrare a orificiilor se desfășoară într-o succesiune de etape:

- instalarea obiectului prelucrării;
- pornirea instalației de circulare a lichidului dielectric;
- reglarea parametrilor regimului de prelucrare;
- pornirea mașinii;

- prelucrarea orificiului;
- întreruperea procesului de prelucrare;
- retragerea electrodului sculă;
- oprirea mașinii;
- oprirea instalației de circulare a lichidului dielectric.

La pornirea mașinii se cuplează generatorul de impulsuri și sistemul de reglare automată a avansului electrodului sculă, care se deplasează spre obiectul prelucrării, pînă la distanța corespunzătoare amorțirii descărcărilor electrice. Începe procesul de prelucrare, cu avans automat al electrodului. După străpungerea orificiului, electrodul trebuie să-și continue înaintarea, pe o distanță determinată de lungimea pe care electrodul prezintă uzură, după care să se retragă din orificiu. Sfîrșitul procesului de prelucrare este dificil de apreciat, iar continuarea avansului electrodului pe o distanță mai mare decît cea necesară calibrării poate determina abateri de la precizia de prelucrare, întrucît electrodul tinde să se curbeze, erodînd din suprafața alezajului. De aceea este necesar ca distanța de înaintare pentru calibrare să fie delimitată.

În figura 6.29 se prezintă diferite situații de prelucrare a orificiilor străpunse. În fig. 6.29 a se observă mărimea corectă a distanței de calibrare. În fig. 6.29 b și c se prezintă abaterile rezultate ca urmare a reglării unei distanțe de calibrare prea mici respectiv prea mari. Fig. 6.29 d redă soluția de limitare a distanței de calibrare prin folosirea unui electrod auxiliar.

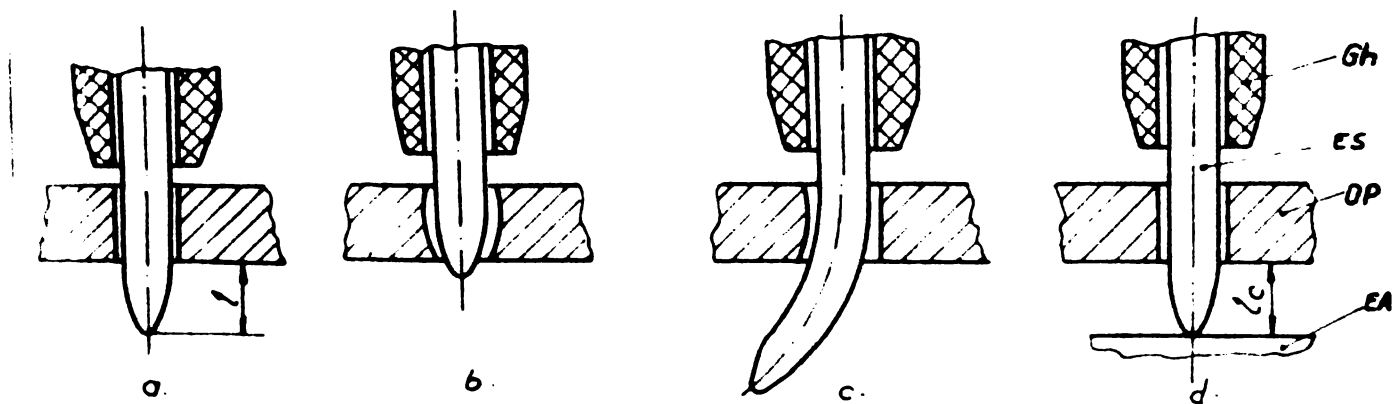


Fig. 6.29. Prelucrarea orificiilor străpunse.

Gh-ghidaj tubular; ES-electrod sculă; OP-obiectul prelucrării; EA-electrod auxiliar.

Pentru a se crea posibilitatea de automatizare a ciclului de

prelucrare, au fost realizate și încercate două soluții de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrodului sculă, delimitându-se distanța de calibrare.

Schema primului dispozitiv de întrerupere a procesului și retragere a electrodului este redată în figura 6.30 și se bazează pe folosirea unui electrod auxiliar. Întrerupătorul a_1 pune sub

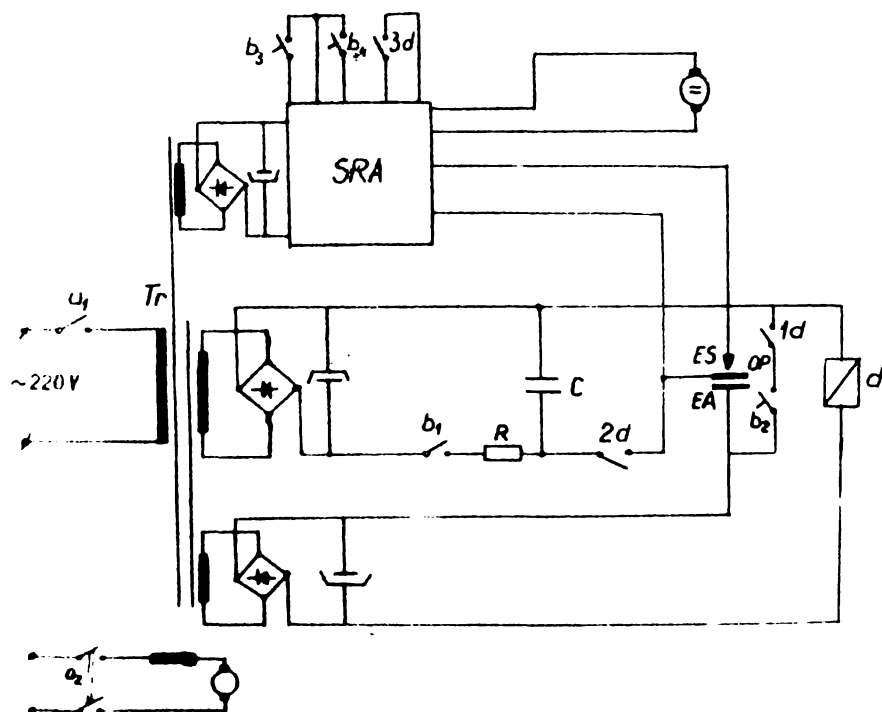


Fig. 6.30. Schema dispozitivului de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrodului sculă, cu electrod auxiliar.

întrerupe tensiunea de pe spațiul de lucru, prin deschiderea contactului normal închis $2d$ și oprește avansul electrodului sculă, scurtcircuitându-se intrarea în amplificatorul diferențial de curent continuu, cu contactul normal deschis $3d$. Totodată, releul d se menține anclanșat prin contactul normal deschis $1d$ și butonul normal închis b_2 . Electrocul este retras din orificiu prin acționarea butonului b_4 . Reluarea ciclului de prelucrare se face prin declanșarea releului d , apăsând butonul b_2 .

Cel de-al doilea dispozitiv se bazează pe sesizarea variației de tensiune ce apare între faza de prelucrare și cea de calibrare a orificiului. În timpul apropierii rapide a electrodului sculă de obiectul prelucrării, pînă la amorsarea descărcărilor electrice, diferența de potențial din spațiul de lucru corespunde valorii

tensiune întreaga mașină. Comanda manuală de apropiere și retragere a electrodului sculă se realizează prin acționarea butoanelor b_3 și b_4 . Procesul de prelucrare se pornește prin butonul b_1 . După ce orificiul a fost străpuns și calibrat, prin contactul stabilit între electrodul sculă ES și electrodul auxiliar EA , se anclanșează releul d , care în-

in gol dată de generatorul de impulsuri. Pe parcursul procesului de prelucrare, valoarea medie a tensiunii scade la 30...35 % din valoarea tensiunii de amorsare, iar in faza de calibrare crește la 50...60 %. Dacă la distanța de calibrare se află un contact legat la același pol cu obiectul prelucrării, în momentul amorsării descărcărilor electrice, tensiunea medie de pe spațiul de lucru va înregistra o nouă scădere la 30...35 % din valoarea tensiunii de amorsare, scădere care comandă întreruperea procesului de prelucrare și retragerea electrodului sculă. Schema de realizare a acestui dispozitiv este prezentată în figura 6.31. Întrerupătorul a_1 pune sub tensiune mașina. Contactul ld_1 al dispozitivului de decuplare DD este deschis, iar

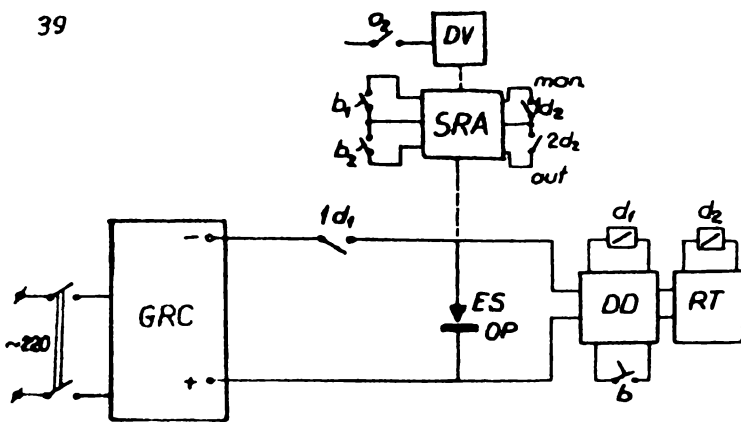


Fig. 6.31. Schema dispozitivului de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrodului sculă, prin variația tensiunii.

releul de timp RT este anclanșat. Spațiul de lucru nu este alimentat, iar sistemul de avans permite efectuarea comenzilor manuale de deplasare a electrodului, prin acționarea butoanelor b_1 și b_2 . Ciclul automat de prelucrare se pornește prin butonul b, care aduce dispozitivul de decuplare și releul de timp în starea inițială, iar spațiul de lucru este pus sub tensiune. Dispozitivul de decuplare sesizează fazele în care se desfășoară procesul de prelucrare și la sfârșitul acestuia, prin anclanșarea releului d_1 întrerupe alimentarea de la generatorul de impulsuri, care determină retragerea temporizată a electrodului sculă, comandată de releul d_2 . Ciclul se reia prin apăsarea butonului b. Schema electrică a dispozitivului de decuplare și fazele de funcționare ale acestuia sînt prezentate în figurile 6.32 și 6.33.

zează fazele în care se desfășoară procesul de prelucrare și la sfârșitul acestuia, prin anclanșarea releului d_1 întrerupe alimentarea de la generatorul de impulsuri, care determină retragerea temporizată a electrodului sculă, comandată de releul d_2 . Ciclul se reia prin apăsarea butonului b. Schema electrică a dispozitivului de decuplare și fazele de funcționare ale acestuia sînt prezentate în figurile 6.32 și 6.33.

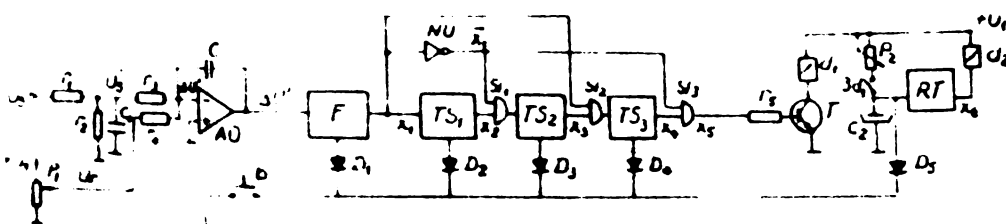


Fig. 6.32. Schema electrică a dispozitivului de decuplare.

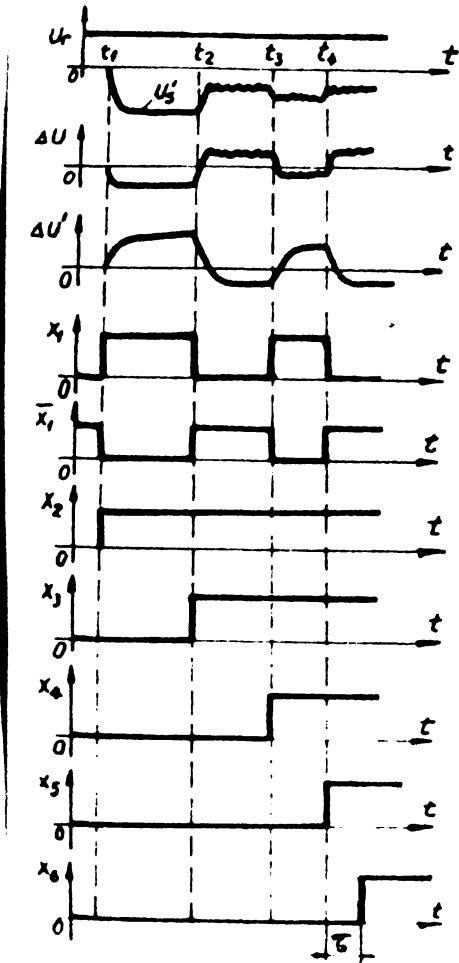


Fig. 6.33. Fazele de funcționare ale dispozitivului de decuplare.

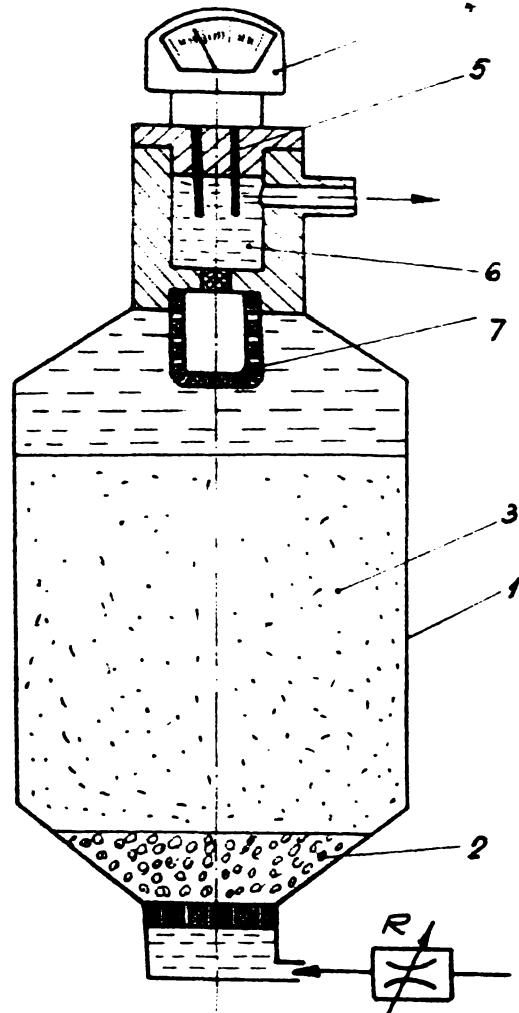


Fig. 6.34. Construcția schimbătorului de ioni.

6.7. Construcția instalației de circulare a lichidului dielectric.

Lichidul dielectric cel mai adecvat pentru prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică este apa deionizată. Aceasta se obține prin trecerea apei printr-un schimbător de ioni, a cărui construcție este alestatuita din (figura 6.34): robinetul R, vasul 1, stratul de cuarț 2, rășina cationică 3, aparatul de măsură a conductibilității electrice 4, avind electrozii 5, spațiul de evacuare 6 și sita 7. Apa deionizată este refulată în spațiul de lucru cu ajutorul unei instalații compuse dintr-un rezervor cu compartimente pentru sedimentarea produselor eroziunii, o pompă acționată prin intermediul unui angrenaj melcat de un motor electric cu turație

variabila și un drosel de reglare a debitului. Realizarea instalației se observă în figura 6.35. Debitul necesar fiind mic, iar presiunea scăzută, s-a folosit o pompă cu tub elastic din cauciuc siliconic. Prin deformarea acestuia de către rolele (rulmenți) montate în rotorul pompei, se realizează absorbția lichidului dielectric din rezervor și refularea pulsatorie a sa în spațiul de lucru. Desenul pompei este redat în figura 6.36.

Fig. 6.35. Instalația de circulare a lichidului dielectric.

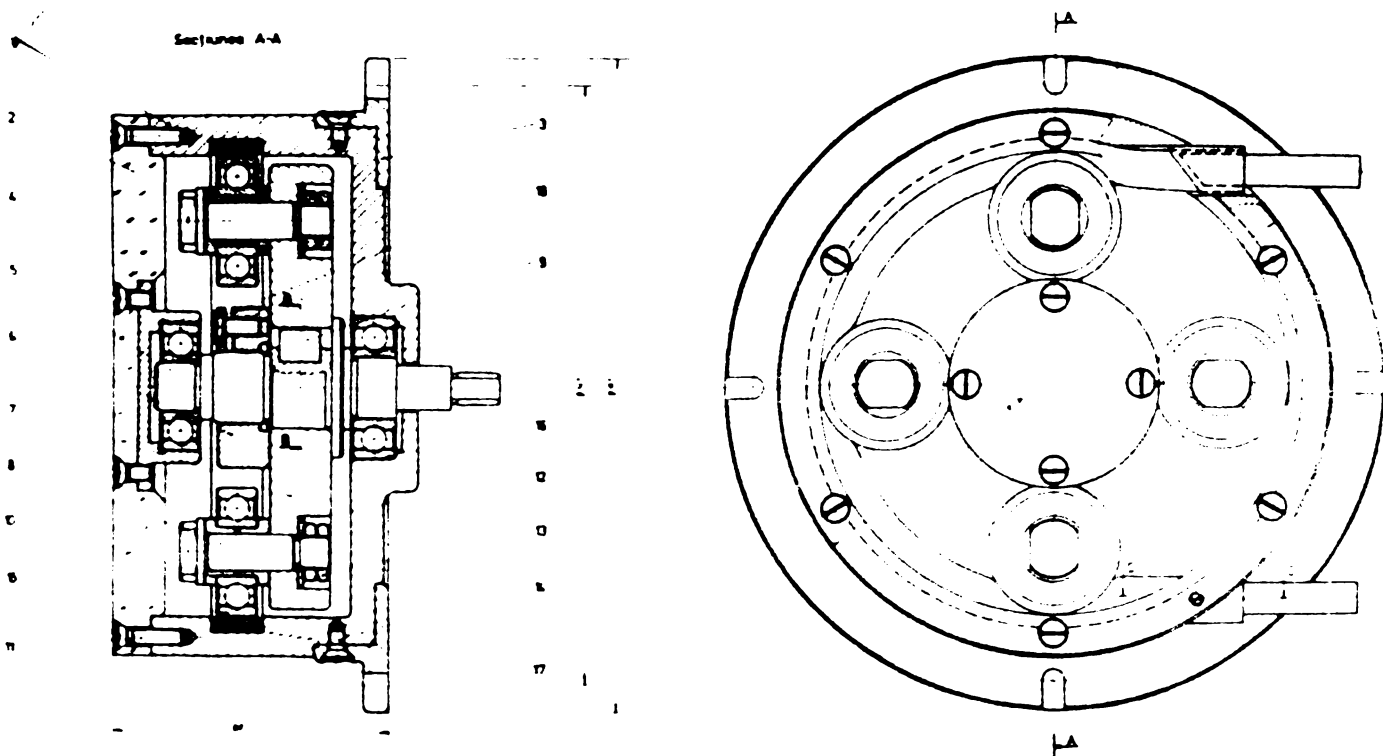
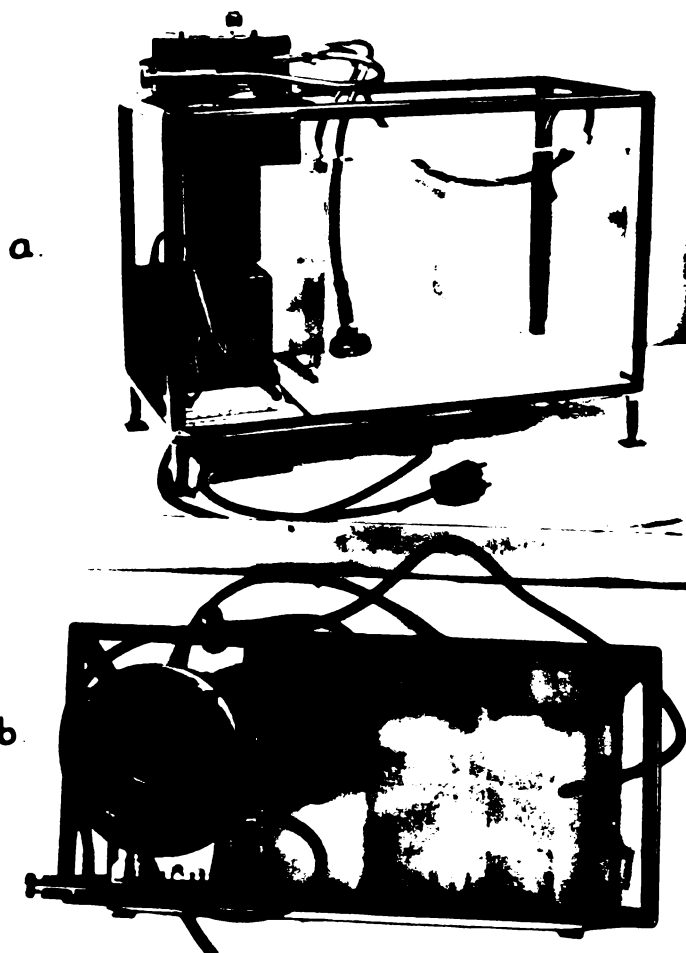


Fig. 6.36. Pompa cu tub elastic.

7. CERCETARI EXPERIMENTALE IN VEDEREA STABILIRII PARAMETRILOR TEHNOLOGICI OPTIMI DE PRELUCRARE A MICROALEZAJELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA

7.1. Condiții inițiale.

Eroziunea electrică este unul din procedeele tehnologice de prelucrare dimensională cu cei mai mulți parametri. Aceștia se referă la:

- materialul obiectului prelucrării, caracterizat prin constantele sale fizico-mecanice;
- materialul electrodului sculă, definit de asemenea prin proprietățile fizico-mecanice, care trebuie să satisfacă ansamblul de condiții impuse de procesul de prelucrare;
- natura lichidului dielectric, a cărui proprietăți trebuie să asigure desfășurarea optimă a procesului de prelucrare;
- regimul electric, exprimat prin energia și frecvența descărcărilor;
- oscilațiile forțate ale electrodului sculă, caracterizate prin frecvența și amplitudinea mișcării;
- forma și dimensiunile suprafeței de prelucrat.

Acești parametri constituind variabile independente ale procesului, ce pot admite o gamă largă de nivele, stabilirea condițiilor optime de prelucrare trebuie făcută pornind de la situația concretă și analizând ansamblul de factori care intervin.

Modelele matematice utilizate până în prezent pentru optimizarea parametrilor tehnologici de prelucrare sînt deduse prin admiterea anumitor criterii și condiții particulare, avînd deci aplicabilitate limitată. De aceea trebuie recurs în mare măsură la efectuarea de încercări experimentale.

Cercetările întreprinse în vederea stabilirii parametrilor tehnologici optimi de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică au fost abordate prin prisma obiectivului principal urmărit în cadrul tezei de doctorat, acela de introducere a tehnologiei de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor duzelor de injecție de la motoarele Diesel. Ca urmare a acestui fapt a fost posibilă delimitarea unor condiții inițiale:

- materialul obiectului prelucrării, oțel 18 Cr Ni 20 carbonitrat;

- diametrul orificiilor 0,2...0,3 mm, adâncimea 1,1 mm;

- lungimea de ieșire a electrodului din orificiu pentru calibrare, 1 mm ;

O serie de încercări experimentale și studii preliminare [119], [120] au condus la definitivarea unor parametri :

- materialul electrodului sculă, alama, iar diametrul 0,19 mm;

- Lichidul dielectric, apă deionizată.

Variabilele independente rămase au fost studiate în două etape, urmărindu-se ordonarea influenței acestora și apoi selectarea lor. Indicii tehnologici analizați au fost viteza de erodare a materialului obiectului prelucrării, mărimea interstițiului lateral dintre electrodul sculă și obiectul prelucrării și conicitatea orificiilor. Cunoașterea acestor indici tehnologici este utilă pentru proiectarea tehnologiei de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor, viteza de erodare permițând calcularea timpului de bază, interstițiul lateral permițând stabilirea diametrului electrodului sculă, iar conicitatea indicând abaterea de la forma cilindrică. Valorile indicilor tehnologici au fost determinate prin calcularea mediilor aritmetice a valorilor obținute în urma mai multor încercări repetate.

Cercetările au fost efectuate pe modelul experimental realizat.

7.2. Ordonarea influenței parametrilor procesului de prelucrare asupra indicilor tehnologici.

7.2.1. Seria de încercări.

În vederea stabilirii ordinii de influență a parametrilor tehnologici ai procesului de prelucrare, a fost stabilită o serie de 60 încercări experimentale, rezultatele obținute fiind prelucrate statistic pe calculatorul electronic, utilizând metoda bilanțului aleatoriu [147].

Variabilele independente și nivelele acestora din seria de încercări sînt redată în tabelul 7.1. Variabilele cu 4 nivele admise se vor regăsi de 15 ori, iar variabila cu 5 nivele, de 12

ori. Distribuirea acestora s-a făcut prin randomizare. La fiecare încercare efectuată s-a cronometrat timpul de bază al prelucrării, calculându-se viteza de erodare și s-au măsurat diametrele orificiului în partea superioară, la intrarea electrodului și în cea inferioară, la ieșirea electrodului, determinându-se mărimea interstițiului lateral și concavitățile.

Tabelul 7.1

Nr.crt.	Variabila independentă	Nivelele variabilei	Nr.nivele
1.	Tensiunea de amorsare U_0 [V]	140, 170, 210, 280	4
2.	Rezistența R [Ω]	540, 620, 750, 1080	4
3.	Capacitatea C [nF]	33, 50, 75, 100, 133	5
4.	Frecvența osc. ν [Hz]	30, 50, 70, 90	4
5.	Amplitudinea osc. a [μ m]	3, 6, 10, 14	4

Seria încercărilor experimentale și rezultatele obținute sînt prezentate în tabelul 7.2.

7.2.2. Stabilirea variabilei cu influența de ordinul I.

Aplicarea metodei bilanțului aleatoriu pentru stabilirea ordinii de influență a variabilelor independente constă în calcularea valorilor mediei aritmetice a indicilor tehnologici pentru fiecare nivel al variabilelor admise și a valorii mediei mediilor aritmetice a indicilor tehnologici. Variabila pentru care domeniul de dispersie al valorilor mediei aritmetice are valoarea maximă, exercită influența primordială asupra indicelui tehnologic respectiv. Rezultatele calculelor sînt prezentate în tabelul 7.3.

Privitor la influența nivelelor variabilelor asupra indicilor tehnologici se pot face următoarele aprecieri:

- viteza de erodare crește pentru următoarea ordine a nivelelor variabilelor : tensiunea de amorsare - 140, 170, 210, 280 V ; rezistența - 1080, 750, 620, 540; capacitatea - 100, 75, 50, 33, 33 nF ; frecvența oscilațiilor forțate - 30, 70, 50, 90 Hz ; amplitudinea oscilațiilor forțate - 6, 10, 14, 3 μ m ;

- interstițiul lateral crește pentru următoarea ordine a nivelelor variabilelor : tensiunea de amorsare - 140, 170, 210, 280;

Tabelul 72

Densitatea de impulsare Hz	Tensiunea de impulsare U _b [V]	Rezistența R[KΩ]	Capacitatea C[nF]	Frecvența oscilațiilor ν[Hz]	Ampl. oscilațiilor A[μm]	Timpul de bază t _b [s]	Viteza de erodare V[mm/min]	Diametrul la intrare D _i [mm]	Diametrul la ieșire D _e [mm]	Interstițiul liber h[mm]	Condi- țiile K
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	280	0,75	33	30	14	34	1,94	0,252	0,250	0,0250	0,0018
2	210	0,54	133	50	14	31	2,13	0,250	0,225	0,0125	0,0227
3	210	0,62	75	50	3	35	1,88	0,250	0,225	0,0125	0,0227
4	140	0,54	100	30	6	83	0,80	0,235	0,210	0,0050	0,0227
5	280	0,54	50	90	10	21	3,142	0,250	0,225	0,0125	0,0227
6	280	1,08	50	70	3	31	2,13	0,240	0,220	0,0100	0,0182
7	140	0,62	75	30	10	76	0,87	0,230	0,210	0,0050	0,0182
8	140	0,54	100	70	14	32	2,06	0,240	0,215	0,0075	0,0227
9	210	0,62	33	90	14	66	1	0,240	0,215	0,0075	0,0227
10	280	0,75	33	70	14	43	1,53	0,240	0,215	0,0075	0,0272
11	210	0,75	133	70	14	42	1,57	0,255	0,230	0,0150	0,0227
12	140	0,54	133	50	3	45	1,22	0,245	0,210	0,0075	0,0272
13	140	1,08	100	30	3	85	0,78	0,240	0,215	0,0075	0,0227
14	140	1,08	100	90	6	58	1,14	0,235	0,215	0,0075	0,0210
15	210	1,08	33	90	3	32	2,06	0,235	0,220	0,0010	0,0163
16	140	0,62	100	30	6	87	0,76	0,230	0,215	0,0075	0,0135
17	280	1,08	75	50	14	28	2,38	0,245	0,230	0,0150	0,0135
18	210	1,08	33	30	6	93	0,71	0,225	0,210	0,0050	0,0135
19	170	0,75	50	50	3	85	0,78	0,225	0,210	0,0050	0,0135
20	280	0,75	100	70	3	18	3,66	0,200	0,250	0,0125	0,0041
21	140	0,54	50	30	3	52	1,27	0,245	0,220	0,0100	0,0227
22	210	0,54	75	70	14	22	1,50	0,245	0,220	0,0100	0,0182
23	140	0,62	50	50	10	47	1,53	0,240	0,220	0,0125	0,0135
24	140	1,08	50	30	3	124	0,71	0,230	0,215	0,0075	0,0182
25	140	0,75	100	70	14	22	1,50	0,230	0,215	0,0075	0,0135
26	170	1,08	133	90	6	41	1,21	0,240	0,220	0,0100	0,0227
27	140	1,08	33	30	6	94	0,71	0,225	0,215	0,0050	0,0045
28	140	1,08	75	50	10	47	0,59	0,240	0,215	0,0075	0,0227
29	80	0,62	133	70	10	76	2,54	0,285	0,265	0,0150	0,0182
30	140	0,54	100	50	14	46	1,43	0,240	0,250	0,0100	0,0091
31	140	0,62	75	30	6	86	0,77	0,250	0,240	0,0075	0,0091
32	80	0,54	50	70	10	38	1,74	0,250	0,250	0,0100	0,0182
33	280	0,54	33	50	10	35	1,88	0,255	0,235	0,0100	0,0182
34	210	0,54	75	90	10	28	2,57	0,280	0,235	0,0100	0,0227

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
35	170	0,62	133	30	3	56	1,18	0,240	0,220	0,0000	0,0182
36	210	0,75	100	50	10	50	1,32	0,250	0,235	0,0175	0,0136
37	170	0,75	50	90	3	50	1,32	0,245	0,205	0,0025	0,0182
38	170	0,75	100	50	6	82	0,81	0,250	0,215	0,0175	0,0400
39	170	0,54	50	30	10	82	0,81	0,250	0,215	0,0175	0,0318
40	210	0,75	50	70	10	50	1,10	0,255	0,225	0,0125	0,0272
41	170	0,62	75	90	3	55	1,18	0,230	0,210	0,0050	0,0182
42	170	0,54	33	50	10	43	1,53	0,265	0,250	0,0025	0,0136
43	170	0,62	33	90	6	52	1,27	0,240	0,210	0,0050	0,0272
44	210	0,54	33	50	14	57	1,16	0,240	0,220	0,0100	0,0182
45	170	1,08	75	70	14	123	0,54	0,235	0,220	0,0000	0,0136
46	280	1,08	133	30	10	49	1,35	0,250	0,250	0,0250	0
47	280	0,75	75	50	6	21	3,14	0,255	0,250	0,0000	0,0045
48	170	1,08	50	30	6	117	0,56	0,235	0,210	0,0100	0,0227
49	170	0,54	100	90	10	44	1,50	0,245	0,220	0,0050	0,0136
50	210	0,75	133	70	14	41	1,67	0,250	0,230	0,0100	0,0182
51	170	0,75	133	70	3	73	0,90	0,235	0,215	0,0025	0,0182
52	210	0,75	133	30	6	51	1,30	0,240	0,225	0,0125	0,0182
53	170	0,75	100	90	10	108	0,51	0,235	0,210	0,0050	0,0227
54	170	0,62	50	90	6	36	1,80	0,220	0,205	0,0025	0,0136
55	170	0,62	50	90	6	50	1,32	0,220	0,205	0,0025	0,0136
56	170	1,08	33	70	6	185	0,36	0,240	0,210	0,0050	0,0272
57	210	0,62	133	30	3	29	2,27	0,250	0,240	0,0200	0,0182
58	170	0,62	33	90	14	29	2,27	0,230	0,210	0,0050	0,0182
59	170	1,08	75	70	6	118	0,37	0,240	0,210	0,0050	0,0272
60	280	0,62	33	90	3	21	3,14	0,235	0,235	0,0000	0

No	Parameter	f	U_0	F	U_V	U	U_C	U_S	U_R	F	U_R
1	U_0 [V]	140	0,9140	1,4417	<u>1,3448</u>	0,00633	0,01233	<u>0,04580</u>	0,01847	0,01806	<u>0,00521</u>
		170	0,9926			0,00766					
		210	1,6013			0,01200					
		280	2,2588			0,02133					
		0,54	1,6348			0,01516					
		0,62	1,5873			0,01166					
		0,75	1,5126			0,01300					
		1,08	1,0320			0,00950					
		33	1,5925			0,01395					
		50	1,3776			0,00895					
2	R [k Ω]	75	1,3550	1,4417	0,2617	0,01291	0,01233	0,00563	0,01626	0,01806	0,00417
		100	1,3308			0,01458					
		133	1,5525			0,01437					
		30	0,9580			0,01100					
		50	1,5020			0,01600					
		70	1,5120			0,01133					
		80	1,6348			0,01600					
		3	1,5230			0,01150					
		5	1,0555			0,00950					
		10	1,5240			0,01116					
3	ω [Hz]	14	1,5680	1,4417	0,5834	0,01766	0,01233	0,00816	0,01864	0,01806	0,00420
		14	1,5680			0,01766					

rezistența - 1080, 620, 750, 540; capacitatea - 50, 75, 33, 133, 100; frecvența oscilațiilor - 90, 30, 70, 50; amplitudinea oscilațiilor - 6, 3, 10, 14;

- conicitatea orificiilor crește pentru următoarea ordine a nivelelor variabilelor: tensiunea de amorsare - 280, 140, 170, 210; rezistența - 620, 1080, 750, 540; capacitatea - 33, 75, 100, 133, 50; frecvența oscilațiilor - 30, 50, 90, 70; amplitudinea oscilațiilor;

Domeniul maxim de dispersie al mediilor aritmetice, pentru toți indicii urmăriți, rezultă la variabila tensiune de amorsare, definind-o astfel ca influență de ordinul I.

7.23. Stabilirea variabilei cu influența de ordinul II.

Pentru a putea stabili variabila cu influența de ordinul II este necesar a se elimina aportul variabilei de ordinul I. În acest scop, la fiecare rezultat al încercărilor experimentale se va aplica o corecție calculată ca diferență între media mediilor indicelui tehnologic și media aritmetică a fiecărui nivel al variabilei tensiune de amorsare. Spre exemplu, vitezele de erodare corectate v_1 se obțin adunând la toate vitezele de erodare v , corecțiile:

- pentru încercările cu tensiunea de amorsare 140 V,

$$\Delta_{140} = \bar{v} - \bar{v}_{140} = 1,4417 - 0,914 = 0,5277 .$$

$$\text{iar } v_{1,140} = v_{140} + \Delta_{140}$$

-- pentru încercările cu tensiunea de amorsare 170 V,

$$\Delta_{170} = \bar{v} - \bar{v}_{170} = 1,4417 - 0,9926 = 0,4491 ,$$

$$\text{iar } v_{1,170} = v_{170} + \Delta_{170}$$

- pentru încercările cu tensiunea de amorsare 210 V,

$$\Delta_{210} = \bar{v} - \bar{v}_{210} = 1,4417 - 1,6013 = - 0,1596$$

$$\text{iar } v_{1,210} = v_{210} + \Delta_{210}$$

- pentru încercările cu tensiunea de amorsare 280 V,

$$\Delta_{280} = \bar{v} - \bar{v}_{280} = 1,4417 - 2,2588 = - 0,8171$$

iar $v_{1,280} = v_{280} + \Delta_{280}$

In tabelul 7.4 sînt date valorile calculate ale corecțiilor.

Tabelul 7.4

Variabila independentă	Nivelul variabilei	Corecția aplicată indicelui tehn. viteza de er. interst.lat conicit.		
Tensiunea de amorsare	140	0,5277	0,004	- 0,000413
	170	0,4491	0,0047	- 0,001493
	210	- 0,1596	0,0003	- 0,0018
	280	- 0,8171	- 0,0088	0,0039

Tabelul 7.5 conține rezultatele corectate ale indicilor tehnologici după eliminarea aportului tensiunii de amorsare.

Pentru a se stabili variabila cu influența de ordinul II se aplică metoda bilanțului aleatoriu, rezultatele mărimilor statistice fiind cuprinse în tabelul 7.6. La toți indicii tehnologici se observă ca domeniul maxim de dispersie al mediilor aritmetice corespunde variabilei frecvența oscilațiilor forțate ale electrozudului scula, care devine variabila cu influența de ordinul II.

7.2.4. Stabilirea variabilei cu influența de ordinul III.

Procedura de stabilire a variabilei cu influența de ordinul III este similară, eliminându-se în continuare aportul variabilei frecvența oscilațiilor forțate. La rezultatele obținute după prima corecție se adună valoarea celei de-a doua corecții, determinată ca diferență dintre media mediilor indicelui tehnologic și media aritmetică a fiecărui nivel al variabilei frecvența oscilațiilor. Valorile corecțiilor ce se aplică sînt date în tabelul 7.7.

Cu aceste valori se obțin rezultatele afectate de cea de-a doua corecție, care nu mai sînt influențate de variabilele tensiune de amorsare și frecvența oscilațiilor (tabelul 7.8). Din tabelul 7.9 rezultă variabila cu influența III-a, capacitatea condensatorului.

Numar Inserc.	Tensiunea de umorsare U_0 [V]	Rezistența R [K Ω]	Capacitatea C [nF]	Frecvența oscilațiilor ν [Hz]	Amplitud. oscilațiilor A [μ m]	Viteza de erodare v_f [mm/min]	Intensiția laterală S [mm]	Concitate K
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	80	0,75	33	30	14	1,123	0,0160	0,0058
2	210	0,54	133	50	14	0,090	0,0128	0,0209
3	210	0,62	75	50	3	0,090	0,0128	0,0209
4	140	0,54	100	30	6	1,328	0,0090	0,0233
5	280	0,54	50	90	10	2,325	0,0035	0,0267
6	280	1,08	50	70	3	1,313	0,0010	0,0221
7	140	0,62	75	30	10	1,398	0,0090	0,0178
8	210	0,54	100	70	14	1,900	0,0078	0,0209
9	210	0,62	33	90	14	0,840	0,0078	0,0209
10	80	0,75	33	70	14	0,713	0,0015	0,0311
11	210	0,75	133	70	14	1,410	0,0153	0,0209
12	170	0,54	133	50	3	1,653	0,0122	0,0242
13	170	1,08	100	30	3	1,229	0,0122	0,0212
14	170	1,08	100	90	6	1,583	0,0122	0,0195
15	210	1,08	33	90	3	1,900	0,0103	0,0145
16	140	0,62	100	30	6	1,288	0,0115	0,0132
17	280	1,08	75	50	14	1,543	0,0060	0,0175
18	210	1,08	33	30	6	0,550	0,0053	0,0118
19	170	0,75	50	50	3	1,229	0,0097	0,0121
20	280	0,75	100	70	3	2,843	0,0160	0,0130
21	170	0,54	50	30	3	1,719	0,0147	0,0212
22	210	0,54	75	70	14	1,340	0,0209	0,0164
23	280	0,62	33	50	10	0,713	0,0165	0,0175
24	170	1,08	50	30	3	1,058	0,0115	0,0178
25	210	0,75	100	70	14	1,549	0,0112	0,0121
26	210	1,08	133	90	14	1,733	0,0147	0,0212
27	170	1,08	75	30	6	1,159	0,0112	0,0030
28	170	1,08	75	50	10	1,114	0,0112	0,0209
29	210	0,62	133	70	10	1,723	0,0035	0,0221
30	170	0,54	100	70	14	1,359	0,0209	0,0057
31	140	0,62	75	30	6	1,238	0,0243	0,0057
32	280	0,54	50	70	10	1,325	0,0112	0,0221
33	210	0,54	33	50	10	1,063	0,0145	0,0221
34	210	0,54	75	90	10	2,190	0,0178	0,0209
35	170	0,62	133	30	3	1,629	0,0147	0,0167
36	210	0,75	100	50	10	1,160	0,0175	0,0118

0	1	2	3	4	5	6	7	8
37	170	0,75	50	90	3	1,769	0,0072	0,0167
38	140	0,75	100	50	6	1,338	0,0115	0,0406
39	170	0,54	50	30	10	1,259	0,0122	0,0303
40	210	0,75	50	70	10	0,940	0,0128	0,0254
41	140	0,62	75	90	3	1,708	0,0090	0,0178
42	280	0,54	33	50	10	0,713	0,0160	0,0175
43	140	0,62	33	90	6	1,798	0,0090	0,0268
44	210	0,54	33	70	14	1	0,0103	0,0164
45	170	1,08	75	70	14	0,989	0,0147	0,0121
46	280	1,08	133	30	10	0,533	0,0160	0,0039
47	280	0,75	75	50	6	2,323	0,0160	0,0084
48	170	1,08	50	30	6	1,009	0,0097	0,0212
49	140	0,54	100	90	10	2,028	0,0140	0,0132
50	210	0,75	133	70	14	1,450	0,0153	0,0164
51	140	0,75	133	70	3	1,428	0,0115	0,0168
52	210	0,75	133	30	5	1,140	0,0128	0,0164
53	140	0,75	100	90	10	1,138	0,0090	0,0223
54	170	0,62	50	90	6	2,279	0,0072	0,0121
55	140	0,62	50	90	6	1,848	0,0065	0,0132
56	170	1,08	33	70	6	0,809	0,0097	0,0257
57	280	0,62	133	30	3	1,453	0,0110	0,0221
58	210	0,62	33	90	14	2,110	0,0053	0,0164
59	140	1,08	75	70	6	0,983	0,0077	0,0268
60	280	0,62	33	90	3	2,323	0,0093	0,0039

NO	UNIT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	R [K.S.]	0,54	1,4336	1,3832	0,3374	0,01460	0,01232	0,00387	0,02025	0,01809	0,00358		
		2,82	1,4936										
		2,75	1,4368										
2	C [nF]	1,28	1,1624	1,3832	0,4576	0,01073	0,01232	0,00419	0,01737	0,01809	0,00402		
		35	1,1547										
		50	1,4726										
3	V [Hz]	75	1,3378	1,3832	0,6749	0,01394	0,01232	0,00442	0,01605	0,01809	0,00490		
		20	1,6123										
		33	1,3385										
4	A [um]	30	1,1813	1,3832	0,2757	0,01305	0,01232	0,00356	0,01866	0,01809	0,00254		
		50	1,1547										
		7	1,3446										
5	A [um]	30	1,1813	1,3832	0,2757	0,00946	0,01232	0,00356	0,01774	0,01809	0,00254		
		50	1,1547										
		7	1,3446										
6	A [um]	30	1,1813	1,3832	0,2757	0,00946	0,01232	0,00356	0,01746	0,01809	0,00254		
		50	1,1547										
		7	1,3446										

Tabelul 7.7

Variabila independentă	Nivelul variabilei	Corecția aplicată indicelui tehn. viteza de erod. interst.lat. conicit.		
Frecvența oscilațiilor	30	0,2019	-0,00072	0,00267
	50	0,2192	-0,00155	-0,000776
	70	0,0347	-0,00058	-0,002236
	90	-0,4567	0,00286	0,00035

7.2.5. Stabilirea variabilelor cu influența de ordin IV și V

Dintre variabilele rămase, rezistența și amplitudinea vibrațiilor, urmează a se stabili care exercită influența de ordinul IV respectiv V. Pentru aceasta se aplică corecția a treia, cu valorile date în tabelul 7.10, eliminându-se influența variabilei capacității condensatorului.

Tabelul 7.10

Variabila independentă	Nivelul variabilei	Corecția aplicată indicelui tehn. viteza de erod. interst.lat. conicit.		
Capacitatea condensatorului	33	0,2661	0,00208	0,002149
	50	-0,0329	0,003179	-0,002547
	75	-0,0744	-0,0031	0,002177
	100	-0,2661	-0,00072	-0,0001
	133	0,002	-0,00037	0,00015

Valorile indicilor tehnologici cu corecția a treia sînt cuprinse în tabelul 7.11, iar mărimile statistice calculate pentru evidențierea variabilelor cu influența de ordin IV și V sînt incluse în tabelul 7.12. Se constată că cei trei indici tehnologici analizați sînt influențați în continuare în ordine de rezistență și în ultimul rînd de amplitudinea oscilațiilor forțate ale electrodului soubă.

Număr încearcă	Tensiunea de arnă U ₀ [V]	Rezistența R [kΩ]	Capaci- tatea C [nF]	Frecvența oscilațiilor ν [Hz]	Amplitudi- nea oscilațiilor A [μm]	Viteza de erodare V ₂ [mm/min]	Interstițiul latenței S ₂ [mm]	Coni- citate- tea K ₂
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	280	0,75	33	30	14	1,325	0,01524	0,00847
2	210	0,54	133	50	14	0,310	0,01124	0,02012
3	210	0,62	75	50	3	0,310	0,01124	0,02012
4	140	0,54	100	30	6	1,530	0,00756	0,02497
5	280	0,54	50	90	10	1,865	0,00636	0,02708
6	280	1,08	50	70	3	1,348	0,00040	0,01985
7	140	0,62	75	30	10	1,600	0,00756	0,02047
8	210	0,54	100	70	14	1,935	0,00720	0,01866
9	210	0,62	33	90	14	0,384	0,01352	0,02342
10	280	0,75	33	70	14	0,748	0,00210	0,02387
11	210	0,75	133	70	14	1,445	0,00147	0,01985
12	170	0,54	133	50	3	1,889	0,01064	0,02125
13	170	1,08	100	30	3	1,431	0,01148	0,02886
14	170	1,08	100	90	6	1,133	0,01506	0,01866
15	210	1,08	33	90	3	1,444	0,01316	0,01485
16	140	0,62	100	?	6	1,490	0,01100	0,01587
17	280	1,08	75	50	14	1,763	0,01594	0,01672
18	210	1,08	33	30	6	0,752	0,01108	0,01447
19	170	0,75	50	50	3	1,449	0,01126	0,01132
20	280	0,75	100	70	3	2,878	0,01540	0,01076
21	170	0,54	50	30	14	1,921	0,01408	0,02654
22	210	0,54	15	70	3	1,315	0,01910	0,01416
23	280	0,62	33	50	10	0,933	0,01134	0,01762
24	140	1,08	50	30	3	1,260	0,01100	0,02407
25	170	0,75	100	70	14	1,584	0,01667	0,00985
26	170	1,08	133	30	14	1,283	0,01756	0,02155
27	170	1,08	15	30	6	1,367	0,01660	0,00567
28	140	1,08	15	50	10	1,335	0,01900	0,02152
29	280	0,62	133	70	10	1,758	0,02200	0,01355
30	140	0,54	100	50	14	2,176	0,02144	0,00730
31	140	0,62	75	30	6	1,500	0,02300	0,01137
32	140	0,62	75	30	6	1,500	0,02300	0,01335
33	280	0,54	50	70	10	0,958	0,01100	0,01232
34	280	0,54	33	50	10	1,283	0,01616	0,02132
35	210	0,54	75	30	10	1,734	0,01756	0,02125

0	1	2	3	4	5	6	7	8
35	170	0,62	133	30	3	1,831	0,01400	0,01937
36	210	0,75	100	50	10	1,380	0,01534	0,01102
37	170	0,75	50	90	3	1,313	0,01006	0,01705
38	140	0,75	100	50	6	1,558	0,00934	0,03982
39	170	0,54	50	30	10	1,461	0,01150	0,03927
40	210	0,75	50	70	10	0,975	0,01220	0,02315
41	140	0,62	75	90	3	1,252	0,01186	0,01815
42	280	0,54	33	50	10	0,933	0,01444	0,01682
43	140	0,62	33	90	6	1,333	0,01186	0,02715
44	210	0,54	33	50	14	1,220	0,00874	0,01562
45	170	1,08	75	70	14	1,024	0,01410	0,00985
46	280	1,08	133	30	10	0,735	0,01530	0,00657
47	280	0,75	75	50	6	2,543	0,01444	0,00762
48	170	1,08	50	30	6	1,211	0,00898	0,02387
49	140	0,54	100	90	10	1,572	0,01586	0,01355
50	210	0,75	133	70	14	1,485	0,01470	0,01416
51	140	0,75	133	70	3	1,463	0,01000	0,01556
52	210	0,75	133	30	6	1,342	0,01208	0,01907
53	140	0,75	100	90	10	0,682	0,01185	0,02265
54	170	0,62	50	90	6	1,823	0,01005	0,01245
55	140	0,62	50	90	6	1,392	0,00936	0,01355
56	170	1,08	33	70	6	0,844	0,00910	0,02345
57	280	0,62	133	30	3	1,673	0,00944	0,02132
58	210	0,62	33	90	14	1,654	0,00816	0,01675
59	170	1,08	75	70	6	0,833	0,02620	0,02456
60	80	0,62	33	90	3	1,867	0,01136	0,00425

										\bar{K}_2	\bar{K}_2	\bar{K}_2
1	R [KJ]	0,54	1,4479	1,3817	0,2940	0,01280	0,00267	0,02027	0,01813	0,00307		
		0,62	1,3873									
		0,75	1,4780									
		1,08	1,1840									
2	C [NF]	53	1,1156	1,3817	0,4970	0,01280	0,00988	0,01598	0,01813	0,00472		
		50	1,4146									
		75	1,3861									
		100	1,6126									
3	A [47]	133	1,3797	1,3817	2741	0,01280	0,00396	0,01770	0,01813	0,00347		
		4	1,5552									
		6	1,3763									
		11	1,2811									
		14	1,3149									

Numar incerc	Tensiunea de amorzire $U_0 [V]$	Rezistența $R [K\Omega]$	Capacitatea $C [nF]$	Frecvența oscilațiilor $\nu [Hz]$	Amplitudinea oscilațiilor $A [\mu m]$	Viteza de eroziune $v_3 [mm/min]$	Interacțiunea laterală $s_3 [mm]$	Conicitatea K_3
0	1	2	3		5	6	7	8
1	280	0,75	33	50	4	1,591	0,01608	0,00795
2	210	0,54	133	50	4	0,312	0,01183	0,02105
3	210	0,62	75	50	3	0,260	0,01930	0,02310
4	140	0,54	100	30	6	1,299	0,00830	0,02220
5	280	0,54	50	90	10	1,632	0,00667	0,02415
6	280	1,08	50	70	3	1,315	0,00417	0,01955
7	140	0,62	75	30	10	1,556	0,00590	0,02000
8	210	0,54	100	70	14	1,704	0,00708	0,02080
9	210	0,62	33	90	14	0,650	0,00988	0,02305
10	280	0,75	33	70	14	1,014	0,00058	0,03325
11	210	0,75	133	70	14	1,447	0,01433	0,02105
12	170	0,54	133	50	3	1,891	0,01123	0,02435
13	170	1,08	100	30	3	1,200	0,01148	0,02110
14	170	1,08	100	90	6	0,902	0,01238	0,01940
15	210	1,08	33	90	3	1,710	0,01078	0,01665
16	140	0,62	100	30	6	1,259	0,01146	0,01310
17	280	1,08	75	50	14	1,719	0,00290	0,01970
18	210	1,08	33	30	6	1,018	0,00738	0,01395
19	170	0,75	50	50	3	1,406	0,01286	0,00700
20	280	0,75	100	70	3	2,657	0,01528	0,01290
21	170	0,54	50	30	14	1,898	0,01766	0,01565
22	210	0,54	75	70	3	1,331	0,01720	0,01657
23	280	0,62	33	50	10	1,119	0,01500	0,01660
24	140	1,08	50	30	3	1,227	0,01400	0,01525
25	170	0,75	100	70	14	1,355	0,01644	0,01200
26	170	1,08	133	90	14	1,295	0,01544	0,02135
27	170	1,08	75	30	6	1,317	0,01400	0,01618
28	140	1,08	75	50	10	1,294	0,01400	0,02448
29	280	0,62	133	70	10	1,770	0,02253	0,02225
30	140	0,54	100	50	14	1,347	0,01524	0,01960
31	140	0,62	75	30	10	1,456	0,01400	0,01968
32	280	0,54	50	70	10	0,420	0,01400	0,01855
33	280	0,54	33	50	10	1,549	0,01400	0,02425
34	210	0,54	75	90	10	1,690	0,01400	0,02418

0	1	2	3	4	5	6	7	8
35	170	0,62	133	30	3	1,835	0,01373	0,01685
36	210	0,75	100	50	10	1,149	0,01678	0,01170
37	70	0,75	50	90	3	1,280	0,01038	0,01415
38	140	0,75	100	50	6	1,327	0,01076	0,04050
39	170	0,54	50	30	10	1,428	0,01538	0,02175
40	210	0,75	50	70	10	0,942	0,01598	0,02285
41	140	0,62	75	90	3	1,208	0,00590	0,01967
42	280	0,54	33	50	10	1,199	0,01808	0,01965
43	140	0,62	33	90	6	1,335	0,00803	0,02695
44	210	0,54	33	50	14	1,486	0,01238	0,01855
45	170	1,08	75	70	14	0,980	0,01160	0,01428
46	280	1,08	133	30	10	0,737	0,01406	0,00405
47	280	0,75	75	50	6	2,499	0,01290	0,01058
48	170	1,08	50	30	6	1,178	0,01288	0,01865
49	140	0,54	100	90	10	1,341	0,01388	0,01310
50	210	0,75	133	70	14	1,487	0,01433	0,01655
51	140	0,75	133	70	3	1,465	0,01353	0,01795
52	210	0,75	133	30	6	1,344	0,01182	0,01655
53	140	0,75	100	90	10	0,451	0,00756	0,02220
54	170	0,62	50	90	6	1,790	0,01037	0,00955
55	140	0,62	50	90	6	1,359	0,00937	0,01065
56	170	1,08	33	70	6	1,119	0,01178	0,02785
57	280	0,62	133	30	3	1,671	0,00747	0,02147
58	210	0,62	33	90	14	1,320	0,00719	0,01855
59	170	1,08	75	70	6	0,854	0,02310	0,02674
60	210	0,62	33	90	3	2,133	0,01078	0,00605

Date: 7/12

No	Parameter	ν_{NE}	$\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$W\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$\bar{\nu}_3$	$W\bar{\nu}_3$
1	R [K Ω]	0,54	1,4555		0,01653								
		0,62	1,4379		0,01131								
		0,75	1,4275	1,3752	0,01255	0,2667	0,0130	<u>0,00522</u>					
		1,08	1,1888		0,01160								
		3	1,5444		0,01128								
2	A [μm]	6	1,3364		0,01228								
		10	1,2808	1,3752	0,01604	0,2636	0,0130	<u>0,00476</u>					
		14	1,3490		0,01240								

7.3. Variația indicilor tehnologici sub influența parametrilor procesului de prelucrare.

7.3.1. Influența parametrilor regimului electric.

Utilizând concluziile desprinse din prelucrarea statistică a rezultatelor încercărilor experimentale efectuate în prima etapă, a fost posibilă selectarea variabilelor independente și a nivelelor acestora, în ordinea influenței pe care o exercită asupra indicilor tehnologici.

În vederea studierii influenței parametrilor regimului electric, la condițiile inițiale stabilite se adaugă menținerea constantă a frecvenței oscilațiilor forțate ale electrodului scul ($\nu = 90$ Hz) și a amplitudinii acestora ($u = 3$ μ m).

Regimul electric de prelucrare a fost exprimat prin energia descărcărilor, respectiv frecvența acestora, rezultat ca urmare a reglării următoarelor mrimi ale generatorului de impulsuri:

- tensiunea de amorsare $U_0 = 110, 140, 170, 210, 280$ V;
- rezistența $R = 470, 540, 750, 1030$ Ω ;
- capacitatea $C = 33, 68, 100, 150$ nF.

Intensitatea curentului mediu și densitatea de curent ce se obțin la regimurile de prelucrare sînt reprezentate în diagrama din figura 7.1.

Menținînd pe rînd constantă fiecare valoare a capacității, prin modificarea tensiunii de amorsare și a rezistenței s-au obținut nivele de variație ale frecvenței, respectiv energiei descărcărilor electrice.

Reprezentarea grafică a influenței regimului electric, exprimat prin frecvența și energia descărcărilor

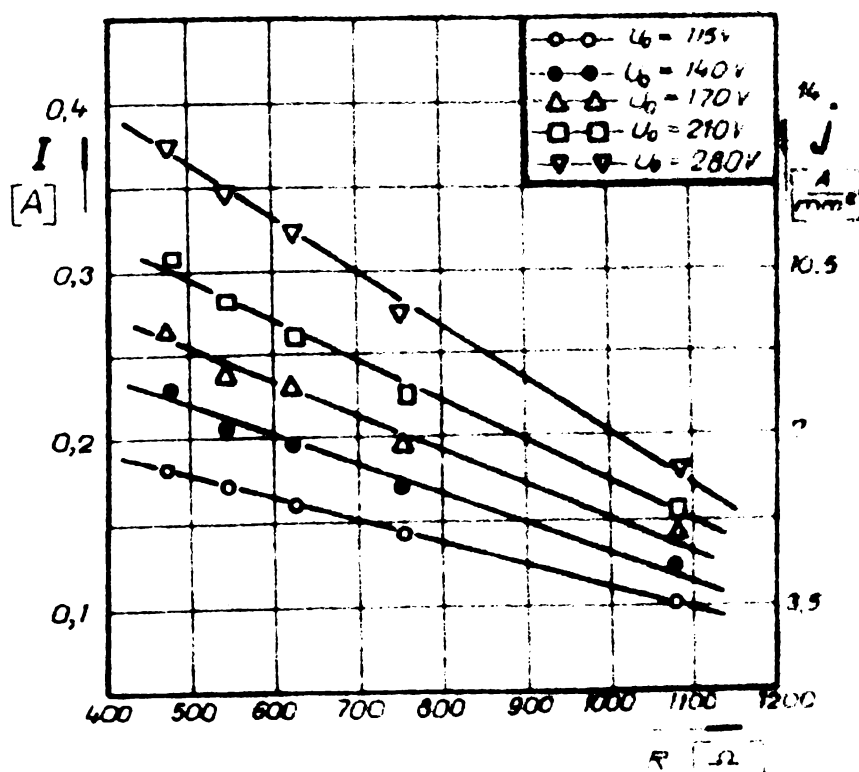


Fig. 7.1.

asupra indicilor tehnologici: viteza de erodare, interstițiu lateral și concitate, determină obținerea unor suprafețe, corespunzătoare fiecărei valori a capacității menționate. În figurile 7.2, 7.3, 7.4 și 7.5 se prezintă variația vitezei de erodare în funcție de energia și frecvența descărcărilor electrice. Pe suprafețele rezultate sînt trasate curbele determinate de intersecția cu plane paralele de frecvență constantă, respectiv energie constantă.

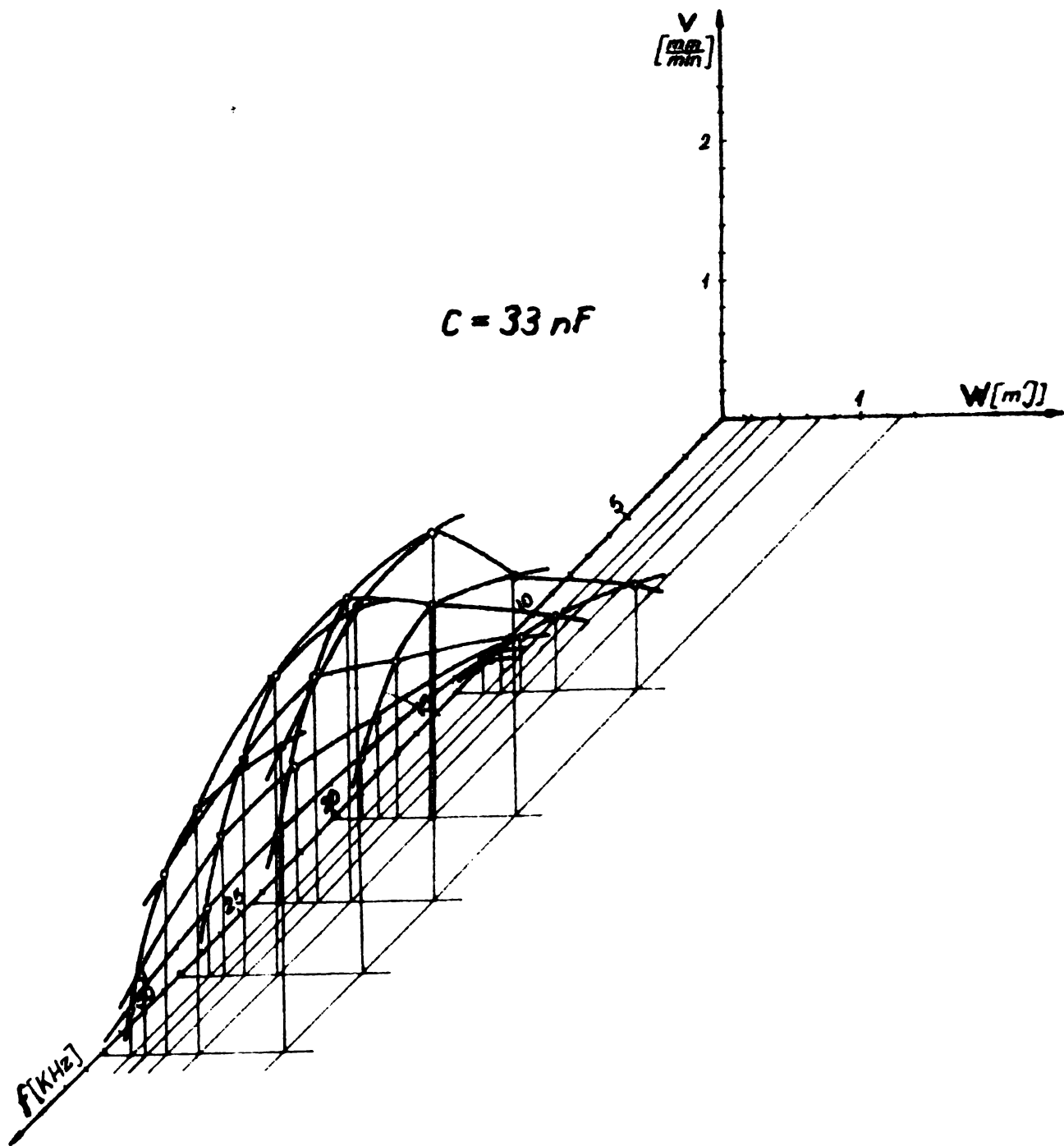


Fig. 7.2.

pentru interpretarea calitativă și cantitativă a influenței

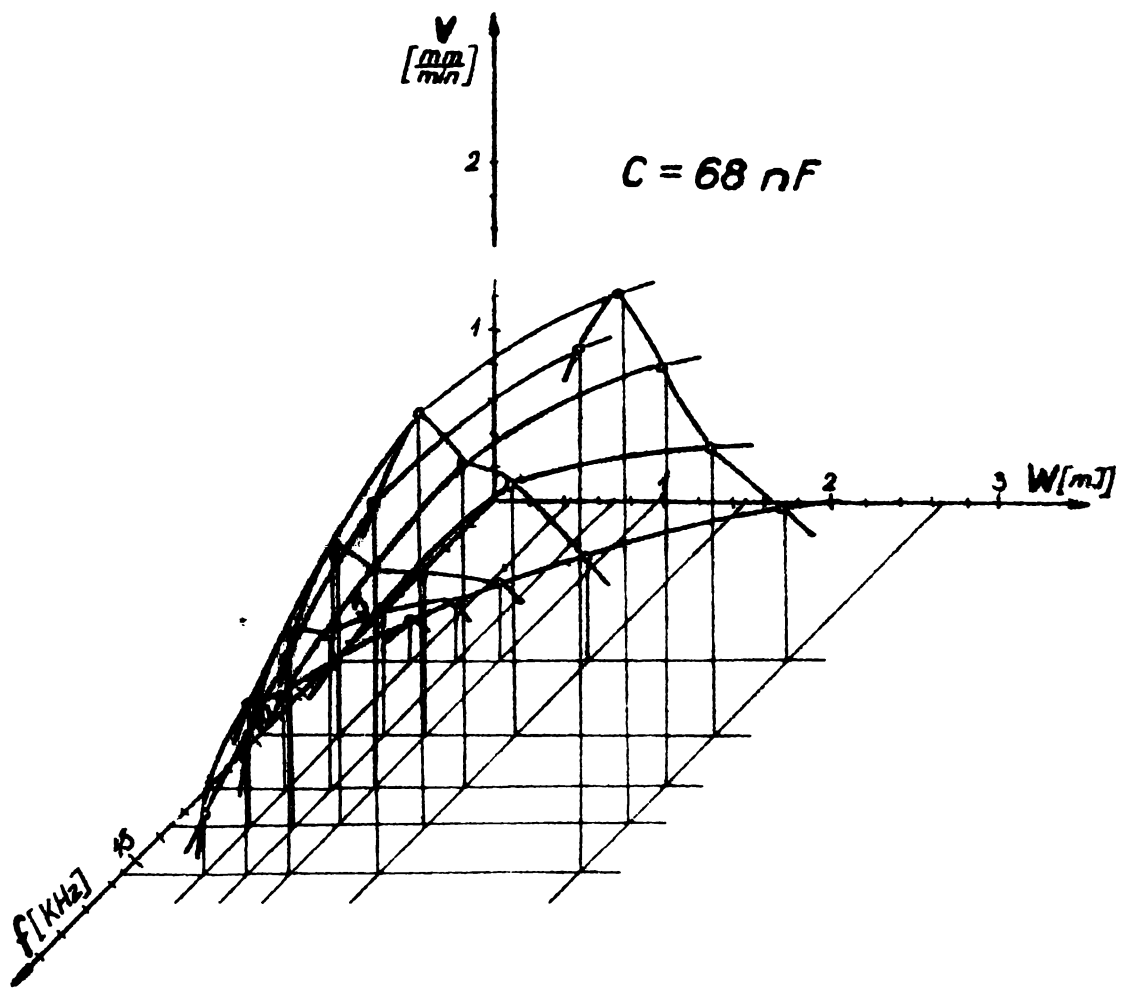


Fig. 7.3.

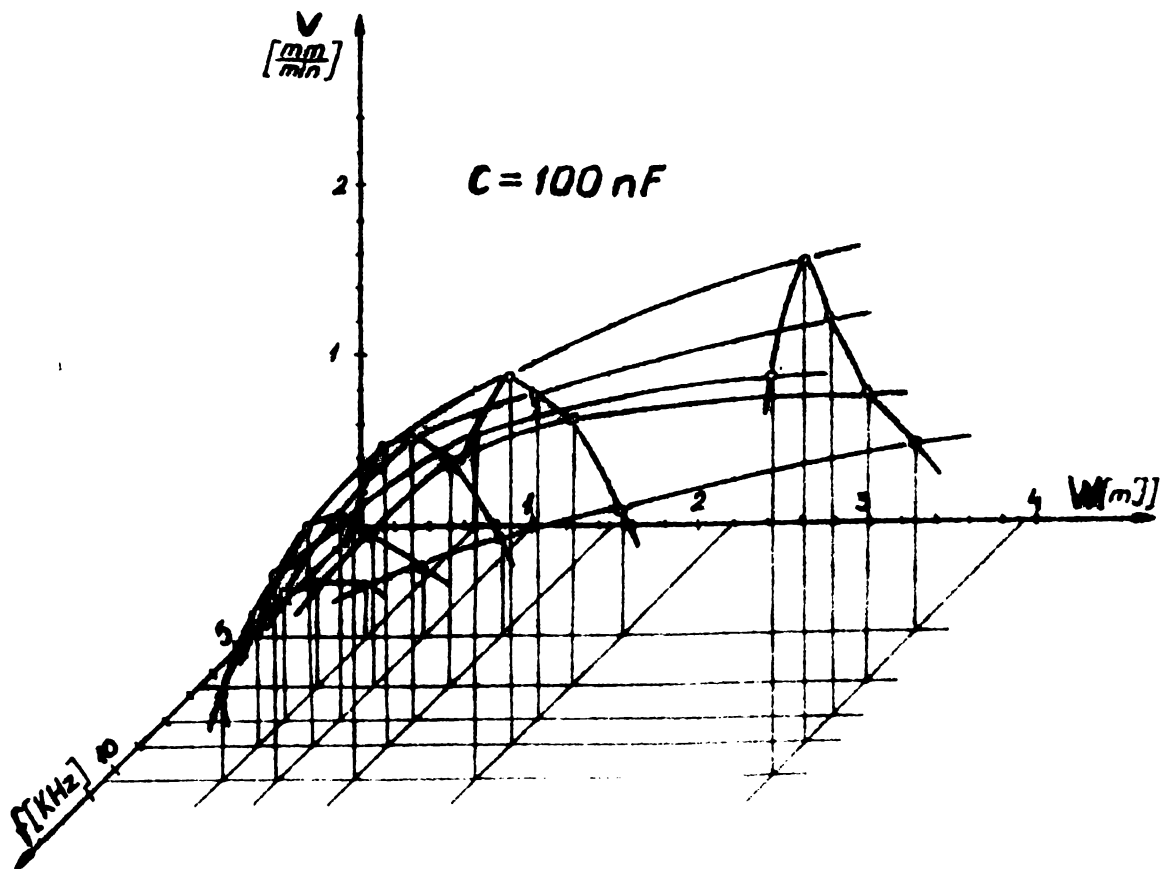


Fig. 7.4.

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMISOARA
BIBLIOTECA CENTRALA

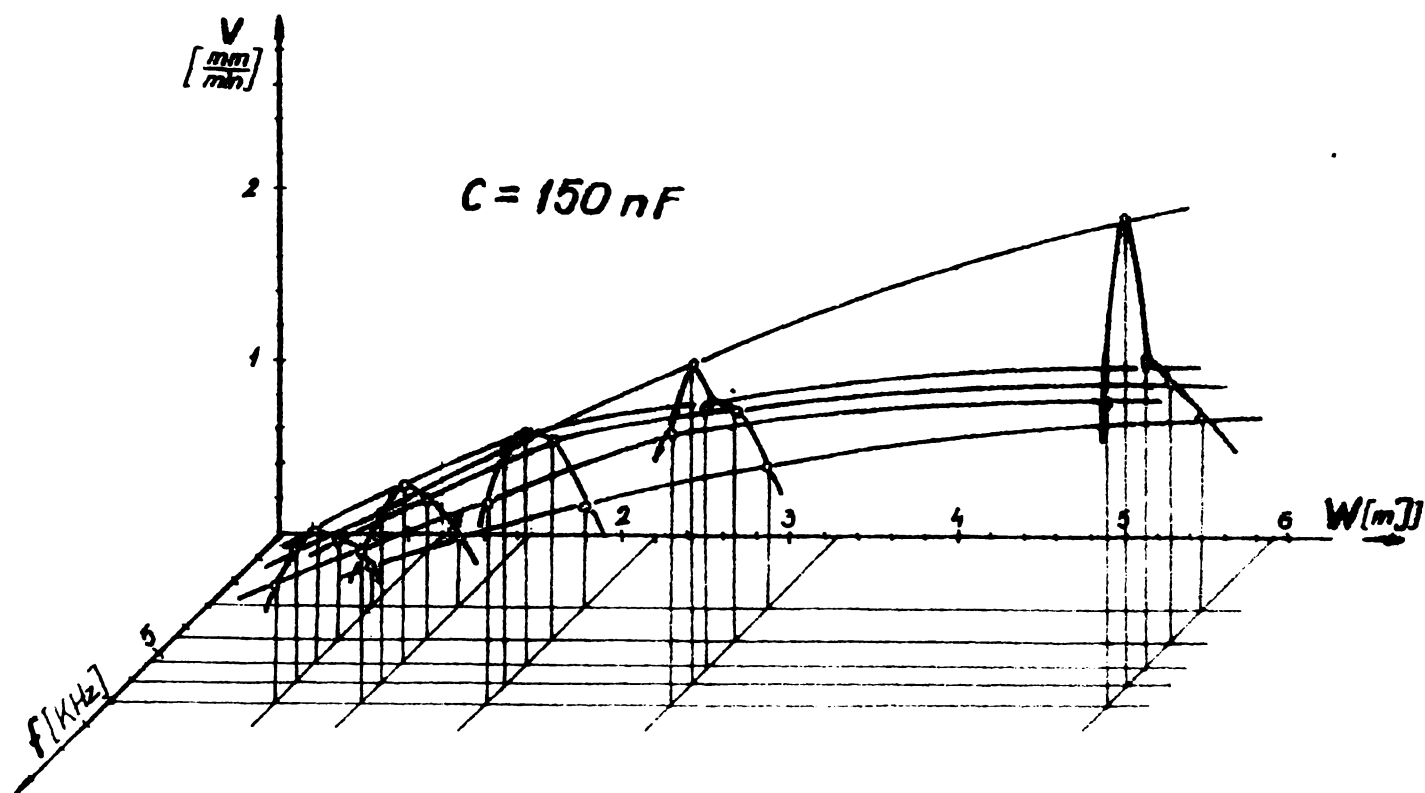


Fig. 7.7.

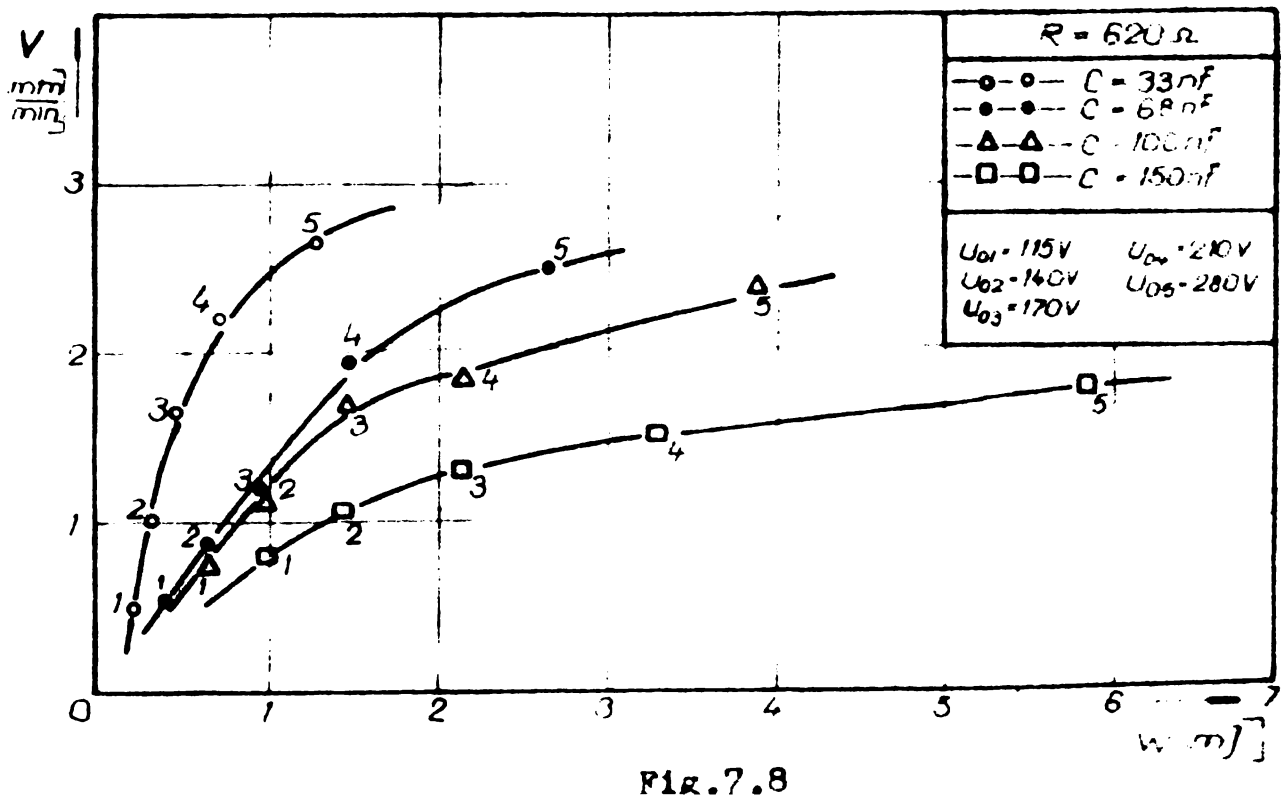
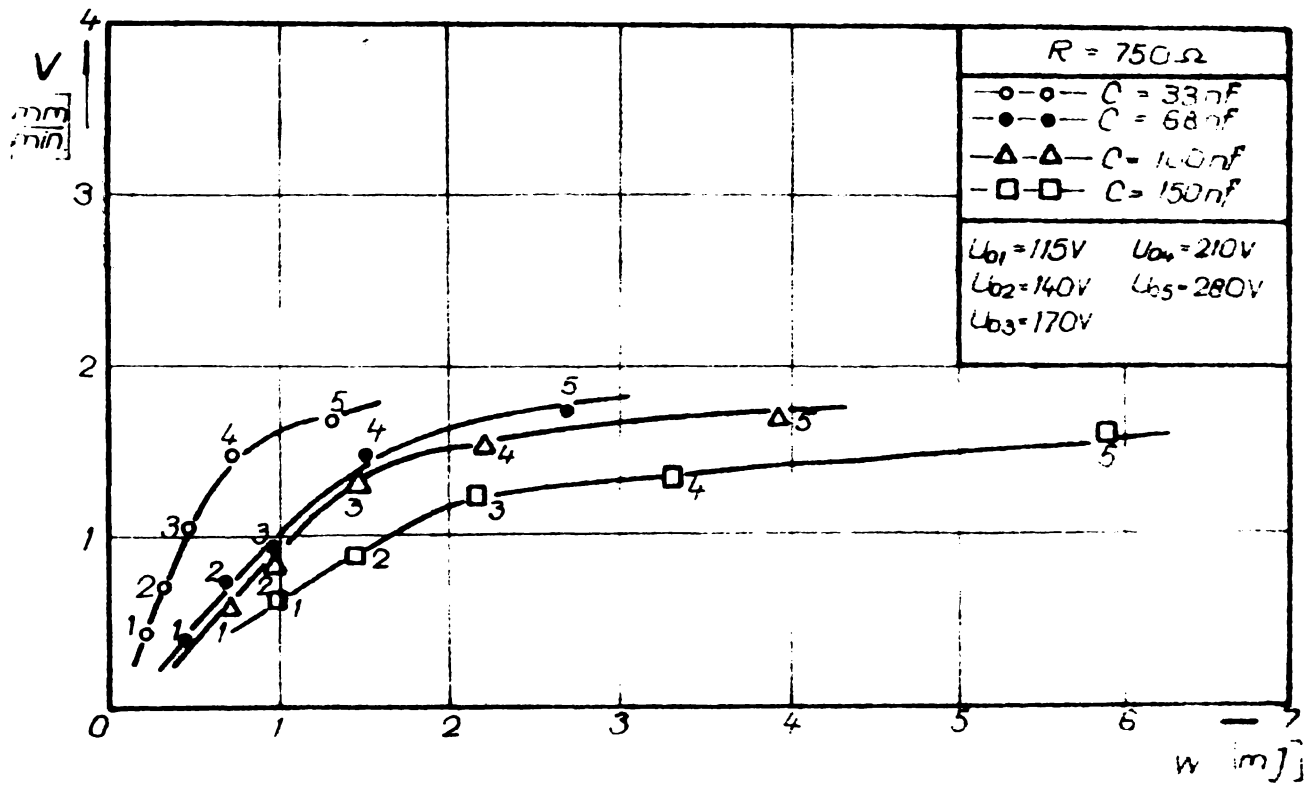
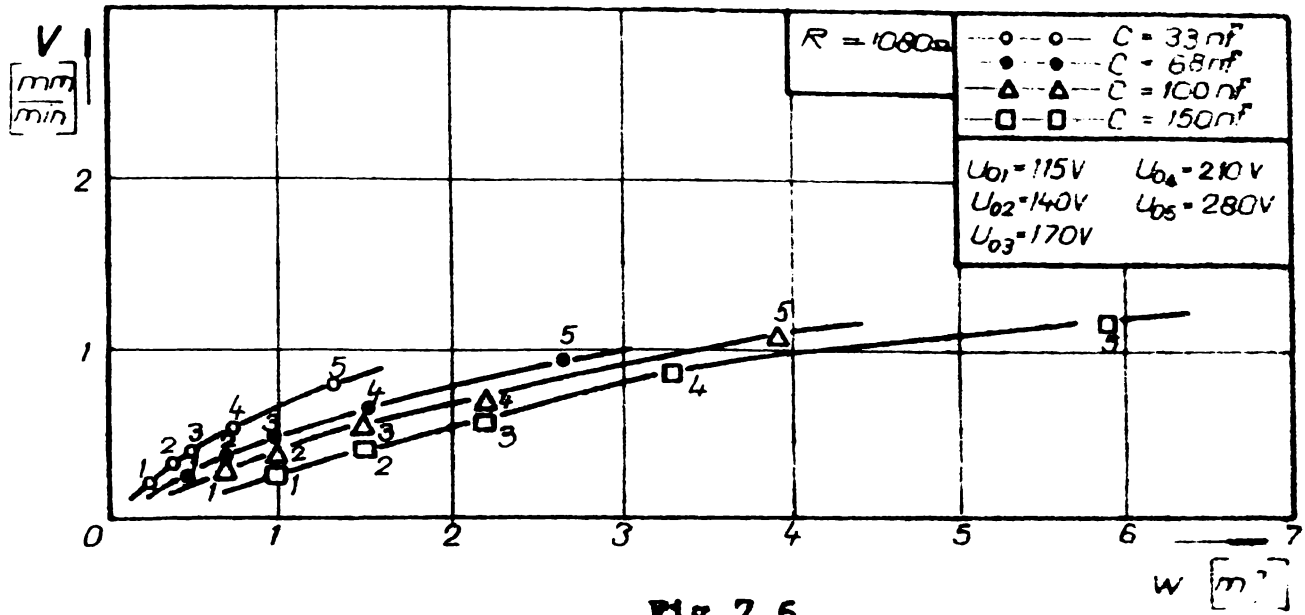
parametrilor regimului electric s-a procedat în continuare la reprezentarea grafică a curbelor de variație a indicilor tehnologici în funcție de energia, respectiv frecvența descărcărilor electrice, în mod distinct.

7.3.1.1. Influența energiei descărcărilor electrice.

Pentru a se studia influența energiei descărcărilor electrice asupra vitezei de erodare, interstițiului lateral și concitației orificiilor, ca parametru variabil în funcție de care s-au obținut diferitele valori ale energiei descărcărilor electrice a fost admis tensiunea de amorsare, iar prin menținerea constantă a rezistenței și capacității condensatorului, au rezultat regimuri de prelucrare cu aceeași valoare a frecvenței.

Diagramele de variație au fost reprezentate pentru oite o valoare a rezistenței, iar fiecare curbă, pentru oite o valoare a capacității, pe fiecare diagramă rezultând un fascicul de curbe de frecvența constantă a descărcărilor electrice. De acestea sînt marcate punctele corespunzătoare valorilor nivelelor tensiunii de amorsare.

Variația vitezei de erodare este reprezentată în diagramele din figurile 7.6, 7.7, 7.8, 7.9 și 7.10.



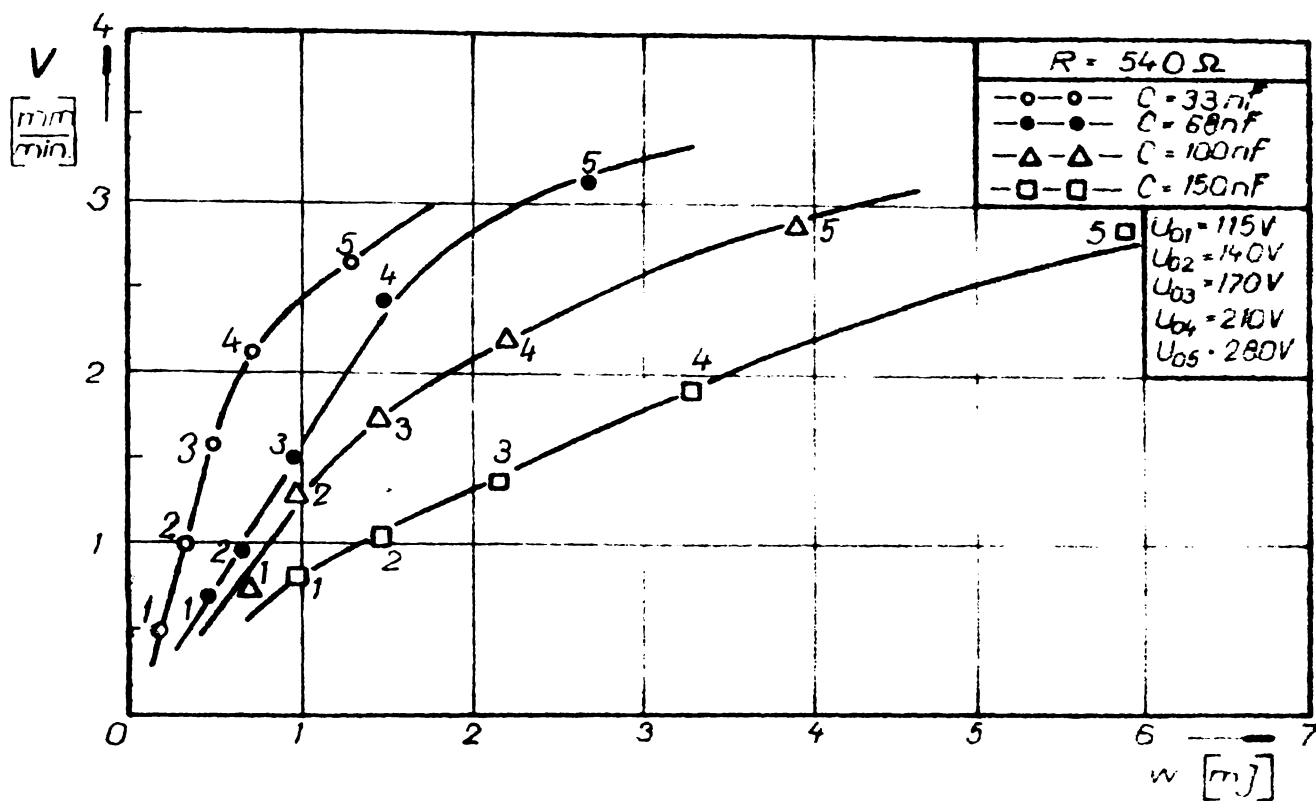


Fig. 7.9

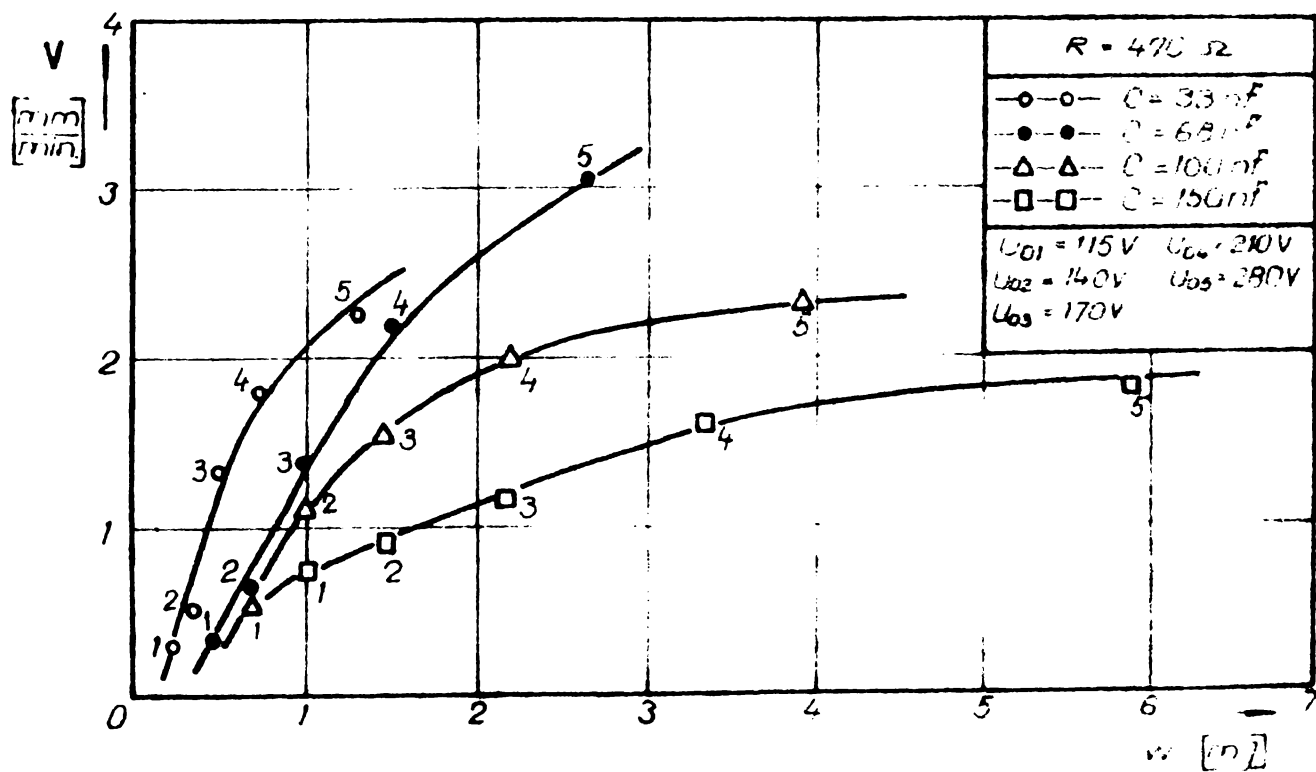


Fig. 7.10

Din analiza curbelor se remarcă o variație crescătoare a vitezei de erodare cu energia descărcărilor electrice, datorată creșterii adâncimii pe care acționează fluxul termic ce provoacă topirea și vaporizarea materialului. La valori mari ale energiei descărcărilor se observa reducerea pantei curbelor de frecvență constantă, ca urmare a modificării repartiției energiei între cantitatea consumată pentru erodarea materialului obiectului prelucrării, uzura electrodului sculă și fărâmițarea particulelor de dimensiune mare. Astfel, la aceste valori, energia consumată pentru fărâmițarea particulelor detașate se mărește, în detrimentul prelevării de material.

Se remarcă de asemenea o variație mai accentuată a vitezei de erodare în funcție de energia descărcărilor electrice, la valori mai mici ale rezistenței și capacității condensatorului (frecvență ridicată). Astfel, vitezele de erodare cresc de 7,32 ori la o creștere de 5,03 ori a energiei, pentru frecvența maximă admisă $f=32,2$ kHz ($R = 470 \Omega$, $C = 33$ nF), față de o creștere a vitezei de erodare de numai 4,97 ori la aceeași creștere a energiei, pentru frecvența minimă admisă $f = 3,08$ kHz, raportul între creșterile vitezelor fiind deci de 1,47 ori. Variația cea mai accentuată se înregistrează la $f = 15,6$ kHz ($R = 470 \Omega$, $C = 68$ nF), raportul dintre viteză maximă $v_{max} = 3,06$ mm/min, la $U_0 = 280$ V și viteză minimă $v_{min} = 0,324$ mm/min, la $U_0 = 115$ V, fiind de 9,45; cea mai redusă variație apare la $f = 5,4$ kHz ($R = 620 \Omega$, $C = 150$ nF), raportul dintre viteză maximă și cea minimă fiind de 2,23. Cea mai ridicată viteză de erodare se înregistrează la energia $W = 2,665$ mJ și frecvența $f = 13,6$ kHz, pentru $U_0 = 280$ V, $R = 540 \Omega$, $C = 68$ nF.

Variația interspățiului lateral în funcție de energia descărcărilor este reprezentată în diagramele din figurile 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15,

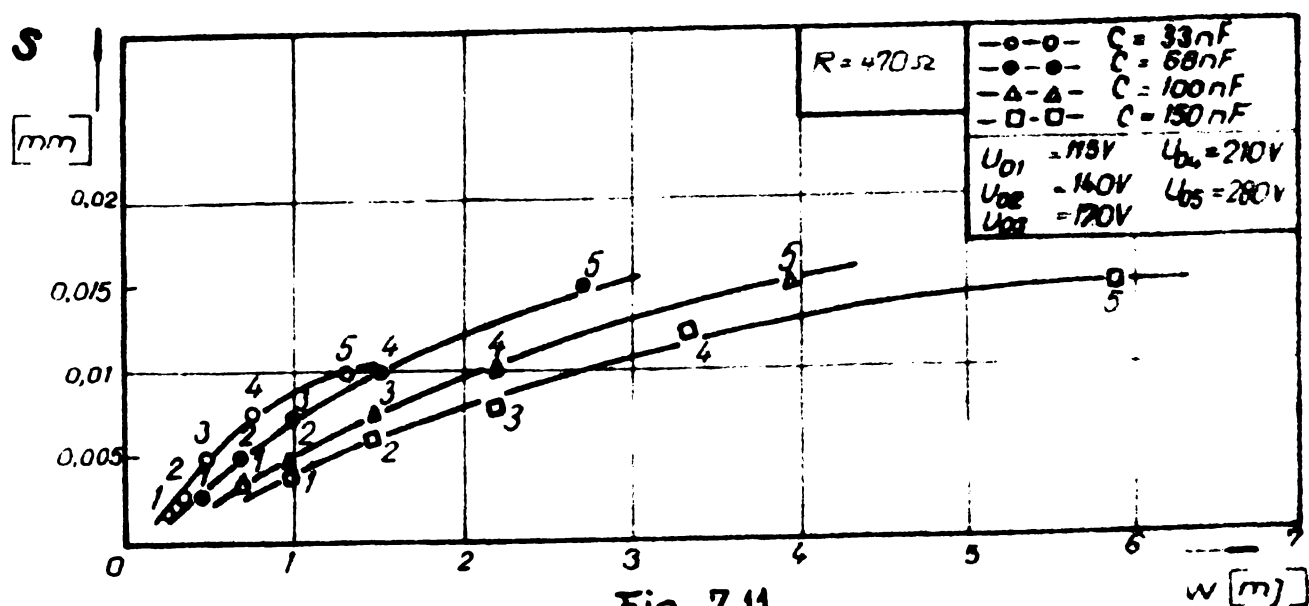


Fig. 7.11.

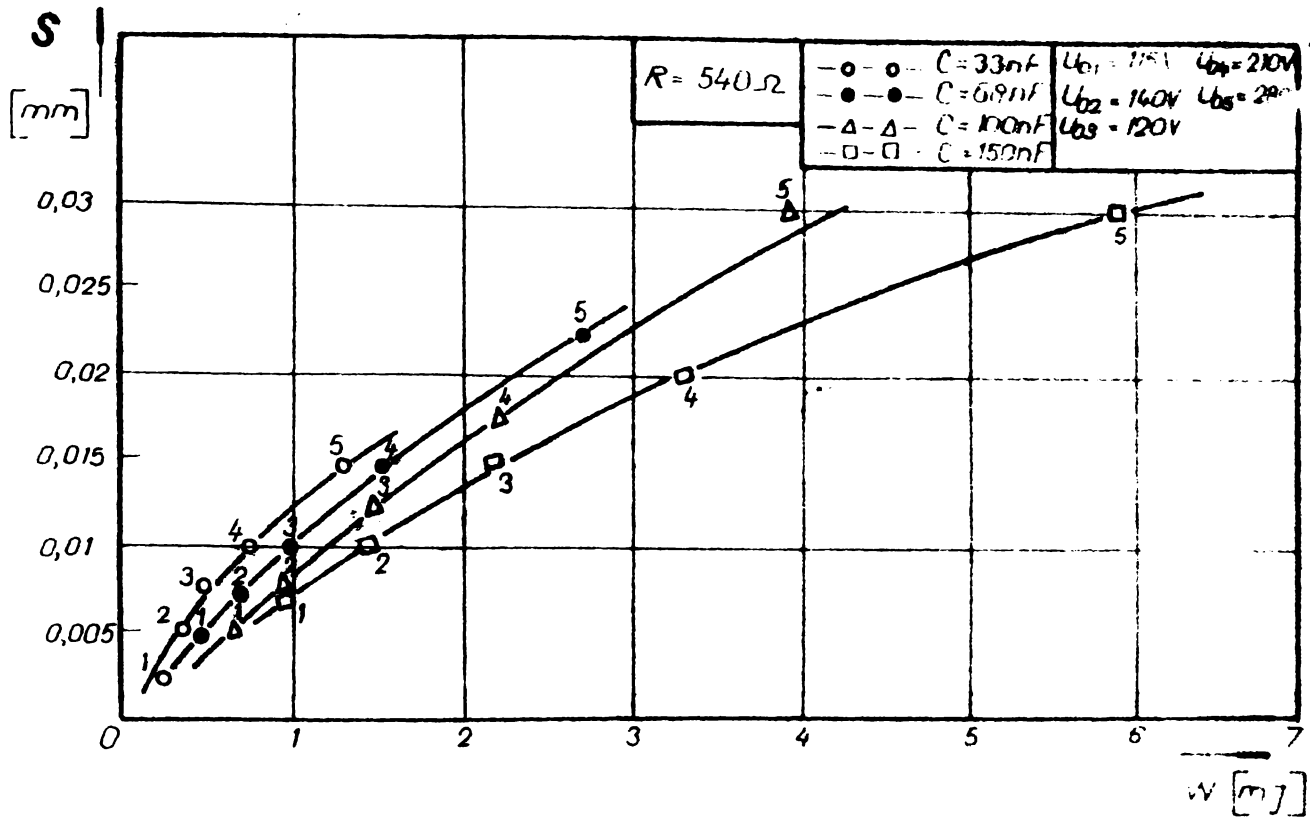


Fig. 7.12

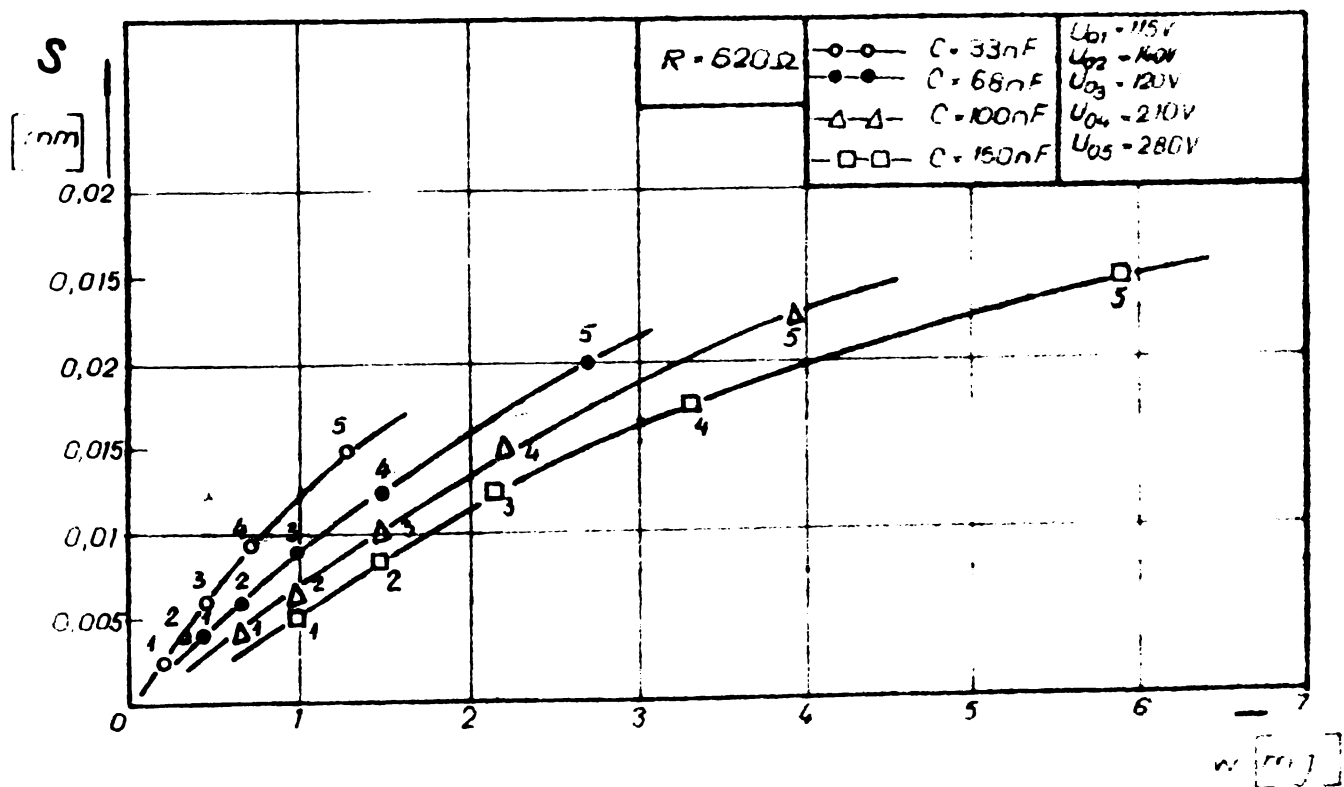


Fig. 7.13

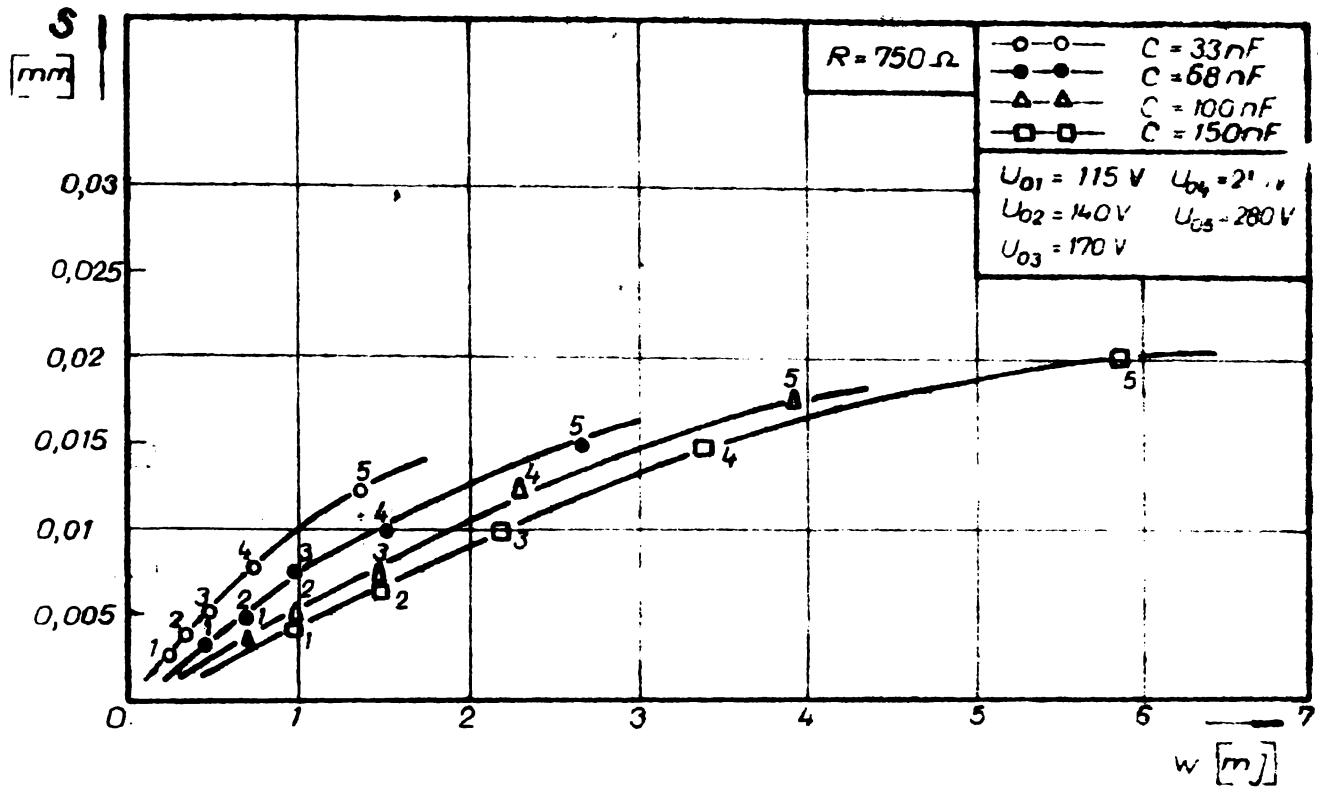


Fig. 7.14

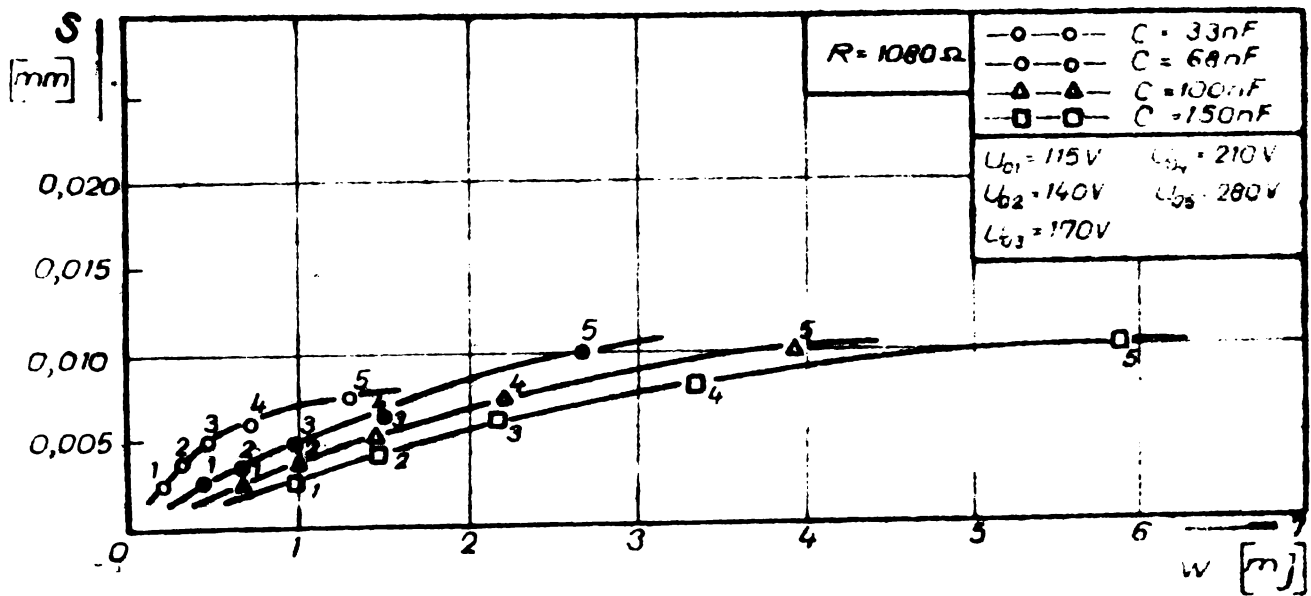


Fig. 7.15

Creșterea energiei descărcărilor electrice fiind rezultatul măririi tensiunii de amorsare, este de așteptat a se evidenția și o majorare a interstițiului lateral. Modificarea repartiției energiei la valorile superioare, pentru regimurile de prelucrare cu frecvență constantă, cauzează ca și în cazul vitezei de erodare o reducere sensibilă a pantei curbelor.

Din punct de vedere al evacuării particulelor erodate este de preferat ca interstițiul lateral să fie cât mai mare, fiind deci avantajoase tensiunile mari de amorsare, dar pentru prelucrarea orificiilor de diametru foarte mic, ar însemna pe de o parte utilizarea unor electrozi foarte subțiri, de rigiditate mică, care ar fi dificil de antrenat și ghidat.

Valorile interstițiului lateral rezultate în urma încercărilor experimentale sînt cuprinse între $s_{\min} = 0,0015$ mm, pentru $W_{\min} = 0,218$ mJ și $f_{\max} = 32,2$ kHz ($U_0 = 115$ V, $R = 470\Omega$, $C = 33$ nF) și $s_{\max} = 0,03$ mm, pentru $W_{\max} = 5,88$ mJ și $f = 6,2$ kHz ($U_0 = 280$ V, $R = 540\Omega$, $C = 150$ nF). Pentru o creștere a energiei descărcărilor electrice de 5,93 ori, majorarea interstițiului este în medie de 4,9 ori, de numai 3 ori la $f = 14$ kHz și de 0,7 ori la $f = 32,2$ kHz.

Curbele de variație a conicității orificiilor în funcție de energia descărcărilor electrice sînt redată în diagramele din figurile 7.16, ..., 7.20. Alura curbelor de frecvență constantă pare curioasă la prima vedere și dificil de explicat, prezentînd un maxim la $U_0 = 170$ V și apoi o scădere asimptotică.

Forma conică a orificiilor este determinată de procesele erozive ce au loc în interstițiul lateral. Se poate admite ca aceste procese sînt generate de acțiunea descărcărilor laterale produse prin intermediul punților conductoare formate de particulele erodate, la evacuarea lor. Unda de șoc creată de forțe electrodinamice și mecanice, nereușind să evacueze întreaga cantitate de material erodat, distanța pînă la suprafața obiectului prelucrării fiind mai mare decît parcursul liber mijlociu al particulelor în interstițiu, în partea sa superioară se vor aglomera produse ale eroziunii, solide, lichide și gazoase, care depășind concentrația optimă, determină modificarea condițiilor de străpungere. Cu creșterea energiei, mărindu-se atît cantitatea de material erodat, cît și dimensiunile particulelor, condițiile de amorsare a descărcărilor electrice laterale fiind mai favorabile, rezultă o creștere a

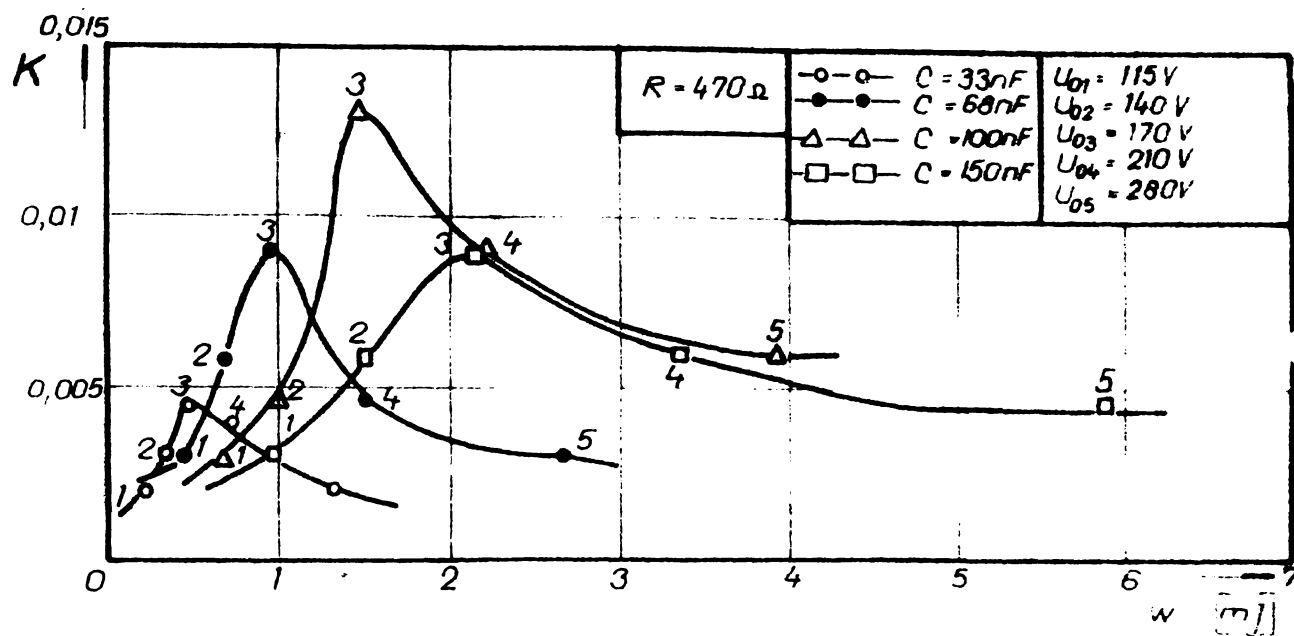


Fig. 7.16

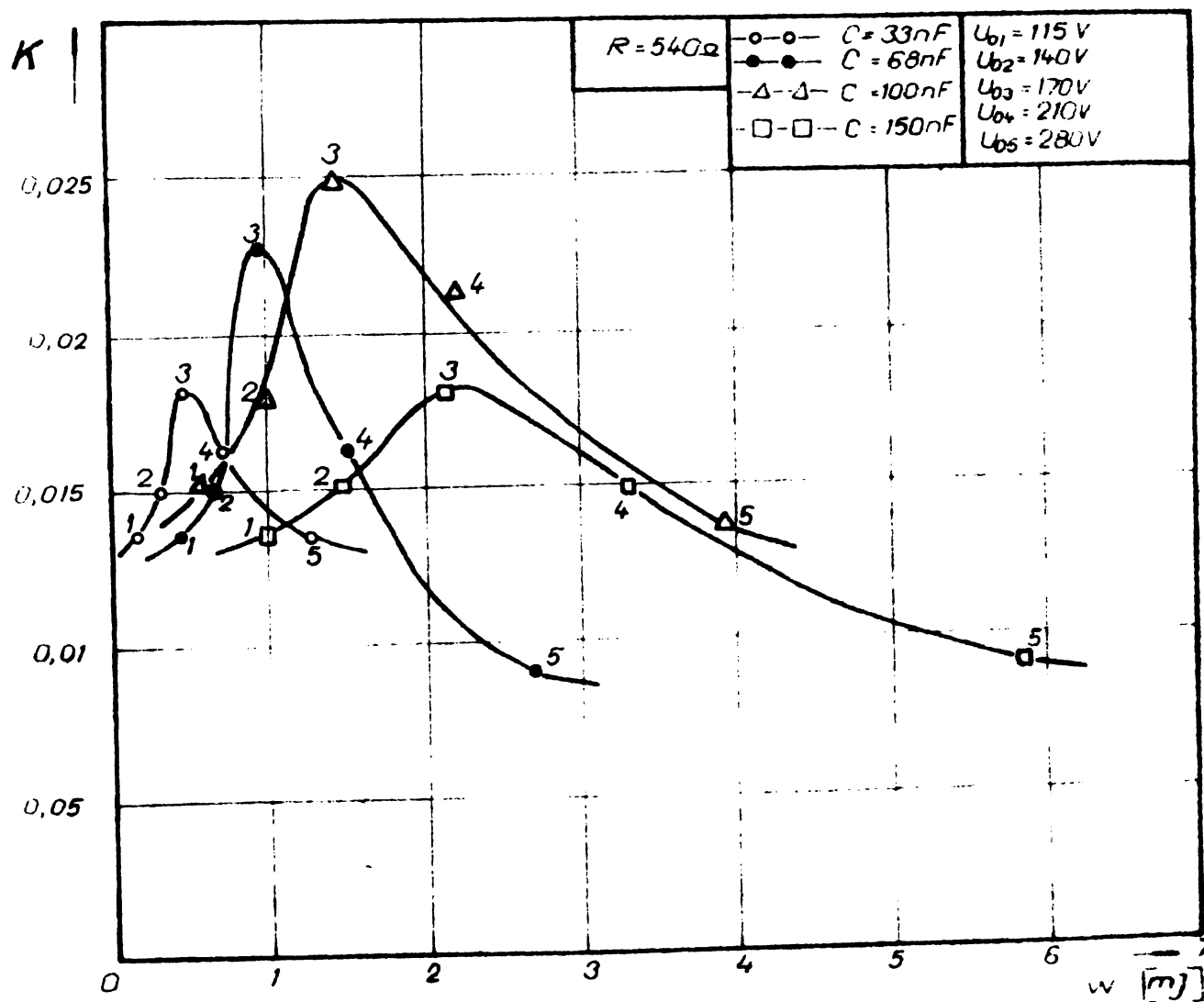


Fig. 7.17

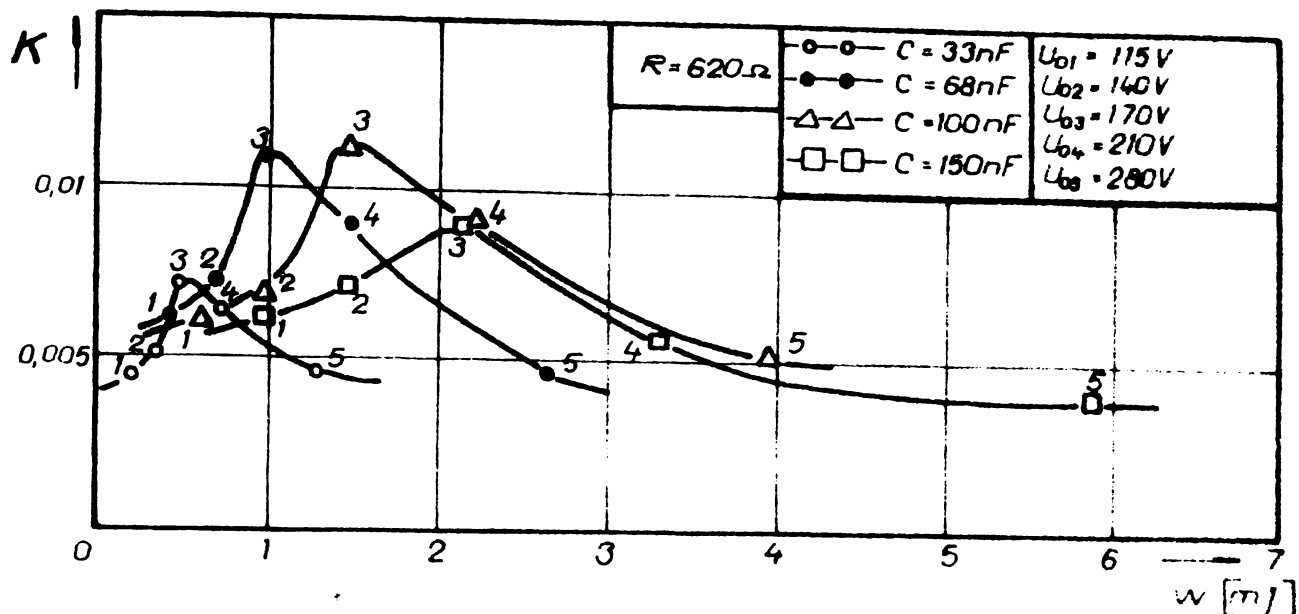


Fig. 7.13

conicității orificiilor. La valori mari ale energiei însă, o parte tot-mai însemnată din aceasta fiind consumată pentru fărâmițarea particulelor, pe de o parte și creșterea interstițiului lateral, pe de altă parte, coroborează la reducerea conicității orificiilor.

Acțiunea descărcărilor laterale, din cauza aglomerării produselor eroziunii în zona superioară a orificiului, se observă în timpul prelucrării prin apariția unor microexplozii periodice, determinate de undele de șoc.

Valoarea minimă a conicității, 0,002 mm se înregistrează la următoarele regimuri de prelucrare :

- $W = 0,218 \text{ mJ}$ și $f = 14 \text{ kHz}$ ($U_0 = 115 \text{ V}$, $R = 1080 \Omega$, $C = 33 \text{ nF}$)
- $W = 0,218 \text{ mJ}$ și $f = 32,2 \text{ kHz}$ ($U_0 = 115 \text{ V}$, $R = 470 \Omega$, $C = 33 \text{ nF}$)
- $W = 1,295 \text{ mJ}$ și $f = 32,2 \text{ kHz}$ ($U_0 = 280 \text{ V}$, $R = 470 \Omega$, $C = 33 \text{ nF}$)

Valoarea maximă a conicității, 0,025 mm apare la regimul caracterizat prin $W = 1,445 \text{ mJ}$ și $f = 9,3 \text{ kHz}$ ($U_0 = 170 \text{ V}$, $R = 540 \Omega$, și $C = 100 \text{ nF}$).

7.3.1.2. Influența frecvenței descărcărilor electrice.

Studiul variației indicilor tehnologici în funcție de frecvența descărcărilor electrice s-a efectuat pe baza rezultatelor încercărilor experimentale reprezentate în diagramele trasate pentru valorile admise ale tensiunii de amorsare, curbele corespunzătoare capacității condensatorului fiind de energie constantă. punctele

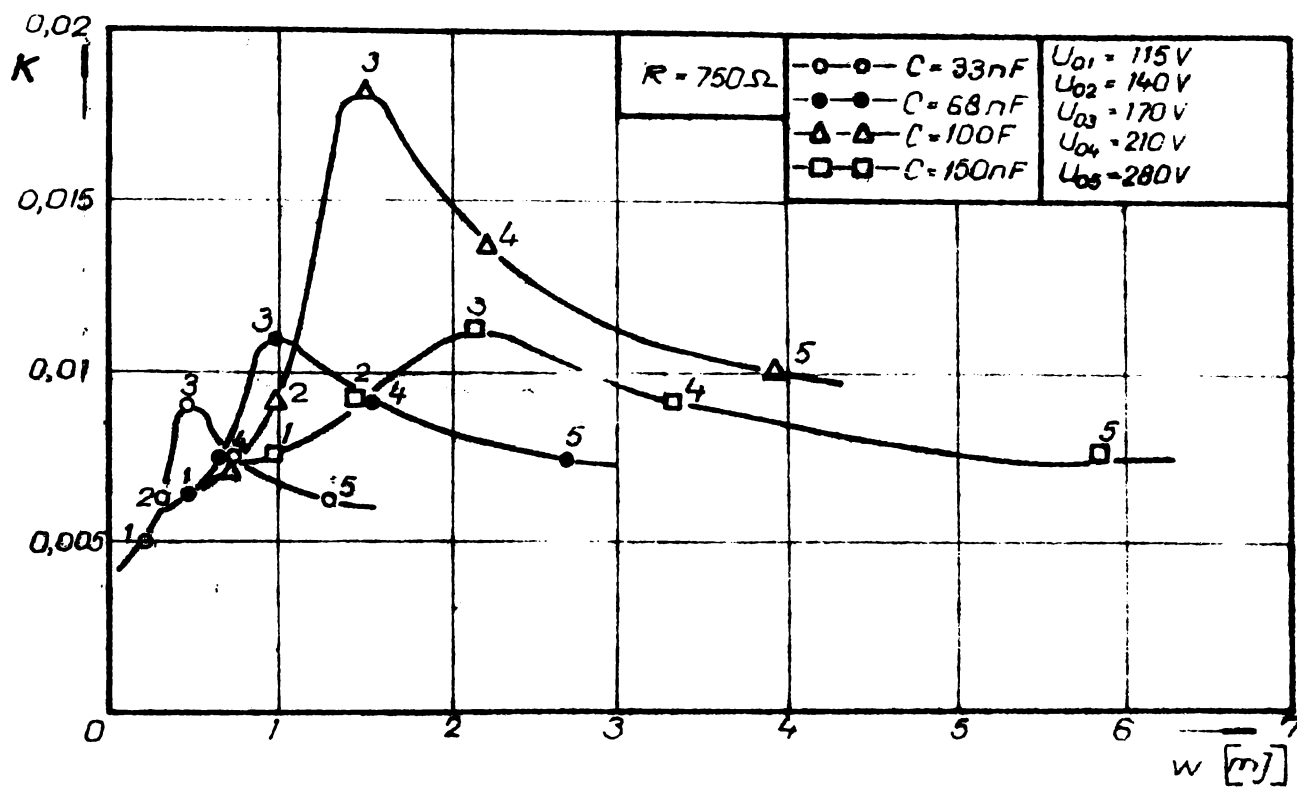


Fig. 7.19

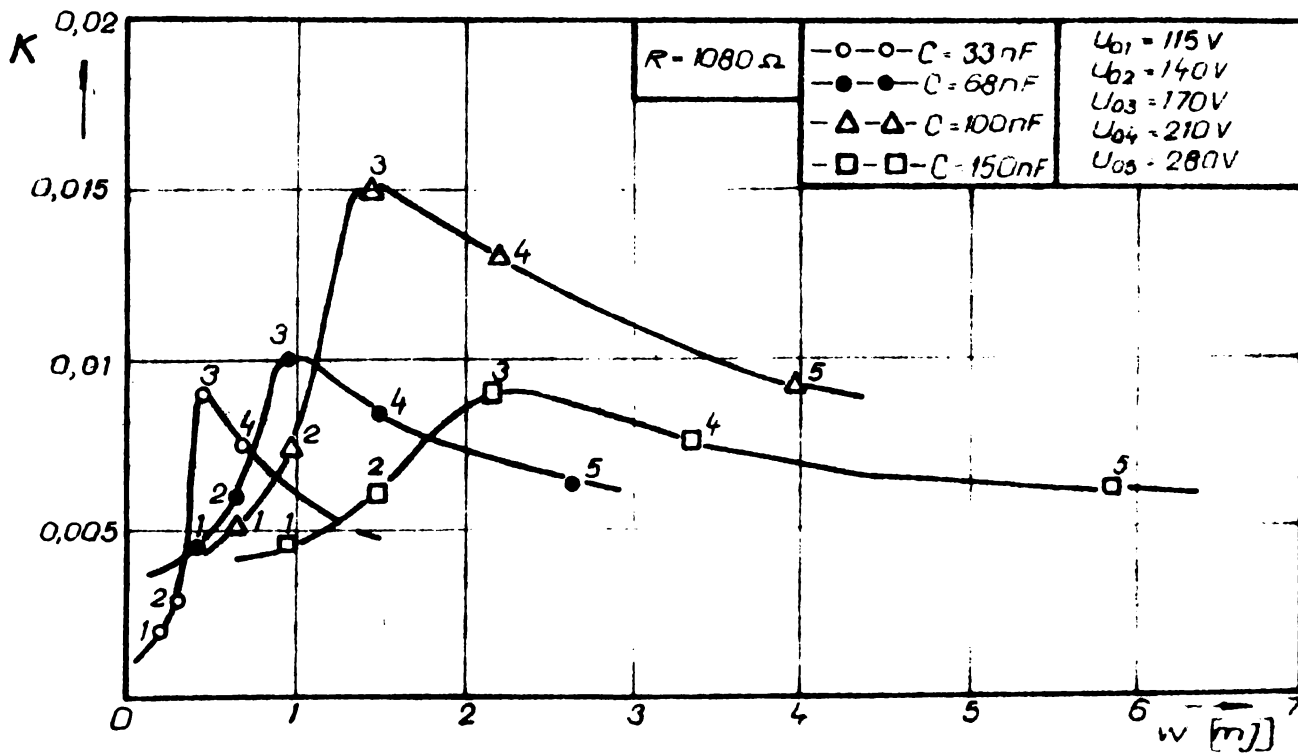


Fig. 7.20

marcate pe curbe reprezintă valorile rezistențelor prin care s-au obținut regimurile de frecvență variabilă.

În figurile 7.21...7.25 este reprezentată variația vitezei de erodare a materialului obiectului prelucrării.

O primă remarcă, valabilă pentru totalitatea curbelor rezultate, o constituie variația extremală a vitezei de erodare în funcție de frecvența descărcărilor electrice. Așa după cum era de așteptat, creșterea frecvenței a determinat și creșterea vitezei de erodare. În aceste condiții se ajunge însă la un moment dat la o saturație a produselor eroziunii în spațiul de lucru, fapt ce îngreunează evacuarea acestora. Ca urmare, o parte tot mai mare din energia introdusă se consumă pentru producerea descărcărilor fictive, care diminuează viteza de erodare. Fenomenul este cu atât mai accentuat cu cât energia descărcărilor electrice este mai mare.

Cea de-a doua remarcă desprinsă din analiza curbelor reprezentate constă în variația mai pronunțată a vitezei de erodare, la creșterea energiei descărcărilor electrice. Astfel, panta de creștere, respectiv de scădere a vitezei de erodare este mai mare la curbele situate la stînga diagramelor și de asemenea cu cât tensiunea de amorsare este superioară.

O variație asemănătoare prezintă și interstițiul lateral, curbele fiind redată în figurile 7.26...7.30.

În ceea ce privește conicitatea orificiilor în funcție de frecvența descărcărilor electrice, aceasta prezintă o variație oscilatorie. Din diagramele redată în figurile 7.31...7.35 rezultă că la rezistența $R = 540 \Omega$, pentru toate încercările efectuate s-au obținut cele mai mari valori ale conicității, indiferent de energia descărcărilor electrice. Conicități minime se înregistrează pentru rezistența $R = 470 \Omega$.

7.3.2. Influența parametrilor oscilațiilor forțate ale electrodului seculă.

Studiul influenței parametrilor oscilațiilor forțate ale electrodului seculă asupra indicilor tehnologici urmăriți a fost efectuat pentru două regimuri electrice cu rezultate semnificative în vederea optimizării procesului de prelucrare. În ceea ce privește capacitatea productivă a prelucrării, viteze de erodare maxime s-au obținut la tensiunea de amorsare $U_0 = 280 \text{ V}$. Pentru

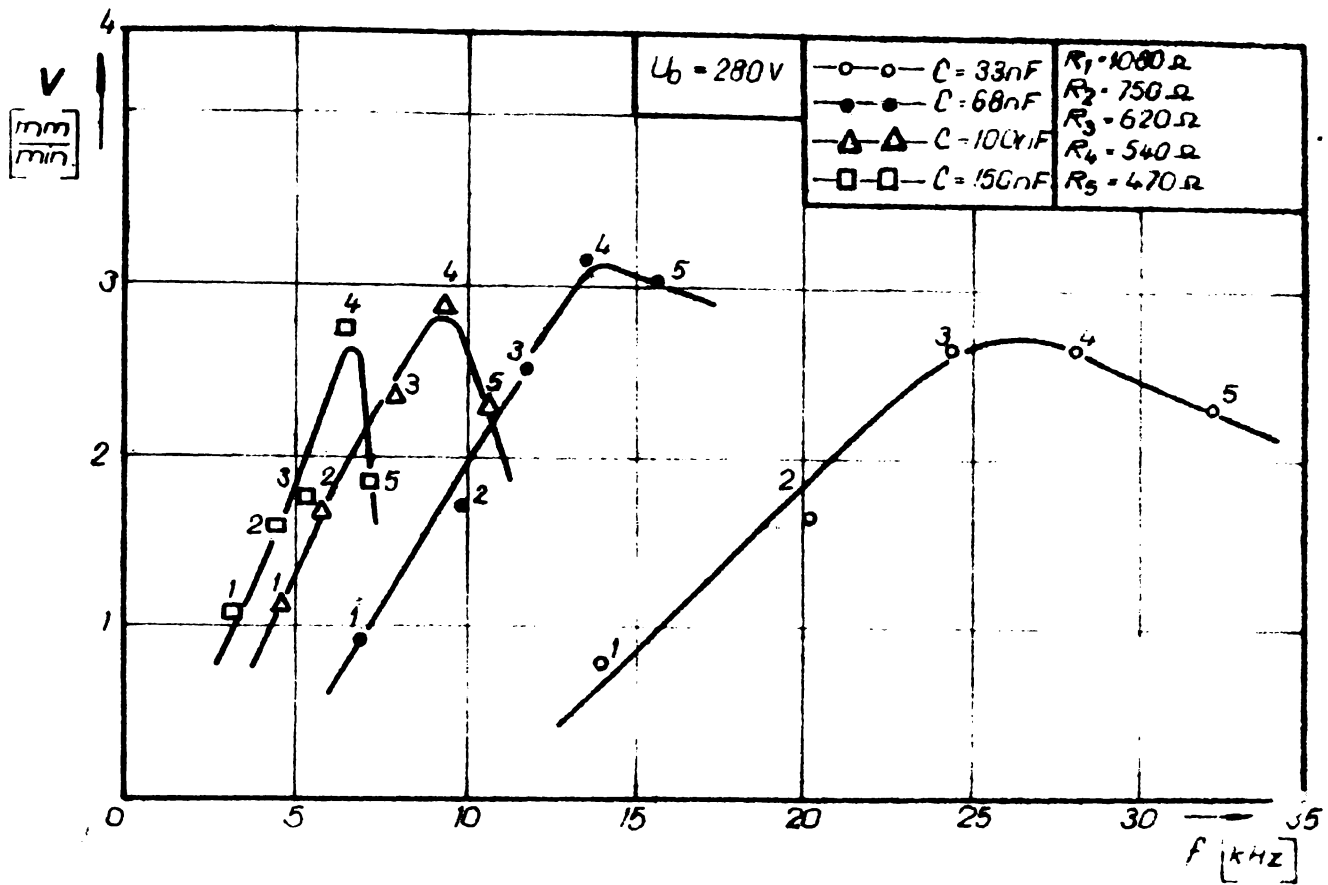


Fig. 7.21

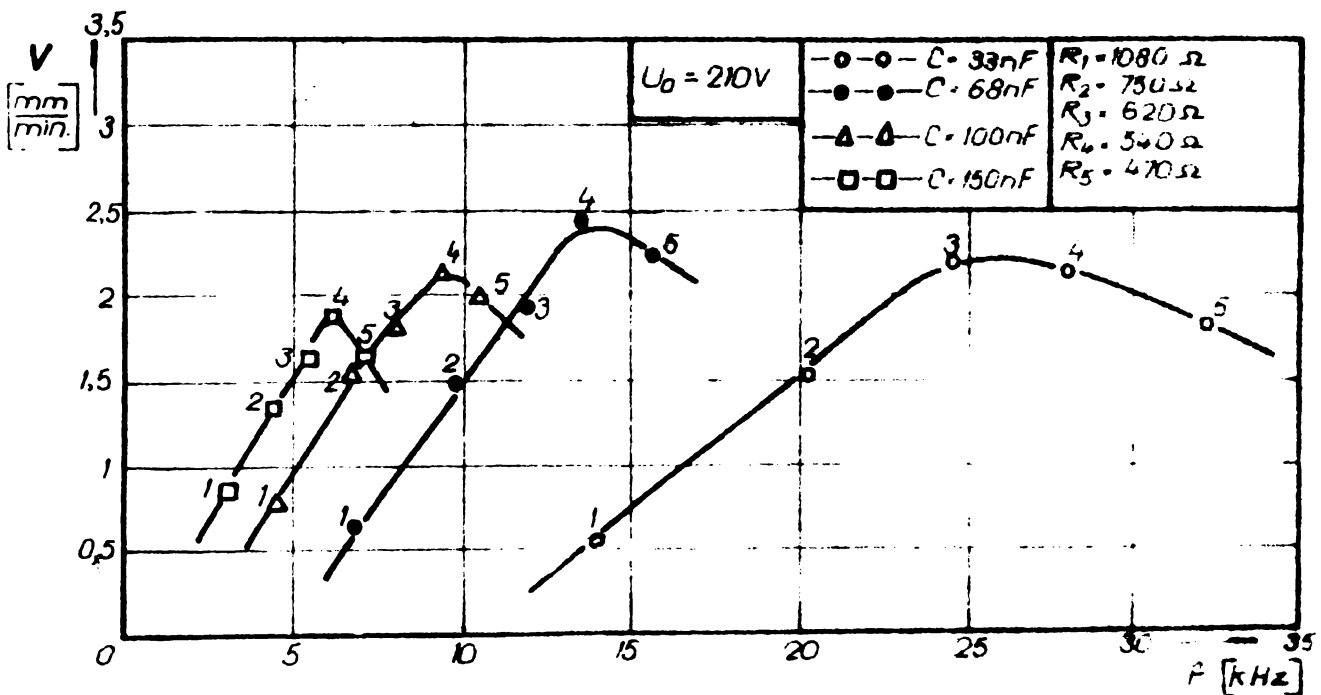


Fig. 7.22

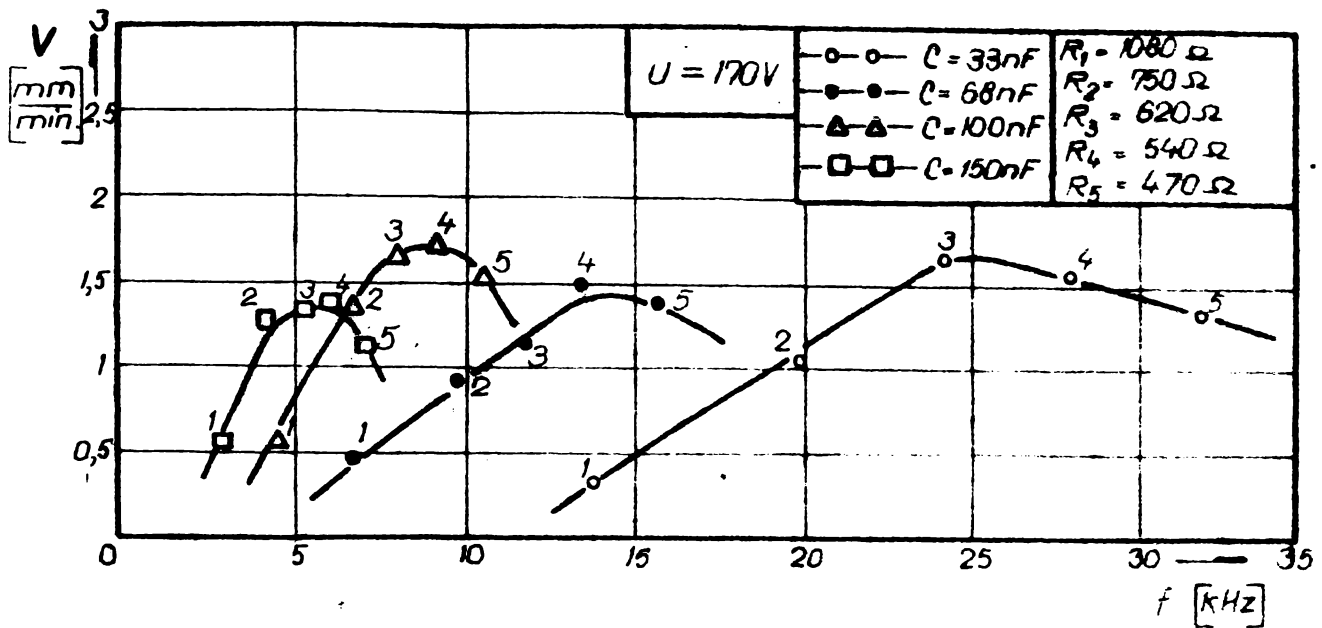


Fig. 7.23

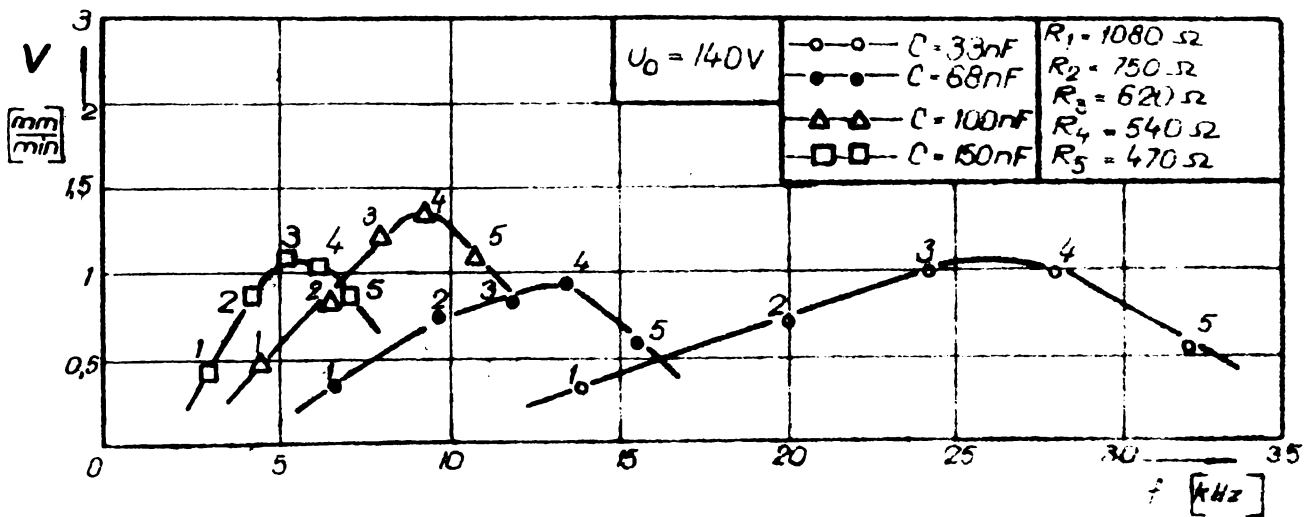


Fig. 7.24

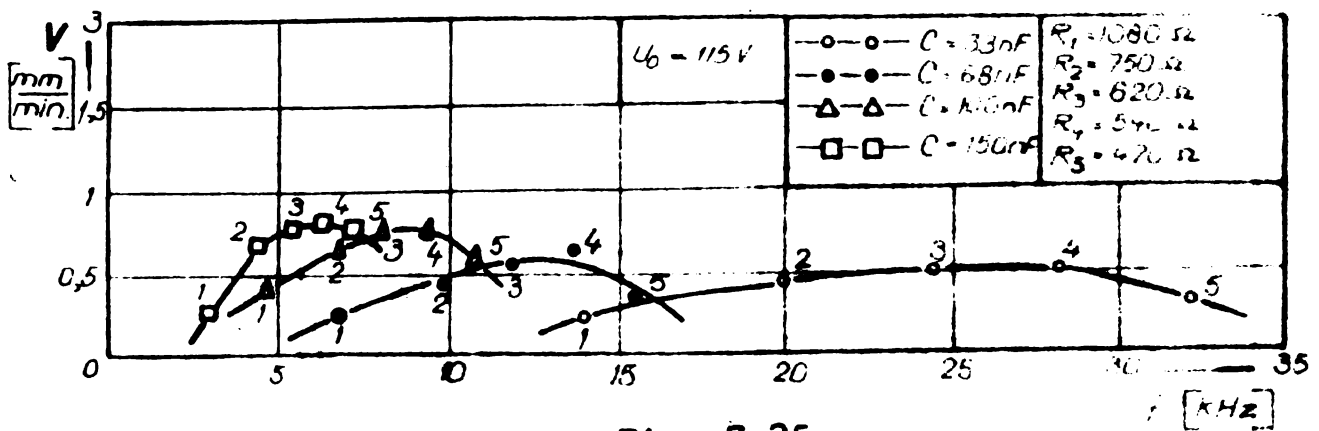


Fig. 7.25

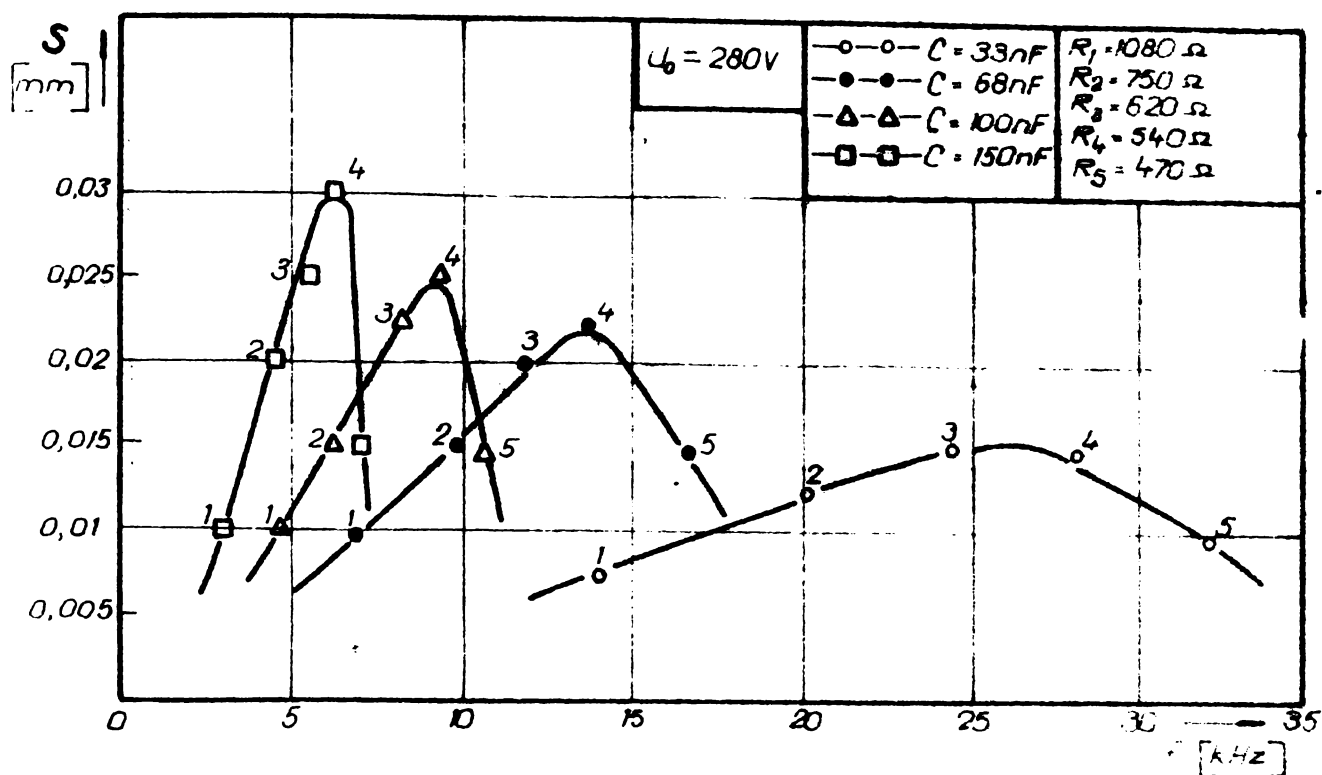


Fig. 7.26

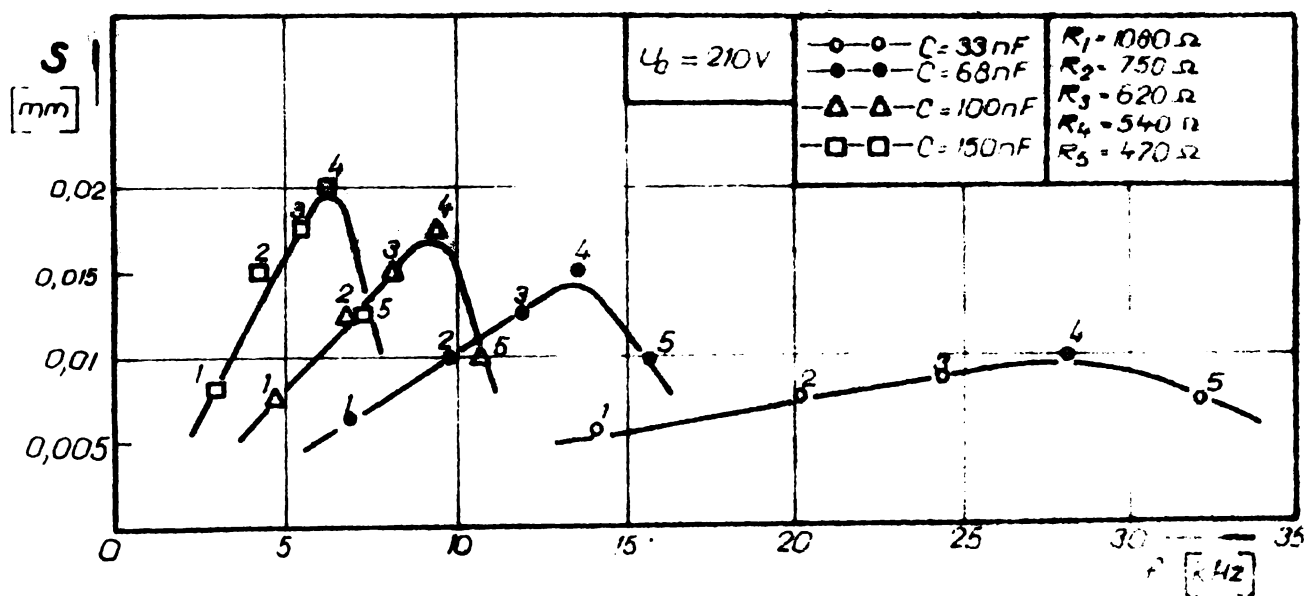


Fig. 7.27

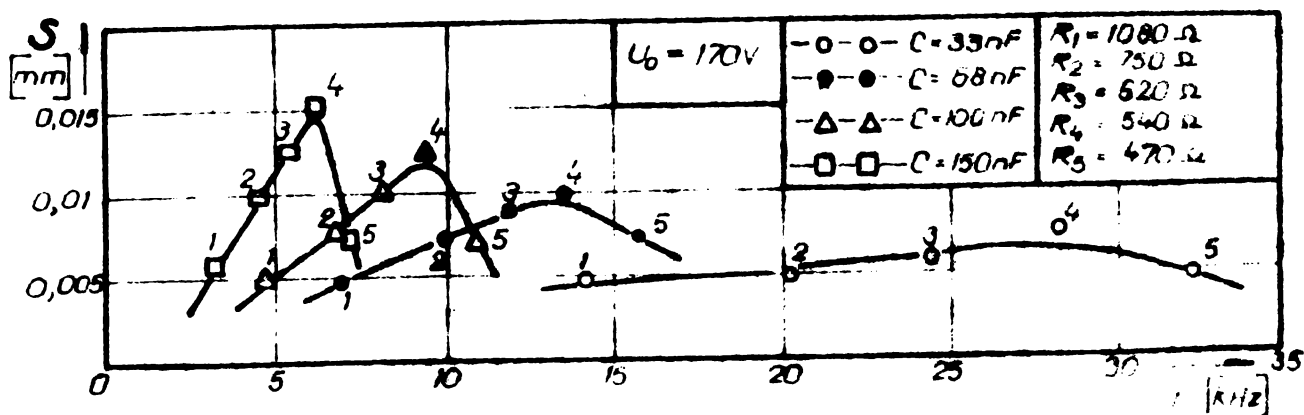


Fig. 7.28

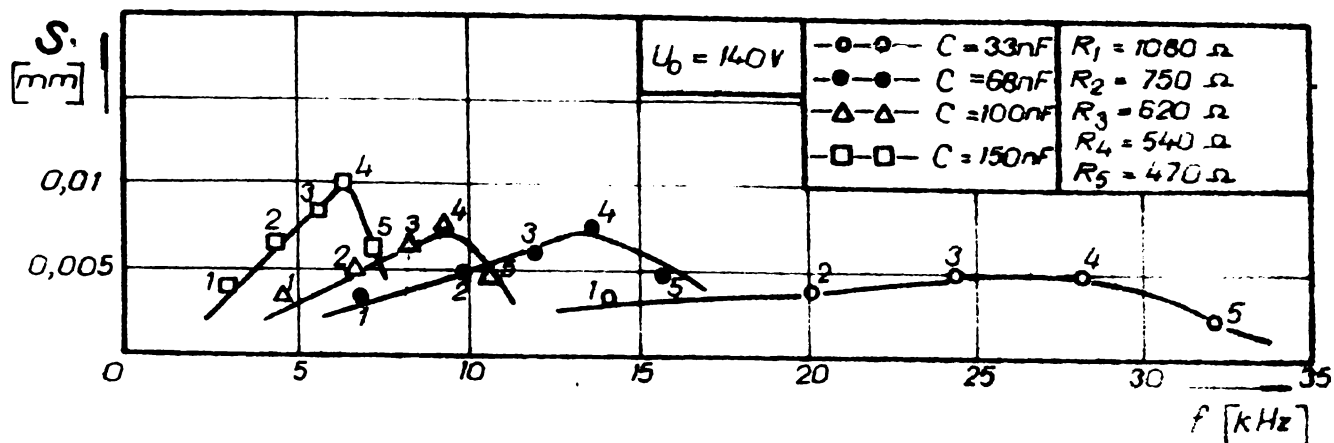


Fig. 7.29

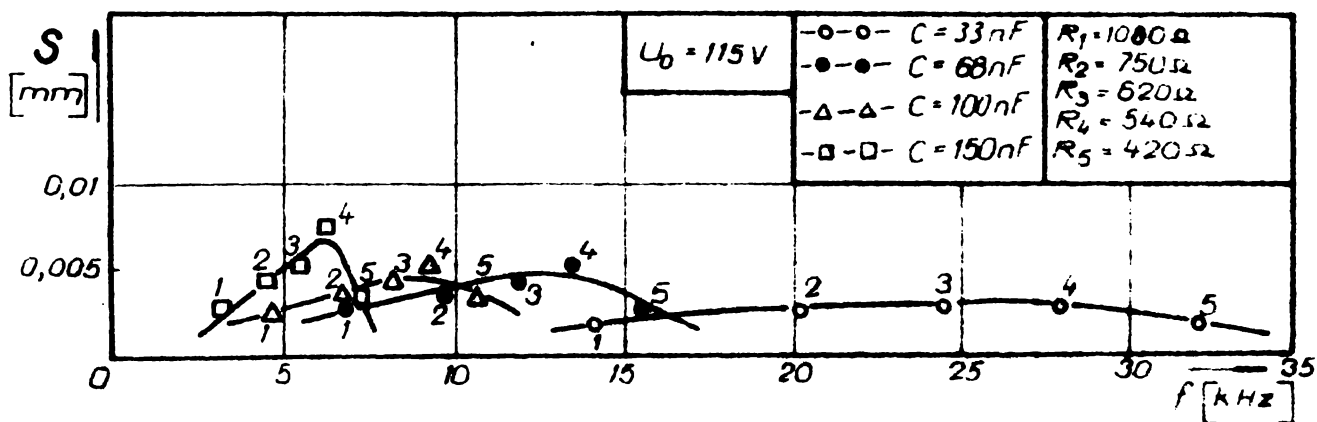


Fig. 7.30

rezistențe și capacități au fost reținute valorile $R = 620 \Omega$ și $C = 33 \text{ nF}$, respectiv $R = 540 \Omega$ și $C = 68 \text{ nF}$, la care concitarea orificiilor a fost mai mică de $0,01 \text{ mm}$.

Influența regimului oscilațiilor forțate ale electrodului sculă a fost studiată pentru trei valori ale frecvenței vibratorului electromagnetic (45 Hz, 90 Hz, 180 Hz) amplitudinile rezultate prin modificarea tensiunii de alimentare a bobinei.

Variația vitezei de erodare în funcție de parametrii oscilațiilor forțate este reprezentată în figurile 7.36 și 7.37. O primă constatare este aceea că pe măsura creșterii frecvenței se obțin și creșteri importante ale vitezei de erodare. În ceea ce privește amplitudinea oscilațiilor, aceasta determină o variație extremă a vitezei de erodare.

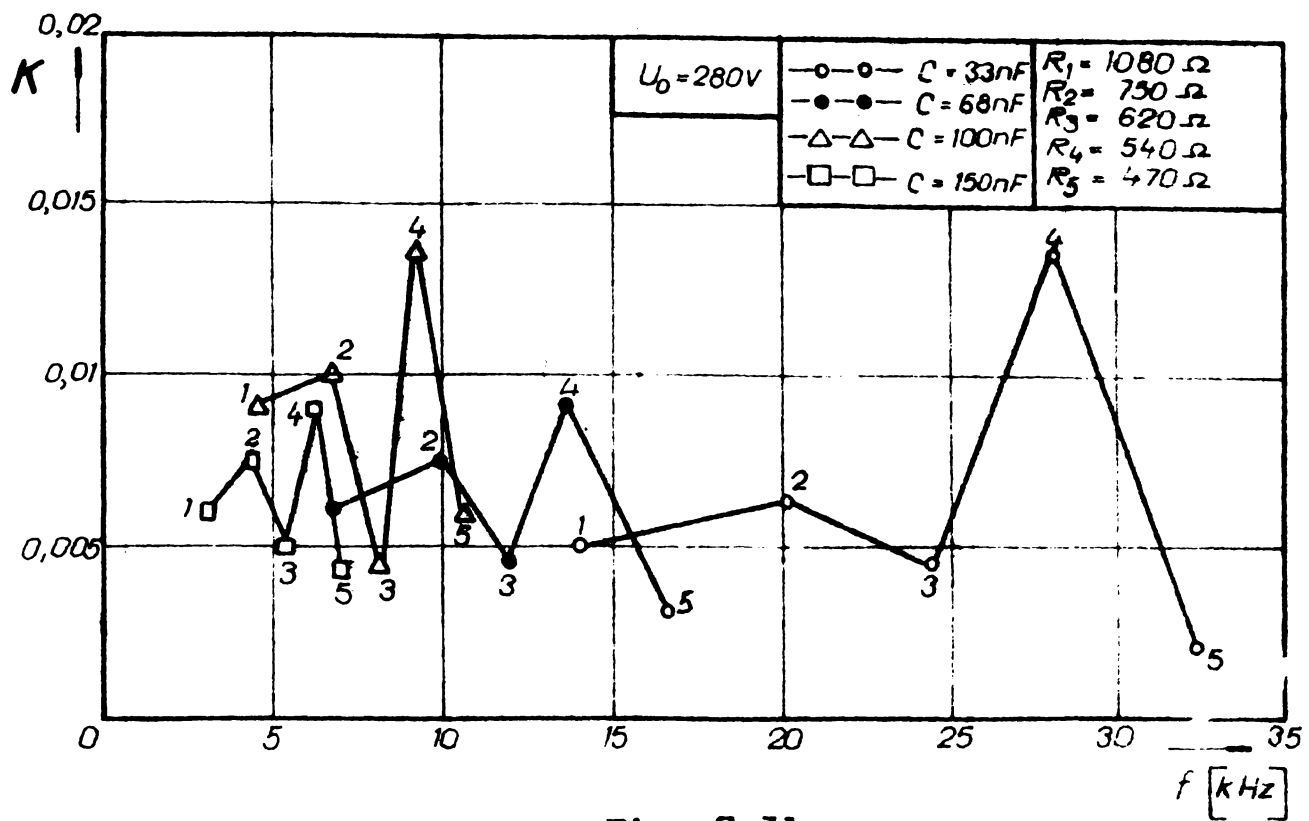


Fig. 7.31

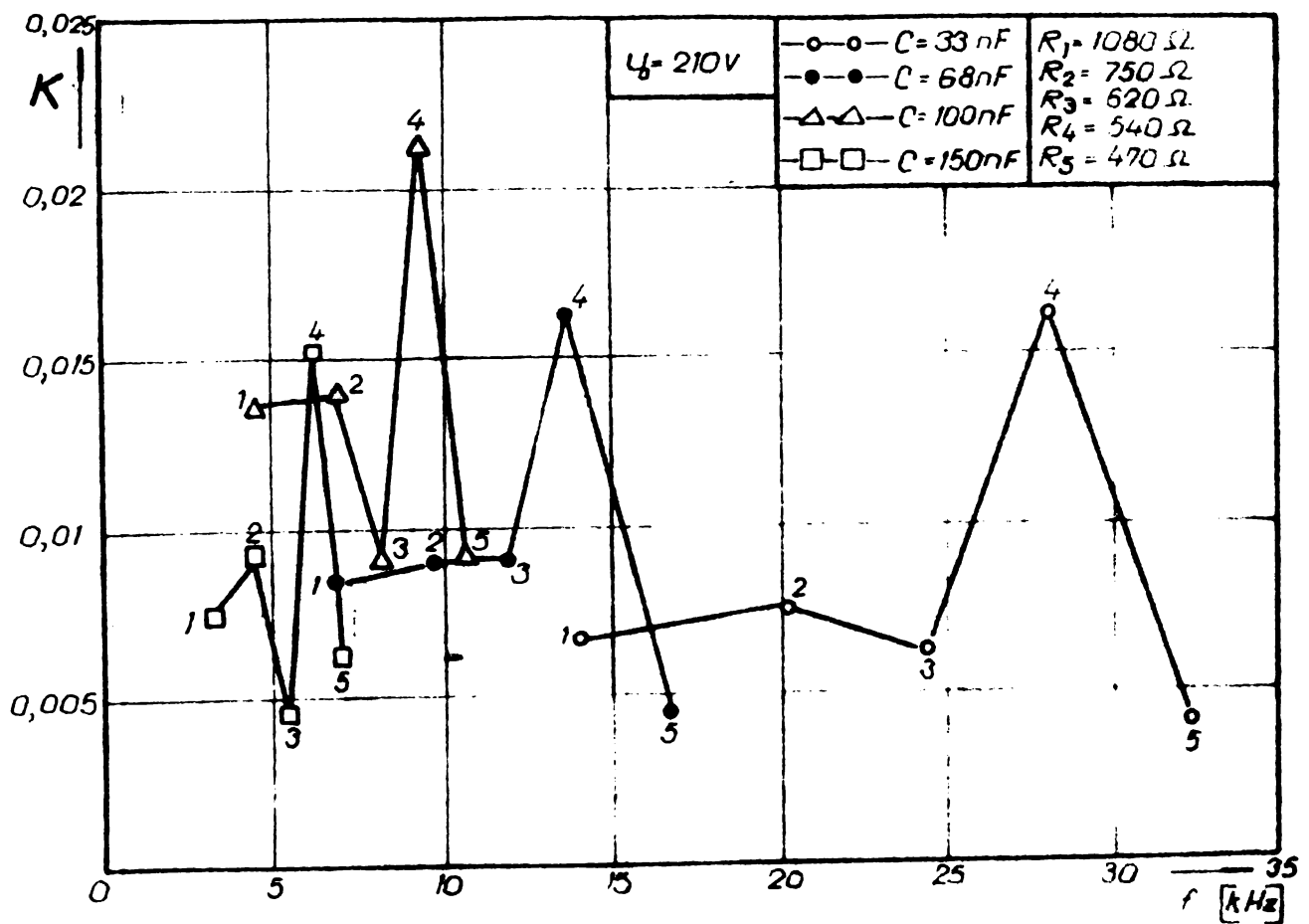


Fig. 7.32

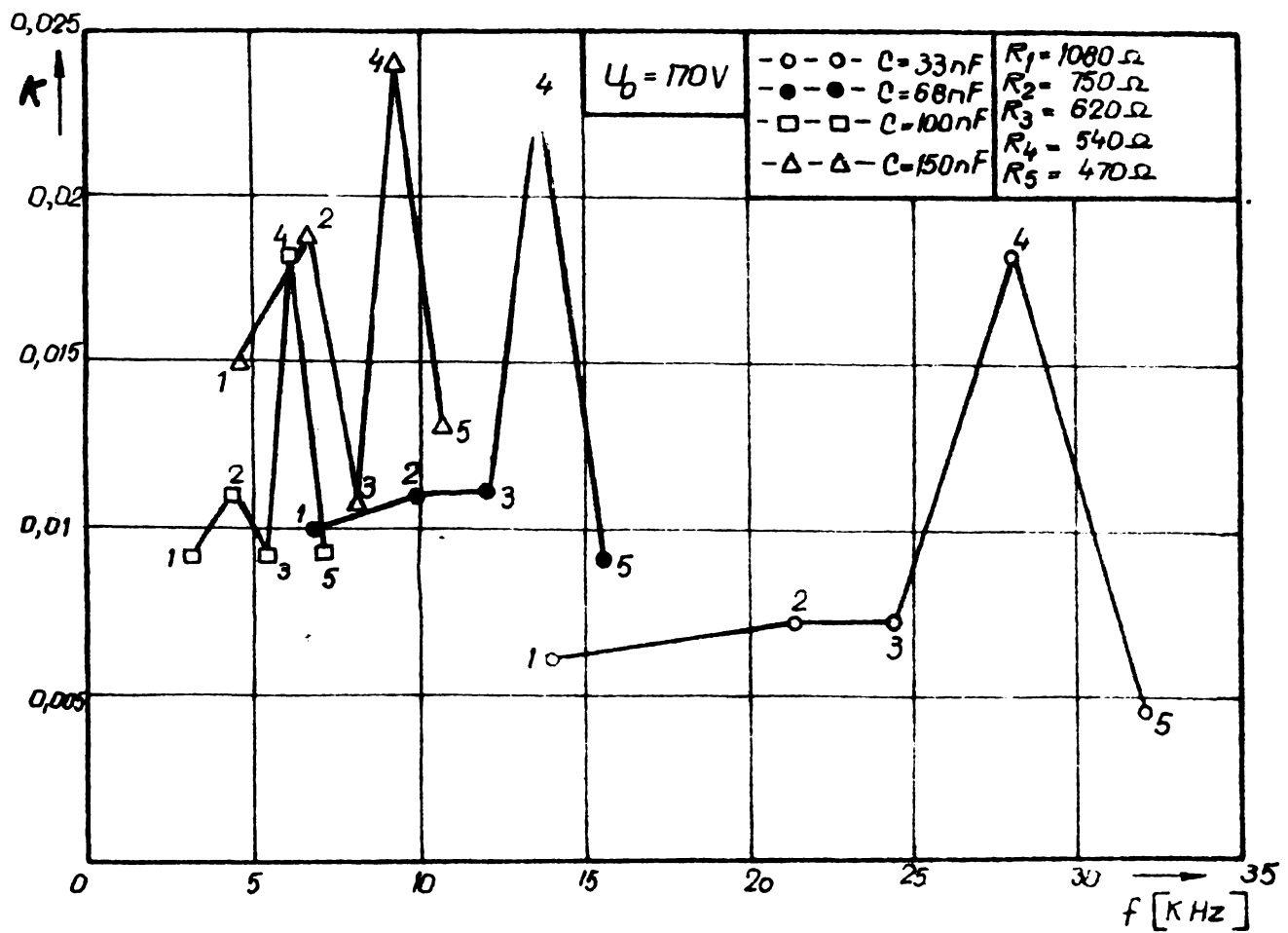


Fig. 7. 33

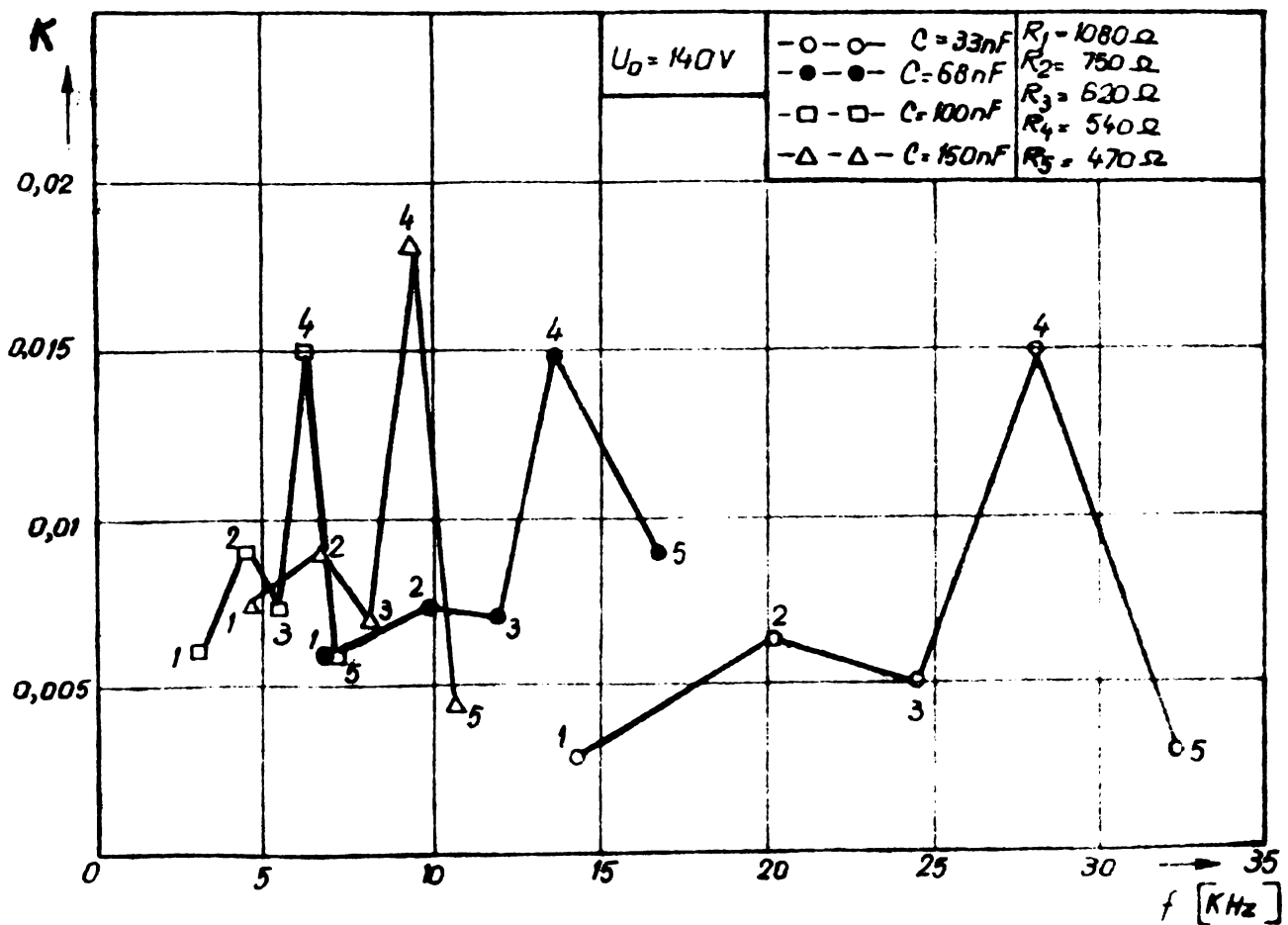


Fig. 7. 34

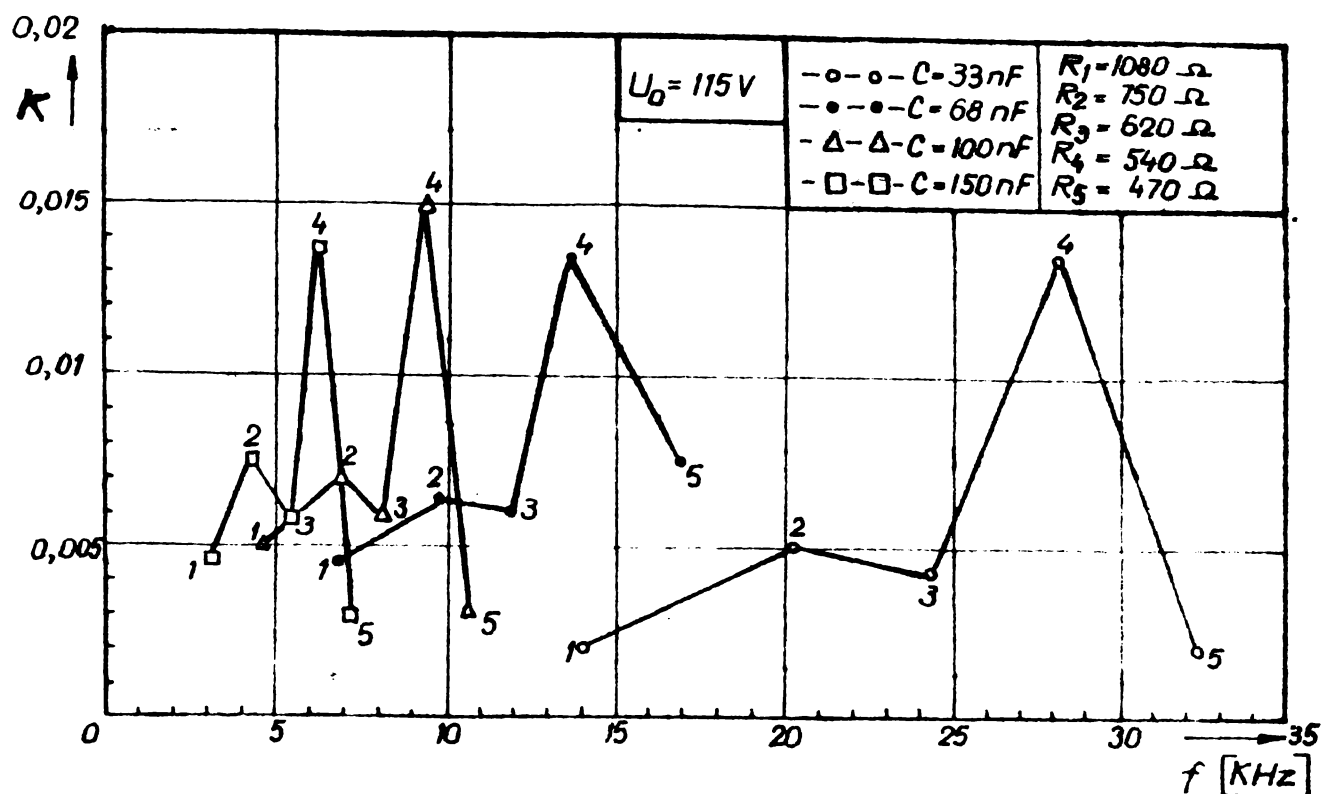


Fig. 7.35

Efectul maxim al oscilațiilor forțate se obține în funcție de ansamblul factorilor ce influențează procesul de prelucrare, existind o corelare între parametrii . Oscilațiile electrodului contribuie la stabilizarea reglării automate a interstițiului, acționând asupra factorilor perturbatori. Se poate considera că în principal, frecvența oscilațiilor acționează asupra particulelor erodate influențând concentrația acestora în interstițiu, iar amplitudinea oscilațiilor determină modificarea mărimii interstițiului de amorsare a descărcărilor electrice.

În curbele reprezentate se evidențiază faptul că la amplitudini peste valoarea optimă ($A_{opt} = 0,5 \mu m$ la $\nu = 45 Hz$, $A_{opt} = 3,1 \mu m$ la $\nu = 90 Hz$ și $A_{opt} = 2,1 \mu m$ la $\nu = 180 Hz$) viteza de erodare se micșorează, ca urmare a instabilității create prin alternarea descărcărilor electrice în scurtcircuit și în gol. Vitezele de erodare maxime obținute sînt mai mari decît în cazul prelucrării fără oscilarea electrodului, de 2.2 ori la $\nu = 45 Hz$, de 3,5 ori la $\nu = 90 Hz$ și de 4,5 ori la $\nu = 180 Hz$, pentru regimul dat de $R = 540 \Omega$ și $C = 68 nF$, de 1,45 ori la $\nu = 45 Hz$, de 2,35 ori la $\nu = 90 Hz$ și de 2,95 ori la $\nu = 180 Hz$, pentru regimul dat de $R = 620 \Omega$ și $C = 33 nF$. La regimul $R = 620 \Omega$ și $C = 33 nF$ se observă că în cazul frecvenței $\nu = 45 Hz$, la amplitudini mai mari de $3 \mu m$, viteza de erodare scade sub valoarea obținută la prelucrare fără oscilații, procesul devenind instabil.

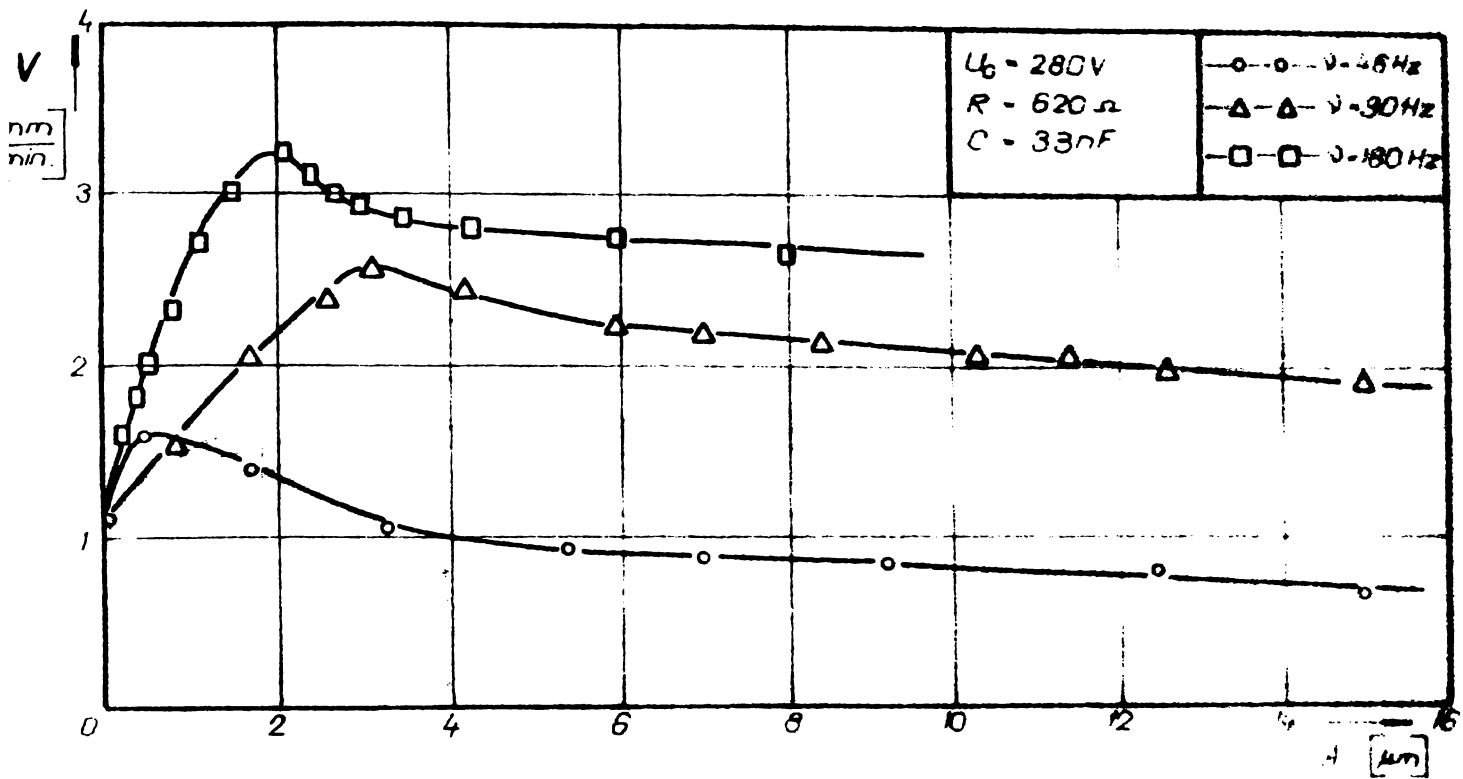


Fig. 7.36

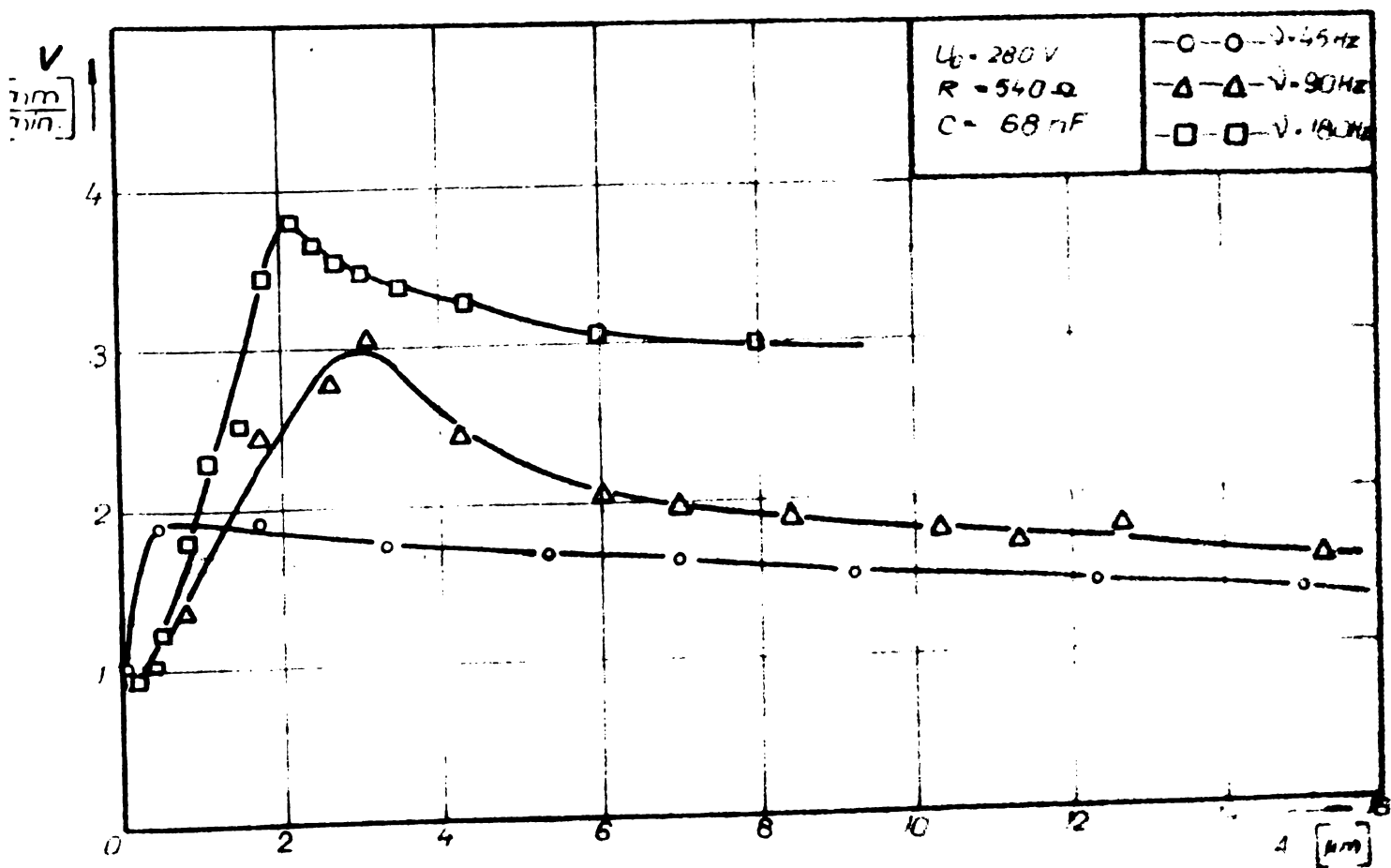


Fig. 7.37

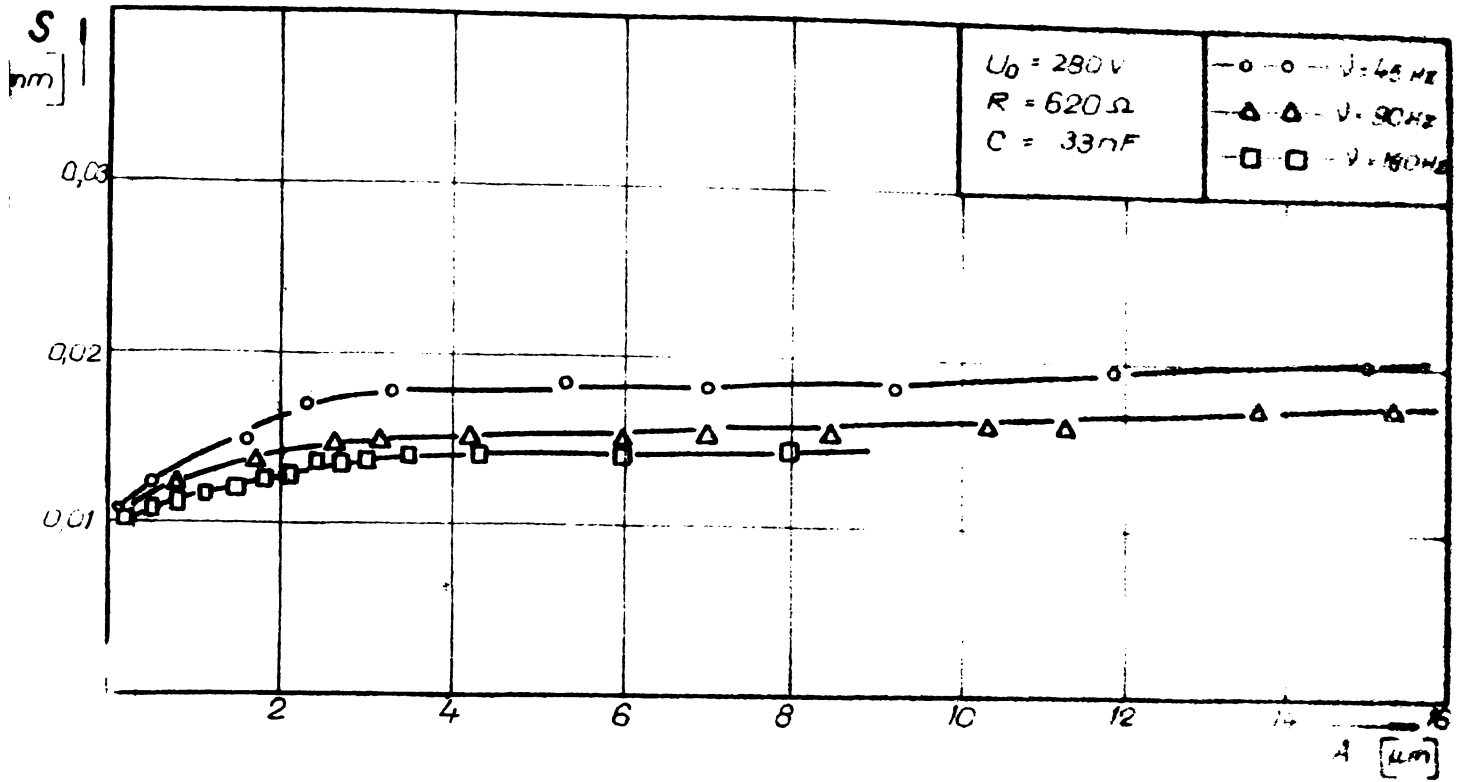


Fig. 7. 38

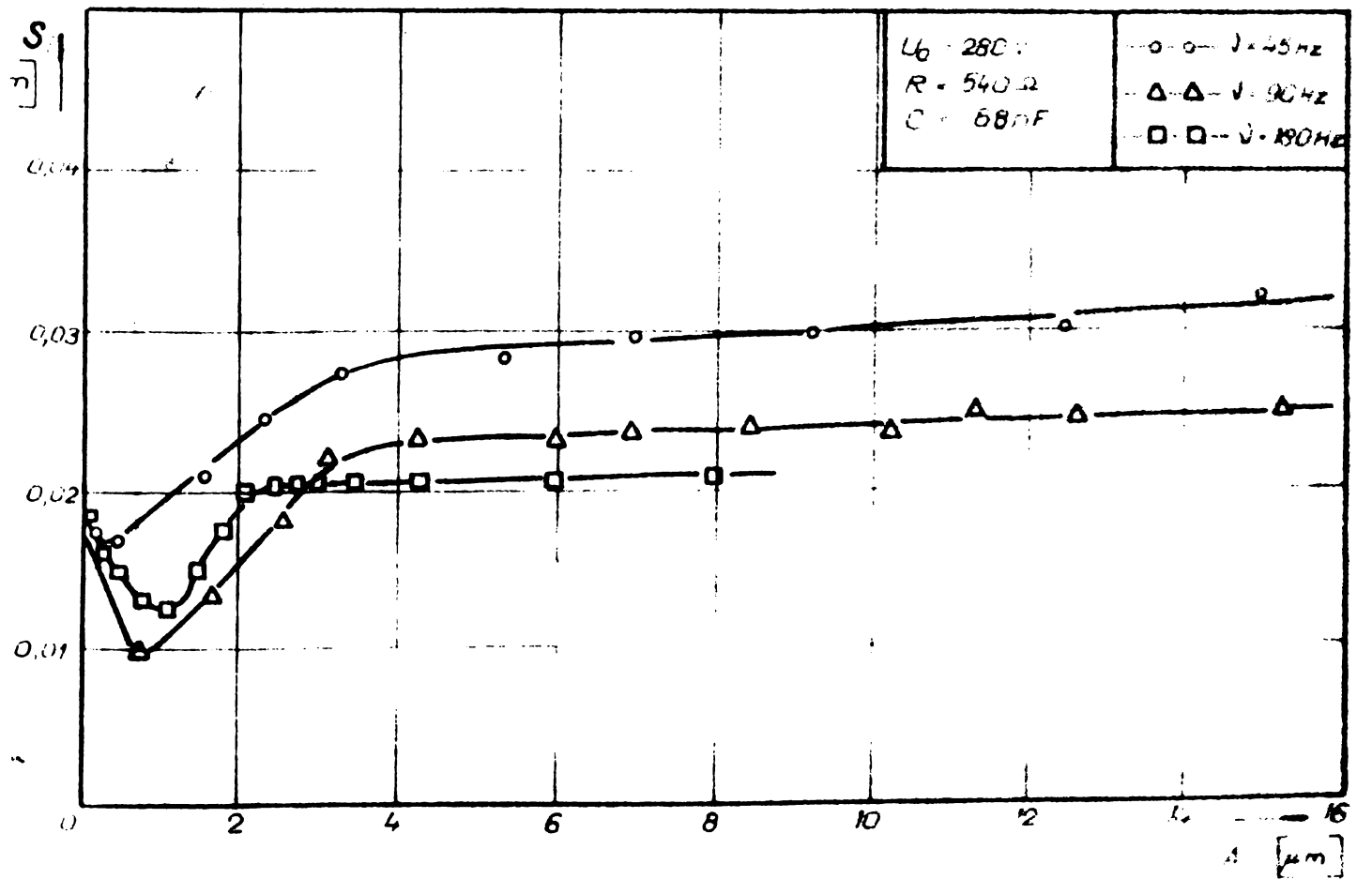


Fig. 7.39

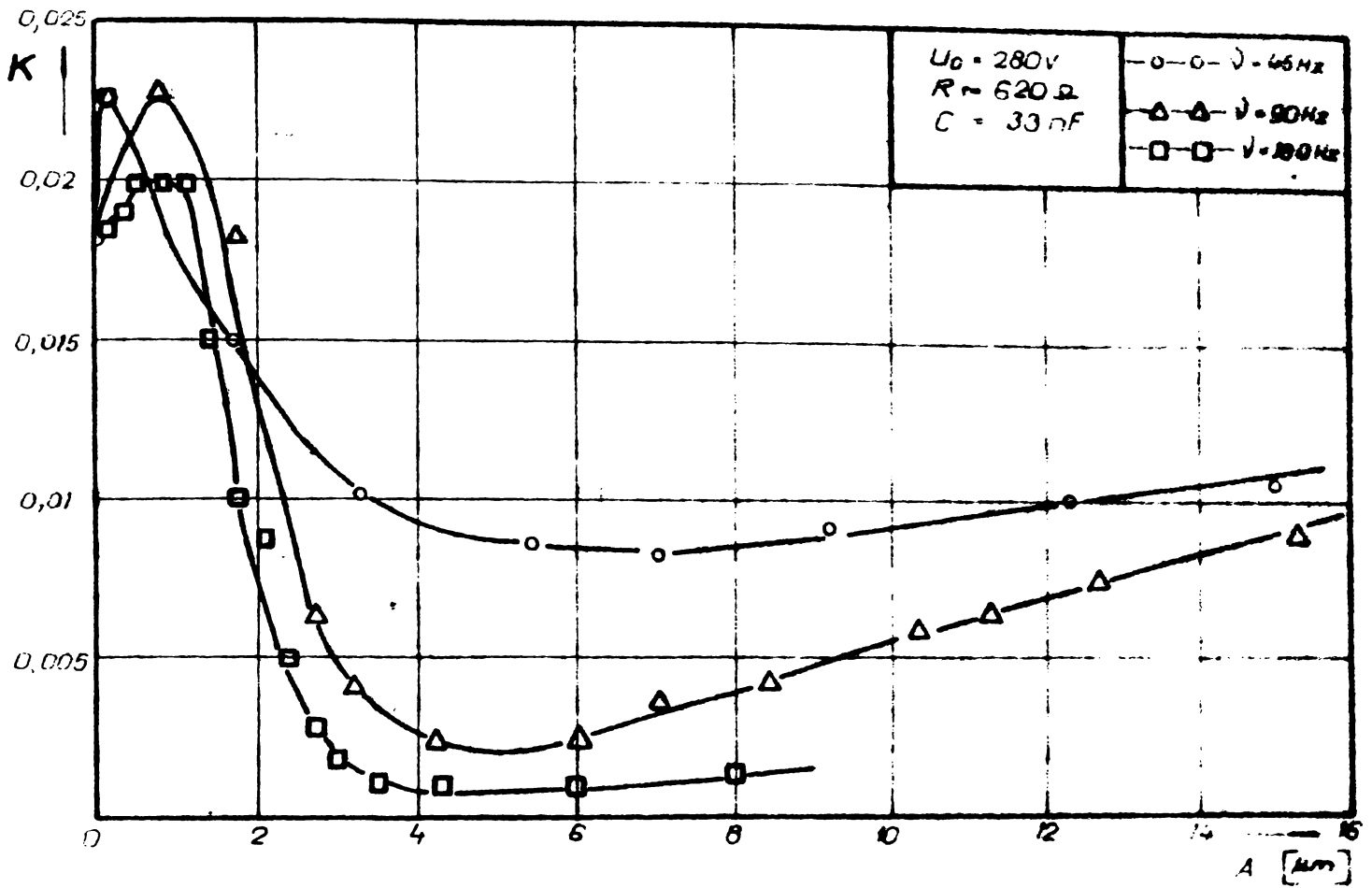


Fig. 7.40

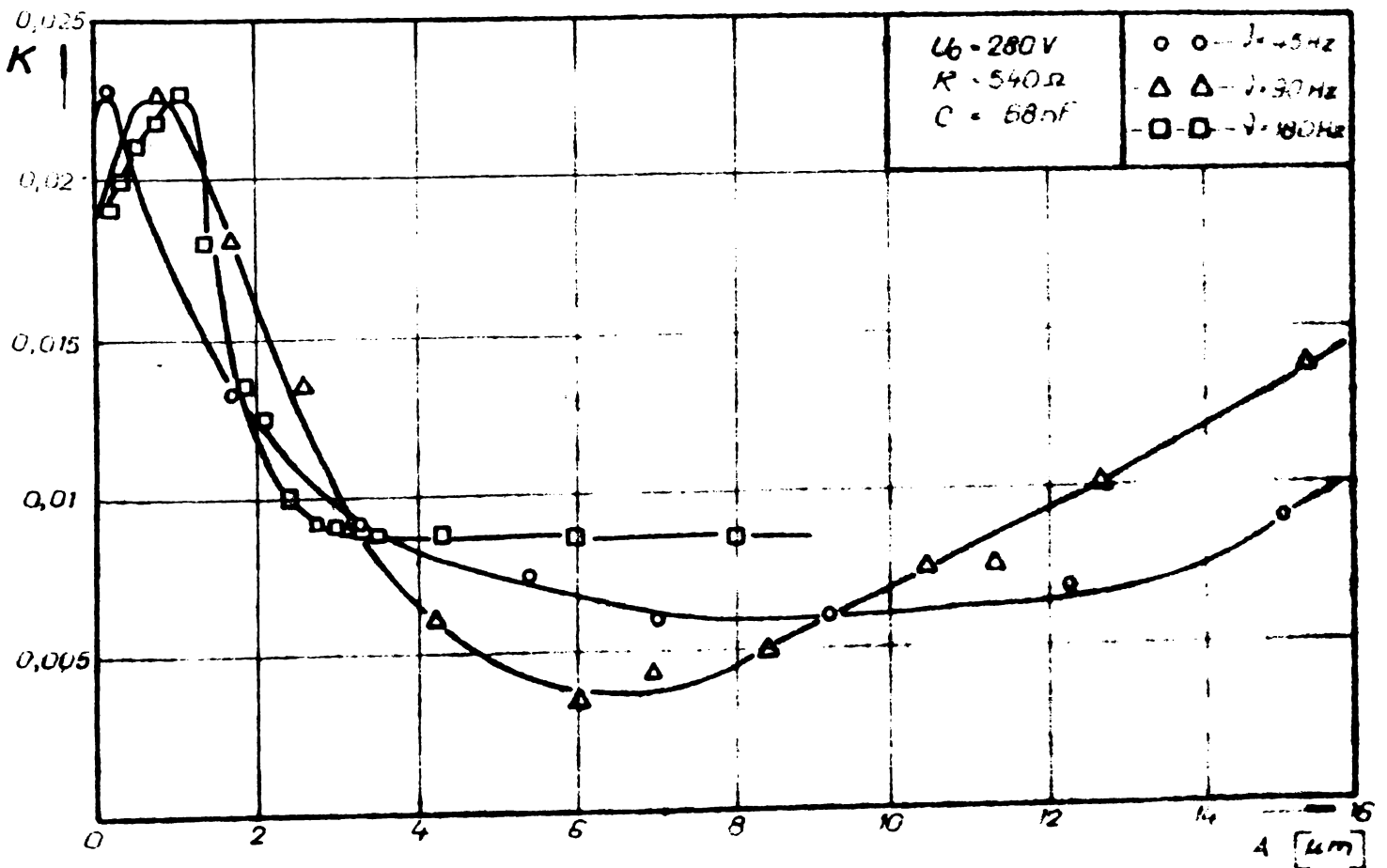


Fig. 7.41

Variația mărimii interstițiului lateral în funcție de amplitudinea și frecvența oscilațiilor forțate ale electrodului este redată în diagramele din figurile 7.38 și 7.39. Se constată că mișcarea oscilatorie a electrodului determină o creștere a interstițiului lateral, invers proporțională cu frecvența vibrațiilor, cu excepția regimului cu $R = 540 \Omega$, $C = 68 \text{ nF}$, la valori mici ale amplitudinii.

Din curbele reprezentate în figura 17.40 și figura 17.41, ce exprimă variația conicității orificiilor în funcție de frecvența și amplitudinea oscilațiilor se constată o influență deosebit de importantă, cu implicații majore asupra preciziei de prelucrare. După o ușoară creștere a conicității, la amplitudini de până la $1 \mu\text{m}$, se înregistrează o scădere bruscă, la valori sub $0,01 \text{ mm}$. Această variație a conicității orificiilor în funcție de parametrii oscilațiilor forțate ale electrodului demonstrează faptul că abaterea de formă conică se datorează în principal descărcărilor laterale prin punți conductoare formate de particulele erodate, la evacuarea lor din spațiul de lucru. Întrucât concentrația acestora se reduce sub influența mișcării oscilatorii a electrodului, rezultă în consecință micșorarea abaterii de prelucrare.

7.3.3. Influența conductibilității electrice a lichidului de lucru.

Lichidul de lucru, apa deionizată, influențează procesul de prelucrare prin conductibilitatea electrică. În cazul unei conductibilități electrice reduse, tensiunea necesară pentru străpungerea lichidului este mai mare, iar creșterea numărului de ioni determină apariția proceselor electrochimice, care au efect negativ asupra prelucrării.

Încercările experimentale efectuate au avut drept scop determinarea domeniului de reglare a circulației apei prin schimbătorul de ioni al instalației. Ca parametri ai regimului electric s-au folosit $U_0 = 280 \text{ V}$, $R = 540 \Omega$, $C = 68 \text{ nF}$, iar ca parametri ai oscilațiilor forțate $A = 3,1 \mu\text{m}$ și $\nu = 180 \text{ Hz}$. În diagrama din figura 7.42 s-a reprezentat variația vitezei de erodare în funcție de conductibilitatea electrică a apei deionizate. Domeniul optim de reglare rezultat este $10...20 \mu\text{S/cm}$. La creșterea conductibilității fenomenele electrochimice se accentuează, for-

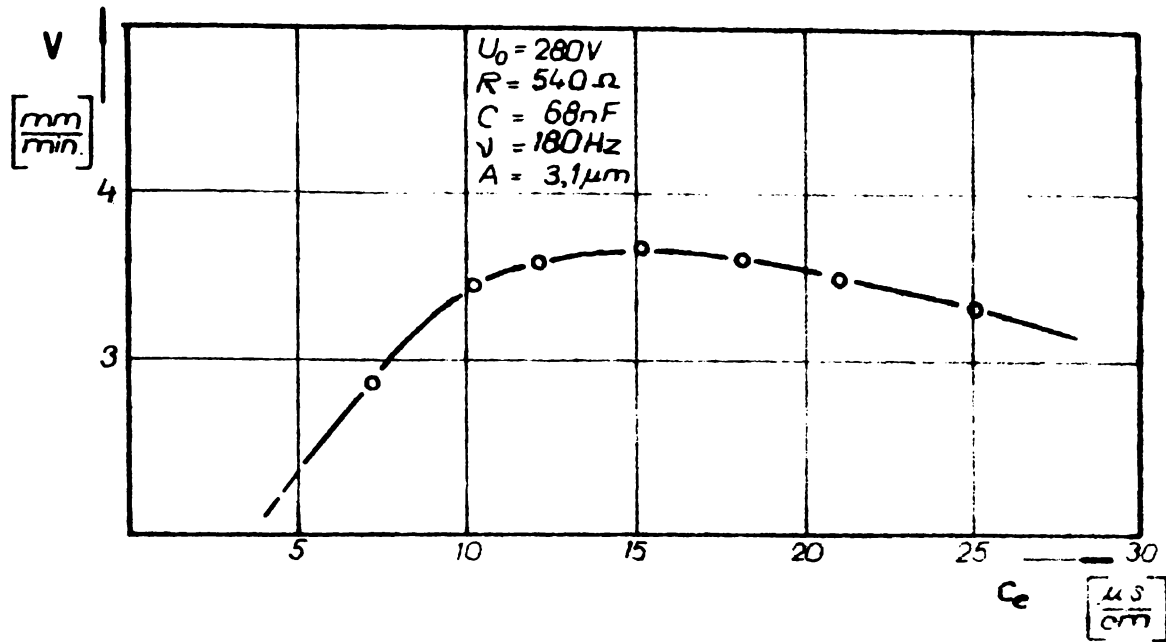


Fig. 7.42

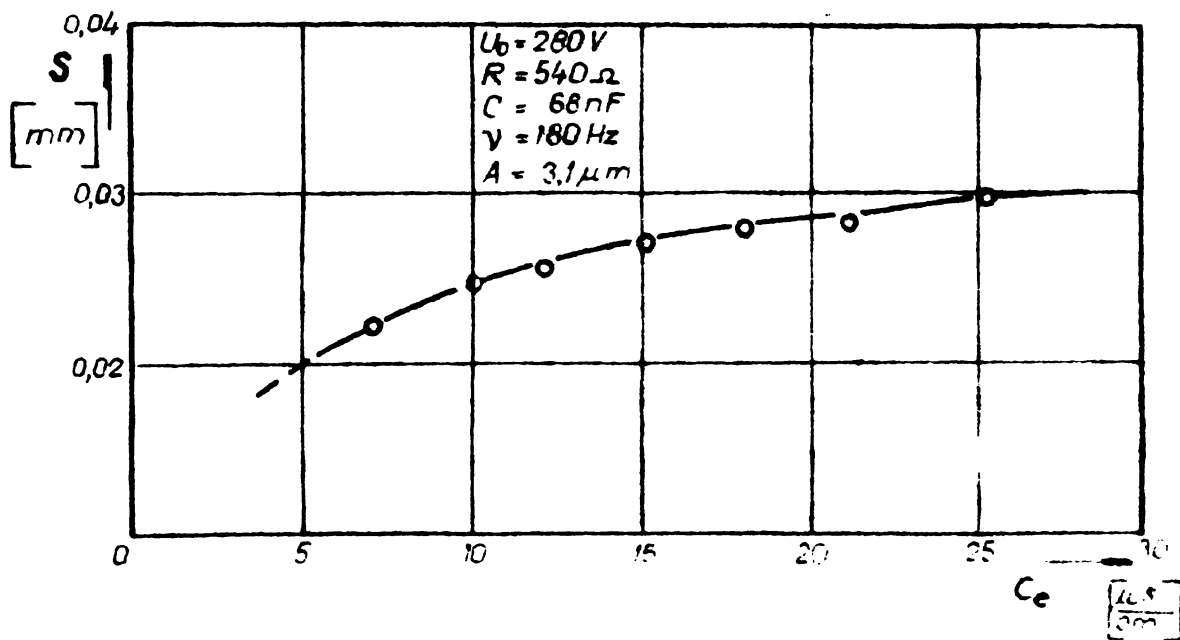


Fig. 7.43

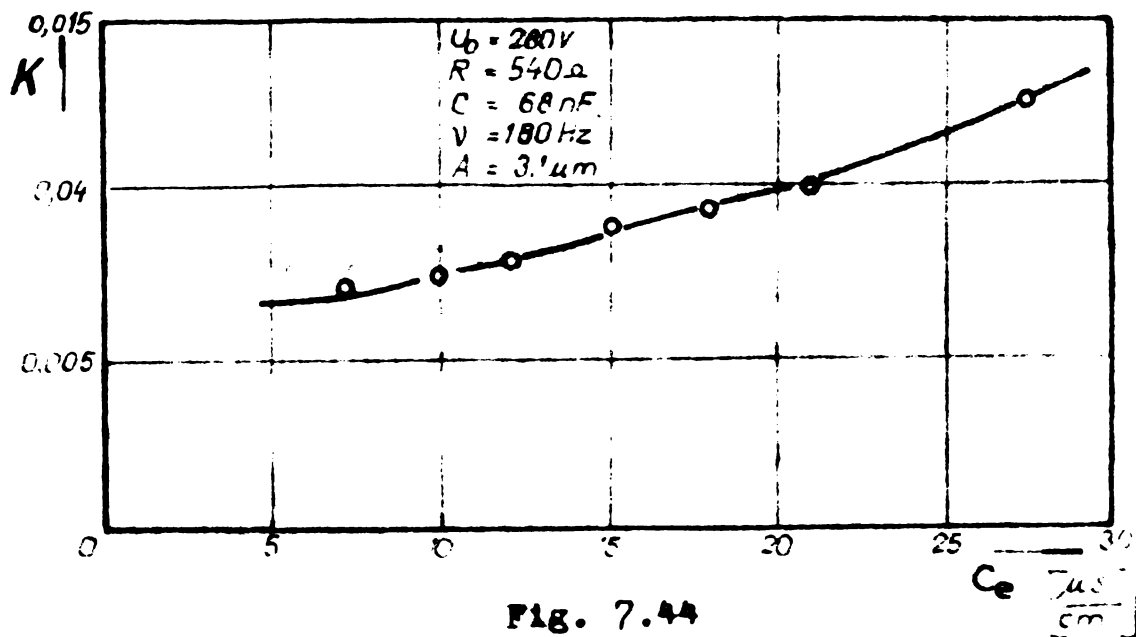


Fig. 7.44

mîndu-se pelicula pasivizatoare și bule de hidrogen, care măresc rigiditatea lichidului dielectric.

Oreșterea conductibilității electrice a lichidului de lucru determină mărirea interstițiului lateral și a conicității orificiilor, după cum se observă în diagramele din figurile 7.43 și 7.44, cauza constituind-o fenomenele de dizolvare anodică ce apar în spațiul de lucru.

7.3.4. Influența adîncimii de prelucrare.

Este cunoscut faptul că, cu cît crește adîncimea de prelucrare, condițiile de desfășurare ale procesului electroeroziv se înrăutățesc, produsele eroziunii aglomerîndu-se în interstițiul lateral, de unde undă de șoc nu reușește să le îndepărteze. Deci oscilațiile forțate ale electrodului au un efect pozitiv în evacuarea particulelor erodate, la anumite adîncimi procesul nu mai poate continua, energia fiind consumată prin descărcări electrice fictive. Fenomenele sînt evidențiate prin reprezentarea variației vitezei de erodare și a conicității orificiilor în funcție de adîncimea de prelucrare (figurile 7.45 și 7.46). La un anumit proces de prelucrare a devenit instabil, nemi fiind posibilă continuarea. Este semnificativ totuși valoarea raportului dintre adîncimea și diametrul orificiului ($h/d = 20$) pînă la care prelucrarea a fost posibilă.

7.4. Concluzii.

Rezultatele încercărilor experimentale efectuate au permis stabilirea parametrilor tehnologici optimi de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor de diametru 0,2...0,3 mm. Față de rezultatele obținute de alți cercetători se apreciază că performanțele realizate sînt superioare. Astfel, viteza de erodare este de pînă la 4 ori mai mare, iar raportul dintre adîncime și diametru de 2,5 ori mai mare. Aceste performanțe se datorează construcției îmbunătățite a sistemului de reglare automată a avansului electrodului scule, utilizării unor regimuri electrice și de oscilare forțate a electrodului optime, precum și a unui lichid dielectric cu proprietăți corespunzătoare.

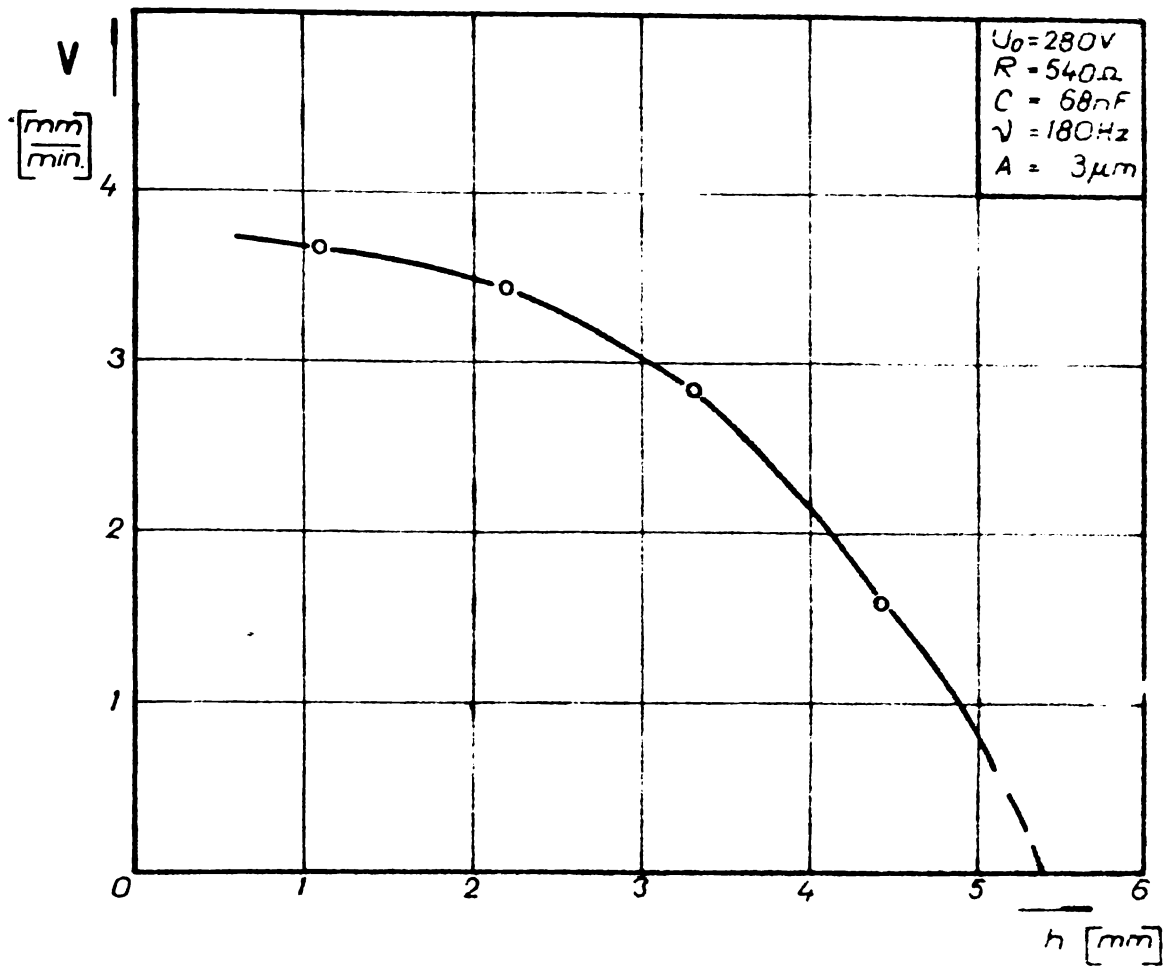


Fig. 7.45

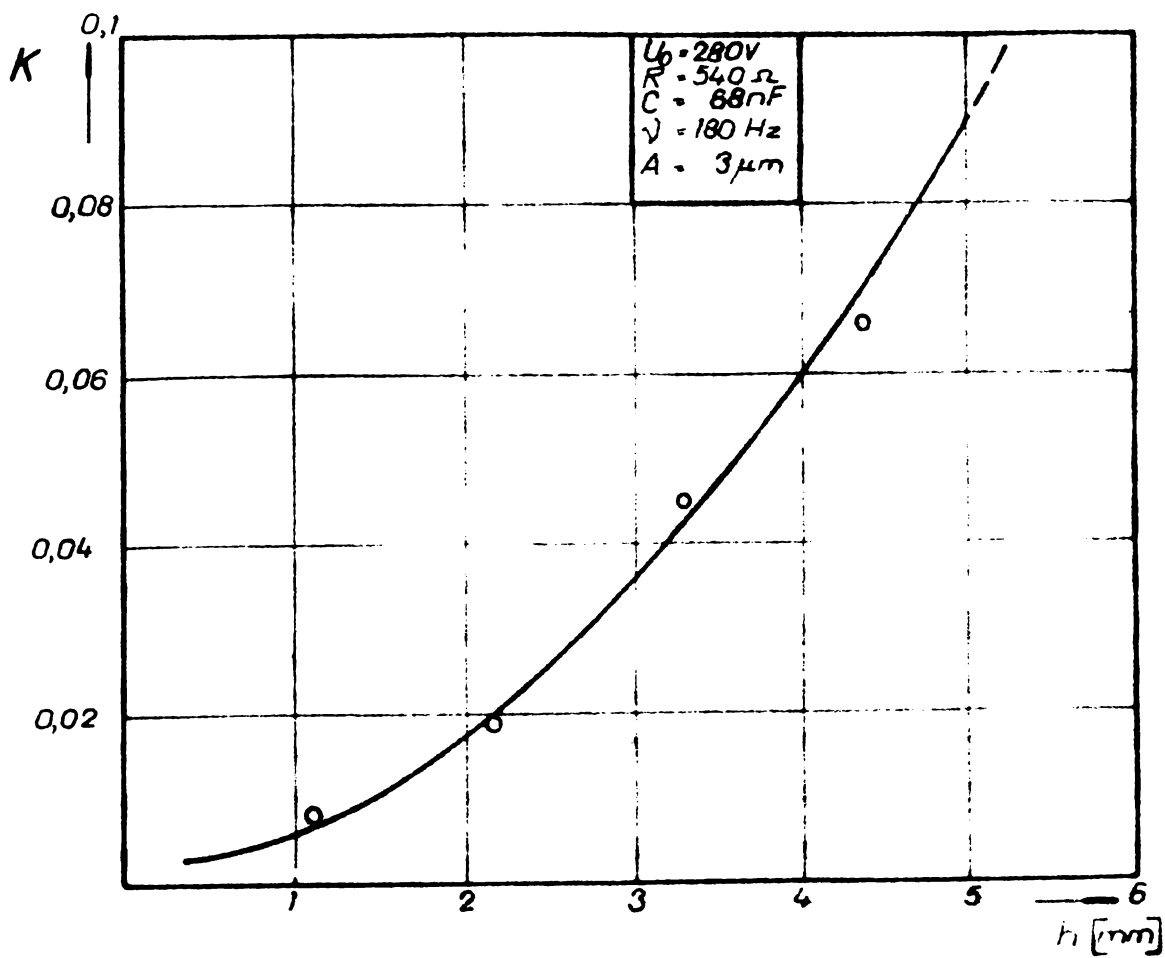


Fig. 7.46

8. APLICAREA INDUSTRIALA A CERCETARILOR

8.1. Unele considerații generale.

Din cele constatate pînă în prezent în întreprinderile de mecanică fină din țara noastră, tehnologia folosită pentru prelucrarea microalezajelor este cea clasică, bazată pe așchieria materialului și care, pentru diametre mai mici de 0,4 mm este dependentă de importul de scule.

În această categorie se află și prelucrarea pulverizatoarelor de la injectoarele motoarelor Diesel, a căror orificii au diametrul cuprins între 0,24... 0,7 mm. În figura 8.1 se arată câteva pulve-

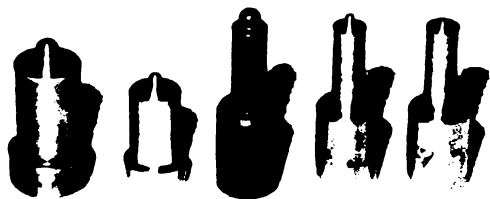


Fig. 8.1. Pulverizatoare ale injectoarelor motoarelor Diesel.

rizatoare din gama ce se produce la întreprinderea de mecanică fină din Sinaia. Dacă în ceea ce privește tipurile de pulverizatoare cu orificii de diametru mai mare de 0,4 mm, prelucrarea acestora prin găurire cu burghiu spiral nu ridică probleme, în schimb pentru cele cu orificii de diametru mai mic, consumul de scule, din import, este foarte mare. Numai pentru pulverizatorul RODLLA 150 s 720 (figura 8.2.), care de altfel are seria de fabricație cea mai mare, se cheltuiesc anual importante fonduri valutare în vederea asigurării necesarului de scule așchietoare.

Operația de prelucrare a orificiilor de $\phi 0,27^{+0,01}$ mm cuprinde următoarele faze a cîte patru treceri: centruiere, găurire, alezare. Prelucrarea se efectuează pe un utilaj fabricat după licența Bosch. Mișcarea de avans precum și mișcările și minuirile auxiliare sînt realizate de către operator. Axa orificiilor nefiind perpendiculară pe o suprafață plană, rezultă abateri de la poziție și forma geometrică. După prelucrarea orificiilor pulverizatorul se tratează termic, operație care produce deformații și deci abateri ale formei geometrice. Astfel, abaterile de la forma circulară pot ajunge pînă la 0,04 mm, situîndu-se în afara cîmpului de toleranță. În figura 8.3 se prezintă forma unui orificiu după prelu-

erare, iar în figura 8.4 după tratamentul termic de carbonitrurare, urmată de călire și revenire joasă.

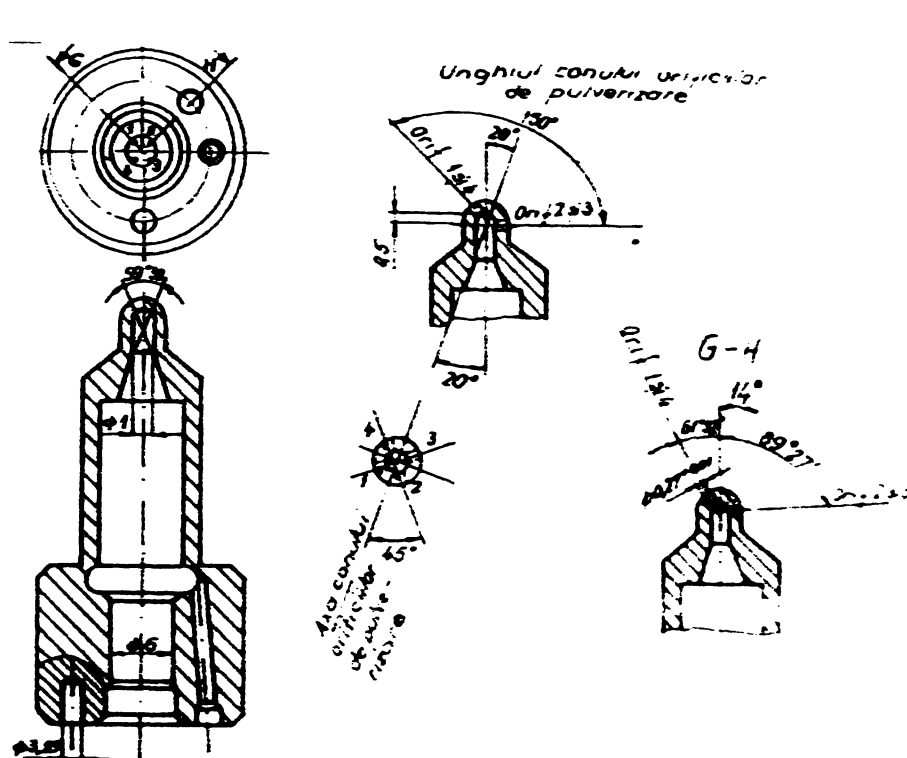


Fig. 8.2. Pulverizatorul
RODLLA 150 s 72e.

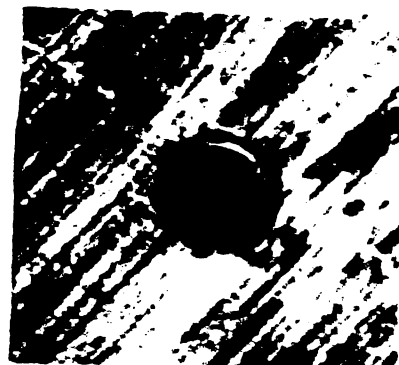


Fig. 8.3

x 40



Fig. 8.4

x 40

Examinările metalografice electronice efectuate asupra materialului prelucrat prin aşchiere evidențiază următoarele aspecte:

- în stare inițială, materialul prezintă o structură intermediară de tip bainitic, favorizată de prezența elementelor de aliere Ni și Cr (figura 8.5);

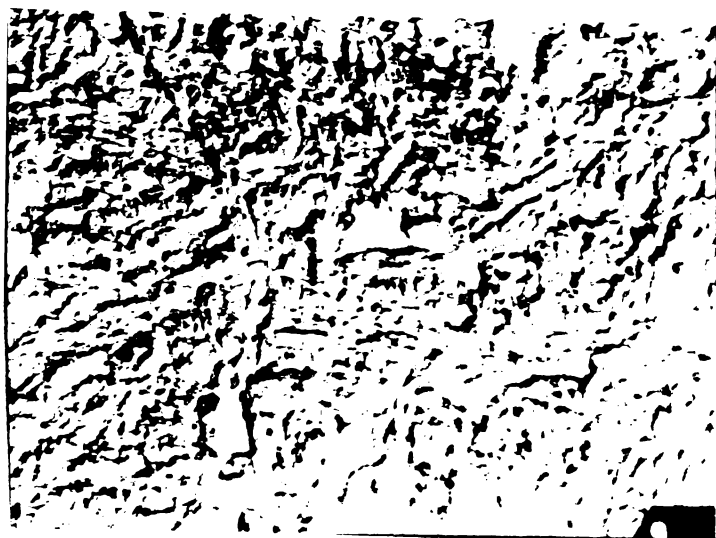
- zona influențată termic de procesul de prelucrare are o structură foarte fină alcătuită din ferită și carburi, separate prin descompunerea bainitei aciculare (figura 8.6);

- materialul tratat termic prin carbonitrurare, călire și revenire joasă, prezintă o structură martensitică de revenire cu carbonitruri de fier și de elemente de aliere (figura 8.7).

O altă operație inclusă în procesul tehnologic de prelucrare, cu consecințe asupra orificiilor este rodarea suprafeței conice interioare. Pasta abrazivă folosită pătrunde în orificii, fiind necesară o desfundare ulterioară a acestora, ceea ce se realizează manual.

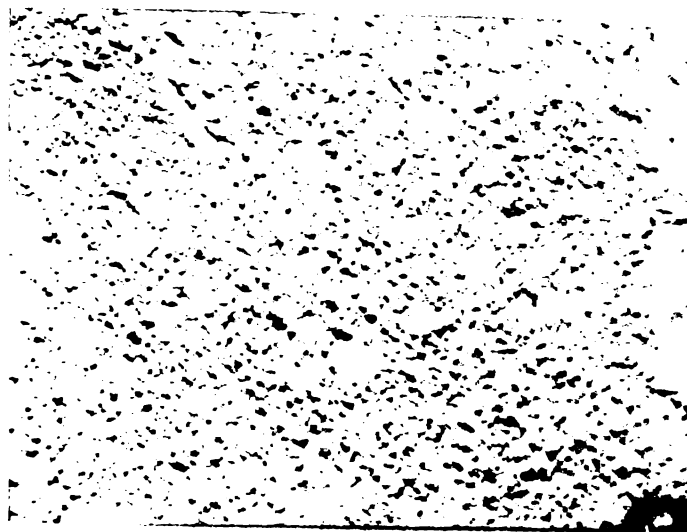
Dezavantajele ce apar în urma procesului tehnologic actual pot fi înlăturate prin utilizarea procedurii electroeroziv. Operația de prelucrare a orificiilor trebuie prevăzută în procesul

tehnologic după tratamentul termic și după rodarea suprafeței conice interioare, pentru a se evita abaterile de formă și infundarea orificiilor.



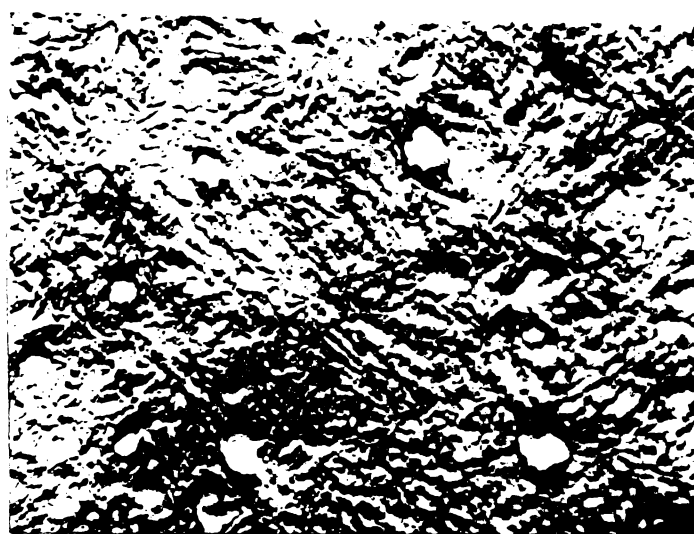
x 15000

Fig. 8.5



x 15000

Fig. 8.6



x 15000

Fig. 8.7

Argumentele introducerii eroziunii electrice în procesul tehnologic de prelucrare al pulverizatoarelor deriva din următoarele avantaje pe care le prezintă :

- posibilitatea prelucrării oricărui material metalic conductor de electricitate, indiferent de duritatea sa;
- orificiile obținute nu prezintă bavuri;
- în procesul de prelucrare nu s-ar forța care s-ar produce deformări și abateri de la precizie;
- se pot prelucra orificii a căror axă este înclinată față de suprafață;
- se realizează repetitivitate a duratei de prelucrare;
- precizia de prelucrare este ridicată;

- prin modificarea regimului electric rezultind mărimi diferite ale interstițiului lateral, se pot obține cu același electrod orificii de diametru diferit;

- ca urmare a uzurii pe suprafața frontală, electrodul se autocalibreză continuu, putându-se folosi un fir de lungime mare, înfășurat pe bobină, fiind posibilă deci aplicarea procedurii în producția de serie;

- în cazul pulverizatoarelor de la injectoarele motoarelor Diesel, orificiile prelucrate prin eroziune electrică determină cimpuri de injecție identice;

- electrodul sculă este obținut printr-o tehnologie simplă și este foarte puțin costisitor;

- densitatea de curent fiind mică, conectarea la sursa de energie a electrozilor se face fără măsuri speciale de protecție;

- utilajul are o construcție flexibilă și permite un grad ridicat de automatizare;

Din punct de vedere economic, aplicarea procedurii de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor are următoarele consecințe:

- eliminarea manoperei directe, prin automatizarea utilajului, fiind necesară doar reglarea și supravegherea acestuia;

- eliminarea unor operații existente în tehnologia clasică, care implică forță de muncă, stocări intermediare, manevrări, cheltuieli de întreținere, suprafețe de producție suplimentare;

- preț de cost mai scăzut pentru orificii de diametru mai mic de 0,4 mm, ca urmare a eliminării importului de scule așchietoare;

- reducerea procentului de rebuturi;

- organizarea mai bună a procesului tehnologic datorită unei capacități de producție constante și încercării utilajelor la capacitatea maximă;

- posibilitatea diversificării producției fără cheltuieli suplimentare;

- creșterea productivității muncii.

Aceste considerente au stat la baza orientării aplicative a cercetărilor, în acest scop fiind realizate pînă în prezent trei contracte de cercetare științifică cu întreprinderea de mecanică fină din Sinaia.

8.2. Contribuții la proiectarea și realizarea unor utilaje experimentale pentru prelucrarea prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor.

Pentru a face posibilă prelucrarea prin eroziune electrică a orificiilor din corpul pulverizator al injectorului au fost concepute următoarele utilaje experimentale:

- micromașina de prelucrare prin eroziune electrică cu dispozitiv special de instalare și indexare a pulverizatorului;
- mașina semiautomată cu un post de prelucrare;
- mașină automată cu patru posturi de prelucrare.

Prima construcție a fost realizată în scopul testării procedurii în condițiile prevăzute pentru orificiile din corpul pulverizatorului și a constituit prima etapă a programului de trecere din faza încercărilor de laborator la cea industrială.

Mașina semiautomată cu un post de prelucrare are un caracter universal, fiind destinată producției de serie mică, precum și experimentării unor prelucrări de orificii la noi tipuri de pulverizatoare.

În vederea introducerii în producția de serie, a fost realizată concepția unei mașini automate cu patru posturi de prelucrare.

8.2.1. Dispozitivul de instalare și indexare a pulverizatorului montat pe micromașina de prelucrare prin eroziune electrică.

Având în vedere dispunerea orificiilor pulverizatorului RODLLA 150 s 720, a fost proiectat și realizat un dispozitiv special de instalare și indexare. Schema constructivă a micromașinii cu dispozitivul special este redată în figura 8.8., iar în figura 8.9 se prezintă fotografia acesteia.

8.2.2 Mașina semiautomată cu un post de prelucrare.

8.2.2.1. Compunerea și funcționarea mașinii.

Mașina semiautomată cu un post de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor a fost realizată pornindu-se de la construcția existentă la Întreprinderea de Mecanică

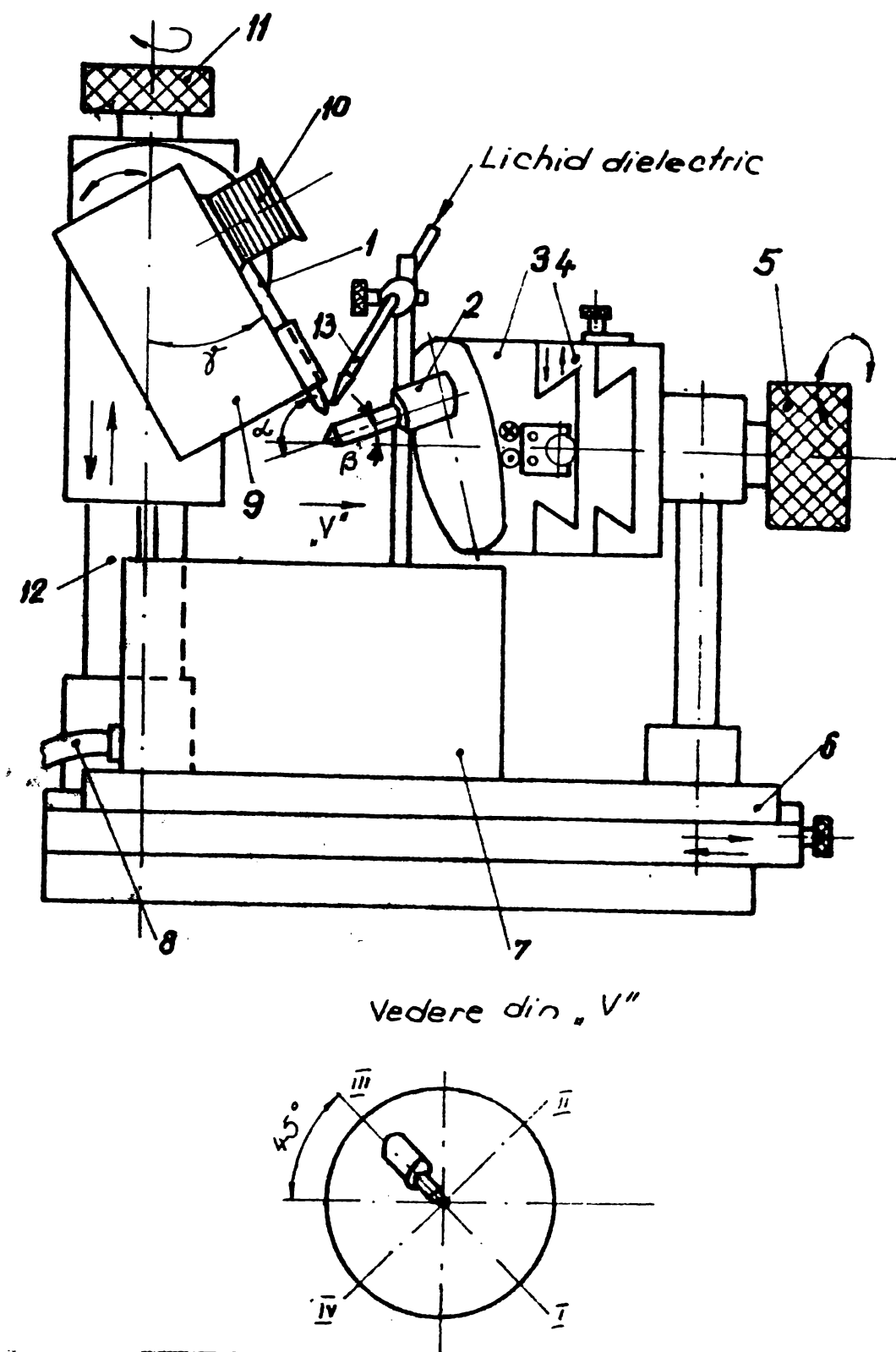


Fig. 8.3. Schema constructivă a micromăşinii cu dispozitivul special de instalare şi indexare a pulverizatorului.
 1-electrod; 2-pulverizator; 3,4-săni de reglare; 5-roată; 6-sanie orizontală; 7-coperă; 8-furtun evacuare; 9-cap de prelucrare; 10-mesur; 11-roată; 12-coperă; 13-şturţ regulare.

rină din Sinaia, la care au fost operate următoarele modificări şi completări :

- capul de găurire cu burghiul a fost înlocuit cu capul de prelucrare prin eroziune electrică;

- în soclul batiului a fost introdusă o instalație de circulare, filtrare și deionizare a lichidului dielectric, precum și pupitrul ce include generatorul de impulsuri, dispozitivele electronice de automatizare, generatorul de frecvență și amplitudine reglabilă. Desenul cu vederile de ansamblu ale mașinii este prezentat în figura 8.10.

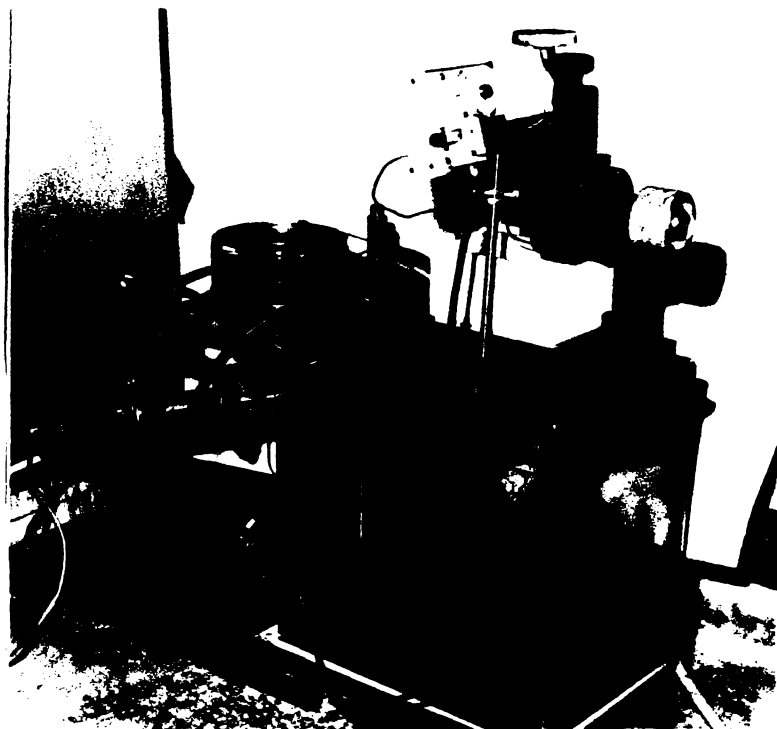


Fig. 8.9. Micromășina cu dispozitivul special de instalare și indexare a pulverizatorului.

Ciclul de prelucrare a orificiilor unui pulverizator cuprinde următoarele faze:

- instalarea pulverizatorului în dispozitiv;
- apropierea capului de lucru până la un tampon limitator;

- cuplarea procesului de prelucrare (generatorul de impulsuri, sistemul de reglare automată a avansului electrodului, dispozitivul automat de intrerupere a procesului și retragere a electrodului);

- prelucrarea unui orificiu;

- intreruperea automată a procesului după străpungerea orificiului;

- retragerea temporizată a electrodului din orificiu;

- indexarea dispozitivului de instalare a pulverizatorului în poziția corespunzătoare următorului orificiu;

- recuplarea procesului pentru relucrarea orificiului următor;

- repetarea fazelor de prelucrare a celorlalte orificii;

- scoaterea pulverizatorului din dispozitiv;

- controlul direcției jeturilor și a debitului refulat prin orificii.

Mașina se reglează în funcție de tipul de pulverizator, se montează bobina cu electrodul de diametru adecvat și se stabilește regimul de prelucrare.

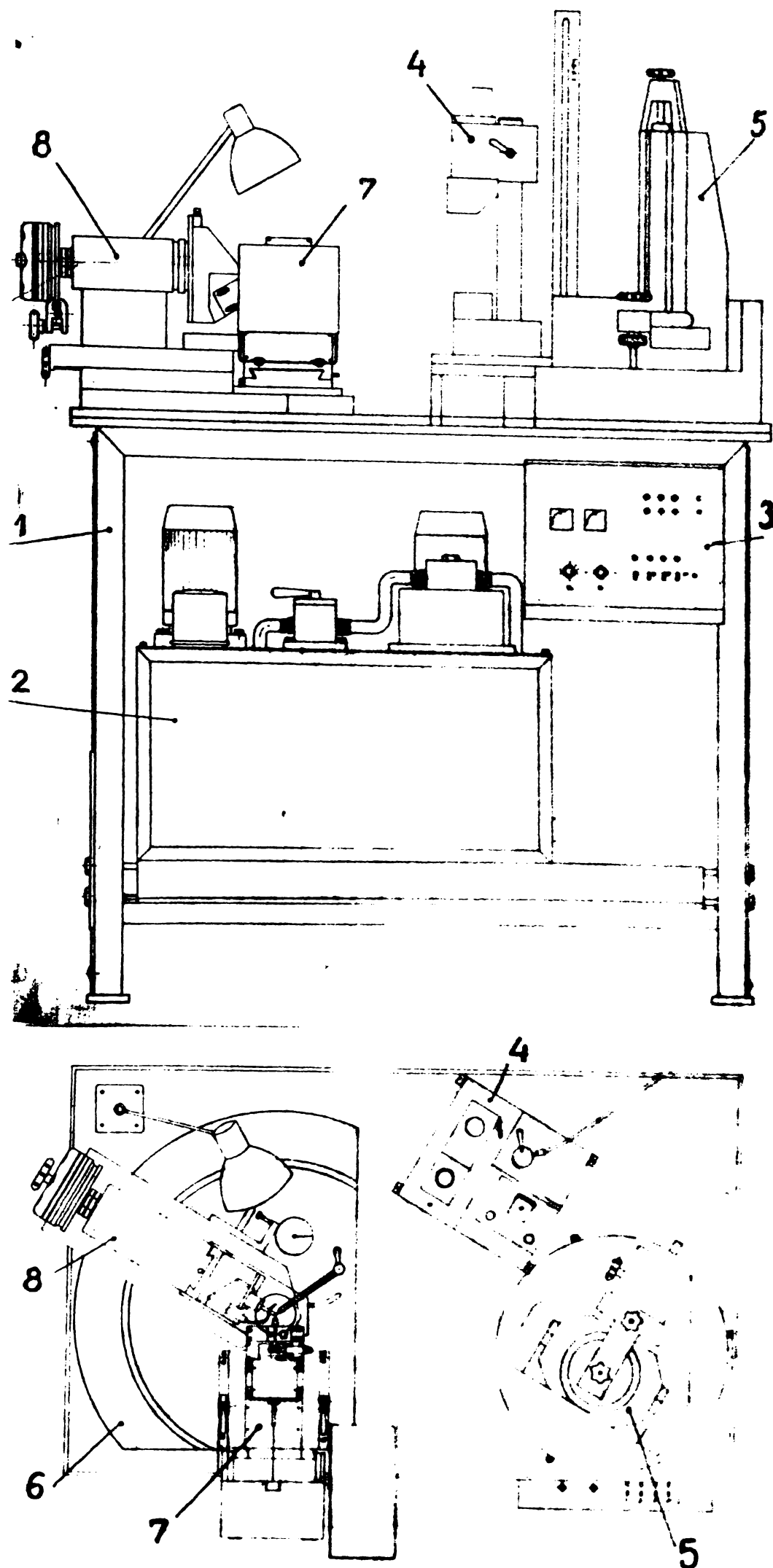


Fig. 8.10. Mașina semiautomată cu un post de prelucrare.

1-batiu; 2-instalație de circulare, filtrare și deionizare a lichidului dielectric; 3-pupitru electric; 4-rotametrul pentru controlul debitului refulat prin orificiile pulverizatorului; 5-dispozitiv cu cupă pentru controlul direcției jeturilor de lichid refulat prin orificiile pulverizatorului; 6-placă de bază; 7-cap de prelucrare prin eroziune electrică; 8-dispozitiv de instalare și indexare a pulverizatorului.

3.2.2.2. Construcția capului de prelucrare.

În figura 8.11 se prezintă două vederi ale ansamblului capului de prelucrare. La această mașină, mișcarea de avans a electrodului sculă se efectuează pe direcție orizontală. Sistemul de reglare automată este de tip electromecanic, soluția constructivă fiind bazată pe rezultatele cercetărilor anterioare. Întreg ansamblul și prismele de fixare a tubului de ghidare a electrodului au șanți pentru reglarea poziției în cele trei direcții. Dispozitivul cu role de antrenare a electrodului este montat pe armătura vibratorului electromagnetice.

3.2.2.3. Pupitrul electric.

În compunerea pupitrului electric intră generatorul de impulsuri, dispozitivul de automatizare al sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă, dispozitivul electronic de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrodului sculă, generatorul de frecvență și amplitudine variabilă.

Generatorul de impulsuri este de tip RC, având posibilitatea de reglare a regimurilor optime de prelucrare a orificiilor pulverizatoarelor, stabilite în urma cercetărilor experimentale efectuate anterior.

În vederea întreruperii procesului de prelucrare după străpungerea orificiului din pulverizator, s-a optat pentru un dispozitiv electronic ce urmărește variațiile de tensiune, astfel:

- la apropierea rapidă a electrodului se înregistrează valoarea tensiunii de amorsare;

- în timpul procesului de prelucrare, valoarea medie a tensiunii este de 25...30% din tensiunea de amorsare;

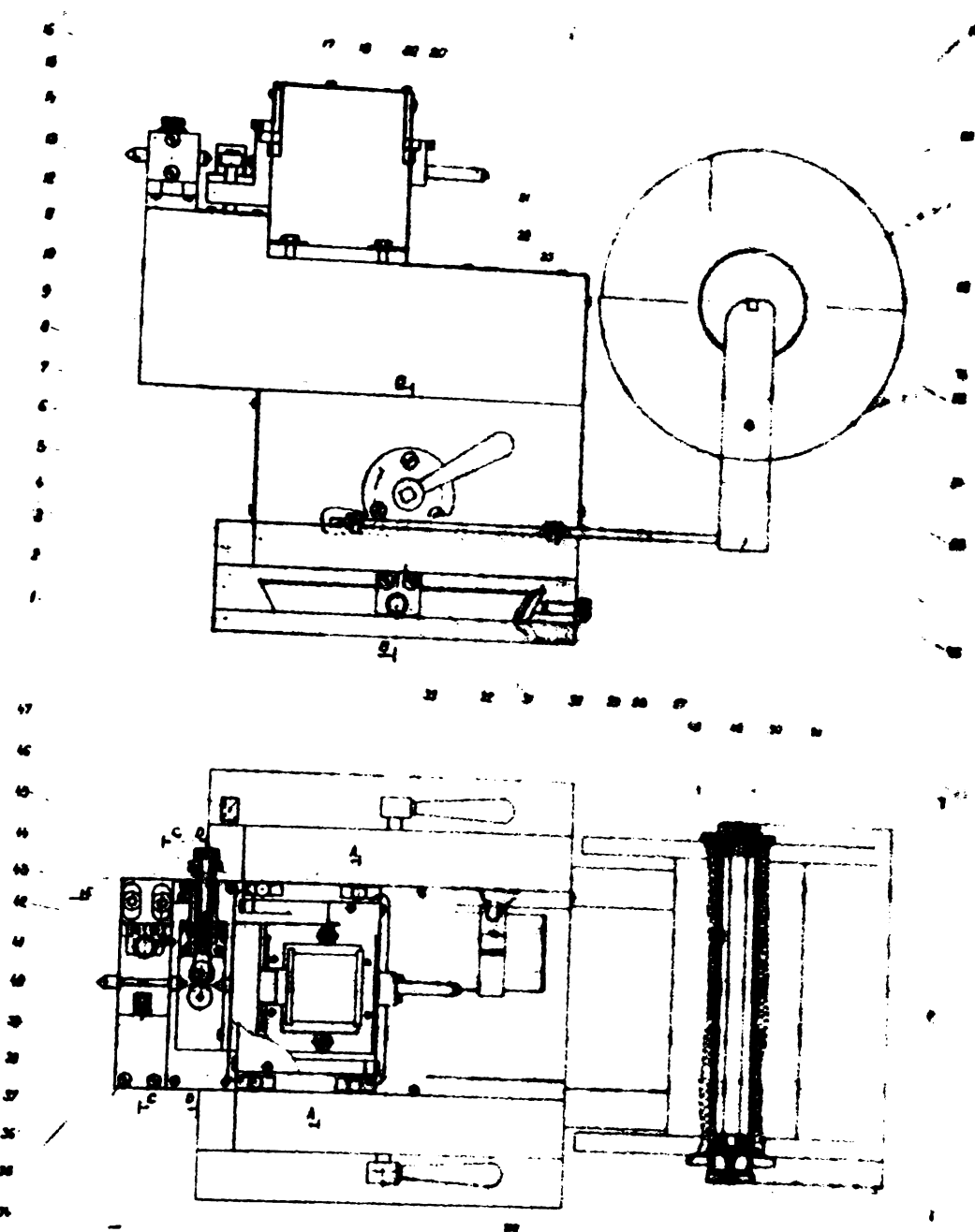


Fig. 8.11. Capăt de prelucrare al mașinii semiautomate.

- în timpul procesului de calibrare a orificiului valoarea medie a tensiunii este de 50...55 % din tensiunea de amorsare;
- la atingerea peretelui opus al pulverizatorului, valoarea medie a tensiunii este din nou 25...30 % din tensiunea de amorsare. Această ultimă variație constituie semnalul de comandă al întreruperii procesului de prelucrare și intrării în acțiune a releeului de temporizare a retragerii electrodului din orificiu.

8.2.2.4. Instalația de circulare, filtrare și deionizare a lichidului dielectric.

Lichidul dielectric folosit este apa deionizată. Instalația care echipază mașina realizează refularea lichidului în zona de prelucrare, revenirea acestuia în rezervor, filtrarea și deionizarea, în vederea menținerii constante a proprietăților. Schema instalației este redată în figura 8.12, iar desenul de ansamblu, în figura 8.13.

Cînd distribuitorul este cuplat în poziția din schema, lichidul este dirijat în al doilea compartiment al rezervorului, de unde este pompat în zona de prelucrare. La constatarea creșterii conductibilității electrice a lichidului se cuplează cealaltă poziție a distribuitorului, intrînd în circuit deionizatorul.

8.2.3. Mașina automată cu patru posturi de prelucrare.

Mașina este concepută cu patru posturi de prelucrare, acestea fiind reglate corespunzător poziției în care se află orificiile în corpul pulverizatorului. Intrarea în funcțiune, respectiv terminarea procesului de prelucrare la fiecare post este decalată cu 5 secunde, astfel încît electrozii să nu se intersecteze în gaura centrală din bulbul pulverizatorului.

Pulverizatoarele sînt ordonate pe o masă rotativă indexabilă, de pe care, un împingător acționat pneumatic le instalează pe rînd în vederea executării orificiilor. Schema de principiu a mașinii este redată în figura 8.14.

Ciclul de prelucrare este comandat automat prin funcții logice și cuprinde următoarele faze:

- împingerea pulverizatorului în poziția de prelucrare;
- intrarea succesiv în funcțiune a celor patru posturi de prelucrare;
- întreruperea procesului de prelucrare și retragerea electrozilor;
- coborîrea pulverizatorului pe masa rotativă;
- indexarea mesei rotative.

Sarcinile operatorului se rezumă la supravegherea unei linii tehnologice dotată cu astfel de mașini, intervenind doar în caz de avarii, semnalizate sonor și luminos. Controlul preciziei de prelucrare se realizează automat.

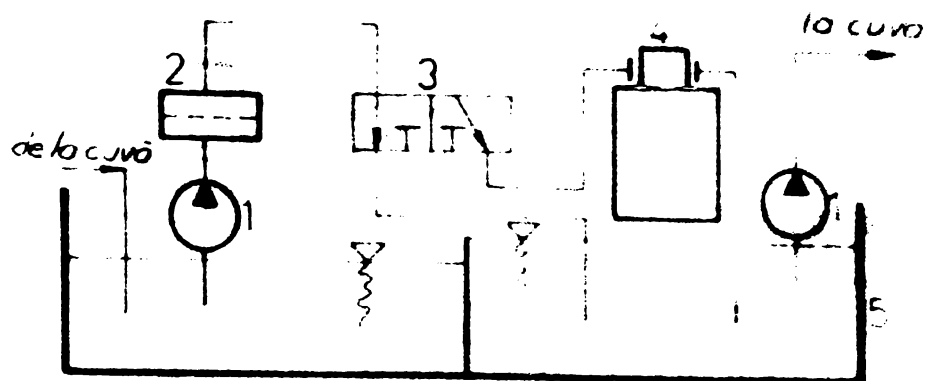


Fig. 8.12. Schema instalației de circulare, filtrare și deionizare a lichidului dielectric.

1-pompă; 2-filtru; 3-distribuitoare; 4-deionizator; 5-rezervor.

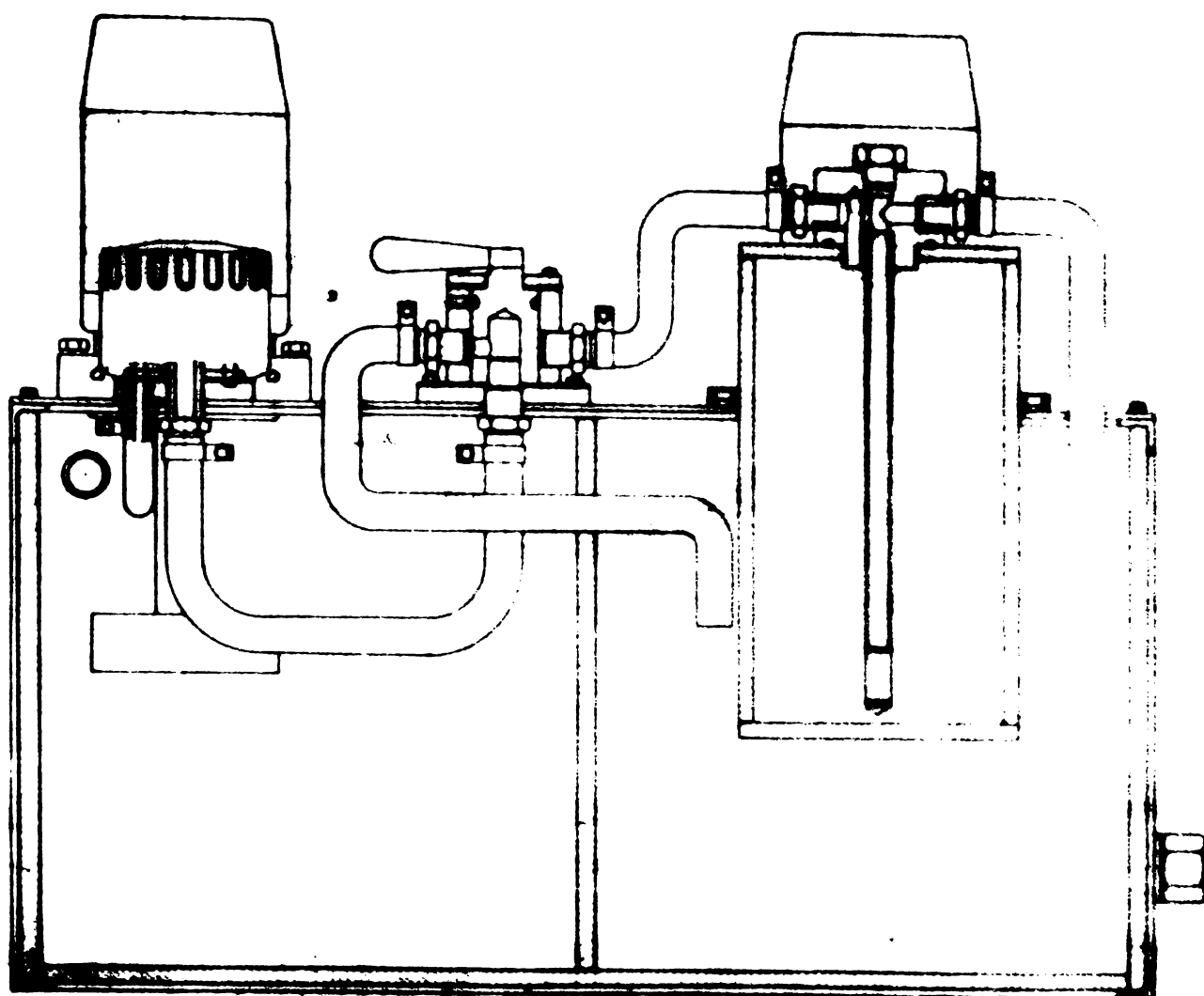


Fig. 8.13. Ansamblul instalației de circulare, filtrare și deionizare a lichidului dielectric.

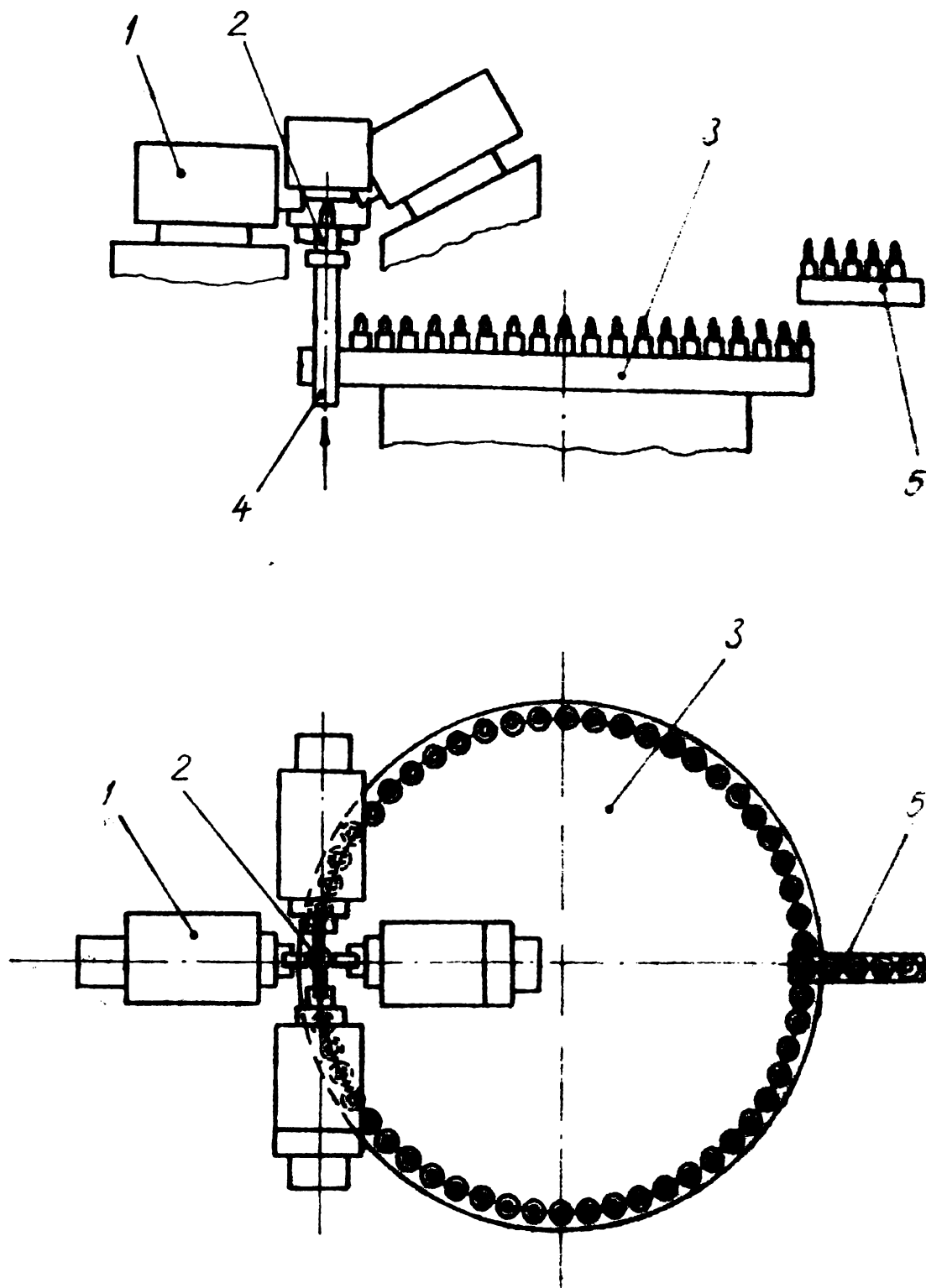


Fig. 8.14. Schema de principiu a mașinii automate cu patru posturi de prelucrare.

1-cap de prelucrare; 2-pulverizator; 3-masă rotativă indexabilă;
4-impingator; 5-dispozitiv de alimentare.

8.3. Analiza procesului tehnologic de prelucrare a orificiilor pulverizatorului RODELLA 150 s 720.

8.3.1. Considerații generale.

În vederea introducerii în producția de serie a prelucrării prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatorului RODELLA 150 s 720 a fost analizat procesul tehnologic din punct de vedere a ritmicității, preciziei dimensionale și a formei geometrice, precum și calitatea suprafeței.

Condițiile admise pentru efectuarea prelucrării orificiilor sînt următoarele:

- materialul electrodului sculă, alamă;
- diametrul electrodului sculă, 0,22 mm;
- materialul pulverizatorului, 18 CrNi 20 carbonitrat;
- adîncimea de prelucrare, 1,1 mm;
- lichidul dielectric, apă deionizată cu conductibilitate electrică 15 μ S/cm;
- parametrii regimului electric, tensiunea de amorsare $U_0 = 280$ V, rezistența $R = 540 \Omega$, capacitatea $C = 68$ nF;
- parametrii oscilațiilor forțate ale electrodului sculă, frecvența $\nu = 180$ Hz, amplitudinea $A = 3$ μ m.

Ritmicitatea și precizia dimensională a orificiilor au fost analizate prin efectuarea unui control statistic în timpul desfășurării procesului de prelucrare. Precizia formei geometrice a fost urmărită prin vizualizarea circularității orificiilor și a formei cilindrice. Calitatea suprafeței s-a analizat prin prisma rugozității și a modificărilor structurale survenite în stratul marginal afectat termic de procesul de prelucrare.

8.3.2. Controlul statistic în timpul desfășurării procesului de prelucrare.

Controlul statistic efectuat în timpul desfășurării procesului de prelucrare comportă următoarele faze [163]:

- analiza statistică a procesului tehnologic, premergătoare aplicării controlului statistic;
- întocmirea fișei de control;
- efectuarea controlului statistic;

- utilizarea informației obținute în timpul controlului.

8.3.2.1. Controlul ritmicității.

Urmărirea ritmicității s-a realizat prin cronometrarea duratei de prelucrare a orificiilor.

a) Analiza statistică a procesului de prelucrare, premergătoare aplicării controlului statistic are drept scop evaluarea stabilității procesului tehnologic și determinării parametrilor pe baza cărora se va efectua controlul.

Duratele de prelucrare măsurate sunt înscrise în ordinea rezultată, în fișa de observație (tabelul 8.1) și sunt transpuse în graficul de timp reprezentat în figura 8.15. Se poate aprecia că procesul tehnologic prezintă stabilitate bună din punct de vedere al preciziei, împrăștierea valorilor caracteristicii fiind mică, dar există tendințe de instabilitate a reglajului.

Tabelul 8.1

Nr.	t [s]	Nr.	t [s]	Nr.	t [s]	Nr.	t [s]	Nr.	t [s]
1.	15,9	21.	15,9	41.	16,5	61.	16,5	81.	17,4
2.	15,7	22.	16,3	42.	16,7	62.	17	82.	17,1
3.	16,1	23.	15,4	43.	16,2	63.	16,8	83.	17,3
4.	15,8	24.	16,1	44.	16,8	64.	17,4	84.	17,6
5.	16,2	25.	16	45.	16,6	65.	16,9	85.	17,2
6.	15,5	26.	16,2	46.	16,4	66.	17,2	86.	17,4
7.	16	27.	16,4	47.	16,3	67.	17	87.	17,8
8.	15,8	28.	15,1	48.	16,6	68.	16,7	88.	17,7
9.	15,3	29.	16,6	49.	16,9	69.	17,4	89.	17,3
10.	16	30.	16,5	50.	16,7	70.	17,1	90.	18,1
11.	15	31.	16,3	51.	17	71.	17,2	91.	17,5
12.	15,2	32.	16,7	52.	16,8	72.	16,7	92.	17,9
13.	15,6	33.	16,4	53.	16,3	73.	17,3	93.	18,3
14.	15,1	34.	16,4	54.	16,6	74.	16,9	94.	18,2
15.	14,9	35.	16,9	55.	17,1	75.	17,2	95.	18,0
16.	14,6	36.	16,7	56.	16,7	76.	17,4	96.	17,9
17.	15,2	37.	15,5	57.	16,9	77.	17,7	97.	18
18.	14,8	38.	15,3	58.	16,6	78.	17,2	98.	18,4
19.	15,8	39.	16,4	59.	17	79.	17,8	99.	19
20.	15,3	40.	16,9	60.	17,2	80.	17,3	100.	18,7

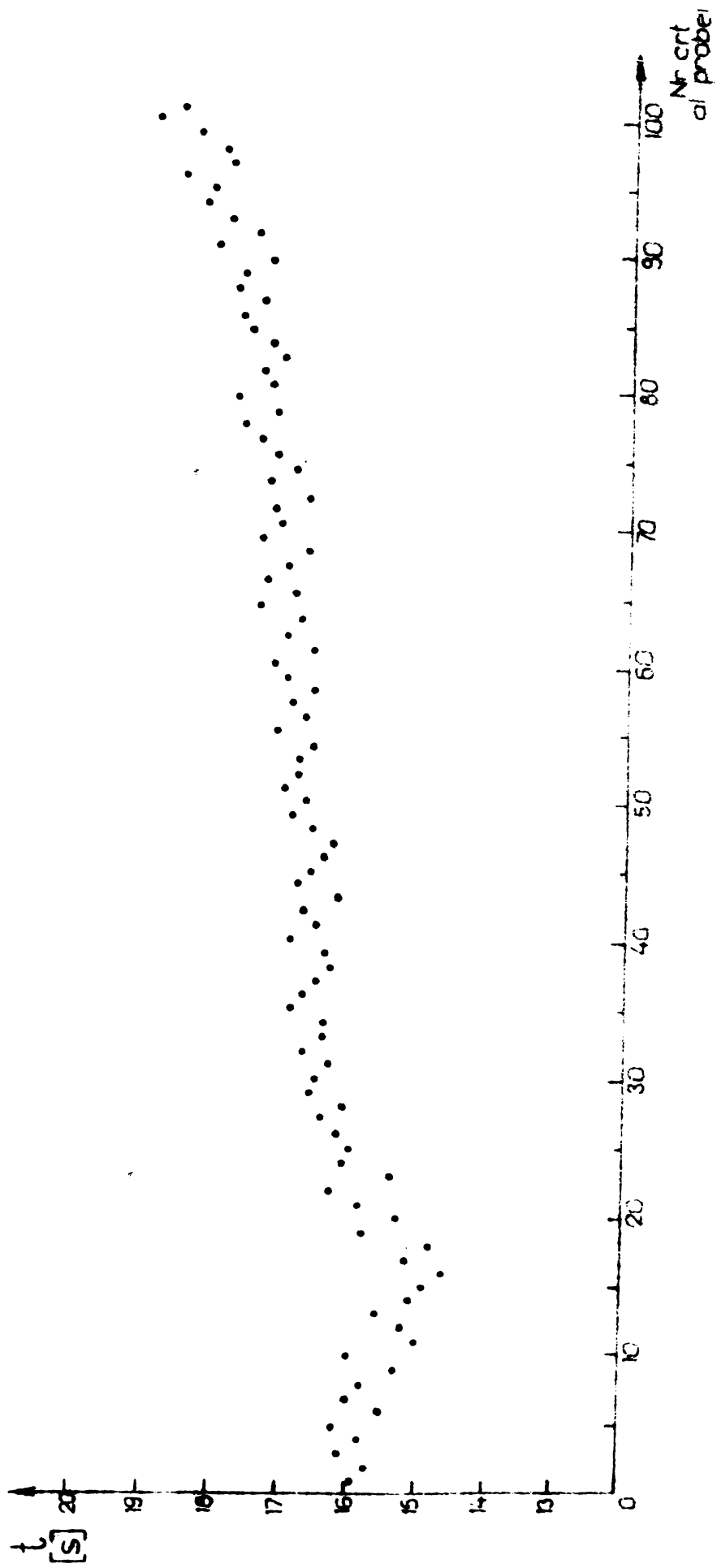


Fig. 8.15

Studierea variabilității procesului tehnologic s-a efectuat prin determinarea legii de repartiție statistică a valorilor caracteristicii controlate. In acest scop, câmpul de dispersie a fost împărțit în 9 intervale, determinându-se frecvența valorilor caracteristicii și calculându-se apoi parametrii repartiției-media aritmetică și abaterea medie pătratică. Rezultatele sînt prezentate în tabelul 8.2, iar histograma repartiției valorilor este redată în figura 8.16. Aceasta sugerează ipoteza normalității, ceea ce urmează a se verifica.

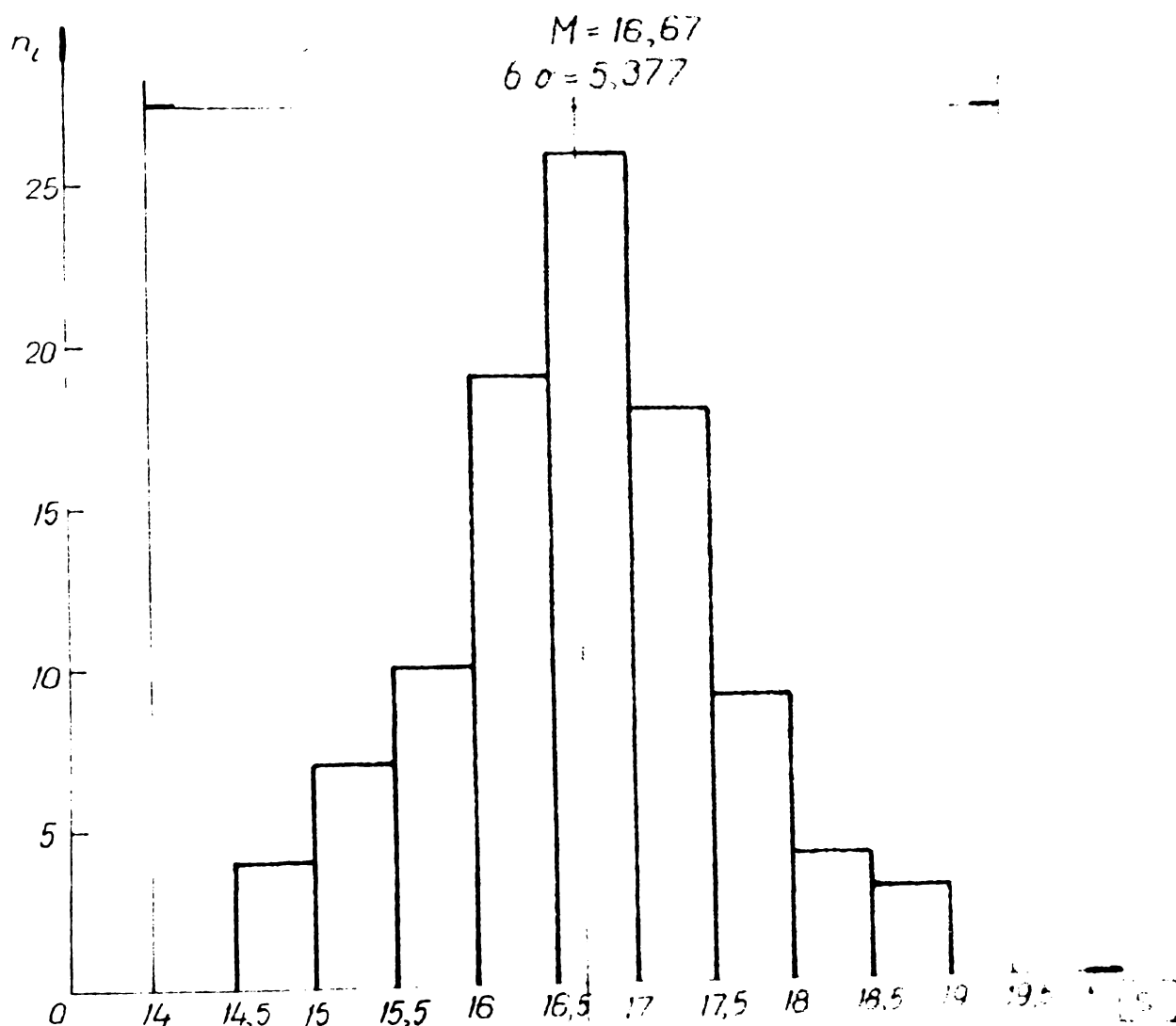


Fig. 8.16.

Independența rezultatelor succesive se verifică prin metoda punctelor critice, determinându-se intervalul de încredere. Dacă variabila aleatorie X are repartiție normală, cu parametrii M și σ , probabilitatea de a lua o valoare cuprinsă în intervalul (x_1, x_2) este dată de expresia:

Tabelul 8.2

Mr. Limitele Val.mijl. Freev. Probab. $p_1 \cdot x_1$ $M = \sum p_1 x_1$ $x_1 - M$ $(x_1 - M)^2$ $(x_1 - M)^2 p_1$ $\sigma =$
 Interv.interv. x_1 n_1 $p_1 = \frac{n_1}{N}$ $\sqrt{\sum (x_1 - M)^2 p_1}$

1.	14,5...15	14,75	4	0,04	0,59	-1,92	3,6864	0,1474
2.	15...15,5	15,25	7	0,07	1,0675	-1,42	2,0164	0,1411
3.	15,5...16	15,75	10	0,1	1,575	-0,92	0,8464	0,0846
4.	16...16,5	16,25	19	0,19	3,0675	-0,42	0,1764	0,0535
5.	16,5...17	16,75	26	0,26	4,355	0,08	0,0064	0,0016
6.	17...17,5	17,25	18	0,18	3,205	0,58	0,3364	0,0605
7.	17,5...18	17,75	9	0,09	1,5975	1,08	1,1664	0,1049
8.	18...18,5	18,25	4	0,04	0,73	1,58	2,4964	0,0998
9.	18,5...19	18,75	3	0,03	0,5625	2,08	4,3264	0,1297

$$P(x_1 < X < x_2) = F\left(\frac{x_2 - \bar{X}}{\sigma}\right) - F\left(\frac{x_1 - \bar{X}}{\sigma}\right) \quad (8.1)$$

Pentru nivelul de încredere obținut, $1 - \alpha = 0,9875$, limitele intervalului de încredere vor fi:

$$\frac{2}{3} (N - 2) \pm z_\alpha \sqrt{\frac{15K - 29}{30}} \quad (8.2)$$

unde z_α este valoarea careia îi corespunde $\Phi(z_\alpha) = \frac{1 - \alpha}{2}$, rezultând $z_\alpha = 2,24$. Limitele intervalului de încredere astfel determinate sînt: $65,33 \pm 9,34$. Din graficul de timp, între primul și ultimul punct critic maxim se află 73 puncte critice, confirmându-se că seria examinată este aleatorie.

Verificarea ipotezei de normalitate a repartiției valorilor s-a efectuat prin testul χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(n_i - Np_i)^2}{Np_i} \quad (8.3)$$

Calcululele efectuate sînt prezentate în tabelul 8.3.

Dacă k reprezintă numărul parametrilor repartiției, numărul gradelor de libertate al indicatorului χ^2 este $\nu = k - (1 + 1) = 9 - (2 + 1) = 6$. Probabilitățile se stabilesc astfel:

$$p_1 = \Phi(z_1) + 0,5$$

$$p_i = \Phi(z_i) - \Phi(z_{i-1})$$

Pentru nivelul de încredere $1 - \alpha = 0,9875$ rezultă $\alpha = 0,0125$. În funcție de α și ν , valoarea indicatorului $\chi^2_{0,0125;6} = 16,4$. Deoarece valoarea rezultată pentru repartiția cercetată este $\chi^2 = 10,5942$, iar $\chi^2 < \chi^2_{0,0125;6}$ se deduce că această urmează legea normală.

În concluzie, întrucît valorile caracteristicii au o repartiție normală, se poate aplica în continuare controlul statistic în timpul desfășurării procesului de prelucrare.

b) Efectuarea controlului statistic.

Admițînd ritmul producției $c = 180$ orificii/oră, numărul mediu de orificii realizate între două reglări succesive $M = 1500$, iar numărul de orificii controlate $n = 4$, care corespunde numărului de orificii ale pulverizatorului, proporția orificiilor con-

Tabelul 8.3

Nr.	Limitele inter. interv.	Frecv. n_1	x_1	$x_1 - M$	$z_1 = \frac{x_1 - M}{\sigma}$	$\phi(z_1)$	p_1	Np_1	$n_1 - Np_1$	$(n_1 - Np_1)^2$	$\frac{(n_1 - Np_1)^2}{Np_1}$
1.	14,5...15	4	14,75	-1,92	-2,1424	-0,4839	0,0161	1,61	2,39	5,7121	3,5479
2.	15...15,5	7	15,25	-1,42	-1,5844	-0,4455	0,0404	4,04	2,96	8,7616	2,1687
3.	15,5...16	10	15,75	-0,92	-1,0265	-0,3475	0,0860	8,60	1,4	1,96	0,2279
4.	16...16,5	19	16,25	-0,42	-0,4686	-0,1804	0,1771	17,71	1,29	1,6641	0,0939
5.	16,5...17	26	16,75	0,08	0,0892	0,0355	0,2259	22,59	2,41	11,6281	0,5147
6.	17...17,5	18	17,25	0,58	0,6472	0,2414	0,2059	20,59	-2,59	6,7081	0,3258
7.	17,5...18	9	17,75	1,08	1,2051	0,2859	0,1445	14,45	-5,45	29,7025	2,0555
8.	18...18,5	4	18,25	1,58	1,7630	0,4612	0,0753	7,53	-3,53	12,4609	1,6540
9.	18,5...19	3	18,75	2,08	2,3209	0,4900	0,0208	2,08	-4,12	0,0144	0,005

10,5942

trolate este :

$$q = \sqrt{\frac{n}{N}} = \sqrt{\frac{4}{1500}} = 0,0516 = 5,16 \%$$

iar intervalul între două prelevări de probe,

$$\frac{60}{c} \sqrt{nN} = \frac{60}{180} \sqrt{4 \cdot 1500} = 25 \text{ minute.}$$

Pentru efectuarea controlului statistic s-a folosit metoda mediei și abaterii medii pătratice [114], admitându-se un timp de toleranță $T = 5$ secunde.

Limitele de control ale mediei aritmetice, în cazul când fracțiunea defectă este $0,001 \leq p \leq 0,02$, sînt :

$$L_{ci} = T_c - A\sigma = 16,5 - 1,29 \cdot 0,8962 = 15,38$$

$$L_{cs} = T_c + A\sigma = 16,5 + 1,29 \cdot 0,8962 = 17,62$$

unde T_c reprezintă centrul cîmpului de toleranță, iar A este un coeficient în funcție de α , z și n .

Limita de control a abaterii medii pătratice pentru $p \leq 0,02$ este:

$$L_c = G\sigma = 1,66 \cdot 0,8962 = 1,4877$$

Rezultatele măsurărilor, calculele și reprezentarea parametrilor statistici sînt cuprinse în fișa de control (tabelul 8.4). Se observă că la eșantionul cu număr de ordine 4, punctul ce reprezintă media aritmetică a valorilor depășește limita de control superioară, fiind necesară oprirea mașinii. Cauza care a determinat această instabilitate a reglajului a constituit-o existența unei ondulații a electrodului, care a provocat frecări în tubul de ghidare, alunecări pe rola de antrenare și timpî morți în funcționarea sistemului de reglare automată a avansului .

8.3.2.2. Controlul preciziei dimensionale a orificiilor.

Măsurarea diametrului orificiilor prelucrate s-a făcut cu o precizie de 0,001 mm, folosind un microscop de atelier Karl Zeiss Jena și un comparator.

a) Analiza statistică a procesului de prelucrare, premergătoare aplicării controlului statistic.

Tabelul 8.4

FIȘA DE CONTROL PENTRU MEDIA ARITMETICĂ ȘI ABATEREA
MEDIE PĂTRATICĂ

INSTITUTUL POLITEHNIC, Traian Vuia
Timișoara

Facultatea de Mecanică

Catedra de TCM

Mașina de prelucrat microalezoaje
prin eroziune electrică; caract. control-
lată: durata prelucrării [s]

Toleranța prescrisă: 5s

Operația: găurire $\phi 0,27^{+0,01}$ mm

Producția orară: 180 orificii

Aparatul de măsură: cronometru.

Precizia aparatului de măsură: $\pm 1/10$ s.

Volumul eșantionului: 4

Intervalul dintre două prelucrări:
25 minute.

Data		14.01.1980									
Ora		8,00	8,25	8,50	9,15	9,40	10,05	10,30	10,55	11,20	11,45
Nr. de ordine / eșant.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Media aritmetică	18										
	17,5										
Abaterea medie pătratică	1,5										
	1										
Valorile caracteristicii controlate	1	17,7	14,8	16,6	20	15	17,3	15,8	16,5	18	16,3
	2	17,3	15,5	16,8	20,5	16,7	17,5	16,1	17	17,5	16,9
	3	15,8	15,8	15,6	15,9	16,3	16	16,8	16,5	17,3	16,2
	4	16,5	17,2	16,6	16,3	17	15,4	16,3	16,4	17,4	17,4
Media aritmetică \bar{x}		16,82	15,82	16,4	18,17	16,25	16,55	16,25	17,1	17,55	16,55
Ab. medie pătrat. σ		0,07	0,18	0,2	0,03	0,25	0,1	0,05	0,35	0,1	0,25
Concluzia control		C	C	C	O	C	C	C	C	C	C

In tabelul 8.5 sint cuprinse valorile caracteristicii controlate.

Tabelul 8.5

Nr.	D [mm]	Nr.	D [mm]	Nr.	D [mm]	Nr.	D [mm]	Nr.	D [mm]
1.	0,273	21.	0,273	41.	0,275	61.	0,276	81.	0,275
2.	0,273	22.	0,274	42.	0,277	62.	0,276	82.	0,274
3.	0,274	23.	0,274	43.	0,276	63.	0,275	83.	0,276
4.	0,273	24.	0,274	44.	0,278	64.	0,274	84.	0,278
5.	0,274	25.	0,274	45.	0,277	65.	0,276	85.	0,276
6.	0,272	26.	0,275	46.	0,274	66.	0,275	86.	0,275
7.	0,273	27.	0,273	47.	0,276	67.	0,275	87.	0,276
8.	0,272	28.	0,273	48.	0,274	68.	0,277	88.	0,277
9.	0,272	29.	0,276	49.	0,275	69.	0,275	89.	0,275
10.	0,273	30.	0,272	50.	0,274	70.	0,274	90.	0,274
11.	0,272	31.	0,273	51.	0,275	71.	0,275	91.	0,276
12.	0,272	32.	0,275	52.	0,276	72.	0,276	92.	0,277
13.	0,273	33.	0,277	53.	0,275	73.	0,274	93.	0,275
14.	0,274	34.	0,275	54.	0,274	74.	0,275	94.	0,275
15.	0,273	35.	0,275	55.	0,276	75.	0,276	95.	0,279
16.	0,273	36.	0,274	56.	0,276	76.	0,279	96.	0,277
17.	0,270	37.	0,276	57.	0,275	77.	0,277	97.	0,278
18.	0,271	38.	0,273	58.	0,275	78.	0,274	98.	0,275
19.	0,271	39.	0,277	59.	0,276	79.	0,275	99.	0,279
20.	0,274	40.	0,274	60.	0,277	80.	0,277	100.	0,278

Graficul de timp al valorilor caracteristicii controlate este redat in figura 8.17.

Pentru a studia variabilitatea procesului de prelucrare, cimpul de dispersie al valorilor caracteristicii a fost impartit in 9 intervale, calculandu-se frecventa si probabilitatea de incadrare in fiecare interval, precum si parametrii repartitiei, media aritmetica si abaterea medie patratica. Calculele efectuate sint cuprinse in tabelul 8.6. In figura 8.18 s-a reprezentat histograma repartitiei valorilor caracteristicii controlate.

Pentru verificarea independentei rezultatelor succesive a fost determinat nivelul de incredere $1 - \alpha = 0,9883$, a rui a fi co-

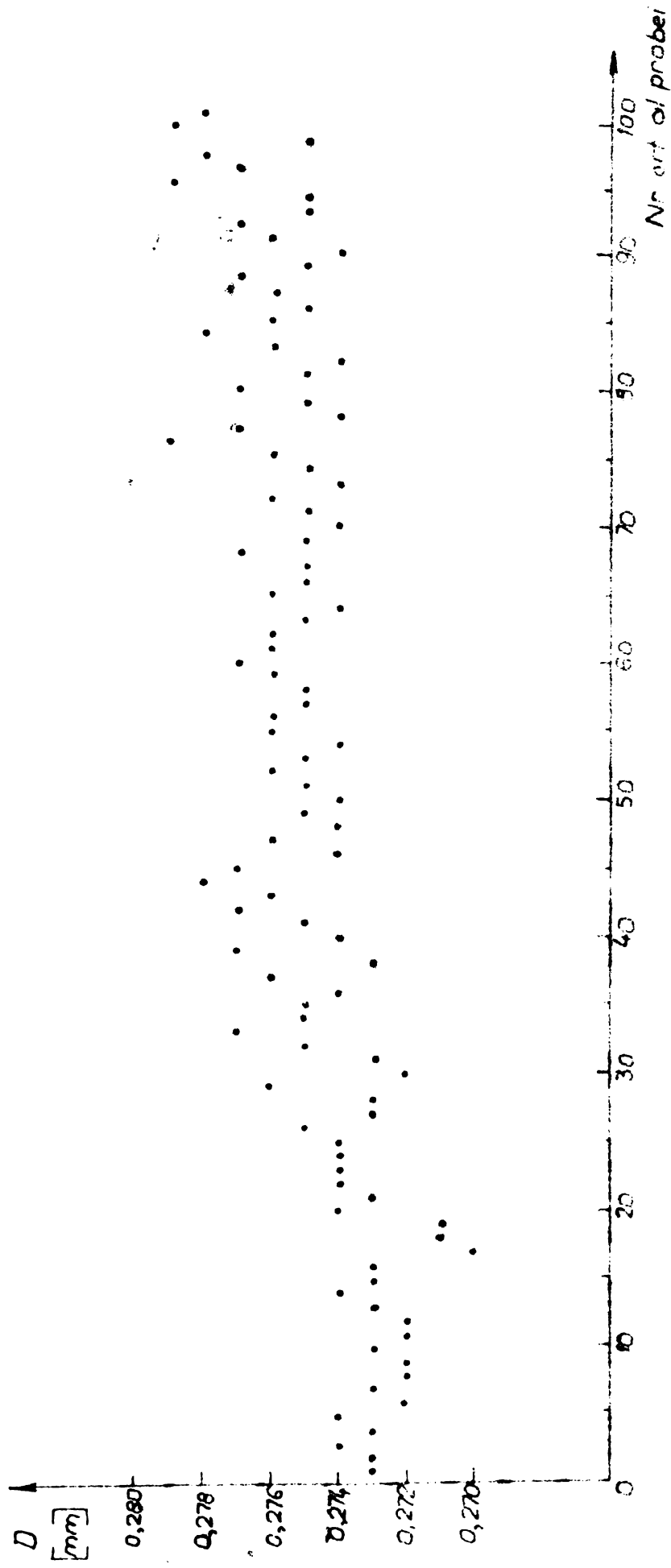


Fig. 8.17

Tabelul 8.6

Mr. Limitele Val. m.j.l. Frecv. Probab.											
Interv.	Interv. x ₁	n ₁	$P_1 = \frac{n_1}{N}$	$P_1 x_1$	$M = \sum P_1 x_1$	$x_1 - M$	$(x_1 - M)^2$	$(x_1 - M)^2 P_1$	$\sqrt{\sum (x_1 - M)^2 P_1}$	σ	
								$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-6}$		
1.	0,270...0,271	0,2705	3	0,03	0,0001	-0,0039	0,1521	0,4563			
2.	0,271...0,272	0,2715	6	0,06	0,0163	-0,0029	0,0841	0,5046			
3.	0,272...0,273	0,2725	13	0,13	0,0354	-0,0019	0,0361	0,4693			
4.	0,273...0,274	0,2735	20	0,20	0,0547	-0,0009	0,0001	0,1620			
5.	0,274...0,275	0,2745	23	0,23	0,0631	0,2744	0,0001	0,0023			$1,7016 \cdot 10^{-3}$
6.	0,275...0,276	0,2755	17	0,17	0,0469	0,0011	0,0121	0,2057			
7.	0,276...0,277	0,2765	11	0,11	0,0304	0,0021	0,0441	0,4851			
8.	0,277...0,278	0,2775	4	0,04	0,0111	0,0031	0,0961	0,3044			
9.	0,278...0,279	0,2785	3	0,03	0,0084	0,0041	0,1601	0,5043			

respunde un interval de incredere cu limitele 9,33 & 9,4. Din graficul de timp rezultă între primul și ultimul punct critic inferior, un număr de 59 puncte critice, ceea ce înseamnă că repartiția valorilor este aleatorie.

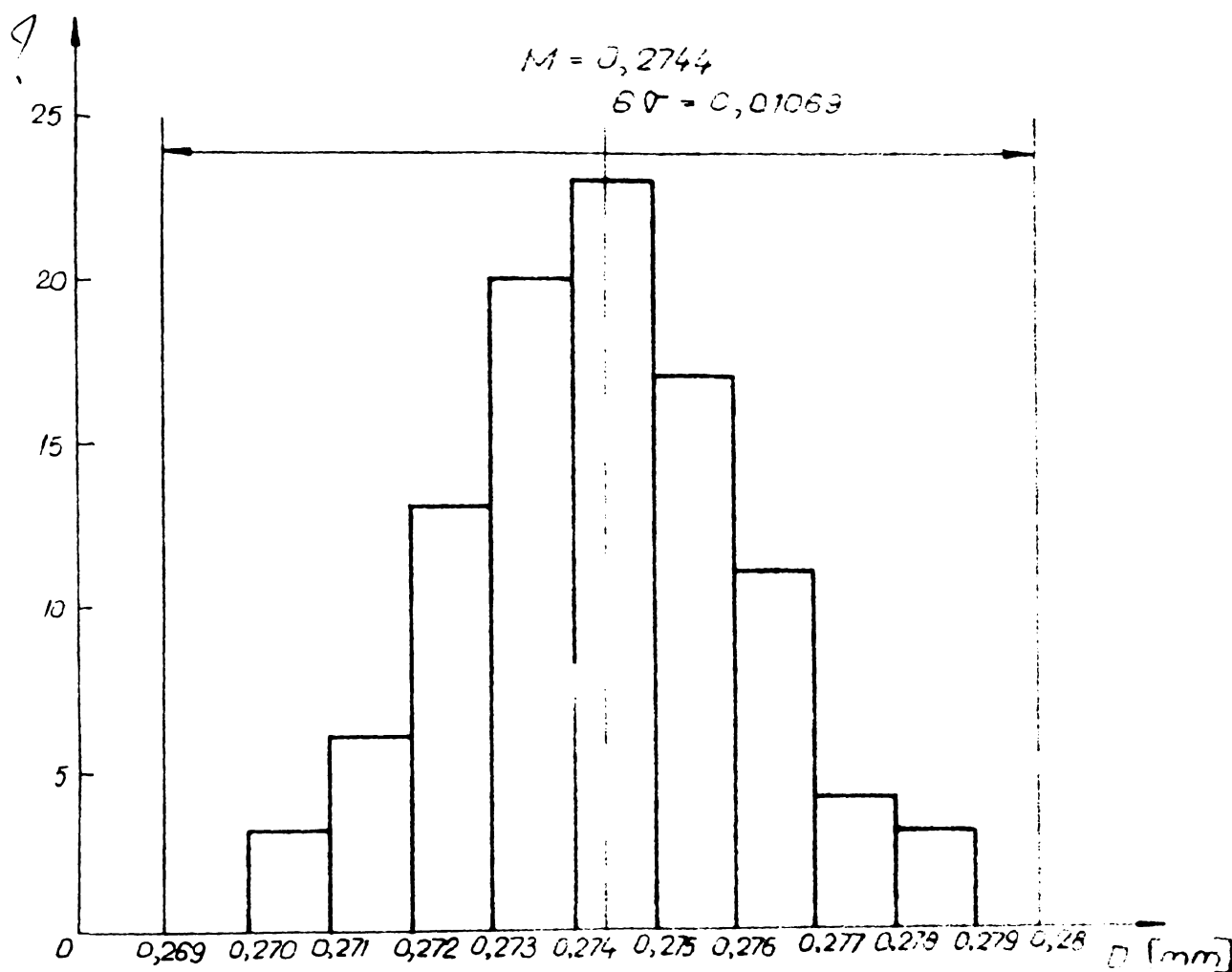


Fig. 3.18

Verificarea ipotezei de normalitate a repartiției s-a făcut prin aplicarea testului χ^2 , calculele fiind centralizate în tabelul 8.7. În funcție de $\alpha = 0,0117$ și $\nu = 6$ rezultă valoarea indicatorului $\chi^2_{0,0117;6} = 16,1$. Valoarea calculată fiind $\chi^2 = 8,865$, iar $\chi^2 < \chi^2_{0,0117;6}$ înseamnă că repartiția cercetată urmează legea normală, putându-se aplica în continuare controlul statistic în timpul desfășurării procesului de prelucrare.

b) Efectuarea controlului statistic.

Controlul statistic s-a efectuat prin metoda mediei și abaterii medii pătratice. Fișa de control întocmită este prezentată în tabelul 3.8.

Tabelul 8.7

Nr. Interv.	Limitele Interv.	x_1	$x_1 - M$	$z_1 = \frac{x_1 - M}{\sigma}$	$\phi(z_1)$	p_1	np_1	$n_1 - np_1$	$(n_1 - np_1)^2$	$\frac{(n_1 - np_1)^2}{np_1}$
1.	0,270...0,271	3	0,2705	-0,0039	-2,18905	0,0153	1,53	1,47	2,1609	1,4123
2.	0,271...0,272	6	0,2715	-0,0029	-1,62775	0,0375	3,75	2,25	5,0625	1,55
3.	0,272...0,273	13	0,2725	-0,0019	-1,06645	0,0920	9,2	5,8	14,44	1,5696
4.	0,273...0,274	20	0,2735	-0,0009	-0,50518	0,1630	16,3	5,7	15,69	0,9398
5.	0,274...0,275	23	0,2745	0,0001	0,05613	0,2155	21,55	1,45	4,1025	0,0976
6.	0,275...0,276	17	0,2755	0,0011	0,61742	0,2092	20,92	-0,92	15,5664	0,7345
7.	0,276...0,277	11	0,2765	0,0021	1,17071	0,1492	14,92	-0,92	15,5664	0,7345
8.	0,277...0,278	4	0,2775	0,0031	1,74001	0,0784	7,84	-3,84	14,7456	1,8806
9.	0,278...0,279	3	0,2785	0,0041	2,30130	0,0399	3,99	-0,99	0,9801	0,2459

8,8650

Tabelul 8.8

FIȘA DE CONTROL PENTRU MEDIA ARITMETICĂ ȘI ABATEREA
MEDIE PĂTRATICĂ

Institutul Politehnic „Traian Vuia”
Timișoara
Facultatea de Mecanică
Catedra de TCM
Mașina de prelucrat microalezaje
prin eroziune electrică
Caract. controlată: diametrul

Toleranța prescrisă: 0,01 mm
Operația: găurire ϕ 0,27 $^{+0,01}$ mm.
Producția orară: 180 orificii.
Aparatul de măsură: microscop de
sculărie Karl Zeiss Jena și compo-
rator.
Precizia aparatului: 0,001 mm.
Volumul eșantionului: 4
Intervalul între două prelevări: 25 min.

Data		14. 01. 1980									
Ora		8,00	8,25	8,50	9,15	9,40	10,05	10,30	10,55	11,20	11,45
Nr. de ordine al eșantionului		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Media aritmetică	0,278										
	0,277										
	0,276										
	0,275										
	0,274										
Abaterea medie pătratică	0,003										
	0,002										
	0,001										
	0										
Valorile caracteristicii controlate	1	0,272	0,275	0,274	0,280	0,274	0,276	0,272	0,279	0,278	0,274
	2	0,275	0,274	0,277	0,282	0,276	0,278	0,273	0,276	0,277	0,274
	3	0,273	0,276	0,274	0,274	0,273	0,274	0,275	0,274	0,276	0,273
	4	0,272	0,272	0,275	0,275	0,277	0,272	0,274	0,274	0,276	0,277
Media aritmetică \bar{X}		0,273	0,27425	0,275	0,27775	0,275	0,275	0,2735	0,27575	0,27675	0,2745
Abaterea medie pătr. \sqrt{V}		0,0005	0,00025	0,0005	0,00125	0,0005	0,0005	0,00025	0,001	0,00025	0,0005
Concluzia controlului		c	c	c	o	c	c	c	c	c	c

Analizând cei doi parametri de control, primul referitor la stabilitatea reglării procesului și al doilea referitor la precizia procesului, se constată, la fel ca și în cazul controlului ritmicității, că punctul ce reprezintă media aritmetică a valorilor eșantionului 4 este situată în afara limitelor stabilite. Acest lucru este firesc, întrucât au fost prelucrate aceleași date experimentale. Durata de prelucrare mai mare a cauzat prelevarea de material prin descărcări electrice laterale, mărindu-se diametrul orificiilor.

Ținând cont de cauzele ce pot provoca instabilități ale procesului de prelucrare, luând măsurile corespunzătoare la începerea lucrului și pe parcurs, atunci când se observă tendințe de apariție a unor modificări, se poate preîntâmpina apariția rebuturilor.

Controlul statistic aplicat în timpul procesului de prelucrare a scos în evidență faptul că operația de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor conferă o bună ritmicitate a producției și o precizie dimensională corespunzătoare.

La aplicarea în producție a procedurii, utilizarea unui astfel de control nu este eficientă, ciclul de prelucrare fiind foarte scurt, iar calculele ce trebuie efectuate sînt laborioase. În această situație se preconizează folosirea unui control automat.

3.3.3. Precizia formei geometrice a orificiilor.

Realizarea unei bune pulverizări a combustibilului în camera de ardere a motorului este condiționată de forma orificiilor. Abaterile de la forma geometrică pot apărea în cazul prelucrării prin eroziune electrică a orificiilor, în funcție de următorii factori:

- precizia formei circulare a electrodului sculă;
- rectilinitatea generatoarei și a direcției de avans a electrodului sculă;
- ghidarea electrodului;
- regimul de prelucrare.

Abaterile maxime admise de la forma circulară și de la forma cilindrică a orificiilor pulverizatorului RODLIA 150 s 720 sînt de 0,01 mm. Pentru verificarea modului de încadrare în aceste cerințe se prezintă fotografiile ale eșantioanelor cu orificii prelucrate prin eroziune electrică, efectuate la un microscop Karl Zeiss Jena. În figura 8.19 se redau trei orificii, la care se poate apre-

cia precizia formei circulare.



x 40

Fig. 8.19



x 40

Fig. 8.20

Pentru a se putea observa forma cilindrică a orificiilor, a fost secționat un eșantion, imaginea fiind redată în figura 8.20.

8.3.4. Calitatea suprafeței orificiilor.

Calitatea suprafeței orificiilor prelucrate prin eroziune electrică este analizată sub două aspecte: microgeometria suprafeței, respectiv transformările structurale produse în stratul marginal afectat de procesul de prelucrare.

Microgeometria suprafeței se poate observa în figura 8.20. Se disting craterele, specifice prelucrării prin eroziune electrică. Rugozitatea estimată la microscop este cuprinsă între limitele $R_{\max} = 2 \dots 6 \mu\text{m}$.

Este cunoscut faptul că procesul de prelucrare prin eroziune electrică determină topirea și vaporizarea parțială a materialului și totodată afectează microstructura stratului marginal, pe o adâncime dependentă de valoarea energiei descărcărilor electrice și de susceptibilitatea aliajului la transformări fazice. În figurile 8.21...8.24 se prezintă câteva microstructuri semnificative aferente stratului marginal și metalului de bază, la prelucrarea prin eroziune electrică a orificiilor în materialul netratat termic, respectiv supus carbonitrurării, calirii și revenirii joase.

De remarcă faptul că în zona influențată termic de procesul de prelucrare, a materialului netratat termic, apare o structură bainitică aciculară (figura 8.21), foarte apropiată de cea a materialului de bază (figura 8.22).

La prelucrarea orificiilor în materialul tratat termic, stratul de suprafață are o structură constituită din carburi fine uniform distribuite într-o masă de bază de ferită saturată în carbon

(figura 8.23). Datorită temperaturii mari de încălzire din strat, carbonitrurile formate la tratamentul termochimic (figura 8.24) au fost trecute în soluție, iar prin răcire bruscă s-a obținut o stare în afară de echilibru. Gradul redus de omogenitate chimică a austenitei, determinat de vitezele de încălzire foarte mari, face ca numărul germinilor de cristalizare în stare solidă să fie mare și ca urmare a gradelor de subrăcire ridicate, dimensiunea acestora este mică. În acest fel se explică structura fină prezentă în stratul de suprafață.

Examinările metalografice electronice atestă faptul că efectuarea operației de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor după tratamentul termic prescris, conferă stratului marginal proprietăți de exploatare superioare celor obținute în urma prelucrării prin așchiere și aplicării tratamentului termic. Totodată absența abaterilor de formă a orificiilor, cauzate de aplicarea tratamentului termic, constituie un argument suplimentar în favoarea prelucrării prin eroziune electrică a orificiilor, după realizarea tratamentului termic al pulverizatorului.

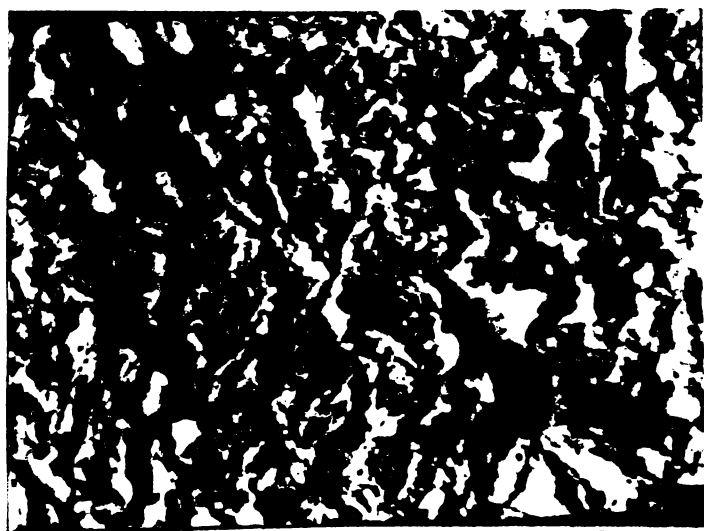


Fig. 8.21 x 15000

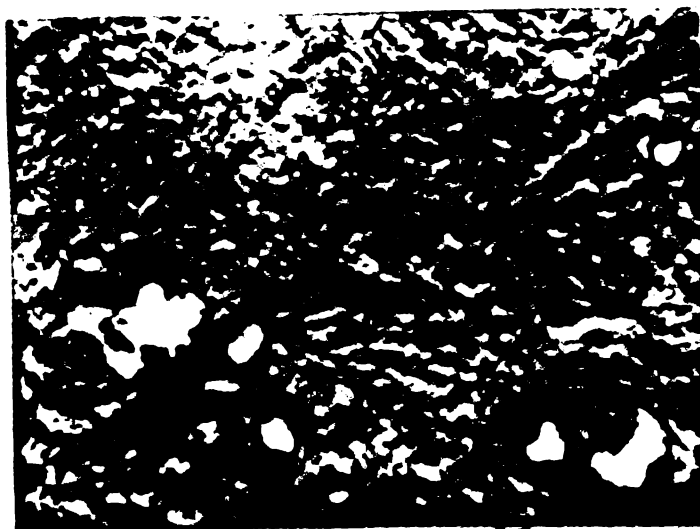


Fig. 8.22 x 15000



Fig. 8.23

x 15000



Fig. 8.24

x 15000

3.4. Concluzii.

Caracterile efectuate în scopul utilizării procedurii electroeroziv pentru prelucrarea orificiilor pulverizatoarelor de la injectoarele motoarelor Diesel au scos în evidență oportunitatea trecerii la faza de aplicare industrială. Productivitatea, precizia de prelucrare și calitatea suprafeței sînt superioare celor realizate prin procesul tehnologic actual.

9. CONCLUZII FINALE

Teza de doctorat elaborată și-a propus să rezolve problema prelucrării orificiilor de diametru mai mic de 0,4 mm, prin procedeul electroeroziv. Existând de la început o direcție clară de aplicare industrială a cercetărilor, acestea au fost orientate în consecință, delimitându-se astfel domeniul abordat.

Cele două obiective importante ale tezei, pe care s-au axat cercetările au fost:

- fundamentarea principiilor constructive, proiectarea, realizarea și încercarea unor modele experimentale de utilaje de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică;
- stabilirea parametrilor tehnologici optimi de prelucrare a microalezajelor prin eroziune electrică.

Apreciind ca rezultatele obținute sînt concludente, se impune aplicarea neîntîrziată pe scară industrială, în primul rînd în vederea înlocuirii actualului proces tehnologic de prelucrare a orificiilor pulverizatoarelor de la injectoarele motoarelor Diesel, eliminîndu-se în acest fel importul de scule și asigurîndu-se o precizie ridicată de prelucrare, concomitent cu creșterea productivității muncii.

În măsura solicitărilor pe care industria le va face, există posibilitatea de rezolvare și a altor situații concrete.

Din cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat se pot desprinde următoarele contribuții originale:

A. În domeniul cercetării teoretice,

1. Realizarea unui studiu monografic privind stadiul actual al tehnologiilor folosite pentru prelucrarea microalezajelor, stabilindu-se domeniile și limitele de aplicare a diferitelor procedee;

2. Înunțarea particularităților procesului și a parametrilor tehnologici de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor;

3. Fundamentarea unui model termic al procesului de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor, care a permis deducerea pe cale analitică a valorilor temperaturii dezvoltate la suprafața obiectului prelucrării, adîncimii pe care materialul acestuia este topit și vaporizat, capacității productive și factorului

de proporționalitate energetică, care au fost confirmate de rezultatele obținute prin experimentări.

4. Realizarea unui studiu critic asupra soluțiilor constructive cunoscute ale subansamblelor specifice care compun utilajele de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor.

5. Conceperea unui sistem de reglare automată a avansului electrodului sculă, de tip electromecanic, în circuit închis, cu acțiune în funcție de abatere.

6. Stabilirea principiilor de proiectare ale sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă, deducerea condițiilor necesare pentru asigurarea calității statice și a stabilității dinamice a acestuia.

7. Stabilirea ecuațiilor diferențiale și a funcțiilor de transfer ale elementelor ce compun sistemul de reglare automată a avansului electrodului.

8. Deducerea condițiilor funcționale ale dispozitivului de antrenare și ghidare a electrodului sculă.

9. Stabilirea principiilor de proiectare ale vibratorului electromagnetice folosit pentru oscilarea forțată a electrodului.

B. În domeniul experimental-constructiv,

1. Proiectarea și realizarea integrală a două modele experimentale de utilaje de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor.

2. Proiectarea, realizarea și încercarea unor soluții constructive ale elementelor componente ale sistemului de reglare automată a avansului electrodului sculă.

3. Proiectarea, realizarea și etalonarea unui vibrator electromagnetice.

4. Proiectarea, realizarea și încercarea unor soluții constructive ale generatorului de impulsuri.

5. Proiectarea, realizarea și încercarea unor soluții constructive de dispozitive de întrerupere a procesului de prelucrare și retragere a electrodului sculă, în vederea automatizării ciclului de prelucrare.

6. Proiectarea și realizarea instalației de circulare a lichidului dielectric.

C. În domeniul experimental-tehnologic,

1. Aplicarea statisticii matematice în vederea ordonării in-

fluenței parametrilor procesului de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor, asupra indicilor tehnologici se caracterizează capacitatea productivă și precizia de prelucrare.

2. Studiarea influenței parametrilor regimului electric asupra indicilor tehnologici.

3. Determinarea parametrilor optimi ai oscilațiilor forțate ale electrodului scula.

4. Stabilirea domeniului optim al conductibilității electrice a lichidului de lucru.

5. Stabilirea raportului maxim dintre adâncimea și diametrul de prelucrare.

6. Determinarea în ansamblu a parametrilor optimi de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor.

B. În domeniul cercetării aplicative,

1. Proiectarea și realizarea unui dispozitiv special de instalare și indexare a pulverizatoarelor și efectuarea încercărilor de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor acestora.

2. Proiectarea și realizarea în colaborare cu întreprinderea de mecanică fină din Sinaia a unei mașini semiautomate de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor.

3. Conceperea unei mașini automate cu patru posturi de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor.

4. Aplicarea metodelor de control statistic în vederea studierii desfășurării procesului de prelucrare prin eroziune electrică a orificiilor pulverizatoarelor.

5. Examinarea metalografică electronică a structurii stratului marginal al suprafeței orificiilor.

6. Efectuarea unui studiu comparativ cu privire la precizia de prelucrare și calitatea suprafeței obținute prin tehnologia actuală și prin cea propusă în cadrul tezei de doctorat entru realizarea orificiilor pulverizatoarelor de la injectoarele motoarelor Diesel.

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

1. Achimescu N., Popa H.- Influența factorilor geometrici asupra uzurii electrodului la prelucrarea electroeroziivă cu copierea formei. Buletinul științific și tehnic al I.I.Tr.Viua Timișoara, Seria mecanică, Tom 17(31) Fascicola 2, 1972.
2. Afanasiev N.V., Kapelian S.N.- Vlianie parametrov razriadnovo kontura na eroziu metallov pri razliacinih impulsnih davleniah. Fiziceskie osnovi elektroiskrovoi obrabotki materialov. Izd.Nauka, Moskva, 1966.
3. Afanasiev N.V.- Nekotorie zakonomernosti v iavleniah elektriceskoi erozii i puti povșenia proizvoditelnosti elektriceskoi obrabotki metallov. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, 1971.
4. Albinski K.- Bedeutung der Charakteristik der Elektrischen Impulsentladungen im vorgang der Elektroerosion. ISEM 3 Wien, 1970.
5. Armenski E.V. ș.a.- Electron-Beam Machining. ISEM 4, Bratislava, 1974.
6. Babuția I., Budișan N.- Teoria sistemelor automate. I.I.Tr.Viua Timișoara, 1976.
7. Baehni M.J.- Découpage par étincelage dans l'industrie horlogère ISEM 4, Bratislava, 1974.
8. Bakoto I.A., Nekrasevici I.G.- O naciionaloi stadii proșesa elektriceskoi erozii (proboi dielektricov). Fiziceskie osnovi elektroiskrovoi obrabotki materialov, Izd. Nauka, Moskva, 1966.
9. Balleys F.- Removal rate vs. accuracy in wire cut. ISEM 5, Solfsberg, 1977.
10. Bender F.K., Lahl D.- Wirtschaftlichkeitsfragen der funkenerosiven Raumformbearbeitung. ISEM 3, Wien, 1970.
11. Broch J.T.- Mechanical vibration and shock measurements. Brüel & Kjaer, 1973.
12. Budișan N.- Automatizări și telecomenzi. Ed. did. și ped., 1968.
13. Buzdugan Gh.- Măsurarea vibrațiilor mecanice. Ed. tehnic, București, 1979.

14. Cartia I.- Cercetări teoretice și experimentale asupra structurii, proprietăților fizice și rugozității suprafeței prelucrate prin eroziune electrică. Teză de doctorat, I.I.Tr.Vuia Timișoara, 1973.
15. Călin S., Belea C.- Sisteme automate adaptive și optimale. Ed. tehnica, București, 1971.
16. Sekster G.I.- Optimalinije parametri impulsov generatorov dlia elektroerozionovo şlifovania. Elektronnaia obrabotka materialov. Nr.5 (83), 1978.
17. Chinchole L.- Metal removal and adaptive control in EDM. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
18. Christov B.- Approach to the standardisation of the EDM process. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
19. Conrad H.- Impulsgeneratoren für elektroerosive Bearbeitung. Elektrik, 28, nr.6, 1974.
20. Conrad H., ș.a.- Zur Optimierung des EDM Prozesses. ISEM 4, Bratislava, 1974.
21. Crawley H.J.- The economics of electrical discharge machining. ISEM 3, Wien, 1970.
22. D'Auria A.- An integrated system for the numerical control manufacture of flat blanking dies. ISEM 4, Bratislava 1974.
23. Delpretti R.- Physical and chemical characteristics of the superficial layers. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
24. Demian T.- Elemente constructive de mecanica fină. Ed. Tehnica, București, 1976.
25. Divers S.V.- Ionisation in spark gaps its effect and control. ISEM 3, Wien, 1970.
26. Lobeneck B.F.- Einige industrielle Anwendungen der Materialbearbeitung mit Energiestrahlen. ISEM 4, Bratislava, 1974.
27. Dumpe V.L.- Elektroerozionnaia obrabotka detalei. Izd.Tehnika, Kiev, 1978.
28. Dupraz J.- Recent improvements of planetary techniques. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
29. Bușenko V.F., ș.a.- Optimizația procesa elektroiskrovovo leghirovania poroșkovimi materialami. Elektronnaia obrabotka materialov, Nr.5 (83), 1978.

30. Draghici G., Savii Gh.- Contribuții la întocmirea și optimizarea tehnologiei de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform. Lucrările Sesiunii tehnico-științifice organizate cu prilejul Zilei constructorilor de mașini din URSS. IC. FOM, București, 1974.
31. Draghici G., Savii Gh.- Caracteristicile constructive ale utilajelor de prelucrare prin eroziune electrică a microalezajelor. Lucrările celei de-a III-a Conferințe IUR, Timișoara, 1978.
32. Draghici G., Savii Gh., Szaufman Ir.- Considerații asupra mecanismului de prelevare a materialului la prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică. Bul. șt. și tehnic al I. Tr. Vuia Timișoara, Seria mecanică, Tom 25(39), Fascicola 1-1979.
33. Garbajs V.- Iroucitev integritete povrisin domacin materialov po elektroerozivni obdelavi. Fakulteta za strojninstvo univerze v Ljubljani, 1978.
34. Gavrilaș I.- Prelucrări electrice în construcția de mașini. M. tehnica, București, 1968.
35. Gavrilaș I.- Tehnologia prelucrării gaurilor filiforme prin electroeroziune. Sesiunea de comunicări științifice a ICAMTS, București, 1975.
36. Gavrilaș I.- Prelucrarea gaurilor filiforme prin electroeroziune. Sesiunea de comunicări tehnico-științifice, Galați, 1977.
37. Gislser K.- EDM solution to production problems. ISEM 3, Ien, 1970.
38. Godinho L.H., Noble S.F.- The use of water as interelectrode medium in pulsed EDM. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
39. Gogoasă I.- Cercetări tehnologice privind posibilitățile de extindere a procedeelor de prelucrare prin electroeroziune în industria RSR. Conferința Dezvoltarea industrială a tehnologiilor neconvenționale, București, 1977.
40. Gutkin B.G.- Avtomatizația elektroerozionih stankov. Izd. Mașinostroenie, Leningrad, 1971.
41. Navaleo J., Zimanyi J.- Composite (superposed) current pulses in EDM. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.

42. Heuvelman C.J. - Orientation on EDM standardization and terminology. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
43. Iolanzan T. - Cercetari asupra parametrilor constructivi și funcționali la mașinile de prelucrat cu ultrasunete. Teză de doctorat, I.P.Tr.Vuia Timișoara, 1975.
44. Kaldos F. - Characterizing of electric discharge machines by the metal removal rate, volumetric electrode wastage and roughness of the machined surface. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor. Timișoara, 1971.
45. Kaldos F., Kiss L. - Effects of some EDM parameters on machined surfaces. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
46. Kiryazova K. - Producing precision threads and other profiles by EDM. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
47. Klostermann V. - Funkenerosion Werkzeugmaschinen für die Bearbeitung von Druckguss und Kokillen - Werkzeugen AEG Elotherm, 1978.
48. Kosec L., ș.a. - Some characteristics of EDM surfaces of sintered carbide and electrode. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
49. Kosik o. - Metallurgical problems associated with EDM. ISEM 3, Wien, 1970.
50. Kolalenko V.S. - Elektrofiziceskie i elektrohimiceskie metodi obrabotki materialov. Kiev, 1975.
51. König G., Murr R. - Grundlagen zur selbsttätigen Regelung der funkenerosiven Bearbeitung. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara 1971.
52. König G., Barz E. - System für die Prozessoptimierung bei der funkenerosiven Bearbeitung. ISEM 4, Bratislava 1974.
53. Kracht E., Zimmermann A. - Spark erosion of largeforging dies. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
54. Krasiuk B. A. - O roli mehaniceskih faktorov v processe svetovoi erozii metallov. Fiziceskie osnovi elektreiskrovoi obrabotki materialov, Izd. Nauka, Moskva, 1966.

55. Kravets A.T., s.a. - Technological characteristics of EDM, range of application and problems of increasing efficiency. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
56. Kunc J. - Konstrukce riesenie elektroiskrovych obrabacih strojov. Nekonvenčne metody obrabania kovov, Bratislava, 1972.
57. Lang W. - Heutige Tendenzen der funkenerosiven Mikrobearbeitung. ISEM 3, Wien, 1970.
58. Lang W. - Wirtschaftlichkeit und Besonderheiten der EDM-Anwendungen in Verschiedenen Branchen und bei Verschiedenen Dimensionen. ISEM 4, Bratislava, 1974.
59. Lascoe G.D. - Minicomputer for on line process optimization. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
60. Lascoe G.D., s.a. - The effect of the recast layer on the surface integrity and the fatigue life of 18 / Nickel maraging steel. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
61. Lazarenko B.R. - Elektroiskrovoe leghirovanie s ispolinovaniem elektriceskogo polia. Elektronnaia obrabotka materialov, nr.3, 1976.
62. Levinson L.M., s.a. - Elektrorazriadnaia obrabotka metallov. Izd. Mashinostroenie, Leningrad, 1971.
63. Levinson L.M., s.a. - Sprovociroe posobie po elektrotehnologii. Leningrad, 1972.
64. Levit M.L., Korenblum M.V. - Computation of operating parameters of EDM with regard to thermal and hydrodynamic processes in the interelectrode space. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
65. Levit M.L., Madelko G.V. - Testing of workpiece and electrode materials. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
66. Levy G.N., s.a. - Technological and economical aspects of planetary spark erosion. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
67. Liubcik L. - proiectarea electromagnetilor. Editura tehnica, Bucuresti, 1976.
68. Livsit A.L. - Mechanizm protessa elektroerozionoi obrabotki metallov. Stanki i instrument, 36, 9, 1967.
69. Livsit A.L. - Elektreimpulsnaia obrabotka metallov. Izd. Mashinostroenie, Leningrad, 1967.

70. Maillet M.A., Quisse M. - The reduction of electrode wire to non measurable dimensions using output generations partially activated by relaxation. ISEM 3 Sien, 1970.
71. Manițiu C. - Contribuții la teoria generală a stabilirii parametrilor de lucru la prelucrarea prin electroeroziune. Conferința Dezvoltarea industrială a tehnologiilor neconvenționale, București, noiembrie 1977.
72. Marendaz G.A. - Servomecanismul. Information technique Charnilles, nr.11, 1970.
73. Mehedințeanu I. - Contribuții la studiul prelucrării cu fascicul laser concentrat a alezajelor micrometrice în materiale dure. Teză de doctorat, I. .Pr. Vujia Timișoara, 1978.
74. Mirnoff N.L. - Thermal effects of erosive pulses. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
75. Mițkevici N.K. - Ob elektroerozionnom effekte na vibriruiuşeih elektrodah. Fiziceskie osnovi elektroiskrovoi obrabotki materialov. Izd. Nauka, Moskva, 1966
76. Mițkevici N.K. - Einfluss der Niederfrequenzschwingungen der Elektroden und Ultraschalles auf den funkenerosiven Abtragprozess. ISEM 3, Sien, 1970.
77. Motoki M., ș.a. - Electronic ED. Generator. ISEM 4, Bratislava, 1974.
78. Motoki M., Uno T. - Bridge phenomenon in the gap, instability of low current discharge and high frequency oscillation. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
79. Nanu A. - Tehnologia materialelor. Editura didactică și pedagogică, București, 1977.
80. Nanu A. - Perspectivele tehnologiilor neconvenționale în industrie. Conferința Dezvoltarea industrială a tehnologiilor neconvenționale, București noiembrie, 1977.
81. Nanu A., Buzulică D. - Posibilități de optimizare a programării parametrilor electrici la prelucrarea prin eroziune electrică. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor. Timișoara, 1971.

82. Nanu A., Isarie I. - Theoretical considerations about the possibilities of improving surfaces finish at EDM under overpressure condition. ISEM 3, Wien, 1970.
83. Nanu A., Nichici A. - Calculul productivității prelucrării cu scintei electrice cu electrod oscilant. Buletinul științific și tehnic al IP Timișoara, Seria mecanică, Tom 15(29), Fascicula 1, Ian.-iunie 1970.
84. Nanu A., Nichici A. - Berechnung der Abtragleistung bei funkenerosiven Bearbeitung mit schwingender Elektrode. ISEM 3, Wien, 1970.
85. Nanu A., Nichici A. - Principii de optimizare a prelucrării cu scintei electrice cu electrod oscilant. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, 1971.
86. Nanu A., ș.a. - Contribuții privind realizarea unui sistem de avans pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică. Vol. Tehnologii noi în construcția de mașini, Galați, 1977.
87. Nanu A., ș.a. - Principii constructive ale mașinilor de prelucrare dimensională prin eroziune electrică de tip RC. Vol. Tehnologii noi în construcția de mașini, Galați, 1977.
88. Nica M. - Contribuții la studiul teoretic și experimental al prelucrării oțelurilor slab aliate prin procedeul electrochimic în regim hidrodinamic. Teza de doctorat, I.P.Tr.Vuia Timișoara, 1978.
89. Nichici A. - Fenomene fundamentale la prelucrarea cu scintei electrice cu electrod oscilant. Teza de doctorat, I.P.Tr.Vuia Timișoara, 1970.
90. Nanu D. - Prelucrarea prin eroziune electrică în câmp magnetic. Teza de doctorat, I.P.Cluj-Napoca, 1979.
91. Nichici A. - Tendințe actuale în modelarea proceselor de prelucrare prin eroziune electrică. Conferința Dezvoltarea industrială a tehnologiilor neconvenționale. București, noiembrie, 1977.
92. Obaciu Gh. - Contribuții la studiul distribuției energiei

- impulsului la prelucrarea electroerzivă. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, 1971.
93. O'Connor P. - EDM in motion machine tools designed for their application. ISEM 3, Wien, 1970.
94. Otto H.S., Lorenblum M.V. - High-frequency transistor generators for EDM. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
95. Bal M.N., s.a. - Optimization of circuit parameters of a relaxation circuit of EDM. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, 1971.
96. Manschow R., Suhr V. - Line numerische Steuerung für Maschinen zum funkenerosiven Schneiden mit ablaufender Drahtelektrode und Aspekte ihrer Entwicklung ISEM 3, Wien, 1970.
97. Manschow R., Suhr V. - Numerische Steuerung für funkenerosiven Drahtschneidemaschine. Werkzeug Maschine International, nr.4, August 1971.
98. Sciurow N.S., s.a. - O zatražah energii na himičeskie procesi pri elektroerozionoi obrabotke. Fizičeskie osnovi elektroiskrovoi obrabotki materialov, Izd. Nauka, Moskva, 1966.
99. Beklenik J. - Obdelovalnost domacih materialov z elektroerozije I.del. Ljubljana, 1977.
100. Golotski V.L., s.a. - Improvements to ed wire cut machines and their range of application. ISEM 5, Wolfsberg 1977.
101. Popa H., Achimescu N. - Procese și factori care determină uzura electrodului la prelucrarea prin erziune electrică cu copierea formei. Buletinul științific și tehnic al I.P.Timișoara, Seria mecanică, Tom 17(31) Fascicola 2, 1972.
102. Popelusak V. - Aplicacia elektroiskroveho obrabania v jemnej mechanike. Nekonvenone metody obrabania kovov, Bratislava, 1972.
103. Popilov L.I. - Elektrofiziceskaia i elektronimiceskaia obrabotka materialov. Izd. Mašinostroenie, Moskva 1969.
104. Popilov L.I. - Osnovi elektrotehnologhii i novie ee raznovidnosti. Izd. Mašinostroenie, Leningrad, 1971.

105. Fuhr J., Scharwächter R. - Effect of EDM, ECM and EBM on the strenght of high temperature nickel alloy. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
106. Rauscher G. - Materialbearbeitung mit Laser. ISEM 4, Bratislava, 1974.
107. Rhyner H. - Betrachtungen über einige der neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Entladungsgeneratoren. ISEM 3, Wien, 1970.
108. Rhyner H. - Generatoare de descarcare. Information technique Charmilles, nr.11, 1970.
109. Roche A., s.a. - Le diélectrique et les matériaux constituant l'électrode et la pièce en usinage par électro-érosion. ISEM 4, Bratislava, 1974.
110. Roethel F. - Elektroerozijska obdelava (EDM) na nasih tleh. Strojnikski vestnik, Ljubljana, nr.11-12, 1976.
111. Roethel F. - Nekaj misli o izbivi posebnih tehnoloskih postopkov za obdelavo. Strojnikski vestnik, Ljubljana, nr.1-2, 1977.
112. Rumsiski L.Z. - Prelucrarea matematica a datelor experimentale. Editura tehnica, Bucuresti, 1974.
113. Rupert G.F. - Production EDM technology-today. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
114. Savii Gh. - Tehnologia construcției de mașini. Editura didactica și pedagogica, Bucuresti, 1967.
115. Savii Gh., Drăghiei G. - Criteriu de stabilire a timpului de normare pentru operația de prelucrare prin electroeroziune. Buletinul științific și tehnic al I.P.Tr.Vuia Timișoara, Seria mecanica, Tom 20(34), Fascicola 1, 1975.
116. Savii Gh., Drăghiei G. - Studiu privind prelucrabilitatea aliajului Ferro-Fic prin electroeroziune. Buletinul științific și tehnic al I.P.Tr.Vuia Timișoara, Seria mecanica, Tom 22(36), Fascicola 1, 1977.
117. Savii Gh., Drăghiei G. - Unele aspecte privind tehnologiile de prelucrare a microalezajelor prin procedee neconvenționale. Lucrari tehnico-științifice. Vol. Prelucrari la rece și la cald. Sudura și încercari mecanice, I. .Tr.Vuia Timișoara, 1977

118. Savii Gh., Draghici G. - Studiu asupra prelucrabilității aliajului Zircaloy prin electroeroziune cu impulsuri de relaxare. *Buletinul științific și tehnic al I.P.Tr.Vuia Timișoara, Seria mecanică, Tom 22(37), Fascicola 1, 1978.*
119. Savii Gh., Draghici G. - Studiul statistic al influenței parametrilor procesului asupra indicilor tehnologici la prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică. *Buletinul științific și tehnic al I.P.Tr.Vuia Timișoara, Seria mecanică, Tom 23(38), Fascicola 2, 1978.*
120. Savii Gh., Draghici G. - Particularități tehnologice la prelucrarea microalezajelor prin eroziune electrică. *Comunicările celei de-a III-a Conferințe UIR, Vol.I, Timișoara, 1978.*
121. Savii Gh., Draghici G. - Исследования по оптимизации процесса электроискровой обработки микрорасточек. *Международный симпозиум по электрическим методам обработки материалов, ISM 6, Варшав, 1980.*
122. Schecher H.S. - Erodieren von grossen Hohlformwerkzeugen. *ISM 4, Bratislava, 1974.*
123. Schadaoh P. - Funkenerosive Bearbeitung von pritzgiesswerkzeugen. *Maschinenmarkt 95/1974, 15/1976.*
124. Schmidt H.W. - Funkenerosives Schneiden mit Drahtelektrode und Bahnsteuerung. *Moderne Fertigung, VDI-Nachrichten, Mai 1970.*
125. Schmidt G. - Technik des funkenerosiven Drahtschneidens. *ISM 3, Wien 1970.*
126. Schmitt R., Leacock R. - Les micro-orifices. *Exposé présenté à l'Institut de physique de Genève, le 29 oct. 1971.*
127. Schmitt R. - Integration de l'électro-érosion dans une chaîne transfert dans l'industrie automobile. *ISM 4, Bratislava, 1974.*
128. Schumacher . - Funkenerosive Schneidanlage mit numerisch bahngesteuerter Drahtelektrode. *Technische Rundschau nr.13, April 1970.*
129. Schumacher . - Volltransistorisierte, statische Impulsgeneratoren für die funkenerosive Bearbeitung. *GI.*

- Baureihe L. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, 1971.
130. Schumacher B. - Die Verfahrensgerechte Planung und Ausführung von Erodierarbeiten. ISEM 4, Bratislava, 1974.
131. Senecky L., ș.a. - Functional Groups of EDM machines. ISEM 4, Bratislava, 1974.
132. Sieper R. - Schneidwerkzeuge funkenerosiv bearbeitet. Maschinen Anlagen Verfahren nr.10, 1976.
133. Sieper R. - Senk und Drahterodiermaschinen : Stand der Technik und Entwicklungstendenzen, Maschinenmarkt nr.27, 1977.
134. Silaș Gh., ș.a. - Vibrații mecanice. Editura didactică și pedagogică, București, 1968.
135. Siwczyk M. - Einige probleme der projektierung der Werkzeugelektroden für die elektroerosive Bearbeitung. ISEM 4, Bratislava, 1974.
136. Snoeys R., ș.a. - Analysis of the EDM process. ISEM 5, Wolfsberg 1977.
137. Stanek J. - Electromachining Development trends. ISEM 4, Bratislava, 1974.
138. Stavițki B.I., ș.a. - Ed cutting with a wire tool electrode. ISEM 4, Bratislava, 1974.
139. Tadini V., Bühler B. - Process control in EDM die sinking. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
140. Tiron M. - Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare. Editura tehnică, București 1977.
141. Ullmann ., Schumacher B. - Numerisch gesteuerte Funkenerosion. Werkzeug Maschine International, nr.3, 1971.
142. Van Dijk F., Snoeys R. - Thermo-mathematical analysis for Electro Discharge Machining operation. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor Timișoara, 1971.
143. Van Dijk F., ș.a. - Some results of physical Research in EDM. ISEM 4, Bratislava, 1974.
144. Van Osenbruggen C. - Mikroszikkraforģicsolis. Minomechanika, nr.6,7,10, 1971.
145. Volkov I.S., Livșiț A.L. - Ghidromehanika profesorov evakuatii

- produselor erozii iz mejelektrodnogo zagora.
 Fizika i himia obrabotki materialov, Moskva,
 nr.3, 1968.
146. Vucu I. - Cercetari asupra prelucurii dimensionale ultrasonore cu suspensie abraziva a unor ferite. Teza de doctorat, I.P.Tr.Vuia Timisoara, 1977.
147. Willey H.C.T. - Parametrii procesului de prelucurare prin eroziune electrica. Buletinul stiintific si tehnic al I.P.Tr.Vuia Timisoara, Seria mecanica, Tom 17(31), Fascicola 1, 1972.
148. Winkelman R. - Die Problematik der oberflächenmessung und die Einführung von oberflächennormalen bei der funkenrosiven Bearbeitung. ISEM 3, Wien, 1970.
149. Zimanyi J. - Zu einige Fragen der Dynamik der elektrischen Entladung bei Anwendung des unabhängigen Generators. ISEM 3, Wien, 1970.
150. Zimanyi J. - Principiile zanjimare experimenty. Nekonvenentne metody obrabania kovov, Bratislava, 1972.
151. Zimanyi J. - Interelectrode Material transfer in EDM process using controlled Generators. ISEM 4, Bratislava, 1974.
152. Zimanyi J. - Mathematical model of the EDM process and its application to planning on optimal technological process. ISEM 5, Wolfsberg, 1977.
153. Zolotich B.N. - Phänomenologische Theorie der funkenrosiven Massbearbeitung. ISEM 3, Wien, 1970.
154. Zolotich B.N. - O roli mehanicheskikh faktorov v processe erozii v impulsnom razriade. Fizicheskie osnovy elektrotroiskrovoy obrabotki materialov, Izd. Nauka, Moskva, 1966.
155. Zolotich B.N. - Practical significance of the theory of EDM in Fluids. ISEM 4, Bratislava, 1974.
156. x x x - AEG Electrotherm. prospects.
157. x x x - Agietron S.S. AGIE für industrielle elektronike Lozane-Locarno, Schwitzerland. prospect.
158. x x x - Charmilles, Genève, Schwitzerland. prospects.
159. x x x - Bromik-Bromatik. Instalatiile de prelucurare prin eroziune cu scintei din programul de fabrica-

ție al firmei VEB Steremat Hermann Schlimme,
Berlin. respecte.

160. x x x - Prelucrarea metalelor prin tehnologii neconvenționale. Buletin de informare tehnică pentru ingineri, nr.2, 1973.
161. x x x - STAS 1839-72. Teoria probabilităților. Terminologie și simboluri.
162. x x x - STAS 2631-72. Statistica matematică. Terminologie și simboluri.
163. x x x - STAS R 1849-72. Controlul statistic al calității. Controlul în timpul procesului de fabricație. Principii de bază.
164. x x x - STAS R 5880-72. Controlul statistic al calității. Controlul în timpul procesului de fabricație, prin măsurare.