

615.140  
140 G

UNIVERSITATEA POLITEHNICA  
TIMISOARA  
FACULTATEA DE MECANICA

# TEZA DE DOCTORAT

ACTIVAREA CU ULTRASUNETE A  
PROCESELOR DE PRELUCRARE  
PRIN ELECTROEROZIUNE CU  
ELECTROD FILIFORM

ing. Viorel-Mihai Nani

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

Conducător științific:  
Prof. univ. dr. ing. Tudor Iclănzan

Timișoara 1996

## C U P R I N S

Mulțumiri .....	6
Cap.0 Introducere .....	8
Cap.1 Echipamente și tehnologii de prelucrare prin electroeroziune și ultrasunete .....	12
1.1 Locul tehnologiilor neconvenționale în construcția de mașini. Principiul prelucrării prin eroziune .....	12
1.2 Tehnologie și utilaj de prelucrare prin electroeroziune. Prelucrarea prin electroeroziune cu electrod filiform .....	15
1.3 Tehnologie și utilaj de prelucrare cu ultrasunete .....	28
Cap.2 Realizări în domeniul activării cu ultrasunete a procesului de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform .....	39
2.1 Principiul activării cu ultrasunete a electrodului filiform .....	39
2.1.1 Dispozitive de activare cu ultrasunete a electrodului filiform .....	39
2.1.2 Modelul prelucrării prin electroeroziune cu electrod filiform activat ultrasonic .....	46
2.2 Cercetări experimentale întreprinse. Rezultate obținute .....	53
Cap.3 Baze fizico-chimice, tehnologice și fenomenologice ale prelucrării prin electroeroziune în câmp ultrasonic .....	59
3.1 Considerații teoretice privind transmiterea undelor ultrasonice într-un mediu material oarecare .....	59
3.2 Studiul modurilor de vibrație a concentratoarelor adaptoare de undă în oscilații longitudinale .....	69
3.3 Studiul parametrilor caracteristici principali ai impulsurilor de tensiune și vibrațiilor elastice .....	73
3.4 Studiul proceselor ce au loc în interstițiul tehnologic la prelucrarea prin electroeroziune în câmp ultrasonic .....	76
3.4.1 Amorsarea descărcării electrice în câmp ultrasonic .....	76

3.4.2 Evoluția descărcării electrice în câmp ultrasonic .....	79
3.4.3 Prelevarea de material din piesă și uzarea sculei în câmp ultrasonic .....	81
3.4.3.1 Activarea energetică locală .....	82
3.4.3.2 Expulzarea materialului activat .....	82
3.5 Considerații asupra mecanismelor ipotetice de pre- lucrare prin electroeroziune cu electrod filiform activat cu ultrasunete .....	65
Cap.4 Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă a sistemelor acustice rezonante .....	69
4.1 Calculul și proiectarea unui concentrator adaptor de undă sub forma unei bare de secțiune circulară constantă .....	69
4.2 Calculul și proiectarea unui concentrator adaptor de undă cilindric în trepte .....	91
4.3 Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă sub forma unor bare de secțiune circulară variabilă .....	94
4.3.1 Calculul și proiectarea concentratorului adaptor de undă conic .....	97
4.3.2 Calculul și proiectarea concentratorului adaptor de undă exponențial .....	102
4.3.3 Calculul și proiectarea concentratorului adaptor de undă catenoidal .....	107
4.3.4 Considerații teoretice privind determinarea principalelor elemente constructive specifice CAU .....	110
4.4 Elemente modificatoare ale algoritmilor de calcul și gradul de influență a diferiților parametri perturbatori .....	112
4.4.1 Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă cu obiectul de transfer (scula) atașat .....	112
4.4.1.1 Calculul CAU cilindric în trepte cu OT(S) atașat .....	112

4.4.1.2	Calculul CAU exponențial cu OT(s) atașat .....	116
4.4.2	Calculul concentratoarelor adaptoare de undă cilindrice în trepte având o secțiune variabilă la trecerea între tronsoane .....	121
4.4.2.1	Calculul CAU cilindrice în trepte având o suprafață conică la trecerea între tronsoane .....	123
4.4.2.2	Calculul CAU cilindrice în trepte având o suprafață catenoidală la trecerea între tronsoane .....	126
4.4.3	Influența factorului de amplificare și a masei concentratorului adaptor de undă asupra lungimii și a frecvenței sale de rezonanță .....	130
4.4.4	Influența formei concentratorului adaptor de undă asupra parametrilor acustici și tehnolo- gici .....	136
4.5	Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă de secțiune circulară și profil după funcția Bessel .....	142
4.6	Calculul și proiectarea unor concentratoare adaptoare de undă complexe (compuse) .....	146
4.6.1	Aplicarea metodei diferențelor finite la determinarea dimensiunilor și solicitărilor concentratoarelor adaptoare de undă .....	147
4.6.2	Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă determinând legea de variație a profilului .....	158
Cap.5	Modalități de activare cu ultrasunete a electrodului filiform .....	171
5.1	Vibrațiile sistemelor continue. Vibrațiile firelor .....	171
5.2	Vibrația electrodului filiform utilizat la prelu- crarea prin electroeroziune .....	175
5.2.1	Activarea electrodului filiform într-un singur punct .....	175

5.2.2 Activarea electrozodului filiform în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu .....	183
5.3 Influența descărcărilor electrice în impuls asupra caracteristicilor de prelucrare .....	194
Cap.6 Cercetări experimentale asupra proceselor de prelucrare prin electroeroziune cu electrozod filiform activat ultrasonic .....	201
6.1 Obiective urmărite prin activarea cu ultrasunete a procesului de prelucrare prin electroeroziune.....	201
6.2 Instalația experimentală. Dimensionarea sistemului de activare cu ultrasunete a electrozodului filiform .....	203
6.2.1 Proiectarea concentratorului adaptor de undă .....	205
6.2.2 Calculul de dimensionare a elementelor de ghidare și alimentare cu energie electrică a electrozodului filiform .....	207
6.3 Cercetări experimentale privind prelucrarea prin electroeroziune cu electrozod filiform activat ultrasonic .....	212
6.3.1 Activarea electrozodului filiform cu frecvență ultrasonică într-un singur punct .....	212
6.3.1.1 Activarea electrozodului filiform cu frecvență ultrasonică în brațul mobil .....	213
6.3.1.2 Activarea electrozodului filiform cu frecvență ultrasonică în brațul fix .....	217
6.3.2 Activarea electrozodului filiform cu frecvență ultrasonică în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu .....	221
6.3.2.1 Aspecte privind variația capacității erozive în funcție de parametri de lucru .....	223
6.3.2.2 Rezultate experimentale privind pre- cizia dimensională, de formă și calitatea suprafeței.....	230
6.3.3 Concluzii privind rezultatele cercetărilor ex- perimentale întreprinse de autor .....	234

Cap.7 Concluzii finale și contribuții originale ale autorului.....	236
7.1 Concluzii finale .....	236
7.2 Contribuții originale ale autorului .....	237
7.2.1 Contribuții teoretice .....	237
7.2.2 Contribuții în domeniul aplicațiilor practice și industriale .....	238
7.2.3 Contribuții în domeniul cercetării și încercă- rilor experimentale .....	239
Bibliografie .....	240

## M U L T U M I R I

Acum, după finalizarea lucrării, primele cuvinte de mulțumire și recunoștință se îndreaptă spre conducătorul științific, **prof.dr.ing.Tudor Iclănzan** care a îndrumat și canalizat activitatea de elaborare a lucrării cu multă competență și profesionalism, creând doctorandului un puternic sentiment de responsabilitate și încredere în forțele proprii și căruia i-a pus la dispoziție bogata sa experiență în domeniu.

Fără a respecta o anumită ordine, autorul se simte dator de a-i mulțumi domnului **prof.doc.dr.ing.Aurel Nanu**, cel care i-a condus primii pași și i-a insuflat o adevărată patimă pentru tehnologiile neconvenționale.

Folosind acest prilej, autorul își exprimă gratitudinea față de domnul **prof.dr.ing.Mihai Nica** care a avut un rol determinant în formarea sa profesională ca viitor specialist și cercetător.

Cu cele mai alese gânduri autorul cinstește prin prezenta lucrare memoria regretatului **prof.em.dr.ing.Gheorghe Savii** care a contribuit decisiv la maturizarea și afirmarea autorului pe tărâmul cercetării științifice, în abordarea și coordonarea unor programe de cercetare de interes național.

Nu poate fi omis din această înșiruire domnul **inginer Arke Markus**, cel ce a înființat și condus cu dăruire și abnegație aproape două decenii întreprinderea **Electrotimiș**, unde autorul a avut posibilitatea să-și valorifice cunoștințele și să cunoască o deplină consacrare pe tărâm profesional.

În această ordine de idei, un gând bun pentru foștii colaboratori din cadrul departamentului de cercetare de la **Electrotimiș**, remarcând, fără a respecta un anumit criteriu de departajare, pe **Dan Nicoară, Cornel Militaru, Alexandru Isar, Nicolae Muntean, Marcel Tolomey, Gheorghe Pop, Carol Gal, Constantin Voloșencu, Sorin Marian, Tereza Nyari, Ioan Barbu, Rafael Opreșiu, Marius Dineș, Dan Vidrașcu**, care, prin efort comun, a asimilat în fabricația de serie o gamă de produse noi, originale în domeniul construcțiilor de mașini (ultrasunete, electroeroziune, microelectronică).

Nu în ultimul rând, autorul ține să mulțumească celor ce au sprijinit îmbogățirea cunoștințelor autorului pe parcursul elaborării tezei, dând sfaturi interesante sau punându-i la dispoziție un prețios material bibliografic, evocând

în acest sens personalitatea prof. dr. ing. Alexandru Nichici și prof. dr. ing. George Drăghici; aceleași considerente și pentru domnii prof. dr. ing. Vladimir Crețu, conf. dr. ing. Titus Slavici și as. ing. Ion Stoianov care au asigurat suportul logistic și au sprijinit tehnoredactarea prezentei lucrări.

Un gând bun și domnului director general inginer Andrei Mățiu și colaboratorilor săi de la SC "STIMEL" SA Timișoara care a asigurat baza materială și a pus la dispoziția autorului utilaje, echipamente și personal de specialitate pentru derularea programului de cercetare experimentală.

Apreciind sprijinul familiei, îndeosebi al soției și al copiilor care au fost în permanență alături, autorul mulțumește în încheiere tuturor celor care au contribuit direct sau indirect la finalizarea lucrării de față, spațiul restrâns nepermițând însiruirea tuturor numelor acestora.



## CAPITOLUL 0. INTRODUCERE

Prezenta lucrare reprezintă rezultatul unei activități de aproape 15 ani și a unei pasiuni de mai bine de două decenii a autorului în domeniul atât de captivant al tehnologiilor neconvenționale, îndeosebi cele privind prelucrarea prin electroeroziune, cu ultrasunete și nu în ultimul rând, prin electrochimie. Introducerea în problematica temei s-a făcut treptat, începând cu o prezentare sintetică a principalelor echipamente și tehnologii care caracterizează separat prelucrarea prin electroeroziune, respectiv cu ultrasunete, continuând cu unele realizări obținute pe plan mondial în ceea ce privește activarea cu ultrasunete a electrodului filiform utilizat la prelucrarea prin electroeroziune, modelarea mecanismului de prelevare și îndepărtare a particulelor erodate ca efect al suprapunerii energiei ultrasunetelor peste energia datorată descărcărilor electrice în impuls și terminând cu rezultatele cercetărilor experimentale întreprinse de autor.

Lucrarea încearcă să îmbine pregătirea și cunoștințele teoretice și practice ale autorului din două procese de fabricație înrudite, dar distincte prin particularitățile parametrilor de proces pe care le incumbă, rezultând prin combinarea acestora o tehnologie de prelucrare inedită, caracterizată prin performanțe superioare, cu atât mai mult cu cât în literatura de specialitate și de brevete acest subiect nu este în totalitate tratat și eludat. Pornind de la această remarcă, autorul a căutat și găsit noi posibilități de abordare a domeniului cercetat în interconexiune, aprofundând întrepătrunderea proceselor până la nivelul unui act eroziv elementar și a orientat experimentările spre valorificarea unor brevete proprii de invenție privind antrenarea, recondiționarea și vibrarea electrodului filiform în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu.

Dezideratul principal urmărit în lucrare a fost de evidențiere a eficienței prelucrării prin electroeroziune cu electrod filiform activat cu frecvență ultrasonică, elaborarea unui ghid tehnologic de uzinare a unor materiale dure tratate termic coroborat cu studierea posibilităților de dotare a mașinilor de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform cu dispozitive și echipamente de activare ultrasonică.

În primul capitol autorul își rezervă libertatea de a face o scurtă incursiune în problematica prelucrării prin eroziune, scoțând în evidență principiile de bază ale fenomenelor ce conduc la îndepărtarea de material din

semifabricat și prezentând principalele utilaje specifice prelucrării prin electroeroziune și cu ultrasunete. În fapt, se face o prezentare generală a mașinii de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform de fabricație românească la a cărei realizare și asimilare în premieră națională a contribuit și autorul la sfârșitul anilor '70, și care, printr-o echipare corespunzătoare cu generatoare de ultrasunete și convertoare electroacustice adecvate, a constituit instalația experimentală pe care autorul și-a derulat programul de cercetare.

În al doilea capitol sunt analizate dispozitivele de activare cu ultrasunete a electrodului filiform realizate pe plan mondial, autorul incluzând aici și propriul dispozitiv ce constituie obiectul unui brevet de invenție românesc. Sunt prezentate în detaliu modelul prelucrării prin electroeroziune cu electrod filiform activat ultrasonic fundamentat de cercetătorii ruși la sfârșitul anilor '60 pentru prima familie de generatoare de impulsuri RC, cât și rezultatele cercetărilor întreprinse de specialiștii japonezi la începutul anilor '80 precum și de autor în etapa preliminară de tatonare și orientare a activității proprii de cercetare.

Al treilea capitol tratează aspecte fenomenologice ale prelucrării prin electroeroziune în câmp ultrasonic. După ce face o analiză a modului de transmitere a undelor ultrasonice printr-un mediu material oarecare precum și a parametrilor caracteristici impulsului de tensiune, autorul propune un model de prelevare și îndepărtare a particulelor erodate urmărind secvențial inițierea și dezvoltarea unei descărcări electrice în câmp ultrasonic, activarea energetică locală și expulzarea materialului activat. În finalul acestui capitol sunt prezentate câteva considerații asupra mecanismelor ipotetice de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform activat cu ultrasunete care vor ghida în continuare programul de cercetări experimentale.

Dat fiind influența modului de realizare și adaptare a convertoarelor electroacustice pe mașina de prelucrat ca măsură a oportunității activării cu ultrasunete a electrodului filiform, al patrulea capitol se ocupă de calculul de dimensionare a concentratoarelor adaptoare de undă. După o scurtă prezentare a modului de calcul al concentratoarelor simple așa cum reiese și din literatura de specialitate, cu analogii confirmând teoria sonicității savantului român Gogu Constantinescu, sunt analizate în detaliu elementele modificatoare și influențele diferiților parametri perturbatori asupra algoritmilor de calcul: atașarea sculei (obiectului de transfer), variația secțiunii la trecerea dintre tronsoane, factorul de amplificare, masa și forma concentratorului însăși. Se dezvoltă calculul de proiectare pentru concentratoare de secțiune circulară și profil după funcția Bessel, după care se fac referiri asupra concentratoarelor complexe (compuse). Sunt prezentate două metode de calcul a concentratoarelor complexe, una a diferențelor finite, iar cealaltă determinând legea de variație a profilului,

fiecare din aceste metode având organigrama și programul de dimensionare pe calculator. În finalul acestui capitol sunt analizate câteva cazuri concrete de dimensionare care implică un calcul de proiectare diferențiat.

În al cincilea capitol se fac referiri asupra modalităților de activare cu ultrasunete a electrodului filiform, fiind dezvoltat un studiu teoretic privind vibrarea electrodului într-un punct sau în două puncte după două direcții perpendiculare în spațiu; în acest ultim caz sunt analizate două situații distincte: vibrarea electrodului filiform cu frecvență ultrasonică în două puncte cu frecvențe și amplitudini egale, respectiv cu frecvențe și amplitudini diferite. De asemenea, este evidențiată influența câmpului electromagnetic asupra poziției relative a electrodului filiform față de semifabricat în timpul prelucrării prin electroeroziune datorată descărcărilor electrice în impuls, cu consecințe negative asupra preciziei dimensionale.

Capitolul al șaselea prezintă în exclusivitate instalația și cercetările experimentale întreprinse de autor în condiții de exploatare industrială pe una din mașinile ELEROFIL-10 din fabricația de serie. Programul de cercetare a explorat atât vibrarea electrodului filiform cu frecvență ultrasonică într-un singur punct, în brațul mobil sau în brațul fix după o direcție paralelă sau perpendiculară pe direcția de avans, cât și în două puncte în cele două brațe ale mașinii ELEROFIL-10 după două direcții perpendiculare în spațiu. Rezultatele cercetărilor experimentale au evidențiat influența parametrilor de lucru impuși sistemului tehnologic (mod de vibrare a electrodului filiform, amplitudinea de vibrație aflată în raport direct proporțional cu puterea electrică consumată/furnizată de generatorul de ultrasunete, tensiunea mecanică în electrod) asupra mărimilor de leșire: capacitatea erozivă a prelucrării, precizia dimensională și de formă a semifabricatului, rugozitatea suprafeței prelucrate.

Există și unele neîmpliniri în derularea cercetărilor experimentale, cea mai importantă fiind indisolubii legată de influența energiei ultrasunetelor într-o proporție relativ mică asupra capacității erozive. Desigur, se pot formula explicații pertinente asupra acestui aspect - electrodul filiform a fost vibrat cu frecvențe relativ ridicate (40 kHz), tipul de generator de impulsuri de tensiune este performant prin însăși concepția sa - dar experimentările sau limitat doar la testarea unui singur tip de concentrator adaptor de undă (cilindric în trepte) care a asigurat într-adevăr un factor de amplificare ridicat ( $k_{\dots}=4,5$ ), dar a limitat în același timp puterea furnizată de generatoarele de ultrasunete. De asemenea, cercetările experimentale puteau fi aprofundate de pildă, prin analiza metalografică a stării suprafeței prelucrate sau corelarea frecvenței impulsurilor de tensiune cu frecvența de vibrație a electrodului filiform, dar aceasta însemna o extindere mult prea mare a tematicii propuse a fi

rezolvate prin prezenta lucrare care se poate considera că și-a atins obiectivele propuse.

Ultimul capitol sintetizează concluziile finale și evidențiază contribuțiile originale ale lucrării defalcate în anumite direcții.

Intreaga organizare a lucrării este în așa fel concepută încât se asigură o dezvoltare logică a problematicii abordate în sensul implicațiilor și condiționărilor existente între capitole, dar și în tratarea univocă a fiecărui capitol ca o lucrare de sine stătătoare. Se consideră că acest mod de structurare a lucrării, cu urmărirea pe verticală a dezvoltării problematicii asigură în ultima instanță o tratare logică și unitară, subliniind aspectele considerate de autor ca fiind fundamentale iar eventualele probleme colaterale fiind prezentate numai în situații speciale, reclamate de suportul teoretic sau practic al acestora.

## CAPITOLUL 1. ECHIPAMENTE SI TEHNOLOGII DE PRELUCRARE PRIN ELECTROEROZIUNE SI ULTRASUNETE

### 1.1 LOCUL TEHNOLOGIILOR NECONVENTIONALE IN CONSTRUCTIA DE MASINI. PRINCIPIUL PRELUCRARII PRIN EROZIUNE

Prelucrarea prin tehnologii neconvenționale este o metodă de finalitate, bazată pe distrugerea integrității și prelevarea materialului excedentar - numit și adaos de prelucrare - de pe suprafața unui semifabricat prin acțiunea dinamică a unor agenți erozivi sub formă de particole solide, lichide, gazoase, de plasmă sau radiație electromagnetică. Aceste tehnologii valorifică o gamă largă de fenomene fizice, chimice sau combinate - cum sunt fenomenele de eroziune abrazivă, termică, chimică și electrică - care conduc la îndepărtarea de material.

Dezvoltarea tehnologiilor neconvenționale este determinată de necesitatea utilizării unor materiale cu proprietăți fizico-chimice deosebite, greu de prelucrat prin așchiere sau separare cu tășuri asociate, și care au o geometrie complexă. Deși ponderea tehnologiilor neconvenționale în totalul tuturor procedeelor de prelucrare cunoscute și aplicate în industrie este relativ scăzută - circa 5...6% -, acestea sunt deosebit de importante pentru asigurarea dezvoltării în continuare a unor ramuri precum aeronautica și tehnica spațială, mașini-unelte, electronica și microelectronica, mecanica fină și de precizie, tehnica nucleară.

Dintre tehnologiile neconvenționale, în funcție de numărul utilajelor existente în industrie, cea mai răspândită este prelucrarea prin electroeroziune urmată de prelucrarea prin electrochimie, cu fascicul laser și cu ultrasunete. Această distribuție este determinată de posibilitatea oferită de tehnologiile existente, dar și de stadiul actual al cunoștințelor teoretice și al soluțiilor constructive și tehnologice aplicative.

Cu toată diversitatea fenomenologică, tehnologiile neconvenționale generează procedee de prelucrare prin eroziune diferite și specifice aplicației tehnologice, dar care au o structură principial identică a sistemului de acționare reprezentată la nivel de schemă bloc în fig.1.1.

Realizarea acțiunii de prelucrare prin eroziune este condiționată de:

- utilajul tehnologic;
- energia de efect;

- subsistemul de comandă.

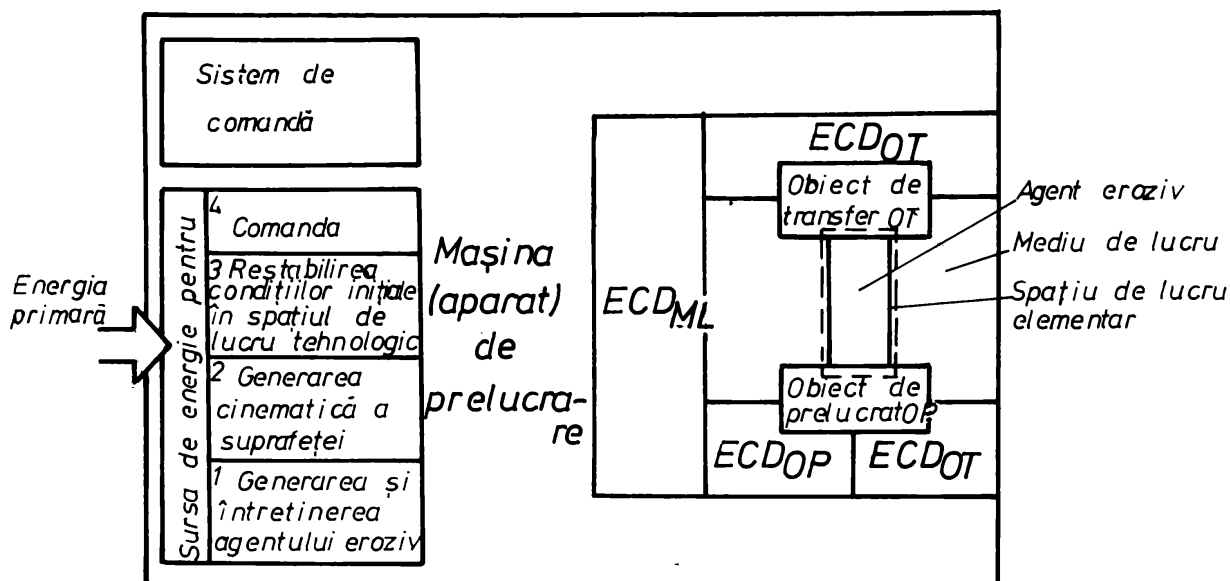


Fig. 1.1

Schema de principiu a utilajelor de prelucrare prin tehnologii neconvenționale

a) Utilajul tehnologic, ca sistem de elemente constructiv- stocatoare de informație și eventual adaptivă asupra obiectului prelucrării OP, are drept componente [90] mașina (aparatură) de prelucrare și echipamentul tehnologic aferent constituit din echipament de completare și dispozitivare ECD și obiectul de transfer OT a energiei și informației pe suprafața de prelucrat. ECD este în contact cu OT și OP, asigură existența mediului de lucru ML și evacuarea deșeurilor tehnologic DT.

Funcțiile principale ale utilajului tehnologic sunt următoarele:

- generarea și întreținerea agentului eroziv pe suprafața de prelucrat;
- menținerea unui echilibru dinamic între procesele de prelevare și de evacuare în afara spațiului de lucru;
- asigurarea deplasărilor relative - mișcări principale și mișcări de avans - necesare generării cinematice a suprafețelor piesei.

b) Energia de efect, destinată întreținerii proceselor de transformare fizico-chimice și geometrice a substanței impuse de obiectivele acțiunii tehnologice, provine de regulă din transformarea adecvată în cadrul utilajului tehnologic a unei energii primare, cel mai adesea electrică, în principal în energie termică, chimică și/sau mecanică. Transformarea energiei primare în energie de efect se produce în prezența și cu participarea unui corp lichid, corp gazos sau câmp electromagnetic. Sursa de energie poate alimenta:

- sistemul de comandă a procesului tehnologic;

- restabilirea condițiilor inițiale în spațiul de lucru;
- generarea cinematică a suprafeței piesei;
- generarea și întreținerea agentului eroziv.

În funcție de particularitățile procesului de prelucrare prin eroziune, energia de efect poate fi transmisă OP în regim continuu sau pulsant, prin intermediul unor zone de interacțiune cu caracter punctiform, liniar sau de suprafață.

c) **Subsistemul de comandă** operator uman și/sau un dispozitiv de reglare automată, este capabil să asigure generarea, prelucrarea și transmiterea informațiilor, preponderent adaptive, necesare desăvârșirii în condiții optime a acțiunii de prelucrare.

Ceea ce definește și separă prelucrarea prin eroziune față de alte metode de prelucrare este faptul că acțiunea de îndepărtare a adaosului de prelucrare este rezultatul nemijlocit al interacțiunii unui agent eroziv cu OP. Pentru constituirea agenților erozivi, în structura utilajului tehnologic se include un echipament de generare a agentului eroziv - sursa de energie 1 din fig.1.1 - și un echipament de formare finală și poziționare a agentului eroziv pe suprafața piesei OP.

Deși extrem de diverse din punct de vedere fenomenologic, procedeele de prelucrare prin tehnologii neconvenționale prezintă unele caracteristici generale comune [1,11,23,31,44,66,90] și anume:

- caracterul discret, progresiv și cumulativ al proceselor de prelucrare a materialului de prelevat, caracter specific și proceselor naturale de eroziune;
- consum specific ridicat de energie, determinat de randamentul limitat al conversiei energiei primare în energie de efect;
- insensibilitatea prelucrabilității față de proprietățile fizico-mecanice ale OP;
- posibilitatea dirijării în limite largi, într-un sistem de prelucrare dat, a intensității fluxului energetic dezvoltat pe unitatea de suprafață;
- posibilitatea copierii formei spațiale a OT sau a formei secțiunii transversale a agentului eroziv în OP, utilizând exclusiv o mișcare de avans liniară a OT în raport cu OP;
- realizarea acțiunii tehnologice cu solicitări mecanice neglijabile transmise OP;
- automatizarea complexă și uneori completă a sistemelor/proceselor de prelucrare.

## 1.2 TEHNOLOGIE SI UTILAJ DE PRELUCRARE PRIN ELECTROEROZIUNE. PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE CU ELECTROD FILIFORM

Prelucrarea prin electroeroziune este un procedeu de îndepărtare a adaosului de prelucrare prin acțiunea repetată a descărcărilor electrice în impuls într-un mediu lichid dielectric aflat în spațiul de lucru limitat de OT conectat la un pol și OP conectat la celălalt pol al unui generator de impulsuri de tensiune - fig.1.2 -.

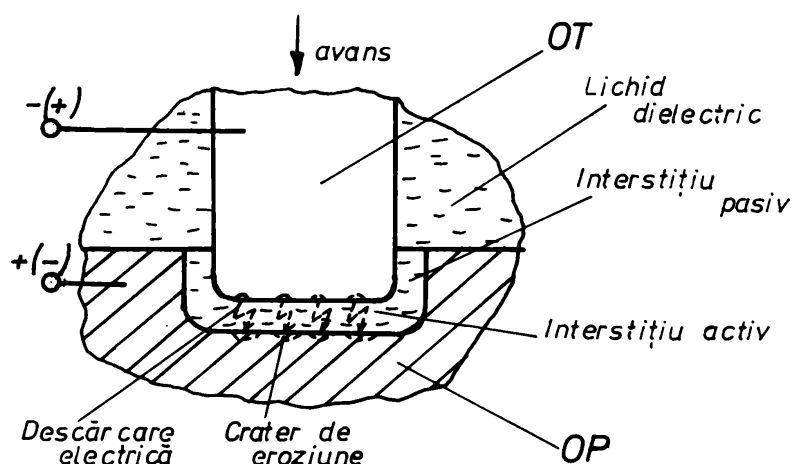


Fig.1.2

Schema de principiu a prelucrării prin electroeroziune

Descărcările electrice se amorsează succesiv și se localizează selectiv în diferite zone ale interstițiului activ [26,49,61,67,90,99] în funcție de realizarea locală a condițiilor disruptive în raport cu distanța dintre OT - OP și cu proprietățile di-

electrice ale mediului. Fiecare dintre aceste impulsuri, acționând în mod discontinuu, constituie un proces de eroziune desfășurat într-un spațiu restrâns format din coloana descărcării înconjurată de lichidul de lucru, petele electrodice de contact ale coloanei cu materiale metalice și straturile de material activate de acestea. Introducerea directă a energiei electrice în spațiul de lucru, dozarea ei temporală și transformarea în energie de efect la nivelul petelor electrodice duce la formarea craterului de eroziune la OP și a celui de uzare la OT.

Evacuarea produselor eroziunii din interstițiu și restabilirea distanței disruptive prin avansul OT asigură continuitatea macroscopică a procesului. Deplasarea spațială a descărcărilor electrice, însoțită de modificarea permanentă a geometriei interstițiului, conduce la generarea suprafeței dorite la OP.

Dozarea în impuls a energiei la prelucrarea prin electroeroziune determină individualizarea actelor elementare de eroziune, caracterizate de totalitatea fenomenelor care au loc în timpul acțiunii impulsului, considerat



singular. Principalele procese care se desfășoară în interstițiu în timpul unui act de eroziune elementar sunt [2,23,24,26,46,67,96]:

- amorsarea descărcării electrice;
- evoluția descărcării electrice;
- prelevarea de material din electrozi.

Gama utilajelor de prelucrare prin electroeroziune este largă și în continuă diversificare. După soluția constructiv-tehnologică utilizată pentru generarea suprafețelor OP, se disting:

- utilaje de prelucrare prin copierea formei suprafeței sau profilului OT (găurire, gravare, marcarea, debitare);
- utilaje de prelucrare prin rulare (executarea cavităților cu profil periodic);
- utilaje de prelucrare cu OT rotativ (rectificare, profilare, debitare);
- utilaje de prelucrare cu electrod filiform (debitare după contur).

Din punct de vedere constructiv și funcțional, utilajele de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform se împart în două mari grupe, și anume:

- mașini de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform și comanda traiectoriei firului după program numeric;
- mașini de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform și comanda traiectoriei firului după conturul unui desen sau după șablon.

Dat fiind avantajele oferite în aplicațiile tehnologice industriale, în continuare se vor face referiri doar asupra mașinilor din prima categorie. Acestea se execută în două variante constructiv-tehnologice principale. Prima variantă, aplicată pe scară mai largă, se caracterizează prin realizarea mișcării relative OT-OP în plan orizontal prin compunerea deplasărilor comandate ale mesei de lucru sau ale mesei de lucru și mecanismului de antrenare a electrodului filiform după două direcții perpendiculare în spațiu care determină un plan - planul suprafeței de așezare a OP - normal pe direcția de avans tehnologic a electrodului. La cea de-a doua variantă, ansamblul port-electrod filiform execută toate mișcărilor necesare poziționării și întreținerii procesului de prelucrare, iar masa de lucru este fixă.

În principal, mașinile din prima variantă [26,31,44,90,124] sunt alcătuite din cinci ansamble - fig.1.3 -, astfel:

- mașina propriu-zisă (sistemul mecanic) - fig.1.3 a -;
- generatorul de impulsuri electroerozive prevăzut și cu un sistem de reglare automată a interstițiului tehnologic - fig.1.3 b -;
- echipamentul de comandă numerică - fig.1.3 c -;
- sistemul pentru pregătirea mediului dielectric cu controlul și reglarea automată a gradului de deionizare (conductivitate sau rezistivitate) a

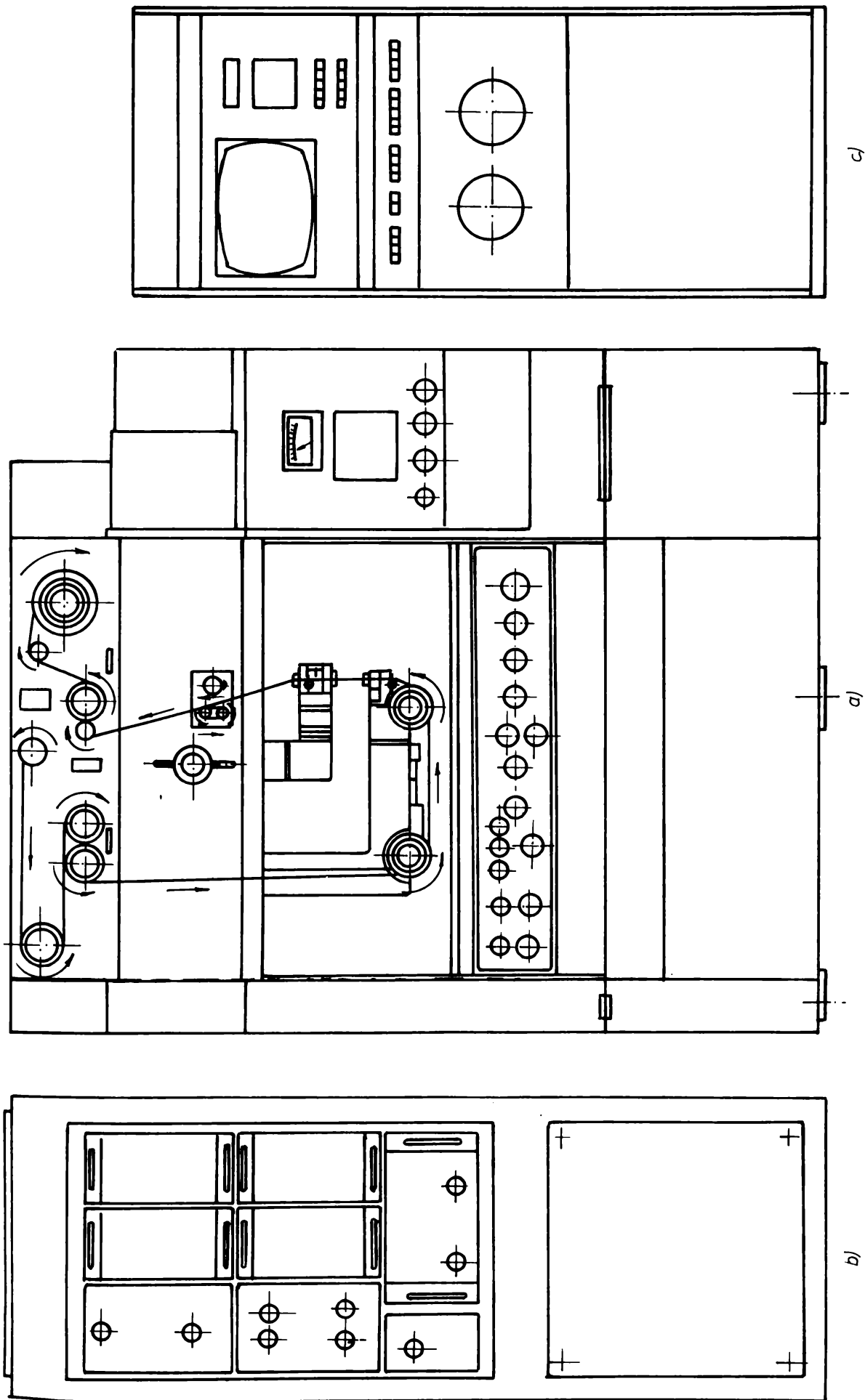


Fig. 1.3

Maşina de prelucrat prin electroeroziune de fabricaţie românească ELEROFIL-10 (a- maşina propriu-zisă; b-generator de impulsuri electroerozive; c- echipament de comandă numerică)

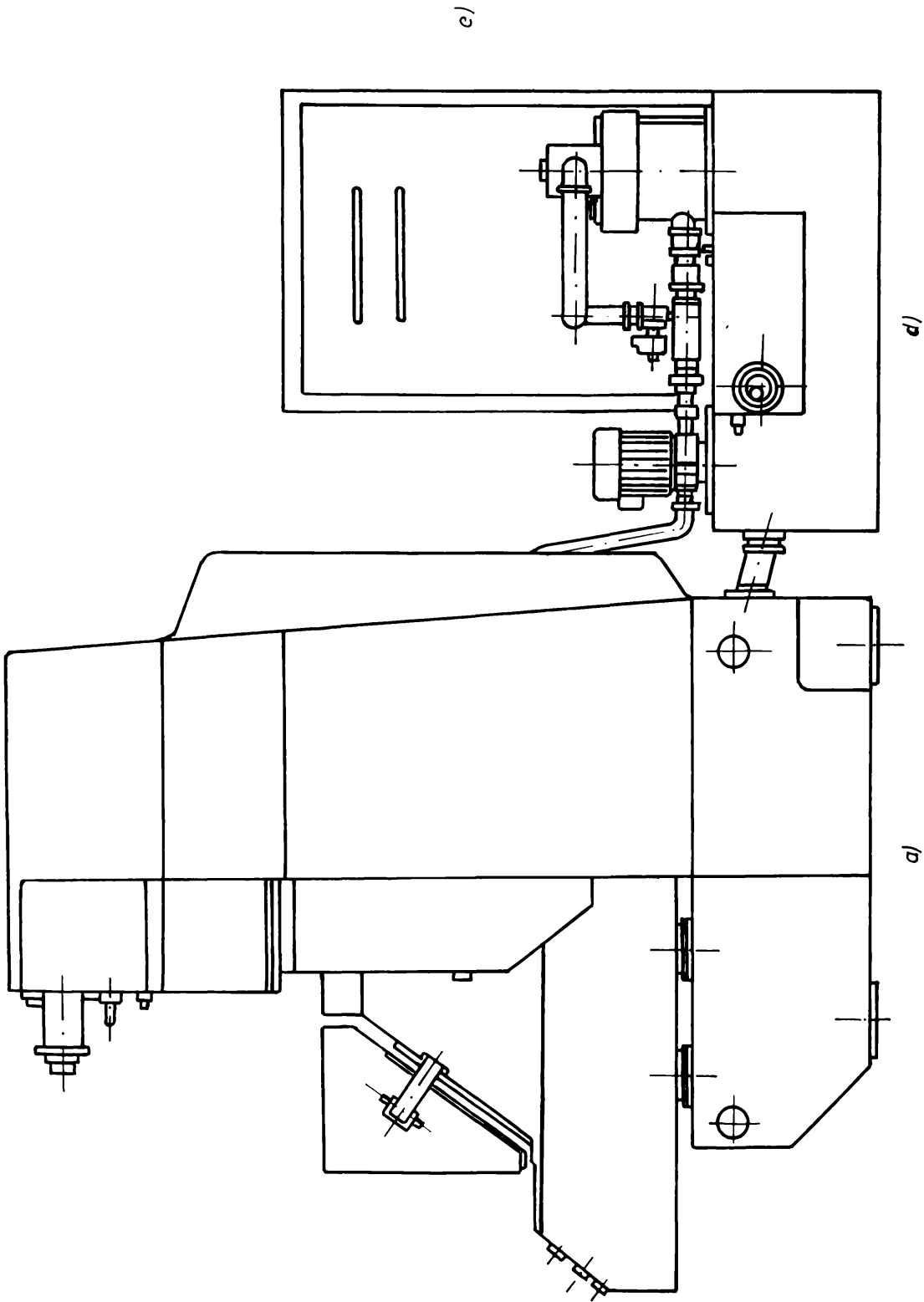


Fig. 1.3 (continuare)  
(d-sistem pentru pregătirea mediului dielectric; e-subsisteme de interlegături)

dielectricului - fig.1.3 d -;

- subsisteme de interlegături - fig.1.3 e -.

Mașina propriu-zisă este alcătuită în general din batiu, montanți, traversă, ghidaje, sănii, masa de lucru, subsisteme de avans după direcțiile X și Y, lanțuri cinematice, dispozitive de poziționare-fixare etc., având o construcție similară mașinilor-unelte convenționale. Față de acestea, mașinile de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform sunt prevăzute suplimentar cu elemente specifice, și anume: mecanismul de antrenare a electrodului filiform, cuva de prelucrare care cuprinde câteva elemente ale sistemului de alimentare cu dielectric, dispozitive de conectare/izolare electrică aferente alimentării cu energie a interstițiului tehnologic. Ghidajele de rostogolire sunt prevăzute cu colivii cu role iar sistemele de avans după direcțiile X și Y sunt alcătuite dintr-un mecanism șurub-piuliță cu role de mare precizie și antrenat de un motor de curent continuu sau de un motor pas cu pas. La unele tipuri de mașini, pentru a crește precizia de poziționare, s-a închis bucla de comandă în sistemele de avans cu ajutorul unor traductoare de poziție liniare - mai rar traductoare rotative - de înaltă precizie.

Subsistemul cel mai complex al blocului mecanic îl constituie mecanismul de antrenare a electrodului filiform. Acesta realizează derularea/rularea permanentă a electrodului filiform înainte/după interacțiunea cu OP, întinderea cu o tensiune mecanică reglablă, ghidarea precisă în zona de lucru și deplasarea cu o viteză de avans în lungul axei sale de asemenea reglablă.

O variantă constructivă de mecanism de antrenare a electrodului filiform, unde masa de lucru pe care se așează OP se poate deplasa controlat după direcțiile X și Y perpendiculare între ele, este prezentată schematic în fig.1.4.

Mecanismul este alcătuit în principal dintr-un batiu (montant) B(M) de care se rigidizează o traversă fixă TF și un braț fix BF. Batiul (B/M) cuprinde câte o bobină debitoare BD, respectiv o bobină înfășurătoare BI pentru derularea/rularea electrodului filiform OT precum și un mecanism regulator MR pentru reglarea și menținerea constantă a tensiunii mecanice în OT. De traversa fixă TF se fixează un mecanism de acționare alcătuit dintr-un motoreductor care antrenează în mișcare de rotație o rolă de tracțiune RT împreună cu o rolă condusă RC. Ansamblul RT-RC realizează deplasarea cu viteză reglablă și menținerea tensiunii mecanice în fir între anumite limite. Față de BF se poate deplasa un braț mobil BM până la o distanță corespunzătoare grosimii OP. Pe parcursul traseului dintre BD și BI, OT este condus prin mai multe role de ghidare RG iar în spațiul de lucru este ghidat de elementele inferioare și superioare EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> confecționate din safir sau ceramică. OP se fixează de un suport S rigidizat de masa mașinii care determină deplasarea după direcțiile rectangulare X și Y.

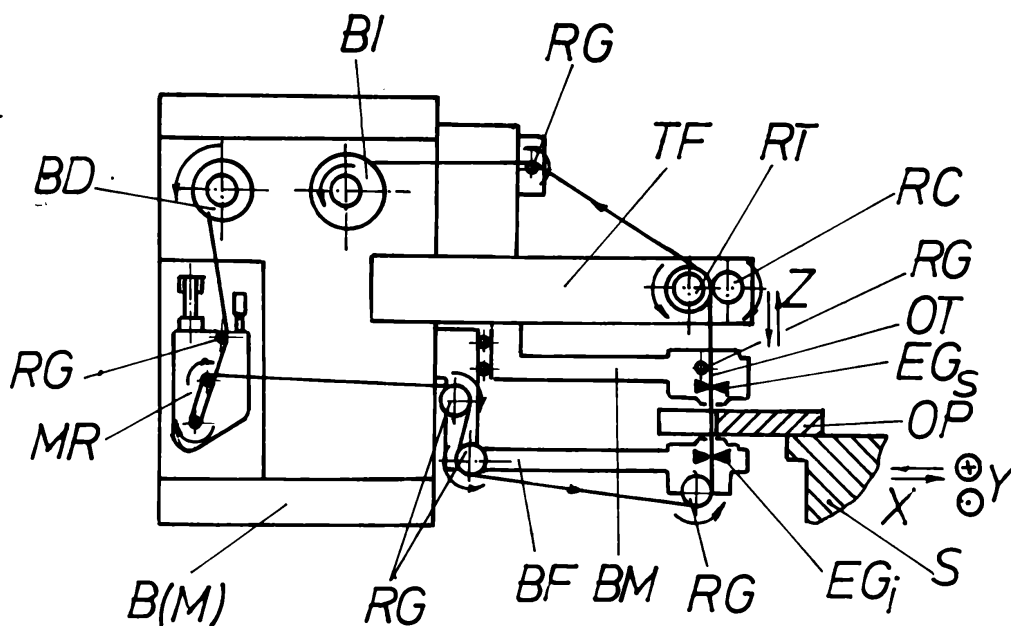


Fig. 1.4

Mecanism de antrenare a electrodului filiform (AGIE)  
 (BD- bobina debitoare; BI- bobina înfășurătoare; RG- rolă ghidare; TF- traversa fixă; RT-rola de tracțiune; RC-rola condusă; OT,OP-obiect de transfer, respectiv al prelucrării; EG<sub>s</sub>,EG<sub>i</sub>-element de ghidare superior, respectiv inferior; BM,BF- braț mobil, respectiv fix; B(M)-batiu, montant; MR- mecanism regulator; S- suport)

X,Y,Z- direcții de deplasare a OT,OP(S) pentru generarea suprafețelor spațiale

O altă soluție constructivă [31,67,68] - fig.1.5 - permite deplasarea OT după două direcții Z și Y, iar OP se deplasează împreună cu S și masa mașinii după direcția X. Față de varianta anterioară, mecanismul este prevăzut cu o rolă de frânare RF care este în contact cu o rolă condusă RC<sub>1</sub>, iar rola de tracțiune RT are dimensiuni mult mai reduse decât rola condusă RC<sub>2</sub>. Prin sincronizarea și controlul mișcărilor de rotație dintre RF și RT se asigură o stabilitate superioară deplasării OT între EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub>, astfel încât viteza de deplasare a firului după direcția Z este comandată de RF, iar tensiunea mecanică în OT depinde de viteza unghiulară a RT.

Blocul mecanic îndeplinește următoarele funcții principale:

- poziționarea, fixarea și susținerea OT și OP;
- poziționarea și deplasarea relativă a OT și OP corespunzător necesităților procesului de prelucrare;
- menținerea mediului dielectric lichid în interstițiul tehnologic;
- aplicarea impulsurilor de tensiune elaborate de către generator electrodului și piesei de prelucrat;
- asigurarea securității muncii în exploatarea utilajului.

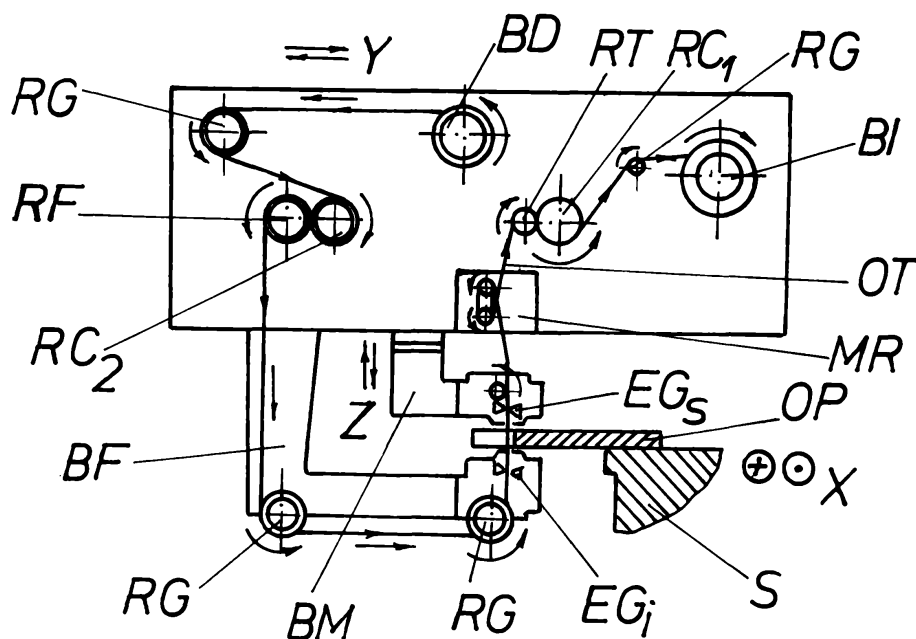


Fig.15

Mecanism de antrenare a electrodului filiform (ELEROFIL-10)  
 (BD-bobina debitoare;RT-rola de tracțiune;RC<sub>1</sub>,RC<sub>2</sub>-rola condusă 1 și 2;BI-bobina înfășurătoare,OT,OP-obiect de transfer, respectiv al prelucrării;MR-mecanism regulator;EG<sub>s</sub>,EG<sub>j</sub>-element de ghidare superior, respectiv inferior;BM,BF-braț mobil, respectiv fix;RF-rola de frânare; S-suport)

X,Y,Z-direcții de deplasare a OT,OP(S) pentru generarea suprafețelor spațiale

Generatorul de impulsuri electroerozive, care efectuează și un control a stării plasmatice din spațiul de lucru, reprezintă sursa de alimentare cu energie electrică a procesului de prelucrare. Funcțiile principale ale generatorului sunt:

- adaptarea energiei furnizate de rețeaua de alimentare la cerințele utilajului de prelucrare (modificarea amplitudinii tensiunii și eventual a frecvenței, redresare);
- generarea unor impulsuri de tensiune de formă, amplitudine, durată și frecvență adecvate declanșării și întreținerii acțiunii erozive pe suprafața de prelucrat;
- controlul formei, amplitudinii, duratei și frecvenței impulsurilor de curent electric asociate descărcărilor electrice dezvoltate prin acțiunea impulsurilor de tensiune în interstițiul tehnologic, în sensul adaptării acestora la obiectivele procesului de prelucrare, în condiții date.

Generatorul de impulsuri asigură dozarea și în anumite limite localizarea spațială a energiei primare introduse în interstițiul tehnologic [9,81]. Principalele procedee de generare a impulsurilor de tensiune pentru prelucrarea

prin electroeroziune sunt:

- comutarea unor tensiuni de curent continuu;
- relaxarea energiei înmagazinate într-un câmp electric sau magnetic.

Schema de principiu a celui mai răspândit tip de generator de impulsuri, bazat pe acțiuni de comutare comandată a unei tensiuni de c.c. cu ajutorul unor dispozitive semiconductoare - tranzistori sau tiristori - este reprezentată în fig.1.6.

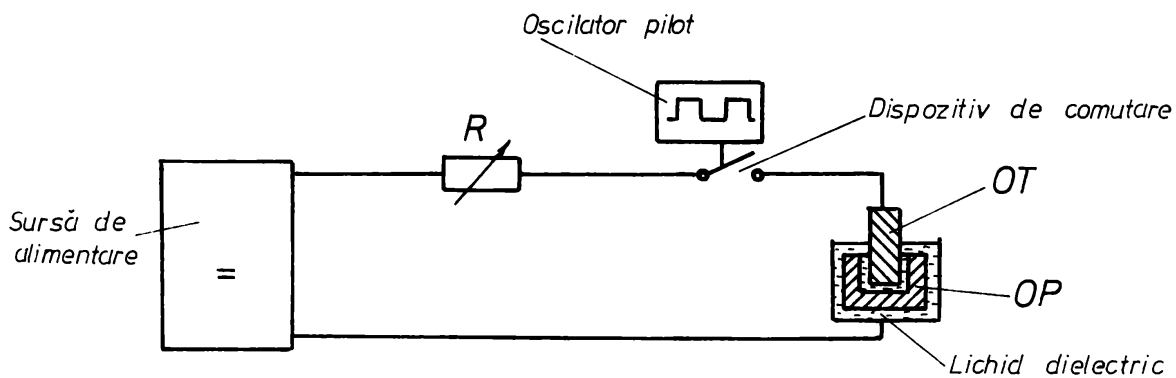


Fig.1.6

Schema de principiu a unui generator de impulsuri comandate  
OT,OP-obiect de transfer,respectiv al prelucrării  
R -rezistor reglabil

Aceste generatoare, numite curent generatoare de impulsuri comandate, pot funcționa la frecvența constantă a impulsurilor de tensiune, la energie constantă a impulsurilor de curent sau în regim bipuls, caz în care peste impulsul normal de tensiune se suprapune sincronizat un impuls de amorsare de amplitudine mărită.

Generatorul de impulsuri tip **ROGIF 50 MF** care echipează mașinile de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform **ELEROFIL-10** de fabricație românească [31,124], are la bază un dispozitiv de înaltă frecvență - 200 kHz, 20 A și 300 V - care asigură încărcarea în impulsuri a condensatoarelor ce formează energia de descărcare electroerozivă necesară prelucrării. Nivelul tensiunii de la care se produce străpungerea mediului dielectric, împreună cu valoarea condensatorului determină energia fiecărei descărcări și prin aceasta, productivitatea prelucrării, rugozitatea suprafeței prelucrate și mărimea interstițiului tehnologic. Menținerea constantă a energiei fiecărei descărcări electrice asigură obținerea unor performanțe tehnologice ridicate ale procesului de eroziune.

Viteza procesului de erodare sau capacitatea erozivă este o funcție multivariabilă de forma [31]:

$$v_{\text{erDM}} = f(k_m, h, d, g, \rho_1, U_0, v_s) \quad (1.1)$$

unde:

- $k_m$  - constantă ce ține seama de materialul OP și OT și de natura dielectricului;
- $h$  - grosimea OP;
- $d$  - diametrul OT (electrod filiform);
- $g$  - distanța dintre OT și OP;
- $\rho_1$  - conductivitatea instantanee (rezistivitatea) mediului dielectric;
- $U_0$  - tensiunea de mers în gol;
- $v_s$  - viteza de deplasare a OT pe direcția de prelucrare.

Dintre parametri care influențează viteza procesului de erodare  $v_{\text{erDM}}$  care sunt cei mai puternic perturbați în timpul actului electroeroziv, se află distanța  $g$  și grosimea  $h$  pe direcția de avans. Variația vitezei de deplasare  $v_s$  a OT determină modificarea distanței dintre OT și OP și în consecință, se modifică și viteza procesului de erodare (prelucrare)  $v_{\text{erDM}}$ .

Sarcina realizării unei viteze de prelucrare maximă în condiții tehnologice date revine sistemului de reglare automată a interstițiului tehnologic care asigură un echilibru între viteza procesului de erodare  $v_{\text{erDM}}$  și viteza de deplasare  $v_s$  pe direcția de prelucrare a electrozodului filiform în așa fel încât să se obțină:

$$V_{\text{erDM}} = V_{\text{erDMmax}} \quad (1.2)$$

Cu alte cuvinte, sistemul de reglare automată are ca funcție asigurarea unei poziții relative stabile a OT și OP, poziție definită printr-o valoare optimă a grosimii interstițiului tehnologic  $g_{\text{opt}}$  pe tot parcursul procesului de prelucrare. Concepția sistemelor de reglare automată a interstițiului tehnologic este determinată de următoarele considerente [1,9,26,49,50,82,83]:

- interstițiul tehnologic este controlat nu din punct de vedere geometric, ci fizic, astfel încât grosimea  $g$  a interstițiului este măsurată indirect, prin rigiditatea dielectrică și respectiv conductanța electrică pe care o prezintă în condițiile particulare ale prelucrării prin electroeroziune;
- valoarea optimă a grosimii interstițiului  $g_{\text{opt}}$  este determinată complex de



mulțimea factorilor și parametrilor definitorii ai procesului de prelucrare și se modifică pe parcursul acestuia;

- în condițiile existenței prelevării de material de la suprafața OP și OT, menținerea unei valori determinate a grosimii interstițiului tehnologic impune necesitatea unei mișcări relative a acestora cu o viteză  $v_{opt}$ .

Schema bloc principală a sistemului de reglare automată a interstițiului tehnologic este reprezentată în fig.1.7.

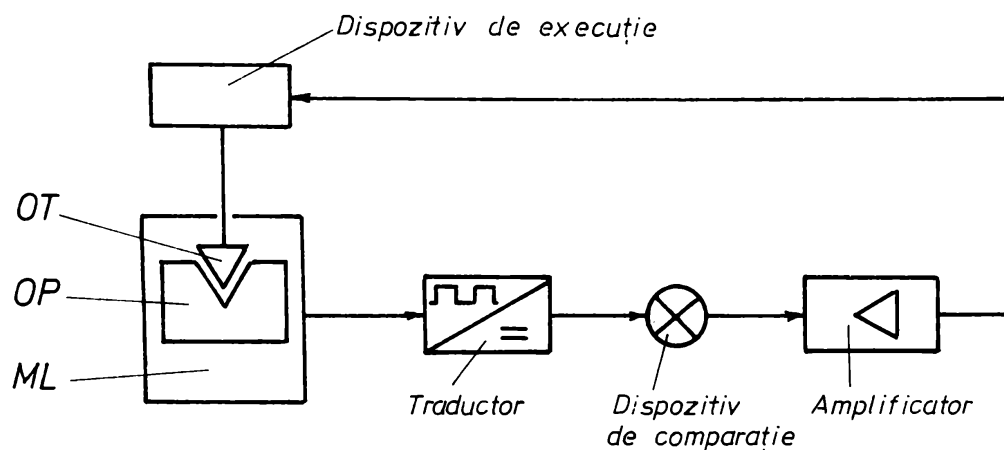


Fig.1.7

Schema bloc a sistemului de reglare automată a interstițiului tehnologic

OT,OP-obiect de transfer, respectiv al prelucrării  
ML- mediul de lucru

În cazul prelucrării pe mașina ELEROFIL-10 [31,124] cu parametri tehnologici fixați anterior, obținerea unei viteze maxime de erodare  $v_{eDmax}$ , cu condiția menținerii constante a interstițiului de prelucrare  $g$  și a rugozității suprafeței [9,82], este determinată de viteza de reacție a sistemului de comandă la schimbarea condițiilor de lucru ceea ce a necesitat realizarea unui sistem de automatizare în care deciziile de modificare a vitezei  $v_e$  se iau în timp real. În acest sens, sistemul de reglare automată, în vederea predeterminării sensului de variație a distanței dintre OT și OP, înregistrează nivelul de tensiune de la care se produce fiecare descărcare electrică și ia decizii de modificare a vitezei de deplasare  $v_e$  a electrodului filiform pe direcția de prelucrare la prima descărcare electrică care scoate sistemul din starea sa optimă  $g_{opt}$ . Sistemul numeric pentru formarea automată a frecvenței de comandă pentru motoarele pas cu pas aflate în componența sistemelor de avans X și Y a mașinii ELEROFIL-10 asigură o parte de variație a vitezei de deplasare  $v_e$  a electrodului filiform de forma:

$$\frac{dv}{dt} = k \cdot v^2 (t) \quad (1.3)$$

unde:  $k$  - constantă ce ține seama de condițiile de lucru, ceea ce permite revenirea sistemului într-un interval de timp minim în punctul de funcționare optim sau modificarea acestuia către un nou optim, indiferent de sensul și mărimea perturbațiilor care intervin pe parcursul unei prelucrări. Spre exemplificare, sistemul de reglare automată a interstițiului tehnologic existent în structura generatorului de impulsuri **ROGIF 50 MF** asigură o prelucrare optimă a **OP** la care raportul dintre secțiunea minimă și maximă este  $1/200$  [31,124], fără ca operatorul care deserveste ansamblul să intervină pe parcursul prelucrării.

**Echipamentul de comandă numerică** reprezintă componenta cea mai dinamică a utilajelor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform și are următoarele funcții principale:

- conectarea/deconectarea utilajului și a blocurilor funcționale ale acestuia în condiții de exploatare normală și respectiv în caz de avarie: scăderea nivelului de dielectric în rezervor, creșterea temperaturii sau scăderea gradului de deionizare a lichidului dielectric, lipsa dielectricului în spațiul de lucru, persistența descărcărilor în arc sau a scurtcircuitării interstițiului tehnologic, defectări ale componentelor de bază ale utilajului și îndeosebi a sistemelor de avans după direcțiile **X** și **Y** și a mecanismului de antrenare a electrodului filiform etc.;

- controlul poziției relative a **OT** și **OP** și comanda mișcării relative a acestora corespunzător cinematicii procesului de generare a suprafețelor;

- comanda ciclului de lucru, inclusiv cu modificarea regimului de prelucrare;

- comanda automată după program și adaptivă a indicatorilor de performanță ai prelucrării prin reglarea coordonată simulată sau succesivă, discontinuă sau continuă a parametrilor de funcționare ai utilajului de prelucrare: generatorul de impulsuri, sistemul de reglare automată a interstițiului tehnologic și sistemul pentru pregătirea lichidului dielectric.

Principala sursă de informații asupra desfășurării proceselor electroerozive o reprezintă parametri impulsurilor de tensiune și de curent asociate descărcărilor electrice succesive dezvoltate în interstițiul tehnologic și respectiv impedanța acestuia în intervalele dintre impulsuri. Analiza logică și discriminarea de amplitudine și frecvență a tipurilor caracteristice de impulsuri care pot interveni [24,49,81,88,99] permit măsurarea în proces a unor indicatori

ai eficienței prelucrării de forma:

$$C = \frac{\sum (t_i - t_e)}{\sum (t_i + t_p)} \cdot 100 \quad (1.4)$$

unde :  $t_i$  - timp de impuls;

$t_e$  - timp de amorsare;

$t_p$  - timp de pauză.

Echipamentul de comandă numerică ce se află în componența mașinii **ELEROFIL-10** de tip **CNC NUMEROM-450 (455) AC** asigură următoarele facilități tehnologice [31,124]:

a) Generarea numerică a traiectoriilor liniare și circulare pe baza prelucrării informațiilor de la un suport de informații schimbabile și a informațiilor privind controlul adaptiv.

Generarea numerică continuă a traiectoriilor complexe se execută în timp real [113] cu o precizie de 1 $\mu$ m și cu o viteză de deplasare rezultantă impusă în modul următor :

- în regim de prelucrare electroerozivă pe baza informațiilor primite de la generatorul de impulsuri tip **ROGIF 50 MF**;
- în regim de desenare cu viteză reglabilă programată extern;
- în regim de prelucrare, la apariția unui scurtcircuit între **OT** și **OP**, cu o viteză de retur pe contur impusă de echipamentul **CNC**; în timpul returului, echipamentul **CNC** testează în permanență ieșirea din scurtcircuit și la dispariția acestuia comandă trecerea în regim de reînțoarcere pe același traseu pe care s-a parcurs inițial prelucrarea și apoi s-a efectuat returul pe contur.

Generarea traiectoriilor este realizată de către echipament prin rezolvarea iterativă a ecuațiilor diferențiale de definiție a conturului.

b) Corectarea numerică a traiectoriilor ca urmare a erorilor dinamice și statice ale sistemului.

Necesitatea corecției provine din faptul că mărimea  $g$  a interstițiului tehnologic se modifică ca urmare a schimbării condițiilor de proces, de exemplu a schimbării energiei de descărcare. Pentru ca piesa să rezulte la dimensiunile impuse prin program, echipamentul **CNC** corectează traiectoria pe care se deplasează centrul firului față de traiectoria programată. O corectare frecventă a traiectoriei **OT** se realizează, de exemplu, atunci când cu același program se prelucurează poansonul și placa tăietoare de la o ștanță.

c) Corectarea numerică a traiectoriilor ca urmare a introducerii unui factor de multiplicare/demultiplicare.

Multiplicarea/demultiplicarea contururilor programate se poate efectua cu valori continue în intervalul 0...999.

d) Realizarea accelerării/decelerării organelor mobile în vederea obținerii unei dinamici adecvate.

e) Posibilitatea prelucrării "în oglindă", ceea ce permite ca piesele cu simetrie să fie uzinate prin programarea unei singure părți a piesei.

f) Realizarea comenzii adaptive a avansului tehnologic în vederea menținerii constante a interstițiului de lucru  $g$  și a rugozității suprafeței prelucrate pentru a asigura obținerea unei productivități maxime.

Adaptarea la condițiile de proces cuprinde o strategie concretizată prin următoarele tipuri de răspuns ale echipamentului numeric:

- viteza de generare a traiectoriilor, respectiv frecvențele de calcul ale iterațiilor corespunzător punctelor de pe contur, răspund condițiilor de lucru prin reacția efectuată în generatorul de impulsuri;

- în situația de scurtcircuit, în urma informațiilor transmise de generatorul de impulsuri, echipamentul CNC comandă intrarea într-o strategie de recul;

g) Posibilitatea funcționării în buclă închisă sau deschisă de poziție cu motoare pas cu pas.

În cazul funcționării în buclă închisă, echipamentul CNC corectează automat erorile mecanice și dinamice ale deplasării OT pe contur.

h) Acționarea sistemelor de avans de lucru în vederea compunerii traiectoriilor complexe.

Sistemele de avans după direcțiile X și Y sunt realizate prin dezvoltarea unui mecanism de acționare-măsură care garantează efectuarea exactă a incrementului comandat de 1 $\mu$ m cu viteze de la 0,001 Hz la 3 kHz.

**Sistemul pentru pregătirea mediului dielectric are următoarele funcții principale:**

- introducerea și evacuarea continuă a lichidului dielectric în spațiul de lucru;

- circulație forțată a lichidului dielectric prin interstițiul tehnologic prin asigurarea unui debit constant sub forma unui jet care înconjoară uniform electrodul filiform, precum și aducerea lichidului dielectric în spațiul de lucru prin niște ajutaje suplimentare;

- curățirea (filtrarea) lichidului dielectric de produsele eroziunii;

- prepararea lichidului dielectric cu menținerea constantă, automată, a gradului de deionizare (conductivitate, rezistivitate);

- limitarea temperaturii de încălzire a lichidului dielectric sau chiar termostatarea acestuia;

- măsurarea nivelului de lichid dielectric în rezervor și semnalizarea optică

în caz de avarie.

Sistemele pentru lichid dielectric se construiesc în mai multe variante destinate fie unui singur utilaj, fie pentru deservirea centralizată a mai multor utilaje de prelucrare.

Subsistemele de interlegături realizează cuplarea electrică și hidraulică a blocului mecanic cu generatorul de impulsuri, echipamentul de comandă numerică și sistemul pentru pregătirea mediului dielectric precum și interconexiunile respective specifice din cadrul fiecărui subansamblu al mașinii. Interlegăturile se dimensionează din punct de vedere al secțiunii necesare asigurării transferului de informație și energie electrică sau hidraulică de la un subansamblu la altul.

### 1.3 TEHNOLOGIE SI UTILAJ DE PRELUCRARE CU ULTRASUNETE

Prelucrarea prin eroziune ultrasonică se datorește acțiunii erozive a unor particole abrazive aflate în câmp ultrasonic - fig.1.8 -prin combinarea

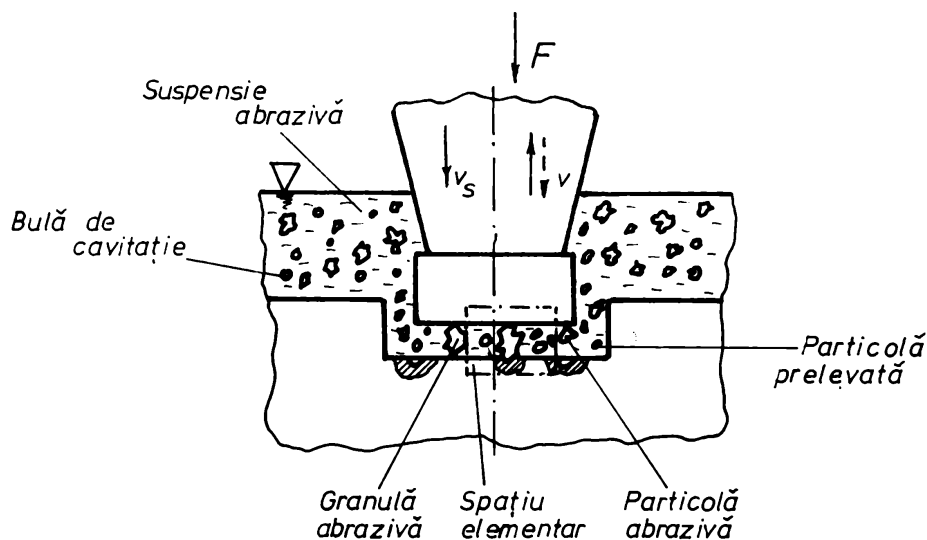


Fig.1.8

Schema de principiu a prelucrării prin eroziune ultrasonică

$F$  - forța statică care acționează asupra particolelor abrazive  
 $v$  - viteza prelucrării

$v_s$  - viteza de avans a OT

sîmultană a patru efecte [3,13,25,30,43,47,121]:

- transmiterea directă, nemijlocită, a șocurilor dinamice ale OT prin intermediul granulelor abrazive la OP;
- accelerarea și impactul granulelor abrazive libere din spațiul de lucru cu

suprafața OP;

- eroziunea cavitațională a lichidului suspensiei abrazive;
- acțiunea chimică a lichidului asociată cu proprietatea acestuia de a fi un mediu de cuplaj acustic bun între OT, OP și granulele abrazive pentru transmiterea undelor de șoc.

Transmiterea directă a șocurilor dinamice ale OT la OP prin granulele abrazive de dimensiuni mai mari aflate în suspensie, are o pondere majoră în acțiunea de prelevare a materialului de adaos din OP. Între OT și OP se dezvoltă o forță de apăsare statică  $F$  care asigură transmiterea șocurilor dinamice - efectul de piston - ale OT cu frecvență ultrasonică, uzual 16...35 kHz [4, 13, 25, 26, 43]. Sub acțiunea șocurilor dinamice ale OT, granulele abrazive mai mari creează microfisuri în stratul de suprafață fragil al OP. Aceste microfisuri progresează în adâncime, producând desprinderi de microparticole din OP. Mecanismul de prelevare datorat șocurilor dinamice - efect de ciocănire a granulelor abrazive aflate între OT și OP - poate fi asimilat cu un proces de microașchiere din partea granulelor abrazive care pentru a realiza desprinderea de particole din OP trebuie să aibe o duritate mai mare decât a acestuia.

Din studiul rezistenței corpurilor fragile după modelul lui V.F. Kazanțev și L.D. Rosenberg [25, 43], rezultă că adâncimea de pătrundere a unei particole abrazive  $h_{op}$  - fig. 1.9 - este invers proporțională cu duritatea lor, adică:

$$h_{op} = \frac{1}{k_1 \cdot H \cdot (F - F_1)} \quad (1.5)$$

unde :  $k_1$  - coeficient ce ține seama de condițiile de lucru;

$H$  - duritatea OP;

$F_1$  - forța statică care acționează asupra particolei de abraziv  $i$ .

Pentru a se ține cont de forma ascuțită a granulelor abrazive, a fost introdusă [25] o variabilă suplimentară  $k$  care este determinată de raportul dintre dublul razei de rotunjire a particolei abrazive  $2r$  și dimensiunea medie a acestela notată  $d_m$ :

$$k = \frac{2r}{d_m} \quad (1.6)$$

astfel încât relația (1.5) devine:

$$h_{OP} = \frac{1}{k_1 \cdot H \cdot (F - k \cdot k_2 \cdot d_m)} \quad (1.7)$$

și exprimă dependența adâncimii cavității față de mărimea forței de acțiune  $F$ .

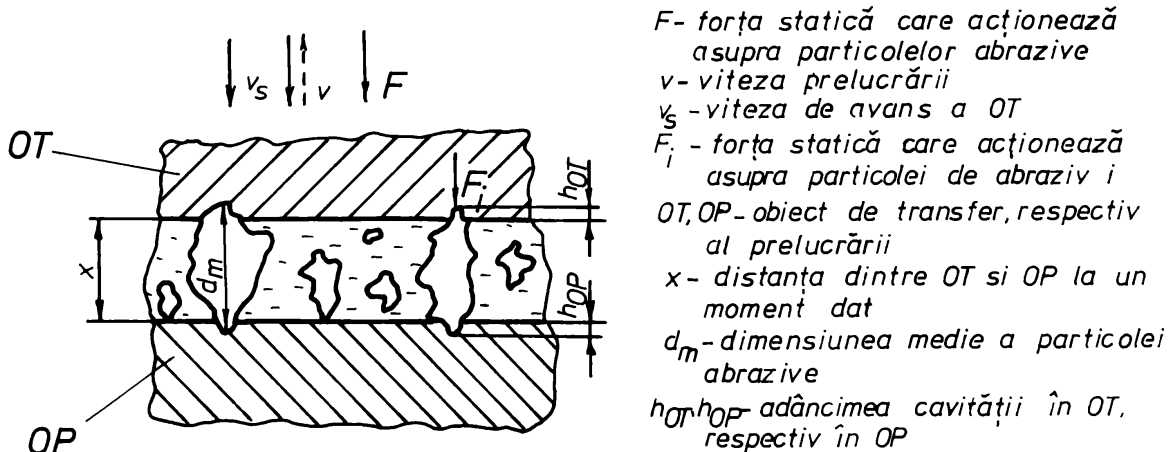


Fig. 19

Transmiterea șocurilor dinamice ale OT prin granulele abrazive la OP

Cercetările experimentale efectuate cu particole abrazive de diferite granulații confirmă modelul Kazanțev-Rosenberg. Ca urmare, s-a elaborat o relație empirică de calcul pentru viteza procesului de erodare  $v_{eUS}$  de forma [25, 121, 123]:

$$v_{eUS} = Q \cdot c(d_m) \cdot \left(\frac{\sigma_m}{n_c}\right)^{c_r} \cdot n_o \cdot f \quad (1.8)$$

unde:  $Q$  - coeficient ce depinde de duritatea OP și a granulelor abrazive;

$c(d_m)$  - factor ce reflectă dependența de dimensiunea medie a particolelor abrazive;

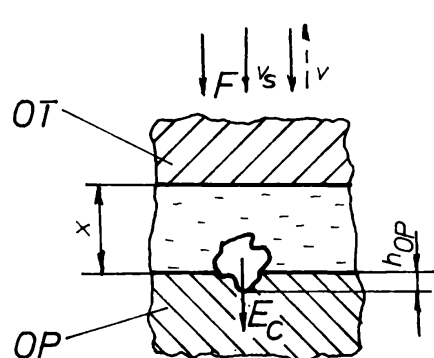
$n_o$  - numărul particolelor abrazive existente pe  $1 \text{ cm}^2$  al suprafeței OP;

$c_r$  - coeficient ce ține seama de forța maximă ce acționează asupra granulelor abrazive.

Accelerarea și impactul granulelor abrazive libere din spațiul de lucru are o pondere în prelevarea totală de material din OP de până la 20 %

[90,118,121], valori superioare obținându-se cu abraziv cu granulație mai mare. Granulele abrazive de dimensiuni mai mici care primesc impulsul dinamic al OT sunt accelerate în interstițiu și lovesc suprafața OP, transmițând acesteia șocuri dinamice indirecte.

Energia cinetică pe care o primește granula abrazivă după modelul lui Markov, Show și Rosenberg [14,44,102] - fig.1.10 - este egală cu:



$F$  - forța statică care acționează asupra particulei abrazive  
 $v$  - viteza prelucrării  
 $v_s$  - viteza de avans a OT  
 $OT, OP$  - obiect de transfer, respectiv al prelucrării  
 $x$  - distanța dintre OT și OP la un moment dat  
 $h_{OP}$  - adâncimea cavității în OP  
 $E$  - energia cinetică pe care o primește granula abrazivă

Fig.1.10

Accelerarea și impactul granulelor abrazive libere în spațiul de lucru

$$E_c = \frac{\pi^3}{12} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \xi^2 \cdot f^2 \cdot d^3 \quad (1.9)$$

unde:

- $\gamma$  - greutatea specifică a granulelor abrazive;
- $g$  - accelerația gravitațională;
- $\xi$  - amplitudinea de vibrație în vârful OT;
- $f$  - frecvența de oscilație a OT la rezonanță;
- $d$  - diametrul sferei care cuprinde particolela de abraziv.

În urma impactului cu OP, granula abrazivă pătrunde în acesta cu adâncimea  $h_{op}$  învingând rezistența  $F$ :

$$F = \sigma_m \cdot S = \pi \cdot \sigma_m \cdot d \cdot h_{op} \quad (1.10)$$

unde:

- $\sigma_m$  - rezistența medie la deformare a OP;
- $S$  - suprafața proiecției amprentei pe suprafața OP;
- $S = \pi \cdot d \cdot h_{op}$



Calculând lucrul mecanic efectuat de forța maximă  $F_m$ :

$$L = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \sigma_m \cdot d \cdot h_{OP} \quad (1.11)$$

din egalitatea relațiilor (1.10) și (1.11) se poate deduce adâncimea de pătrundere a granulei abrazive în OP:

$$h_{OP} = \pi \cdot \xi \cdot f \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{6 \sigma_m \cdot g}} \quad (1.12)$$

În ipotezele simplificatoare [43] că materialul îndepărtat de fiecare granulă este proporțional cu puterea a treia a diametrului amprentei și că numărul de șocuri este invers proporțional cu  $d^2$ , se poate determina volumul de material prelevat din OP în unitatea de timp:

$$V_u = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \sqrt{f^{\xi}} \cdot d \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi^2 \cdot \xi^2 \cdot \gamma}{6 \sigma_m \cdot g}\right)^3} \quad (1.13)$$

unde:  $P_1$  - constantă ce ține seama de coeficientul de prelucrabilitate a OP;

$P_2$  - constantă funcție de concentrația de particole abrazive în suspensie;

$P_3$  - constantă ce depinde de efectul de cavitație și de fenomenele chimice însoțitoare.

Eroziunea cavitațională a lichidului suspensiei abrazive se datorește acțiunii oscilatorii a OT cu frecvență ultrasonică. Cavitația ultrasonică este fenomenul de rupere și refacere imediată a unui lichid sub acțiunea unor tensiuni suficient de mari sau a unor variații rapide și bruște de presiune.

Fenomenul de cavitație este legat de faptul că lichidele, deși transmit ușor comprimări foarte mari pe diverse direcții, sunt extrem de sensibile la eforturile de destindere. La propagarea unei unde cu faza corespunzătoare unei destinderi [27,33,41,55,84,85,100,123], lichidul se rupe și în el se formează un număr foarte mare de bule minuscule care apar de obicei în locurile unde rezistența lichidului a fost mai mică. Aceste locuri sunt cele în care există bule mici de gaz, particole de impurități etc. Cavitațiile minuscule - numite și bule de

cavitație - sunt absorbite după o existență de scurtă durată.

În fazele de apropiere a OT de OP se produc solicitări la compresiune ale lichidului iar bulele cavitaționale se distrug prin implozie producând puternice șocuri hidraulice și presiuni locale ce depășesc  $10^6$  bar. Sub acțiunea undelor de șoc hidraulice, lichidul pătrunde în rețeaua fină de microfisuri create în stratul de suprafață fragil al OP de către granule abrazive, având un efect de pană mecanică în prelevarea de material.

Acțiunea chimică a lichidului este un efect al cavitației ultrasonice și are o pondere nesemnificativă în prelevarea totală de material din OP. Acțiunea chimică a lichidului suspensiei abrazive datorată energiei undelor ultrasonore este însoțită și de efecte cu caracter secundar în prelucrare: electrochimice, electrice și termice [28,47,77,86,112].

Mașinile de prelucrat prin eroziune ultrasonică se pot clasifica în funcție de mai multe criterii. Astfel [35,105], după locul de efectuare a operațiilor de prelucrare, acestea se pot grupa în:

- mașini deplasabile (portabile);
- mașini staționare.

Cele mai răspândite sunt mașinile ultrasonice staționare care în funcție de destinație se clasifică în:

- mașini universale, destinate pentru diferite operații și faze de prelucrare;
- mașini speciale și specializate, utilizate la prelucrarea unor anumite produse și cu o gamă restrânsă de faze.

Deasemenea, în funcție de putere, mașinile ultrasonice staționare se clasifică în trei grupe:

- mașini de putere mică (30...200 W);
- mașini de putere medie (250...1200 W);
- mașini de putere mare (1500...4000 W).

Intrucât construcția utilajelor de prelucrare cu ultrasunete permite realizarea acestora într-o variantă modulară și tipizată, s-a facilitat extinderea aplicațiilor active ale ultrasunetelor la activarea altor procese de prelucrare convenționale (așchiere, deformare plastică, turnare etc.) sau neconvenționale (electroeroziune, electrochimie etc.), procese chimice, fizice și biologice.

Schema bloc a unui utilaj de prelucrare cu ultrasunete este prezentată în **fig.1.11**.

Structura de principiu este următoarea:

- convertor electroacustic **CE**;
- generator de semnal de înaltă frecvență (ultrasunete) **GUS**;
- sistem de avans **SA** care realizează forța de apăsare între OT și OP;
- bloc mecanic **BM**;

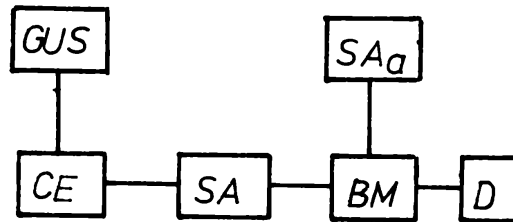


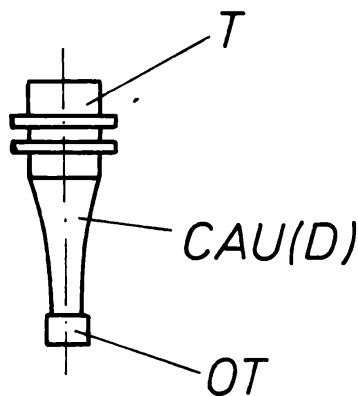
Fig.1.11

Schema bloc a unui utilaj de prelucrare cu ultrasunete

- GUS - generator de semnal de înaltă frecvență (ultrasunete)
- CE - convertor electroacustic
- SA - sistem de avans
- BM - bloc mecanic
- SAa - sistem de alimentare cu suspensie abrazivă
- D - dispozitive specifice

- sistem de alimentare cu suspensie abrazivă SA<sub>a</sub>;
- dispozitive specifice D.

Convertorul electroacustic CE transformă energia electrică de frecvență ultrasonică în energie mecanică de aceeași frecvență dar de amplitudine diferită pe care o concentrează în spațiul de lucru tehnologic. CE este constituit - fig.1.12 - dintr-un ansamblu ce cuprinde un transductor T, un concentrator



- T - transductor
- CAU(D) - concentrator adaptor de undă (difuzor)
- OT - obiect de transfer

Fig.1.12

Schema de principiu a unui convertor electroacustic

adaptor de undă sau difuzor CAU(D) și obiectul de transfer (scula) OT(S). Transductoarele uzual folosite în aplicații industriale pot fi:

- magnetostrictive [97], din tole de Ni - caz în care se necesită adaptarea

unor soluții constructive suplimentare pentru răcirea forțată a T - sau ceremice (ferită);

- piezoelectrice [22,126], din cuarț, ceramică PZT etc.

**CAU(D)** se confecționează [12,19] din oțel, aliaje de aluminiu, aliaje de titan etc. și pot avea o configurație geometrică simplă - cilindric în trepte, conic, exponențial și catenoidal - sau complexă (compunere din mai multe tronsoane de **CAU(D)** simple - în funcție de mărimea amplitudinii de vibrație și solicitările pe care le necesită aplicația tehnologică.

**OT** se dimensionează în așa fel încât să asigure amplitudinea de vibrație transmisă de **CAU(D)** și forma într-o secțiune transversală impuse de procesul tehnologic.

**Generatorul de semnal de înaltă frecvență GUS** - denumit curent și **generator de ultrasunete** - are rolul de a transforma frecvența curentului alternativ de la rețea cu frecvența de 50 Hz (60 Hz), în curenți sinusoidali cu frecvența ultrasonică  $f = 16 \dots 50$  kHz care se aplică **T** din **CE**.

**GUS** se pot realiza pe baza a două scheme principiale:

- cu autoexcitație (fig.1.13);
- cu excitație independentă (fig.1.14).

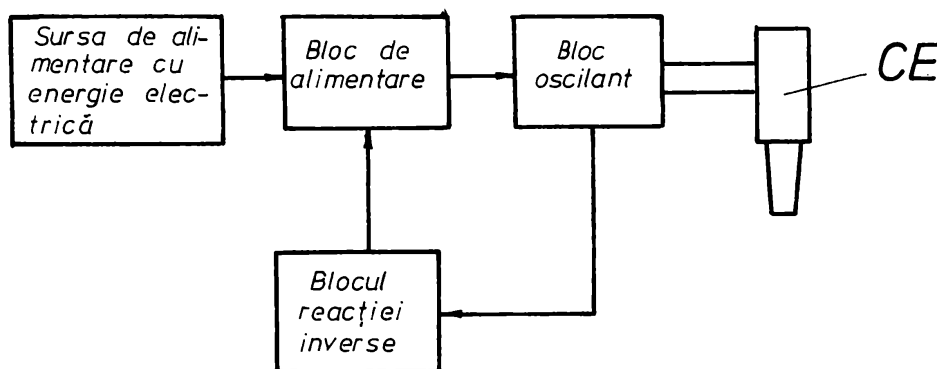


Fig. 1.13

Schema bloc a unui generator de înaltă frecvență cu autoexcitație  
CE - convertor electroacustic

**GUS** cu autoexcitație [8,90,114] se caracterizează prin simplitate, blocul oscilant autoacordându-se pe frecvența de rezonanță a **CE** între anumite limite atunci când acesta prezintă o variație a frecvenței în sarcină, prin modificarea impedanței mecanice.

**GUS** cu excitație independentă [5,30,90,104,117,125] asigură o mai

mare stabilitate în frecvență și permite reglarea ei într-o gamă largă. Amplificatorul intermediar amplifică puterea oscilațiilor electrice și asigură protecția generatorului pilot.

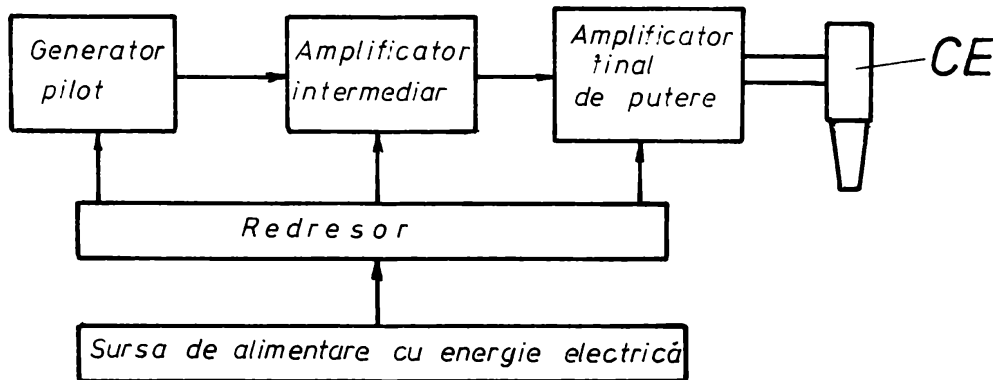


Fig.1.14

Schema bloc a unui generator de înaltă frecvență cu excitație independentă  
CE - convertor electroacustic

Sistemul de avans SA are rolul de a crea și menține presiunea statică necesară procesului între OT și OP. Având drept particularitate realizarea unor viteze mici și variabile [30,36], intrând în domeniul microavansurilor, SA li se impun două condiții esențiale:

- precizie ridicată de deplasare - OP sau OT - pentru a obține o precizie corespunzătoare de prelucrare;
- sensibilitate ridicată, astfel încât SA să fie capabil să mențină presiunea statică în anumite limite, iar viteza de prelucrare a OP să fie maximă.

SA poate fi din punct de vedere constructiv:

- mecanic (cu arcuri, contragreutăți, pârghii etc.);
- hidropneumatic;
- electromecanic.

Blocul mecanic BM realizează structura de susținere a întregului utilaj și este alcătuit [51,52,66,76,103,105,106] din batiu, montant, sănii, ghidaje, mese fixe sau cu deplasare în coordonate rectangulare sau carteziene etc. BM asigură susținerea, ghidarea și poziționarea OT față de OP pentru generarea suprafeței și poate cuprinde într-o variantă modulară și celelalte subansamble: GUS, SA, D etc.

Sistemul de alimentare cu suspensie abrazivă SA<sub>1</sub> este compus din pompă centrifugală sau cu tub flexibil, care în combinație cu o pompă de vid poate realiza cicluri de absorbție-refulare sub presiune sau stropire [105,106,121].

Dispozitivele specifice D echipează mașinile de prelucrat cu ultrasunete în scopul creșterii flexibilității acestora, extinzând astfel domeniul de utilizare. D pot asigura rotirea OT sau OP în timpul prelucrării, deplasarea în coordonate a OP, instalarea OP, recondiționarea OT etc. [12,20,77,86,120].

În cazul activării cu ultrasunete a unor procese de prelucrare prin așchiere sau neconvenționale, fizice, chimice sau biologice, echipamentul specific este determinat de aplicația tehnologică. Configurația generală a unui astfel de echipament este prezentată simplificat în fig.1.15.

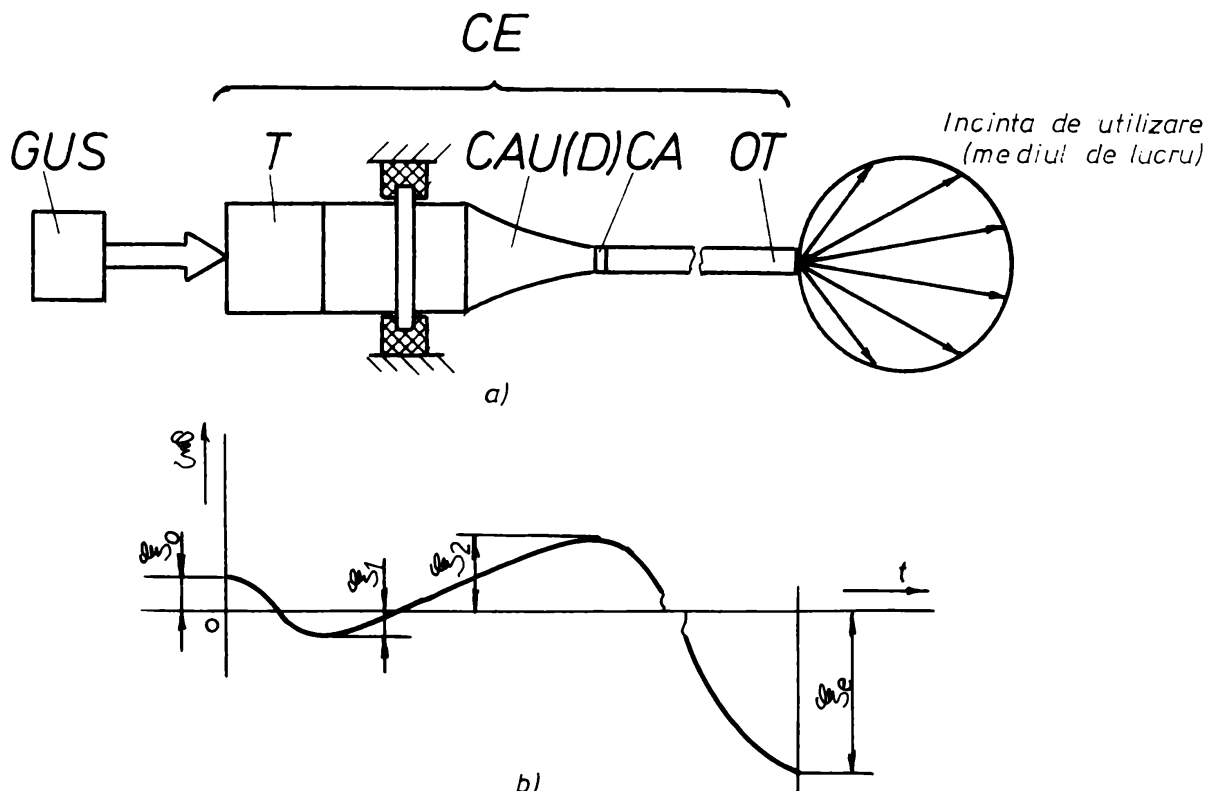


Fig. 1.15

Schema generală simplificată a activării cu ultrasunete a unor procese de prelucrare

- CE - convertor electroacustic
- GUS - generator de semnal de înaltă frecvență (ultrasunete)
- T - transductor
- CAU(D) - concentrator adaptor de undă (difuzor)
- CA - cuplaj acustic
- OT - obiect de transfer
- t - timpul
- $\xi$  - amplitudinea de vibrație

Generatorul de ultrasunete GUS furnizează energie electrică transductorului T care oscilează cu amplitudinea  $\xi_1$  în planul de separație cu concentratorul adaptor de undă (difuzor) CAU(D) - fig.1.15 b -. CAU(D) este fixat mecanic în nodul de vibrație prin elemente elastice și amortizoare față de

structura de rezistență a echipamentului specific și amplifică amplitudinea de vibrație la valoarea  $\xi_2$ . Obiectul de transfer OT este în contact cu incinta de utilizare (mediul de lucru) și în situația unei dimensionări adecvate și a unui cuplaj acustic bun cu CAU(D), se poate amplifica/diminua amplitudinea de vibrație la valoarea  $\xi_1$  necesară procesului tehnologic. În unele aplicații OT poate să lipsească iar CA se realizează uzual sub forma unei ansamblări prin filet.

## CAPITOLUL 2. REALIZARI IN DOMENIUL ACTIVARII CU ULTRASUNETE A PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN ELECTROEROZIUNE CU ELECTROD FILIFORM

### 2.1 PRINCIPIUL ACTIVARII CU ULTRASUNETE A ELECTRODULUI FILIFORM

#### 2.1.1 Dispozitive de activare cu ultrasunete a electrodului filiform

La prelucrarea prin electroeroziune cu electrod filiform, atunci când regimurile de lucru sunt caracterizate de niveluri energetice ale impulsurilor mai reduse, capacitatea de erodare scade odată cu creșterea grosimii OT. Deși, așa cum s-a arătat anterior, unele soluții constructive de generatoare de impulsuri [9,31,81] asigură o constanță a energiei descărcărilor la variația în limite largi a raportului dintre grosimea minimă și maximă a OP, fenomenele ce au loc în interstițiul tehnologic sunt complexe la semifabricate de grosimi mai mari. Menținerea capacității de erodare la o valoare aproximativ constantă pe parcursul prelucrării coroborat cu asigurarea unei precizii dimensionale și de formă ridicate, se pot realiza printr-o spălare suplimentară sub presiune a interstițiului tehnologic și prin vibrarea OT [26,87].

Dispozitivele de vibrare a OT sunt simple și eficiente, oscilațiile electrodului jucând un rol complex și diferit în procesul de eroziune, în funcție de regimul de prelucrare. Schematic, un astfel de dispozitiv [106] este prezentat în fig.2.1

Electrodul filiform OT se deplasează prin interstițiul tehnologic format între el însăși și piesa OP cu o viteză de avans  $v$  constantă și perpendiculară pe planul X-Y determinat de deplasarea în coordonate a mesei de lucru  $m_1$ . Deplasarea OT se efectuează de la o bobină debitoare BD la o bobină înfășurătoare BI, electrodul filiform fiind ghidat de elementele de ghidare EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub>, confecționate de obicei din safir și aflate sub tensiune electrică prin câte un element de alimentare EA<sub>1</sub> și EA<sub>2</sub>. OT prin EA<sub>1</sub> și EA<sub>2</sub> se leagă la un pol, iar OP se leagă la celălalt pol al unui generator de impulsuri. Mediul de lucru ML este alcătuit dintr-un lichid dielectric adus în spațiul de lucru și care înconjoară uniform OT datorită tuburilor de distribuție TD<sub>1</sub> și TD<sub>2</sub>. Unul dintre elementele de ghidare, de exemplu EG<sub>1</sub>, este cuplat rigid cu un convertor electroacustic constituit dintr-un concentrator adaptor de undă CAU și un transductor T, uzual de tip piezoelectric, care la rândul său este în legătură cu un generator de ultrasunete GUS. OT este întins între EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> cu o tensiune mecanică proporțională cu diametrul electrodului filiform, dar cu mult mai scăzută decât rezistența la rupere.



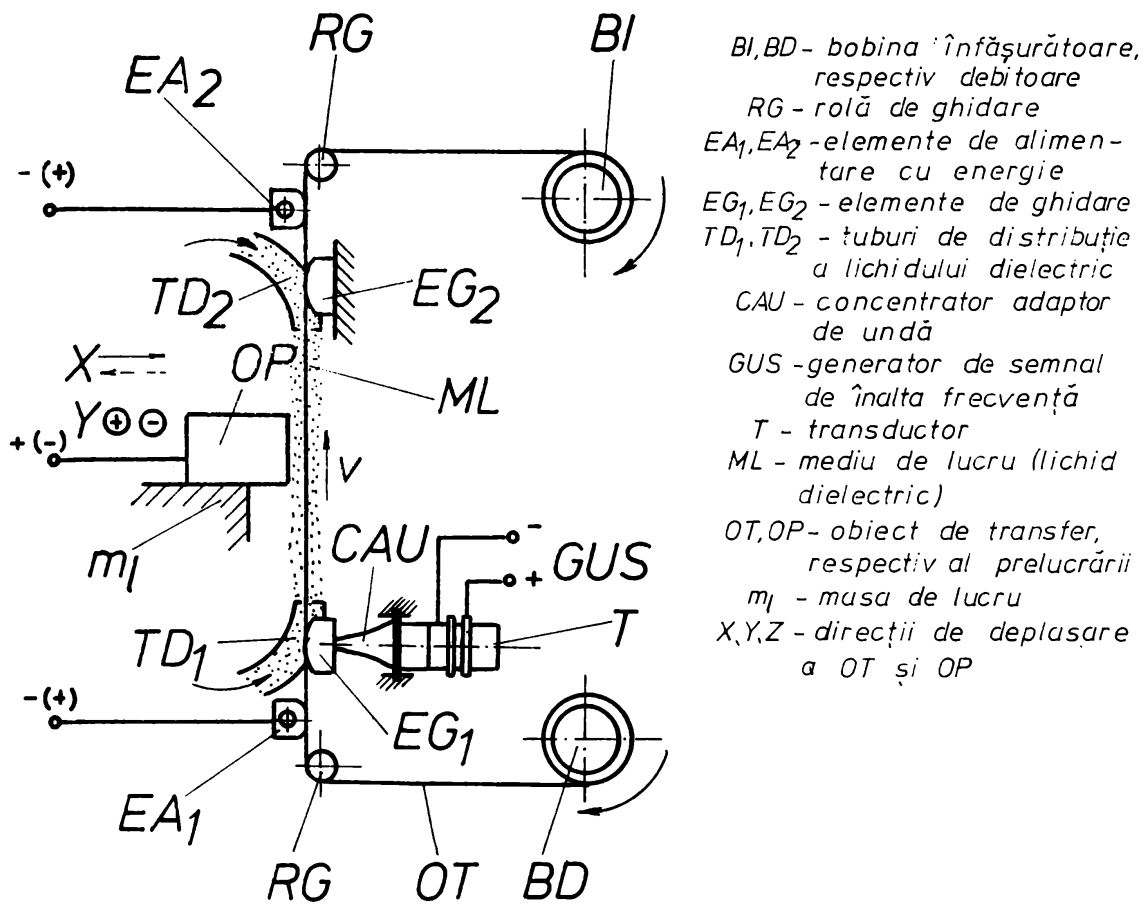


Fig. 2.1

Schema unui dispozitiv de vibrație a electrodului filiform cu frecvență ultrasonoară

Elementele de ghidare a electrodului filiform se pot realiza în mai multe variante constructive [37,38,39] - fig.2.2 - având o formă prismatică - fig.2.2 a și b - situație în care se transmit oscilații transversale OT, respectiv o formă inelară - fig.2.2 c și d - prin care se transmit OT oscilații longitudinale. Deasemenea, elementele de ghidare EG pot fi cuplate rigid direct cu un transductor T - fig.2.2 a și c - sau însăși T, printr-o formă adecvată, poate îndeplini și rolul de ghidare. Datorită oscilațiilor transmise electrodului filiform prin elementele de ghidare, scade forța de frecare dintre OT și EG, fapt ce conduce la micșorarea tensiunii mecanice în electrod, respectiv la creșterea durabilității acestuia (se evită ruperea OT).

Vibrarea OT într-un singur punct după direcția de avans de lucru determină apariția undelor oscilatorii în lungul electrodului filiform - fig.2.3 - care ajută la pătrunderea lichidului dielectric în interstiții mici și la evacuarea particulelor erodate, dar în principal [26,50] la distribuirea descărcărilor electrice în impuls pe energii și asigurarea amorsării descărcărilor la parametri

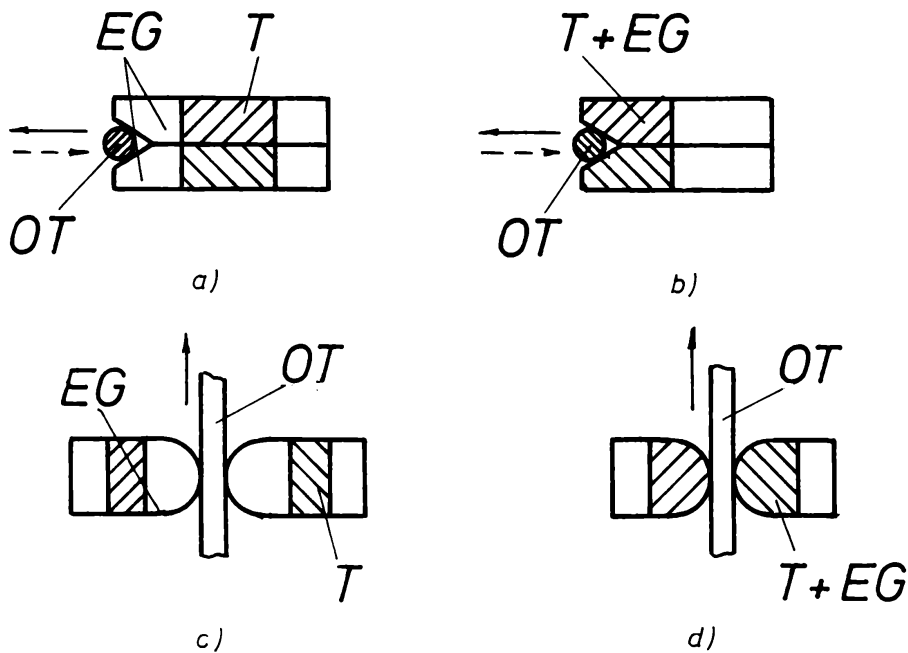
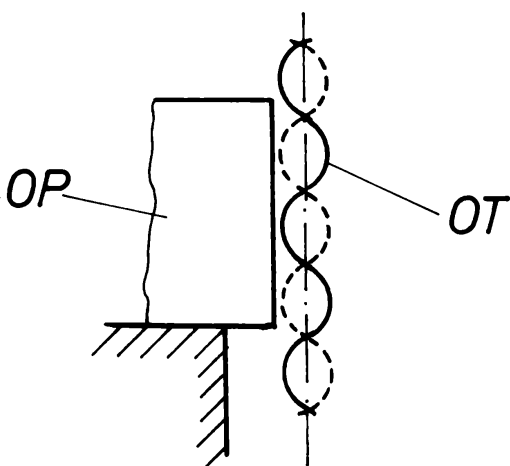


Fig. 22

Elemente de ghidare a electrodului filiform OT  
 EG - element de ghidare  
 T - transductor

inițiali. Apariția undelor staționare în OT și oscilarea acestuia după o singură



OT - obiect de transfer  
 OP - obiect al prelucrării

Fig. 23

Vibrarea electrodului filiform într-un singur punct după direcția sa de avans de lucru

direcție influențează însă negativ precizia dimensională și calitatea suprafeței, factori evidențiați mai mult la OP de grosimi mai mari și atunci când mișcarea de avans de lucru este

normală pe direcția de vibrație. Aceste neajunsuri pot fi diminuate prin utilizarea unor dispozitive speciale de activare a OT.

Astfel, în cazul undelor staționare, aceleași porțiuni ale OP sunt dispuse în timpul descărcărilor electrice în fața ventrelor, respectiv nodurilor

inițiate în OT, fapt ce determină obținerea suprafeței prelucrate cu abateri macrogeometrice (profil ondulat). Dispozitivul de activare cu ultrasunete - fig.2.4 - este prevăzut cu un modulator M [39] care modifică controlat-

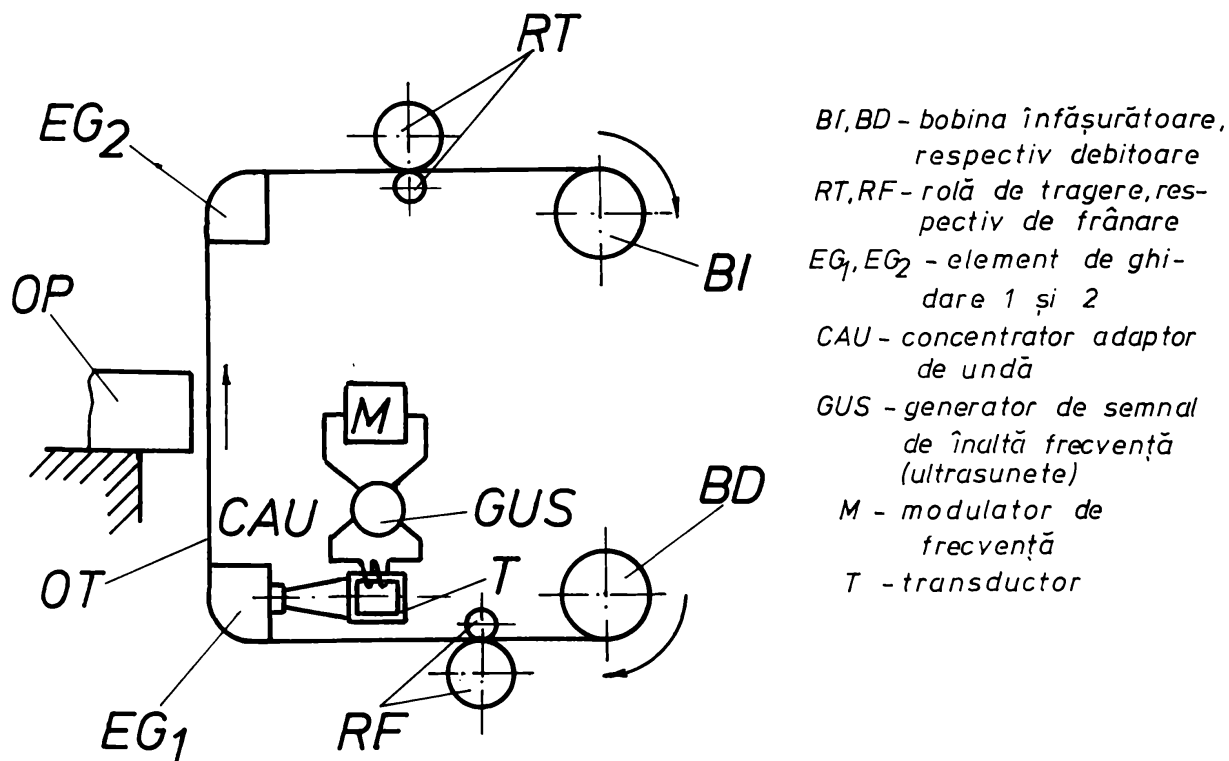


Fig.2.4

Dispozitiv de activare cu ultrasunete a electrodului filiform prevăzut cu un modulator de frecvență

temporizat frecvența semnalului furnizat de generatorul de ultrasunete GUS. În acest fel se modifică numărul de ventre și noduri în OT între EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub>, rezultând o deplasare constantă a pozițiilor acestora în lungul electrodului filiform. În acest fel se obține o suprafață frontală prelucrată în OP uniformă.

Utilizarea acestui dispozitiv este limitată de mărimea gamei de frecvență în care poate fi activat T pentru ca împreună cu CAU să fie în domeniul frecvenței de rezonanță. Din acest motiv se folosesc T de tip magnetostriktiv, și cu tot randamentul conversiei mai scăzut, cele din tole cu Ni. Totodată, modificarea frecvenței OT este puternic influențată de variația tensiunii mecanice în electrodul filiform. Dispozitivul din fig.2.4 are în alcătuire două perechi de role, una pentru tragere RT, cealaltă pentru frânare RF, tocmai pentru a asigura tensiunea în electrod care permite modificarea frecvenței generate de M-GUS într-un domeniu mai larg.

Un alt dispozitiv [39] - fig.2.5 - este alcătuit dintr-un element

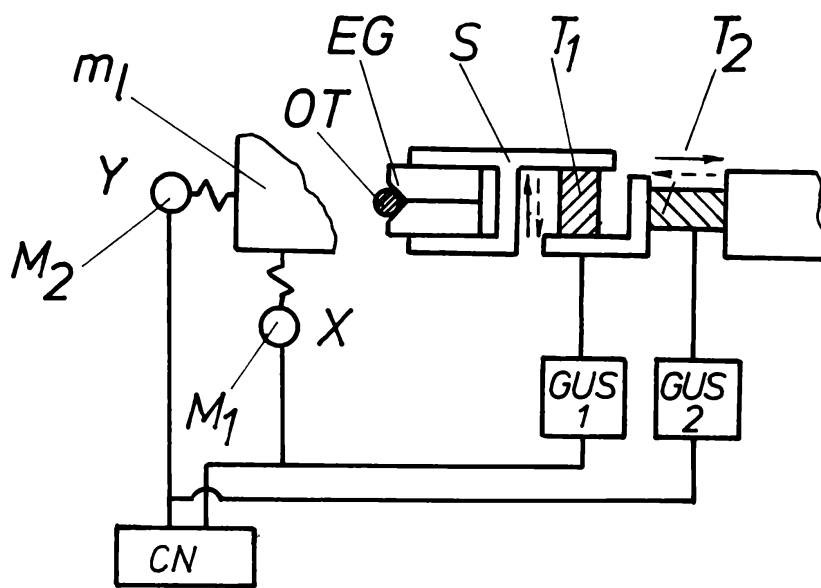


Fig. 2.5

Dispozitiv de activare cu ultrasunete a electrodului filiform prevăzut cu un suport care poate vibra după două direcții rectangulare în spațiu

$T_1, T_2$  - transductoare 1 și 2

$S$  - suport

$EG$  - element de ghidare

$M_1, M_2$  - motoare electrice de acționare 1 și 2

$m_1$  - masa de lucru

$CN$  - comanda numerică

$GUS_1, GUS_2$  - generatoare de semnal de înaltă frecvență

$X, Y$  - direcții de deplasare a mesei de lucru

$OT$  - obiect de transfer

deplasarea  $m_1$  după direcțiile  $X$ - $Y$  acționând motoarele  $M_1$  și  $M_2$  în funcție de configurația geometrică a  $OP$ . Întrucât precizia dimensională la prelucrarea prin electroeroziune cu electrod filiform activat ultrasonic este influențată de neconcordanța direcției de vibrare a  $OT$  cu direcția de avans de lucru, dispozitivul prin  $CN$  realizează succesiv sau simultan vibrarea  $EG$ , deci și a  $OT$ , în funcție de sensul de deplasare după direcția  $X$  sau/și  $Y$  a  $OP$ .

Urmărind deasemenea creșterea preciziei de prelucrare, dispozitivul din fig. 2.6 are în construcția sa [39] un bloc de comandă  $BC$  care, pe de o parte, controlează și adaptează continuiu frecvența/puterea generatorului de ultrasunete  $GUS$ , iar pe de altă parte este racordat electric cu un potențiommetru  $P$  dispus între  $OP$  și  $OT$ . În funcție de valoarea căderii de potențial dintre  $OT$  și  $OP$  în interstițiul tehnologic semnalat de  $P$ ,  $BC$  reglează în așa fel frecvența și/sau amplitudinea furnizată de  $GUS$  electrodului filiform încât se realizează condiții

de ghidare  $EG$  fixat într-un suport  $S$  care are posibilitatea să oscileze după două direcții rectangulare în spațiu datorită transductoarelor  $T_1$  și  $T_2$ .

Fiecare transductor este activat independent de către un generator de ultrasunete  $GUS_1$ , respectiv  $GUS_2$ , care sunt comandate de un echipament cu comandă numerică  $CN$ .

$CN$  determină

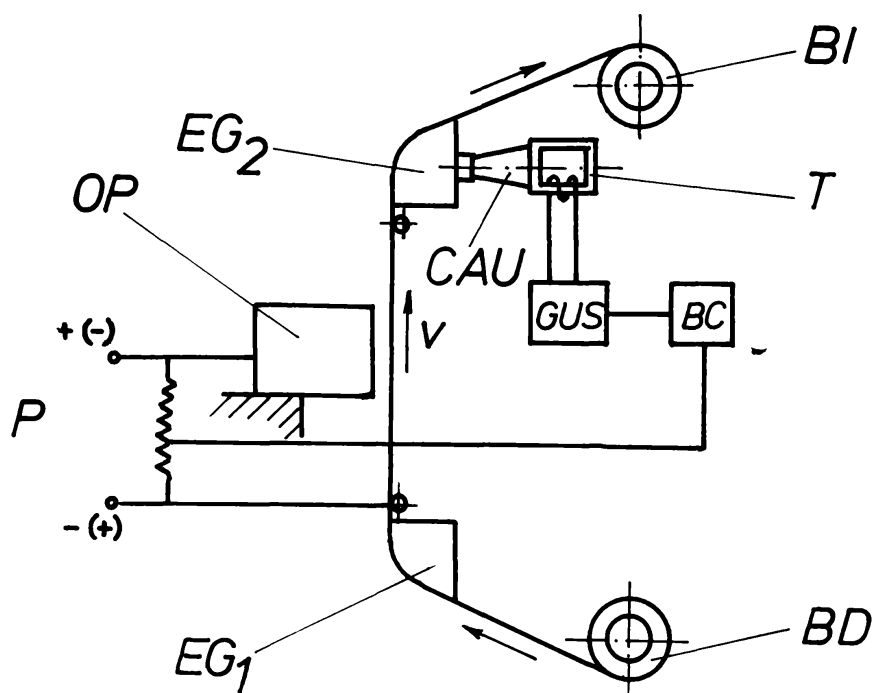


Fig.2.6

Dispozitiv de activare cu ultrasunete a  
electrodului filiform prevăzut cu un bloc  
de comandă

BI, BD - bobina înfășurătoare, respectiv debitoare

EG<sub>1</sub>, EG<sub>2</sub> - element de ghidare 1 și 2

T - transductor

CAU - concentrator adaptor de undă

BC - bloc de comandă

GUS - generator de semnal de înalta frecvență

P - potenționmetru

OP - obiectul prelucrării

optime de amorsare a descărcărilor electrice în impuls.

Deficiențele dispozitivelor prezentate [39,106] sunt în mare măsură diminuate în situația în care electrodul filiform este activat în două puncte dispuse după două direcții rectangulare în spațiu. Astfel [107] - fig.2.7 - electrodul filiform OT primește o mișcare oscilatorie prin EG<sub>1</sub> de la convertorul electroacustic CAU<sub>1</sub> - T<sub>1</sub> și GUS<sub>1</sub> cu o anumită amplitudine și frecvență de vibrație, respectiv cu o anumită amplitudine și frecvență de vibrație egale sau diferite prin EG<sub>2</sub> de la CAU<sub>2</sub> - T<sub>2</sub> și GUS<sub>2</sub>, cele două direcții de vibrație fiind perpendiculare. Intre elementele de ghidare a OT, EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> cele două mișcări oscilatorii se compun, având drept rezultat apariția undelor flexurale [106].

Amplitudinea și frecvența undelor flexurale - fig.2.8 - sunt

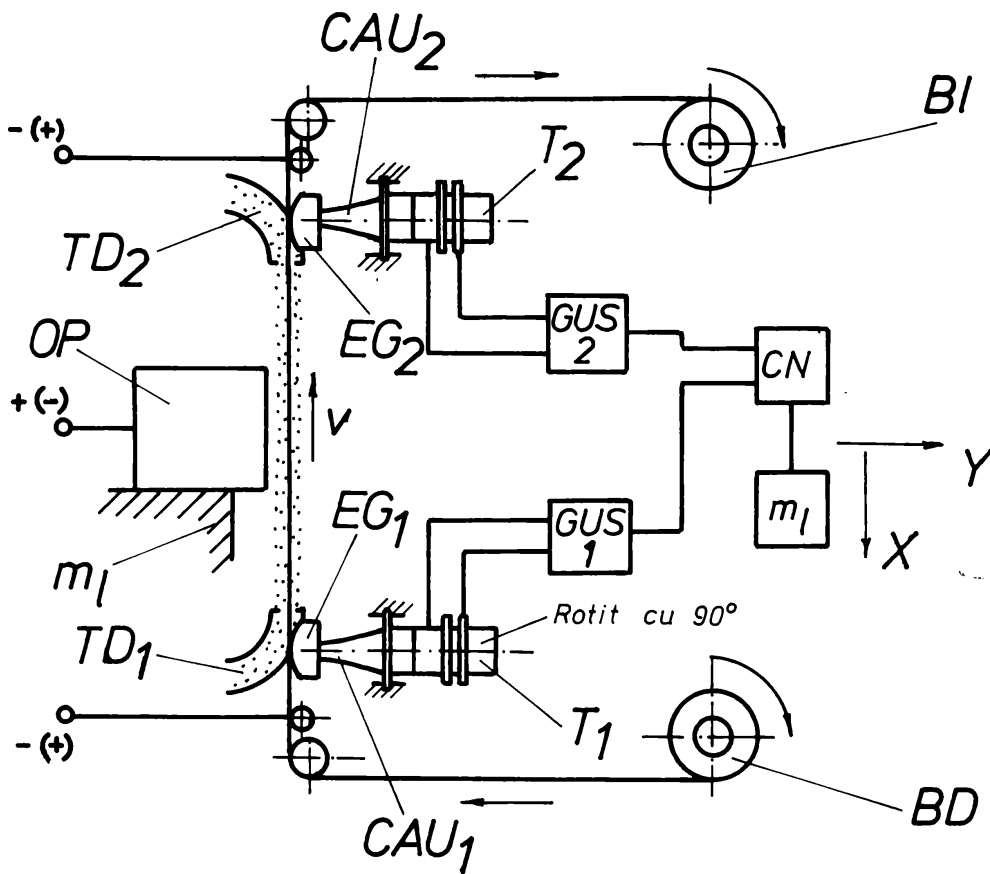


Fig. 2.7

Dispozitiv de activare cu ultrasunete în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu a electrodului filiform

BI, BD - bobina înfășurătoare, respectiv debitoare

CAU<sub>1</sub>, CAU<sub>2</sub> - concentrator adaptor de undă în punctul 1, respectiv 2

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> - transductor 1 și 2

EG<sub>1</sub>, EG<sub>2</sub> - element de ghidare 1 și 2

TD<sub>1</sub>, TD<sub>2</sub> - tub de distribuție 1 și 2

GUS<sub>1</sub>, GUS<sub>2</sub> - generator de semnal de înaltă frecvență pentru T<sub>1</sub>, respectiv T<sub>2</sub>

CN - comanda numerică

m<sub>1</sub> - masa de lucru (a mașinii)

OP - obiectul prelucrării

X, Y - direcții de deplasare a mesei de lucru m<sub>1</sub>

v - viteza de avans a OT în lungul axei sale

dependente de frecvența și amplitudinea de vibrație a fiecărui convertor electroacustic și de cuplajul mecanic dintre EG<sub>1</sub>, EG<sub>2</sub> și OT. Cuplajul mecanic este proporțional cu mărimea tensiunii mecanice în OT [108], cu natura și proprietățile fizico-mecanice ale OT precum și cu rugozitatea suprafețelor de contact a elementelor de ghidare.



$\tau$  - durata descărcării în impuls.

În timpul unei perioade a vibrațiilor OT, cantitatea totală de material prelevat din OP se poate exprima ca sumă a produselor dintre cantitățile de material erodat  $m_i$  în cazul fiecărei descărcări electrice singulare  $i$  și frecvența oscilațiilor  $f$ :

$$M = \sum_{i=1}^n m_i \cdot f \quad (2.2)$$

Intrucât în cazul general:

$$\frac{V_c}{S_c^2} \int I^2 dt = \varphi(U_{si})$$

unde:

$U_{si}$  - tensiunea de amorsare corespunzătoare descărcării electrice  $i$ , expresia (2.2) devine:

$$M = B \cdot f \sum_{i=1}^n \varphi(U_{si}) \quad (2.3)$$

Ecuatia (2.3) se poate rezolva numai atunci când se cunoaște  $U_{si}$ . Tensiunea de amorsare  $U_{si}$  se poate determina din condiția de străpungere a dielectricului în funcție de poziția OT oscilant față de OP. Se consideră distanța  $L$  dintre OT și OP variabilă în funcție de timp.

$$L = \phi(t) \quad (2.4)$$

La rândul ei, mărimea distanței de străpungere  $g$  dintre OT și OP în funcție de diferența de potențial este dată de:

$$g = \Psi[U_{si}(t)] \quad (2.5)$$



În momentul  $t = t_0$ , când distanța  $L_0$  dintre OT și OP devine egală cu distanța de străpungere  $g_0$ , are loc străpungerea dielectricului cu dezvoltarea ulterioară a descărcării în impuls. Prin urmare, condiția de străpungere a dielectricului se poate scrie:

$$\phi(t_0) = \psi(U_{a0}) \quad (2.6)$$

Următoarea străpungere a dielectricului are loc în momentul  $t_0 + \Delta t_1$ , când diferența de potențial ajunge la valoarea  $U_{a1}$  iar distanța dintre OT și OP este  $g_1$ , adică atunci când  $\phi(t_0 + \Delta t_1) = \psi(U_{a1})$ . Pentru descărcarea electrică în impuls i se poate scrie în mod similar:

$$\phi(t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i) = \psi(U_{ai}) \quad (2.7)$$

care împreună cu relația (2.3) formează un sistem de două ecuații cu două necunoscute:  $\psi(U_{a1})$  și  $M$ .

În cazul particular al unui generator de impulsuri de relaxare RC [50], valoarea

$$\int_0^T I^2 dt$$

este proporțională cu mărimea  $C \cdot U_{a1}$ , astfel că expresia (2.3) devine:

$$M = k \cdot C \cdot f \sum_{i=1}^n U_{ai}^{\beta} \quad (2.8)$$

unde:

$\beta$  - coeficient determinat experimental (uzual  $\beta = 1,6 \dots 2$ );

$k$  - coeficient de proporționalitate în funcție de caracteristicile termofizice ale materialului OT.

Deasemenea, ecuația de mișcare a electrodului are forma [50]:

$$\phi(t) = \xi \cdot (1 - \cos \omega t) + g_{\min} \quad (2.9)$$

unde:

$\xi$  - amplitudinea de vibrație a OT;

$\omega$  - pulsația;

$g_{\min}$  - interstițiul minim între OT și OP.

Intrucât experimental [11,23,49] s-a stabilit că în domeniul 0...300 V există o dependență aproximativ liniară între mărimea distanței de străpungere  $g$  și diferența de potențial  $U$ , se poate scrie:

$$U \approx \delta \cdot g \quad (2.10)$$

unde:  $\delta$  - coeficient de proporționalitate în funcție de caracteristicile lichidului dielectric,

astfel că pentru fiecare descărcare electrică în impuls  $i$  condiția (2.6) de străpungere a dielectricului devine:

$$\frac{1}{\delta} \cdot U_{a,i} = \xi \cdot [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{f=1}^n \Delta t_f)] + g_{\min} \quad (2.11)$$

Astfel, dependența dintre efectul de eroziune a electrozilor și parametri vibrațiilor OT se poate explicita printr-un sistem de două ecuații de forma:

$$M = k \cdot C \cdot f \sum_{i=1}^n U_{a,i}^p \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{\delta} \cdot U_{a,i} = \xi \cdot [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{f=1}^n \Delta t_f)] + g_{\min}$$

Pe baza sistemului transcendent (2.12), M.K.Mișkevici a modelat grafic efectul vibrațiilor asupra procesului de prelucrare prin electroeroziune

reprezentat schematic în fig.2.9.

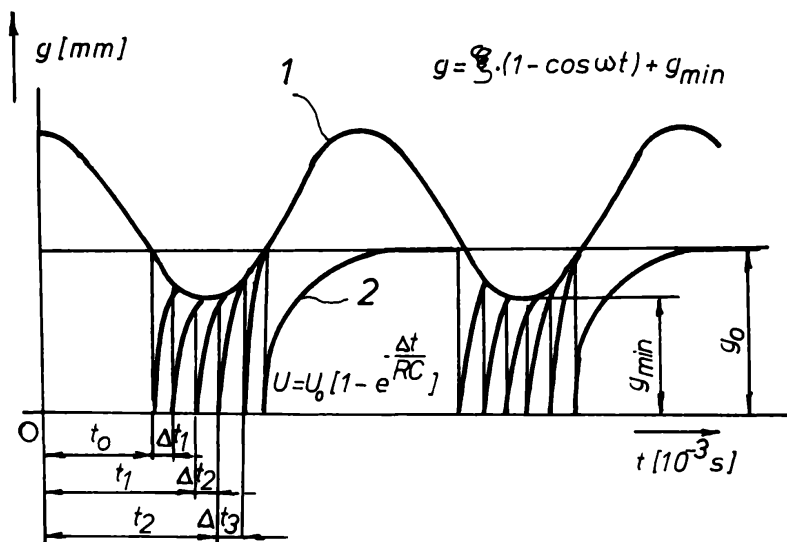


Fig. 2.9

Efectul vibrațiilor asupra procesului de prelucrare prin electroeroziune

$g$  - interstițiul dintre OT și OP

$\omega$  - pulsația

$\xi$  - amplitudinea de vibrație a OT

$t$  - intervalul de timp în care au loc procesele electroerozive

$U$  - tensiunea de amorsare

$RC$  - parametri generatorului de impulsuri

Pe axa ordonatelor este reprezentată distanța  $g$  dintre OT și OP (interstițiu tehnologic), iar pe axa absciselor timpul  $t$ . Curba 1 caracterizează variația distanței dintre cei doi electrozi - relația (2.9) - datorită mișcării oscilatorii a OT care se produce între limitele  $g_{min}$  și  $g_{min} + 2\xi$ . De asemenea, curba 2 caracterizează variația tensiunii în timp pe baza gradului de încărcare a condensatorului C din generatorul de impulsuri comandate RC:

satorului C din generatorul de impulsuri comandate RC:

$$U_{a1} = U_0 \cdot [1 - e^{-\frac{t}{RC}}] \quad (2.13)$$

unde:

$U_0$  - tensiunea de mers în gol.

Dacă se consideră că tensiunea de amorsare este proporțională cu mărimea interstițiului, la momentul  $t = t_0$  când condensatorul C s-a încărcat până la valoarea  $U_0$  iar OT și OP se găsesc la distanța medie de amorsare  $g_0$ , are loc străpungerea dielectricului. Energia descărcării electrice este proporțională în

acest caz cu tensiunea sursei. Se presupune că tensiunea scade după descărcare până la valoarea zero, după care crește în intervalul  $\Delta t_i$  până la valoarea de amorsare. Pentru următoarea valoare a interstițiului tehnologic  $g_i$  se produce o nouă descărcare, dar cu o altă energie proporțională cu tensiunea  $U_{ai}$  și procesul continuă în acest fel până la valoarea  $g_0$ .

Însă sistemul de ecuații (2.12) descrie procesul de prelucrare prin electroeroziune în prezența vibrațiilor în ipoteza că  $g_{min} = ct$ . Practic, distanța minimă dintre OT și OP este influențată de o serie de factori astfel că  $g_{min}$  variază între anumite limite. În ipoteza [50] că reglarea avansului OT se efectuează după valoarea curentului mediu  $I_m$ :

$$I_m = \frac{Q}{T} = C \cdot f \sum_{i=1}^n U_{ai} \quad (2.14)$$

unde:

Q - cantitatea de electricitate dirijată de la OT la OP;

T - perioada oscilațiilor OT,

sistemul de ecuații (2.12) devine:

$$M = k \cdot C \cdot f \sum_{i=1}^n U_{ai}^2$$

$$\frac{1}{\delta} \cdot U_{ai} = \xi \cdot [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i)] + g_{min} \quad (2.15)$$

$$I_m = C \cdot f \sum_{i=1}^n U_{ai}$$

Dezvoltând pentru fiecare descărcare în impuls i în perioada T condiția de străpungere a dielectricului:

$$\frac{1}{\delta} \cdot U_{a0} = \xi \cdot [1 - \cos \omega t_0] + g_{\min}$$

$$\frac{1}{\delta} \cdot U_{a1} = \xi \cdot [1 - \cos \omega (t_0 + \Delta t_1)] + g_{\min}$$

$$\frac{1}{\delta} \cdot U_{ai} = \xi \cdot [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i)] + g_{\min}$$

din însumarea acestor relații pentru cele n descărcări:

$$\frac{1}{\delta} \cdot \sum_{i=1}^n U_{ai} = \xi \cdot \sum_{i=1}^n [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i)] + n \cdot g_{\min} \quad (2.16)$$

se poate deduce distanța minimă  $g_{\min}$  între electrozi:

$$g_m = \frac{1}{n} \left\{ \frac{I_m}{C \cdot f \cdot \delta} - \xi \sum_{i=1}^n [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i)] \right\} \quad (2.17)$$

Din relația (2.17) se observă că interstițiul minim între OT și OP depinde de amplitudinea și frecvența de vibrația  $\xi$  și  $f$  a OT și de parametri descărcării electrice într-un impuls de tensiune în perioada T:  $I_m$ , C,  $t_0$  și  $t_1$ . Înlocuind (2.17) în (2.15), se obține sistemul de ecuații cu două necunoscute M și  $U_{ai}$  care nu mai depind la rândul lor de mărimea  $g_{\min}$ :

$$M = k \cdot C \cdot f \sum_{i=1}^n U_{ai}^{\delta} \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{\delta} \cdot U_{ai} = \xi \cdot [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i)] + \frac{1}{n} \cdot \left\{ \frac{I_m}{C \cdot f \cdot \delta} - \xi \sum_{i=1}^n [1 - \cos \omega (t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i)] \right\}$$

## 2.2 CERCETARI EXPERIMENTALE INTREPRINSE. REZULTATE OBTINUTE

Mișcarea vibratorie a OT asigură succesiunea descărcărilor chiar și în situația limită  $g_{min} = 0$  deoarece valoarea medie a interstițiului este mai mare ca zero  $g_0 > 0$ . Cercetările experimentale întreprinse [50] au condus la evidențierea a trei efecte datorită activării ultrasonice a electrodului:

- intensificarea procesului de prelucrare prin electroeroziune determinat de redistribuirea descărcărilor electrice după energie;

- mărirea distanței de străpungere - interstițiul de lucru - și îmbunătățirea evacuării produselor eroziunii din spațiul de lucru, fapt ce iese mai puternic în evidență la energii și forțe hidrodinamice mici care apar în timpul descărcărilor electrice în impuls;

- îmbunătățirea evacuării materialului aflat în faza lichidă din craterul OP.

Studiul influenței oscilațiilor ultrasonice ale OT asupra capacității de erodare datorat redistribuirii descărcărilor electrice în impuls după energie întreprinse pe baza sistemului de ecuații (2.16) a fost completat [50] și cu cercetări experimentale. Astfel, în cazul particular pentru un generator de impulsuri de tensiune de tip RC cu  $RC = 1 \cdot 10^{-5}$  s,  $U_0 = 100$  V,  $g_0 = 0,040$  mm

și  $\xi = 0,010$

mm, s-a urmărit dependența cantității de material erodat  $M$  în funcție de frecvența de oscilație  $f$  a OT

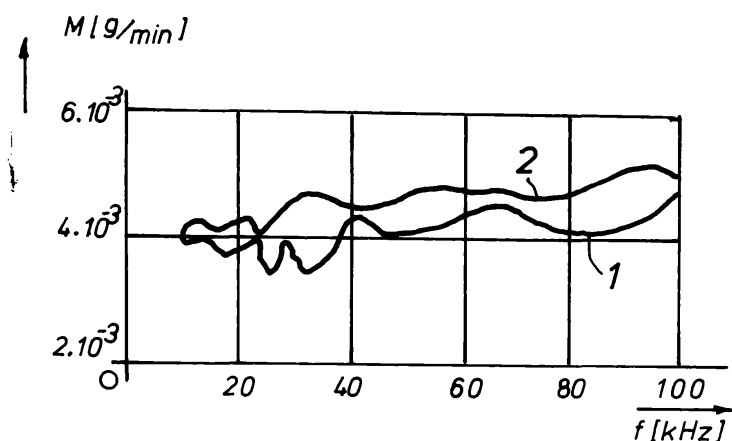


Fig. 2.10

Dependența capacității productive de frecvența de vibrație a OT

- curba 1:  $g_{min} = 0,3 \cdot g_0$

- curba 2:  $g_{min} = 0,5 \cdot g_0$

$M$  - cantitatea de material prelevat din OP

$f$  - frecvența de vibrație a OT

- fig. 2.10 -  
în două situații:

- $g_{min} = 0,3 \cdot g_0$   
(curba 1);

- $g_{min} = 0,5 \cdot g_0$   
(curba 2).

Se observă că în domeniul de frecvențe 10...40 kHz apar variații mari

ale capacității de erodare. Din acest motiv se necesită punerea de acord a parametrilor electrici cu frecvența vibrațiilor ultrasonice. De exemplu, cercetările experimentale efectuate de M. K. Mițkevic la frecvența  $f = 23,5 \text{ kHz}$  și amplitudinea de vibrație  $\xi = 0,001 \text{ mm}$  au condus la obținerea următoarelor rezultate în funcție de variația capacității de încărcare a condensatorului  $C$ : creșterea capacității de erodare față de procedeul electroeroziv fără ultrasunete cu 10 % la  $C = 2 \text{ }\mu\text{F}$ , cu 50...80 % la  $C = 0,5 \text{ }\mu\text{F}$  și cu 55...185 % la  $C = 0,2 \text{ }\mu\text{F}$ .

Însă rolul vibrațiilor cu frecvență ultrasonică a OT este complex, influențând toate laturile procesului de prelucrare, de la străpungerea dielectricului până la desfășurarea fenomenelor intime de prelevare.

La prelucrarea materialului SKD-10 [39] având o grosime de 10 mm, K. Inoue a utilizat un electrod filiform confecționat din alamă cu diametrul de 0,2 mm într-un lichid dielectric de tip apă distilată cu rezistivitatea de  $5 \cdot 10^4 \text{ }\Omega\text{cm}$ . Impulsurile electrice aplicate OT aveau o intensitate la vârf de 30 A, durata impulsurilor  $t_1 = 10 \text{ }\mu\text{s}$  și un timp de pauză între impulsuri  $t_p = 20 \text{ }\mu\text{s}$ . În situația prelucrării prin electroeroziune fără activare ultrasonică a electrodului filiform, s-a obținut o viteză de erodare de 1,2 mm/min. Dacă se aplică o frecvență de 30 kHz electrodului filiform, viteza de erodare ajunge la 2,3 mm/min la o amplitudine de vibrație de 1  $\mu\text{m}$ , respectiv 2,0 mm/min la amplitudinea de 3  $\mu\text{m}$ .

Variația tensiunii mecanice în OT are o influență nesemnificativă asupra vitezei de erodare. Astfel, la o tensiune mecanică în electrod dată la o masă de 600 g și un domeniu de variație de 5...300 g, viteza de erodare este practic constantă în intervalul de frecvență 1...50 kHz. De exemplu, la frecvența de 1 kHz s-a obținut o viteză de erodare de 1,9 mm/min, iar la 3 kHz, 2,0 mm/min.

În cazul prelucrării materialului SKD-11 [39] de grosime 10 mm cu un electrod filiform din alamă cu diametrul de 0,2 mm căruia i se furnizează impulsuri electrice cu  $t_1 = 5 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $t_p = 20 \text{ }\mu\text{s}$  și o intensitate la vârf a curentului de 27 A, s-a urmărit dependența vitezei de lucru funcție de rezistivitatea lichidului dielectric în domeniul  $10 \dots 10^7 \text{ }\Omega\text{cm}$  - fig.2.11 -. De fapt, în această figură sunt prezentate sintetic mai multe rezultate experimentale referitoare la dependența interstițiului tehnologic, adâncimea de prelucrare și rugozitatea suprafeței prelucrate în funcție de rezistivitatea lichidului dielectric.

Se observă că mărimea interstițiului tehnologic  $g$  variază invers proporțional cu rezistivitatea dielectricului, având o dependență aproximativ liniară. La valori de  $10^6 \dots 10^7 \text{ }\Omega\text{cm}$  a rezistivității lichidului dielectric - cazul apei distilate - mărimea interstițiului tehnologic este de 0,010...0,020 mm. Acesta se poate mări la valori de 0,040...0,050 mm atunci când rezistivitatea scade la  $10^2 \dots 10^4 \text{ }\Omega\text{cm}$ . Viteza de erodare  $v_e$  crește brusc atunci când rezistivitatea dielectricu-

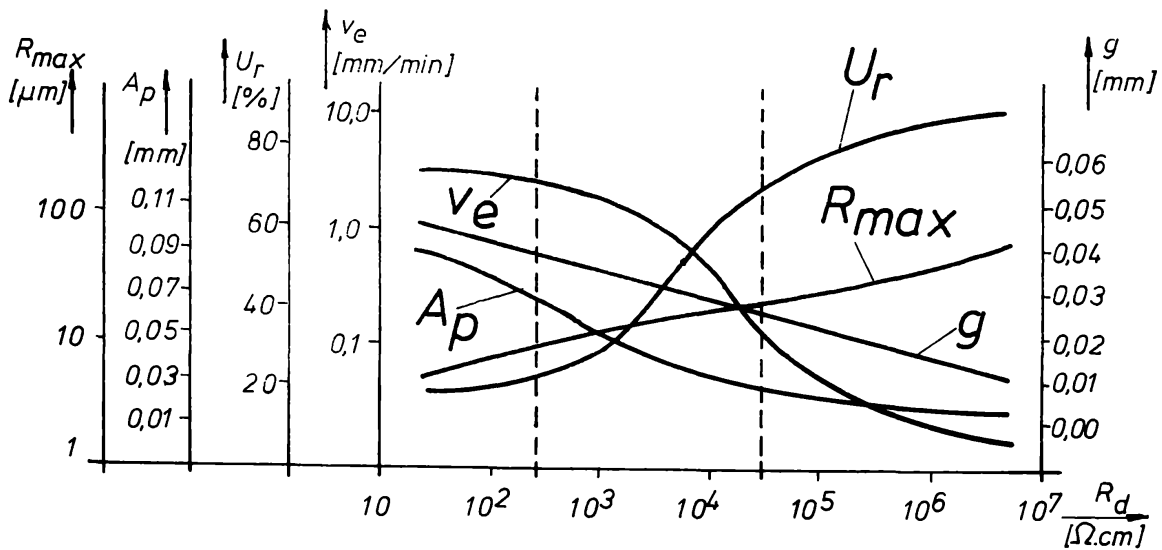


Fig. 2.11

Dependenta parametrilor tehnologici de rezistivitatea lichidului dielectric

- $R_{max}$  - rugozitatea suprafeței OP
- $A_p$  - adâncimea de prelucrare
- $U_r$  - uzura relativă a OT
- $v_e$  - viteza procesului de erodare (capacitatea productivă)
- $g$  - mărimea interstițiului tehnologic dintre OT și OP
- $R_d$  - rezistivitatea lichidului dielectric

lui depășește puțin valoarea  $5 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ , în timp ce uzura relativă a electrodului filiform  $U_r$  se diminuează considerabil între  $10^4$  și  $5 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ . Astfel, dacă uzura relativă  $U_r$  este de circa 80 % la o rezistivitate a lichidului dielectric superioară valorii de  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ , acesta scade la 20 % pentru o rezistivitate de  $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ . Adâncimea de prelucrare  $A_p$ , care variază descrescător cu mărirea rezistivității, cunoaște o creștere mai pronunțată în domeniul  $10^2 \dots 5 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ . Deasemenea, rugozitatea suprafeței exprimată prin parametrul  $R_{max}$  aflată într-o dependență aproximativ liniară cu rezistivitatea dielectricului, se reduce la valori mai scăzute ale acesteia din urmă.

Din analiza acestor caracteristici tehnologice rezultă că se pot obține efecte satisfăcătoare dacă se lucrează cu un lichid dielectric - obișnuit apa menajeră deionizată - a cărei rezistivitate este cuprinsă între  $5 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  (suprafața delimitată cu linie întreruptă în fig. 2.11). După valoarea de  $5 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  viteza procesului de erodare  $v_e$  scade foarte mult, influența ultrasunetelor asupra productivității fiind nesemnificativă la rezistivități mai mari ale dielectricului, pe când la valori mai scăzute de  $5 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$  adâncimea de prelucrare se mărește considerabil, fapt ce determină o scădere a preciziei de prelucrare.



Totodată, din cercetările experimentale efectuate [39] s-a constatat că rezistivitatea dielectricului aflat și supus descărcărilor electrice în

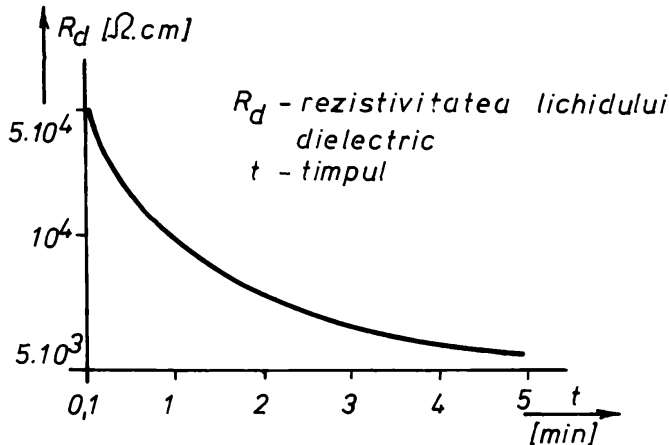


Fig. 2.12

Variația rezistivității lichidului dielectric în timp

interstițiul tehnologic, fără a circula prin acesta, se diminuează considerabil în timp. Astfel, în fig. 2.12 s-a reprezentat grafic modul de variație a rezistivității lichidului dielectric în timp plecând de la o rezistivitate inițială de  $5 \cdot 10^4 \Omega \text{cm}$ . Se observă că în decurs de câteva minute rezistivitatea dielectricului poate să scadă de câteva ori, fapt ce influențează negativ pa-

rametri tehnologici ai procesului de prelucrare. Explicația acestui fenomen constă în creșterea temperaturii lichidului dielectric datorită energiei rezultate în urma descărcărilor electrice, care favorizează creșterea capacității de dizolvare a gazului carbonic în apă și implicit a concentrației acestuia în apă, respectiv scăderea rezistivității. Din acest motiv se necesită circulația - uneori forțată - a lichidului dielectric prin interstițiul tehnologic în lungul zonei de prelucrare.

În general, vibrarea electrodului filiform a contribuit decisiv la intensificarea proceselor de prelucrare electroerozive [39,50] atunci când s-a lucrat cu amplitudini de vibrație cuprinse între  $1 \dots 50 \mu\text{m}$ , uzual  $1 \dots 5 \mu\text{m}$ , și cu frecvențe de  $10 \dots 50(100) \text{ kHz}$ .

Alte cercetări experimentale au fost efectuate de autor la frecvența nominală de  $40 \text{ kHz}$  [108] iar activarea electrodului filiform s-a efectuat conform fig. 2.7 prin două elemente de ghidare dispuse după două direcții rectangulare în spațiu. Deși volumul experimentărilor a fost redus, s-a urmărit în primul rând influența amplitudinii de vibrație a convertorului electroacustic pentru fiecare element de ghidare în funcție de variația puterii electrice furnizată de generatorul de ultrasunete GUS - fig. 2.13 -. Se observă că pentru amplitudini relativ mici în jur de  $1 \dots 3 \mu\text{m}$ , puterea generatorului de ultrasunete GUS este de circa  $20 \dots 30 \text{ W}$ . Aceasta are o mare importanță în calculul de dimensionare energetică a ansamblului CE-GUS, facilitând miniaturizarea generatorului și implementarea acestuia în echipamentul de comandă CNC al utilajului.

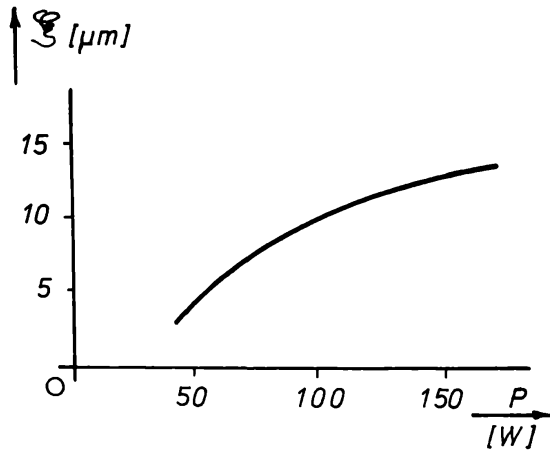


Fig. 2.13

Dependența amplitudinii de vibrație a OT funcție de puterea GUS  
 $a$  - amplitudinea de vibrație a OT  
 $P$  - puterea electrică de ieșire din generatorul de semnal de înalta frecvență GUS

Menținând amplitudinea de vibrație constantă a CE prin schimbarea CAU cu diferite valori ale factorului de amplificare a amplitudinii, s-a urmărit dependența densității de energie  $W_{sp}$  prin interstițiul tehnologic OT-OP în funcție de raportul (factorul) de amplificare a CAU

- fig.2.14 -. La prelucrarea unor semifabricate de grosime mai mare, în situația în care se necesită o densitate mai mare de energie și corelat cu tipul generatorului de impulsuri de

tenșiune, se poate adapta ușor CE corespunzător necesităților tehnologice prin

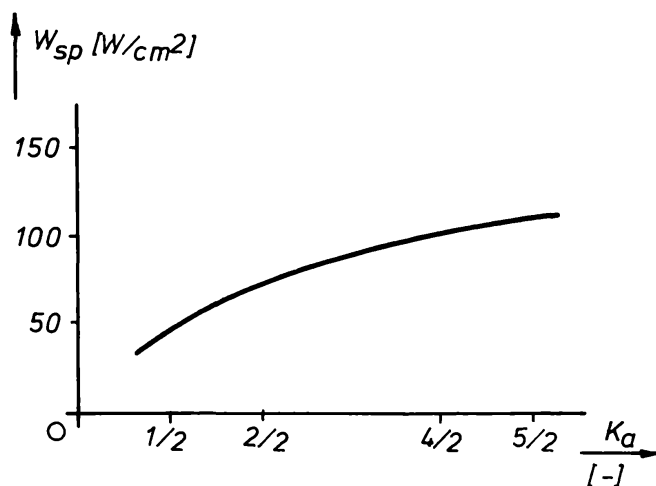


Fig. 2.14

Dependența densității de energie prin interstițiul tehnologic funcție de factorul de amplificare

$W_{sp}$  - densitatea de energie  
 $K_a$  - factor de amplificare a amplitudinii de vibrație

simpla schimbare cu un concentrator adaptor de undă cu factor de amplificare mai mare.

În fig.2.15 s-a determinat experimental raportul dintre productivitatea prelucrării  $P_p$  și diferența dintre frecvențele de lucru ale fiecărui element de ghidare a electrodului filiform. Domeniul de variație a frecvenței a fost de 1 kHz, fiind cuprins între 39,5 kHz și 40,5 kHz. Din compunerea spațială a

mișcărilor oscilatorii a rezultat o componentă pentru care diferența dintre frecvențele de lucru a fost de 0,27 kHz și a condus la obținerea unui maxim de

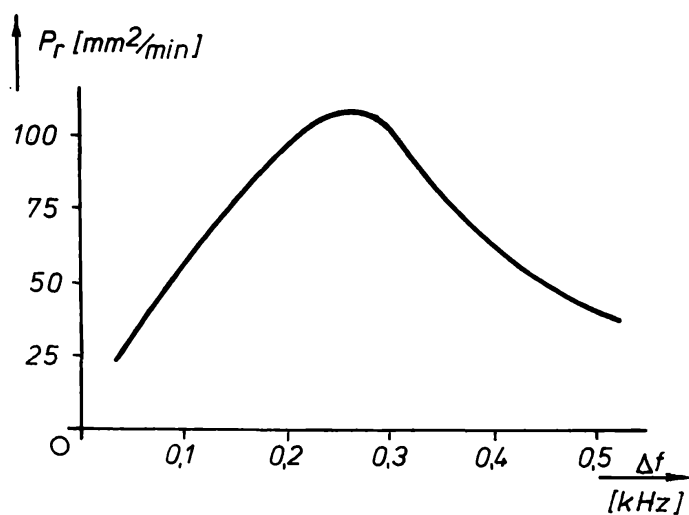


Fig. 2.15

Dependența productivității prelucrării funcție de diferența de frecvențe de vibrație în două puncte a electrodului filiform

$P_r$  - productivitatea prelucrării

$\Delta f$  - diferența dintre frecvențele de vibrație a OT în două puncte

productivitate de aproape 130 mm<sup>2</sup>/min. Se observă că pentru valori mai mici de 0,2 kHz a diferențelor dintre frecvențele primare ale elementelor de ghidare se obține o reducere mai accentuată a productivității prelucrării, pe când la valori mai mari de 0,3 kHz productivitatea prelucrării tinde să se stabilizeze la 30...35 mm<sup>2</sup>/min.

### CAPITOLUL 3. BAZE FIZICO-CHIMICE, TEHNOLOGICE SI FENOMENOLOGICE ALE PRELUCRARIII PRIN ELECTROEROZIUNE IN CAMP ULTRASONIC

#### 3.1 CONSIDERATII TEORETICE PRIVIND TRANSMITEREA UNDELOR ULTRASONICE PRINTR-UN MEDIU MATERIAL OARECARE

Se consideră un sistem material oarecare (dispozitiv, mașină unealtă, concentrator adaptor de undă etc.) aflat în stare de repaus (poziție de repaus) sau în mișcare (mișcare permanentă), numite și stări de referință. În unele situații sistemul material poate executa mișcări în raport cu aceste stări de referință ce se pot studia cu un număr determinat de parametri. Aceste mișcări sunt vibrații (oscilații) dacă parametri ce descriu mișcarea variază alternativ în timp în jurul valorilor corespunzătoare stărilor de referință.

Oscilațiile sau vibrațiile reprezintă deci variații periodice de stare ale mediului. Pentru propagarea vibrațiilor elastice este necesară prin urmare prezența unui sistem material - numit sistem acustic rezonant -, adică prezența legăturilor elastice între particolele materiei. La trecerea undei prin sistem, particolele se abat într-un anumit mod de la starea de referință. Dacă una din particole este abătută de la starea de referință, atunci acțiunea forțelor elastice datorată celorlalte particole tinde să-o readucă în poziția inițială. Prezența forțelor elastice conduce la faptul că porțiunile vecine se manifestă ca fiind scoase din starea de referință (poziția de repaus sau de mișcare), iar prezența forțelor de inerție este cauza faptului că particolele continuă să oscileze în jurul unei poziții medii și după trecerea undei.

Pe de altă parte, particolele mediului prin care se propagă ultrasunetele sunt puse într-o mișcare de vibrație, situație în care apar forțe elastice care variază în decursul fiecărei perioade a vibrațiilor. După V.A.Kazanțev și L.D.Rosenberg [43], viteza particolelor care se deplasează determină energia cinetică a fluxului de particole, pe când forțele de interacțiune ale particolelor determină energia potențială. În acustică [4,10,14,15,16], suma acestor două energii poartă denumirea de energie sonoră sau acustică.

Energia acustică, care se propagă de la sursa de ultrasunete (sunete), se atenuază pe măsura înaintării ei în mediu [17,25].

Intensitatea ultrasunetului este caracterizată drept cantitatea de energie transportată de unda ultrasonoră în unitatea de timp, pe direcția de

propagare a acestuia perpendicular pe unitatea de suprafață. Conform acestei definiții, intensitatea ultrasunetului este dată de [25,101,102]:

$$I_{us} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{us} \cdot \mu dt \quad (3.1)$$

unde:

T - perioada de vibrație;

$p_{us}$  - valoarea instantanee a presiunii ultrasonore;

$\mu$  - valoarea instantanee a componentei vectorului de vibrație,

care este perpendicular pe unitatea de suprafață.

Undele ultrasonore care trec printr-un mediu sunt supuse unei absorbții condiționate de vâscozitate (forțele de frecare internă), conductibilitatea termică și absorbția mediului. Absorbția vibrațiilor elastice în diferite materiale, care se intensifică considerabil atunci când mărimea particulelor mediului devine comparabilă cu lungimea de undă a ultrasunetelor, este dată de expresia:

$$\xi_x = \xi_0 \cdot e^{-ax} \quad (3.2)$$

unde:

$\xi_x$  - amplitudinea de vibrație la distanța x de sursă;

$\xi_0$  - amplitudinea de vibrație în punctul x = 0;

a - coeficient de absorbție.

Atunci când undele se propagă printr-un mediu material, ele suferă reflexii, refracții, difracții, interferențe și alte fenomene caracteristice pentru mișcarea ondulatorie.

Undele acustice pot fi de diferite tipuri în raport cu traiectoria pe care o pot avea particulele sistemului material și cu natura și dimensiunea corpului prin care se propagă undele. În cazul în care traiectoria este liniară și deplasarea particulelor se produce în direcția propagării undelor, acestea se numesc **longitudinale**. Asemenea unde se pot propaga prin orice mediu elastic, fie el gazos, lichid sau solid și poartă cu sine o anumită energie pe direcția de deplasare. Mai pot fi întâlnite și alte tipuri de unde - cvasilongitudinale, transversale, de încovoiere, de suprafață, de torsiune, de placă simetrice sau

asimetrice etc. - dar importante pentru studiul fenomenelor datorate influenței ultrasunetelor asupra prelucrării prin electroeroziune cu electrod filiform, sunt cele longitudinale.

Fie un mediu elastic reprezentat printr-o bară rectilinie de secțiune constantă  $S$ . Prin deformarea de tip longitudinal, secțiunile normale axei longitudinale (direcția  $x$ ) se deplasează paralel cu ele însele - fig.3.1 -.

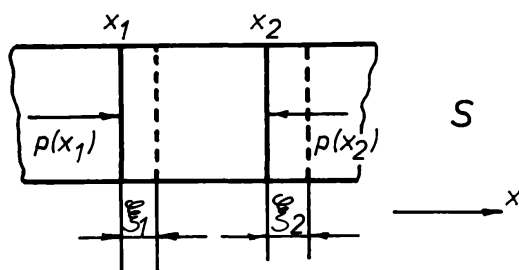


Fig. 3.1

Deformarea de tip longitudinal a unei bare rectilinii de secțiune constantă  
 $x_1, x_2$  - pozițiile succesive ale secțiunii  $S$  la diferite momente  $t$   
 $p(x_1), p(x_2)$  - efortul corespunzător pozițiilor  $x_1$  și  $x_2$   
 $\xi_1, \xi_2$  - amplitudinea de vibrație corespunzătoare pozițiilor  $x_1$  și  $x_2$   
 $x$  - abscisa sistemului de coordonate

Astfel, secțiunea care la momentul  $t = 0$  ocupă poziția  $x_1$ , trece în poziția  $x_1 + \xi_1$  la momentul  $t$ . Poziția instantanee a unei secțiuni este caracterizată de funcția complexă  $\xi(x, t)$  care reprezintă deplasarea secțiunii de abscisă  $x$  la momentul  $t$ .

Forțele de legătură de tip elastic derivă din

legea lui Hooke conform căreia forța de legătură este proporțională cu deformarea datorată modificării pozițiilor relative a două secțiuni [13,91], adică:

$$p = -E \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (3.3)$$

unde:

$p$  - efort unitar;

$E$  - modul de elasticitate (modulul lui Young).

Efortul  $p$ , considerat ca forță de compresiune, reprezintă forța pe unitatea de suprafață cu care mediul, adică restul barei, acționează asupra unei porțiuni de bară. Forța de restabilire unitară cu care bara acționează asupra exteriorului este egală și de semn contrar cu efortul unitar.

Ecuția undelor longitudinale în bare de secțiune constantă se obține

scriind legea lui Newton pentru o porțiune de bară de grosime  $dx$  și de masă specifică  $\rho$  în ipoteza că funcția  $\xi(x,t)$  este suficient de netedă:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \cdot dx = p(x) - p(x+dx) = -E \left[ \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_x - \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_{x+dx} \right] \quad (3.4)$$

care devine:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (3.5)$$

unde:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{- reprezintă viteza de propagare a undei longitudinale}$$

într-un mediu liniar, izotrop, omogen și conservativ.

Ecuatia (3.5) reprezintă ecuația de mișcare a barei în absența pierderilor (disipației) și a forțelor distribuite imprimare, care mai poartă denumirea și de ecuația de propagare a undelor. Soluțiile acestei ecuații se obțin sub formă concretă numai prin precizarea condițiilor la limită. Astfel, în [115] se caută soluții prin metoda separării variabilelor punând:

$$\xi(x, t) = K \cdot X(x) \cdot e^{st} \quad \text{și} \quad s = \alpha + j\omega \quad (3.6)$$

unde:

$s$  - număr complex;

$X(x)$  - amplitudinea de vibrație.

Deasemenea, în [2] soluția ecuației (3.5) este de forma:

$$\xi(x, t) = \phi_1(x-ct) + \phi_2(x+ct) \quad (3.7)$$

unde:

$\phi_1, \phi_2$  - sunt funcții arbitrare.

În cazul barelor cu secțiune variabilă și masa distribuită în lungul

lor, forțele de inerție provoacă în timpul vibrației o anumită distribuție a deplasărilor și a tensiunilor mecanice în funcție de timp  $t$  și coordonată  $x$ . Ecuația generală care caracterizează propagarea undelor longitudinale în corpuri cu secțiune variabilă este dată de relația [16,46]:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\mu}{E} \cdot \frac{\partial^3 \xi}{\partial t \partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\mu}{E} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t \partial x} \right) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

unde:

$S$  - aria secțiunii transversale variabilă cu coordonata  $x$  după o anumită lege;

$\mu$  - coeficient de frecare internă.

În ipoteza că sistemul material - bara cu secțiune variabilă - este perfect elastic și nedisipativ ( $\mu = 0$ ) și oscilează după o anumită lege, ecuația diferențială care descrie legea de oscilație devine:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

În situația oscilațiilor armonice a barei cu secțiune variabilă [15,16,110] produse după o lege de forma:

$$\xi(x, t) = \xi(x) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.10)$$

ecuația (3.9) va fi descrisă de ecuația diferențială de ordinul doi numai în funcție de o coordonată:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2 \cdot (1 + j\eta)} \cdot \xi = 0 \quad (3.11)$$

unde:

$\omega = 2\pi f$  - pulsația oscilațiilor armonice;

$f$  - frecvența oscilațiilor (vibrațiilor);

$\eta = \mu \cdot \frac{\omega}{E}$  - coeficient de pierderi.



Pentru barele cu secțiune variabilă și masa distribuită, confecționate din oțel sau aliaje de aluminiu cu titan, caz frecvent întâlnit în construcția concentratoarelor adaptoare de undă [6,17,18,32,45], coeficientul de pierderi este  $\eta = (1,4 \dots 5,0) \cdot 10^{-4}$  și poate fi neglijat din calcule.

Notând cu:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{\lambda f} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{- număr de undă;}$$

unde:

$\lambda$  - lungimea de undă,

ecuația (3.11) devine:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \cdot \xi = 0 \quad (3.12)$$

Aplicând legea conservării impulsului și a masei în condițiile existenței mai multor ipoteze simplificatoare [17,18,90] - ipoteza secțiunii plane, lipsa oscilațiilor transversale parazite, oscilațiile sunt numai longitudinale și variază după o lege armonică, omogenitatea materialului etc. - ecuația generală (3.8) devine:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + k^2 \cdot v = 0 \quad (3.13)$$

unde:

$$v = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad \text{- viteza de oscilație a particulelor mediului.}$$

Prin urmare, teoria propagării undelor ultrasonore se bazează pe elasticitatea mediului prin care este transmisă energia. Caracterul esențial al sistemului acustic rezonant este că particulele mediului, fie solid, lichid sau gazos, sunt într-o stare de vibrație de o parte și de alta a unei poziții medii.

Ecuația de propagare a undelor în bare de secțiune variabilă (3.12) cunoscută în literatura de specialitate ca ecuația lui Webster [115] permite

determinarea în condiții inițiale date - profilul barei în lungul generatoarei, ipoteza de continuitate a planului de separație etc. - a parametrilor acustici pentru sisteme rezonante alcătuite din particole solide. Într-un cadru general, teoria **sonicității** elaborată de Gogu Constantinescu [21] extinde această proprietate a materiei și la medii lichide.

Astfel, se consideră **R**, **L**, **S** și **C** respectiv rezistența, inerția, perditanța și capacitatea pe unitatea de lungime a unei conducte lungi.

Rezistența (fricțiunea) într-un curent alternativ de lichid se datorește frecărilor cu suprafața internă a țevii precum și între particolele lichidului însuși. În ipoteza că diferența de presiune sau presiunea sonomotrice **h** este proporțională cu curentul **i**, aceasta se calculează cu relația:

$$h = R \cdot i \quad (3.14)$$

unde:

**R** - coeficient de fricțiune.

Inerția este o proprietate care depinde de masa în mișcare. Dacă se consideră un corp de masă **M** ținut în mișcare de o presiune care lucrează asupra unei suprafețe **ω** normală la direcția mișcării, atunci coeficientul de inerție se definește:

$$L = \frac{M}{\omega^2} = \frac{P}{g \cdot \omega^2} \quad (3.15)$$

unde:

$$P = M \cdot g$$

**g** - accelerația gravitațională.

**ω** coloană de lichid cu lungimea **l** are un coeficient de inerție:

$$L = \frac{\gamma \cdot l}{g \cdot \omega} \quad (3.16)$$

unde:

**γ** - greutatea specifică a lichidului.

Perditanța se referă la orice pierdere sau scurgere de lichid sau curent datorită presiunii și se determină din legea generală:

$$i = S \cdot h \quad (3.17)$$

unde:

$S$  - coeficient de perditanță,

$i$  - curent creat de mișcare,

$h$  - presiunea la un moment dat.

Coeficientul de capacitate este definit de relația:

$$C = \frac{\delta}{h} \quad (3.18)$$

unde:

$\delta$  - deplasament sau variația volumului de fluid deplasat în intervalul de timp  $t_1 - t_2$ ,

și

$$\delta = \int_{t_1}^{t_2} i dt$$

Într-o conductă de lungime  $dx$ , dacă  $d\bar{H}$  este presiunea care produce mișcarea masei lichide iar  $d\bar{I}$  reprezintă diferența curentului între extremitățile porțiunii  $dx$  - fig.3.2 -, atunci se pot scrie relațiile [21]:

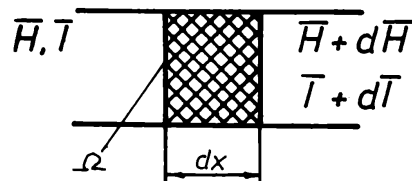


Fig. 3.2

Propagarea undelor într-o conductă de lungime  $dx$

$\bar{H}, \bar{I}$  - valorile vectoriale ale presiunii și curentului

$d\bar{H}$  - presiunea care produce mișcarea masei lichide

$d\bar{I}$  - diferența curentului între extremitățile porțiunii  $dx$

$\Omega$  - secțiunea conductei

$$d\bar{H} = \bar{I} \cdot R \cdot dx + j \cdot a \cdot \bar{I} \cdot L \cdot dx \quad (3.19.a)$$

$$d\bar{I} = \bar{H} \cdot S \cdot dx + j \cdot a \cdot \bar{H} \cdot C \cdot dx \quad (3.19.b)$$

sau:

$$\frac{d\bar{H}}{dx} = \bar{I} \cdot K + j \cdot a \cdot \bar{I} \cdot L \quad (3.20.a)$$

$$\frac{d\bar{I}}{dx} = \bar{H} \cdot S + j \cdot a \cdot \bar{H} \cdot C \quad (3.20.b)$$

unde:

$\bar{H}, \bar{I}$  - valorile vectoriale ale presiunii și curentului;

$a = 2\pi f$  - viteza unghiulară (pulsatia);

$j$  - simbol care indică că vectorul  $\bar{H}$  este cu  $\pi/2$  în urma vectorului  $\bar{I}$  ( $j^2 = -1$ ).

Considerând:

$$\bar{L} = L - j \cdot \frac{R}{a} \quad \text{și} \quad \bar{C} = C - j \cdot \frac{R}{a},$$

ecuațiile (3.20.a) și (3.20.b) devin:

$$\frac{d\bar{H}}{dx} = j \cdot a \cdot \bar{L} \cdot \bar{I} \quad (3.21.a)$$

$$\frac{d\bar{I}}{dx} = j \cdot a \cdot \bar{C} \cdot \bar{H} \quad (3.21.b)$$

În cazul unei conducte cu secțiune variabilă, cantitățile  $\bar{L}$  și  $\bar{C}$  sunt funcții de secțiunea conductei și nu mai sunt independente față de coordonata  $x$ . Prin diferențierea ecuațiilor (3.21.a) și (3.21.b) și considerând  $\bar{L}$  și  $\bar{C}$  variabile, se obține:

$$\frac{d^2\bar{H}}{dx^2} + a^2 \cdot \bar{C} \cdot \bar{L} \cdot \bar{H} - \frac{1}{\bar{L}} \cdot \frac{d\bar{L}}{dx} \cdot \frac{d\bar{H}}{dx} = 0 \quad (3.22)$$

Neglijând pierderile datorate frecțiunii și perditanței și notând cu:

$$\mu = a \cdot \sqrt{C \cdot L},$$

ecuația (3.22) devine:

$$\frac{d^2 \bar{H}}{dx^2} + \mu^2 \cdot H - \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dx} \cdot \frac{d\bar{H}}{dx} = 0 \quad (3.23)$$

Dar:

$$L = \frac{\gamma}{g \cdot \Omega} \quad (3.24)$$

unde:

$\Omega$  - secțiunea conductei, și

$$\frac{dL}{dx} = -\frac{\gamma}{g \cdot \Omega^2} \cdot \frac{d\Omega}{dx} \quad (3.25)$$

astfel că:

$$\frac{dL}{dx} \cdot \frac{1}{L} = -\frac{1}{\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dx} \quad (3.26)$$

Introducând relația (3.26) în ecuația (3.23), se obține:

$$\frac{d^2 \bar{H}}{dx^2} + \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dx} \cdot \frac{d\bar{H}}{dx} + \mu^2 \cdot H = 0 \quad (3.27)$$

care reprezintă ecuația de propagare a undelor într-un mediu lichid aflat într-o conductă cu secțiunea variabilă. Identitatea acestei ecuații cu relația (3.12) este evidentă.

În mod analog, C fiind proporțional cu  $\Omega$ , se obține:

$$\frac{d^2\bar{T}}{dx^2} + \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dx} \cdot \frac{d\bar{T}}{dx} + \mu^2 \cdot \bar{T} = 0 \quad (3.28)$$

care reprezintă ecuația curentului (vitezei) într-o conductă cu secțiunea variabilă și care este sinonimă cu (3.13).

Fără a detalia calculul de dimensionare a conductelor, acesta fiind similar barelor cu secțiune circulară constantă sau variabilă, se apreciază concordanța ecuațiilor de propagare a undelor elastice în mediu solid cu cele din mediul lichid.

### 3.2 STUDIUL MODURILOR DE VIBRAȚIE A CONCENTRATOARELOR ADAPTOARE DE UNDA ÎN OSCILAȚII LONGITUDINALE

Sunetele sunt definite [13,39] ca fiind oscilații elastice de frecvență joasă, cuprinsă în general între 20 și 20000 oscilații/secundă. Când frecvența oscilațiilor particulelor mediului se află între aceste limite, atunci undele elastice sunt percepute de om. Dacă frecvența oscilațiilor particulelor depășește pragul superior, atunci aceste oscilații se numesc ultrasunete sau ultrasonore.

Limita superioară de frecvență a vibrațiilor ultrasonice este de aproximativ  $10^{10}$  oscilații/secundă [25,109,115], frecvență ce corespunde oscilațiilor termice ale moleculelor în corpurile solide. Oscilațiile care au componente spectrale de frecvență mai mică de 20 Hz se numesc infrasunete, iar cele care au componente spectrale mai mari de  $10^{10}$  Hz constituie hipersunete [115]. O clasificare și delimitare a domeniilor enumerate pe surse și aplicații tehnice este prezentată în tabelul 3.1.

În general, oscilația (vibrația) este reprezentată printr-o funcție de timp de forma  $y = y(t)$  și descrie modul în care o mărime fizică - deplasare, presiune etc. - se modifică în decursul timpului. La timpul fixat  $t = t_0$ , funcția  $y(t_0)$  reprezintă starea de oscilație la momentul  $t_0$ . În descrierea matematică a oscilației spațiul nu apare. Din această cauză, legătura oscilație-timp-spațiu este realizată printr-o undă care din punct de vedere fizic reprezintă transportul în spațiu al stării de oscilație.

În cazul undelor ultrasonore, oscilațiile sunt produse de un echipament specific determinat de aplicația tehnologică. În general, un astfel de echipament - fig.1.15 - cuprinde generatorul de semnal de înaltă frecvență

TABELUL 3.1

Nr. crt.	Frecvența [Hz]	Denumire	Surse	Aplicații
0	1	2	3	4
1.	0,5 - 20	Infrasunet	Oscilațiile apei în incinte mari, bățile inimii	Observații meteorologice, cercetări cardiologice, seismologice
2.	20 - 2.10 <sup>4</sup>	Sunet	Voce, muzică, mediul înconjurător	Comunicații, semnalizări
3.	2.10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	Ultrasunet	Vibratoare magneto-strictive, piezoelectrice, sirene ultrasonore, semnale emise de unele animale	Hidrolocație, detectoscopie ultrasonoră, prelucrări speciale, fizica moleculară
4.	10 <sup>11</sup>	Hipersunet	Oscilațiile termice ale moleculelor	Microfizica

(ultrasunete) GUS, transductorul T care transformă energia electrică furnizată de GUS în energie mecanică (vibrații, oscilații) pe care o transferă concentratorului adaptor de undă sau difuzorului CAU(D), și dacă este cazul, obiectul prelucrării /scula) OP/OP.

CAU(D) asigură continuitatea între T și suprafețele de legătură care în unele cazuri pot fi chiar suprafețe de lucru sau obiectul prelucrării (scula) OT, adaptează energia la intensitățile și amplitudinile necesare procesului tehnologic și mențin stabilitatea sistemului oscilant la sarcini statice sau dinamice în condițiile unor pierderi minime de energie și a unei rezistențe mari la oboseală.

Din considerente energetice și de stabilitate dinamică, sistemul de fixare mecanică cu izolare acustică a CAU(D) se montează într-un nod de oscilație - fig.1.15.b -.

Cuplajul mecano-acustic CA și obiectul de transfer sau scula OT(S) realizează legătura între CAU(D) și suprafețele de lucru, furnizând deci amplitudinea necesară procesului tehnologic  $\xi_s$  - fig-1.15.b - în condițiile unor pierderi minime de energie precum și a unei rezistențe la uzură și la oboseală cât mai bune. Din acest motiv, fiecare element se dimensionează pe principiul frecvenței de rezonanță [15,109,111,115], caz în care lungimea trebuie să fie multiplu de jumătăți de lungime de undă  $\lambda/2$ .

În general, un element de lungime l având n = 1, 2, 3 moduri de oscilație [111,115] poate fi fixat în trei moduri: rigid la ambele capete, liber la

ambele capete, liber la un capăt și rigid la celălalt capăt.

În cazul elementelor - convertor electroacustic CE sau subansamble în acesta: T, CAU(D), OT(S) - rigide sau libere la ambele capete, indiferent de numărul de oscilație  $n$ , lungimea  $l$  cuprinde jumătăți de lungimi de undă:

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.29)$$

unde:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad - \text{lungimea de undă, și}$$

$$f = \frac{n \cdot c}{2l} \quad - \text{frecvența oscilațiilor.}$$

Pentru elementul rigid la ambele capete, expresia modului de vibrație de ordinul  $n$  pentru viteză este dată de relația:

$$v_n(x, t) = \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{l} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot c}{l} \cdot t + \phi_n\right) \quad (3.30)$$

unde:

$\phi_n$  - potențialul scalar al câmpului acustic corespunzător  
modului de oscilație de ordinul  $n$ ;

Modul de oscilație de ordinul  $n$  pentru viteză corespunzător unui element liber la ambele capete se determină cu relația:

$$v_n(x, t) = \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{l} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot c}{l} \cdot t + \phi_n\right) \quad (3.31)$$

În cazul elementului liber la un capăt și rigid la celălalt capăt, lungimea  $l$  cuprinde un număr impar de sferturi de lungime de undă:

$$l = (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (3.32)$$

unde:



$$\lambda = \frac{c}{f}$$

și

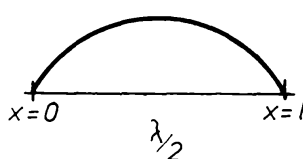
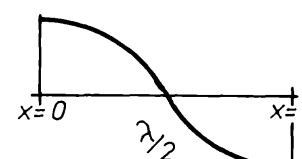
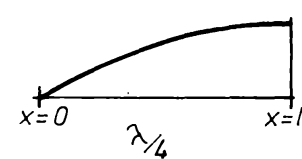
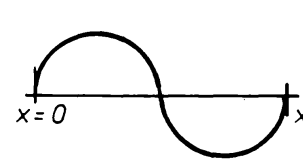
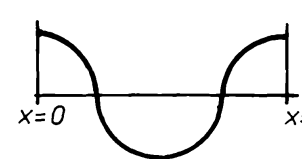
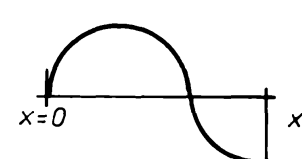
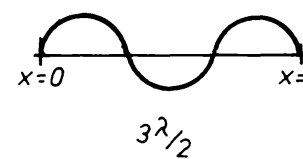
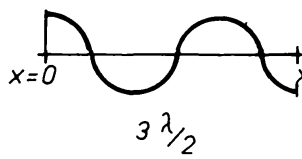
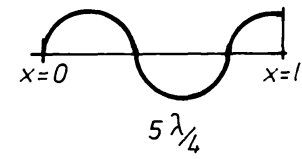
$$f = \frac{(2n-1) \cdot c}{4l}$$

Modul  $n$  de oscilație este caracterizat prin viteză nulă în punctul  $x = 0$  și viteză maximă în punctul  $x = l$ . Expresia sa este dată de :

$$v_n(x, t) = \sin\left(\frac{2n-1}{2l} \cdot \pi \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{2n-1}{2l} \cdot \pi \cdot c \cdot t + \phi_n\right) \quad (3.33)$$

Reprezentarea modurilor de oscilație - adică a distribuției vitezelor instantanee - este dată în tabelul 3.2.

TABELUL 3.2

Mod	Bara fixată la $x=0$ și $x=l$	Bara liberă la $x=0$ și $x=l$	Bara fixată la $x=0$ și liberă la $x=l$
$n=1$			
$n=2$			
$n=3$			

În toate cele trei cazuri [115] frecvențele proprii sunt în rapoarte întregi, adică  $f_n/f_1 \in \mathbf{N}$ , respectiv sunt în rapoarte armonice, iar modurile de

oscilație reprezintă unde staționare rezultând din suprapunerea undelor progresive.

Practic, CAU(D) cu nod sau maxim de oscilație la capete se utilizează în moduri de oscilație impare, adică acelea în care mijlocul barei - de secțiune constantă sau variabilă - reprezintă un nod de oscilație și ca atare sistemul poate fi fixat la mijloc fără a perturba modul de oscilație. În situația în care o bară liberă la ambele capete este activată la un mod impar de un generator de semnal de înaltă frecvență având mai multe componente armonice, atunci modurile de vibrație pare nu sunt excitate deoarece acestea au mijlocul barei ca punct de oscilație maximă.

### 3.3 STUDIUL PARAMETRILOR CARACTERISTICI PRINCIPALI AI IMPULSURILOR DE TENSIUNE SI VIBRAȚIILOR ELASTICE

Dozarea în impuls a energiei la prelucrarea prin electroeroziune determină individualizarea actelor elementare de eroziune, caracterizate de totalitatea fenomenelor care au loc în timpul acțiunii impulsului, considerat singular. Parametri caracteristici principali ai impulsurilor de tensiune - fig.3.3 - sunt [49,80,89,90,124]:

-tensiunea de mers în gol  $U_0$ , aplicată în spațiul de lucru de către generatorul de impulsuri;

- durata impulsului  $t_1$ , reprezentând timpul în care este aplicată tensiunea electrică între OT și OP;

- timpul de pauză  $t_p$ , reprezentând timpul scurs între două impulsuri succesive de tensiune;

- perioada impulsurilor  $T$ , reprezentând timpul scurs de la aplicarea unui impuls de tensiune până la aplicarea impulsului următor:

$$T = t_1 + t_p = \frac{1}{f_1} \quad (3.34)$$

unde:

$f_1$  - frecvența impulsurilor de tensiune;

- factorul de umplere  $K$ , reprezentând raportul dintre durata și perioada impulsului:

$$K = \frac{t_1}{T} \cdot 100 \quad (3.35)$$

- tensiunea medie  $U_m$  - tensiunea de lucru - reprezentând valoarea medie a

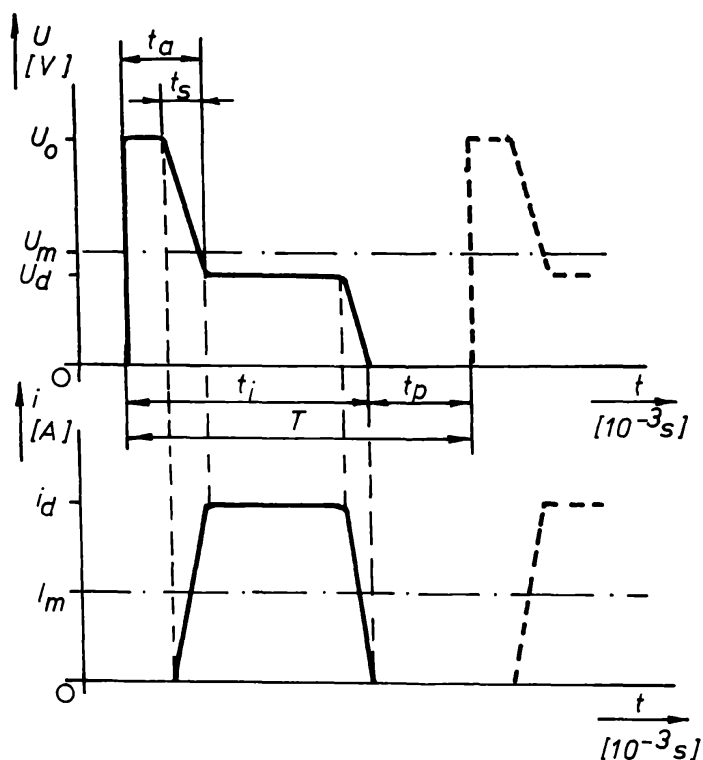


Fig. 3.3

Parametri caracteristici principali ai impulsurilor de tensiune

$U_0$  - tensiunea de mers în gol

$U_m$  - tensiunea medie

$U_d$  - tensiunea descărcării electrice în impuls

$t_i$  - durata impulsului

$t_p$  - timp de pauză

$T$  - perioada impulsurilor

$I_m$  - curentul mediu

$i_d$  - curentul de descărcare în impuls

tensiunii determinată în funcție de perioada și de variația tensiunii  $u(t)$  în acest interval de timp:

$$U_m = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3.36)$$

- curentul mediu  $I_m$ , definit de intensitatea medie a curentului prin spațiul de lucru:

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (3.37)$$

În ceea ce privește parametri caracteristici principali ai vibrațiilor elastice cu frecvență ultrasonică, acestea sunt legate de proprietățile

fizice ale mediului prin care se propagă (v. subcap.3.1 și subcap.3.2).

Propagarea undelor într-un mediu oarecare - fig.3.4 - se face printr-o succesiune de comprimări și destinderi având amplitudini egale. Viteza de propagare a vibrațiilor elastice este dată de relația [13,115]:

$$c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} \quad (3.38)$$

unde:

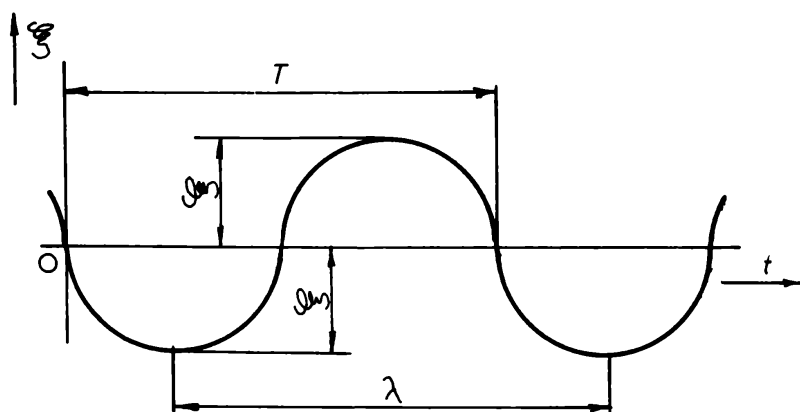
$\lambda$  - lungimea de undă;

$f$  - frecvența oscilației;

$T$  - perioada oscilației,

și este diferită pentru diverse medii în care se propagă:

- în corpuri  
solide:



$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.39)$$

- în lichide:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta}} \quad (3.40)$$

- în gaze:

$$c = \sqrt{\frac{\chi \cdot p}{\rho}} \quad (3.41)$$

- unde:

- E - modul de elasticitate (modulul lui Young);
- $\rho$  - densitatea mediului;
- $\beta$  - compresibilitatea la temperatură constantă;
- $\chi$  - raportul căldurilor specifice la presiune constantă,  
respectiv la volum constant;
- p - presiunea.

Viteza undelor longitudinale și transversale definită la subcap.3.1 se găsește în următorul raport [13,50]:

$$\frac{c_l}{c_{tr}} \approx \sqrt{3} \quad (3.42)$$

unde:

- $c_l$  - viteza undelor longitudinale;
- $c_{tr}$  - viteza undelor transversale.

La propagarea unei unde elastice nu are loc o transmisie de substanță întrucât poziția de echilibru în jurul căreia se efectuează oscilația particulelor mediului nu se deplasează.

### 3.4 STUDIUL PROCESELOR CE AU LOC IN INTERSTITIUL TEHNOLOGIC LA PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE IN CAMP ULTRASONIC

In interstițiul tehnologic, în timpul unui act de eroziune elementară la activarea cu ultrasunete a prelucrării prin electroeroziune, se desfășoară următoarele procese principale: amorsarea descărcării electrice, evoluția ei în timpul de impuls, efecte fizico-chimice în mediul de lucru și prelevarea de material din electrozi în câmp ultrasonic.

#### 3.4.1 Amorsarea descărcării electrice în câmp ultrasonic

Prin amorsare a descărcării electrice se înțelege [11,44,50,60,90] totalitatea fenomenelor care au loc în perioada pregătirii și formării în lichidul dielectric a canalului gazos, ionizat, conducător de curent.

Timpul scurs din momentul aplicării impulsului de tensiune pe spațiul de lucru până la străpungerea electrică a interstițiului, numit timp de amorsare  $t_a$  - fig.3.3 -, este constituit din două componente:

- timpul de întârziere, care reprezintă o perioadă cu caracter aleator de pregătire a condițiilor străpungerii;

- timpul de străpungere  $t_p$ , necesar formării efective a coloanei de plasmă a descărcării; în acest timp, intensitatea curentului electric crește de la zero la valoarea quasistacionară  $I_a$ , iar tensiunea scade de la cea de mers în gol  $U_0$ , la o valoare  $U_a$  practic constantă.

În cazul unui lichid dielectric pur, străpungerea acestuia este posibilă numai prin emisiune autoelectrică la nivelul catodului [49,53,75]. Electronii emiși sunt dirijați de câmpul electrostatic în direcția anodului - fig.3.5 - dar parcursul liber mijlociu în mediul lichid nu permite obținerea unor energii cinetice care să depășească valoarea critică necesară ionizării colizionale a moleculelor de lichid. Ciocnirile frecvente cu aceste molecule ridică însă temperatura lichidului, putându-se ajunge la transformări locale de stare. În acest mod se constituie microincinte gazoase în care parcursul liber mijlociu mai mare permite apariția fenomenelor de ionizare cu dezvoltarea unei avalanșe de electroni într-un canal îngust de gaz. Frontul de sarcini negative determină o sporire a intensității câmpului electric pe lungimea canalului descărcării rămasă nestrăpunsă  $l_m$ . Drept urmare, procesul se desfășoară accelerat până când canalul filiform gazos atinge anodul și interstițiul se consideră străpuns.

Practic însă, dielectricele sunt impuri. Mecanismul străpunerii acestora este asemănător cazului descris anterior în condițiile fragmentării

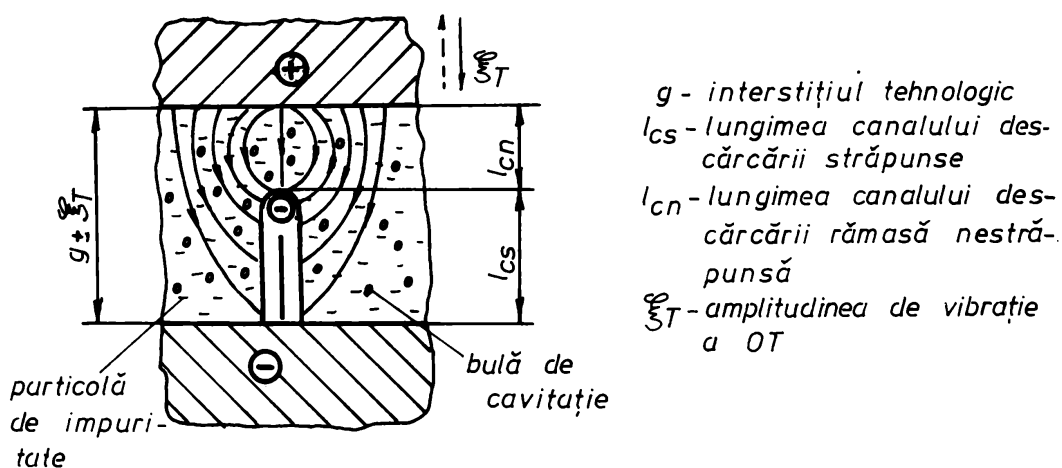


Fig. 3.5

Schema amorsării descărcării electrice

spațiului disruptiv de către particolele de impurități care se comportă ca niște lanțuri de capacități orientate de-a lungul liniilor de câmp electric. Microcapacitățile sunt străpunse în lanț și în final are loc străpungerea lichidului dielectric. Fenomenul de străpungere este mai probabil acolo unde gradul de impurificare  $K_1$  este mai mare [11,44,90]. Acesta se definește prin schimbarea densității lichidului dielectric și se calculează cu relația:

$$K_1 = \frac{\rho_i - \rho_o}{\rho_o} \cdot 100 \quad (3.43)$$

unde:

$\rho_i$  - densitatea lichidului impurificat,

$\rho_o$  - densitatea lichidului pur.

Pe de altă parte, sub acțiunea undelor ultrasonice, în lichidul dielectric aflat în interstițiul tehnologic are loc fenomenul de cavitație acustică. Bulele de cavitație își măresc volumul [4,33,59,84] prin umplere cu aerul sau vaporii rezultați prin evaporare care se găseau în locul respectiv în momentul formării lor, până la o anumită mărime care, la o anumită presiune, depinde de durata dezvoltării și frecvența ultrasunetelor. În faza imediat următoare se produce comprimarea bruscă și distrugerea rapidă a bulei de cavitație.

Acest mecanism este însă un proces violent [33,64,65,100], în

decursul căruia apar presiuni și temperaturi ridicate, degajări de substanțe chimice, fenomene electrice și electrochimice. În momentul imploziei bulelor cavitaționale se constată o creștere substanțială a temperaturii, ajungându-se până la valori de  $10^4$  °K, identificându-se după O.M. Popoviciu două mecanisme:

- prin comprimarea gazelor conținute în bula cavitațională, se ajunge la presiuni de implozie de ordinul  $10^6$  bar care sunt însoțite de o creștere concomitentă a temperaturii;

- prin transformarea în căldură a lucrului mecanic - circa 85 % - rezultat în urma imploziei.

În același timp, între pereții bulei apare o diferență de potențial [100] generată de faptul că ionii aflați în stratul lichid unde se produce ruperea sunt dirijați în funcție de sarcina electrică către două fețe opuse bulei, astfel încât aceasta poate fi considerată un condensator. Intensitatea câmpului electric în acest caz este după V.I. Skorobogatov [112]:

$$E = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \sqrt{\frac{\delta \cdot N}{S}} \quad (3.44)$$

unde:

$\delta$  - diametrul bulei;

$N$  - numărul de molecule dissociate în unitatea de volum;

$\epsilon$  - sarcina ionului monovalent;

$S$  - suprafața secțiunii bulei.

Pe baza acestor considerente, se concepe următorul parcurs fenomenologic:

a) în cazul lichidului dielectric pur

Fenomenul de cavitație datorat energiei ultrasunetelor și inițiat în lichidul dielectric aflat în interstițiul tehnologic  $g$  și  $\xi_r$  - fig.3.5 - conduce, pe de o parte, la stimularea ciocnirilor între moleculele lichidului dielectric [100], iar pe de altă parte, la creșterea locală a temperaturii [48], având ca efect apariția mai rapidă a microincintelor gazoase ca urmare a intensificării transformărilor locale de strare. Câmpul electric cavitațional - relația (3.44) - determină o sporire a intensității câmpului electric corespunzător descărcării în impuls între OT și OP atât pe lungimea canalului descărcării străpunsă  $l_{\text{str}}$ , cât și mai ales pe lungimea canalului descărcării rămasă nestrăpunsă  $l_{\text{nr}}$ .

Prin urmare, energia ultrasonică transmisă mediului dielectric [53] determină accelerarea proceselor de formare a canalului filiform ionizat care atinge anodul, și în consecință se scurtează timpul aleator de străpungere a

dielectricului.

b) In cazul lichidului dielectric impur

In această situație, impuritățile din mediul lichid constituie germeni de inițiere a fenomenului de cavitație datorat energiei ultrasunetelor. Ca atare, rezistivitatea electrică mai mică a impurităților ușurează apariția fazei gazoase [53], iar prin destinderea undei ultraacustice se formează un număr foarte mare de bule minuscule de cavitație care, ținând seama de mecanismul descris la pct. a), scurtează considerabil timpul aleator de pregătire a descărcării.

### 3.4.2 Evoluția descărcării electrice în câmp ultrasonic

Coloana descărcării are inițial o secțiune transversală foarte mică, ceea ce conduce la o densitate de curent extrem de mare. Curentul electric de intensitate  $i$  [23, 24, 90] este compus în orice secțiune a coloanei descărcării dintr-o componentă negativă  $i_{(-)}$  și una pozitivă  $i_{(+)}$ , care au valori diferite de-a lungul grosimii  $g$  a interstițiului tehnologic, conform densității și vitezei de deplasare a purtătorilor de sarcină. Drept consecință, apar în interstițiul  $g$  sarcini electrice

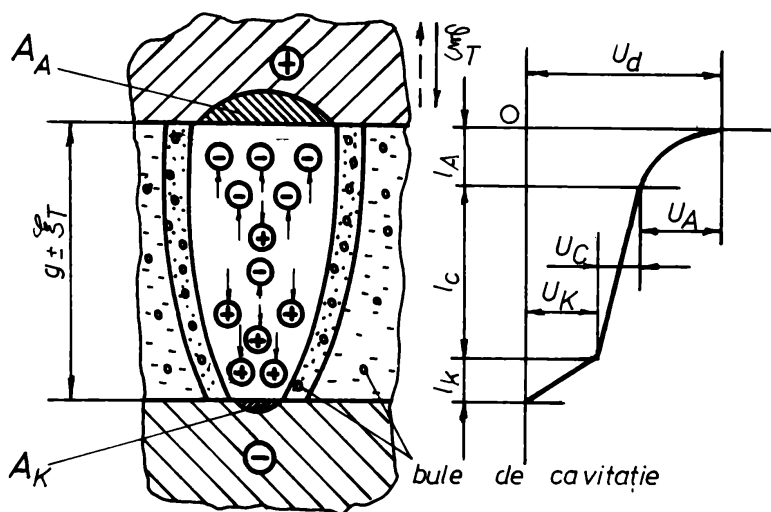


Fig. 36

Apariția sarcinilor electrice spațiale în interstițiul tehnologic

$A_A, A_K$  - pete electrodice anodice, respectiv catodice

$g$  - interstițiul tehnologic dintre OT și OP fără US

$U_d$  - tensiunea descărcării electrice

$U_A, U_C, I_A, I_C$  - căderile de tensiune anodice, respectiv catodice corespunzătoare lungimilor zonelor anodice, respectiv catodice

$U_K, I_K$  - căderea de tensiune corespunzătoare lungimii coloanei descărcării

$\xi_T$  - amplitudinea de vibrație a OT



spațiale pozitive și negative - fig.3.6 - care determină o repartizare neuniformă a tensiunii  $U_a$ , identificându-se o cădere de tensiune catodică  $U_c$  pe lungimea  $l_c$  a zonei catodice, o cădere de tensiune  $U_c$  pe lungimea  $l_c$  a coloanei și o cădere de tensiune anodică  $U_a$  pe lungimea  $l_a$  a zonei anodice.

Energia cinetică primită de purtătorii de sarcină pozitivi și negativi este cedată prin impact la suprafața celor doi electrozi unde se transformă în principal în energie termică. Apar petele electrodice  $A_c$  și  $A_a$  ca niște surse termice cu temperatură ridicată capabile să declanșeze efectul eroziv la suprafețele OP și OT.

În același timp, densitatea de curent prin canalul descărcării provoacă în faza străpungerii presiuni locale foarte mari. Acestea dau naștere unei unde de șoc care se propagă radial. Inițial, marginile canalului gazos I al

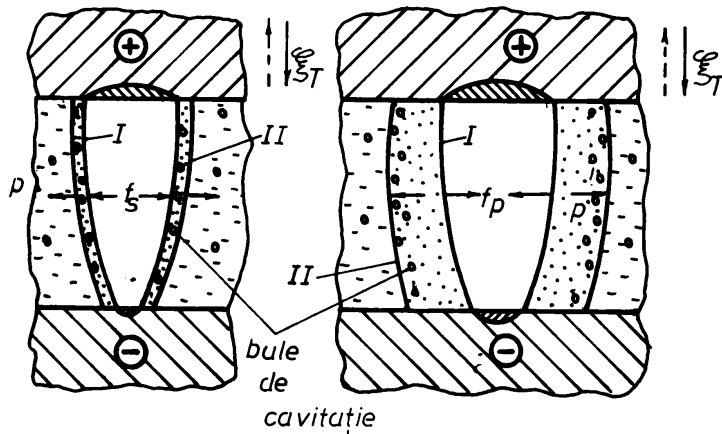


Fig. 3.7

*Evoluția descărcării electrice*

$f_s, f_p$  - forțe electrodinamice date de efectul Skin, respectiv Pinch

I - marginile canalului gazos

II - frontul undei de presiune

$\xi_T$  - amplitudinea de vibrație a OT

coloanei ionizate și frontul undei de presiune II coincid - fig.3.7 a -, apoi frontul undei de presiune II se separă avansând în mediul dielectric, după care începe să se dilate și coloana descărcării electrice I - fig.3.7 b -.

Separarea coloanei de plasmă de peretele canalului de gaz este favorizată de forțele cu care acționează câmpul magnetic propriu asupra liniilor de curent, res-

pectiv asupra traiectoriilor reale ale purtătorilor de sarcini.

La începutul descărcării, atunci când are loc o variație a curentului electric ( $di/dt > 0$ ), acționează divergent după P.J.Van Dijk [23] forțe electrodinamice  $f_s$  date de efectul Skin - fig.3.7 a - care mențin coloana descărcării în apropierea peretelui canalului. În momentul în care curentul se stabilizează ( $di/dt = 0$ ), forțele electrodinamice  $f_p$  date de efectul Pinch - fig.3.7 b - acționează constricțional și coloana de plasmă se separă de frontul gazos.

În această etapă, influența ultrasunetelor asupra evoluției descărcării electrice în impuls se manifestă prin fenomenele termice și electrice descrise la

paragraful 3.4.1, la care se adaugă o serie de fenomene mecanice.

Cercetările experimentale întreprinse [100] au evidențiat în timpul imploziei bulelor cavitaționale eforturi specifice deosebit de mari care pot fi divizate în două grupe:

- procesul imploziei are loc astfel încât în fazele finale presiunile în zonele adiacente bulei cavitaționale devin atât de mari încât se depășește limita de rupere a tuturor materialelor cunoscute;

- restrângerea volumului se face de așa manieră încât în interiorul bulelor se formează unul sau mai multe jeturi care în urma șocurilor cu suprafața unor corpuri solide, pot crea presiuni ce depășesc limita de rupere a acestora.

Față de aceste considerații, se dezvoltă mecanismul propus la paragraful 3.4.1 în felul următor:

a) Presiunea realizată în timp scurt în faza de străpungere a lichidului dielectric, dă naștere unei unde de șoc care se suprapune peste implozia bulelor de gaz datorate efectului de cavitație. Drept urmare, este sporită intensitatea presiunii instantanee, ajungând de câteva ori mai mare decât cea inițială [23,53,54,85], fapt ce conduce la separarea mai rapidă a coloanei de plasmă de peretele canalului de gaz. Totodată, descărcările electrice suplimentare inițiate în bulele de cavitație [100] accentuează valoarea câmpului magnetic propriu asupra liniilor de curent și a purtătorilor de sarcini, contribuind la coincidența coloanei ionizate cu frontul undei de presiune.

Cu alte cuvinte, fenomenele electrice și mecanice ce apar în interstițiul tehnologic în lichidul dielectric datorită cavitației în timpul evoluției descărcării electrice în impuls conduc la accentuarea efectelor Skin și Pinch [63,72].

b) Undele ultrasonice provoacă o dilatare continuă a mediului gazos și după încetarea descărcării electrice. Bulele de gaz se sparg prin implozie și se fragmentează și în timpul de pauză  $t_p$ , dar prin agitația mecanică locală produsă se contribuie rapid la delonizarea spațiului de lucru și refacerea rigidității sale dielectrice [11,72], pregătind condițiile pentru amorsarea unor noi descărcări electrice.

### 3.4.3 Prelevarea de material din piesă și uzarea sculei în câmp ultrasonic

În mecanismul prelevării de particole din OP și/sau OT intră un complex de fenomene interconectate [2,11,23,39,43,48,50,72], rolul esențial revenind după N.L.Mironoff efectului termic al descărcării electrice conjugat, după autor, cu eroziunea abrazivo-cavitațională datorată energiei ultrasunetelor. Pentru a realiza îndepărtarea de material, trebuie îndeplinite două condiții

esențiale:

- activarea energetică locală pentru slăbirea forțelor interatomice de legătură;

- expulzarea materialului activat sub acțiunea unor forțe care depășesc valoarea forțelor de coeziune.

#### 3.4.3.1 Activarea energetică locală

Cercetările experimentale întreprinse de N. L. Mironoff [48] confirmă faptul că particolele îndepărtate prin electroeroziune, având frecvent formă sferică, au suferit transformări de fază sub acțiunea energiei termice. Sursa de căldură care determină aceste transformări are caracter de sursă termică superficială, de scurtă durată și dimensiuni limitate la cele ale petelor electrodice, de la care prin proces nestaționar de termoconductibilitate, căldura se propagă spre interior. Sub acțiunea sursei termice de temperatură mai mare decât cea de vaporizare a materialului OP, are loc la suprafață trecerea unei părți a acestuia în stare de vapori. În același timp, căldura transmisă prin conducție topește un strat de material până la adâncimea corespunzătoare izotermei cu temperatura lui de fuziune. Sub stratul lichid urmează un strat solid activat prin încălzire.

Așa cum rezultă din analiza evoluției bulei cavitaționale efectuată de O. M. Popoviciu și V. I. Skorobogatov [100, 112], implozia cuprinde mai multe cicluri de surpare a bulei, din care în primul ciclu se formează un jet de arie transversală mare. Acest jet este generat în perioada în care accelerația frontierelor este redusă și în consecință va avea o viteză relativ redusă, așa că impactul cu suprafața OP nu va genera presiuni mai mari pentru a provoca distrugerii, însă suficient de mari pentru a activa energetic local stratul superficial.

Particulele erodate aflate în interstițiul tehnologic primesc, sub influența ultrasunetelor, energii cinetice extrem de mari [52, 54, 63, 72, 100, 106], deci accelerații gravimetrice mari, care în momentul impactului cu suprafața OP, o parte se transformă în căldură, o parte creează microfisuri în stratul superficial.

Ca atare, autorul conchide că pe lângă sursa termică inițiată de descărcarea electrică în impuls, stratul superficial este activat energetic de efectul ultrasunetelor asupra mediului lichid dielectric, atât prin surparea bulelor cavitaționale - primul ciclu - în imediata apropiere a electrozilor, cât și în urma impactului particolelor erodate în urma descărcărilor electrice anterioare.

#### 3.4.3.2 Expulzarea materialului activat

Forțele care înving coeziunea și provoacă îndepărtarea propriu-zisă a materialului activat pot fi de origine termodinamică, electrostatică,

electrodinamică și termodinamică.

**1° Expulzarea termodinamică** este un procedeu de îndepărtare a materialului sub acțiunea fazei de vapori [49,90]. Materialul activat începe să vaporizeze la nivelul sursei termice pe măsură ce presiunea de vapori depășește presiunea canalului gazos al descărcării. Procesul este frânat la începutul impulsului din cauza creșterii presiunii, concomitent cu ea crescând și temperatura de vaporizare. În acest mod are loc și o supraîncălzire a fazei lichide. Întreg volumul de lichid supraîncălzit la temperaturi mai mari ajunge în stare critică, apar și se dilată cu viteze mari microincinte de vaporizare explozivă, care antrenează și masa lichidă pe care o ejectează sub formă de picături. Lichidul care nu a fost antrenat în șocul de expulzare este reținut de tensiunea superficială la suprafața corpului solid și se resolidifică pe pereții și pe marginile craterului.

Datorită fenomenului de cavitație care produce puternice unde de șoc, se realizează după O. Drăgan ș.a. [25] o dispersie a metalului în faza de vapori sau în faza lichidă datorită micșorării tensiunii superficiale la interfața dintre aceste stări de agregare. Activarea cu ultrasunete a fazei lichide conduce la micșorarea subrăcirii și a timpului de cristalizare, respectiv la schimbarea caracterului câmpului termic. Presiunea acustică determină amestecarea intensă a lichidului, uniformizează temperatura mediului de lucru și intensifică difuzia de convecție [27].

Determinat de surparea bulelor cavitaționale în jeturile secundare [100], are loc o încălzire locală pronunțată, ceea ce creează în zona învecinată un gradient termic care într-un mediu conducător produce un curent electric care inițiază efectul de coroziune electrochimică.

În concordanță cu aceste constatări, se poate aprecia că ultrasunetele influențează schimbul de căldură prin pătrunderea presiunii acustice în interfața stărilor de agregare a stratului superficial lichid-solid, mărinđ de câteva ori coeficientul de cedare de căldură [25]. Sub acțiunea energiei ultraacustice se micșorează subrăcirea, fapt ce mărește cantitatea de embrioni de germinare, particolele solidificate având o structură foarte fină. Efectul termic datorat impactului dintre particolele erodate și suprafața OP și cavitației ultrasonore, supraîncălzesc faza lichidă coroborat cu intensificarea procesului de coroziune electrochimică.

**2° Smulgerea electrostatică** este fenomenul care conduce la îndepărtarea materialului din crater sub acțiunea forțelor câmpului electric exercitate asupra ionilor pozitivi ai rețelei cristaline. Apariția locală la suprafața anodului a unei densități mari de sarcini electrostatice creează după A. Nichici ș.a. [90] intensități de câmp electric care dau forțe foarte mari. În anumite condiții ele pot depăși rezistența la rupere în secțiunea de legătură a unei particole de material, pe care

o pot smulge și dirija în direcția liniilor de câmp.

Urmare a descărcărilor electrice ce au loc în momentul imploziei bulelor de cavitație ultrasonoră, autorul afirmă că acestea se suprapun peste descărcările electrice în impuls ce se manifestă în interstițiul tehnologic dintre OT și OP. Se consideră că efectul de cavitație este stimulat de descărcările electrice în impuls, iar câmpul electric dintre OT și OP datorat descărcărilor electrice în impuls este accentuat de fenomenele electrice ce au loc în bulele de cavitație. Drept urmare, crește ponderea particulelor smulse în urma acțiunii forțelor inițiate de câmpul electrostatic, fapt constatat și de M.K.Mițkevici [50] prin cercetările experimentale întreprinse.

3° Expulzarea electrodinamică a materialului activat energetic poate avea loc sub acțiunea efectului Pinch. Variația curentului electric în timpul descărcării determină neuniformitatea densității de putere în sursa termică de suprafață [23,49,90]. În fazele de variație bruscă a intensității curentului, densitățile de sarcină cresc la periferia petei electrodice datorită efectului pelicular, iar în faza quasistaționară cresc în axa ei datorită efectului Pinch. Fenomenul implică și deplasarea lichidului spre axa descărcării și, la o anumită valoare a razei de constricție, pot acționa componente axiale ale forțelor Pinch, care formează picături și le desprind din crater.

Cavitația ultrasonoră, după autor, pune în evidență efectul Pinch încă din faza de evoluție a descărcării electrice în impuls (afirmația a de la subcap.3.4.2). Descărcările electrice din bulele de cavitație, prin caracterul lor aleator, contribuie la variația curentului electric prin canalul descărcării, deci la creșterea densității de sarcină la periferia petelor electrodice.

4° Ruperea termodinamică este posibilă atunci când se depășește rezistența la rupere în secțiunile de legătură a unor particole de material din cauza dilatărilor bruște cu un grad de libertate numai spre exteriorul OP [48].

Ruperile termodinamice pot să apară și la contracția în timpul răcirii a materialului dilatat și deformat plastic anterior, în faza de încălzire. Fenomenul este favorizat după N. L.Mironoff [49] de forțele hidrodinamice care acționează la proiectarea pe suprafața OP a frontului de lichid de lucru rezultat din implozia bulelor gazoase la sfârșitul descărcării.

În evoluția ulterioară a bulelor cavitaționale [100], mai cu seamă în al doilea jet și al treilea ciclu de surpare, s-a constatat existența a numeroase jeturi lichide, dirijate sub diferite unghiuri către suprafața OP. Din observațiile făcute, a rezultat că jeturile secundare, spre deosebire de cel central, apar în perioada când accelerația frontierelor este mult mai mare, ceea ce conduce la obținerea unor viteze sporite. Prin urmare, jeturile secundare, mai ales cele din

ultimile etape de surpare a bulei, au o energie suficient de mare pentru a provoca eroziunea la suprafața OP.

Aprofundând acest model, autorul susține că fenomenul este favorizat de surparea bulelor cavitaționale și deși eroziunea cavitațională este un proces lent, aceasta se suprapune peste implozia bulelor gazoase. Intrucât stratul superficial prezintă foarte multe microfisuri atât datorită descărcărilor electrice în impuls, cât și impactului cu particole erodate, fenomenul de cavitație se manifestă cu preponderență în aceste microfisuri, dând naștere efectului de pană hidraulică [54,59,106], ceea ce conduce la îndepărtarea suplimentară de material, fapt confirmat și de I.Hansson în lucrarea sa [33].

### 3.5 CONSIDERATII ASUPRA MECANISMELOR IPOTETICE DE PRELUCRARE PRIN ELECTROEROZIUNE CU ELECTROD FILIFORM ACTIVAT CU ULTRASUNETE

Prelucrarea prin electroeroziune cu electrod filiform activat ultrasonic este deosebit de complexă. Concepția mecanismului de prelucrare prin electroeroziune în câmp ultrasonic s-a bazat pe interconexiunea logică a unor fenomene cunoscute, experimentate și aplicate de diverși cercetători, rezultând efecte suprapuse și procese adiacente care însoțesc o descărcare electrică în impuls. Urmărind influența ultrasunetelor asupra fiecărei etape a procesului electroeroziv, cercetările teoretice întreprinse de autor constată o îmbunătățire a caracteristicilor tehnologice și de prelucrabilitate. Însă în spațiul de lucru se succed o multitudine de descărcări electrice însoțite de procese fizico-chimice care se combină și se influențează reciproc. Nu toate impulsurile de tensiune aplicate pe spațiul de lucru sunt însoțite de procese elementare de eroziune, unele impulsuri au caracteristici care se abat de la cele normale iar ultrasunetele pot genera efecte secundare care modifică condițiile disruptive.

Studiul literaturii de specialitate și de brevete [11,39,43,107] a confirmat faptul că activarea cu ultrasunete a electrodului filiform utilizat în procesele de prelucrare electroerozive conduce, în anumite condiții, la creșterea capacității de erodare. Cercetările experimentale întreprinse de majoritatea cercetătorilor [23,46,50] au evidențiat numai acest parametru tehnologic, nefăcându-se referiri asupra preciziei dimensionale, de formă și de la poziția reciprocă și nici despre calitatea suprafeței rezultate în urma prelucrării, care sunt parametri la fel de importanți în construcția de mașini și aparate. Deasemenea, studiile teoretice foarte bine aprofundate în strict domeniile de

prelucrare numai prin electroeroziune sau numai prin ultrasunete, nu au putut modela un mecanism care să explice clar și coerent, procesele elementare ce au loc în mediul dielectric din interstițiul de lucru atunci când peste descărcările electrice în impuls se suprapune energia ultrasunetelor. Din acest motiv nu a fost studiată în profunzime nici influența unor factori specifici ultrasunetelor de mari energii: modalități de activare a electrodului filiform, compunerea și interferența undelor în OT, influența câmpului magnetic dintre OT și OP asupra preciziei de prelucrare, modul în care influențează forma, masa, lungimea și coeficientul de amplificare algoritmul de calcul și proiectare al concentratoarelor adaptoare de undă simple și/sau compuse.

Cu toată complexitatea fenomenelor care intervin, așa cum au fost ele prezentate în subcap.3.4 și propuse de autor ca un posibil model de prelucrare prin electroeroziune în câmp ultrasonic, se poate afirma că mecanismul de bază pentru înlăturarea unei părți din materialul activat din craterul de eroziune este expulzarea termodinamică. În cazul prelucrării prin electroeroziune fără activarea ultrasonică a OT, mărimea craterului de eroziune depinde în principal de forma, durata impulsului, cota parte din energia descărcării primită de OP și de rezistența la eroziune a acestuia. Energia  $W_1$  este determinată de funcția de timp a tensiunii și a curentului pe durata descărcării electrice:

$$W_1 = \int_0^{t_i} u(t) \cdot i(t) dt \quad (3.45)$$

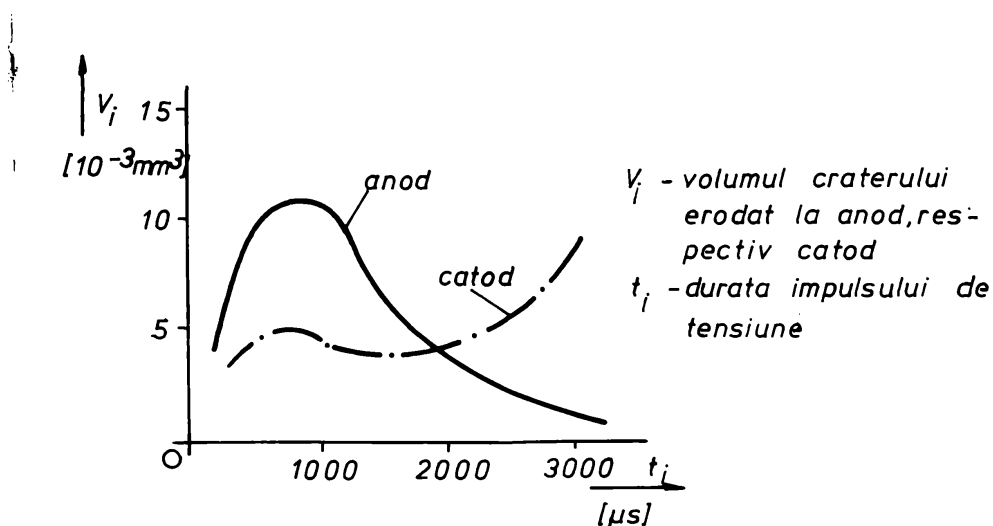


Fig. 3.8  
 Dependența volumului craterului erodat funcție de durata impulsului

La o valoare constantă a energiei impulsului, volumul craterului  $V_i$  depinde de durata impulsului  $t_i$  și de polaritatea de conectare a electrozilor [48] - fig.3.8 -.

Dacă tensiunea și amplitudinea curentului sunt constante [23] - fig.3.9 - volumul craterului depinde de polaritate și crește cu durata impulsului  $t_i$ .

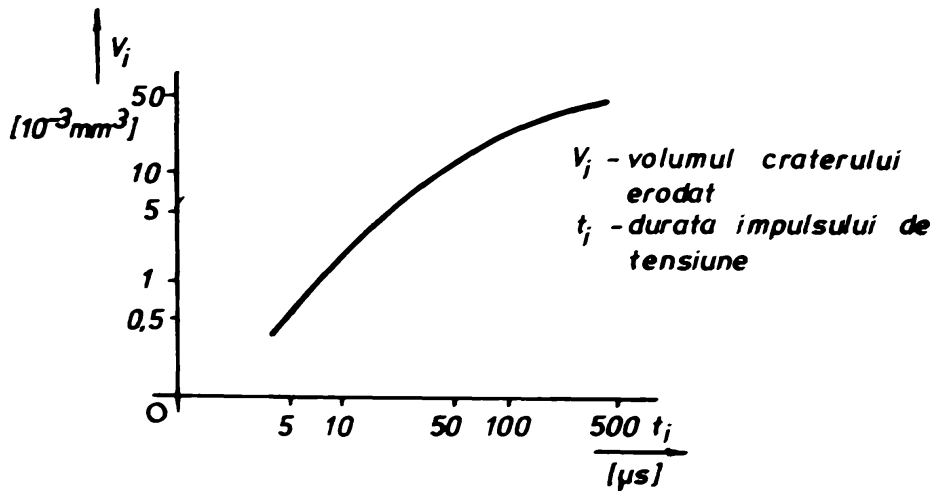


Fig.3.9  
Dependența volumului craterului erodat funcție de durata impulsului

În ceea ce privește energia ultrasunetelor introdusă în spațiul de lucru, influența acesteia asupra prelucrării electroerozive este strâns legată de apariția efectului de cavitație. Experiențele efectuate [25] au arătat faptul că prin mișcarea bulelor cavitaționale mici de rază  $R_0$ , între ele acționează sau forțe de atracție, sau forțe de respingere. Prin atracție, bulele fuzionează și formează bule de dimensiuni mai mari care în urma imploziei creează o undă de șoc cu o presiune maximă dată de relația:

$$P_{\text{max}} = \frac{P_0}{\sqrt[3]{256}} \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \quad (3.46)$$

unde:

- $P_0$  - presiunea hidrostatică a bulei de rază  $R_0$ ;
- $R_0$  - raza bulei cavitaționale înainte de comprimare;
- $R$  - raza bulei comprimată.

Bulele cavitaționale își măresc continuu volumul și sub acțiunea câmpului ultrasonic încep să pulseze, au o mișcare oscilatorie armonică iar frecvența de rezonanță  $f_0$  corespunzătoare se poate calcula cu expresia [25].



$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_c} \sqrt{\frac{3\chi}{\rho} \cdot \left(P + \frac{2\sigma}{R_c}\right)} \quad (3.47)$$

unde:

$\chi$  - raportul căldurilor specifice corespunzătoare gazului existent în interiorul bulei de cavitație;

$\rho$  - densitatea lichidului;

$P$  - presiunea hidrostatică;

$\sigma$  - tensiunea superficială a lichidului.

Se observă că dacă frecvența ultrasunetului este mai mică decât frecvența de rezonanță, bula de cavitație se găsește în stare instabilă în care caz se reduce dilatarea și implozia acestora. Dacă însă frecvența ultrasunetului este mai mare decât frecvența de rezonanță, implozia bulei nu se mai produce, ea căpătând o mișcare oscilatorie complexă. În acest caz, volumul bulei crește continuu constituind principalul mecanism de degajare al unui lichid sub acțiunea câmpului ultraacustic. Prin urmare, pentru a asigura inițierea și dezvoltarea bulelor cavitaționale în interstițiul tehnologic dintre OT și OP se necesită ca frecvența de oscilație ultrasonică a OT să fie egală sau superioară frecvenței proprii de rezonanță a acestora.

Pe lângă efectele secundare de omogenizare și dispersare a particulelor erodate care sunt astfel rapid evacuate din interstițiul tehnologic, oscilația ultrasonică a electrodului filiform produce și accelerarea acestora, care o parte lovesc suprafața OP, iar o parte ajung în impact cu OT. Pe baza coeficientului de prelucrabilitate:

$$K_{pr} = \frac{\tau_f}{\sigma_f} = \frac{R_f}{R_m} \quad (3.48)$$

unde:

$\tau_f$ ,  $R_f$  - tensiunea mecanică tangențială la rupere, respectiv la forfecare;

$\sigma_f$ ,  $R_m$  - tensiunea mecanică normală de rupere prin tracțiune, care în cazul OT - confecționat din cupru sau din alamă - este  $K_{pr} < 1$ , se deduce că particulele abrazive se încastrează în electrodul filiform și sunt astfel evacuate și pe această cale din interstițiu prin mișcarea relativă a electrodului în lungul axei sale.

## CAPITOLUL 4. CALCULUL SI PROIECTAREA

### CONCENTRATOARELOR ADAPTOARE DE UNDA A SISTEMELOR ACUSTICE REZONANTE

#### 4.1 CALCULUL SI PROIECTAREA UNUI CONCENTRATOR ADAPTOR DE UNDA SUB FORMA UNEI BARE DE SECTIUNE CIRCULARA CONSTANTA

Concentratorul adaptor de undă sau difuzorul CAU(D) sub forma unei bare de secțiune circulară constantă se utilizează în aplicațiile tehnologice în care energia vibrațiilor ultrasonore se necesită a fi transmisă mediului fără concentrarea sau dispersarea ei. Cu alte cuvinte, acest tip de CAU(D) se interpune între transductor T și mediul de lucru în situația în care T nu poate fi amplasat în mediul respectiv. Un astfel de CAU(D) este prezentat în Fig. 4.1.



*l, D - lungimea, respectiv  
diametrul CAU*

*Fig. 4.1*

*CAU sub forma unei bare de secțiune  
circulară constantă*

Determinarea lungimii concentratorului (difuzorului) se efectuează [12, 13, 16] cu formula.

$$l = \frac{n \cdot c}{2f} \quad (4.1)$$

unde:

*c* - viteza de propagare a oscilațiilor (vibrațiilor) în materialul barei de secțiune

constantă;

*f* - frecvența oscilațiilor (vibrațiilor),

*n* - modul de oscilație (din considerente constructive se alege *n=1, 2* sau *3*)

Modul de oscilație *n* este dat de raportul dintre lungimea barei și jumătatea lungimii de undă  $\lambda/2$  a vibrațiilor elastice de frecvență corespunzător materialului barei:

$$n = \frac{2l}{\lambda} \quad (4.2)$$

În tabelul 4.1 sunt date densitățile specifice  $\rho$ , vitezele de propagare  $c$  și lungimile de undă ale undelor longitudinale [20,25,30,109,116,122] pentru diferite materiale la frecvențele de 20 kHz și 40 kHz.

TABELUL 4.1

Material	Densitate specifică $\rho$ $10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Viteza sun- tului $10^3$ [m/s]	Lungimea de undă $\lambda$ [m]	
			20 kHz	40 kHz
Aluminiu	2,70	5,24	0,262	0,131
Bismut	9,80	1,79	0,089	0,045
Alamă	8,55	3,42	0,171	0,086
Cupru	8,88	4,30	0,215	0,108
Aur	19,32	2,03	0,102	0,051
Fier	7,87	5,17	0,259	0,129
Plumb	11,32	1,25	0,063	0,031
Nichel	8,90	4,76	0,238	0,119
Argint	10,50	2,64	0,132	0,066
Oțel	7,80	5,05	0,253	0,126
Zinc	7,10	3,81	0,191	0,095
Cuarț	2,65	5,37	0,269	0,134
Sare Seignette	1,77	3,20	0,160	0,080
Cauciuc moale	0,90	1,48	0,074	0,037

Diametrul  $D$  al barei se determină din considerente constructive corelat cu diametrul (suprafața) transductorului  $T$ , respectiv cu adaptarea acestuia în mediul de lucru.

În continuare este necesar să se determine poziția nodului de viteză a vibrațiilor elastice  $x_0$ , adică acel plan de pe bară în care amplitudinea vibrațiilor este nulă:

$$x_0 = \frac{l}{2n} \quad (4.3)$$

În cazul modului de vibrație  $n - 1$  și lungimea  $CAU(D)$  este jumătate din lungimea de undă  $\lambda/2$ , nodul de vibrație se determină cu relația:

$$x_0 = \frac{\lambda}{4} \quad (4.4)$$

Energia ultrasonoră transmisă mediului de către suprafața activă a CAU(D) în formă de bară de secțiune circulară constantă este egală cu energia furnizată de T [16,25,34], minus pierderile inevitabile de energie din bara însăși. Dacă materialul este ales în mod judicios, pierderile din bară sunt relativ mici și în mod obișnuit nu sunt luate în considerare în calculul acestor concentratoare (difuzoare).

#### 4.2 CALCULUL SI PROIECTAREA UNUI CONCENTRATOR ADAPTOR DE UNDA CILINDRIC IN TREPTE

Se consideră un CAU cilindric în trepte prezentat schematic în fig.4.2.

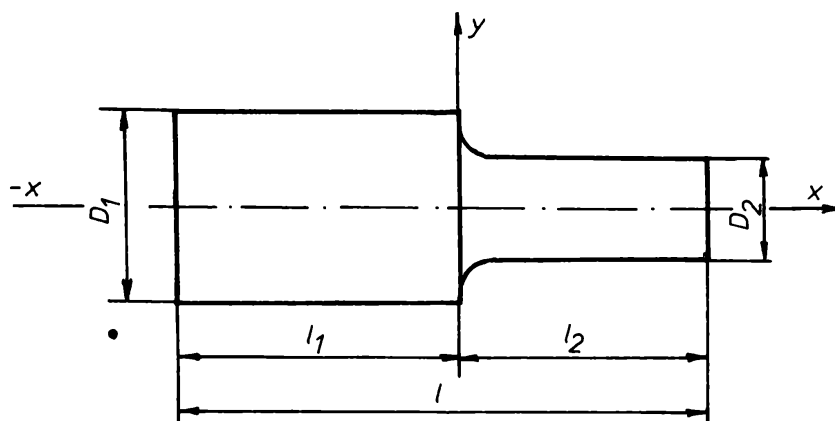


Fig.4.2

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte

$D_1, D_2$  - diametrele CAU corespunzătoare fiecărei trepte

$l$  - lungimea CAU

$l_1, l_2$  - lungimile corespunzătoare fiecărui tronson

$x, y$  - sistemul de axe rectangulare

Intrucât  $S(x)$  - constant, înseamnă că în legea de propagare a undelor  $\partial S / \partial x = 0$ . În această situație ecuația (3.12) devine.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + k^2 \cdot \xi = 0 \quad (4.5)$$

Soluțiile acestei ecuații sunt de forma [56,92]:

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot \sin kl_1 \cdot (-\sin kx + \operatorname{ctg} kl_1 \cdot \cos kx) \quad (4.6)$$

pentru  $x \in [-l_1, 0]$ , respectiv

$$\xi(x) = N^2 \cdot \xi_2 \cdot \sin kl_2 \cdot (-\sin kx - \operatorname{ctg} kl_2 \cdot \cos kx) \quad (4.7)$$

pentru  $x \in [0, l_2]$

unde:

$$N = \frac{D_1}{D_2}$$

reprezintă raportul diametrelor.

Lungimea de rezonanță  $l$ , adică lungimea la care frecvența mecanică proprie a CAU este egală cu frecvența de excitație a T, se compune - fig. 4.2 - din  $l_1 + l_2$ . Lungimile  $l_1$  și  $l_2$  pot fi variate între anumite limite [92]. Astfel,  $l_1$  se poate stabili ca fiind cota parte din  $\lambda/2$  și se determină constructiv cu relația:

$$l_1 = p_1 \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (4.8.a)$$

unde:

$p_1 \in (0, 1)$  este o constantă aleasă arbitrar.

Lungimea  $l_2$  se calculează cu ajutorul relațiilor (4.6) și (4.7) punând condiția ca amplitudinile celor două părți ale CAU la saltul de diametre ( $x = 0$ ) să fie egale, obținându-se:

$$l_2 = \frac{1}{k} \cdot \arctg[-N^2 \cdot \operatorname{tg}(kl_1)] \quad (4.8.b)$$

Definind deformația specifică  $\epsilon(x) = \partial \xi / \partial x$ , se poate calcula tensiunea mecanică în CAU cu relația:

$$\sigma(x) = E \cdot \epsilon(x) \quad (4.9)$$

Derivând ecuațiile (4.6) și (4.7) în raport cu coordonata  $x$ , se obțin următoarele relații de calcul a tensiunii mecanice:

$$\sigma(x) = k \cdot E \cdot \xi_1 \cdot \operatorname{sink} l_1 \cdot (-\operatorname{ctg} kx - \operatorname{ctg} k l_1 \cdot \operatorname{sink} x) \quad (4.10)$$

pentru  $x \in [-l_1, 0]$ , respectiv

$$\sigma(x) = N^2 \cdot k \cdot E \cdot \xi_1 \cdot \operatorname{sink} l_1 \cdot (-\cos kx + \operatorname{ctg} k l_2 \cdot \operatorname{sink} x) \quad (4.11)$$

pentru  $x \in [0, l_2]$

Nodul de oscilație  $x_0 = 0$  se află în zona saltului de secțiune, respectiv factorul (coeficientul) de amplificare al amplitudinii  $k_A$  este dat de [92]:

$$k_A = N^2 = \left| -\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \cdot \frac{\operatorname{sink} l_1}{\operatorname{sink} l_2} \right| \quad (4.12)$$

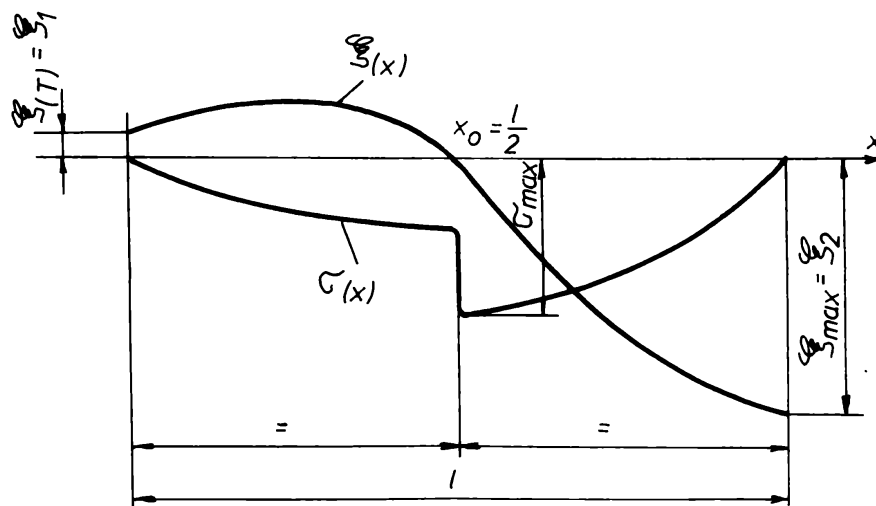


Fig. 4.3

Variația amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x$

$\xi(T), \xi_1, \xi_2$  - amplitudinea de vibrație a transductorului  $T$ , la intrarea, respectiv ieșirea din CAU

$\sigma_{\max}$  - tensiunea mecanică maximă în CAU

$x_0$  - nodul de oscilație

$l$  - lungimea CAU

În situația în care  $l_1 = l_2$ , atunci coeficientul de amplificare al amplitudinii este proporțional cu pătratul raportului celor două diametre, respectiv poziția nodului de oscilație se află la mijlocul lunginii CAU. Diametrul  $D_1$  se stabilește pe baza unor considerente constructive în acord cu forma și dimensiunea T, iar diametrul  $D_2$  este impus de obicei de aplicația tehnologică (mărimea amplitudinii de vibrație a  $OT(S)$ , forma și dimensiunea  $OT(S)$  etc.).

Variația amplitudinii de vibrație  $\xi(x)$  și a tensiunii mecanice  $\sigma(x)$  pentru CAU cilindric în trepte în funcție de coordonata  $x$  este reprezentată în fig. 4.3 [90].

#### 4.3 CALCULUL SI PROIECTAREA CONCENTRATOARELOR ADAPTOARE DE UNDA SUB FORMA UNOR BARE DE SECTIUNE CIRCULARA VARIABILA

Modificarea impedanței acustice și a vitezei de oscilație a CAU se realizează prin variația secțiunii transversale a acestora. Dacă unda longitudinală transmisă în lungul CAU este plană, atunci aria secțiunii transversale  $S(x)$  este de forma:

$$S(x) = \pi \cdot y^2(x) \quad (4.13)$$

unde:

$y(x)$  - raza secțiunii circulare la distanța  $x$ .

Din conservarea energiei [115], este de așteptat ca soluția armonică în timp de frecvență  $\omega$ ,  $\xi(x,t)$  să aibă amplitudinea complexă spațială invers proporțională cu  $y(x)$  iar faza să fie de forma  $\omega t - \psi(x)$ , adică:

$$\xi(x, t) = \frac{A}{y(x)} \cdot e^{j(\omega t - \psi(x))} \quad (4.14)$$

Introducând (4.14) în ecuația (3.12), se obține:

$$\frac{1}{y} \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + \left( \frac{d\psi}{dx} \right)^2 - k^2 + j \cdot \frac{d^2 \psi}{dx^2} = 0 \quad (4.15)$$

unde:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad \text{- număr de undă.}$$

Din ecuația (4.15) rezultă că  $y$  și  $\psi$  sunt funcții cu valori reale. Prin urmare, se poate scrie:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = 0 \quad (4.16.a)$$

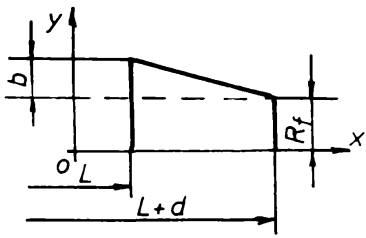
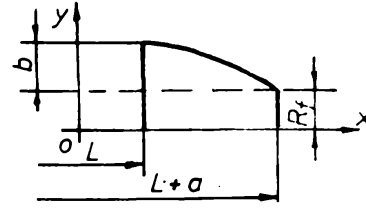
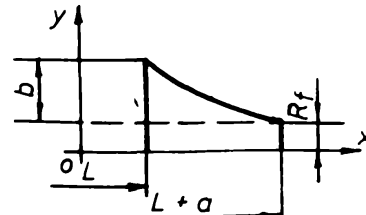
$$\frac{d^2y}{dx^2} + \left[ \left( \frac{d\psi}{dx} \right)^2 - k^4 \right] \cdot y = 0 \quad (4.16.b)$$

Din (4.16.a) se deduce:

$$\frac{d\psi}{dx} = k_p \quad \text{- constant (în raport cu } x \text{)} \quad (4.17)$$

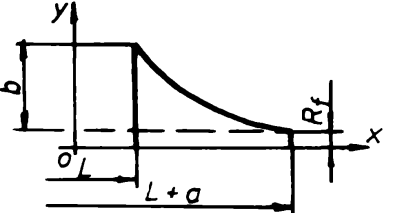
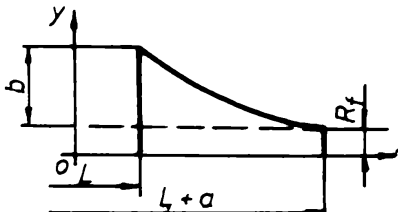
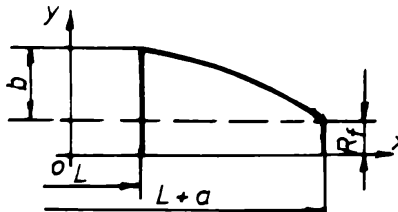
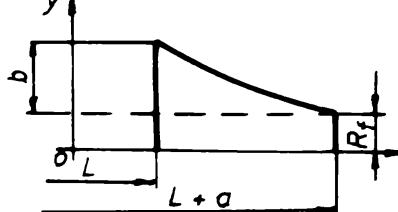
Spre deosebire de  $k$ ,  $k_p$  este constant în raport cu abscisa, dar poate fi funcție de frecvență. Folosind relația (4.17) în ecuația (4.16.b) se obține:

TABELUL 4.2

Nr. crt.	Curba	Forma concentratorului	Ecuația curbei $y=f(x)$ și $L < x < L+a$
1	Dreapta		$y = R_f + b \left( 1 - \frac{x-L}{a} \right)$
2	Parabola		$y = R_f + b \left[ 1 - \left( \frac{x-L}{a} \right)^2 \right]$
3			$y = R_f + b \left( 1 - \sqrt{\frac{x-L}{a}} \right)$



TABELUL 4.2 (continuare)

4.	Parabola de ordinul $n$		$y = R_f + b \left[ 1 - \left( \frac{x-L}{a} \right)^n \right]$ <p style="text-align: center;">sau</p> $y = R_f + b \left( 1 - \sqrt[n]{\frac{x-L}{a}} \right)$ <p>unde: <math>n=4, \dots, 10, 15, 30</math></p>
5	Elipsa		$y = R_f + b \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{x-L}{a} \right)^2} \right]$
6.	Cosinus		$y = R_f + \frac{b}{2} \left[ 1 + \cos \frac{\pi(x-L)}{a} \right]$
7	Sinus		$y = R_f + b \left[ 1 - \sin \frac{\pi(x-L)}{a} \right]$

$$\frac{d^2y}{dx^2} + (k_F^2 - k^2) \cdot y = 0 \quad (4.16)$$

Principalele tipuri de variații ale secțiunii care pot fi utilizate în construcția CAU se obțin prin rezolvarea ecuației (4.16) pentru diferite forme particulare a funcției  $y(x)$ . Acestea sunt prezentate sintetic [16] în tabelul 4.2.

Ecuația (3.12) se poate integra prin cuadraturi în următoarele cazuri generale [115].

- $s(x) = s_0(x/x_0)^2$  - concentrator conic,
- $s(x) = s_0(x/x_0)$  - concentrator parabolic,
- $s(x) = s_0(x_0/x)$  - concentrator hiperbolic,
- $s(x) = s_0(x/x_0)^m$  - concentrator Bessel,  $m = 1, 2, \dots$
- $s(x) = s_0 \cdot e^{mx}$  - concentrator exponențial,  $m \in \mathbb{R}$ .

4.3.1 Calculul și proiectarea concentratorului adaptor de undă conic

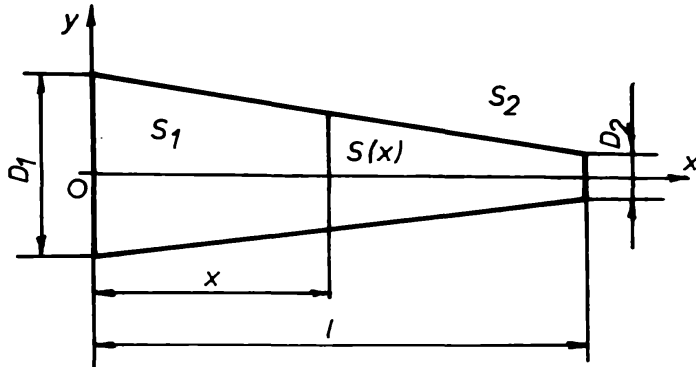


Fig. 4.4

Schema de calcul a CAU conic  
 $S_1, S_2, D_1, D_2$  - secțiunea și diametrul de intrare, respectiv de ieșire din CAU  
 $S(x)$  - secțiunea CAU la distanța  $x$  față secțiunea de intrare  
 $l$  - lungimea CAU

Schița de calcul a CAU conic este redată în fig.4.4. Se consideră secțiunea transversală circulară, având diametrul de intrare  $D_1$  și diametrul de ieșire  $D_2$ .

Legea de variație a secțiunii în lungul generatoarei CAU este dată de.

$$S(x) = S_1 \cdot (1 - \alpha x)^2 \quad (4.19)$$

unde.

$$\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 \cdot l}$$

reprezintă coeficientul de reducere a secțiunii conului.

Înlocuind  $S(x)$  în ecuația (3.12), se obține ecuația diferențială de vibrație a CAU conic [56, 92].

$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} + \frac{2}{(x - \frac{1}{\alpha})} \cdot \frac{d \xi}{dx} + k^2 \cdot \xi = 0 \quad (4.20)$$

Soluția ecuației (4.20) în ipoteza unui acord perfect cu T și în lipsa sarcinii în spațiul de lucru, pentru lungimea de rezonanță  $l = \lambda/2$ , este de forma.

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot \frac{1}{1 - \alpha x} \cdot (\cos kx - \frac{\alpha}{k} \cdot \sin kx) \quad (4.21)$$

unde:

$\xi_1$  - amplitudinea de oscilație la intrarea în CAU (adică în secțiunea  $S_1$ ), egală cu amplitudinea de vibrație a suprafeței radiante a T,

$\xi_2$  - amplitudinea de oscilație la ieșirea din CAU (adică în secțiunea  $S_2$ ).

Relația (4.21) se ia împreună cu ecuația transcendentă [92,119]:

$$\frac{N}{(1-N)^2} = \frac{(kl) - \operatorname{tg}(kl)}{(kl)^2 \cdot \operatorname{tg}(kl)} \quad (4.22)$$

care se poate rezolva atât pe cale grafică - fig.4.5 - cât și prin metode numerice pentru  $N$  și  $k$  dat.

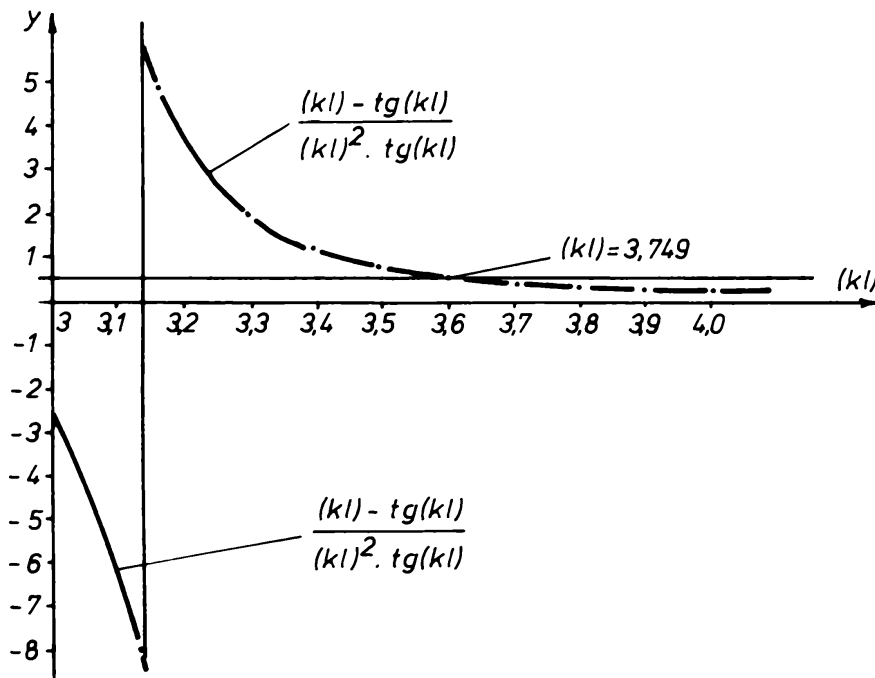


Fig.4.5

Metoda grafică de calcul a CAU conice

$$y = \operatorname{tg}(kl)$$

$$y = \frac{x}{\frac{x^2 \cdot N}{(1-N)^2} + 1} \quad \text{și } x = (kl)$$

$k_A$  - factor de amplificare a amplitudinii

$l$  - lungimea CAU

$N$  - raportul diametrelor de intrare și ieșire din CAU

$k$  - număr de undă

Din relația (4.22) se determină lungimea de rezonanță a CAU:

$$i = \frac{(kl)}{k} = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{(kl)}{\pi} \quad (4.23)$$

unde  $(kl)$  este soluția ecuației:

$$tg(kl) = \frac{kl}{\frac{(kl)^2 \cdot N}{(1-M)^2} + 1} \quad (4.24)$$

Această ecuație se rezolvă printr-o metodă grafo-analitică. Astfel, se reprezintă grafic cele două ecuații ale căror curbe se intersectează într-un punct ce constituie soluția ecuației  $(kl)$ . Cele două ecuații sunt:

$$tg(kl) = y \quad (4.25.a)$$

și

$$y = \frac{x}{\frac{x^2 \cdot N}{(1-M)^2} + 1} \quad (4.25.b)$$

unde  $(kl) = x$

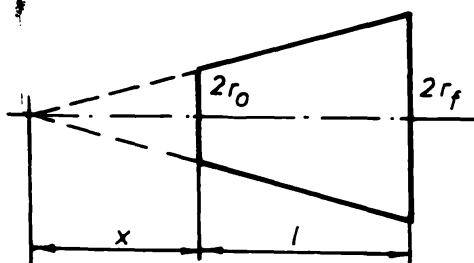


Fig. 4.6

Schema de calcul a lungimii de rezonanță a CAU(D) conic

$2r_0, r_f$  - raza de intrare, respectiv de ieșire din difuzorul conic

$l$  - lungimea de rezonanță a CAU(D) conic

$x$  - parametru ce ține seama de unghiul la vârf al conului

Pe de altă parte după D. Stanomir [115] lungimea de rezonanță trebuie astfel aleasă încât în secțiunea finală să nu se producă reflexii. Asumând deschiderea finală cu un piston de rază  $r_f$  - fig. 4.6 - rezultă că pentru asigurarea absenței reflexiilor este necesar ca:

$$k \cdot r_f \geq 1 \quad (4.26)$$

unde:

$$k = \frac{\dot{\omega}}{c}$$

Inegalitatea (4.26) este critică la frecvența  $\omega_j$ , astfel ca:

$$r_f \geq \frac{c}{\omega_j} = \frac{c}{2\pi \cdot f_j} = \frac{\lambda_j}{2\pi} \quad (4.27.a)$$

și

$$r_f = x \quad (4.27.b)$$

Deci raza finală  $r_f$  și abscisa  $x$  trebuie să fie egale cu cel puțin  $\lambda_1/2\pi$ , dar această condiție nu afectează raza inițială  $r_0$ .

Notând raportul razelor  $k_1 = r_f/r_0$ , lungimea de rezonanță a CAU conic se poate determina și cu relația:

$$1 = x \cdot (k_1 - 1) \quad (4.28)$$

Raportul de amplificare a amplitudinii de vibrație, definit de  $k_A = \xi_2/\xi_1$ , se deduce [92] din relația (4.21):

$$k_A = \left| N \cdot \cos(kl) + \frac{1-N}{(kl)} \cdot \sin(kl) \right| \quad (4.29)$$

care prin transformări succesive conduce la:

$$k_A = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)^2} \leq N \quad (4.30)$$

Cunoscând deformația specifică:

$$\epsilon(x) = \frac{\partial \xi}{\partial x},$$

tensiunea mecanică a CAU conic se calculează:

$$\sigma(x) = E \cdot \epsilon(x) = \frac{E \cdot \xi_1}{(1 - \alpha x)^2} \cdot \left[ \alpha^2 \cdot x \cdot \cos kx - \frac{(\alpha^2 + k^2 - \alpha x)}{k} \cdot \sin kx \right] \quad (4.31)$$

Nodul de oscilație  $x_0$  se determină din relația (4.21) punând condiția  $\xi(x) = 0$ :

$$x_0 = \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \frac{k}{\alpha} \quad (4.32)$$

Variația amplitudinii de vibrație  $\xi(x)$  și a tensiunii mecanice  $\sigma(x)$  pentru CAU conic în funcție de coordonata  $x$  este reprezentată în fig.4.7.

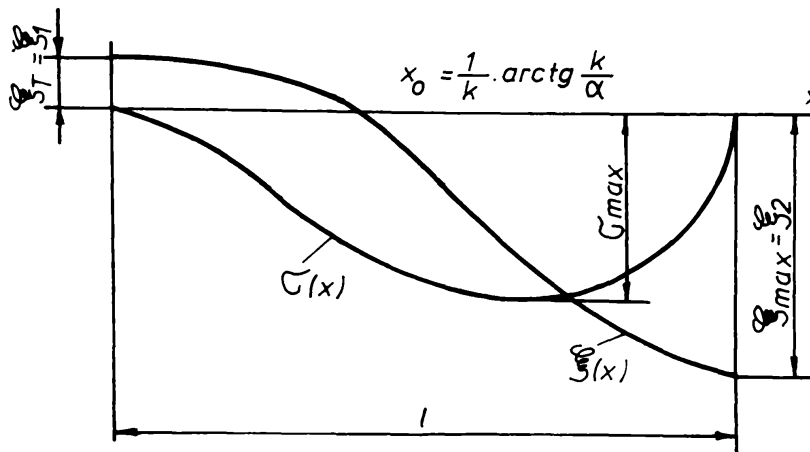


Fig. 4.7

Variația amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x$

$\xi_T, \xi_1, \xi_2$  - amplitudinea de vibrație a transductorului  $T$ , la intrarea, respectiv ieșirea din CAU(D) conic

$\sigma_{max}$  - tensiunea mecanică maximă în CAU(D)

$x_0$  - nodul de oscilație

$l$  - lungimea CAU(D)

$k$  - număr de undă

$\alpha$  - coeficient de reducere a secțiunii conului

În concordanță cu teoria sonicității a lui G. Constantinescu [21], rezolvarea ecuațiilor (3.27) și (3.28) este posibilă în diferite cazuri particulare. Spre exemplificare, se consideră conducta cu secțiune conică având ecuația:

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \left( \frac{x}{x_0} \right)^2 \quad (4.33)$$

Derivând în raport cu coordonata  $x$ , se obține:

$$\frac{1}{\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dx} = \frac{2}{x} \quad (4.34)$$

astfel că ecuațiile (3.27) și (3.28) devin:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{dH}{dx} + \mu^2 \cdot H = 0 \quad (4.35.a)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{dI}{dx} + \mu^2 \cdot I = 0 \quad (4.35.b)$$

Soluția generală a acestor ecuații este de forma:

$$H = \frac{1}{x} \cdot (A \cdot \cos \mu x + B \cdot \sin \mu x) \quad (4.36.a)$$

$$I = A_1 \cdot (\sin \mu x - \mu x \cdot \cos \mu x) + B_1 \cdot (\cos \mu x + \mu x \cdot \sin \mu x) \quad (4.36.b)$$

unde constantele de integrare  $A$ ,  $B$ ,  $A_1$  și  $B_1$  se determină punând condiții inițiale sau la limită [21,56].

#### 4.3.2 Calculul și proiectarea concentratorului adaptor de undă exponențial

Considerând secțiunea transversală de formă circulară, legea de variație a secțiunii în lungul generatoarei după o curbă exponențială este dată de.

$$S_x = S_1 \cdot e^{-2\beta x} \quad (4.38)$$

sau după diametru:

$$D_x = D_1 \cdot e^{-\beta x} \quad (4.39)$$

unde:

$\beta$  - exponent de reducere a secțiunii;

Schița de calcul a CAU exponențial este prezentată în fig.4.6.

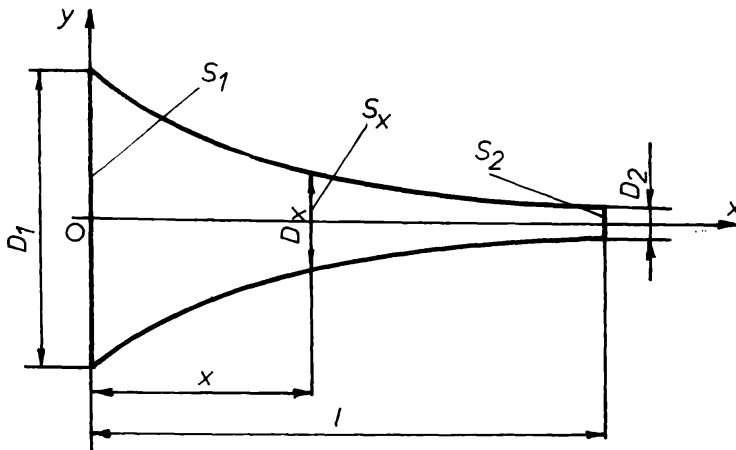


Fig. 4.8

Schema de calcul a CAU exponențial

$S_1, S_2, D_1, D_2$  - secțiunea și diametrul de intrare, respectiv de ieșire din CAU

$S_x, D_x$  - secțiunea, respectiv diametrul la distanța  $x$  față de secțiunea de intrare

$l$  - lungimea CAU

Înlocuind  $S_x$  din (4.36) în ecuația (3.12), se obține [93]:

$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} - 2\beta \cdot \frac{d\xi}{dx} + k^2 \cdot \xi = 0 \quad (4.40)$$

căre are soluția:

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot e^{\beta x} \cdot \left( \cos k'x - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k'x \right) \quad (4.41)$$

unde:

$$k' = \frac{\omega}{c'} \quad - \text{ număr de undă, și}$$

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\beta^2 \cdot c^4}{\omega^2}}} \quad - \text{ viteza acustică de fază a undelor în bare cu secțiune variabilă;}$$

Cu ajutorul relației (4.41) se poate determina factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație [30, 56, 93].



$$k_A = \frac{\xi_2}{\xi_1} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = \frac{D_2}{D_1} = N \quad (4.42)$$

care este egal cu raportul diametrelor de intrare și ieșire a CAU.

În ipoteza unui acord ideal al CAU cu T la regimul de rezonanță și sarcini neglijabile în spațiul de lucru, adică accelerațiile la capete fiind nule:

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} \Big|_{x=0} = 0 \quad \text{și} \quad \frac{d^2\xi}{dx^2} \Big|_{x=l} = 0,$$

concentratorul oscilează ca o bară liberă la capete (v. tab.3.2). Pentru modul de oscilație  $n = 1$ , lungimea de rezonanță în acest caz este [18, 90, 93].

$$l = \frac{1}{k} \sqrt{\pi^2 + 1n^2N^2} = \frac{C}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{inN}{\pi}\right)^2} \quad (4.43)$$

Dacă  $n > 1$  și  $n \in \mathbb{N}$ , atunci lungimea de rezonanță a CAU exponențial este dată de [30]:

$$l = \frac{n \cdot C}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{inN}{\pi n}\right)^2} \quad (4.44)$$

Derivând relația (4.41), se obține deformația specifică.

$$\epsilon = \frac{d\xi}{dx}, \quad \text{care are expresia.}$$

$$\epsilon = -\frac{\xi_1 \cdot (\beta^2 + k^4)}{k'} \cdot e^{\beta x} \cdot \sin k'x \quad (4.45)$$

De aici se deduce tensiunea mecanică care solăcă CAU.

$$\sigma = E \cdot \epsilon = - \frac{E \cdot \xi_1 \cdot (\beta^2 + k'^2)}{k'} \cdot e^{\beta x} \cdot \sin k'x \quad (4.46)$$

Punând condiția:

$\frac{d\epsilon}{dx} = 0$ , din relația (4.45) se determină poziția ventrului deformației specifice care corespunde tensiunii mecanice maxime:

$$x_m = \frac{1}{k'} \cdot \arctg\left(-\frac{k'}{\beta}\right) \quad (4.47)$$

Din relația (4.41), pentru  $\xi(x) = 0$  se deduce poziția nodului de câștig.

$$x_0 = \frac{1}{k'} \cdot \arctg \frac{k'}{\beta} \quad (4.48)$$

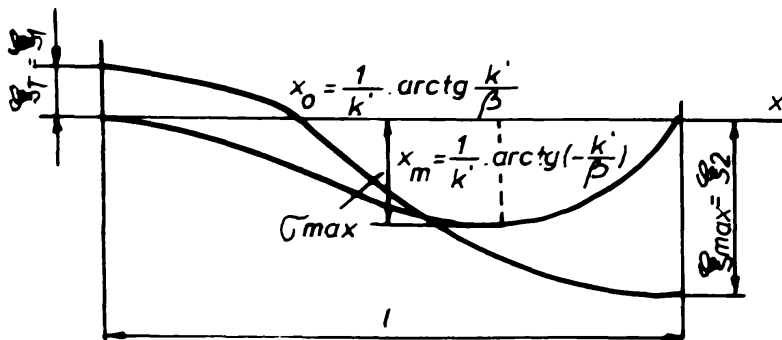


Fig. 4.9

Variația amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x$

$\xi_1, \xi_2$  - amplitudinea de vibrație a transductorului  $T$ , la intrarea, respectiv ieșirea din CAU exponențial

$\sigma_{max}$  - tensiunea mecanică maximă în CAU

$x_0$  - nodul de oscilație

$x_m$  - poziția punctului corespunzător tensiunii mecanice maxime

$k'$  - număr de undă

$\beta$  - exponent de reducere a secțiunii

Practic, în funcție de materialul CAU, caracteristicile  $T$  și particularitățile aplicației tehnologice, se adoptă  $E, \nu, l, D_1, D_2$  și  $k_n$  [36]. Cu aceste valori se poate calcula lungimea de rezonanță  $l$  cu relația (4.43) sau (4.44) și coeficientul de reducere a secțiunii  $\beta = 1/l \cdot \ln N$ , apoi se determină diametrul variabil

și concentratorul  $D_2 = D_1 \cdot e_{\beta l}$ .

Variația amplitudinii de vibrație  $\xi(x)$  și a tensiunii mecanice  $\sigma(x)$  pentru CAU exponențial în funcție de coordonata  $x$  este reprezentată în fig.4.9 [93].

În cazul unui CAU exponențial de secțiune dreptunghiulară se dau dimensiunile laturilor de intrare și ieșire, respectiv  $a_1, b_1, a_2, b_2$ . Factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație, definit după D.A. Gherșgal și V.M. Fridman [30] ca rădăcină pătrată a raportului ariilor secțiunii transversale a CAU la intrare și ieșire, se determină cu relația:

$$k_A = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = \sqrt{\frac{a_1 \cdot b_1}{a_2 \cdot b_2}} = N \quad (4.49)$$

În situația în care suprafața de radiație a CAU exponențial este pătrată ( $a_1 = b_1$  și  $a_2 = b_2$ ),  $k_A$  va căpăta forma:

$$k_A = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \quad (4.50)$$

Lungimea de rezonanță  $l$  se calculează în mod analog CAU de secțiune circulară cu relațiile (4.43) sau (4.44) iar mărimea coeficientului de reducere a secțiunii cu  $B = 1/l \cdot \ln N$ .

Pentru o secțiune inițial pătrată se obține legea de variație:

$$a_x = a_1 \cdot e^{-2\beta x} \quad (4.51)$$

unde:

$a_1$  - latura inițială a secțiunii de intrare în CAU;

Rezolvarea ecuațiilor (3.27) și (3.28) din teoria sonicității pentru cazul particular al unei conducte de formă exponențială este ilustrată în fig.4.10. În această situație:

$$r = r_0 \cdot e^{-mx} \quad (4.52)$$

respectiv:

$$\Omega = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot r_0^2 \cdot e^{-2mx} \quad (4.53)$$

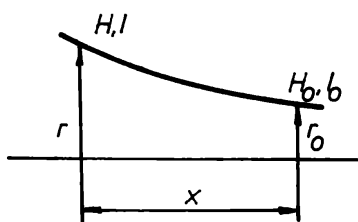


Fig. 4.10

Segment de conductă  
exponențială

$H, l$  - presiunea și curentul lichidului în conductă în secțiunea de rază  $r$

$H_0, l_0$  - presiunea și curentul lichidului în conductă în secțiunea de rază  $r_0$

Derivând în raport cu coordonata  $x$ , se obține:

$$\frac{1}{\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dx} = 2m \quad (4.54)$$

astfel că ecuațiile (3.27) și (3.28) devin:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} + 2m \cdot \frac{dH}{dx} + \mu^2 \cdot H = 0 \quad (4.55.a)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} + 2m \cdot \frac{dI}{dx} + \mu^2 \cdot I = 0 \quad (4.55.b)$$

Soluția generală a ecuațiilor (4.55.a) și (4.55.b) este de forma:

$$H = e^{-mx} \cdot (A \cdot \sin x \cdot \sqrt{\mu^2 - m^2} + B \cdot \cos x \cdot \sqrt{\mu^2 - m^2}) \quad (4.56.a)$$

$$I = e^{mx} \cdot (A_1 \cdot \sin x \cdot \sqrt{\mu^2 - m^2} + B_1 \cdot \cos x \cdot \sqrt{\mu^2 - m^2}) \quad (4.56.b)$$

unde constantele de integrare  $A, B, A_1, B_1$  se determină din condițiile inițiale și la limită [21, 56].

#### 4.3.3 Calculul și proiectarea concentratorului adaptor de undă catenoidal

Schema de calcul a CAU catenoidal este prezentată în fig. 4.8 și este asemănătoare cu aceea a CAU exponențial. Generatoarea variază în acest caz după o funcție hiperbolică iar legea de variație a secțiunii transversale este:

$$S_x = S_2 \cdot \text{ch}^2 \gamma \cdot (1-x) \quad (4.57)$$

Înlocuind (4.57) în ecuația diferențială de ordinul doi (3.12), se obține:

$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} - 2\gamma \cdot \text{th} \gamma \cdot (1-x) \cdot \frac{d\xi}{dx} + k^2 \cdot \xi = 0 \quad (4.58)$$

care are soluția generală de forma [93,96]:

$$\xi = \frac{\xi_1 \cdot \operatorname{ch} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma (l-x)} \cdot \left( \cos k'x - \frac{\gamma}{k'} \cdot \operatorname{th} \gamma l \cdot \sin k'x \right) \quad (4.59)$$

unde:

$\gamma$  - coeficient de reducere a secțiunii,

$$\gamma = \frac{1}{l} \cdot \operatorname{argch} N$$

$$k' = \frac{\omega}{c'}$$

iar

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \gamma^2 \cdot c^2}}$$

și care se ia împreună [96] cu ecuația transcendentă:

$$(k'l) \cdot \operatorname{tg}(k'l) = \operatorname{argch} N \sqrt{1 - \frac{1}{N^2}} \quad (4.60)$$

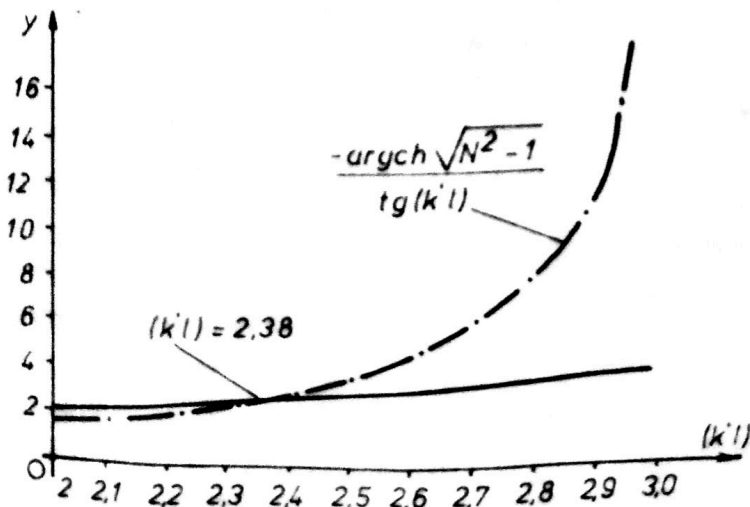


Fig. 4.11

Metoda grafică de calcul a CAU catenoidale

- $k'$  - număr de undă
- $l$  - lungimea CAU
- $N$  - raportul diametrelor

Asemănător CAU conice, ecuația (4.60) se poate rezolva pe cale grafică - fig. 4.11 - sau printr-o metodă numerică pentru  $N$  și  $k'$  dat.

Din relația (4.59) se poate deduce factorul de amplificarea al amplitudinii de vibrație [90,96]:

$$k_A = \frac{D_1}{D_2} \cdot \left[ \cos k'l - \frac{1}{k'l} \cdot \operatorname{argch} \left( \frac{D_1}{D_2} \sqrt{1 - \frac{1}{N^2}} \right) \cdot \operatorname{sink}'l \right] \quad (4.61)$$

care prin substituții și înlocuiri succesive devine:

$$k_A = \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{1}{\cos k'l} = \frac{N}{\cos k'l} \gg N \quad (4.62)$$

Lungimea de rezonanță se calculează cu:

$$l = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{(k'l)^2 + \operatorname{argch}^2 N} \quad (4.63)$$

iar tensiunea mecanică se determină cu relația [96]:

$$\sigma = E \cdot \epsilon = E \cdot \frac{d\xi}{dx} = \frac{E \cdot \gamma \cdot \xi_1 \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot \operatorname{ch} \gamma (l-x)}{\operatorname{ch}^2 \gamma (l-x)} \cdot \left( \cos k'x - \frac{\gamma}{k'} \cdot \operatorname{tg} \gamma l \cdot \operatorname{sink}'x \right) -$$

$$- \frac{E \cdot \xi_1 \cdot \operatorname{ch} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma (l-x)} \cdot (k' \cdot \operatorname{sink}'x + \gamma \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos k'x) \quad (4.64)$$

Punând condiția  $\xi(x) = 0$  în relația (4.59), se stabilește poziția nodului de oscilație:

$$x_0 = \frac{1}{k'} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{k'}{\gamma} \cdot \operatorname{cthg} \gamma l \right) \quad (4.65)$$

Reprezentarea grafică a amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în cazul CAU catenoidal în funcție de coordonata  $x$  este ilustrată în fig. 4.12 [93, 96].

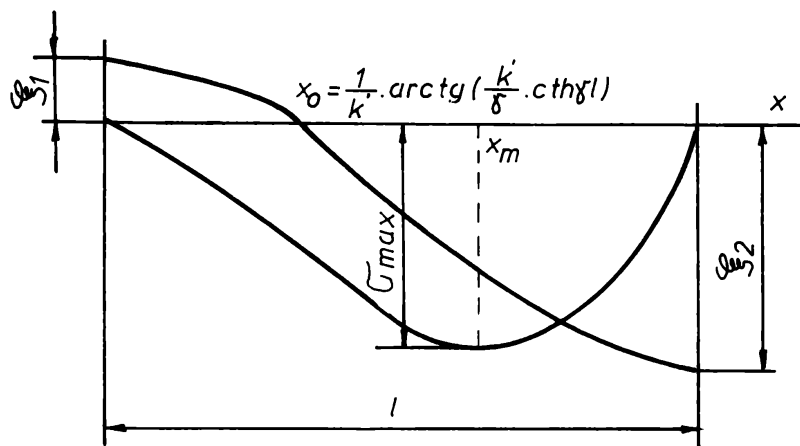


Fig. 4.12

Variația amplitudinii de vibrație și a tensiunii  
mecanice în funcție de coordonata  $x$

$\xi_1, \xi_2$  - amplitudinea de vibrație inițială, respec-  
tativ de ieșire din CAU

$x_0$  - nodul de oscilație

$x_m$  - poziția punctului corespunzător ten-  
siunii mecanice maxime

$k$  - număr de undă

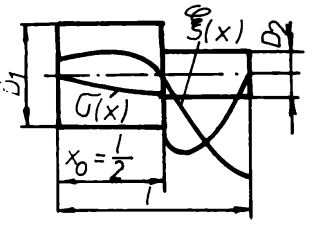
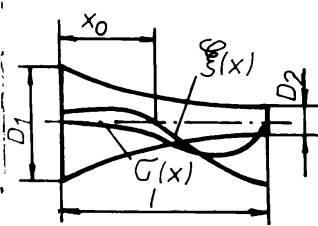
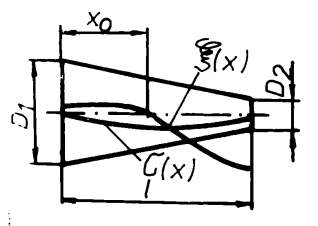
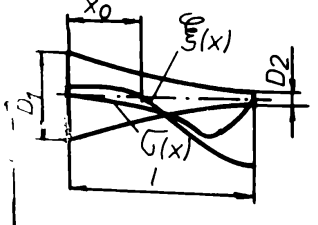
$\gamma$  - coeficient de reducere a secțiunii

#### 4.3.4 Considerații teoretice privind determinarea principalelor elemente constructive specifice CAU

Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă simple s-a bazat pe rezolvarea ecuației diferențiale de ordinul doi (3.12) sau (3.13) care descrie variația amplitudinii de oscilație  $\xi(x)$ , respectiv vitezei de oscilație  $v(x)$  în lungul unui CAU - bară cu secțiunea variabilă - când prin acesta se transmit vibrații longitudinale. Întrucât soluții generale pentru aceste ecuații diferențiale nu s-au putut da, ele s-au integrat pentru anumite funcții ale secțiunii transversale. Dificultatea rezolvării în general a ecuației diferențiale de ordinul doi a constat în determinarea constantelor de integrare din condițiile limită și inițiale. În acest mod s-a putut calcula lungimea de rezonanță, factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație, poziția nodului de oscilație și mărimea tensiunii mecanice în materialul concentratorului.

Particularizând utilizarea soluțiilor ecuațiilor (3.12) și (3.13) la realizarea practică a CAU, în tabelul 4.3 se prezintă sintetic [16, 90] relațiile de calcul a elementelor geometrice a concentratoarelor în  $\lambda/2$ , cel mai des folosite în aplicațiile tehnologice ale ultrasunetelor: cilindric în trepte, exponențial, conic și catenoidal.

TABELUL 4.3

Forma concentratorului	Legea de variație a generatorii	Coeficientul de amplificarea a amplificării	Lungimea de rezonanță	Poziția nodului de oscilație
	<p>Pentru <math>0 &lt; x &lt; \frac{l}{2}</math>  <math>D(x) = D_1</math>                      Pentru <math>\frac{l}{2} &lt; x &lt; l</math>  <math>D(x) = D_2</math></p>	$k_A = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = N^2$	$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$	$x_0 = \frac{l}{2}$
	<p><math>D(x) = D_1 \cdot e^{-\beta x}</math>  <math>\beta = \frac{1}{l} \cdot \ln N</math></p>	$k_A = \frac{D_1}{D_2} = N$	$l = \frac{1}{k} \sqrt{\pi^2 + \ln^2 N} = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$x_0 = \frac{1}{k} \cdot \arctg \frac{k'}{\beta}$ $k' = \frac{\omega}{c}$ $c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\beta^2 c^2}{\omega^2}}}$
	<p><math>D(x) = D_1(1 - \alpha x)^2</math>  <math>\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 \cdot l}</math></p>	$k_A = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)^2} < N$	$l = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{(kl)}{\pi}$ $tg(kl) = \frac{(kl)}{\frac{(kl)^2 \cdot N}{(1 - N)^2} + 1}$	$x = \frac{1}{k} \arctg \frac{k}{\alpha}$ $k = \frac{\omega}{c}$
	<p><math>D(x) = D_2 \operatorname{ch} \delta (l - x)</math>  <math>\delta = \frac{1}{l} \operatorname{argch} N</math></p>	$k = \frac{N}{\cos(kl)} > N$	$l = \frac{1}{k} \cdot \frac{\sqrt{(k'l)^2 + \operatorname{argch}^2 N}}{+ \operatorname{argch}^2 N}$	$x_0 = \frac{1}{k'} \cdot \arctg \left( \frac{k'}{\delta} \operatorname{ch} \delta l \right)$ $k' = \frac{\omega}{c}$ $c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\delta^2 c^2}{\omega^2}}}$

CAU conice și cilindrice în trepte au o largă utilizare în construcția echipamentelor cu ultrasunete datorită simplității tehnologice de execuție a lor. Față de CAU de formă exponențială și catenoidală, concentratoarele conice și cilindrice în trepte au dezavantajul existenței unor tensiuni mecanice foarte mari la cel cilindric în trepte, îndeosebi în zona de trecere, respectiv a unei amplitudini de vibrație relativ mici la cel conic.

Dintre cele patru tipuri de concentratoare prezentate în tabelul 4.3, cel mai mare factor de amplificare a amplitudinii de vibrație îl realizează CAU cilindric în trepte. Acesta se recomandă [36, 92] a fi utilizat la puteri de activare mici și mijlocii și în general la operații tehnologice de finisare și semifinisare, având o bandă relativ îngustă la frecvența de rezonanță. Din acest motiv se



necesită adoptarea pentru acest tip de CAU a unor generatoare de semnal de înaltă frecvență (ultrasunete) în varianta autooscilantă sau cu control automat al frecvenței, puterii de activare sau defazajului.

În schimb, celelalte trei tipuri de concentratoare sunt mai robuste în ceea ce privește tensiunea mecanică și mai stabile, având o bandă mai largă a frecvenței de rezonanță. Se pot încărca cu puteri acustice relativ mari, putând fi utilizate însă tot în regim de finisare și semifinisare datorită amplitudinii de vibrație mici. Pentru regimuri de degroșare, la puteri mari și foarte mari, se recomandă utilizarea unor CAU compuse (complexe).

#### 4.4 ELEMENTE MODIFICATOARE ALE ALGORITMILOR DE CALCUL ȘI GRADUL DE INFLUENȚA A DIFERITILOR PARAMETRI PERTURBATORI

În practica prelucrării dimensionale cu ultrasunete, precum și în alte domenii de aplicare a ultrasunetelor - activarea unor procese fizice, chimice, biologice, măsurători și investigare cu ultrasunete etc. - se utilizează frecvent CAU compuse. De obicei, pe lângă suprafețele de formă exponențială, catenoidală, conică sau cilindrică în trepte, există și alte porțiuni având o formă diferită la ieșirea sau la intrarea în concentrator. OT(S) are în general o formă cilindrică sau prismatică și împreună cu CAU formează un transformator acustic compus [51,52,105,106].

Deasemenea, între cele două tronsoane cilindrice la CAU cilindrice în trepte se adoptă diferite legi de variație a secțiunii în scopul diminuării tensiunii mecanice și evitării pericolului de rupere prin oboseală. Față de elementele geometrice ale CAU determinate în condiții la limită din ecuația generală a propagării undelor (3.12) sau (3.13), lungimea de rezonanță  $l$  și factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  $k$ , sunt influențate de forma suprafeței și de însăși masa concentratorului. O analiză teoretică a acestor aspecte este necesară pentru a se putea stabili soluții raționale la proiectarea lor.

##### 4.4.1 Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă cu obiectul de transfer (scula) atașat

###### 4.4.1.1 Calculul CAU cilindric în trepte cu OT(S) atașat

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte cu OT(S) este prezentată în fig. 4.13.

Aplicând ecuația diferențială (4.5) pentru fiecare tronson  $a$ ,  $b$  și  $c$  și punând condiții la limită corespunzătoare, se obțin următoarele amplitudini de deplasare (vibrație) [56,94]:

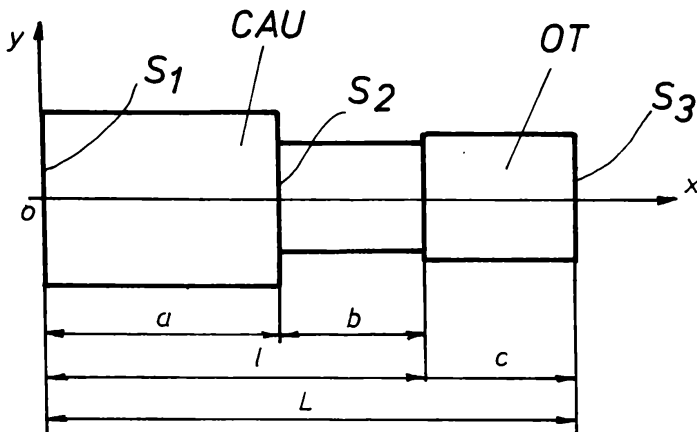


Fig. 4.13

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte cu scula atașată

$a, b, c$  - lungimile tronsoanelor de secțiune  $S_1, S_2$ , respectiv  $S_3$

CAU - concentrator adaptor de undă

OT - obiect de transfer (scula)

$l$  - lungimea CAU

$L$  - lungimea CAU cu OT atașat

a) Tronsonul a

Pentru

$$x=0, \frac{d\xi_1}{dx}=0, \xi_1=\xi_0$$

Se poate scrie:

$$\xi_1 = \xi_0 \cdot \cos kx \quad (4.66)$$

b) Tronsonul b

Pentru

$$S_2 \cdot \frac{d\xi_2}{dx} = S_3 \cdot \frac{d\xi_3}{dx}$$

$$x=l, \xi_3 = \xi_2$$

$$l-a-b, L-l-c,$$

se obține:

$$\xi_2 \cdot \cos kc = \frac{S_3 \cdot \xi_2 \cdot \sin kc + S_1 \cdot \xi_0 \cdot \sin ka \cdot \cos kb}{S_2 \cdot \sin kb} \cdot \cos k(x-a) +$$

$$+ \frac{S_1}{S_2} \cdot \xi_0 \cdot \sin ka \cdot \sin k(x-a) \quad (4.67)$$

Dar  $x = a + b$ , astfel că după înlocuiri succesive se obține:

$$\xi_2 = \frac{S_1 \cdot \xi_0 \cdot \sin ka}{S_2 \cdot \cos kc \cdot \sin kb + S_3 \cdot \sin kc \cdot \cos kb} \quad (4.68)$$

c) Tronsonul c

Pentru

$$x=L, \frac{d\xi_3}{dx} = 0, \xi_3 = \xi_2$$

se obține:

$$\xi_3 = \xi_2 \cdot \cos k(L-x) \quad (4.69)$$

Factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație a concentratorului în planul de separație dintre CAU și OT(S), ținând seama de influența OT(S), se determină cu relația:

$$k_{A_2-3} = \frac{S_1 \cdot \sin ka}{S_2 \cdot \cos kc \cdot \sin kb - S_3 \cdot \sin kc \cdot \cos kb} = \frac{\xi_2}{\xi_1} \quad (4.70)$$

Factorul de amplificare  $k_{A_2-3}$  este maxim atunci când  $(S_1 \cdot \sin ka)$  este maxim, respectiv  $(S_2 \cdot \cos kc \cdot \sin kb - S_3 \cdot \sin kc \cdot \cos kb)$  este minim. Dar  $(S_1 \cdot \sin ka)$  este maxim atunci când:

$$ka = \frac{\pi}{2} \quad (4.71)$$

de unde:

$$a = \frac{\pi}{2k} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\lambda}{4} \quad (4.72)$$

iar:

$$S_2 \cdot \cos kc \cdot \sin kb - S_3 \cdot \sin kc \cdot \cos kb = 0$$

Se consideră la limită:

$$S_2 \cdot \cos kc \cdot \sin kb - S_3 \cdot \sin kc \cdot \cos kb = 0 \quad (4.73)$$

care conduce la :

$$\frac{S_2}{S_3} \cdot \operatorname{tg} kb \cdot \operatorname{ctg} kc - 1 = 0 \quad (4.74)$$

De obicei, pentru CAU cilindric în trepte în  $\lambda/2$  valorile  $a = b = \lambda/4$ , astfel că relația (4.74) permite determinarea lungimii OT(S) la rezonanță, adică:

$$c = \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{S_2}{S_3} \cdot \operatorname{tg} kb \right) \quad (4.75)$$

Influența  $OT(S)$  asupra lungimii de rezonanță  $b$  a tronsonului de secțiune  $S_2$  și a factorului de amplificare a amplitudinii  $k_{A2-0}$  a CAU cilindric în trepte este redată [6,7,19,37,38,56,94] în fig. 4.14 pentru CAU confecționat din

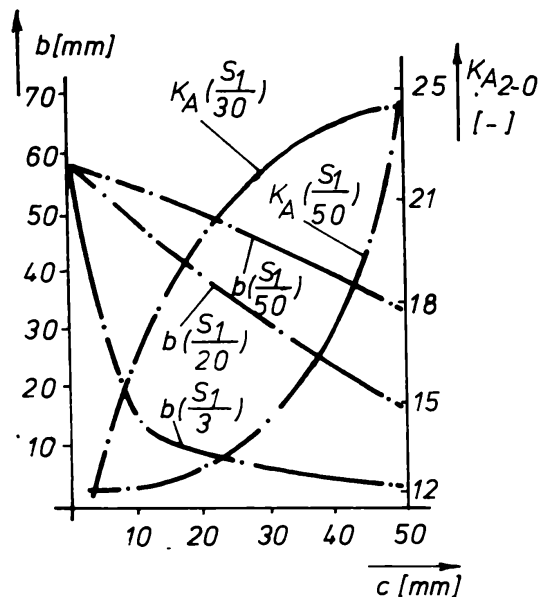


Fig. 4.14

Influența  $OT$  asupra lungimii de rezonanță  $b$  și a coeficientului de amplificare a amplitudinii  $KA_{2-0}$

oțel în  $\lambda/2$  la frecvența de rezonanță de 22 kHz și la diferite valori ale secțiunii  $S_2$ .

Se observă că pentru  $b$  și  $k_{A2-0}$  impuși de construcția echipamentului de prelucrare cu ultrasunete sau de aplicația tehnologică, lungimea sculei variază între limite foarte largi, uzual între  $\lambda/50 \dots \lambda/5$ .

Derivând relația (4.73) și substituind  $tgkb$  în relația (4.74), se obține inegalitatea [19,94]:

$$\frac{S_2}{S_1} \cdot ctgkc < 1 \quad (4.76)$$

de unde:

$$S_1 < S_2 \cdot ctgkc \quad (4.77)$$

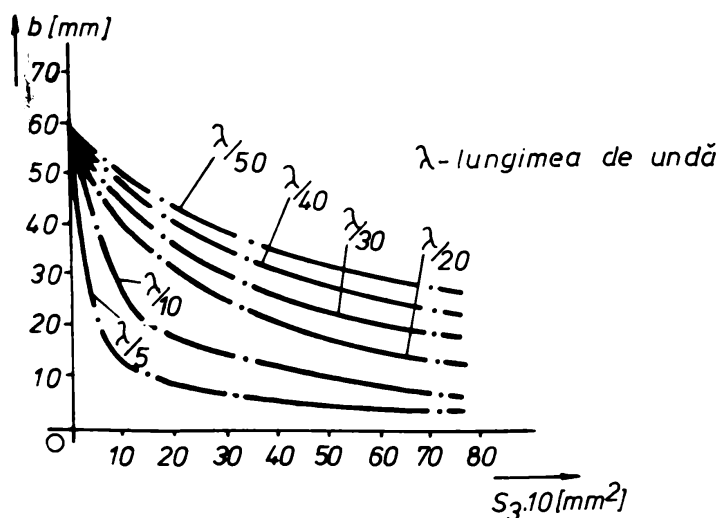


Fig. 4.15

Influența secțiunii  $OT$  asupra lungimii de rezonanță a CAU

Cu această relație se determină valoarea maximală a secțiunii  $S_1$  pentru  $S_2$  dat și  $c$  calculat cu (4.75) pentru care  $\xi_2$  crește față de  $\xi_0$ . Dacă  $OT(S)$  lipsește la capătul concentratorului cilindric în trepte, adică  $c = 0$  și  $kb = \pi/2$ , din (4.70) rezultă.

$$\frac{\xi_2}{\xi_0} = \frac{S_1}{S_2} \quad (4.78)$$

Influența secțiunii sculei de diferite lungimi asupra lungimii de rezonanță a tronsonului de secțiune mică pentru același CAU cilindric în trepte este prezentată [7,94] în fig.4.15.

La aceeași secțiune  $S_1$  a  $OT(S)$ , cu cât scula este mai scurtă, cu atât lungimea tronsonului  $b$  este mai mare. Acesta ajunge la rezonanța proprie atunci când  $S_1 = 0$ , adică  $OT(S)$  este îndepărtat.

Practic, unui CAU existent construit în  $\lambda/2$  și acordat pe frecvența de rezonanță a  $T$ , i se atașează diferite  $OT(S)$  în funcție de caracterul aplicației tehnologice. Problema care se pune este de a stabili secțiunea  $S_1$  și lungimea  $c$  a sculei în așa fel încât ansamblul  $T - CAU - OT(S)$  să lucreze pe aceeași frecvență de rezonanță. Pentru aceasta se consideră scula solitară cu concentratorul, formând un ansamblu rigid care trebuie să asigure o frecvență și o amplitudine a oscilațiilor impuse de procesul tehnologic. Algoritmul de calcul în acest caz, după autor, este următorul:

- se determină factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație cu relația (4.70) cunoscând amplitudinea de vibrație  $\xi_0$  a  $T$ ,  $\xi_2$  fiind impusă de proces;
- se alege constructiv secțiunea de intrare  $S_1$  corelat cu forma și dimensiunile  $T$  pentru a asigura un cuplaj maxim între acesta și CAU;
- se calculează tronsoanele  $a$  și  $b$  astfel ca  $a = b = \lambda/4$ ;
- se alege arbitrar secțiunea  $S_2$  astfel ca tensiunea mecanică în planul de reducere a secțiunii  $S_1/S_2$  să fie minimă;
- se determină lungimea  $c$  și secțiunea  $S_3$  a sculei cu ajutorul relației (4.75) cu respectarea condiției (4.77) și a criteriului de reducere a tensiunii mecanice în planul de micșorare a secțiunii  $S_2/S_3$ .

#### 4.4.1.2 Calculul CAU exponențial cu $OT(S)$ atașat

Schema de calcul a CAU exponențiale cu  $OT(S)$  atașat este redată în fig.4.16.

Ecuațiile diferențiale ale propagării oscilațiilor longitudinale în CAU exponențiale și cilindrice în trepte sunt date de relațiile (4.5) și (4.40) care au soluțiile (4.6), respectiv (4.41).

Raportul de amplificare al amplitudinilor de vibrație se determină din egalitatea amplitudinilor și a forțelor în secțiunea de trecere pentru  $x = a$ :

$$\xi_{0-1}(x) \Big|_{x=a} = \xi_{1-2}(x) \Big|_{x=0} \quad (4.79)$$

respectiv:

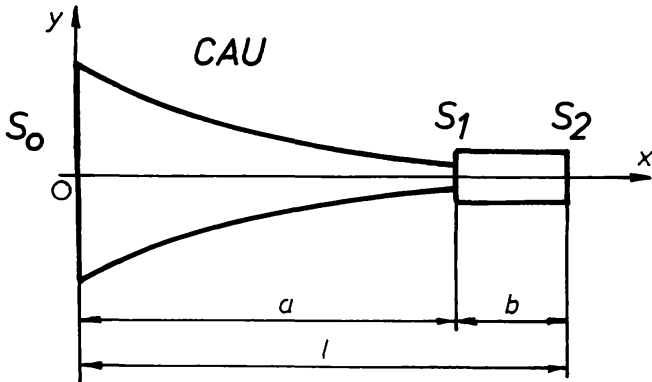


Fig.4.16

Schema de calcul a CAU exponențial  
cu scula atașată

$S_0, S_1, S_2$  - secțiunile de intrare și ieșire din CAU, respectiv secțiunea sculei

CAU - concentrator adaptor de undă  
 $a, b, l$  - lungimea CAU, a sculei, respectiv a ansamblului CAU-sculă

$$E_1 \cdot S_1 \cdot \frac{d\xi_{0-1}}{dx} \Big|_{x=a} =$$

$$= E_2 \cdot S_2 \cdot \frac{d\xi_{1-2}}{dx} \Big|_{x=a} \quad (4.80)$$

Derivând (4.41) și (4.6) în raport cu  $x$  și înlocuind  $x = a$  în relațiile (4.5), (4.40), (4.6) și (4.41), se obține:

$$\xi_0 \cdot e^{\beta a} \cdot \left( \cos k'a - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k'a \right) - \xi_1 \cdot \cos k(l-a) \quad (4.81)$$

$$-E_1 \cdot S_1 \cdot \xi_0 \cdot e^{\beta a} \cdot \left( k' + \frac{\beta^2}{k'} \right) \cdot \sin k'a = E_2 \cdot S_1 \cdot k \cdot \xi_1 \cdot \sin kb \quad (4.82)$$

Pentru același material al CAU și OT(S),  $E_1 = E_2$ , iar factorul de amplificare dedus din relația (4.82) este:

$$k_A = \frac{\xi_1}{\xi_0} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{e^{\beta a} \cdot \left( k' + \frac{\beta^2}{k'} \right) \cdot \sin k'a}{k \cdot \sin kb} \quad (4.83)$$

care după transformări devine:

$$k_A = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{e^{\beta a} \cdot (k^2 + \beta^2) \cdot \sin k'a}{k \cdot k' \cdot \sin kb} \quad (4.84)$$

Se deduce în continuare factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație din ecuația (4.81):

$$k_A = \frac{\xi_1}{\xi_0} = e^{\beta a} \cdot \frac{\cos k'a - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k'a}{\cos kb} \quad (4.85)$$

Dar:

$$e^{\beta a} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad \text{și} \quad l = a + b$$

Astfel că:

$$k_A = \frac{\xi_1}{\xi_0} = \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \cdot \frac{\cos k'a - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k'a}{\cos kb} \quad (4.86)$$

Tinând cont că  $S_1 = S_0 \cdot e^{-2\beta a}$  și egalând relațiile (4.84) și (4.85), se obține:

$$\operatorname{ctg} k'a - \frac{\beta}{k'} = -\frac{S_1}{S_2} \cdot \operatorname{ctg} kb \cdot \frac{k'^2 + \beta^2}{k'} \quad (4.87)$$

de unde se deduce lungimea de rezonanță a CAU exponențial:

$$\left\{ a = \frac{1}{k'} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{\beta}{k'} - \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{k'^2 + \beta^2}{k'} \cdot \operatorname{ctg} kb \right] \right. \quad (4.88)$$

Plecând de la  $S_x = S_0 \cdot e^{-2\beta x}$ , pentru  $x = a$  rezultă:

$$S_1 = S_0 \cdot e^{-2\beta a} \quad (4.89)$$

de unde:

$$a = \frac{1}{2\beta} \cdot \ln \frac{S_0}{S_1} \quad (4.90)$$

Practic, pentru  $S_0$ ,  $S_1$  și  $b$  date constructiv și în funcție de aplicația tehnologică, se calculează lungimea de rezonanță a CAU exponențial a din relațiile (4.88) și (4.90), impunând următoarele condiții la limită [7,94]:

a) Raportul secțiunilor de intrare și ieșire din CAU exponențial cu  $OT(S)$  atașat să fie pozitiv, dar subunitar:

$$0 < \frac{S_2}{S_0} < 1 \quad (4.91)$$

b) Coeficientul de reducere a secțiunii exponențiale trebuie să fie supraunitar pentru ca relația (4.89) să aibă sens, dar inferior unui coeficient critic ce afectează lungimea de rezonanță în  $\lambda/2$  a CAU:

$$1 < \beta < \beta_{cr} \quad (4.92)$$

c) Lungimea OT(S), din considerente constructiv-funcționale, se necesită a fi inferioară  $\lambda/4$ .

$$0 < b < \frac{\lambda}{4} \quad (4.93)$$

Influența OT(S) asupra lunginii de rezonanță a a CAU exponențial și a factorului de amplificare a amplitudinii de vibrație  $k_A$  pentru un ansamblu CAU-OT(S) confecționat din oțel în  $\lambda/2$  la frecvența de 22 kHz și la diferite rapoarte a secțiunii de trecere, este redată [6,7,94] în fig.4.17.

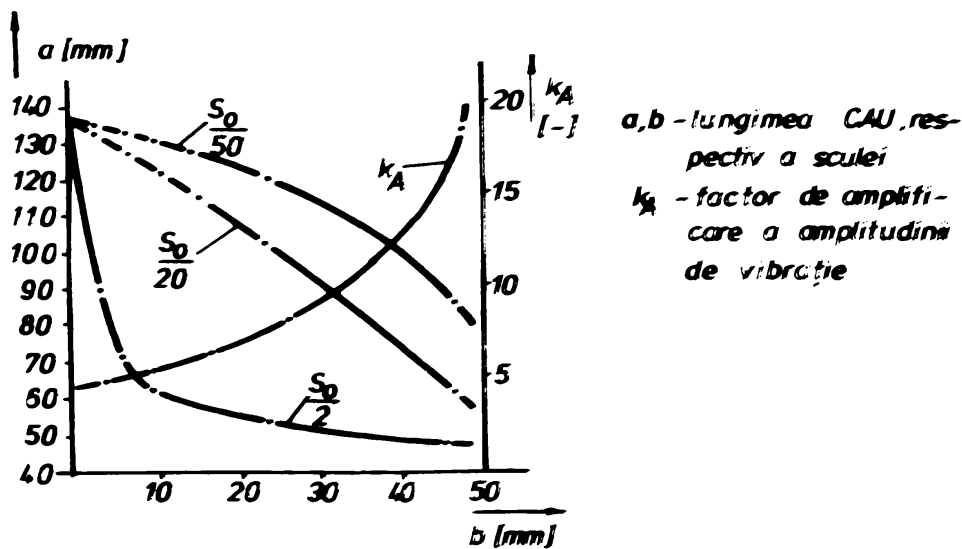


Fig. 4.17

Influența sculei asupra lunginii de rezonanță și factorului de amplificare a amplitudinii la un CAU exponențial

Lungimea sculei poate fi aleasă între limite largi, de la  $\lambda/5$  până la  $\lambda/50$ , fapt ce conduce la o variație a lunginii de rezonanță a a CAU între 50...130 mm. Pentru  $k_A$  impus de procesul tehnologic și  $b$  dat, lungimea de rezonanță a CAU se stabilește corelat cu raportul secțiunilor  $S_2/S_0$ . De exemplu, pentru  $S_2/S_0 = 0.5$ ,  $b = 10$  mm,  $k_A = 10$ .



intrare  $S_0$  în CAU se determină din considerente constructive și de cuplaj mecanic cu T.

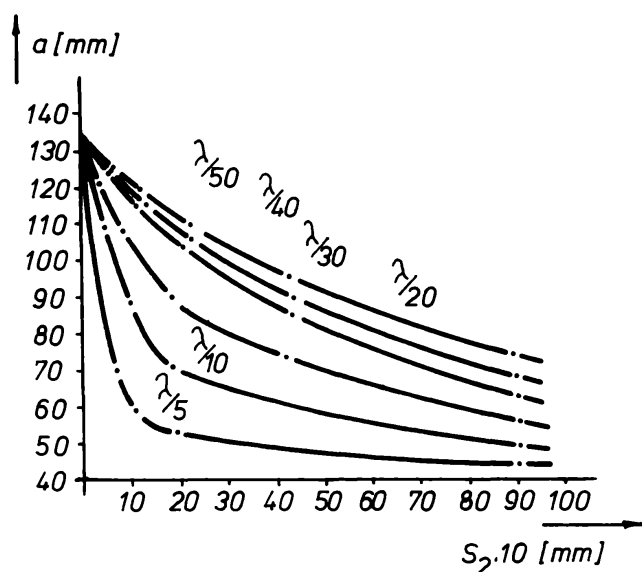


Fig. 4.18

Variația lungimii de rezonanță a CAU exponențial în funcție de lungimea sculei

- a - lungimea CAU
- $\lambda$  - lungimea de undă
- $S_2$  - secțiunea sculei

corelat cu forma și dimensiunile T pentru a asigura un cuplaj maxim între acesta și CAU;

- pentru o aplicație dată, se indică secțiunea  $S_2$ , lungimea b și amplitudinea de vibrație  $\xi_1$  la suprafața de lucru a OT(S), amplitudinea de vibrație  $\xi_0$  a T fiind cunoscută;

- se calculează lungimea de rezonanță a a CAU cu relația (4.66) respectând condițiile (4.91) și (4.92) pentru un coeficient de reducere a secțiunii S ales constructiv;

- se determină factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  $k_a$  cu relația (4.65);

În mod similar decurg calculele și pentru CAU catenoidali și conici cu scule atașate [94].

Cercetările întreprinse [36, 56, 98] conduc la formularea următoarelor concluzii asupra influenței OT(S) atașate asupra parametrilor acustici ai CAU:

- atașarea sculei determină întotdeauna micșorarea lungimii de rezonanță a concentratorului;

- micșorarea lungimii de rezonanță a CAU este cu atât mai mare cu cât este mai mare masa sculei atașate;

În funcție de secțiunea sculei  $S_2$ , variația lungimii de rezonanță a a CAU exponențial este redată, pentru aceleași condiții de lucru descrise anterior, pentru mai multe lungimi a OT(S) [6, 7, 94] în fig. 4.18.

Pentru  $S_2$ , lungimea de rezonanță a a CAU exponențial se află într-un raport invers proporțional cu lungimea sculei.

Algoritmul de calcul stabilit de autor în acest caz este următorul:

- se alege constructiv secțiunea de intrare  $S_0$

- variația lungimii de rezonanță a concentratorului prin atașarea sculei este mai mare cu cât factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  $k_a$  este mai mare;
- atașarea unei scule de lungime mică și secțiune transversală mare conduce la micșorarea amplitudinii de vibrație la capătul OT(S).

#### 4.4.2 Calculul concentratoarelor adaptoare de undă cilindrice în trepte având o secțiune variabilă la trecerea între tronsoane

Schema de calcul a CAU cilindrice în trepte cu secțiune variabilă la trecerea între tronsoane este redată în fig. 4.19.

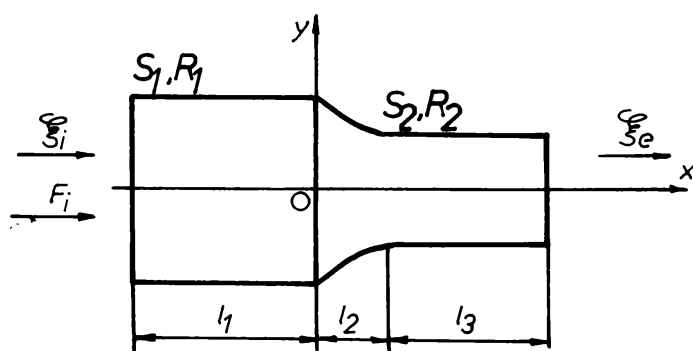


Fig. 4.19

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte cu secțiune variabilă la trecerea între tronsoane

$S_1, S_2, R_1, R_2$  - secțiunile, respectiv razele celor două tronsoane

$\xi_i, \xi_e$  - amplitudinea de vibrație la intrarea, respectiv ieșirea din CAU

$F_i$  - forțele ce acționează asupra CAU de secțiune  $S_1$

$l_1, l_2, l_3$  - lungimile fiecărui tronson

tronsonul  $l_2$ ;

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{- număr de undă,}$$

$$k_p = \frac{d\psi}{dx} \quad \text{- constantă în raport cu abscisa, dar dependentă de frecvență,}$$

$\psi(x)$  - faza spațială a amplitudinii de vibrație,

care reprezintă ecuația diferențială a razei suprafeței de rotație pe lungimea  $l_1$ .

Dacă pentru tronsoanele  $l_1$  și  $l_3$  se aplică ecuația de propagare a oscilațiilor în bare cu secțiune constantă (4.5), atunci pentru rezolvarea ecuației profilului  $l_2$  se pornește de la relația (4.16):

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + (k_p^2 - k^2) \cdot y = 0$$

unde:

$y = y(x)$  - raza secțiunii circulare la distanța  $x$  variabilă în

Prin ipoteza [115], suprafața  $S_z$  depinde de  $x$ , dar nu depinde de timp, adică de frecvență. Prin urmare, este necesar să fie îndeplinită condiția:

$$k_p^2 - k^2 = \text{constant} \quad (4.94)$$

astfel încât pentru rezolvarea ecuației (4.18) există două posibilități [70,115]:

a) Constanta este nulă, adică:

$$k_p^2 - k^2 = 0, k_p = k \quad (4.95)$$

Această condiție arată că propagarea în CAU este nedisipativă deoarece constanta de fază în concentrator este proporțională cu frecvența. Faza spațială este dată de relația:

$$\psi(x) = k \cdot x = \frac{\omega}{c} \cdot x \quad (4.96)$$

iar timpul de întârziere de grup [115]:

$$\tau_g = \frac{d\psi}{d\omega} = \frac{x}{c} \quad (4.97)$$

Relația (4.97) arată că timpul de întârziere este liniar funcție de coordonată și independent față de frecvență.

b) Constanta este nenulă, adică:

$$k^2 - k_p^2 = \left(\frac{m}{2}\right)^2, m \in \mathbb{R} \quad (4.98)$$

de unde:

$$k_p = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m}{2}\right)^2} \quad (4.99)$$

$m$  - coeficient de expansiune (coeficient de reducere a secțiunii), condiție care arată că propagarea este dispersivă întrucât  $k_p$  nu mai este proporțional cu frecvența.

Faza spațială în acest caz:

$$\psi(x) = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{m}{2}\right)^2} \cdot x \quad (4.100)$$

nu mai este proporțională cu frecvența, iar timpul de întârziere de grup este real numai dacă  $k > m/2$ , însă nu mai este constant:

$$\tau_g = \frac{d\psi}{d\omega} = \frac{k \cdot x}{\sqrt{\omega^2 - \left(\frac{2c}{m}\right)^2}} \quad (4.101)$$

#### 4.4.2.1 Calculul CAU cilindric în trepte având o suprafață conică la trecerea între tronsoane

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte cu suprafață conică la trecerea între tronsoane este prezentată în fig. 4.20.

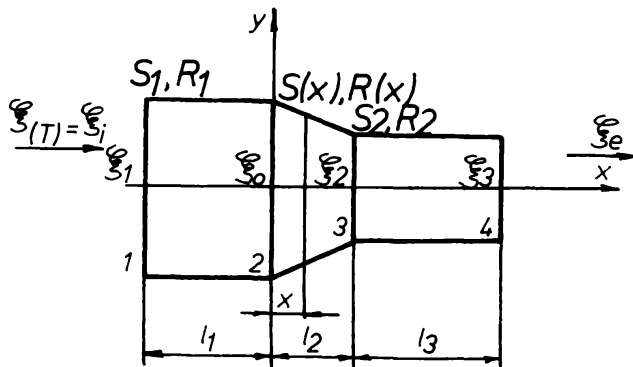


Fig. 4.20

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte cu suprafața conică la trecerea între tronsoane  
 $S_1, S_2, R_1, R_2$  - secțiunile, respectiv razele celor două tronsoane

$S(x), R(x)$  - secțiunea, respectiv raza în porțiunea conică la distanța  $x$  față de planul de referință

$\xi_i, \xi_r, \xi_e$  - amplitudinea de vibrație a  $T$ , respectiv de intrare și ieșire din CAU

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  - amplitudinile de vibrație ale CAU în punctele 1, 2, 3, și 4

$l_1, l_2, l_3$  - lungimile fiecărui tronson

În acest caz  $k = k_p$  și se obține ecuația:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (4.102)$$

de unde:

$$dy/dx = \text{constant} \quad (4.103)$$

Din tabelul 4.2, ecuația curbei pentru suprafața conică conform fig. 4.20 este:

$$y = \frac{R_2 - R_1}{l_2} x + R_1 \quad (4.104)$$

iar:

$$S(x) = S_1 \cdot (l_2 - \alpha x)^2 \quad (4.105)$$

unde:

$$\alpha = \frac{R_1 - R_2}{R_1 \cdot l_2} \quad - \text{coeficient de reducere a secțiunii;}$$

Pentru tronsonul 1 - 2 (CAU cilindric cu  $S_1 = \text{constant}$ ), soluția ecuației (4.5) este de forma:

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot \text{sink}l_1 \cdot (-\text{sink}x + \text{ctg}kl_1 \cdot \text{cos}kx) \quad (4.106)$$

iar  $x \in [-l_1, 0]$

Când  $x = -l_1$ , atunci  $\xi(-l_1) = \xi_1 = \xi_r$ , adică amplitudinea de vibrație a CAU în planul 1 este egală cu cea a T, iar pentru  $x = 0$ :

$$\xi(0) = \xi_o = \xi_1 \cdot \text{cos}kl_1 \quad (4.107)$$

Amplitudinea maximă de vibrație pe acest tronson se obține atunci când  $d\xi/dx = 0$ , adică atunci când tensiunea mecanică în material este nulă:

$$\xi_1 \cdot \text{sink}l_1 \cdot (-\text{cos}kx + \text{ctg}kl_1 \cdot \text{sin}kx) = 0 \quad (4.108)$$

de unde rezultă poziția ventrului:

$$x_m = \frac{1}{k} \cdot \text{arctg}(tgkl_1) \quad (4.109)$$

Pentru tronsonul 2 - 3 (CAU conic ce îndeplinește relația (4.105)), soluția ecuației (4.20) este:

$$\xi(x) = \xi_o \cdot \frac{1}{1 - \alpha x} \cdot (\text{cos}kx - \frac{\alpha}{k} \cdot \text{sin}kx) \quad (4.110)$$

punând condiții la limită, când  $x = 0$  se obține:

$$\xi(0) = \xi_0 = \xi_1 \cdot \cos kl_1 \quad (4.111)$$

respectiv, pentru  $x = l_2$ ,

$$\xi(l_2) = \xi_2 = \xi_0 \cdot \frac{1}{1 - \alpha l_2} \cdot \left( \cos kl_2 - \frac{\alpha}{k} \cdot \sin kl_2 \right) \quad (4.112)$$

Calculând  $d\xi/dx = 0$ , se obține coordonata pentru care amplitudinea de vibrație este maximă:

$$x_{\max} = \frac{\pi}{2k} \quad (4.113)$$

Pentru tronsonul 3 - 4 (CAU cilindric cu  $S_2 = \text{constant}$ ), soluția ecuației (4.5) este de forma:

$$\xi(x) = \xi_2 \cdot N^2 \cdot \sin kl_1 \cdot [-\sin l(x - l_2) - \text{ctg} k(l_2 + l_3) \cdot \cos k(x - l_2)] \quad (4.114)$$

La limită, pe de o parte  $x = l_2$  și se obține:

$$\xi(l_2) = \xi_2 \cdot N^2 \cdot \sin kl_1 \cdot [-\text{ctg} k(l_2 + l_3)] \quad (4.115)$$

iar pe de altă parte  $x = l_3$  și rezultă:

$$\xi(l_3) = \xi_3 = \xi_e = \xi_2 \cdot N^2 \cdot \sin kl_1 \cdot [-\sin k(l_3 - l_2) - \text{ctg} k(l_2 + l_3) \cdot \cos k(l_3 - l_2)] \quad (4.116)$$

Coeficientul de amplificare al CAU cilindric în trepte cu suprafață conică de trecere între tronsoane se deduce [57,70,95] din egalitatea amplitudinilor - relațiile (4.112) și (4.114) - și a forțelor în secțiunea 3. Astfel, din egalitatea amplitudinilor se obține:

$$k_2 = \frac{\xi_2}{\xi_0} = \frac{1}{1 - \alpha l_2} \cdot \frac{\cos kl_2 - \frac{\alpha}{k} \cdot \sin kl_2}{N^2 \cdot \sin kl_1 \cdot [-\text{ctg} k(l_2 + l_3)]} \quad (4.117)$$

iar din egalizarea forțelor

$$E_2 \cdot S_2 \cdot \frac{d\xi_{2-3}}{dx} \Big|_{x=l_2} = E_3 \cdot S_3 \cdot \frac{d\xi_{3-2}}{dx} \Big|_{x=l_2}$$

pentru același material și  $S_2 = S_3 = \text{constant}$ , după înlocuiri și transformări succesive se ajunge la:

$$k_A = \frac{1}{1 - \alpha l_2} \cdot \frac{\frac{\alpha}{1 - \alpha l_2} \cdot (\cos kl_2 - \frac{\alpha}{k} \cdot \sin kl_2) + (\sin kl_2 - \frac{\alpha}{k} \cdot \cos kl_2)}{N^2 \cdot \sin kl_1} \quad (4.116)$$

În general, aplicația tehnologică ce necesită astfel de CAU, impune constructiv alegerea  $R_1, R_2, l_1, l_2$  și a factorului de amplificare a amplitudinii de

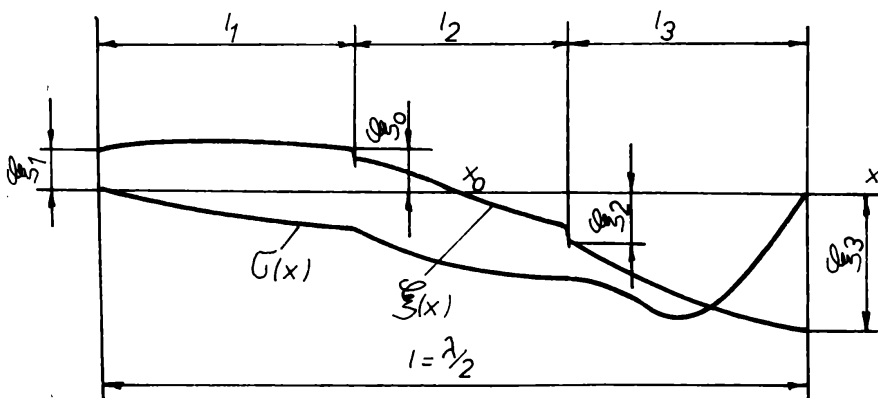


Fig. 4.21

Variația amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x$

$\xi_1, \xi_0, \xi_2, \xi_3$  - amplitudinea de vibrație la intrarea în CAU, în planul de referință, la intrarea, respectiv ieșirea din ultimul tronson

$l_1, l_2, l_3, l$  - lungimile tronsoanelor, respectiv a CAU

$x_0$  - nodul de oscilație

$\lambda$  - lungimea de undă

vibrație  $k_A$ . Lungimea de rezonanță în condiții date - materialul CAU, frecvența de rezonanță și amplitudinea  $T$  etc. - a suprafeței conice se determină din relația (4.117) și/sau (4.116). Diagrama amplitudinii de oscilație și a tensiunii meca-

nice pentru un CAU dimensionat în  $\lambda/2$  este redată în fig. 4.21.

#### 4.4.2.2 Calculul CAU cilindric în trepte având o suprafață catenoidală la trecerea între tronsoane

Schema de calcul a acestui tip de concentrator este prezentată în

fig. 4.22.

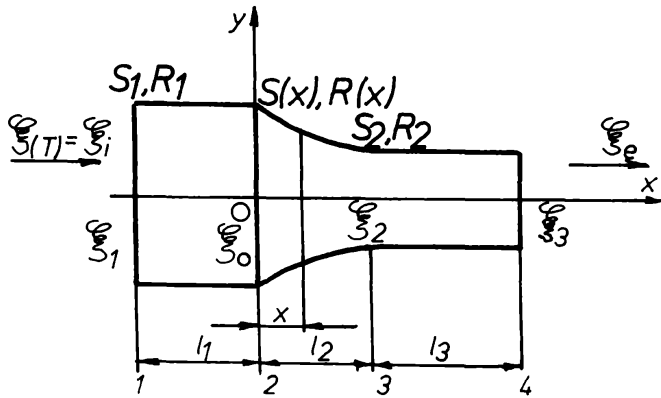


Fig. 4.22

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte cu suprafața catenoidală la trecerea între tronsoane

$S_1, S_2, R_1, R_2$  - secțiunile, respectiv razele celor două tronsoane

$S(x), R(x)$  - secțiunea, respectiv raza în porțiunea catenoidală la distanța  $x$  față de planul de referință

$\xi(T), \xi_i, \xi_e$  - amplitudinea de vibrație a  $T$ , respectiv de intrare și ieșire din CAU

$\xi_1, \xi_0, \xi_2, \xi_3$  - amplitudinile de vibrație ale CAU, în punctele 1, 2, 3 și 4

$l_1, l_2, l_3$  - lungimile fiecărui tronson

Pentru  $k \neq k_p$ , ecuația (4.18) devine:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{1}{h^2} \cdot y = 0$$

(4.119)

și

$$k^4 = k_p^2 + \frac{1}{h^2}, m = 2h$$

care are soluția generală de forma [115].

$$y = A \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{h} + B \cdot \operatorname{sh} \frac{x}{h}$$

(4.120)

În relația (4.120) sunt cuprinse două soluții particulare:

a)  $y = A \cdot e^{\frac{x}{h}}$ ,

și CAU are un profil de trecere de formă exponențială,

b)  $y = A \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{h}$ .

și CAU are un profil de trecere de formă catenoidală.

În cazul a), pentru tronsoanele 1 - 2 și 3 - 4 relațiile de calcul sunt cele de la CAU cilindric în trepte cu profil conic în zona de trecere. Interesează în continuare tronsonul 2 - 3, pentru care soluția ecuației (4.40) are următoarea formă:

$$\xi(x) = \xi_0 \cdot e^{\beta x} \cdot \left( \cos k'x - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k'x \right) \quad (4.121)$$



Punând condiții inițiale și la limită [56,70], pentru  $x = 0$  se obține  $\xi(0) = \xi_0$ , iar pentru  $x = l_2$ :

$$\xi(l_2) = \xi_2 = \xi_0 \cdot e^{\beta l_2} \cdot \left( \cos k' l_2 - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k' l_2 \right) \quad (4.122)$$

Coordonata  $x$  pentru care amplitudinea de vibrație este maximă se calculează punând condiția  $d\xi/dx = 0$ , de unde:

$$x_{\max} = \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} \left( \beta \cdot \frac{k-1}{k^2 + \beta^2} \right) \quad (4.123)$$

În mod analog, amplitudinea maximă de vibrație pentru tronsonul 3 - 4 se determină cu:

$$x_{\max} = l_2 + \frac{1}{k} \cdot \operatorname{arctg} [\operatorname{ctgk}(l_2 + l_3)] \quad (4.124)$$

Egalând amplitudinile de vibrație în planul 3 se obține:

$$\xi_0 \cdot e^{\beta l_2} \cdot \left( \cos k' l_2 - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k' l_2 \right) - \xi_2 \cdot N^2 \cdot \sin k l_1 \cdot [-\operatorname{ctgk}(l_2 + l_3)] \quad (4.125)$$

de unde se deduce factorul de amplificare a amplitudinii:

$$K_A = \frac{\xi_2}{\xi_0} = \frac{e^{\beta l_2}}{N^2} \cdot \frac{\cos k' l_2 - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k' l_2}{\sin k l_1 \cdot [-\operatorname{ctgk}(l_2 + l_3)]} \quad (4.126)$$

Egalând forțele în planul 3:

$$\xi_0 \cdot e^{\beta l_2} \cdot \left[ \beta \cdot \cos k' l_2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{k} \right) - \sin k' l_2 \cdot \left( 1 + \frac{\beta^2}{k} \right) \right] = \xi_2 \cdot N^2 \cdot \sin k l_1 \quad (4.127)$$

se deduce factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație:

$$k_A = \frac{\xi_2}{\xi_0} = \frac{e^{\beta l_2}}{N^2} \cdot \frac{\beta \cdot \cos k'l_2 \cdot (1 - \frac{1}{k}) - \sin k'l_2 \cdot (1 + \frac{\beta^2}{k})}{\sin kl_1} \quad (4.126)$$

În condiții constructiv-tehnologice date, considerând elementele  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  și  $\beta$  cunoscute iar  $k$  impus de procesul tehnologic, se determină lungimea de rezonanță  $l_2$  a porțiunii exponențiale a CAU din relațiile (4.127) și (4.128).

În mod similar se calculează și CAU cilindrice în trepte având o suprafață de trecere între tronsoane de formă catenoidală (cazul b). Pentru tronsonul 2 - 3 (fig.4.22) soluția ecuației (4.56) este de forma:

$$\xi(x) = \xi_0 \cdot \frac{\operatorname{ch} \gamma l_2}{\operatorname{ch} \gamma (l_2 - x)} \cdot (\cos k'x - \frac{\gamma}{k'} \cdot \operatorname{th} \gamma l_2 \cdot \sin k'x) \quad (4.129)$$

Din condițiile inițiale și la limită [56,70], pentru  $x = 0$  și  $x = l_2$ , se obține:

$$\xi(0) = \xi_0 \quad (4.130)$$

și

$$\xi(l_2) = \xi_2 = \xi_0 \cdot \operatorname{ch} \gamma l_2 \cdot (\cos k'l_2 - \frac{\gamma}{k'} \cdot \operatorname{th} \gamma l_2 \cdot \sin k'l_2) \quad (4.131)$$

Prin egalizarea amplitudinilor de vibrație în planul 3, se obține factorul de amplificare:

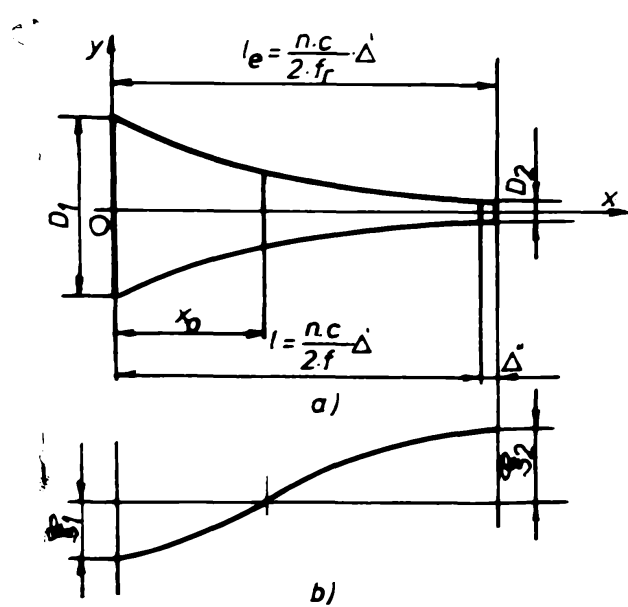
$$k_A = \frac{\operatorname{ch} \gamma l_2}{N^2} \cdot \frac{\cos k'l_2 - \frac{\gamma}{k'} \cdot \operatorname{th} \gamma l_2 \cdot \sin k'l_2}{\sin kl_1 \cdot [-\operatorname{ctg} k(l_2 + l_3)]} \quad (4.132)$$

Elementele constructive ale acestui tip de concentrator se determină ca și la CAU cilindrice în trepte cu secțiuni de trecere între tronsoane de formă conică.

La CAU cilindrice în trepte cu secțiune variabilă de trecere între tronsoane, indiferent de profilul acesteia, se reduce raportul de amplificarea amplitudinii de vibrație pe ansamblu [94], dar în același timp se diminuează și tensiunea mecanică maximă, fapt ce asigură o durabilitate mai mare în timp. Zonele de trecere exponențiale și catenoidale asigură o lungime de rezonanță mai mică decât cea conică [115].

#### 4.4.3 Influența factorului de amplificare și a masei concentratorului adaptor de undă asupra lungimii și a frecvenței sale de rezonanță

Se consideră un CAU de forma unei bare de secțiune circulară variabilă prezentat în fig.4.23 a și b, având lungimea de rezonanță:



$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (4.133)$$

și  $\lambda = \frac{c'}{f}$

respectiv:

$$l = n \cdot \frac{1}{2f} \cdot c' \quad (4.134)$$

Pentru CAU conice, se poate scrie:

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \alpha^2 \cdot \frac{c^2}{\omega^2}}} \quad (4.134)$$

unde:  $\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 \cdot l}$

Fig. 4.23

Influența factorului de amplificare și a masei CAU asupra lungimii și frecvenței de rezonanță

$l, l_e$  - lungimea de rezonanță corectată cu  $\Delta'$ , respectiv efectivă a CAU

$D_1, D_2$  - diametrul de intrare, respectiv de ieșire din CAU

$x_0$  - nodul de oscilație

$\beta_1, \beta_2$  - amplitudinea de vibrație la intrarea, respectiv ieșirea din CAU

$\Delta', \Delta''$  - factori de corecție

iar din relația (4.30) se obține

lungimea de undă în funcție de factorul de amplificare [71]:

$$\lambda^2 = \frac{4\pi^2 l^2}{k_A^2 - 1} \quad (4.135)$$

Inlocuind în (4.134)

$$\frac{c^2}{\omega^2} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2},$$

unde  $\lambda^2$  se ia din (4.135), se obține lungimea de rezonanță:

$$l = \frac{n \cdot c}{2f} \cdot \Delta' \quad (4.136)$$

unde:

$$\Delta' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c^2 \cdot l^2}{k_A^2 - 1}}} \quad (4.137)$$

și reprezintă corecția de lungime datorită influenței factorului de amplificare a amplitudinii de vibrație.

Dacă CAU are un profil exponențial, atunci din

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\beta^2 \cdot c^2}{\omega^2}}} \quad \text{și} \quad D_x = D_1 \cdot e^{-\beta x}$$

se obține pentru  $\kappa = 1$  corecția de lungime [71]:

$$\Delta' = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\ln M \cdot c}{\omega \cdot l}\right)^2}} \quad (4.138)$$

Pentru modurile de vibrație  $n = 1$  și  $n = 2$  în funcție de diferite valori ale factorului de amplificare a amplitudinii  $k_A$ , mărimea corecției de lungime  $\Delta'$  este indicată în tabelul 4.4 [125].

Asemănător, pentru CAU catenoidale caracterizate de relațiile:

TABELUL 4.4

Factor de amplificare $k_n$	Corecția de lungime $\Delta'$	
	$n = 1$	$n = 2$
1	1,0000	1,0000
2	1,0240	1,0060
3	1,0590	1,0150
4	1,0930	1,0240
5	1,1230	1,0322
6	1,1513	1,0398
7	1,1760	1,0468
8	1,1880	1,0501
9	1,2399	1,0593
10	1,2499	1,0650
11	1,2582	1,0704
12	1,2753	1,0754
13	1,2912	1,0801
14	1,3063	1,0847
15	1,3206	1,0890

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\gamma^2 \cdot c^2}{\omega^2}}}$$

și

$$\gamma = \frac{1}{l} \cdot \operatorname{arcc}hN$$

se obține corecția de lungime datorită factorului de amplificare:

$$\Delta' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\operatorname{arcc}h^2 N \cdot c^2}{l^2 \cdot \omega^2}}} \quad (4.139)$$

Influența factorului de amplificare a amplitudinii de vibrație asupra lungimii de rezonanță este demonstrată teoretic prin relațiile (4.137), (4.138) și (4.139). Deși în [25] au fost efectuate determinări de laborator pentru CAU exponențiale (v. tabelul 4.4), nu de fiecare dată acestea au fost confirmate practic [36].

Pentru cele trei tipuri de concentratoare corectate cu  $\Delta'$  sau efectuat

cercetări experimentale [3,25,36] privind influența masei și lungimii CAU asupra frecvenței de rezonanță. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 4.5.

TABELUL 4.5

Tipul concentra- torului	Lungimea corectată l [mm]	Frecvența de rezonanță		Abaterea frecvenței Δf [Hz]	Masa concentra- torului m [kg]
		calcu lată f <sub>c</sub> [Hz]	reală f <sub>r</sub> [Hz]		
Conic	174,58	20000	19260	740	1,060
	178,97	19500	18490	1010	1,100
	188,64	18500	17300	1200	1,200
Exponențial	174,58	20000	19520	480	0,519
	178,97	19500	18820	680	0,720
	188,64	18500	17600	900	0,916
Catenoidal	174,58	20000	19560	440	0,375
	178,97	19500	18920	580	0,490
	188,64	18500	17800	700	0,600

Se observă că pentru toate cazurile studiate frecvența reală de rezonanță este mai mică decât cea calculată, abaterea fiind mai mare cu cât masa concentratorului este mai mare. Dacă se fixează pe CAU o sarcină de masă m<sub>i</sub> determinată prin cântărire, dezacordarea relativă γ<sub>i</sub> față de frecvența de rezonanță introdusă de o masă m se poate determina cu relația:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\sqrt{\gamma_i^2 \cdot (m_i - m) + 2\gamma_i \cdot (m_i - m) + m_i}}{(1 + \gamma_i) \cdot m_i} \quad (4.140)$$

unde:

Δf - deviația de frecvență măsurată experimental;

f<sub>0</sub> - frecvența de rezonanță a CE fără OT(S).

Dezacordul de frecvență relativ introdus de sarcina cu masa m mai poate fi determinat în mod aproximativ cu relația [30]:

$$\frac{\Delta f}{\bar{f}_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{m}{m_i} \cdot \left[1 - \frac{1}{(1 + \gamma_i)^2}\right]}} \quad (4.141)$$

Se poate determina și masa admisibilă  $m_a$  a ansamblului mecanic CAU - OT(S) [3] astfel încât acesta să oscileze în banda de frecvență pentru care a fost proiectat:

$$m_a = m_i \cdot \frac{\gamma_a \cdot (2 + \gamma_a) \cdot (1 + \gamma_i)^2}{(\gamma_i^2 + 2\gamma_i) \cdot (1 + \gamma_a)^2} \quad (4.142)$$

unde:

$\gamma_a$  - dezacordarea relativă admisibilă ce asigură vibrarea concentratorului în banda de frecvență în care acesta este la rezonanță;

Dacă s-a determinat dezacordul  $\gamma_i$  provocat de acțiunea unei sarcini având masa  $m_i$ , pentru găsirea masei admisibile a sarcinii se poate utiliza și formula [30]:

$$m_a = \frac{1 - \frac{1}{(1 + \gamma_a)^2}}{1 - \frac{1}{(1 + \gamma_i)^2}} \quad (4.143)$$

Intrucât dezacordarea relativă  $\gamma_i$  sau absolută  $\gamma_a$  față de frecvența de rezonanță reprezintă particularități pentru fiecare tip de concentrator și este influențată de materialul CAU, compoziția și gradul de omogenitate structurală ai acestuia, face ca utilizarea practică a relațiilor (4.140) și (4.142) după [3,25] să fie limitată. Relațiile (4.141) și (4.143) au fost determinate experimental numai pentru cazul în care dimensiunile sarcinii sunt mult mai mici decât lungimea de undă, uzual de 20...30 ori. Mărimile  $\gamma_i$  și  $\gamma_a$  sunt întotdeauna negative deoarece sub acțiunea unei mase concentrate frecvența de rezonanță a CE se micșorează [30].

Utilizând frecvența reală  $f_r$  a sistemului acustic rezonant, lungimea efectivă a concentratorului se poate calcula cu:

$$l_e = \frac{n \cdot C}{2f_r} \cdot \Delta' \quad (4.144)$$

Intrucât  $f_r < f_c - f_0$ , rezultă că  $l_e > l$ . Factorul de corecție a lungimii concentratorului datorită influenței masei este dat de (v. fig. 4.23.a):

$$\Delta'' = l_e - l \quad (4.145)$$

care se mai poate scrie [3].

$$\Delta'' = \frac{n \cdot C}{2} \cdot \left[ \frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_c} \right] \cdot \Delta' \quad (4.146)$$

Variația lungimii concentratorului în funcție de factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație și de frecvența de rezonanță s-a determinat

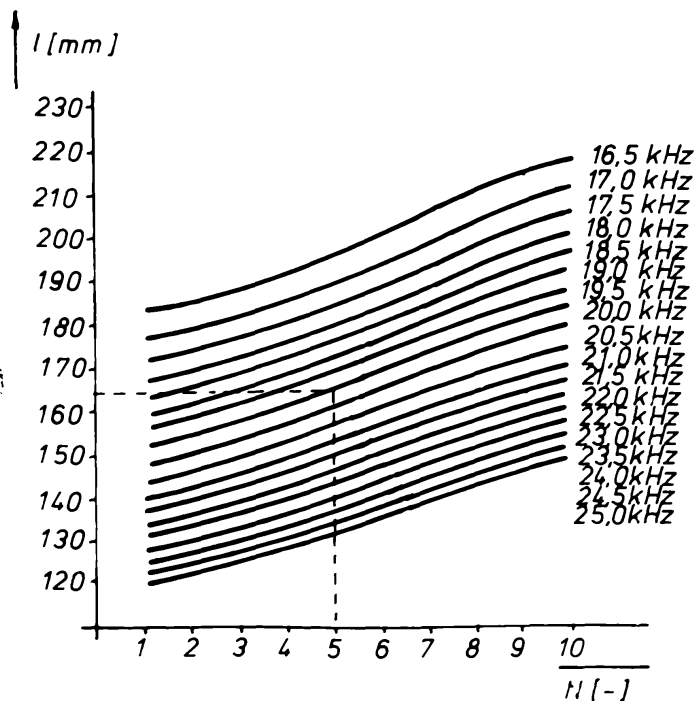


Fig. 4.24

Variația lungimii CAU în funcție de factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  
 l - lungimea de rezonanță a CAU exponențial  
 N - raportul diametrelor

experimental [3] pentru un CAU exponențial - fig.4.24 -.

Se observă că lungimea de rezonanță l depinde direct proporțional de factorul de amplificare  $k_a$  și invers proporțional de frecvența de rezonanță  $f_r$ . Pe de altă parte, cercetările experimentale întreprinse [96] scot în evidență faptul că lungimea CE depinde de lungimea și masa

OT(S), conducând la micșorarea lungimii de rezonanță a CAU cu atât mai mult cu cât masa OT(S) atașată este mai mare.

Lungimea de rezonanță reală a CAU exponențial se poate determina



cu relația [19]:

$$l_0 = k_1 \cdot l \quad (4.147)$$

unde:

$k_1$  - coeficient de corecție a lungimii de rezonanță în funcție de materialul CAU;

$l$  - lungimea de rezonanță teoretică.

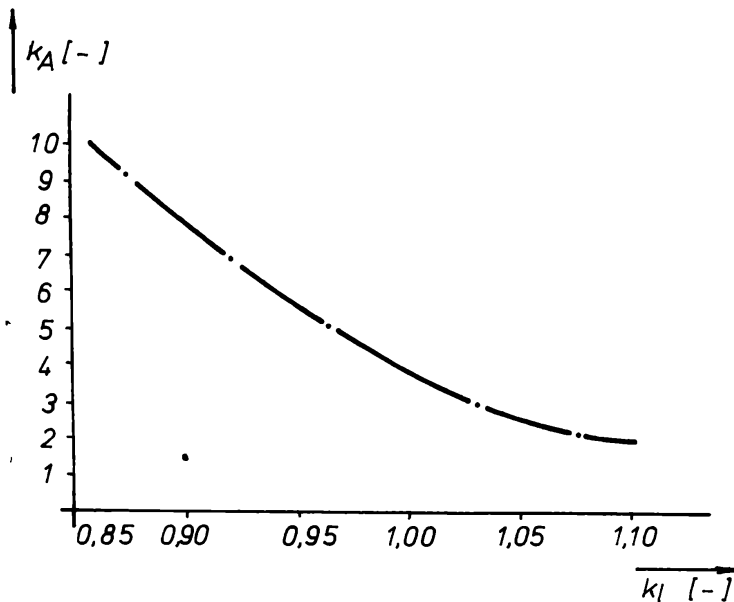


Fig. 4.25

Determinarea coeficientului de corecție în funcție de mărimea factorului de amplificare a amplitudinii  
 $k_A$  - factorul de amplificare a amplitudinii  
 $k_1$  - coeficientul de corecție a lungimii de rezonanță

Coeficientul de corecție  $k_1$  a fost determinat experimental [19]

- fig. 4.25 - în funcție de factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  $k_A$ .

Pentru un factor de amplificare mediu  $k_A = 5 \dots 6$ , coeficientul de corecție  $k_1 \approx 1$ , deci în relația (4.147)

$l_0 \approx l$ . La amplificări mai mari, coeficientul de corecție

este subunitar, prin urmare  $l_0 < l$ , în schimb la coeficienți mai mici de amplificare lungimea de rezonanță reală este mai mare decât cea teoretică  $l_0 > l$ .

#### 4.4.4 Influența formei concentratorului adaptor de undă asupra parametrilor acustici și tehnologici

Capacitatea erozivă, randamentul transmisiei energiei acustice în spațiul de lucru (incinta de utilizare), precizia prelucrării dimensionale și calitatea suprafețelor generate în urma prelucrării cu ultrasunete, depind în esență și de forma, materialul și calitatea execuției CAU [19, 46, 95].

În continuare se studiază influența a patru tipuri de CAU frecvent utilizate în aplicațiile cu ultrasunete - conic, exponențial, catenoidal, cilindric în trepte - asupra parametrilor acustici și tehnologici. Concentratoarele sunt dimensionate în  $\lambda/2$  la frecvența de 22 kHz, puterea de activare 100 W și au

raportul diametrelor  $N = D_1/D_2 = 5$  [95].

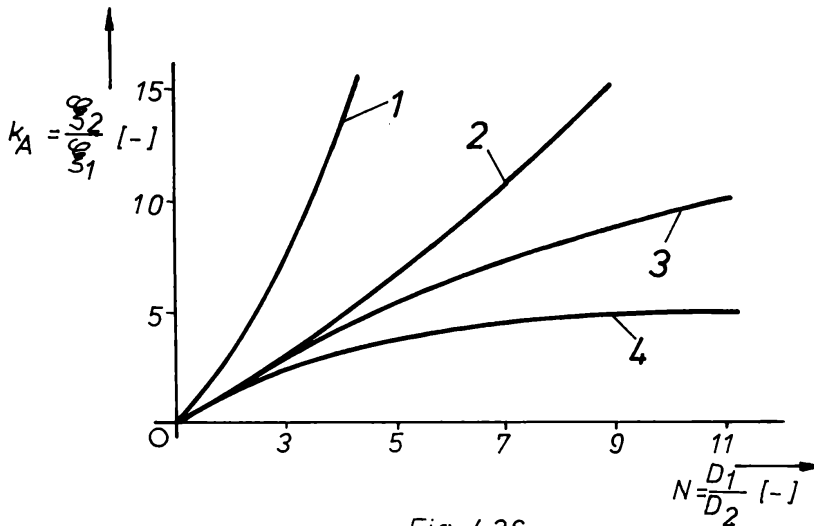


Fig. 4.26

Variația factorului de amplificare în funcție de raportul diametrelor de intrare

$k_A$  - factorul de amplificare a amplitudinii  
 $N$  - raportul diametrelor de intrare/ieșire în CAU

- 1 - CAU cilindric în trepte;
- 2 - CAU catenoidal;
- 3 - CAU exponențial;
- 4 - CAU conic.

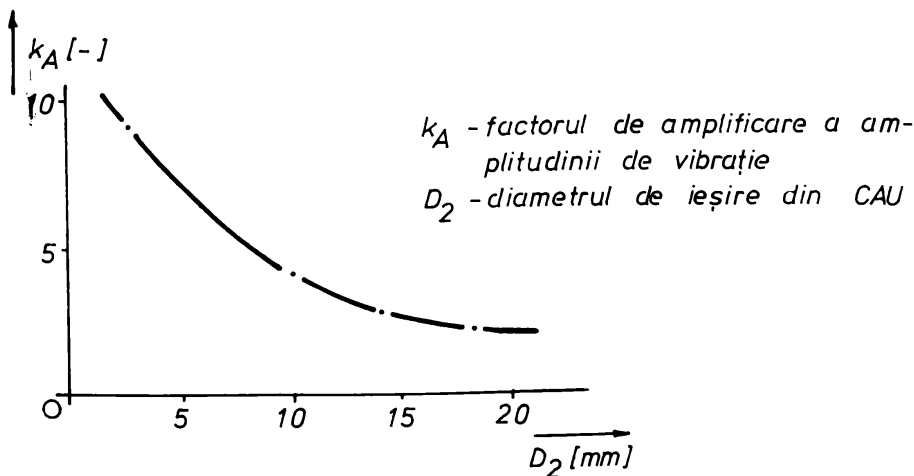


Fig. 4.27

Variația factorului de amplificare în funcție de diametrul de ieșire din CAU

$k_A$  - factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  
 $D_2$  - diametrul de ieșire din CAU

Modul de variație a factorului de amplificare  $k_A$  determinat cu relațiile (4.12), (4.29), (4.42) și (4.62) în funcție de raportul diametrelor de intrare  $N$  este prezentat în fig. 4.26 [19,35], unde semnificația cifrelor este următoarea:

Pentru un concentrator exponențial [19], variația factorului de amplificare  $k_A$  în funcție de diametrul de ieșire  $D_2$  este prezentată în fig. 4.27.

Pentru concentratoarele catenoidale, exponențiale și conice produsul dintre coeficienții de reducere a secțiunii

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  și lungimea  $l$  corespunzătoare fiecărui CAU în funcție de raportul diametrelor  $N$  [46,95], se poate determina din fig. 4.26 unde:

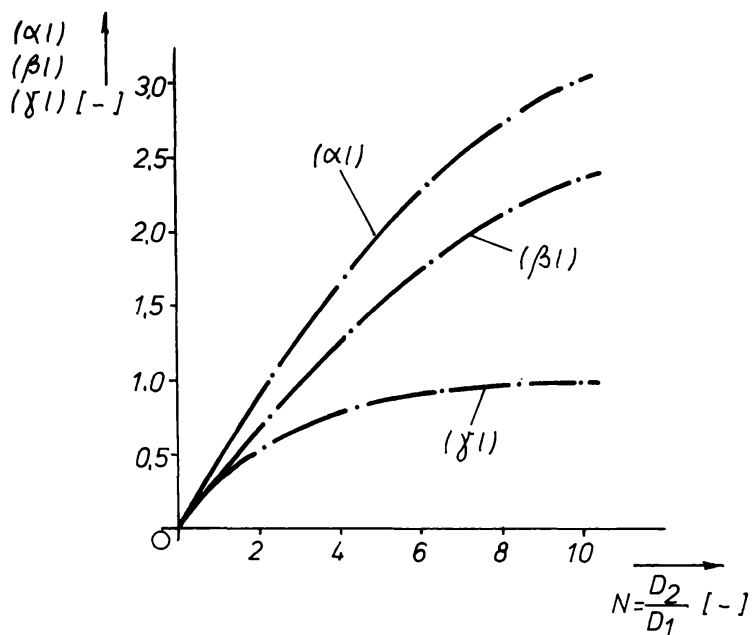


Fig.4.28

Determinarea coeficienților de reducere a secțiunii în funcție de raportul diametrelor

- $\alpha, \beta, \gamma$  - coeficienții de reducere a secțiunii pentru CAU conic, exponențial, respectiv catenoidal
- $l$  - lungimea CAU
- $N$  - raportul diametrelor de intrare  $D_1$ , respectiv ieșire  $D_2$  din CAU

$\alpha$  - coeficient de reducere a secțiunii pentru CAU conic determinat din relația (4.19);

$\beta$  - coeficient de reducere a secțiunii pentru CAU exponențial dedus din relațiile (4.38) sau (4.39),

$\gamma$  - coeficient de reducere a secțiunii pentru CAU catenoidal determinat din relația (4.57).

Cu creșterea lui  $N$  se

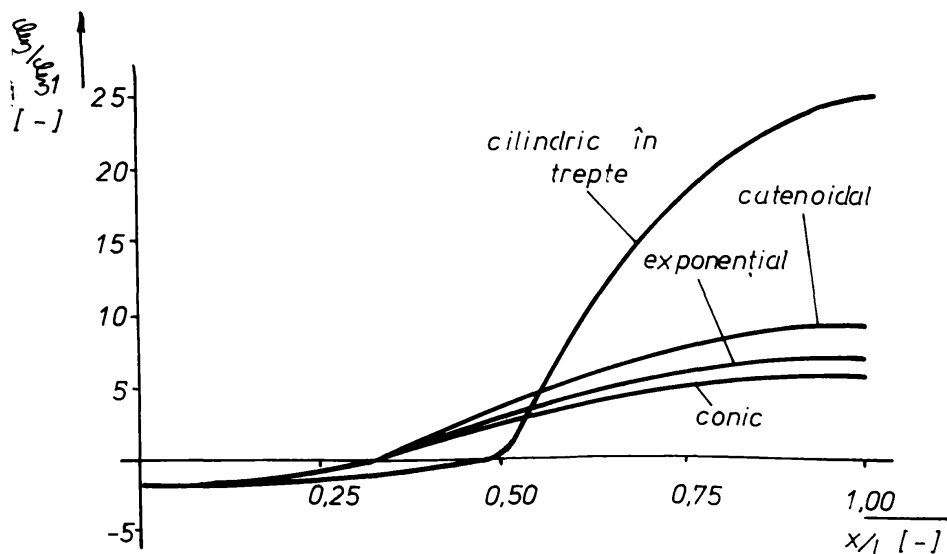


Fig. 4.29

Variația amplitudinii de vibrație în funcție de lungimea raportată a CAU

- $u_2, u_1$  - amplitudinea de vibrație în lungul CAU, respectiv de intrare în CAU
- $x$  - abscisa punctului în lungul CAU
- $l$  - lungimea CAU

măresc produsele  $(\sigma l)$ ,  $(\delta l)$  și  $(\gamma l)$ , mai accentuat pentru concentratorul catenoidal.

Pentru a putea face comparații între diferite tipuri de concentratoare, se prezintă în fig. 4.29 parametri acestora în valori raportate și adimensionale [36,95] pentru amplitudinea de vibrație  $\xi/\xi_1$  în funcție de lungimea raportată a CAU notată  $x/l$ .

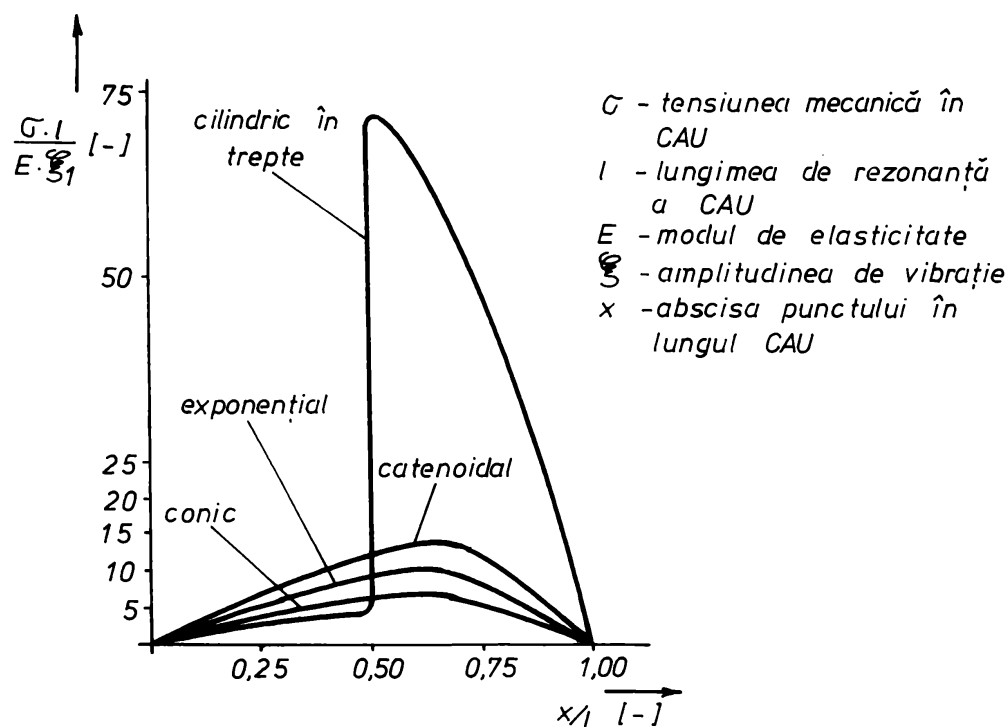


Fig. 4.30

Variația tensiunii mecanice în funcție de lungimea raportată a CAU

Variația tensiunii mecanice în CAU în valori raportate și adimensionale în funcție de lungimea raportată a concentratorului  $x/l$  este redată în fig. 4.30. În cazul concentratoarelor catenoidale - fig. 4.31 - ventrul tensiunii mecanice [96] se deplasează spre diametrul mai mic  $D_2$ , o dată cu creșterea lui  $N$  concomitent cu mărirea tensiunii mecanice raportate.

Dimensiunea diametrului de ieșire  $D_2$  este influențată de lungimea de rezonanță a concentratorului [19] care se calculează în acest caz cu relația (4.147). Dependența coeficientului de corecție a lunginii de rezonanță  $k_1$  în funcție de diametrul de ieșire  $D_2$  al concentratorului s-a determinat experimental pentru un CAU exponențial și este ilustrată în fig. 4.32. Pentru diametre de ieșire  $D_2$  mai mari de 6 mm, coeficientul de corecție este  $k_1 > 1$ , prin urmare lungimea de rezonanță reală  $l_r$  este mai mare decât cea teoretică  $l$ .

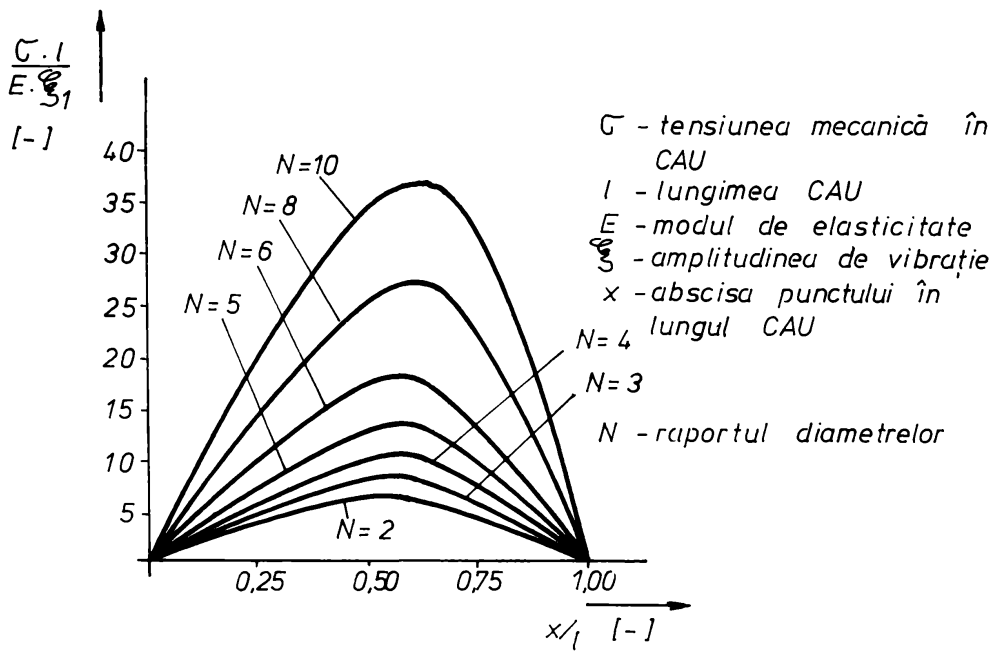


Fig.4.31

Variația tensiunii mecanice în funcție de lungimea raportată a CAU

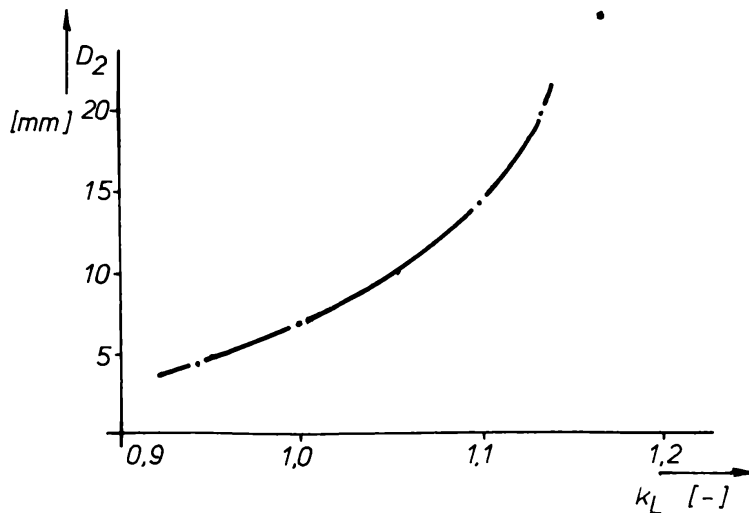


Fig.4.32

Dependența factorului de corecție a lungimii de rezonanță funcție de diametrul de ieșire  
 $k_L$  - factorul de corecție a lungimii de rezonanță a CAU  
 $D_2$  - diametrul de ieșire din CAU

Considerând productivitatea prelucrării în sticlă egală cu unitatea pentru un CAU conic [95] - fig.4.33 - la prelucrarea cu celelalte concentratoare valorile raportate ale productivității  $Q_p$  sunt indicate în histograma din fig.4.33,

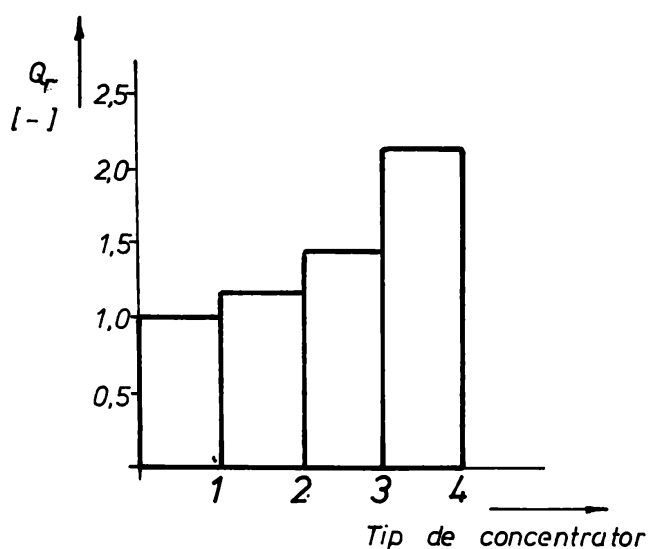


Fig.4.33

Productivitatea prelucrării corespunzătoare diferitelor tipuri de CAU

unde:

$Q_r$  - productivitatea relativă;

1 - CAU conic;

2 - CAU exponențial;

3 - CAU catenoidal;

4 - CAU cilindric în trepte;

Intrucât condițiile de lucru au fost identice pentru fiecare tip de concentrator, sporul de productivitate relativă a prelucrării se datorește amplitudinii de vibrație

diferită - v. fig.4.29 - cu un câștig substanțial pentru CAU cilindric în trepte.

Productivitatea prelucrării (capacitatea erozivă) în funcție de amplitudinea de vibrație se poate determina în acest caz cu relația empirică [95]:

$$Q_v = C_v \cdot \xi^{0,72} \quad (4.148)$$

unde:  $Q_v$  - productivitatea volumică;

$C_v$  - constantă de proporționalitate;

$\xi$  - amplitudinea de vibrație.

Relația (4.148) își găsește aplicabilitate în cazul CAU conice, exponențiale și catenoidale. Pentru concentratoarele cilindrice în trepte exponentul amplitudinii de vibrație trebuie să fie mai mic.

Cercetările experimentale întreprinse [3,10,18,19,30,90,95,96] demonstrează că cel mai sigur în funcționare și comode privind reglajul generatorului pe frecvența proprie de vibrație a concentratorului sunt CAU exponențiale și conice. Acestea sunt mai puțin sensibile la variația condițiilor în spațiul de lucru (incinta de utilizare) la modificarea impedanței mecanice de sarcină sau la modificările de temperatură ale concentratorului.

Deși amplitudinea de vibrație este mai mică, CAU conice și exponențiale rezistă mai bine la solicitările variabile în timp, iar scoaterea lor din uz prin rupere la oboseală [10] intervine numai la puteri de activare mari. Tensiunea mecanică este mai redusă la concentratoarele conice și exponențiale care în același timp au o curbă de rezonanță mai largă decât CAU cilindrice în trepte.

Concentratoarele cilindrice în trepte asigură cele mai mari amplificări ale amplitudinii de vibrație și sunt ușor de realizat tehnologic. Acestea au însă dezavantajul existenței unui salt brusc de tensiune mecanică în secțiunea de trecere și în funcționare ies deseori din frecvența de rezonanță, având curba de rezonanță îngustă. Dacă generatorul de ultrasunete nu are reacție inversă de comandă pentru autoacordare pe frecvența proprie de rezonanță a concentratorului, utilizarea practică a acestora este limitată la puteri mici.

Tensiunea mecanică maximă în concentrator poate fi atenuată dacă la trecerea între două tronsoane se asigură o rază de rotunjire egală cu  $0,3 \dots 0,4$  în diferența celor două diametre ( $D_1 - D_2$ ) sau se adoptă o secțiune variabilă conică, catenoidală - CAU exponențiale și catenoidale datorită formei profilului au o stabilitate mare în frecvență și sunt superioare celor conice.

Forma și diametrul de ieșire  $D_2$  al CAU are influență atât asupra parametrilor acustici - factor de amplificare a amplitudinii de vibrație, tensiunea mecanică, lungimea de rezonanță - cât și asupra parametrilor tehnologici - inductivitatea prelucrării, durabilitatea și stabilitatea în exploatare - fapt ce permite stabilirea univocă a tipului de concentrator în funcție de criteriile restrictive impuse de construcția echipamentului cu ultrasunete și de aplicația tehnologică.

#### 4.5 CALCULUL SI PROIECTAREA CONCENTRATOARELOR ADAPTOARE DE UNDA DE SECTIUNE CIRCULARA SI PROFIL DUPA FUNCTIA BESSEL

Ecuatia diferențială care are drept soluții funcția Bessel este de forma:

$$x^2 \cdot \frac{d^2 \xi}{dx^2} + x \cdot \frac{d\xi}{dx} + (x^2 + \nu^2) \cdot \xi = 0 \quad (4.149)$$

unde:

$x$  - variabila reală (coordonata punctului după direcția Ox);

$\nu$  - parametru complex.

Soluția generală a ecuației (4.149) este de forma [69, 115]:

$$\xi(x) = A \cdot J_\nu(x) + B \cdot Y_\nu(x) = A' \cdot H_\nu^{(1)}(x) + B' \cdot H_\nu^{(2)}(x) \quad (4.150)$$

unde:

$J_\nu(x)$  - funcția Bessel de speța întâi și ordinul  $\nu$ ;

$Y_\nu(x)$  - funcția Bessel de speța a doua și ordinul  $\nu$ ;

$H_\nu^{(1)}(x), H_\nu^{(2)}(x)$  - funcții Bessel de speța a treia și ordinul  $\nu$ ;

A, B - constante care se determină din condiții la limită.

Cele patru funcții au următoarele proprietăți:

a)  $J_\nu(x)$  și  $J_{-\nu}(x)$  sunt liniar independente dacă  $\nu$  nu este întreg;

b)  $J_n(x) = (-1)^n \cdot J_{-n}(x)$ , n întreg;

c) 
$$Y_\nu(x) = \frac{1}{\sin(\nu\pi)} \cdot [J_\nu(x) \cdot (\cos(\nu\pi) - J_{-\nu}(x))]$$

dacă  $\nu$  nu este întreg, în caz contrar se ia limita fracției;

d)  $J_\nu(x), Y_\nu(x)$  și  $H_\nu^{(1)}(x), H_\nu^{(2)}(x)$

sunt respectiv perechi liniar independente;

$$H_\nu^{(1)}(x) = J_\nu(x) + j \cdot Y_\nu(x)$$

e)

$$H_\nu^{(2)}(x) = J_\nu(x) - j \cdot Y_\nu(x)$$

Funcția  $J_n(x)$  are dezvoltarea în serie:

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+n} \cdot \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \quad (4.151)$$

Pentru n fixat și  $|x| < 1$ , au loc dezvoltările [115]:

$$J_0(x) \approx 1 - \frac{x^2}{4} \quad - \text{funcția Bessel de speța întâi și ordinul zero;}$$

$$Y_0(x) \approx \frac{2}{\pi} \cdot \ln x \quad - \text{funcția Bessel de speța a doua și ordinul zero.}$$

Înlocuind aceste funcții în relația (4.149) se obține:



$$\xi(x) = A \cdot J_0(x) + B \cdot Y_0(x) \quad (4.152)$$

adică:

$$\xi(x) = A \cdot \left(1 - \frac{x^2}{4}\right) + B \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \ln x$$

iar constantele **A** și **B** se determină punând condiții la limită. Întrucât pentru  $x=0$  funcția Bessel de speța a doua  $Y_0(x)$  devine infinit, se adoptă o soluție particulară a ecuației (4.152) care devine [69,115]:

$$\xi(x) = A \cdot J_0(x) - \frac{B}{k^2 \cdot F} \quad (4.153)$$

unde:

$F = E \cdot S(x) \cdot d\xi/dx$  - forța elastică între particolele CAU;

**B** - constantă.

Dacă **B** = 0, atunci oscilațiile în concentrator sunt libere, iar pentru **B** ≠ 0 oscilațiile sunt forțate (regim permanent sinusoidal), situație caracteristică transmiterii energiei acustice prin CAU de la T la OT(S) sau direct mediului de lucru.

Pentru  $x = 0$ ,  $\xi(0) = \xi_1$ , iar ecuația (4.153) devine:

$$\xi_1 = A - \frac{B}{k^2 \cdot F} \quad (4.154)$$

Punând condiția  $d\xi/dx = 0$  pentru  $x = l$  în relația (4.152), se obține:

$$B = A \cdot \frac{\pi l^2}{4}$$

care înlocuit în (4.154) conduce la:

$$\xi_1 = A \cdot \left(1 - \frac{\pi l^2}{4k^2 \cdot F}\right) \quad (4.155)$$

Amplitudinea de vibrație la ieșirea din concentrator se determină din

relația (4.152) punând  $x = 1$ :

$$\xi_2 = A \cdot \left(1 - \frac{l^2}{4} + \frac{l^2}{2} \cdot \ln l\right) \quad (4.156)$$

Din relațiile (4.155) și (4.156) se poate deduce factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație:

$$k_A = \frac{\xi_2}{\xi_1} = \frac{k^2 F \cdot (4 - l^2 + 2l^2 \cdot \ln l)}{4k^2 \cdot F - \pi l^2} \quad (4.157)$$

În mod similar se procedează și pentru rezolvarea ecuației diferențiale care are drept soluții funcțiile Bessel modificate [115]:

$$x^2 \cdot \frac{d^2 \xi}{dx^2} + x \cdot \frac{d\xi}{dx} - (x^2 + \nu^2) \cdot \xi = 0 \quad (4.158)$$

unde  $x$  și  $\nu$  au semnificația de la ecuația (4.149). Soluția generală a ecuației considerate este de forma:

$$\xi(x) = A \cdot I_\nu(x) + B \cdot K_\nu(x) \quad (4.159)$$

unde:

$I_\nu(x)$  - funcția Bessel modificată de speța întâi și ordinul  $\nu$ ;

$K_\nu(x)$  - funcția Bessel modificată de speța a doua și de ordinul  $\nu$ ;

Pentru  $n$  fixat și  $|x| < 1$  au loc dezvoltările [115]:

$$I_0(x) \approx 1 + \frac{x^2}{4}$$

și

$$K_0(x) \approx -\ln x$$

În ambele situații, dat fiind complexitatea calculelor pentru determinarea rădăcinilor funcției Bessel și a constantelor  $A$  și  $B$ , se recomandă utilizarea calculatorului electronic.

#### 4.6 CALCULUL SI PROIECTAREA UNOR CONCENTRATOARE ADAPTOARE DE UNDA COMPLEXE (COMPUSE)

Calculul și proiectarea CAU complexe (compuse) necesită, după autor, parcurgerea în principal a următoarelor etape:

- stabilirea materialului din care se confecționează concentratorul astfel încât frecările interne între particole și coeficientul de pierderi să fie cât mai mici;
- alegerea suprafeței secțiunii CAU la îmbinarea cu T, respectiv cu OT(S) pentru a se obține un cuplaj acustic maxim;
- alegerea unui profil favorabil pentru concentrator pentru a se asigura amplitudinea de vibrație necesară procesului tehnologic, respectiv variația tensiunii mecanice sub limita admisibilă.

Indiferent de tipul și forma profilului concentratorului, calculul elementelor de dimensionare pornește de la ecuația spațio-temporală (3.5) care mai poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \frac{c^2}{S} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( S \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.160)$$

Admitând că soluția ecuației (4.160) poate fi scrisă ca produsul dintre două funcții dependente de câte o singură variabilă

$$\xi(x, t) = \xi_x(x) \cdot \xi_t(t) \quad (4.161)$$

prin diferențiere și înlocuiri în (4.160) se obține [40]:

$$\frac{\partial^2 \xi_t}{\partial t^2} = \frac{c^2 \cdot \left[ \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 \xi_x}{\partial x^2} \right]}{\xi_x} \quad (4.162)$$

Pentru ca egalitatea de mai sus să fie posibilă este necesar ca ambii termeni să fie constanți. Fie această constantă  $-\omega^2$ , unde  $\omega$  are semnificația fizică a pulsației oscilațiilor armonice transmise de T către CAU. Se obține sistemul de ecuații diferențiale:

$$\frac{\partial^2 \xi_t}{\partial \tau^2} + \omega^2 \cdot \xi_t = 0 \quad (4.163.a)$$

$$\frac{\partial^2 \xi_x}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi_x}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \xi_x = 0 \quad (4.163.b)$$

Dintre aceste ecuații interesează practic în continuare (4.163.b) care - după cum se observă este identică cu relațiile (3.12), (3.13), (3.27) și (3.28) - are două necunoscute  $\xi_x(x)$  și  $S(x)$  și este în general nedeterminată. Ea poate fi rezolvată pentru expresii particulare ale secțiunii  $S(x)$  așa cum au fost analizate de autor în subcap.4.2 și 4.3. Intrucât calculul **CAU(D)** simple sau complexe pentru  $S(x)$  impus este laborios și se referă la determinarea constantelor de integrare punând corect condiții inițiale sau la limită, se pot utiliza diferiți algoritmi cu aplicații pe calculator, cum este metoda diferențelor finite.

În același timp însă, ecuația (4.163.b) poate fi rezolvată și printr-o cale inversă, determinând o expresie analitică pentru  $\xi(x)$  care să verifice condițiile la limită impuse concentratorului și în funcție de acestea să se poată deduce expresia suprafeței  $S(x)$ .

#### 4.6.1 Aplicarea metodei diferențelor finite la determinarea dimensiunilor și solicitărilor concentratoarelor adaptoare de undă

Aplicarea metodei diferențelor finite reclamă modelarea matematică a fenomenului analizat, transpus în acest caz de ecuația (3.12) sau (4.163.b). Discretizând lungimea concentratorului în elemente de lungime  $\Delta x$ , ecuația de propagare a undelor (3.12) sau (4.163.b) se poate scrie pentru elementul  $x_n$ :

$$\frac{d^2 \xi_{(x_n)}}{dx_n^2} + K(x_n) \cdot \frac{d \xi_{(x_n)}}{dx_n} + k^2 \cdot \xi_{(x_n)} = 0 \quad (4.164)$$

unde:

$$\frac{d\xi_{(x_n)}}{dx_n} = \frac{1}{\Delta x} \cdot [\xi_{(x_{n+1})} - \xi_{(x_n)}] \quad (4.165.a)$$

$$\frac{d^2\xi_{(x_n)}}{dx_n^2} = \frac{1}{(\Delta x)^2} \cdot [\xi_{(x_{n+2})} - 2 \cdot \xi_{(x_{n+1})}] \quad (4.165.b)$$

reprezintă derivatele de ordinul unu, respectiv doi, ale funcției  $\xi(x)$  scrise pentru elementul  $x_n$ , iar

$$R(x_n) = \frac{1}{S(x_n)} \cdot \frac{dS(x_n)}{dx_n} \quad (4.166)$$

Prin înlocuiri succesive, se ajunge la:

$$\begin{aligned} \xi_{(x_{n+2})} = & \xi_{(x_{n+1})} \cdot \left[ 2 - \frac{\Delta x}{S(x_n)} \cdot \frac{dS(x_n)}{dx_n} \right] - \\ & - \xi_{(x_n)} \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta x}{S(x_n)} \cdot \frac{dS(x_n)}{dx_n} + (\Delta x)^2 \cdot k^2 \right] \quad (4.167) \end{aligned}$$

În cazul particular, când  $n = 0$ , se obțin ecuațiile:

$$\begin{aligned} \xi_{(x_2)} = & \xi_{(x_1)} \cdot \left[ 2 - \frac{\Delta x}{S(x_0)} \cdot \frac{dS(x_0)}{dx_0} \right] - \\ & - \xi_{(x_0)} \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta x}{S(x_0)} \cdot \frac{dS(x_0)}{dx_0} + (\Delta x)^2 \cdot k^2 \right] \quad (4.168) \end{aligned}$$

$$\xi(x_1) = \xi(x_0) + \Delta x \cdot \frac{d\xi(x_0)}{dx_0} \quad (4.169)$$

unde:

$$\xi(x_0), \frac{d\xi(x_0)}{dx_0} \text{ reprezintă condițiile inițiale, în timp ce } \xi(x_2), \xi(x_1)$$

sunt necunoscute, adică amplitudinile de vibrație corespunzătoare coordonatelor  $x_2$ , respectiv  $x_1$ .

În principiu, metoda diferențelor finite aplicată la calculul CAU constă în determinarea [29,56] punct cu punct a funcției  $\xi(x)$  și a derivatei sale - amplitudinea de vibrație și tensiunea mecanică în concentrator la coordonata  $x$  -, pornind de la ecuațiile (4.168) și (4.169) cu ajutorul relației iterative (4.167). La trecerea de la un tronson la alt tronson caracterizat prin aceeași lege sau altă lege de variație decât cea anterioară a suprafeței generată de  $S(x)$ , trebuie să se țină seama de conservarea amplitudinii și a forței în planul de separație, măriri ce servesc la stabilirea condițiilor la limită pentru noul tronson.

Dacă:

$$\xi(x_1) = \xi_1, \xi(x_2) = \xi_2$$

reprezintă amplitudinea de vibrație la intrare și la ieșire dintr-un element  $n$  de CAU de lungime  $\Delta x$

- fig.4.34 - iar:

$$\xi(x_0), \frac{d\xi(x_0)}{dx_0}$$

sunt amplitudinea de vibrație a T, respectiv tensiunea mecanică în planul de separație CAU - T, atunci din condițiile la limită:

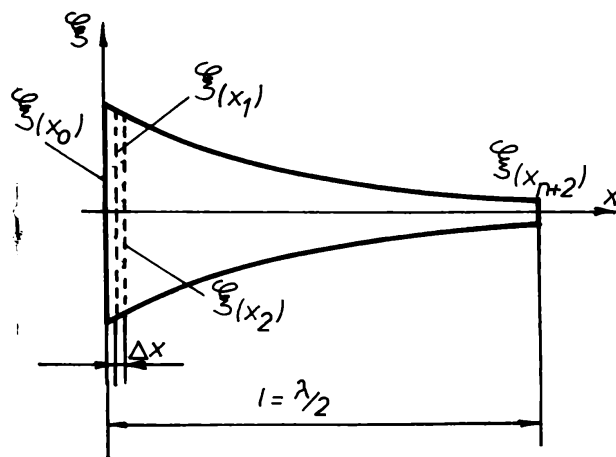


Fig. 4.34

Schema de calcul a unui CAU aplicând metoda diferențelor finite

$\xi(x_0), \xi(x_1), \xi(x_2), \xi(x_{n+2})$  - amplitudinile de vibrație în planurile 0,1,2 și  $n+2$

$\Delta x$  - element de lungime

$l$  - lungimea CAU

$\lambda$  - lungimea de undă

$$\xi(x_0) = \xi_T \quad - \text{ constant la puterea de activare constantă a transductorului T,}$$

$$\frac{d\xi(x_0)}{dx_0} = 0,$$

deci tensiunea mecanică este nulă în planul de separație concentrator - transductor CAU(D) - T,

se poate deduce pentru elementele de lungime  $\Delta x = x_{n+1} - x_n$  considerate cilindrice:

$$\xi_1 = \xi_T \cdot \cos kx_1 \quad (4.170)$$

$$\xi_2 = \xi_T \cdot [2\cos kx_1 + 1 + (x_1 - x_0)^2 \cdot k^2] \quad (4.171)$$

Cunoscând  $\xi_T$  și materialul concentratorului, pentru  $D_1$  corelat cu suprafața T și  $S(x)$  impus,  $\xi_1$  și  $\xi_2$  constituie date de intrare pentru tronsonul următor  $\Delta x$ .

Practic, cu această metodă nu se pot stabili relații de dimensionare a CAU. Metoda se poate însă implementa și utiliza cu ajutorul calculatorului electronic la delimitarea pentru fiecare tronson  $\Delta x$  a amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice. În cazul concentratoarelor în  $\lambda/2$ , calculul continuă până la tronsonul în care derivata funcției  $\xi(x)$  se anulează. Înseamnă că în acest punct tensiunea mecanică este nulă iar amplitudinea de vibrație maximă. Se compară  $\xi(x_{n+1})$  cu  $\xi(x_0)$ , pentru  $D_1$  și  $S(x)$  date se deduce diametrul de ieșire  $D_2$  și lungimea de rezonanță l.

Dat fiind dificultatea calculelor parametrilor ce caracterizează un CAU complex, se propune în continuare un model de proiectare utilizând un PC tip IBM 486. Programul realizat în regim conversațional [29,56] are organigrama prezentată în fig.4.35. La încărcare programul se autolansează în execuție având condițiile inițiale exprimate în mărimi relative și necesitând următoarele date de plecare:

- a) frecvența de rezonanță a T (determinată experimental);
- b) viteza sunetului prin materialul CAU (se determină experimental sau se ia din tabelul 4.1);
- c) modulul de elasticitate al materialului CAU [19];
- d) diametrul inițial  $D_1$ , care este egal cu cel al T dacă acesta este de tip piezoelectric sau circumscris suprafeței radiante dreptunghiulare în cazul unui T de tip magnetostrictiv;
- e) legea de variație a secțiunii CAU cu următoarele particularități introduse ca subprograme (secțiuni circulare):
  - suprafețe cilindrice:  $S(x) = ct.$ ,  $D(x) = D_1 = ct.$ ,  $R(x) = 0$

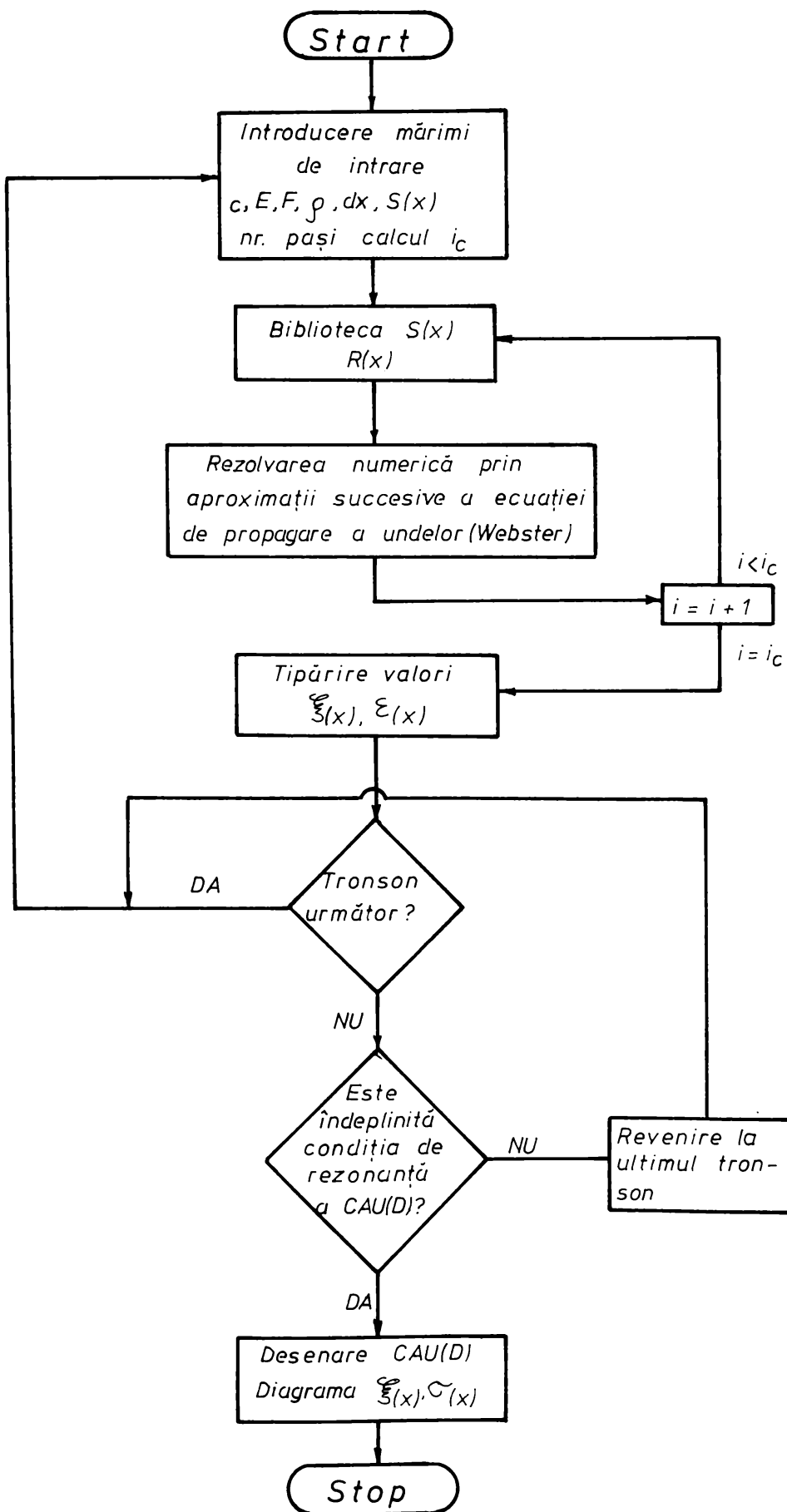


Fig. 4.35

Organigrama de aplicare a metodei diferențelor finite  
la calculul CAU(D) complexe



Dacă racordarea între tronsoanele cilindrice se face prin arc de cerc la rază  $r$ , atunci:

$$S(x) = \frac{\pi}{4} \cdot [D_1 - 2\sqrt{x(2r-x)}]$$

$$R(x) = \frac{-4(r-x)}{[D(x) - 2\sqrt{x(2r-x)}] \cdot \sqrt{x(2r-x)}} \quad \text{când } D(x) < D_1, \text{ respectiv}$$

$$R(x) = \frac{4x}{[D(x) + 2r - 2\sqrt{r^2 - x^2}] \cdot \sqrt{r^2 - x^2}} \quad \text{pentru } D(x) > D_1$$

- suprafețe conice:  $S(x) = S(o) \cdot (1 - x \cdot \text{tga})^2$

$$\text{tga} = \frac{D(x) - D_1}{2x}$$

$$R(x) = \frac{4 \text{tga}}{D_1 + 2x \cdot \text{tga}}$$

- suprafețe exponențiale:  $S(x) = S(o) \cdot e^{-\beta x}$

$$\beta = \frac{\ln \left[ \frac{D(x)}{D_1} \right]}{-x}$$

$$R(x) = -2\beta$$

f) pasul de calcul  $\Delta x$ ;

g) numărul de puncte de calcul (iterații);

Cu aceste date programul permite rezolvarea numerică a ecuației diferențiale (3.12) sau (34.163.b), vizualizându-se - display și opțional imprimantă - coordonata  $x$ , amplitudinea relativă de vibrație  $\xi(x)$  și derivata sa  $\beta \xi / dx$  împreună cu valorile maxime ale acestor ultime două mărimi detectate în

timpul calculului, precum și forma CAU. Îndeplinirea condiției de rezonanță este sesizată la capătul CAU prin obținerea unui maxim al amplitudinii de vibrație.

Spre exemplificare se consideră un concentrator complex alcătuit din cinci tronsoane:

- tronson de intrare cilindric cu  $D_1 = 20$  mm;
- tronson de racordare conic cu  $\alpha = 16,38954^\circ$ ;
- tronson intermediar cilindric cu  $D_2 = 30$  mm;
- tronson intermediar exponențial cu  $\delta = 44,79398$  mm<sup>3</sup>;
- tronson de ieșire cilindric cu  $D_3 = 5$  mm.

Concentratorul este confecționat dintr-un aliaj de aluminiu având  $c = 5,12 \cdot 10^3$  m/s și  $E = 7 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>, fiind activat de T la frecvența de 40 kHz. Profilul concentratorului, amplitudinea de vibrație și tensiunea mecanică în material sunt ilustrate în fig.4.36.a, b și c, iar rezultatele obținute în urma rulării programului sunt prezentate centralizat în tabelul 4.6.

TABELUL 4.6

Tronson i	Pasul de calcul $\Delta x$ [mm]	Nr. de pași	Lungi- mea tronso- nului i $l_i$ [mm]	Diame- trul de intrare în tron- sonul i $D_i$ [mm]	Amplitu- dinea de vibrație maximă $\xi(x)$ [μm]	Tensiu- nea me- canică maximă $\sigma(x)$
1	0,1	30	$l_1 = 3$	$D_1 = 20$	1,00000	
2	0,1	170	$l_2 = 17$	$D_1 = 20$	0,98881	
3	0,5	52	$l_3 = 26$	$D_2 = 30$	0,66063	42,84987
4	0,5	80	$l_4 = 40$	$D_2 = 30$	-6,27781	
5	0,1	180	$l_5 = 5$	$D_3 = 5$	-9,79976	

Concentratorul complex - fig. 4.36 a - este proiectat în  $\lambda/2$ . Nodul de oscilație - fig. 4.36 b - se află la distanța  $x_0 = 38$  mm ( $l_1 + l_2 + 18$ ) față de planul de intrare în CAU determinat de diametrul  $D_1$ . Tensiunea mecanică - fig. 4.36 c - are valoarea maximă în zona de racordare a tronsonului exponențial 4 cu tronsonul de ieșire cilindric 5 corespunzător coordonatei  $x_2 = 86$  mm ( $l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ ). Factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație - tabelul 4.6 - este dat de raportul  $\xi_2/\xi_1$  și are valoarea de 9,79976 μm în cazul în care amplitudinea de vibrație la intrarea în CAU este egală cu unitatea.

În mod analog, se prezintă în continuare un model similar de proiectare a difuzoarelor D utilizând metoda diferențelor finite. Pentru

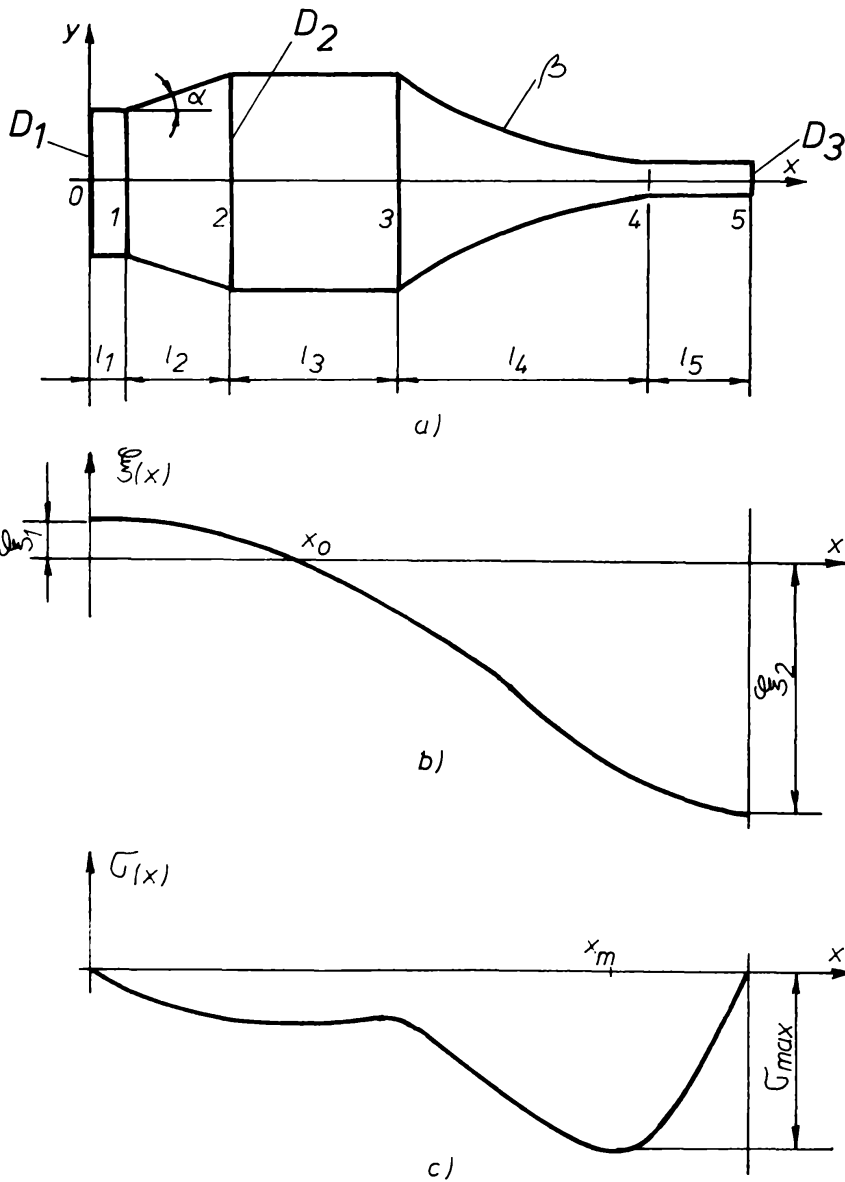


Fig. 4.36

Schema de calcul a unui CAU complex

$D_1, D_2, D_3$  - diametrele CAU: de intrare, intermediar și de ieșire

$l_1, l_2, \dots, l_5$  - lungimile corespunzătoare fiecărui tronson

$\alpha$  - unghiul tronsonului conic

$\beta$  - coeficientul de reducere a secțiunii pentru tronsonul exponențial

$\xi(x), \sigma(x)$  - legea de variație a amplitudinii de vibrație, respectiv a tensiunii mecanice în funcție de abscisa  $x$

$x_0, x_m$  - nodul de oscilație, respectiv punctul corespunzător tensiunii mecanice maxime

operativitate a fost conceput un program asemănător cu cel de la proiectarea CAU pe baza metodei diferențelor finite [12,41], compatibil tot cu un PC tip IBM 486, care permite intervenția pe orice tronson elementar, în orice punct al programului, prezentând pagini cu date sintetice necesare analizei comportării în ansamblu. Datele de intrare ale programului sunt:

- a) frecvența de rezonanță a T (determinată experimental);
- b) diametrele de lucru și de racord  $D_i, D_{i+1}$  pentru  $i = 1, 2, \dots, n-1$  tronsoane elementare (stabilite constructiv sau funcțional);
- c) caracteristicile acustice ale materialului D, viteza sunetului c și modulul de elasticitate E (tabelul 4.1 sau din literatura de specialitate);
- d) factorul de amplificare impus D,  $k_n$ ;
- e) legea de variație a secțiunii D pentru fiecare tronson elementar împreună cu amplitudinea de vibrație:

- suprafețe cilindrice:  $S(x) = ct., \xi(x) = \xi_1 \cdot \cos kx$

- suprafețe conice:  $S(x) = S_1 \cdot (1 - \alpha x)^2$

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot \frac{1}{1 - \alpha x} \cdot (\cos kx - \frac{\alpha}{k} \cdot \sin kx)$$

- suprafețe exponențiale:  $S(x) = S_1 \cdot e^{-2\alpha x}$

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot e^{\beta x} \cdot (\cos k'x - \frac{\beta}{k'} \cdot \sin k'x)$$

- suprafețe catenoidale:  $S(x) = S_2 \cdot \text{ch}^2 \gamma \cdot (1 - x)$

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot \frac{\text{ch} \gamma l}{\text{ch} \gamma (1-x)} \cdot (\cos k'x - \frac{\gamma}{k'} \cdot \text{th} \gamma l \cdot \sin k'x)$$

În lucrarea [41] este prezentat un exemplu de utilizare a programului pentru proiectarea unui D destinat omogenizării în plan orizontal a distribuției câmpului acustic în băile de curățire cu ultrasunete. Difuzorul D - fig. 4.37 - este alcătuit din trei tronsoane:

- 1 - cilindric;
- 2 - conic;
- 3 - cilindric.

Problema proiectării revine la determinarea dimensiunilor geometrice ale D -  $x_1, x_2, x_3$  și  $S_2$  - și a amplitudinii de vibrație  $\xi_1$ .

Derivând soluțiile ecuațiilor pentru suprafețe cilindrice-conice-cilindrice și aplicând legea lui Hooke, se obțin expresiile forțelor elastice pe cele trei tronsoane. Condițiile de continuitate în acest caz sunt:

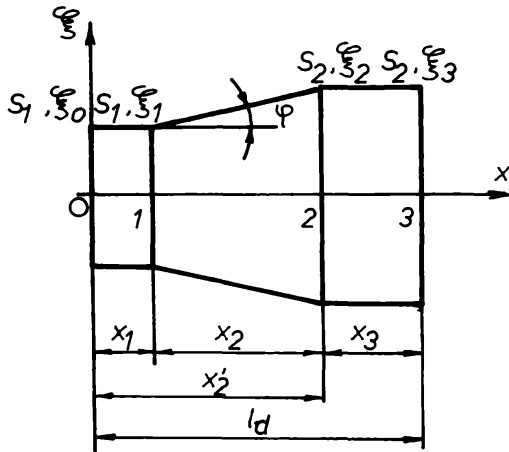


Fig. 4.37

Schema de calcul a unui D complex  
 $S_1, S_2$  - secțiunile tronsoanelor cilindrice  
 $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \xi_3$  - amplitudinile de vibrație în planurile 0, 1, 2 și 3  
 $x_1, x_2, x_3$  - lungimile tronsoanelor 1, 2 și 3  
 $l_D$  - lungimea difuzorului

sau:

$$E_1 \cdot S_1 \cdot \left. \frac{d\xi_1}{dx} \right|_{x=x_1} = E_2 \cdot S_2 \cdot \left. \frac{d\xi_2}{dx} \right|_{x=x_1} \quad \text{și} \quad E_2 \cdot S_2 \cdot \left. \frac{d\xi_2}{dx} \right|_{x=x_2} = E_3 \cdot S_3 \cdot \left. \frac{d\xi_3}{dx} \right|_{x=x_2}$$

- egalitatea amplitudinilor de vibrație la trecerea dintre tronsoanele 1 - 2 și 2 - 3:

$$\xi_0(x_{12}) = \xi_1(x_{21})$$

și

$$\xi_2(x_{23}) = \xi_3(x_{32})$$

- egalitatea forțelor elastice la trecerea dintre tronsoanele 1 - 2 și 2 - 3:

$$F_1(x_{12}) = F_2(x_{21})$$

și

$$F_2(x_{23}) = F_3(x_{32})$$

unde:  $E_1 - E_2 - E_3$  - constant (tronsoanele 1, 2 și 3 sunt confecționate din același material, D având o structură monobloc),

iar  $S_1 - S_2$  pentru  $x - x_1$ , respectiv  $S_2 - S_3$  când  $x - x'_2$ .

Programul întocmit rezolvă sistemul ecuațiilor determinate din condițiile de continuitate completat cu o relație suplimentară rezultată în urma impunerii unghiului  $\phi$  pentru porțiunea conică 2:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{D_2 - D_1}{2x_2}$$

Rezolvarea se face pentru o valoare impusă a lui  $\phi$ , apoi unghiul conicității se incrementează în intervalul  $(0^\circ \dots 90^\circ)$ .

Schema logică a programului este prezentată în fig. 4.36. De exemplu, pentru un D confecționat dintr-un aliaj de aluminiu cu  $c = 5,12 \cdot 10^3$  m/s și  $E = 7 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup> și activat de un T la frecvența de 40 kHz, având  $D_1 = 35$  mm,

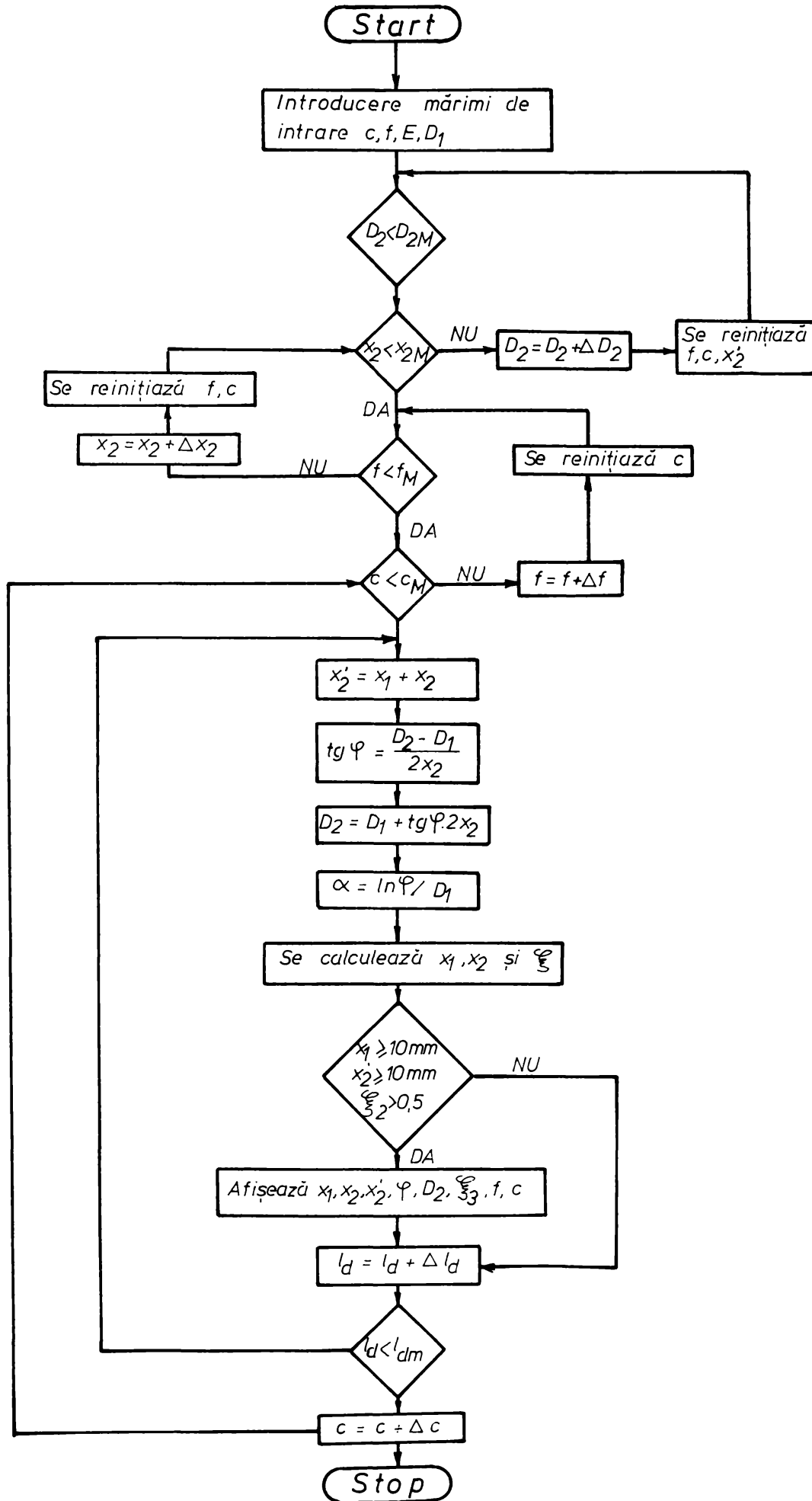


Fig. 4.38

Schema logică de proiectare a unor D cu ajutorul calculatorului

$D_2 = 45 \text{ mm}$  și  $\phi = 5^\circ$ , se obțin următoarele rezultate:

- lungimea tronsonului cilindric  $x_1$ :

$$x_1 = 5,00 \text{ mm}$$

- lungimea tronsonului conic  $x_2$ :

$$x_2 = 57,15 \text{ mm}$$

- lungimea tronsonului cilindric  $x_3$ ,

$$x_3 = 3,35 \text{ mm}$$

Variația amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x \in [0, l_D]$ , unde  $l_D$  reprezintă lungimea difuzorului  $D$ , este ilustrată în diagrama din fig. 4.39.

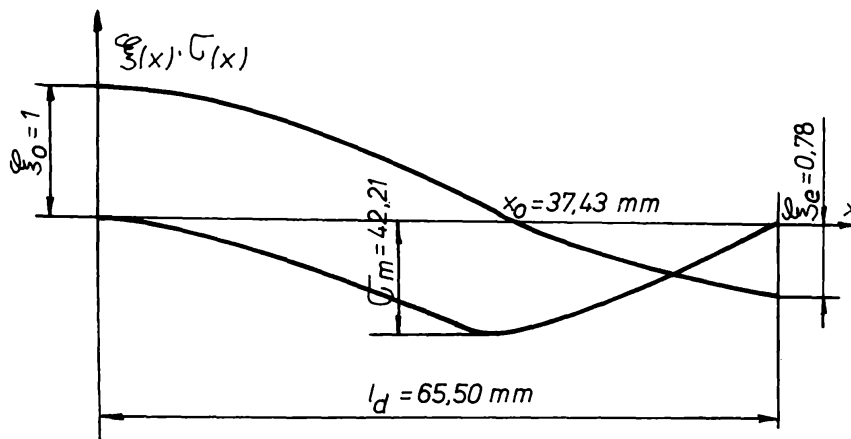


Fig. 4.39

Variația amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x$  pentru  $D$  reprezentat în fig. 4.37

$\xi(x), \sigma(x)$  - legea de variație a amplitudinii de vibrație, respectiv a tensiunii mecanice în funcție de abscisa  $x$

$x_0$  - nodul de oscilație  
 $\xi_0, \xi_e$  - amplitudinea de vibrație la intrarea, respectiv ieșirea din  $D$

$\sigma_m$  - tensiunea mecanică maximă în  $D$

$l_D$  - lungimea  $D$

#### 4.6.2 Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă determinând legea de variație a profilului

Pentru determinarea profilului concentratorului se pornește tot de la ecuația diferențială ce descrie propagarea undelor în bare de secțiune variabilă (4.163.b) care mai poate fi scrisă sub formă:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} (\ln S) \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \cdot \xi = 0 \quad (4.172)$$

unde:

$S = S(x)$  - secțiunea barei al cărei profil urmează a fi determinat, de unde rezultă:

$$\left| \frac{\partial}{\partial x} (\ln S) \right| = \frac{\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + k^2 \cdot \xi}{\frac{\partial \xi}{\partial x}} \quad (4.173)$$

În cazul în care se consideră că ecuația (4.172) are coeficienți constanți, soluția ecuației se discută după rădăcinile ecuației caracteristice atașate [40,56]:

$$X^2 + R \cdot X + C = 0 \quad (4.174)$$

unde:

$$R(x) = \frac{1}{S(x)} \cdot \frac{dS(x)}{dx} \quad (4.175.a)$$

$$C = \omega^2 \quad (4.175.b)$$

$$\text{iar: } \Delta = R^2 - 4C \quad (4.175.c)$$

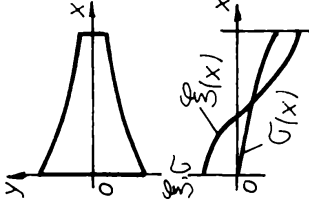
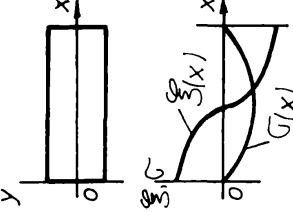
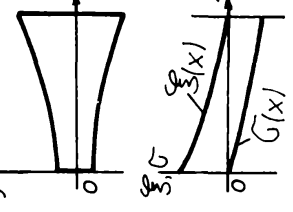
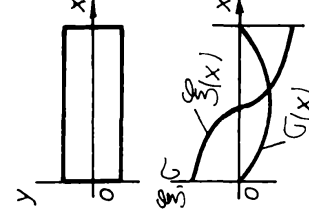
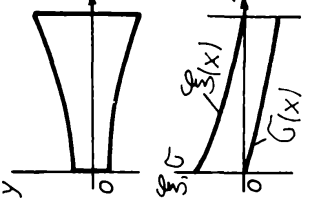
în concordanță cu tabelul 4.7. Se observă că forma undei prin concentrator depinde de coeficientul  $R(x)$ .

În calculele de proiectare a CAU se pun condiții la limită pentru modul de propagare a undei  $\xi(x)$  astfel încât să fie satisfăcută de o anumită suprafață  $S(x)$ . În lucrarea [40] au fost impuse următoarele condiții:

a) Mărimea secțiunii CAU la îmbinarea cu T se stabilește astfel încât să se obțină o adaptare de impedanță mecanică corespunzător unui transfer de putere maxim. Fie această secțiune ( $x = 0$ ):



Tabelul 4.7

$\Delta$	+	0	-	-	0	-	-	0	+
$R(x)$	$(-\infty, -2k)$	$-2k$	$(-2k, 0)$	$0$	$(0, 2k)$	$2k$	$(2k, +\infty)$		
Regim	Aperiodic	Aperiodic critic	Oscilant amortizat	Oscilant neamortizat	Oscilant amortizat	Aperiodic critic	Aperiodic		
$\xi(x)$	$A \cdot e^{\lambda_1 x} + B e^{\lambda_2 x}$ $S_0 \cdot e^{-\alpha x}$ $\cos \beta x + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin \beta x$	$S_0 \cdot (1 - kx) \cdot e^{kx}$	$S_0 \cdot e^{-\alpha x}$ $\cos(\beta x) + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin(\beta x)$	$S_0 \cdot \cos kx$	$S_0 \cdot e^{-\alpha x}$ $\cos(\beta x) + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin(\beta x)$	$S_0 \cdot (1 + kx) \cdot e^{-kx}$	$A \cdot e^{\lambda_1 x} + B e^{\lambda_2 x}$ $S_0 \cdot e^{-\alpha x}$ $\cos \beta x + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin \beta x$		
$\frac{d\xi(x)}{dx}$	$A \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 x} + B \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 x}$	$-S_0 \cdot x \cdot k^2 \cdot e^{kx}$	$-S_0 \cdot \sin kx$			$-S_0 \cdot x \cdot k^2 \cdot e^{-kx}$	$A \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 x} + B \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 x}$ $-S_0 \cdot e^{-\alpha x}$		
$S(x)$	$\frac{d}{dx} [\ln S(x)] < 0$	$S_0 \cdot e^{-2kx}$	constant			$S_0 \cdot e^{2kx}$			
Forma CAU									
Observatii		CAU exponential		CAU cilindric		D exponential			

$$S(x) = S_1 \quad (4.177)$$

b) În planul de separație CAU - T ( $x = 0$ ), amplitudinea de vibrație a concentratorului este egală cu cea a transductorului, adică:

$$\xi(0) = \xi_0 = \xi_1 \quad (4.178)$$

c) La capetele CAU se impune ca tensiunea mecanică să fie nulă:

$$\frac{d\xi}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{d\xi}{dx} \Big|_{x=1} = 0 \quad (4.179)$$

d) Din punct de vedere al aplicației tehnologice se determină amplitudinea de vibrație la ieșirea din CAU ( $x = 1$ ):

$$\xi_2 = k_n \cdot \xi_1 \quad (4.180)$$

La  $x = 0$  amplitudinea de vibrație este  $\xi(x) = \xi_1$ , se anulează în punctul nodal  $x_0$  și ajunge la valoarea impusă  $\xi(x) = \xi_2$  în punctul  $x = 1$ .

e) Pentru a păstra univocitatea temporală a solicitării materialului CAU se impune ca tensiunea mecanică să nu se anuleze:

$$\frac{d\xi}{dx} \neq 0 \quad \text{pentru } x \in (0, 1) \quad (4.181)$$

f) Pentru ca amplitudinile oscilațiilor în timp a punctelor de pe concentrator să se amplifice în spațiu se pune condiția:

$$\frac{\partial}{\partial x} [\ln(S_x)] < 0 \quad (4.182)$$

g) Fixarea CAU se face în nodul de oscilație  $x_0$  pentru care este îndeplinită condiția:

$$\xi(x_0) = 0 \text{ și } x_0 \in (0, 1) \quad (4.163)$$

h) Tensiunea mecanică în concentrator nu trebuie să depășească o valoare maximă admisibilă:

$$\left| \frac{d\xi}{dx} \right| \leq \sigma_{\max, adm} \quad \text{pentru } x \in [0, 1] \quad (4.164)$$

i) Pentru ca relația de calcul a suprafeței  $S(x)$  - relația (4.173) - să aibă sens în punctele  $x = 0$  și  $x = 1$ , se aleg:

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} \Big|_{x=0} = -k^2 \cdot \xi_0 \quad (4.165.a)$$

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} \Big|_{x=1} = k_A \cdot k^2 \cdot \xi_0 \quad (4.165.b)$$

Amplitudinea de vibrație prin concentrator  $\xi(x)$  se aproximează cu un polinom de gradul 5 cu șase coeficienți constanți:

$$\xi(x) = \xi_1 + \xi_2 \cdot x + \xi_3 \cdot x^2 + \xi_4 \cdot x^3 + \xi_5 \cdot x^4 + \xi_6 \cdot x^5 \quad (4.166)$$

rezultând pentru derivatele de ordinul unu și doi expresiile:

$$\frac{d\xi}{dx} = \xi_2 + 2 \cdot \xi_3 \cdot x + 3 \cdot \xi_4 \cdot x^2 + 4 \cdot \xi_5 \cdot x^3 + 5 \cdot \xi_6 \cdot x^4 \quad (4.167.a)$$

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} = 2 \cdot \xi_3 + 6 \cdot \xi_4 \cdot x + 12 \cdot \xi_5 \cdot x^2 + 20 \cdot \xi_6 \cdot x^3 \quad (4.167.b)$$

În principiu, metoda constă în determinarea variației funcțiilor  $\xi(x)$ ,  $d\xi(x)/dx$  și  $d^2\xi/dx^2$  în ipoteza respectării condițiilor restrictive (4.177, ...,

4.185.b) în intervalul  $[0, 1]$ . Problema care se pune în această situație este de a alege soluția care răspunde cel mai bine aplicației tehnologice. Metoda cea mai eficientă constă în furnizarea prin program a unui criteriu de optimizare în baza căruia calculatorul să aleagă doar soluțiile optime.

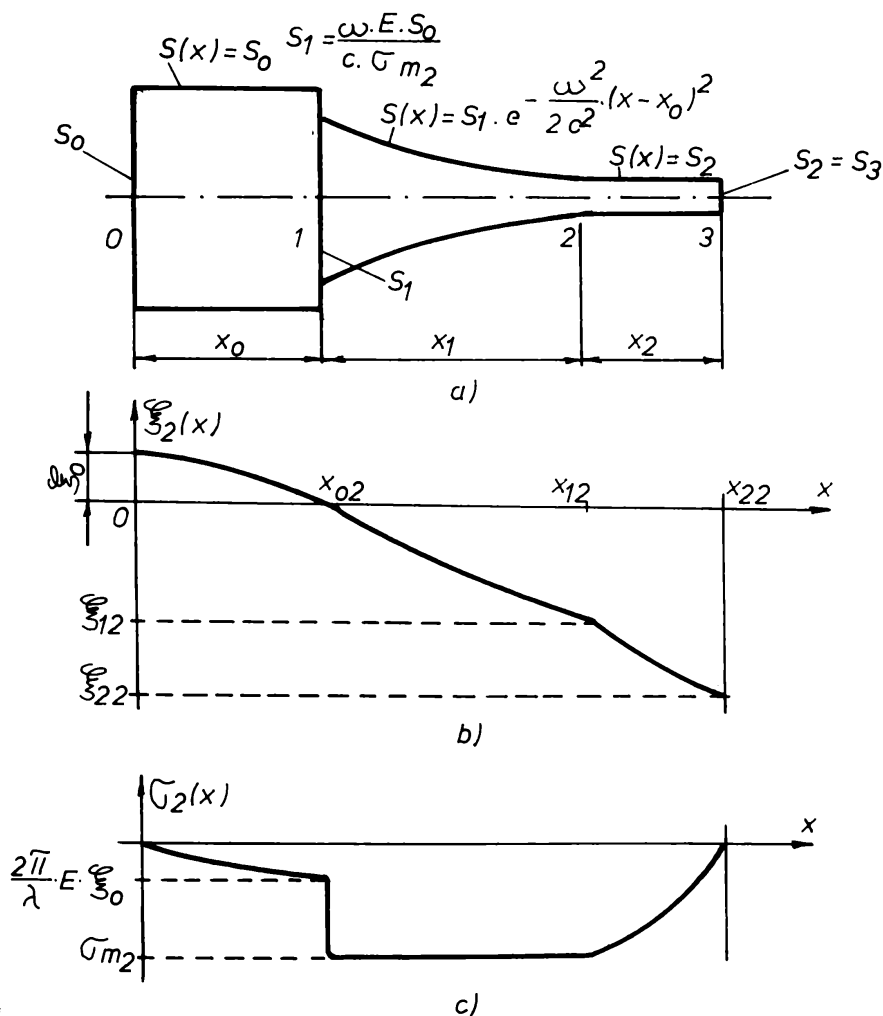


Fig. 4.40

- Schema de calcul a unui CAU complex: 1-cilindric; 2-exponențial; 3-cilindric
- $S(x), S_2(x), G_2(x)$  - legea de variație a secțiunii, amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x$
- $S_0, S_1, S_2, S_3$  - secțiunea CAU în planele 0, 1, 2 și 3
- $x_0, x_1, x_2$  - lungimile tronsoanelor
- $\omega$  - pulsația
- $E$  - modul de elasticitate
- $G_{m2}$  - tensiunea mecanică maximă
- $S_0$  - amplitudinea la intrarea în CAU
- $x_{02}$  - nodul de oscilație
- $S_{12}, S_{22}$  - amplitudinea în secțiunea corespunzătoare coordonatei  $x_{12}$ , respectiv  $x_{22}$

Introducerea [6, 119] drept criteriu de optimizare s-a ales criteriul amplificării maxime. Astfel, dintre toate CAU care au aceleași arii ale secțiunilor la capete și în care se dezvoltă aceeași valoare maximă a tensiunii mecanice, s-a determinat profilul concentratorului care realizează cea mai mare amplificare a amplitudinii de vibrație. Acesta este prezentat în fig. 4.40 a, b și c și este alcătuit din trei tronsoane: 1-cilindric - 2-exponențial - 3-cilindric, unde trecerea de la tronsonul

cilindric 1 la cel exponențial 2 se face printr-un salt de diametru, secțiunea de început  $S_1$  fiind determinată din condiția de continuitate a amplitudinii de vibrație:

$$S_1 = k \cdot E \cdot \frac{S_0}{\sigma_{m_2}} \quad (4.188)$$

unde:

$\sigma_{m_2}$  - reprezintă tensiunea mecanică maximă;

Din [26,92] se constată că din punct de vedere al amplificării cel mai bun concentrator este cel cilindric în trepte. Comparând aceste două concentratoare, se impune condiția ca tensiunile mecanice maxime să fie egale:

$$\sigma_{m_1} = \sigma_{m_2} \quad (4.189)$$

unde indicele 1 se referă la CAU cilindric în trepte, iar indicele 2 simbolizează CAU din fig.4.40 a.

Din relația (4.11) se poate deduce tensiunea mecanică maximă:

$$\sigma_{m_1} = k_1 \cdot k \cdot E \cdot \xi_0 \quad (4.190)$$

Derivând amplitudinea de vibrație  $\xi_2(x)$  în raport cu coordonata  $x$ , se obține tensiunea mecanică  $\sigma_2(x)$  pe tronsoane după cum urmează:

- tronson cilindric 1:

$$\sigma_2(x) = k \cdot E \cdot \xi_0 \cdot \sin kx \quad \text{pentru } x \in [0, \lambda/4] \text{ și } x_{02} = \lambda/4$$

- tronson exponențial 2:

$$\sigma_2(x) = \sigma_{m_2} \quad \text{pentru } x \in [\lambda/4, x_{12}]$$

- tronson cilindric 3:

$$\sigma_2(x) = k \cdot E \cdot \xi_{12} \cdot \frac{\sin k(x-x_{12})}{\cos k(x_{12}-x_{22})} \quad \text{pentru } x \in [x_{12}, x_{22}]$$

În punctul de coordonată  $x = x_{12}$  se obține tensiunea mecanică maximă în CAU cilindric - exponențial - cilindric, având expresia:

$$\sigma_{m_2} = k \cdot E \cdot \xi_{12} \cdot \operatorname{tgk}(x_{12} - x_{22}) \quad (4.191)$$

Înlocuind relațiile (4.190) și (4.191) în egalitatea (4.189) se obține:

$$k_A \cdot k \cdot E \cdot \xi_n = k \cdot E \cdot \xi_{12} \cdot \operatorname{tgk}(x_{12} - x_{22}) \quad (4.192)$$

Însă pe tronsonul 3 amplitudinea de vibrație este:

$$\xi_{22} = \xi_1 \cdot \cos k(x_{12} - x_{22}) \quad \text{pentru } x \in [x_{12}, x_{22}] \quad (4.193)$$

Deasemenea, pentru un CAU cilindric în trepte, amplitudinea de vibrație la ieșire este:

$$\xi_{21} = k_A \cdot \xi_n \quad (4.194)$$

Introducând valorile  $\xi_{21}$  și  $\xi_{22}$  în relația (4.192) se obține:

$$\xi_{21} = \xi_{22} \cdot \operatorname{sink}(x_{12} - x_{22}) \quad (4.195)$$

de unde rezultă:

$$\xi_{21} < \xi_{22} \quad \text{pentru } x_{12} \neq x_{22} \quad (4.196)$$

Această relație demonstrează superioritatea concentratorului din fig. 4.40 a față de CAU cilindric în trepte. Punând condițiile de continuitate la trecerea dintre tronsoanele 2 - 3 și obținerea de viteze nule de particole la ieșirea din concentrator, se pot determina coordonatele:

$$x_{12} = x_{22} + \frac{1}{k} \cdot \sqrt{-2 \ln \frac{S_2}{S_1}} \quad (4.197.a)$$

respectiv:

$$x_{22} = x_{12} + \frac{1}{k} \cdot \left[ \arccos \frac{\xi_{22}}{k'_A \cdot \xi_{12}} \right] \quad (4.197.b)$$

unde:  $x_{02} = \lambda/4$  și  $k'_\lambda = \epsilon_{222}/\epsilon_0$

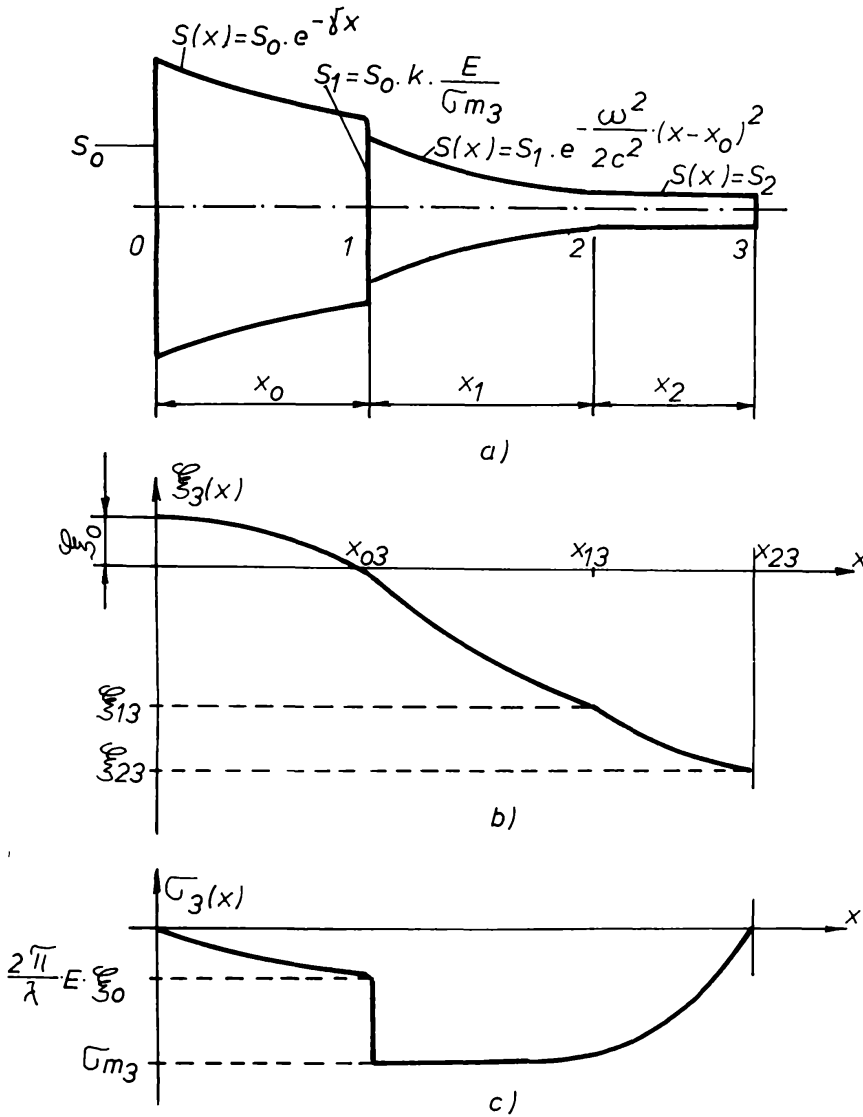


Fig. 4.41

Schema de calcul a unui CAU complex: 1-exponențial; 2-exponențial; 3-cilindric

$S(x), S_3(x), \sigma_3(x)$  - legea de variație a secțiunii, amplitudinii de vibrație și a tensiunii mecanice în funcție de coordonata  $x$

$S_0, S_1, S_2$  - secțiunea CAU în planele 0, 1 și 2(3)

$x_0, x_1, x_2$  - lungimile tronsoanelor

$\delta$  - coeficientul de reducere a secțiunii

$k$  - număr de undă

$E$  - modul de elasticitate

$Gm_3$  - tensiunea mecanică maximă

$S_{30}$  - amplitudinea de vibrație la intrarea în CAU

$c$  - viteza sunetului în CAU

$x_{02}$  - nodul de oscilație

$S_{312}, S_{322}$  - amplitudinea în secțiunea corespunzătoare coordonatei  $x_{12}$ , respectiv  $x_{22}$

În lucrarea [40] se propune un CAU - fig. 4.41 a, b și c - alcătuit tot din trei tronsoane: 1 - exponențial - 2 exponențial - 3 cilindric, având un salt de secțiune între tronsoanele exponențiale 1 - 2 și în care aria secțiunii de început al celui de-al doilea tronson exponențial  $S_1$  a fost determinată din condiția de rezistență mecanică a materialului concentratorului.

$$S_1 = k \cdot E \cdot \frac{S_0}{Gm_3}$$

unde

$Gm_3$  reprezintă tensiunea mecanică maximă pentru concentratorul din fig. 4.41.

Ținând o cale analogă de demonstrație făcută la compararea dintre CAU cili-

dric în trepte cu cel din fig.4.40, se deduce în final:

$$|\xi_{22}| = |\xi_{23}| \quad (4.198)$$

adică amplitudinea de vibrație la ieșire este egală pentru concentratoarele redată în fig.4.40 a și fig.4.41 a. Din condițiile la limită impuse, se obțin următoarele expresii ale amplitudinii de vibrație și ale tensiunii mecanice pe fiecare tronson după cum urmează:

- tronson exponențial 1:

$$\xi_1(x) = \xi_0 \cdot \frac{1}{2\beta} \cdot \left[ \left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \cdot e^{\left(\frac{\gamma+\beta}{2}\right)x} + \left(\beta + \frac{\gamma}{2}\right) \cdot e^{\left(\frac{\gamma-\beta}{2}\right)x} \right]^2 \quad (4.199)$$

$$\sigma_1(x) = \xi_0 \cdot E \cdot \frac{(\beta^2 - \frac{\gamma^2}{4})}{2\beta} \cdot \left[ e^{\left(\frac{\gamma+\beta}{2}\right)x} - e^{\left(\frac{\gamma-\beta}{2}\right)x} \right] \quad (4.200)$$

pentru  $x \in [0, x_{03}]$

și

$$\beta = \frac{\sqrt{\gamma^2 - 4k^2}}{2}$$

- tronson exponențial 2:

$$\xi_2(x) = \frac{\sigma_{m3}}{E} \cdot (x_{03} - x) \quad (4.201)$$

$$\sigma_2(x) = \sigma_{m3} \quad (4.202)$$

pentru  $x \in [x_{03}, x_{13}]$

- tronson cilindric 3:

$$\xi_3(x) = \xi_{13} \cdot \frac{\cos k(x - x_{23})}{\cos k(x_{13} - x_{23})} \quad (4.203)$$



$$\sigma_3(x) = \frac{1}{k} \cdot E \cdot \xi_{13} : \frac{\sin k(x-x_{03})}{\cos k(x_{13}-x_{23})} \quad (4.204)$$

pentru  $x \in [x_{13}, x_{23}]$

Punând  $x = x_{03}$  în relația (4.199) și anulând amplitudinea de vibrație, se determină nodul de oscilație:

$$x_{03} = \frac{1}{2\beta} \cdot \ln \frac{\frac{\gamma}{2} + \beta}{\frac{\gamma}{2} - \beta} \quad x_{03} = \frac{\lambda}{4} \quad (4.205)$$

Din condiția de continuitate a forțelor elastice în secțiunea 2 - 3 se deduce coordonata  $x_{13}$  care are expresia:

$$x_{13} = x_{03} + \frac{1}{k} \cdot \sqrt{-2 \ln \frac{S_2}{S_1}} \quad (4.206)$$

În mod similar cazului precedent [119], se determină coordonata  $x_{23}$  cu relația:

$$x_{23} = x_{13} + \frac{1}{k} \cdot \left[ \arccos \frac{\xi_{23}}{k''_A \cdot \xi_{13}} \right] \quad (4.207)$$

unde:

$$k''_A = \frac{E \xi_{23}}{\xi_0}$$

Comparând concentratoarele din fig. 4.40 a și fig. 4.41 a, în condiții de tensiune mecanică maximă și amplitudini de vibrație la ieșirea din concentrator egale:

$$\sigma_{m2} = \sigma_{m3}$$

și

$$\xi_{22} = \xi_{23}$$

rezultă că CAU exponențial - exponențial - cilindric este mai scurt. Pentru acest concentrator, cunoscând  $S_0$ ,  $k_x$ ,  $f$  și materialul din care se confecționează -  $c$ ,  $\lambda$  și  $E$  - s-au determinat prin program [40] funcțiile  $\xi(x)$ ,  $d\xi/dx$  și  $d^2\xi/dx^2$ . În continuare se poate calcula aria secțiunii concentratorului rezolvând ecuația diferențială (4.173) care admite soluția:

$$S(x) = S_0 \cdot e^{-\int_0^x I dx} \quad (4.208)$$

unde:

$$I = \int_0^x \frac{\frac{d^2\xi}{dx^2} + k^2 \cdot \xi}{\frac{d\xi}{dx}} dx \quad (4.209)$$

iar  $x$  este discretizat cu  $\Delta x = 0,01$  pe intervalul  $[0, 1]$ .

TABELUL 4.8

$x$	$\xi(x)$	$d\xi(x)/dx$	$d^2\xi(x)/dx^2$
0,0	1,0000000	0,0000000	-9,8690243
0,1	0,9052739	42,2942505	-33,8783875
0,2	0,4818126	46,3737240	-45,8201016
0,3	-0,3911695	-11,1092606	-47,2555237
0,4	-1,7292166	-15,5251694	-39,6918945
0,5	-3,4579697	-18,7991180	-24,6725769
0,6	-5,4285097	-20,2623138	-3,7318115
0,7	-7,4327059	-19,3992767	21,5968846
0,8	-9,2185890	-15,8480072	49,7767792
0,9	-10,5056004	-9,3999634	79,2757111
1,0	-11,0000114	-0,0000610	108,5500363

Dacă CAU exponențial - exponențial - cilindric este confecționat din oțel cu  $c = 5,08 \cdot 10^3$  m/s și este dimensionat în  $\lambda/2$ , atunci la frecvența de rezonanță  $f = 20$  kHz și factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  $k_x = 11$ ,

se obțin următoarele valori ale funcțiilor  $\xi(x)$ ,  $d\xi/dx$  și  $d^2\xi/dx^2$  - tabelul 4.8 - pentru  $x$  discretizat în valori relative în intervalul  $[0, 1]$  cu  $\Delta x = 0,1$ .

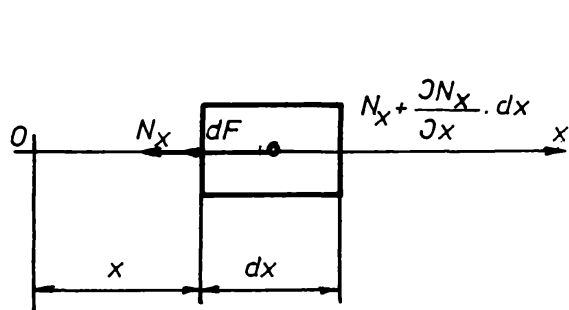
În cazul concentratoarelor complexe, se pot obține rapoarte ale amplitudinii de vibrație mai mari, respectiv tensiuni mecanice mai mici decât la concentratoarele de formă simplă [94]. Și în această situație, dacă CAU complexe li se atașează OT(S), atunci lungimea de rezonanță a concentratorului se mărește. Influența este cu atât mai mare cu cât secțiunea și lungimea sculelor este mai mare. Dacă suprafața secțiunii OT(S) este mai mică decât suprafața secțiunii transversale a părții inferioare a concentratorului, crește amplitudinea de vibrație la capătul sculei [98] care este cu atât mai mare cu cât scula este mai subțire și mai lungă (în limitele până la  $\lambda/4$ ).

CAPITOLUL 5. MODALITATI DE ACTIVARE CU ULTRASUNETE A ELECTRODULUI FILIFORM

5.1 VIBRATIILE SISTEMELOR CONTINUE. VIBRATIA FIRELOR

Un fir poate fi scos din poziția de echilibru static printr-un impuls sau o deplasare inițială, orientate fie după direcția X, fie după direcția Y perpendiculară pe direcția X. După încetarea acțiunii perturbației inițiale, firul poate executa vibrații libere longitudinale și transversale, iar dacă perturbația se menține, firul poate executa vibrații forțate.

Se consideră un fir elastic, extensibil și perfect flexibil, de lungime finită l, cu diametrul d și greutatea pe unitatea de lungime  $\mu$ , întins cu o forță N.



$N_x$  - efortul în secțiunea x  
 $dF$  - forța de inerție

Fie un element de fir de lungime  $dx$  în mișcare vibratorie (oscilatorie) transversală după x [4,59,91]

Fig. 5.1

Element de fir de lungime  $dx$  aflat în mișcare vibratorie transversală după direcția x

- fig.5.1 -  
 asupra căruia acționează în

secțiunile x și  $dx$  eforturile și forțele de inerție notate cu

$$N_x, N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx, dF$$

Din condiția de echilibru dinamic rezultă:

$$N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx - N_x = dF \quad (5.1)$$

Exprimând efortul  $N_x$  și forța de inerție  $dF$  în funcție de deplasarea  $\xi(x,t)$  de abscisă x la momentul t a secțiunii x, se obține:

$$N_x = N + T \cdot dx \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (5.2)$$

și

$$dF = dm \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \mu \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (5.3)$$

de unde se deduce ecuația de mișcare:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{N}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (5.4)$$

care mai este cunoscută și sub denumirea de ecuația coardelor vibrante.

Notând cu

$$c = \sqrt{\frac{N}{\mu}}$$

unde:

$c$  - viteza de propagare a undelor - vibrațiilor - transversale în  
lungul firului,

ecuația generală de propagare a undelor transversale în fir (5.4) se mai poate  
scrie:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (5.5)$$

Când asupra elementului de fir  $dx$  acționează o forță excitatoare  
transversală concentrată într-un punct  $F_o(x, t): dx$ , ecuația de mișcare devine:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{N \cdot \mu} \cdot F_o(x, t) \quad (5.6)$$

Soluțiile ecuațiilor (5.5) și (5.6) descriu vibrația liberă sau forțată a firului dacă sunt satisfăcute condițiile inițiale și condițiile la limită.

Condițiile inițiale precizează deplasarea și viteza la momentul  $t = 0$  în fiecare secțiune a firului:

$$\xi(x, 0) = f(x) \quad (5.7.a)$$

$$\left. \frac{\partial \xi}{\partial t} \right|_{t=0} = g(x) \quad (5.7.b)$$

unde:

$f, g(x)$  - funcții dependente de abscisa  $x$ .

Condițiile la limită precizează modul de prindere a firului. Dacă firul este fixat sau ghidat la ambele capete, condițiile la limită sunt:

$$\xi(0, t) = 0 \quad (5.8.a)$$

$$\xi(1, t) = 0 \quad (5.8.b)$$

În cazul în care în fir se propagă oscilații armonice produse după o lege de forma:

$$\xi(x, t) = \xi(x) \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (5.9)$$

unde:

$\omega$  - pulsația;

$\phi$  - defazajul,

ecuația generală de mișcare - (5.5) sau (5.6) - va fi descrisă de ecuația diferențială de ordinul doi depinzând numai de o coordonată:

$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} + \frac{\mu}{N} \cdot \omega^2 \cdot \xi = 0 \quad (5.10)$$

Ecuația (5.10) reprezintă forma de variație a amplitudinii de vibrație  $\xi(x)$  în lungul firului. Soluția ei este de forma:

$$\xi(x) = A \cdot \sin kx + B \cdot \cos kx \quad (5.11)$$

în care:  $k = \omega/c$  - număr de undă;

$A, B$  - constante de integrare.

Deoarece condițiile la limită trebuie să fie satisfăcute în orice moment  $t$ , rezultă:

$$\xi(0) = 0 \quad (5.12.a)$$

$$\xi(l) = 0 \quad (5.12.b)$$

de unde se deduce:

$$A = 0 \quad (5.13.a)$$

$$A \cdot \sin kl = 0 \quad (5.13.b)$$

Intrucât  $A = 0$ , înseamnă amplitudini de vibrație nule în toate secțiunile firului, se concluzionează că această constantă este nenulă. Prin urmare, condiția (5.13.a) este satisfăcută dacă:

$$kl = n\pi \text{ sau } k = n\pi/l, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.14)$$

iar  $n$  - mod de oscilație.

Există deci o infinitate de soluții  $\xi_n(x)$  de forma:

$$\xi_n(x) = A \cdot \sin \frac{n\pi}{l} \cdot x \quad (5.15)$$

care satisface simultan ecuațiile de mișcare (5.5) și (5.6) și condițiile la limită (5.8.a) și (5.8.b). Din condiția (5.14) se pot obține o infinitate de valori pentru parametrul  $\omega$ :

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \cdot \sqrt{\frac{N}{\mu}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.16)$$

Există deci o infinitate de mișcări vibratorii armonice de pulsații  $\omega_n$  în care forma deformată a firului este dată de:

$$\xi_n(x, t) = \xi_n(x) \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (5.17)$$

Mișcarea caracteristică dată de o deplasare de tipul (5.17) se numește mod propriu de vibrație de ordinul  $n$ , având pulsații proprii  $\omega_n$  și funcții (amplitudini) proprii  $\xi_n(x)$ . Pentru ca vibrația să se producă după unul din modurile proprii, trebuie să fie asigurate anumite condiții inițiale. Astfel, modul propriu  $n$  de vibrație se realizează dacă în condițiile (5.17), funcțiile  $f(x)$  și  $g(x)$

au forma [4,59]:

$$f(x) = \xi_n(x, 0) = \xi_n(x) \cdot \sin \phi_n \quad (5.16.a)$$

$$g(x) = \left. \frac{\partial \xi_n}{\partial t} \right|_{t=0} = \xi_n(x) \cdot \omega_n \cdot \cos \phi_n \quad (5.16.b)$$

O dată cunoscute funcțiile  $f(x)$  și  $g(x)$  se pot determina  $\xi_n$  și  $\phi_n$  care reprezintă amplitudinea de vibrație și faza inițială a mișcării.

Alte condiții inițiale diferite de (5.16.a) și (5.16.b) pot conduce la mișcări periodice, nearmonice, soluția ecuației fiind o suprapunere de moduri proprii:

$$\xi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \xi_n(x) \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (5.19)$$

Necunoscutele  $\xi_n$  și  $\phi_n$  se determină [4,59] din condiții inițiale dezvoltând funcțiile  $f(x)$  și  $g(x)$  în serii de funcții proprii.

## 5.2 VIBRAȚIA ELECTRODULUI FILIFORM UTILIZAT LA PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE

### 5.2.1 Activarea electrodului filiform într-un singur punct

Schema de principiu a activării electrodului filiform este prezentată [60,64,73] în fig.5.2.

Elementul de ghidare  $EG_1$  este activat cu ultrasunete cu frecvența  $f_s$  și amplitudinea  $\xi_s$ . Electrocul filiform este întins cu o tensiune mecanică  $N$  și se deplasează cu o viteză  $v = ct$ . Electrocul filiform este ținut sub tensiune electrică prin elementele de alimentare  $EA_1$  și  $EA_2$  și condus de elementele de ghidare  $EG_1$  și  $EG_2$  și rolele de ghidare  $RG_1$  și  $RG_2$ . Se notează cu 1, 2, 3 și 4 punctele de contact dintre electrocul filiform  $OT$  și  $EA_1$ ,  $EG_1$ ,  $EG_2$  și  $EA_2$ , respectiv cu  $l'_1$ ,  $l_1$  și  $l''_1$  distanțele dintre  $EA_1 - EG_1$ ,  $EG_1 - EG_2$  și  $EG_2 - EA_2$ . Distanța  $l_1$  dintre  $EG_1$  și  $EG_2$  este variabilă în funcție de grosimea semifabricatului. În exemplul din fig.5.2 se consideră  $l_1 = ct$ . Deasemenea, distanțele  $l'_1$ ,  $l''_1 = ct$  și se stabilesc din punct



de vedere constructiv și funcțional.

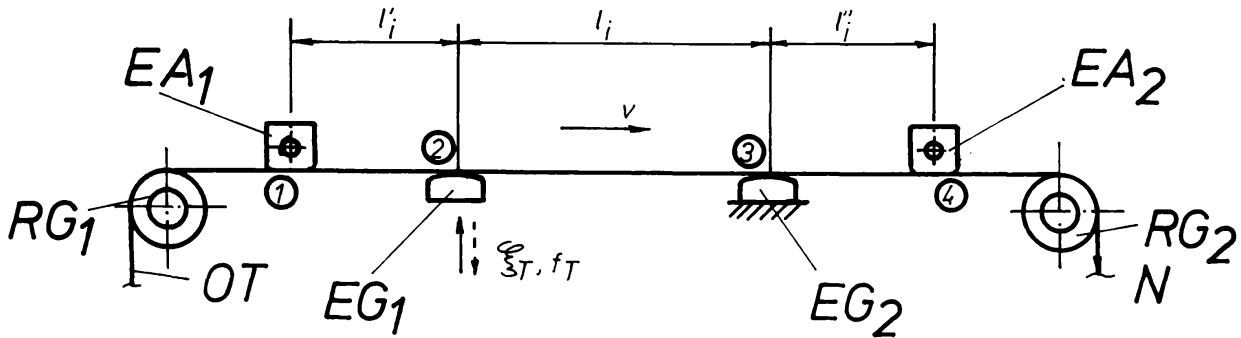


Fig. 5.2

Schema de principiu a activării ultrasonice a electrodului filiform într-un singur punct

$EA_1, EA_2$  - elemente de alimentare cu energie electrică a electrodului filiform

$EG_1, EG_2$  - elemente de ghidare a electrodului filiform

$RG_1, RG_2$  - role de ghidare a electrodului filiform

$OT$  - obiect de transfer (electrod filiform)

$\xi_T, f_T$  - amplitudinea de vibrație, respectiv frecvența vibrației a transductorului

$l_i, l_i, l_i'$  - distanțele dintre  $EA_1-EG_1, EG_1-EG_2$  și  $EG_2-EA_2$

$N$  - efortul în  $OT$

$v$  - viteza de deplasare a  $OT$  în lungul axei sale

Fie soluția generală a ecuației de mișcare (5.5) exprimată sub forma [61, 110]:

$$\xi(x, t) = f_1(ct - x) + f_2(ct + x) \quad (5.20)$$

Prin urmare, deformarea firului într-un punct oarecare dă naștere la două unde, una care se mișcă în sens pozitiv cu viteza  $c$  caracterizată de ecuația:

$$\xi = f_1(ct - x),$$

și alta care se mișcă în sens negativ cu aceeași viteză  $c$ , având ecuația:

$$\xi = f_2(ct + x),$$

în direcția  $x$ .

În cazul primei soluții,  $\xi = f_1(ct - x)$ , la momentul  $t = 0$  deplasarea transversală devine  $\xi_0 = f_1(-x)$ . După un timp egal cu perioada de oscilație  $t = T$  - fig. 5.3 a și b - deplasarea transversală a punctului este:

$$\xi_r = f_1(ct - x) - f_1[-(x + ct)],$$

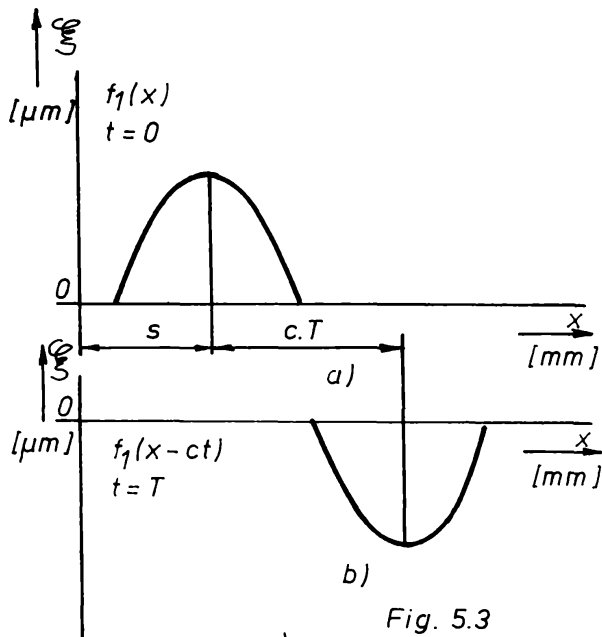


Fig. 5.3

Schema de deformare a electrodului filiform

- $\xi$  - amplitudinea de vibrație
- $c$  - viteza sunetului în electrodul filiform
- $t$  - timpul
- $T$  - perioada unei vibrații
- $s$  - distanța primei vibrații față de momentul  $t=0$
- $f_1$  - legea de deformare a electrodului filiform în timp ( $t$ ) și spațiu ( $x$ )

iar perturbația s-a deplasat în lungul firului cu  $ct$ .

În mod similar, ecuația  $\xi = f_2(ct + x)$  reprezintă o undă care se deplasează în sens contrar cu viteza  $c$ , iar la momentul

$t = T$ , s-a

deplasat cu  $ct$ . Dacă firul este fixat la capete de elementele de ghidare  $EG_1$  și  $EG_2$  sau între elementele de ghidare și elementele de alimentare  $EA_1 - EG_1$  și  $EG_2 - EA_2$ , perturbația produsă într-un punct se propagă în lungul firului, se reflectă la o extremitate și se întoarce în sens contrar, compunându-se cu unda incidentă. Prin interferență, se formează în acest fel unde staționare - fig.5.4 - dacă se respectă condiția:  $\xi = 0$  pentru  $x = 0$  sau  $x = l$  la orice moment  $t$ .

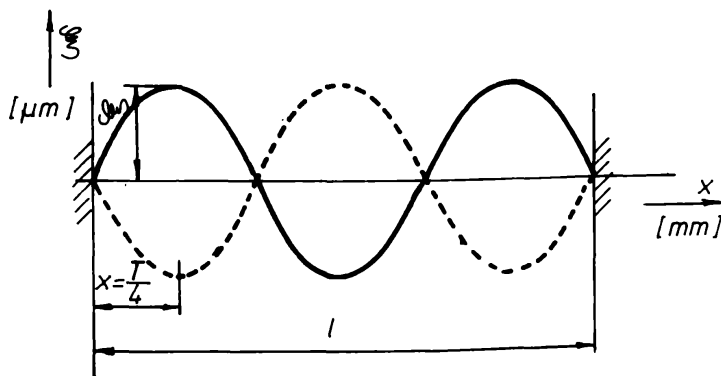


Fig. 5.4

Formarea undelor staționare în electrodul filiform

- $\xi$  - amplitudinea de vibrație
- $T$  - perioada unei vibrații
- $l$  - distanța dintre două puncte de sprijin a electrodului filiform

Cunoscând frecvența de vibrație  $f_1$  pentru modul propriu  $n$ .

$$f_n = \frac{nc}{2l}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.21)$$

se poate deduce lungimea de undă  $\lambda_n$ :

$$\lambda_n = \frac{c}{f_n} = \frac{2l}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.22)$$

Prin urmare, condiția ca în fir să ia naștere unde staționare este aceea ca lungimea de undă  $\lambda_n$  să fie un număr întreg. În această situație, ecuația de mișcare a undelor devine:

$$\xi(x, t) = \sum_{n=1}^n (A_n \cdot \cos k_n t + B_n \cdot \sin k_n t) \cdot \sin k_n x \quad (5.23)$$

unde:

$$k_n = \frac{\omega_n}{c} \quad - \text{ număr de undă corespunzător modului propriu de vibrație } n;$$

$A_n, B_n$  - constante de integrare.

Pentru  $n = 1$ , deplasarea punctului devine:

$$\xi_1 = (A_1 \cdot \cos k_1 t + B_1 \cdot \sin k_1 t) \cdot \sin k_1 x \quad (5.24)$$

iar

$$f_1 = \frac{c}{2l} \quad (5.25)$$

care reprezintă frecvența fundamentală a mișcării oscilatorii. Pentru celelalte moduri de vibrație, frecvențele  $f_n$  se numesc armonice superioare.

Amplitudinea deplasării diferitelor particole ale firului variază în lungul acestuia și se anulează pentru pozițiile în care:

$$\sin k_n x = 0 \quad (5.26)$$

adică

$$\frac{\omega_n}{c} \cdot x = q \cdot \pi, \quad q = 0, 1, 2, \dots, n \quad (5.27)$$

Dar:

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{l} \quad (5.28)$$

de unde:

$$\frac{n\pi x}{l} = q\pi \quad (5.29)$$

Din egalitatea (5.29) se deduce poziția absciselor firului  $x$  pentru care amplitudinile de vibrație  $\xi_n$  sunt nule:

$$x_q = \frac{q}{n} \cdot l \quad (5.30)$$

Aceste poziții se numesc puncte nodale sau noduri. Situațiile în care  $q = 0$  și  $q = n$ , corespund condițiilor limită la capetele firului - fig.5.4 - când amplitudinea deplasării este nulă. Pentru modul propriu de vibrație  $n$ , numărul de noduri este  $n + 1$  iar distanța dintre două noduri succesive este egală cu  $l/n$ .

Amplitudinea deplasării devine maximă pentru pozițiile în care:

$$\sin k_n x = 1 \quad (5.31)$$

adică:

$$\frac{\omega_n}{c} \cdot x = (2q+1) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad q = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (5.32)$$

sau

$$\frac{n\pi x}{l} = (2q+1) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (5.33)$$

de unde:

$$x_{q'} = \frac{2q+1}{2n} \cdot l \quad (5.34)$$

Pozițiile  $x_q$  în lungul firului se numesc ventre iar distanța dintre două ventre este egală cu distanța dintre două noduri, adică cu  $l/n$ . Pentru  $n$  moduri de vibrație, numărul de ventre este egal cu  $n$ . În cazul modului fundamental de vibrație  $n = 1$ , avem un singur ventru și două noduri, poziția corespunzătoare a amplitudinii maxime fiind la jumătatea lungimii firului. Cum viteza de propagare este:

$$c = \sqrt{\frac{N}{\mu}}$$

frecvența corespunzătoare modului propriu de vibrație  $n$  este dată de expresia:

$$f_n = \frac{nC}{2l} = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{N}{\mu}} \quad (5.35)$$

Dacă se ține seama de faptul că greutatea pe unitatea de lungime  $\mu$  se mai poate exprima:

$$\mu = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho \quad (5.36)$$

unde:

$\rho$  - greutatea specifică a materialului firului,  
atunci relația (5.35) devine:

$$f_n = \frac{n}{ld} \cdot \sqrt{\frac{N}{\pi\rho}} \quad (5.37)$$

Relația (5.37), cunoscută în literatura de specialitate sub denumirea de formula lui Taylor, prezintă erori datorită ipotezelor simplificatoare impuse firului, erori care sunt cu atât mai mari cu cât firul este mai scurt și mai gros, forța de întindere mai mică iar amplitudinea de vibrație mai mare.

Problema care se pune în continuare este de a determina amplitudinea de vibrație a electrozudului filiform pe porțiunile 1 - 2, 2 - 3 și 3 - 4 precum și distanțele  $l_1, l'_1, l''_1, i = 1, 2, 3, \dots, n$  dintre aceste puncte. Din considerente funcționale, se precizează că amplitudinea de vibrație a firului este maximă în punctul 2 și nulă în punctele 1, 3 și 4. Se admite că electrozudul filiform este activat în modul fundamental de vibrație  $n = 1$  și se consideră că distanțele  $l_1, l'_1, l''_1$  sunt suficient de mici pentru ca pierderile prin frecare - amortizare - între punctele 1 - 2, 2 - 3 și 3 - 4 să fie practic nule.

Schema de variație a amplitudinii de vibrație a firului între punctele 1 - 2, 2 - 3 și 3 - 4 pe baza considerentelor de mai sus este prezentată în fig. 5.5.

Considerând că electrozudul filiform este confecționat din sârmă de cupru -  $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  - cu diametrul de 0,2 mm și este întins cu o forță  $N = 0,06 \text{ kg.m/s}^2$  [39,107], se poate stabili viteza de propagare a vibrațiilor transversale în lungul firului:

$$c = \sqrt{\frac{N}{\mu}} = 145,3 \text{ m/s}$$

unde:

$$\mu = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot 8,9 \cdot 10^4 = 0,27946 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}$$

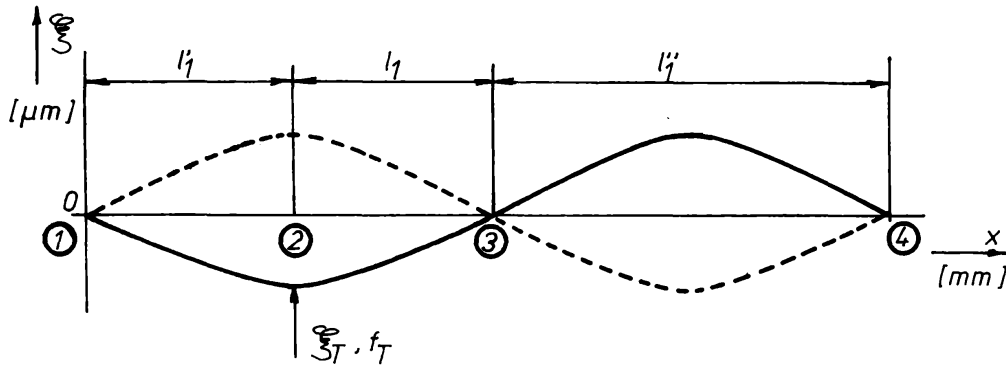


Fig. 5.5

Schema de variație a amplitudinii electrodului filiform - fig.5.2 - pentru modul de vibrație  $n=1$

- $\xi$  - amplitudinea de vibrație
- $\xi_T, f_T$  - amplitudinea și frecvența de vibrație a transductorului
- $l_1, l_1', l_1''$  - distanțele dintre punctele de alimentare și ghidare a electrodului filiform 1, 2, 3 și 4 pentru modul de vibrație  $n=1$

Din fig.5.5 se observă că  $l_1' + l_1 = l_1''$  și  $l_1' = l_1$ , astfel că utilizând relația (5.21) se poate deduce aceste lungimi. Pentru frecvența fundamentală  $f_1 = 40 \cdot 10^3$  Hz - se utilizează un T de tip piezoelectric ceramic TGUS-150/40-1 - [126], se obține:

$$l_1'' = \frac{nc}{2f_1} = \frac{1 \cdot 145,3}{2 \cdot 40 \cdot 10^3} = 1,81625 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

respectiv:

$$l_1' = l_1 = \frac{l_1''}{2} = 0,90812 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Tinând seama de dimensiunile elementelor de ghidare  $EG_{1,2}$  și alimentare  $EA_{1,2}$  - fig.5.2 -, din considerente constructive se necesită ca distanța dintre 1 - 2, respectiv distanța dintre 3 - 4 să fie mai mari și aproximativ egale. Presupunând lungimea de undă  $\lambda_n$  constantă - relația (5.22) - pentru orice  $n = 1, 2, 3, \dots$  și  $\lambda_n = 2 \cdot 1,81625 \cdot 10^{-3}$  m, se adoptă pentru distanța 3 - 4,  $n = 15$ , adică

$$l'_{15} = 27,244 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

În acest caz, distanța 1 - 2 cuprinde  $n = 15$  moduri de vibrație la care se adaugă  $l'_1$ , respectiv:

$$l_{15,5} = l''_{15} + l'_1 = 27,244 \cdot 10^{-3} + 0,908 \cdot 10^{-3} = 28,152 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Distanța dintre punctele 2 - 3 se impune a fi reglabilă în funcție de grosimea OP. Corelat cu parametri de reglare ai brațului mobil de la mașina ELEROFIL-10 [124], se stabilește distanța minimă/maximă dintre  $EG_1$  și  $EG_2$  astfel încât să rezulte un număr fracționar de moduri de vibrație. Prin urmare, pentru distanța minimă se adoptă constructiv:

$$l_{7,5} = l_7 + l_1 = 13,622 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l_{62,5} = l_{62} + l_1 = 113,516 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Pentru porțiunea 2 - 3, din relația (5.11) pentru calculul amplitudinii de vibrație în lungul firului - modul fundamental de vibrație  $n = 1$  - se deduce valoarea constantelor de integrare A, B punând condiții inițiale și la limită:

$$x = 0, \quad \xi(0) = 0, \quad \text{de unde } B = 0$$

$$x = l'_1, \quad \xi(l'_1) = \xi_r = A \cdot \text{sink} l'_1, \quad \text{de unde:}$$

$$A = \xi_r \cdot \frac{1}{\text{sink} l'_1}$$

$$x = l'_1 + l_1, \quad \xi(l'_1 + l_1) = 0, \quad \text{de unde:}$$

$$\text{sink}(l'_1 + l_1) = 0$$

deci:

$$l'_1 + l_1 = q \cdot \frac{\pi}{k}, \quad q = 1, 2, 3, \dots, n$$

Dacă  $q = 1$ , suma  $l'_1 + l_1 = \pi/k$  verifică rezultatul obținut anterior ( $l'_1 = l_1 = 0,90812 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ).

Prin urmare, relația de calcul a amplitudinii  $\xi_n(x)$  pentru modul propriu de vibrație  $n$  devine:

$$\xi_n(x) = \xi_T \cdot \frac{1}{\sin kl'_1} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} \cdot x \quad (5.36)$$

unde:

$\xi_T$  - frecvența de activare a electrozudului filiform (egală cu a convertorului electroacustic CE sau transductorului T).

În ipoteza că firul este perfect elastic și extensibil și dacă se neglijează amortizarea, se poate considera că deplasările sunt constante pe porțiunile 1 - 2, 2 - 3 și 3 - 4 și au amplitudinea maximă egală cu  $\xi_T$ .

Dacă electrozudul filiform se deplasează cu o viteză constantă reglabilă în domeniul  $(5 \dots 100) \cdot 10^{-3}$  m/s [124] - fig.5.2 -, atunci pe porțiunea 2 - 3 viteza relativă este dată de relația:

$$v' = v \pm c = 145,2 \dots 145,4 \text{ m/s} \quad (5.39)$$

Semnul plus sau minus se ia în funcție de coincidența sau nu a sensului de deplasare a undelor cu sensul de deplasare a firului. Cum  $v \ll c$ , în condițiile tehnologice date - frecvența de rezonanță  $f$  și forța de întindere a firului  $N$  impuse de procesul de prelucrare [39,107,108] - se poate neglija viteza de deplasare a electrozudului filiform, aceasta fiind dependentă în exclusivitate de grosimea semifabricatului și de parametri de lucru.

### 5.2.2 Activarea electrozudului filiform în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu

Schema de principiu a activării electrozudului filiform în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu [60,64,73] este prezentată în fig.5.6.

În punctul 2 electrozudul filiform este activat după o direcție cu amplitudinea de vibrație și frecvența  $\xi_T^{(2)}$ ,  $f_T^{(2)}$ , iar în punctul 3, aflat la distanța  $l_1$  de 2, este activat după o direcție perpendiculară pe prima cu  $\xi_T^{(3)}$  și  $f_T^{(3)}$ . În situația în care  $\xi_n^{(2)}$  și  $\xi_n^{(3)}$  variază armonic [62,110,111], firul efectuează două oscilații armonice ortogonale. Interesează în mod deosebit să se determine traiectoria și amplitudinea de vibrație a electrozudului filiform, precum și distanțele  $l_1$ ,  $l'_1$  și  $l''_1$  dintre elementele de ghidare și alimentare.

a) Cazul în care cele două vibrații armonice ortogonale au aceeași frecvență  $f^{(2)} = f^{(3)} = f$ .

Legea de mișcare a electrozudului filiform pentru modul propriu de



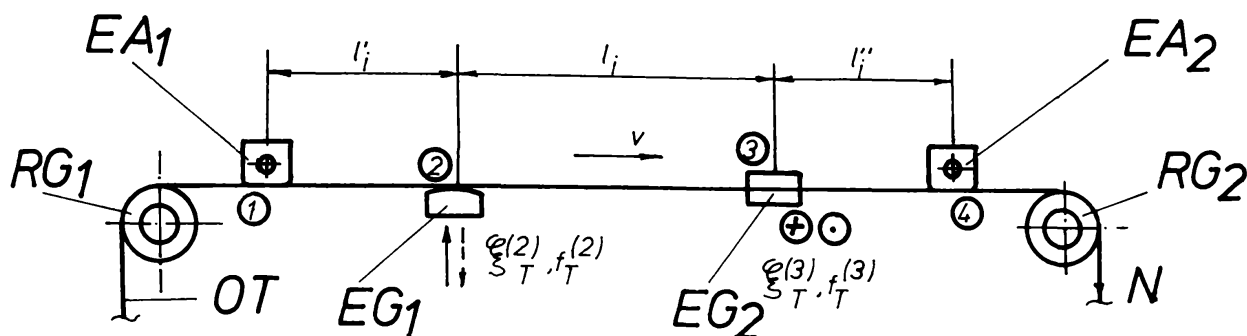


Fig. 5.6

Schema de principiu a activării ultrasonice a electrodului filiform în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu

- $EA_1, EA_2$  - elemente de alimentare cu energie electrică a electrodului filiform
- $EG_1, EG_2$  - elemente de ghidare a electrodului filiform
- $RG_1, RG_2$  - role de ghidare a electrodului filiform
- $OT$  - obiect de transfer (electrod filiform)
- $\xi_T^{(2)}, f_T^{(2)}$  - amplitudinea și frecvența de vibrație a transductorului în punctul 2
- $\xi_T^{(3)}, f_T^{(3)}$  - amplitudinea și frecvența de vibrație a transductorului în punctul 3
- $l_1, l_2, l_3$  - distanțele dintre  $EA_1-EG_1, EG_1-EG_2$  și  $EG_2-EA_2$
- $N$  - efortul în  $OT$
- $v$  - viteza de deplasare a  $OT$  în lungul axei sale

vibrația n se poate scrie astfel:

$$\xi_n^{(2)}(x, t) = (A_n \cos k_n t + B_n \sin k_n t) \sin k_n x \quad (5.40.a)$$

$$\xi_n^{(3)}(x, t) = [A_n \cos(k_n t + \varphi_n) + B_n \sin(k_n t + \varphi_n)] \sin(k_n x + \varphi_n) \quad (5.40.b)$$

unde:

$\xi_n^{(2), (3)}$  - amplitudinea de vibrație în punctul 2, respectiv 3;

$$k_n = k_n^{(2)} = k_n^{(3)} = \frac{\omega_n}{c} \quad - \text{ număr de undă pentru modul } n;$$

$\varphi_n$  - defazajul celor două mișcări,

$A_n, B_n$  - constante de integrare.

În funcție de valoarea defazajului  $\varphi_n$ , traiectoria electrodului filiform într-un plan normal pe direcția sa de avans  $ox$  poate ocupa o mulțime infinită de poziții. Pentru câteva valori particulare ale defazajului  $\varphi_n$ , traiectoriile sunt prezentate în fig.5.7.

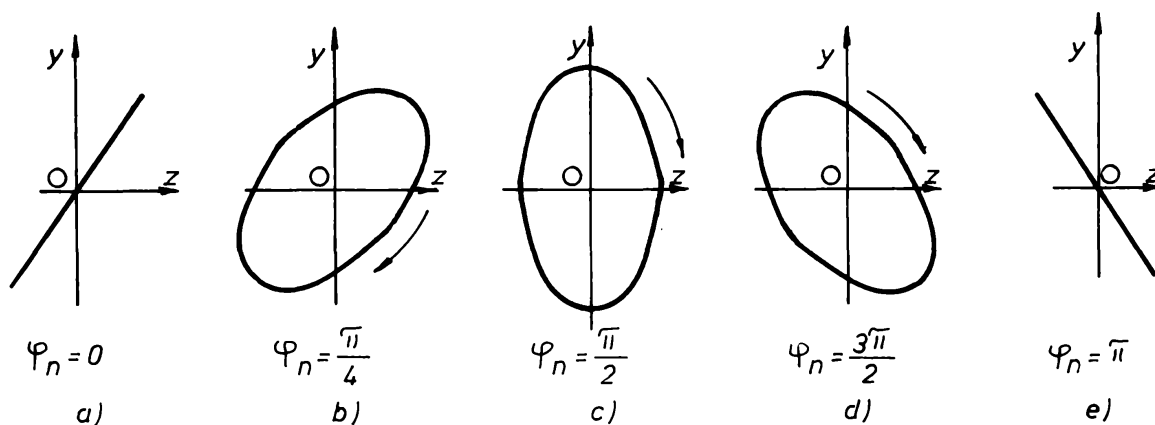


Fig.5.7

Traiectoria electrodului filiform într-un plan normal pe direcția sa de avans în funcție de valoarea defazajului

$\varphi_n$  - defazajul între două vibrații ortogonale armonice având aceeași frecvență

Când defazajul  $\varphi_n = 0$ , traiectoria este o dreaptă conținută în cadranele I și III ale sistemului de axe  $yoz$  - fig.5.7.a - iar amplitudinile de vibrație se găsesc în raportul.

$$\frac{\xi_z^{(2)}}{\xi_y^{(2)}} = \frac{\xi_z^{(3)}}{\xi_y^{(3)}} \quad (5.41)$$

Dacă și amplitudinile de vibrație ale celor două mișcări sunt egale

$$\xi_z^{(2)} = \xi_z^{(3)},$$

atunci pentru  $\varphi_n = 0$  traiectoria este o dreaptă conținută în cadranele I și III și este dispusă la  $45^\circ$ , iar electrodul filiform descrie un segment simetric față de origine. În mod similar, când  $\varphi_n = \pi$ , firul descrie un segment simetric față de origine pe dreapta conținută în cadranele II și IV ale sistemului de axe  $yoz$ .

- fig.5.7.e - iar amplitudinile de vibrație se găsesc în raportul:

$$\frac{\xi_z^{(2)}}{\xi_T^{(2)}} = -\frac{\xi_z^{(3)}}{\xi_T^{(3)}} \quad (5.42)$$

Pentru alte valori ale defazajului  $\phi_n$ , prin eliminarea argumentului  $k_n t$  din sistemul de ecuații (5.40), se obține ecuația traiectoriei electrodului filiform [110,111]:

$$\frac{\xi_z^{(2)^2}}{\xi_T^{(2)^2} \cdot \sin^2 \phi_n} + \frac{\xi_z^{(3)^2}}{\xi_T^{(3)^2} \cdot \sin^2 \phi_n} - \frac{2 \cdot \xi_z^{(2)} \cdot \xi_z^{(3)} \cdot \cos \phi_n}{\xi_T^{(2)} \cdot \xi_T^{(3)} \cdot \sin^2 \phi_n} = 1 \quad (5.43)$$

Se observă că traiectoria firului în planul yoz este o elipsă cu centrul în origine. Axele elipsei sunt înclinate față de axele de coordonate - fig.5.7.b și d - în afară de cazurile  $\phi_n = \pi/2$  reprezentate în fig. 5.7.c și  $\phi_n = 3\pi/2$  când axele elipsei coincid cu axele de coordonate. În aceste cazuri, ecuația elipsei este:

$$\frac{\xi_z^{(2)^2}}{\xi_T^{(2)^2}} + \frac{\xi_z^{(3)^2}}{\xi_T^{(3)^2}} = 1 \quad (5.44)$$

Dacă amplitudinile de vibrație sunt egale

$$\xi_T^{(2)} = \xi_T^{(3)},$$

traiectoria firului în planul yoz este un cerc. Această constatare este deosebit de importantă în procesul tehnologic de prelucrare, influențând direct precizia dimensională și de formă. Deasemenea, în planul yox traiectoria electrodului filiform este deformată în funcție de valoarea defazajului. Pentru câteva cazuri particulare, traiectoria este prezentată schematic în fig.5.8.

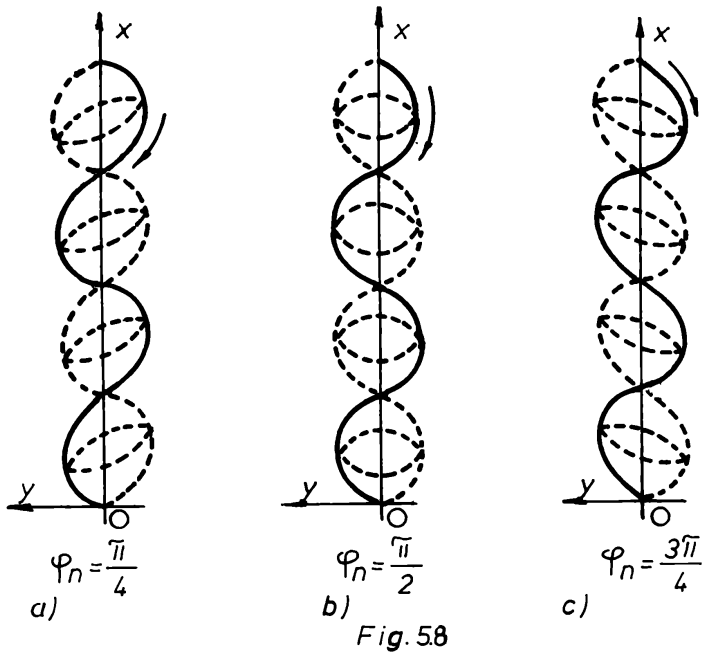


Fig. 5.8

Traieectoria electrodului filiform într-un plan paralel cu direcția sa de avans în funcție de valoarea defazajului

$\varphi_n$  - defazajul între două vibrații armonice având aceeași frecvență

Când  $\phi_n = \pi/4$  sau  $\phi_n = 3\pi/4$ , traieectoria firului este asimetrică în raport cu ox - fig. 5.8 a și c -, fiind ușor alungită în sau înspre sensul de deplasare a undei ultrasonice. Pentru  $\phi_n = \pi/2$ , traieectoria este simetrică față de axa ox - fig. 5.8. b -.

Amplitudinea de vibrație rezultantă  $\xi_n^{(x)}$  este maximă în cazul particular.

$$\xi_n^{(2)} = \xi_n^{(3)}$$

și este dată de:

$$\xi_n^{(x)} = \sqrt{2} \cdot \xi_n^{(2)} \quad (5.45)$$

Pentru modul fundamental de vibrație  $n = 1$ , schema de variație a amplitudinii firului între punctele 1 - 2, 2 - 3 și 3 - 4 este prezentată în fig. 5.9. Față de situația analizată la paragraful 5.2.1, electrodul filiform este activat în punctele 2 și 3 cu amplitudinile  $\xi_r^{(2)}$  și  $\xi_r^{(3)}$  după două direcții rectangulare în spațiu. În punctele 1 și 4 amplitudinile sunt nule.

Distanțele dintre punctele 1 - 2 și 3 - 4 sunt egale  $l'_1 - l''_1$  și, pentru aceleași condiții constructiv-funcționale descrise la paragraful 5.2.1, se poate adopta pentru modul de vibrație  $n = 15$ ,  $l'_{15} - l''_{15} = 27,244 \cdot 10^{-3}$  m.

Dacă între punctele 1 - 2 și 3 - 4 are loc vibrația electrodului filiform după câte o direcție perpendiculară între ele și în care se propagă unde a căror legi de mișcare au fost descrise anterior, interesează în continuare modul de interferență a undelor pe porțiunea 2 - 3 care este în conexiune cu OP.

Atunci când:

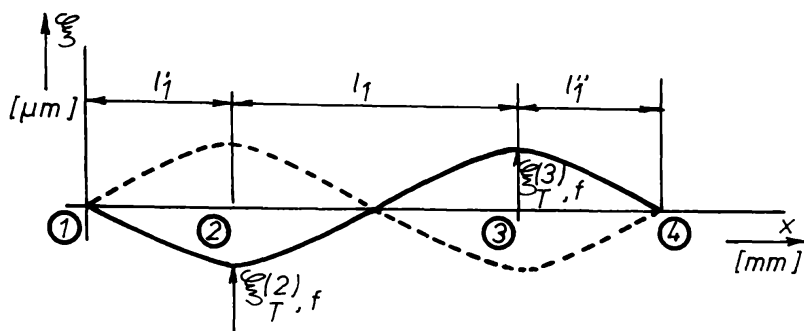


Fig. 5.9

Schema de variație a amplitudinii electrozodului filiform - fig. 5.6 - pentru modul de vibrație  $n=1$

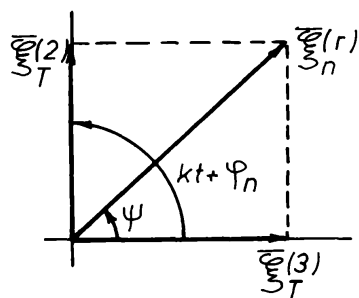
- $\xi_{ST}^{(2)}, \xi_{ST}^{(3)}$  - amplitudinile de vibrație ale  $T$  în punctele 2 și 3
- $l_1', l_1, l_1'$  - distanțele dintre punctele 1, 2, 3 și 4 pentru modul de vibrație  $n=1$
- $f$  - frecvența de vibrație în punctele 2 și 3

$$\xi_{ST}^{(2)} = \xi_{ST}^{(3)}$$

rezultă că  $\tan \psi = 1$ , deci  $\psi = 45^\circ$  (v. fig. 5.10).

Prin urmare, amplitudinea de vibrație în punctul 2 este maximă - relația (5.45) - și pentru  $\xi_r = 0,010 \cdot 10^{-3}$  m are valoarea de  $0,0141 \cdot 10^{-3}$  m. În punctul 3 se obține

aceeași valoare maximă a amplitudinii de vibrație, dar de semn contrar.



- $\xi_{ST}^{(2)}, \xi_{ST}^{(3)}$  - amplitudinile de vibrație în punctele 2 și 3
- $\xi_{ST}^{(r)}$  - amplitudinea de vibrație rezultantă pentru modul  $n$  de vibrație
- $k$  - număr de undă
- $t$  - timpul
- $\varphi_n$  - defazajul dintre cele două mișcări

Fig. 5.10

Compunerea mișcărilor armonice ortogonale având aceeași frecvență de vibrație

Din condițiile inițiale și la limită puse sistemului de ecuații (5.40), se pot determina constantele de integrare  $A_n$  și  $B_n$ , astfel încât ecuațiile de mișcare a electrozodului filiform între punctele 2 - 3 devin

pentru  $n = 1$ :

$$\xi_1^{(2)} = \xi_1^{(r)} \cdot (403,9 \cdot \cos k_1 r + 5455,8 \cdot \sin k_1 r) \cdot \sin k_1 x \quad (5.46)$$

$$\xi_1^{(3)} = \xi_1^{(r)} \cdot 403,9 \cdot \cos(k_1 r + \varphi_1) + 5455,8 \cdot \sin(k_1 r + \varphi_1) \cdot \sin(k_1 x + \varphi_1) \quad (5.47)$$

introducând valoarea numerică a amplitudinii  $\xi_1^{(r)} = 0,0141 \cdot 10^{-3}$  m

pentru cazul particular

$$\xi_T^{(2)} = \xi_T^{(3)} = 0.010 \cdot 10^{-3} m.$$

relațiile (5.46) și (5.47) se transformă în:

$$\xi_1^{(2)} = 10^{-3} \cdot (5.7 \cdot \cos k_1 t + 76.9 \cdot \sin k_1 t) \cdot \sin k_1 x \quad (5.46)$$

$$\xi_1^{(3)} = 10^{-3} \cdot [5.7 \cdot \cos(k_1 t + \varphi_1) + 76.9 \cdot \sin(k_1 t + \varphi_1)] \cdot \sin(k_1 x + \varphi_2) \quad (5.49)$$

Dacă defazajul este nul  $\varphi_1 = 0$  - fig.5.7.a - și

$$x = \frac{q\pi}{2k}, \quad \text{unde } q = 0, 1, 2, \dots, \text{ la momentul } t = 0 \text{ rezultă că:}$$

$$\xi_1^{(2)} = \xi_1^{(3)} = 0.0057 \cdot 10^{-3} m$$

Amplitudinea de vibrație este maximă pentru pozițiile în care - relațiile (5.40.a) și (5.40.b) - :

$$\sin\left(\frac{\omega_p X}{c} + \varphi_1\right) = 1 \quad (5.50)$$

adică:

$$\frac{\omega_p X}{c} + \varphi_1 = (2q+1) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad \text{unde } q = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (5.51)$$

sau

$$\frac{n\pi X}{c} + \varphi_1 = (2q+1) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (5.52)$$

de unde:

$$x = \frac{2q+1}{2n} \cdot l - \varphi_1 \quad (5.53)$$

Distanța  $l_1$ , reglabilă între două valori corelat cu grosimea semifabricatului, se determină [124] constructiv astfel încât să rezulte un număr

întreg de moduri de vibrație n - relația (5.21) -:

$$l_a = 14,530 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l_{a2} = 114,424 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

b) Cazul în care cele două vibrații armonice ortogonale au frecvențe de vibrație diferite  $f^{(2)} \neq f^{(3)}$

Legea de mișcare a electrozodului filiform pentru modul propriu de vibrație n este dată de:

$$\xi_u^{(2)}(x, t) = (A_n \cos k_n^{(2)} t + B_n \sin k_n^{(2)} t) \cdot \sin k_n^{(2)} x \quad (5.54)$$

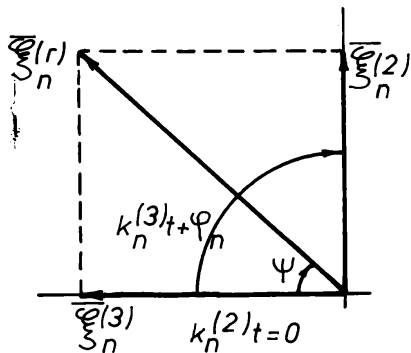
$$\xi_u^{(3)}(x, t) = [A_n \cos(k_n^{(3)} t + \varphi_n) + B_n \sin(k_n^{(3)} t + \varphi_n)] \sin(k_n^{(3)} x + \varphi_n) \quad (5.55)$$

Dacă se admite

$$f_u^{(3)} > f_u^{(2)}$$

și

$$k_u^{(3)} - k_u^{(2)} = \Delta k_n$$



$\xi_n^{(2)}, \xi_n^{(3)}$  - amplitudinile de vibrație în punctele 2 și 3  
 $\xi_n^{(r)}$  - amplitudinea de vibrație rezultantă pentru modul n de vibrație  
 $k_n^{(3)}$  - număr de undă  
 $t$  - timpul  
 $\varphi_n$  - defazajul dintre cele două mișcări

reprezentând vectorial cele două vibrații - fig.5.11 - se observă că unghiul  $\psi$  dintre vectorii:

$$\xi_u^{(2)}, \xi_u^{(3)}$$

Fig. 5.11

Compunerea mișcărilor armonice ortogonale cu frecvențe de vibrație diferite

nu mai este constant, ci variabil în timp și este egal cu:

$$(k_u^{(3)} - k_u^{(2)}) t + \varphi_n = \Delta k_n + \varphi_n \quad (5.56)$$

Din acest motiv, vectorul rezultat:

$$\vec{F}_n^{(x)}$$

ce reprezintă vibrația compusă a două mișcări oscilatorii armonice ortogonale, are mărimea:

$$|\vec{F}_n^{(x)}|$$

și defazaajul  $\psi$  față de prima mișcare care sunt variabile în timp. Mărimea rezultantă nu mai este armonică și, în general, nici periodică.

Pentru ca mișcarea de vibrație să fie periodică [62,110,111] cu o perioadă  $T^{(x)}$ , este necesar ca aceasta să fie un multiplu atât al perioadei

$$T_n^{(2)} = \frac{1}{f_n^{(2)}} = \frac{2\pi}{\omega_n^{(2)}},$$

cât și al perioadei

$$T_n^{(3)} = \frac{1}{f_n^{(3)}} = \frac{2\pi}{\omega_n^{(3)}}$$

adică:

$$T_n^{(x)} = a_n^{(2)} \cdot T_n^{(2)} = a_n^{(3)} \cdot T_n^{(3)} \quad (5.57)$$

unde:

$a_n^{(2),(3)}$  - numere întregi.

Pentru ca  $T_n^{(x)}$  să fie minim, rezultă că  $a_n^{(2)}$  și  $a_n^{(3)}$  trebuie să fie prime între ele:

$$\frac{\omega_n^{(2)}}{\omega_n^{(3)}} = \frac{a_n^{(3)}}{a_n^{(2)}} \quad (5.58)$$

adică raportul pulsațiilor trebuie să fie o fracție rațională. În aceste condiții, perioada  $T_n^{(x)}$  este un multiplu și al perioadei  $T_n^{(2)}$ :

$$T_n^{(x)} = (a_n^{(3)} - a_n^{(2)}) \cdot T_n^{(2)} \quad (5.59)$$

Dacă cele două pulsații au valori foarte apropiate, diferența  $\Delta\omega_n$  este foarte mică, iar perioadele  $T_n^{(2)}$  și  $T_n^{(3)}$  ale mișcărilor componente sunt aproape



egale. În decursul unei perioade  $T_n^{(2)}$ ,  $T_n^{(3)}$ , unghiul dintre vectorii reprezentativi ai mișcărilor componente - fig. 5.11 - variază cu:

$$T_n^{(2)} \cdot \Delta\omega_n \approx T_n^{(3)} \cdot \Delta\omega_n,$$

care este o valoare foarte mică. De aceea se poate considera că, în timpul unei perioade  $T_n^{(2)}$ ,  $T_n^{(3)}$ , amplitudinea mișcării de vibrație rezultante rămâne constantă, adică în acest timp mișcarea rezultantă se poate considera armonică. Într-un interval mai mare de timp, mișcarea rezultantă poate fi considerată ca o succesiune de mișcări armonice, având aceeași durată sau frecvență, dar cu amplitudini diferite.

Amplitudinea de vibrație rezultantă armonică  $\xi_n^{(x)}(x, t)$  variază între maximum valorii:

$$\sqrt{\xi_T^{(2)^2} + \xi_T^{(3)^2}} \quad (5.60)$$

când cei doi vectori au același sens, și valoarea zero când vectorii sunt egali și de sens opus.

Pentru cazul particular când:

$$\xi_T^{(2)} \neq \xi_T^{(3)} \text{ și } \xi_T^{(2)} = 0,005 \cdot 10^{-3} \text{ m, iar } \xi_T^{(3)} = 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m,}$$

amplitudinea maximă are valoarea:

$$\xi_{n_{\max}}(x) = \sqrt{\xi_T^{(2)^2} + \xi_T^{(3)^2}} \approx 0,0112 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Traectoriile mișcării rezultante sunt curbe complicate, care variază cu raportul :

$$\frac{k_n^{(2)}}{k_n^{(3)}}$$

Dacă acest raport este un număr rațional [62,110], curbele sunt închise. Pentru modul fundamental de vibrație  $n = 1$  - fig. 5.9 - porțiunile 1 - 2 și 3 - 4, lungimile  $l_1'$  și  $l_1''$ , se determină cu relația (5.21). Fie:

$$f_1^{(2)} = 39,5 \cdot 10^3 \text{ Hz} \quad \text{și} \quad \xi_T^{(2)} = 0,005 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

respectiv

$$f_1^{(3)} = 40,5 \cdot 10^3 \text{ Hz} \quad \text{și} \quad \xi_T^{(3)} = 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

Atunci:

$$I'_1 = \frac{1 \cdot 145,3}{2 \cdot 39,5 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{2} = 0,9197 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

și

$$I''_1 = \frac{1 \cdot 145,3}{2 \cdot 40,5 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{2} = 0,8970 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Din considerente constructiv-funcționale, se adoptă ( $n = 15$ ):

$$I'_{15} = 27,591 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$I''_{15} = 26,910 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Pentru porțiunea 2 - 3, amplitudinea de vibrație variază periodic cu perioada:

$$T_1 = \frac{1}{\Delta f_1} = \frac{1}{f_1^{(3)} - f_1^{(2)}} = \frac{1}{(40,5 - 39,5) \cdot 10^3} = 10^{-3} \text{ s}$$

unde frecvența de variație a amplitudinii este de  $10^3$  Hz.

Lungimea  $l_1$  - fig. 5.9 - se determină în acest caz la frecvența nominală corespunzătoare mediei aritmetice a frecvențelor celor două mișcări vibratorii componente:

$$f_{1_{med}} = \frac{1}{2} \cdot (f_1^{(2)} + f_1^{(3)}) = 40 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

de unde:

$$l_1 = \frac{1 \cdot 145,3}{2 \cdot 40 \cdot 10^3} = 1,81625 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Abaterile distanței  $l_1$  față de valoarea nominală a frecvenței sunt  $\pm 0,02215 \cdot 10^{-3}$  m, valori ce sunt ne semnificative în calculul de dimensionare a poziției  $EG_{1,2}$  și  $EA_{1,2}$  din alcătuirea subansamblului braț fix - braț mobil de la mașina ELEROFIL-10 [124]. Prin urmare, se pot adopta următoarele limite pentru  $l_1$ :

$$l_0 = 14,530 \cdot 10^{-3}$$

$$l_{e3} = 114,424 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

### 5.3 INFLUENȚA DESCĂRCĂRILOR ELECTRICE ÎN IMPULS ASUPRA CARACTERISTICILOR DE PRELUCRARE

Schema de principiu a interacțiunii electrice a OT cu OP în timpul prelucrării prin electroeroziune este redată în fig. 5.12.

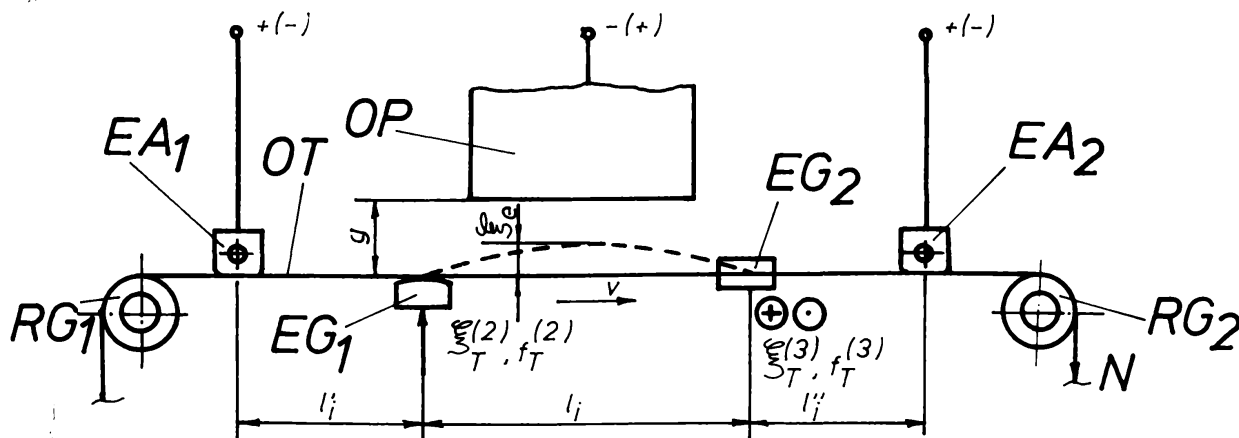


Fig. 5.12

Schema de principiu a influenței descărcărilor electrice în impuls asupra caracteristicilor de prelucrare

$EA_1, EA_2$  - elemente de alimentare cu energie electrică a OT

$EG_1, EG_2$  - elemente de ghidare a OT

$RG_1, RG_2$  - role de ghidare a OT

$OP, OT$  - obiectul prelucrării (piesa), respectiv obiectul de transfer (electrodul filiform)

$e(2), f(2), e(3), f(3)$  - amplitudinea și frecvența de vibrație a transductorului în punctele 2 și 3

$l_1, l_1', l_1''$  - distanțele dintre  $EA_1-EG_1, EG_1-EG_2$  și  $EG_2-EA_2$

$g_e$  - deplasarea OT datorită câmpului electromagnetic dintre OT și OP

$g$  - interstițiul tehnologic dintre OT și OP (capul de lucru)

$N$  - efortul în OT

$v$  - viteza de deplasare a OT în lungul axei sale

Electrodul filiform OT se deplasează prin interstițiul tehnologic  $g$  cu o viteză  $v = \text{constant}$  și este parcurs de un curent electric  $I$  datorită  $EA_1$  și  $EA_2$ . Între OT și OP există o diferență de potențial  $U_1$ ; fie  $f_e$  frecvența descărcărilor electrice în impuls. Se consideră că OT este activat cu ultrasunete în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu (v. subcapit. 5.2, paragraful 5.2.2) cu amplitudinile  $\xi_r^{(2)}$  și  $\xi_r^{(3)}$ , respectiv frecvențele  $f_r^{(2)}$  și  $f_r^{(3)}$ .

Procesul de transfer de material din OP prin electroeroziune constă în principal din interacțiunea a trei fenomene complementare distincte [64,90]. Printre acestea se află și fenomenul electrodinamic așa cum s-a arătat la paragraful 3.4.3. Datorită câmpului electromagnetic propriu, în interstițiu iau naștere forțe electrodinamice care acționează asupra sarcinilor electrice aflate pe suprafața OP, cauzând transfer de material.

Pentru a facilita descărcările electrice în impuls prin străpungerea dielectricului, OP se poziționează față de OT la distanța  $g$ . Suprafața de prelucrat este paralelă cu direcția de deplasare a OT iar OP este parcurs de un curent electric  $i$  de același sens cu  $I$ .

Conform legii lui Ampère, între OT și OP va acționa o forță de atracție dată de:

$$F_a = h_1 \cdot \frac{i \cdot I \cdot l}{g - \xi_e} \quad (5.61)$$

unde:

$\xi_e$  - deplasarea în translație a OT din poziția de echilibru către OP datorită câmpului electromagnetic;

$h_1$  - constantă ce depinde de sistemul de unități în care se exprimă mărimile care apar în expresia forței;

$l$  - lungimea (grosimea) OP.

Ecuatia diferențială a mișcării este în acest caz [75,111]:

$$m \cdot \frac{\partial^2 \xi_e}{\partial t^2} = -K \cdot \xi_e + h_1 \cdot \frac{i \cdot I \cdot l}{g - \xi_e} \quad (5.62)$$

unde:

$K \cdot \xi_e$  - forța elastică ce acționează asupra OT;

$K = m \cdot k_1 \cdot c^2$  - constanta elastică a materialului OT;

$m$  - masa specifică a OT;

$k_1$  - număr de undă dependent de  $f_n^{(2)}$  și  $f_n^{(3)}$ ;

$c$  - viteza de propagare a sunetului prin OT.

Dacă se introduce coordonata adimensională:

$$q = \frac{\xi_g}{g} < 1$$

și se fac notațiile:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m}$$

și

$$\lambda = \frac{h_1 \cdot i \cdot I \cdot l}{g^2 \cdot K} > 0$$

atunci ecuația diferențială a mișcării (5.62) devine:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \omega_n^2 \cdot \left( q - \frac{\lambda}{1-q} \right) = 0 \quad (5.63)$$

Ecuația (5.63) este echivalentă cu sistemul [111]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = v \quad (5.64.a)$$

$$v \cdot \frac{\partial q}{\partial t} = -\omega_n^2 \cdot \left( q - \frac{\lambda}{1-q} \right) = F(q) \quad (5.64.b)$$

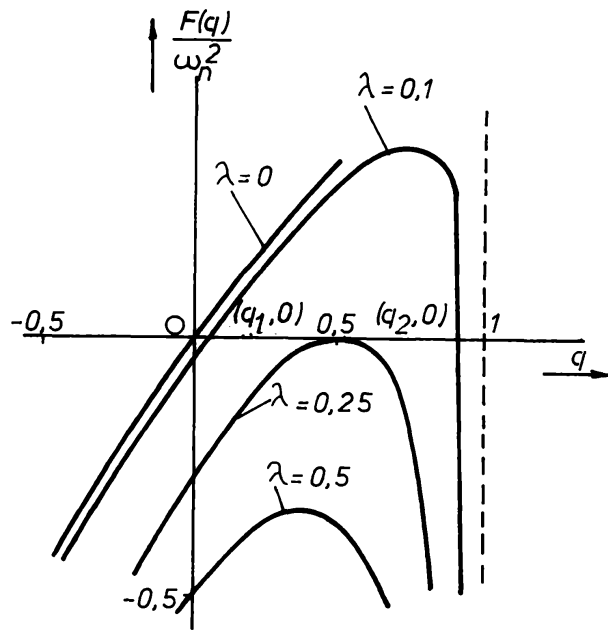
Funcția  $F(q)/\omega_n^2$  a fost determinată experimental [111] pentru diferite valori ale parametrului  $\lambda$  și este reprezentată în fig.5.13 dependent de coordonata adimensională  $q$ . Rădăcinile funcției  $F(q)$  sunt:

$$q_{1,2} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \lambda} \quad (5.65)$$

Pentru  $0 < \lambda < 1/4$ , se obțin în planul de fază două puncte staționare. Fie aceste puncte staționare  $(q_1, 0)$  și  $(q_2, 0)$ . Ele sunt simetrice față de punctul  $(0,5; 0)$ . Intre aceste valori ale parametrului  $\lambda$  este valabil sistemul de inecuații:

$$0 < q_1 < 0,5 \quad (5.66.a)$$

$$0,5 < q_2 < 1 \quad (5.66.b)$$



$F(q)$  - soluția ecuației diferențiale

$\omega_n$  - pulsația  
 $\lambda$  - parametru complex depinzând de mai mulți factori

$q$  - coordonată adimensională

Fig. 5.13

Dependența funcției  $F(q)$  de coordonata adimensională  $q$

Pentru  $\lambda = 1/4$  există un singur punct staționar  $(q_{1,2}, 0)$  cu abscisa  $q = 1/2$ , iar pentru  $\lambda > 1/4$  nu există puncte staționare.

Revenind la coordonata adimensională  $q = \xi_s/g$ , se observă că pentru  $\lambda \leq 1/4$  se obțin unul sau două puncte staționare. În prima situație, datorită câmpului electromagnetic, electrodul filiform se deplasează spre OP cu  $1/2$  din valoarea interstițiului tehnologic  $g$  cu o frecvență dată de  $f_p$ . În a doua situație, în cazul celui de-al doilea punct staționar, OT se deplasează spre OP cu valoarea.

$$0,5 \cdot g < \xi_s < 1 \cdot g \quad (5.67)$$

fapt ce favorizează apariția scurtcircuitului între OT și OP, scade randamentul descărcărilor electrice în impuls pe energie și se îngreunează evacuarea particulelor erodate [50]. Întrucât deplasarea OT nu este uniformă pe distanța  $l_1$  - fig.5.12 unde este reprezentată cu linie întreruptă -, fiind mai pronunțată în zona centrală de interacțiune OT - OP, putându-se aprecia că firul vibrează între EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> cu frecvența  $f_p$  la modul propriu  $n = 1$ , rezultă o eroziune mai accentuată la mijlocul distanței dintre elementele de ghidare. Prin urmare, este influențată negativ precizia dimensională și de formă, obținându-se suprafețe

concave în OP.

Integrând ecuația (5.64.b), se obțin traiectoriile de fază ale punctului  $q$  din relația:

$$v(q) = \pm \sqrt{2} \cdot \sqrt{h - \omega_n^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot q^2 + \lambda \cdot \ln(1-q)} \quad (5.66)$$

unde:

$v(q)$  - viteza de deplasare transversală a OT către OP în punctul de coordonată  $q$ ;

$h$  - constantă de integrare.

Tinând seama că energia potențială în punctul  $q$  este:

$$E_p(q) = \omega_n^2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot q^2 + \lambda \cdot \ln(1-q) \right] \quad (5.69)$$

expresia traiectoriilor de fază (5.66) devine:

$$v(q) = \pm \sqrt{2 [h - E_p(q)]} \quad (5.70)$$

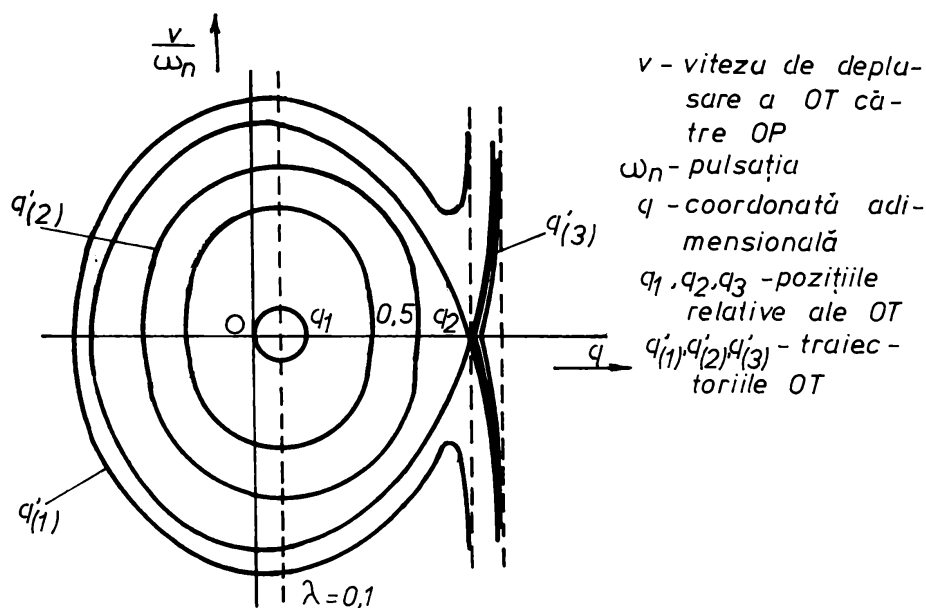
Pentru a determina stabilitatea punctelor staționare  $q_1$  și  $q_2$ , respectiv  $q_{1,2}$  în cazul  $\lambda \leq 1/4$ , se consideră dezvoltarea în serie Taylor [111] a funcției  $E_p(q)$  în jurul acestor puncte. Se obține:

$$E_p(q) = \omega_n^2 \cdot \left[ E_p(q_i) + \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\lambda}{(1-q_i)^2} \right) \cdot (q-q_i)^2 - \frac{1}{3} \cdot \frac{\lambda}{(1-q_i)^3} \cdot (q-q_i)^3 + \dots \right]$$

$$i = 1, 2 \quad (5.71)$$

Dacă  $\lambda < 1/4$ , atunci este valabil sistemul de inecuații (5.66.a) și (5.66.b). Coeficientul lui  $(q - q_i)^2$  pentru  $i = 1$  este pozitiv, iar pentru  $i = 2$  este negativ. Tinând seama de rezultatele experimentale obținute [42], rezultă că punctul staționar  $(q_1, 0)$  este un centru - fig.5.14 pentru  $\lambda = 0,1$  - și reprezintă deci o poziție stabilă de echilibru. Electroful filiform oscilează în jurul poziției  $q_1$

cu frecvența  $f_p$ . Cum  $\xi_s < 1/2 \cdot g$ , deci deplasarea OT este mai mică decât jumătatea interstițiului tehnologic, influența acestor oscilații asupra caracteristicilor de



prelucrare este nesemnificativă. Punctul staționar  $(q_2, 0)$ , conform [42, 75], este o sa și reprezintă astfel o poziție de echilibru instabil. Traiectoriile de fază ce trec prin acest punct au ecuațiile descrise [111] de relația:

Fig. 5.14

Dependenta vitezei de deplasare transversală a OT către OP în funcție de coordonata adimensională  $q$

$$v(q) = \pm \sqrt{2} \cdot \omega_n \lambda \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (q_2^2 - q^2) + \lambda \cdot \ln \frac{1 - q_2}{1 - q}} \quad (5.72)$$

Traiectoriile situate în stânga punctului staționar  $(q_2, 0)$  - fig. 5.14 - sunt reprezentate printr-o curbă închisă și delimitează un domeniu care cuprinde și punctul staționar  $(q_1, 0)$ . În dreapta punctului staționar  $(q_2, 0)$ , traiectoriile sunt asimptotice la verticala  $q = 1$  (cazul de scurtcircuit, când  $\xi_s = g$ ).

Dacă electrodul filiform se găsește într-o poziție  $q < q'(1)$ , față de OP - fig. 5.14 -, atunci viteza de deplasare crește la început până ce ajunge în poziția  $q_1$ , scade în continuare până în poziția  $q_2$ , după care crește la infinit apropiindu-se de OP (scurtcircuitul nu mai poate fi evitat). Dacă OT pleacă fără viteză dintr-o poziție  $q'(2) < q < q_2$ , atunci el oscilează în jurul poziției de echilibru  $q_1$ , iar când pleacă din  $q > q'(3) > q_2$ , se apropie de OP cu viteză crescând nelimitat.

Dacă  $\lambda = 1/4$ , atunci coeficientul lui  $(q - q_1)^2$  devine nul deoarece în acest caz  $q_1 = q_2 = 1/2$ . Coeficientul lui  $(q - q_1)^3$  devine:



$$-\frac{2}{3} \cdot \omega_{\Sigma}^2,$$

deci poziția de echilibru este instabilă [42,75]. În acest caz, toate traiectoriile de fază sunt asimptotice la verticala  $q = 1$ , deci OT se apropie de OP cu viteză accelerată până la apariția scurtcircuitului.

Prin urmare, autorul apreciază că este necesară stabilirea parametrilor de regim și tehnologici -  $i$ ,  $I$ ,  $g$  - și alegerea materialului OT astfel încât  $\lambda < 1/4$ . Vibrația forțată a electrozudului filiform cu frecvență ultrasonică după două direcții rectangulare în spațiu dă naștere în interstițiul tehnologic unor unde flexurale pe toată grosimea piesei - v. subcap. 5.2 -, fapt ce anihilează parțial sau total efectul câmpului electromagnetic. Important este ca amplitudinea de vibrație spațială maximă să fie mai mică decât jumătatea interstițiului tehnologic.

## CAPITOLUL 6. CERCETARI EXPERIMENTALE ASUPRA PROCESELOR DE PRELUCRARE PRIN ELECTROEROZIUNE CU ELECTROD FILIFORM ACTIVAT ULTRASONIC

### 6.1 OBIECTIVE URMARITE PRIN ACTIVAREA CU ULTRASUNETE A PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN ELECTROEROZIUNE

Suprapunerea energiei ultrasunetelor peste energia de efect (secundară) ce se manifestă la suprafața OP datorită descărcărilor electrice în impuls determină inițierea în mediul de lucru aflat în interstițiul tehnologic dintre OT și OP, așa cum s-a detaliat în cap. 3, a unor fenomene fizico-chimice complexe. Deși mecanismul prelevării de material din OP și de uzare a OT nu este în totalitate eludat [64,65,72,74], modelul propus de autor se bazează pe combinarea simultană a efectelor multiple generate de energia ultrasunetelor în electrodul filiform și implicit în mediul de lucru, în diferite faze ale descărcărilor electrice în impuls, și încearcă să explice îmbunătățirea prezumtivă a performanțelor procesului electroeroziv în felul următor:

- crește productivitatea prelucrării prin optimizarea condițiilor de inițiere și dezvoltare a descărcărilor electrice în impuls, intensificarea efectelor de câmp suprapuse peste evacuarea forțată a particulelor erodate și reâmprospătarea lichidului dielectric [53,65] coroborat cu acțiunea erozivă datorată în exclusivitate energiei ultrasunetelor [54,74];

- crește precizia dimensională și de formă deoarece OT oscilează cu amplitudine constantă pe întreaga grosime a OP și are energie suficient de mare pentru a anihila efectul câmpului electromagnetic datorat descărcărilor electrice în impuls între OT și OP [75,76]; în același timp se asigură o rigiditate dielectrică constantă a lichidului din interstițiul tehnologic la care se adaugă proprietatea de dispersare a particulelor erodate aflate în câmp ultrasonic;

- se îmbunătățește calitatea suprafeței OP întrucât particulele erodate aflate în câmp ultrasonic, înainte de a fi dispersate, acționează ca niște scule abrazive care netezesc prin impact suprafața rezultată cu microcratere a OP în urma descărcărilor electrice în impuls [54,74].

Realizarea acestor obiective a impus elaborarea unui amplu program de cercetare experimentală care a urmărit variația mărimilor de ieșire - productivitate (capacitate erozivă) a prelucrării, precizie dimensională și de

formă, calitatea suprafeței - în funcție de activarea US a OT într-un punct sau în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu [61,62,73], cu frecvențe și amplitudini diferite - v.paragraful 5.2.2 -, comparând de fiecare dată rezultatele obținute cu probele martor. În fapt, probele martor au constatat în prelucrarea OP în condiții identice, cu aceeași parametri de regim tehnologic, însă fără activarea US a OT. Întrucât nu s-a intenționat măsurarea amplitudinii de vibrație  $\xi$  a OT în funcție de puterea furnizată OT prin EG de către GUS, s-a acordat un interes deosebit evidențierii unei corelații între mărimile de ieșire și puterea electrică consumată de GUS bazat pe ipoteza că între puterea consumată de GUS, puterea furnizată de GUS electrodului filiform și amplitudinea de vibrație a acestuia, există o dependență liniară. Deasemenea, s-a presupus că la nivelul minim de putere electrică consumată de GUS de la care se percep vibrații ale EG se asigură amplitudinea de vibrație a transductorului TGUS 150/40-1 de  $1\mu\text{m}$  [126] și că aceste amplitudini de vibrație se transmit integral OT; pe măsură ce crește puterea consumată/puterea furnizată de GUS, proporțional crește și amplitudinea de vibrație a T, și implicit și a OT afectat de influența factorului efectiv de amplificare datorat CAU cilindric în trepte.

Din considerente ce țin de tehnologia de proces și practica de lucru prognozate a se desfășura la stabilirea parametrilor de regim pe mașini de prelucrat prin EDM cu electrod filiform cu activare US a OT, determinarea prin calcul și măsurarea amplitudinii efective de vibrație  $\xi$  a OT care fie se bazează pe ipoteze simplificatoare și coeficienți stabiliți experimental, fie necesită o instalație de laborator costisitoare și complexă, nu prezintă interes pentru utilizator/operator. În același timp fabricantul de echipamente de prelucrat prin EDM cu OT activat US este îndrituit să controleze cu efort minim mărimile de ieșire ce țin de performanțele utilajului - productivitate, precizie dimensională și de formă, calitatea suprafeței - și mai puțin parametri ce caracterizează un domeniu limitat al posibilităților de prelucrare. Din acest motiv autorul consideră că evidențierea puterii electrice consumate de GUS în locul amplitudinii de vibrație  $\xi$  a OT este oportună din punctul de vedere al fabricantului/utilizatorului de echipament în contextul în care experimentatorul de proces facilitează controlul integral al acestui parametru prin inserarea GUS în ansamblul G - CNC.

Programul de cercetare experimentală a fost în așa fel conceput încât a permis prin studierea unui număr limitat de cazuri posibile acoperirea unui domeniu vast de posibilități tehnologice, evidențiind influența ultrasunetelor asupra procesului electroeroziv propriu-zis. În același timp s-a necesitat evitarea rezultatelor accidentale prin repetarea experimentului de mai multe ori în aceleași condiții de lucru. Prescrierea parametrilor tehnologici cât și determinarea mărimilor de ieșire au fost abordate sistemic în cadrul unui program unitar care

a cuprins informații referitoare la semifabricat, electrozodul filiform, parametri de lucru (materialul și forța de întindere a OT, rigiditatea lichidului dielectric, frecvența ultrasunetelor în electrozodul filiform, domeniul de reglare a puterii GUS, domeniul de reglare a curentului de amorsare de la generatorul de impulsuri) și mărimile de ieșire (durata prelucrării, precizia dimensională, abaterea de formă, calitatea suprafeței prelucrate).

## 6.2 INSTALATIA EXPERIMENTALA. DIMENSIONAREA SISTEMULUI DE ACTIVARE CU ULTRASUNETE A ELECTROZODULUI FILIFORM

Cercetările experimentale au fost realizate în condiții de exploatare normală cu sprijinul SC STIMEL SA Timișoara pe una din mașinile de prelucrat prin electroeroziune cu electrozod filiform din fabricația curentă tip ELEROFIL-10 [66,67,68,73], iar măsurătorile de capacitate erozivă, precizie și calitate a suprafeței ce au evidențiat performanțele procesului de prelucrare prin EDM cu OT activat US au fost efectuate în cadrul compartimentului de metrologie aparținând SC ELECTROTIMIS SA Timișoara.

Mașina de prelucrat prin electroeroziune ELEROFIL-10 -v. fig. 1.3 - a fost modificată în sensul adaptării în locul subansamblelor braț fix BF și braț mobil BM a unor concentratoare adaptoare de undă CAU cu rol de ghidare și vibrație a OT după una sau două direcții perpendiculare pe axa sa.

Schema de principiu a instalației experimentale este redată în fig. 6.1.

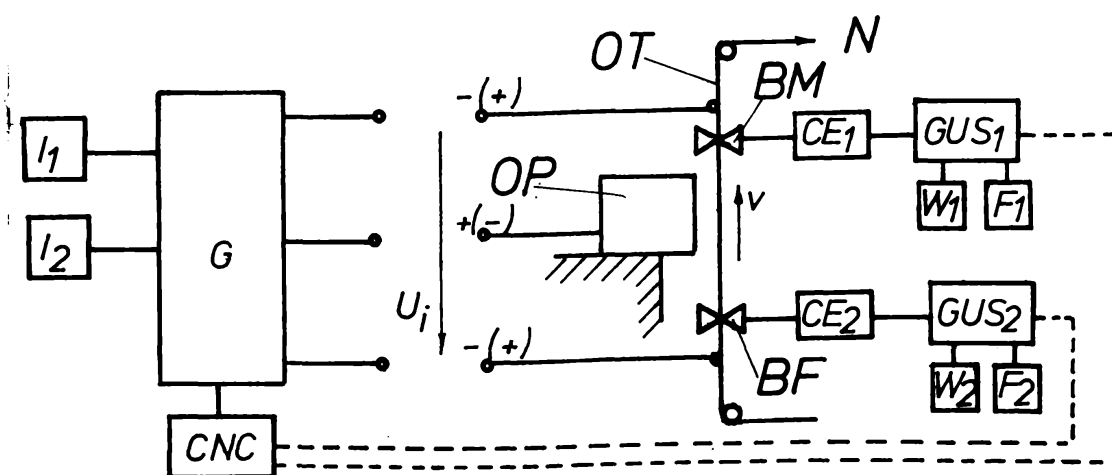


Fig. 6.1

Schema bloc a modelului experimental

unde.

- G - generator de impulsuri de tensiune tip ROGIG 50 MF,

- $I_{1,2}$  - intensitatea curentului electric la străpungerea dielectricului (parametru reglabil în două trepte, grosier  $I_1$ , respectiv fin  $I_2$ );
- $U_1$  - tensiunea de amorsare a descărcărilor electrice corespunzător parametrului de curent  $i$ ;
- OT - obiect de transfer (electrod filiform, scula);
    - $v$  - viteza de deplasare a OT în lungul axei sale;
    - $N$  - forța (tensiunea) mecanică de întindere a OT;
    - BM - braț mobil;
    - BF - braț fix;
  - OP - obiect de prelucrare (semifabricat, piesă);
  - $CE_{1,2}$  - convertor electroacustic corespunzător brațului mobil BM (1), respectiv brațului fix BF (2);
  - $GUS_{1,2}$  - generator de semnal de înaltă frecvență (ultrasunete), corespunzător  $CE_1$ , respectiv  $CE_2$ ;
  - $W_{1,2}$  - aparat pentru măsurarea puterii electrice absorbite de la rețea de  $GUS_1$ , respectiv  $GUS_2$ ;
  - $F_{1,2}$  - aparat pentru măsurarea frecvenței de rezonanță în sarcină a  $CE_1$ , respectiv  $CE_2$ ;
  - CNC - echipament de comandă și control tip **NUMEROM 455 AC**.

În funcție de parametri tehnologici impuși sistemului - materialul și starea suprafeței OP, grosimea OP, corecția traiectoriei OT - se reglează corespunzător  $G$  prin alegerea variabilelor  $I_1 + I_2$ , se stabilește mărimea rigidității dielectrice și se prescriu  $v$  și  $N$ . Activarea cu US a OT se poate face într-un punct, fie în BF, fie în BM perpendicular sau în același sens cu direcția de avans de lucru a OT, sau în două puncte după două direcții perpendiculare în spațiu activând simultan elementele de ghidare  $EG_{1,2}$  din BF și BM.

Pentru cercetările experimentale s-au utilizat două generatoare de ultrasunete într-o structură autooscilantă alimentate de la rețea prin câte un autotransformator ATR 8 și wattmetru, cu ajutorul cărora s-a putut varia și controla în permanență puterea electrică absorbită.

Convertoarele electroacustice  $CE_{1,2}$  au fost alcătuite din câte un CAU cilindric în trepte confecționat din oțel carbon de calitate îmbunătățit, dimensionat pentru frecvența de rezonanță  $f = 40$  kHz. Din considerente constructive - gabarit minim, robustețe - și funcționale - randament ridicat al conversiei energiei electrice în energie acustică, frecvență de rezonanță relativ ridicată - s-au utilizat transductoare piezoelectrice ceramice tip PZT de fabricație românească, cod TGUS 150/40-1 [126], având următoarele caracteristici principale necesare proiectării CAU:

- frecvența nominală: 40 kHz;

- puterea maximă (în impulsuri): 150 W;
- difuzor cilindric cu diametrul de 36 mm.

Fiecare CAU a fost cuplat mecanic prin lipire cu câte un element de ghidare EG<sub>1,2</sub>, confecționat din safir a OT.

### 6.2.1 Proiectarea concentratorului adaptor de undă

Urmărind miniaturizarea sistemului de activare cu ultrasunete adaptabil pe mașina ELEROFIL-10 în condițiile asigurării unei amplitudini de vibrație a electrodului filiform suficient de mare pentru a influența pozitiv procesul de prelucrare prin electroeroziune, atunci când puterea de activare a transductorului, respectiv amplitudinea de vibrație a transductorului, sunt relativ mici, se alege un CAU cilindric în trepte. Schema de calcul a concentratorului este similară celei de la subcap.4.2, fig.4.2, dar pentru dimensionarea acestuia, se prezintă în fig.6.2.

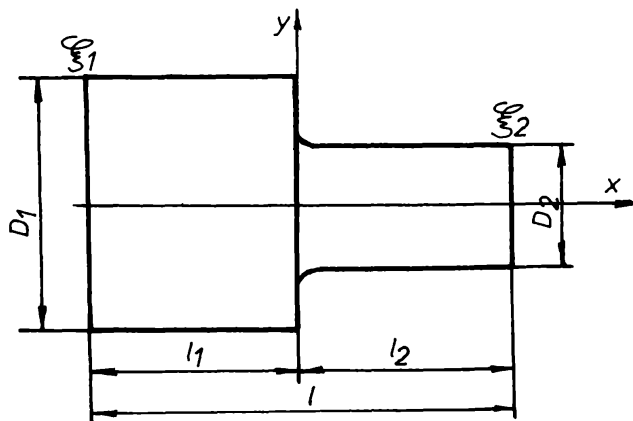


Fig. 6.2

Schema de calcul a CAU cilindric în trepte  
 $D_1, D_2$  - diametrele de intrare și ieșire din concentrator  
 $\xi_1, \xi_2$  - amplitudinile de vibrație la intrare, respectiv ieșirea din CAU  
 $l$  - lungimea CAU  
 $l_1, l_2$  - lungimile tronșoanelor cilindrice ale CAU

Ecuația de mișcare a undelor în acest caz este (v. relația 4.5):

$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} + k^2 \cdot \xi = 0$$

unde:

- $\xi - \xi(x)$  - amplitudinea de vibrație în raport cu abscisa  $x$ ;
- $k - \omega/c$  - număr de undă;
- $\omega - 2\pi f$  - pulsația;
- $f$  - frecvența oscilațiilor;
- $c$  - viteza de propagare a undelor longitudinale.

Amplitudinea de vibrație la intrarea în concentrator se consideră egală cu cea a transductorului în ipoteza unui factor de cuplaj mecanic maxim

$$\xi_T = \xi_1$$

unde:

$\xi_T$  - amplitudinea de vibrație a transductorului.

Fie  $\xi_1 = 0,001 \cdot 10^{-3}$  m [126], situație în care T este activat cu circa 20...30 W. Se alege constructiv diametrul  $D_1$  egal cu cel al T pentru a asigura un transfer energetic optim. Prin urmare, pentru transductorul tip TGUS 150/40-1,  $f = 40$  kHz iar  $D_1 = 38 \cdot 10^{-3}$  m. Se consideră că CAU se confecționează din oțel normalizat cu  $c = 5,12 \cdot 10^3$  m/s și este dimensionat în  $\lambda/2$ . Atunci se poate calcula lungimea CAU cu relația (4.1):

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$$

Înlocuind valorile cunoscute, se obține:

$$l = \frac{5,12 \cdot 10^3}{2 \cdot 40 \cdot 10^3} = 0,064 \text{ m}$$

Considerând  $l_1 = l_2 = l/2$ , coordonata nodului de oscilație coincide cu coordonata punctului de tensiune maximă:

$$x_0 = x_m = \frac{l}{2} = \frac{0,064}{2} = 0,032 \text{ m}$$

Diametrul  $D_2$  la ieșirea din CAU se alege în funcție de forma și dimensiunea elementelor de ghidare  $EG_{1,2}$ , dar și pentru a determina un raport  $N = D_1/D_2$  care să asigure un factor optim de amplificare a amplitudinii de vibrație. Fie această valoare  $D_2 = 12 \cdot 10^{-3}$  m. Prin urmare, se poate calcula factorul de amplificare a amplitudinii cu relația (4.12):

$$k_1 = N^2 = \left( \frac{38 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 10,028 \approx 10$$

Dar  $k_1 = \xi_2/\xi_1$  și cum  $\xi_1 = 0,001 \cdot 10^{-3}$  m, rezultă că  $\xi_2 = 10^{-5}$  m care reprezintă amplitudinea de vibrație teoretică la ieșirea din CAU.

La același rezultat se ajunge rezolvând ecuația diferențială (4.5) care admite soluții de forma (4.6) și (4.7). Punând condițiile inițiale:

$$\xi(-l_1) = \xi_1 = 0,001 \cdot 10^{-3} \text{ m pentru } x = -l_1$$

$$\xi(0) = 0 \text{ pentru } x = 0$$

$$\xi(l_2) = \xi_2 \text{ pentru } x = l_2$$

se obține:

$$\xi_2 = N^2 \cdot \xi_1 \cdot \operatorname{sink} l_1 \cdot (-\operatorname{sink} l_2 + \operatorname{ctgk} l_2 \cdot \operatorname{cosk} l_2) = N^2 \cdot \xi_1 \cdot \frac{\operatorname{sink} l_1}{\operatorname{sink} l_2}$$

Dar cum  $l_1 = l_2$ , rezultă  $\operatorname{sink} l_1 = \operatorname{sink} l_2$ , deci:

$$\xi_2 = N^2 \cdot \xi_1 = 10,028 \cdot 0,001 \cdot 10^{-3} \approx 0,010 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

În funcție de valoarea teoretică a lui  $k_{ar} = 10^{-3} \text{ m}$ , din [36] se stabilește mărimea efectivă a factorului de amplificare:

$$k_{ar} = 4,5$$

Proiectul CAU cilindric în trepte utilizat la derularea cercetărilor experimentale dimensionat constructiv cât și prin calcul după algoritmul descris mai sus, este prezentat în fig.6.3.

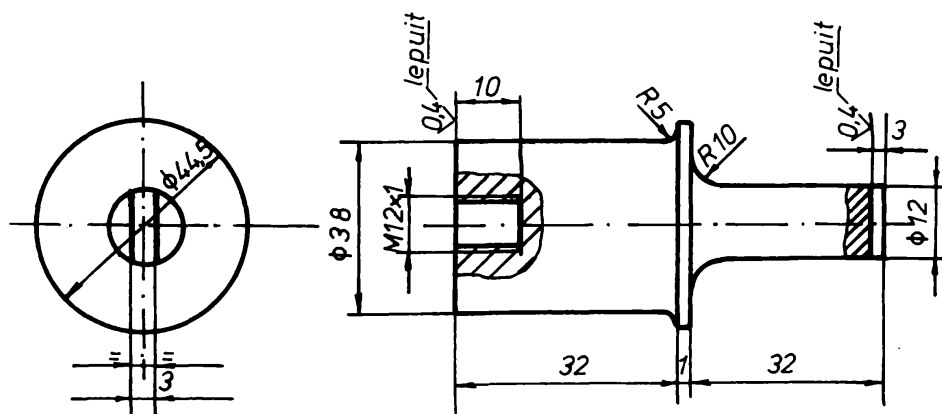


Fig.6.3

Deșenul de execuție al CAU cilindric în trepte

### 6.2.2 Calculul de dimensionare a elementelor de ghidare și alimentare cu energie electrică a electrodului filiform

Se consideră cazul general de activare cu ultrasunete a electrodului filiform în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu (v. fig.5.6). Distanțele  $l_1$ ,  $l_1'$  și  $l_1''$  au fost determinate în exemplele de realizare a soluțiilor constructive de la paragraful 5.2.2. Pentru a asigura o funcționare stabilă a procesului de prelucrare, este necesară existența nodurilor de oscilație pe elementele de alimentare cu energie electrică  $EA_1$  și  $EA_2$ . În caz contrar, datorită



vibrațiilor dintre OT și EA<sub>1,2</sub>, apar descărcări electrice între aceste elemente care conduc la deteriorarea suprafețelor de contact și modificarea configurației geometrice a electrodului filiform coroborat cu variația aleatoare a descărcărilor electrice în impuls dependent de frecvența vibrațiilor ultrasonice. Pe de altă parte, se necesită ca amplitudinea de vibrație să fie maximă în punctele de activare, iar cele două mișcări trebuiesc în așa fel corelate încât în traiectoriile electrodului filiform să conducă la formarea undelor flexurale [59,108].

Realizarea echipamentelor tehnologice de prelucrare impune însă stabilirea unor distanțe reale între elementele de ghidare și elementele de alimentare cu energie electrică care se pot realiza cu precizii dimensionale și de formă între anumite limite. Dar transductoarele se construiesc la rândul lor la o frecvență nominală ce poate varia într-un domeniu îngust de frecvențe, care în general este de 1 kHz. Problema se pune la a determina care este variația maxim admisă pentru frecvențele transductoarelor ce echipează sistemele de activare cu ultrasunete a electrodului filiform în condiții industriale de fabricare, fără a afecta distanțele l'<sub>1</sub> și l''<sub>1</sub> care sunt constante.

Spre exemplificare, se presupune că elementele de ghidare EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> sunt activate cu frecvența de rezonanță f = 40 · 10<sup>3</sup> Hz. Prin urmare, distanțele l'<sub>1</sub> și l''<sub>1</sub> - v. relația (5.21) - la o forță de întindere a firului de 0,06 kg · m/s<sup>2</sup> și modul de vibrație n = 15, sunt:

$$l'_{15} = l''_{15} = \frac{15 \cdot 145,3}{2 \cdot 40 \cdot 10^3} = 27,244 \cdot 10^{-3} m$$

Tinând seama de precizia de prelucrare și de montaj necesară, se adoptă distanța efectivă:

$$l'_{15} = l''_{15} = 27,25 \pm 0,1 mm$$

Însă contactul electrodului filiform OT cu EG<sub>1,2</sub> sau EA<sub>1,2</sub> nu este punctiform. În realitate, elementele de ghidare EG<sub>1,2</sub> sunt confecționate din două semighidaje din safir [124] - fig.6.4 - asamblate prin lipire cu adeziv bicomponent, formând un bloc prismatic arcuit în zona de contact cu OT cu raza r = 75 mm. Lungimea elementelor de ghidare este de 12 mm și este egală cu diametrul de ieșire D<sub>2</sub> din CAU. Suprafața de frecare cu OT este șlefuită fin și apoi lustruită, după care se realizează asamblarea prin lipire.

Elementele de alimentare EA<sub>1,2</sub> se realizează din carbură metalică P 30 [124] - fig.6.5 -, de grosime 6 mm și laturile de 10 mm. EA<sub>1,2</sub> sunt prevăzute pe

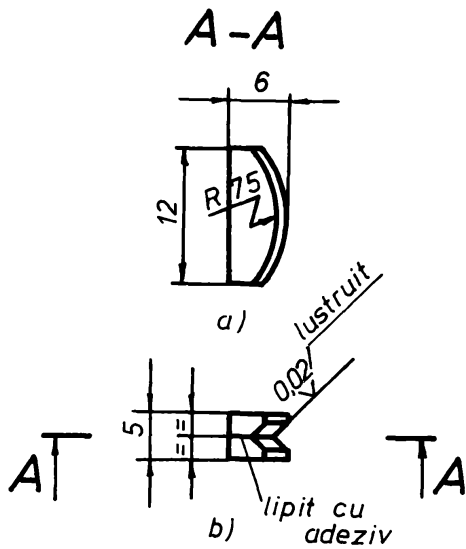


Fig. 6.4

Desenul de execuție a elementelor de ghidare EG

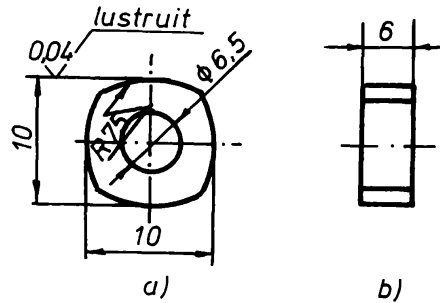


Fig. 6.5

Desenul de execuție a elementelor de alimentare cu energie electrică EA

fiecare latură cu o rază de rotunjire  $r = 75$  mm iar suprafețele de contact cu OT sunt rectificată fin și în final lustruite. În zona centrală se practică un orificiu  $\varnothing 6,5$  mm pentru fixarea  $EA_{1,2}$  de BF sau BM, dar și pentru re poziționarea unei alte laturi față de OT când se constată o uzură pronunțată a suprafeței de contact cu electrodul filiform.

Din descrierea  $EG_{1,2}$  și  $EA_{1,2}$  - fig.6.4 și fig.6.5 - se observă că OT este în contact cu aceste elemente pe o lungime mai mare decât cea corespunzătoare modului propriu fundamental de vibrație ( $l_1 = 1,81625 \cdot 10^{-3}$  m la  $f = 40 \cdot 10^3$  Hz și  $N = 0,06$  kg.m/s<sup>2</sup>). În cazul în care OT este în contact cu  $EG_{1,2}$  pe toată lungimea acestuia de aproximativ 12 mm, se consideră că întreaga porțiune în contact a OT cu  $EG_{1,2}$  oscilează cu aceeași amplitudine și care este egală cu cea furnizată de CE. În același timp, pe suprafața de contact a OT cu  $EA_{1,2}$  este posibil să se realizeze mai multe puncte de contact corespunzător lungimilor  $l'_1$  și  $l''_1$ . Pentru  $n = 1$ , la frecvența  $f = 40 \cdot 10^3$  Hz și  $N = 0,06$  kg.m/s<sup>2</sup>,  $l'_1 = l''_1 = 1,81625 \cdot 10^{-3}$  m. Prin urmare, pentru a avea cât mai multe puncte de contact corespunzător OT -  $EA_{1,2}$ , este preferabil fie să se lucreze cu frecvențe mai înalte iar porțiunea curbată  $EA_1$  să fie mai mare, fie să se creeze în OT unde nestăționare sau flexurale.

Dacă se consideră cazul extrem, când un T are frecvența de rezonanță de  $39,5 \cdot 10^3$  Hz, iar celălalt T are frecvența de  $40,5 \cdot 10^3$  Hz, atunci pentru modul de vibrație  $n = 15$  se obține:

$$l'_{15(2)} = \frac{15 \cdot 145,3}{2 \cdot 39,5 \cdot 10^3} = 27,588 \cdot 10^{-3} m$$

respectiv:

$$l''_{15(2)} = \frac{15 \cdot 145,3}{2 \cdot 40,5 \cdot 10^3} = 26,907 \cdot 10^{-3} m$$

Făcând diferența:

$$l'_{15(1)} - l'_{15} = 27,588 \cdot 10^{-3} - 27,244 \cdot 10^{-3} = 0,344 \cdot 10^{-3} m$$

respectiv:

$$l''_{15(2)} - l''_{15} = 26,907 \cdot 10^{-3} - 27,244 \cdot 10^{-3} = -0,337 \cdot 10^{-3} m$$

se constată că nodurile de oscilație s-au deplasat cu circa  $0,340 \cdot 10^{-3} m$  față de poziția efectivă a mijloacelor  $EA_{1,2}$  stabilită prin calcul pentru frecvența de  $40 \cdot 10^3 Hz$ . Față de lungimea de contact a suprafețelor  $EA_{1,2}$  cu OT de 10 mm, se consideră că deplasarea nodurilor de oscilație cu valorile mai sus determinate este nesemnificativă. Pentru protecția  $EA_{1,2}$  cât și a celorlalte componente ale sistemului de antrenare a OT, se consideră necesară amortizarea elastică a axului care flexează elementele de alimentare.

În calculele de dimensionare a distanțelor dintre  $EG_{1,2}$  și  $EA_{1,2}$  s-a considerat că forța de tragere - s-au de întindere - a electrodului filiform  $N$  este constantă. În realitate, datorită imperfecțiunilor sistemului mecanic de antrenare a electrodului filiform cât și uzurii neuniforme a acestuia, forța  $N$  este variabilă. Pentru a evita variațiile bruște de tensiune mecanică care deseori pot duce la ruperea OT, mașinile de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform sunt prevăzute cu regulatoare mecanice [67,66,124] sau electromecanice de temporizare, reglare și menținere a constanței tensiunii mecanice. Cu toate acestea, pot apărea variații accidentale ale forței de tragere datorate neuniformității secțiunii electrodului filiform, incluziuni sau neomogenități de material, care determină în final variația vitezei de propagare a undelor.

Fie această variație a forței de tragere a OT cuprinsă între limitele  $N = 0,06 \pm 0,01 kg \cdot m/s^2$  [28,40,79]. Dacă  $N_1 = 0,07 kg \cdot m/s^2$ , se obține:

$$c_1 = \sqrt{\frac{0,07 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,9 \cdot 10^3}} = 158,3 \text{ m/s}$$

iar pentru  $N_2 = 0,05 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ .

$$c_2 = \sqrt{\frac{0,05 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,9 \cdot 10^3}} = 133,8 \text{ m/s}$$

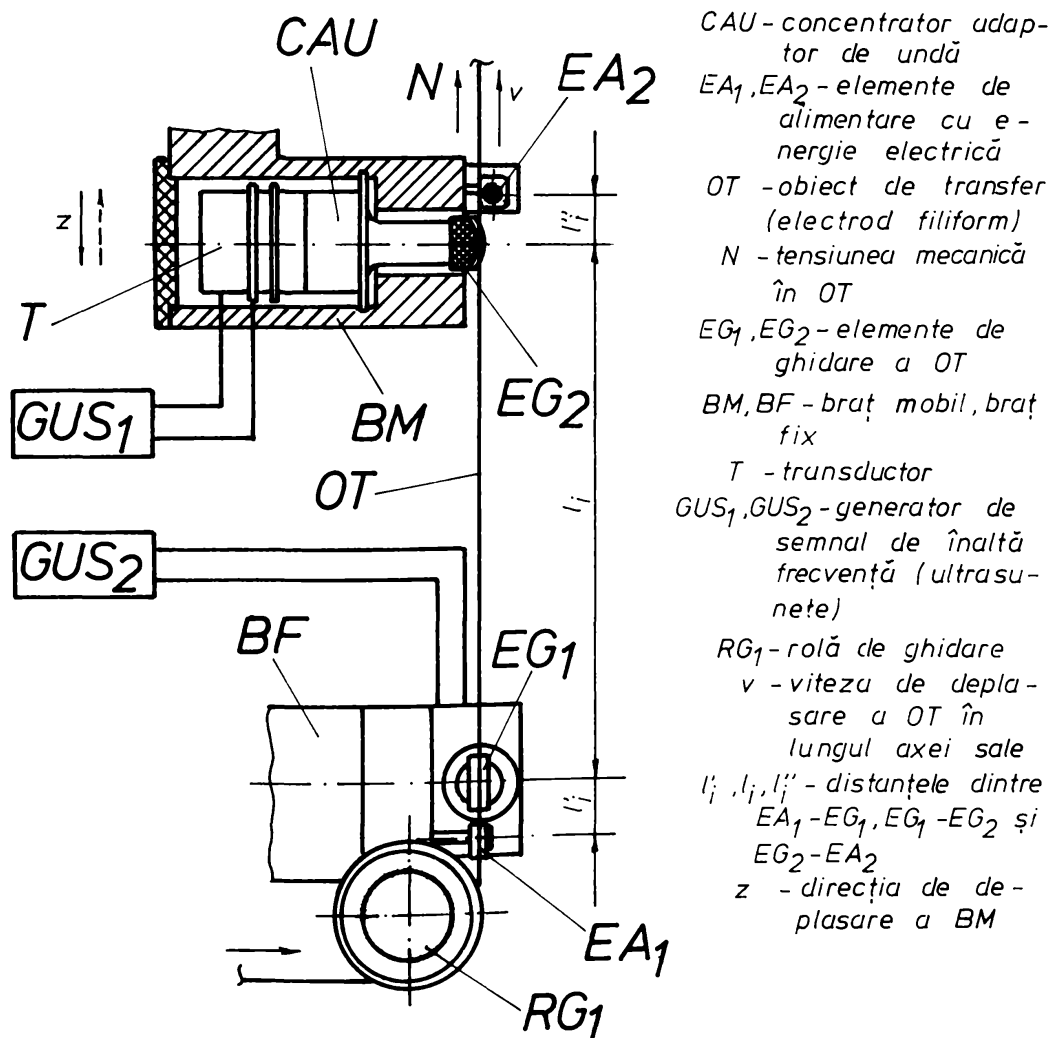


Fig. 6.6

Detaliu constructiv al subansamblului de activare ultrasonică a electrodului filiform adaptabil pe mașina ELEROFIL - 10

În acest caz lungimile recalculate între  $EG_{1,2}$  și  $EA_{1,2}$  pentru modul de vibrație  $n = 15$  la variația forței cu  $10,01 \text{ kg.m/s}^2$ , devin:

$$l'_{15,01} = l''_{15,01} = \frac{15 \cdot 158,3}{2 \cdot 40 \cdot 10^3} = 29,682 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l'_{15,01} = l''_{15,01} = \frac{15 \cdot 133,8}{2 \cdot 40 \cdot 10^3} = 25,088 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Prin urmare, în condițiile constructiv-tehnologice date, variația forței de tragere cu  $10,01 \text{ kg.m/s}^2$  conduce la deplasarea nodului de oscilație pe suprafața  $EA_{1,2}$  cu circa  $2,3 \text{ mm}$ . Aceste abateri influențează stabilitatea prelucrării prin electroeroziune. Din acest motiv se consideră oportună limitarea domeniului de variație a forței de tragere a electrodului filiform la valorile precizate mai sus atât prin perfecționarea mecanismului de antrenare a OT, cât și prin utilizarea unor dispozitive reglatoare adecvate.

O variantă constructivă adoptată la activarea cu ultrasunete a electrodului filiform pe mașina ELEROFIL-10 care înglobează calculul de dimensionare descris anterior este prezentată în fig.6.6.

### 6.3 CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE CU ELECTROD FILIFORM ACTIVAT ULTRASONIC

#### 6.3.1 Activarea electrodului filiform cu frecvență ultrasonică într-un singur punct

Activarea electrodului filiform cu frecvență ultrasonică într-un punct s-a efectuat în două moduri [61,62,76]:

- activarea elementului de ghidare  $EG_2$  din  $BM$ ;
- activarea elementului de ghidare  $EG_1$  din  $BF$ ,

fiecărui mod corespunzându-i câte două situații:

- activarea OT s-a efectuat după o direcție paralelă cu direcția de deplasare (avans) a sa dată de reglajul  $G - CNC$ ;
- activarea cu ultrasunete a OT s-a efectuat după o direcție perpendiculară față de direcția sa de avans de lucru.

În cadrul acestor cercetări experimentale au fost prelucrate OP sub formă de plăci din oțel de grosime  $10 \text{ mm}$ , confecționate din  $34 \text{ MoCN } 15$ , tratate

termic la 54...56 HRC și având suprafețele de referință rectificate, în care s-au efectuat tăieri pe lungimea de 15 mm - fig.6.7 -, unde cu  $g$  s-a notat mărimea

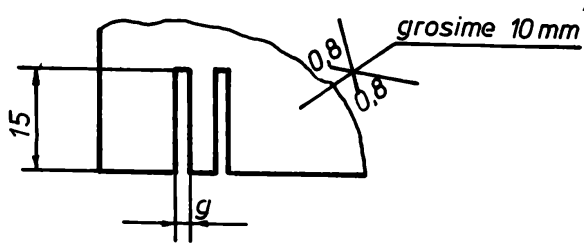


Fig. 6.7

Vedere de sus a semifabricatului și schema de prelucrare

fantei practicate în OP în urma eroziunii.

În timpul determinărilor experimentale s-au menținut constante următorii parametri [65]:

- viteza de deplasare a OT în lungul axei sale;
- tensiunea mecanică în OT;

- intensitatea curentului furnizat de G;
- rigiditatea lichidului dielectric;
- frecvența de activare cu ultrasunete a  $CE_1$  sau  $CE_2$ ,

și s-a cronometrat durata prelucrării pentru fiecare încercare în parte corespunzător nivelului de putere electrică absorbită de GUS de la rețea.

Schema electrică de principiu a activării OT într-un punct este prezentată în fig.6.9. Prin variația continuă a ATR  $\delta$  se modifică tensiunea de alimentare a GUS, deci se obține la ieșire o anumită putere acustică, fapt ce conduce la o mărime bine determinată a amplitudinii de vibrație  $\xi$  a elementului de ghidare  $EG_1$  sau  $EG_2$  și în final și a OT. GUS permite prin construcția sa autoacordarea pe frecvența de rezonanță a  $CE_{1,2}$  în timpul prelucrării propriu-zise chiar la variații relativ mari ale impedanței mecanice, fapt ilustrat de  $F_{1,2}$ . Pentru aducerea grosieră în plaja de frecvență a  $CE_{1,2}$ , GUS se poate regla manual prin modificarea corespunzătoare a circuitului oscilant C - L având forma unei bobine toroidale dispuse într-un miez de ferită tip "oală".

### 6.3.1.1 Activarea electrozudului filiform cu frecvență ultrasonică în brațul mobil

a) Activarea cu ultrasunete a OT după o direcție paralelă cu direcția de avans este prezentată schematic în fig.6.6. În acest caz deplasarea relativă a OP comandată și controlată de C - CNC s-a efectuat după direcția Y a mașinii ELEROFIL-10 (s-a deplasat practic ansamblul ce cuprinde mecanismul de antrenare a OT împreună cu BF și BM), OP rigidizat de masa mașinii rămânând imobilizat ( $X = 0$ ).

Parametri ce au fost menținuți constante în timpul probelor sunt următorii:

- viteza de deplasare a OT în lungul axei sale:  $v = 25$  mm/s;



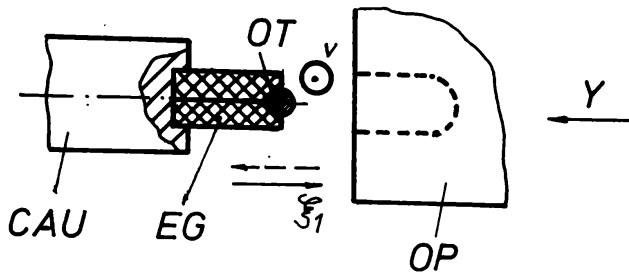


Fig. 6.8

Schema activării electrodului filiform OT cu frecvență ultrasonică în brațul mobil după o direcție Y paralelă cu direcția de avans

CAU - concentrator adaptor de undă

EG - element de ghidare

OP - obiectul prelucrării (semifabricat)

v - viteza de deplasare a OT în lungul axei sale

$S_1$  - amplitudinea de vibrație a OT

- tensiunea mecanică în OT: 30...35 N;

- frecvența de activare US a OT: 40,160 kHz;

- intensitatea curentului de străpungere a dielectricului furnizat de G

(curent de amorsare a descărcării electrice în impuls de tensiune):

$$I_1 + I_2 = 1,66 \text{ A};$$

- rigiditatea lichidului dielectric:

$$R_d = 10^4 \text{ } \Omega \text{cm}.$$

Rezultatele experimentărilor sunt prezentate sintetic în tabelul 6.1, unde valorile de capacitate erozivă a prelucrării  $c_e$  reprezintă media aritmetică a cinci probe de tăiere consecutive.

TABELUL 6.1

Parametru	Fără activare US	Cu activare US [W]			
		4	6	10	25
Capacitate erozivă medie $c_e$ [mm/min]	0,426	0,448	0,434	0,431	0,441

Dependența vitezei de erodare  $c_e$  a OT în funcție de puterea consumată de la rețea  $P_e$  de GUS este prezentată în diagrama din fig.6.10.

Față de proba martor -  $c_e = 0,426$  mm/min - se constată o creștere a capacității erozive în domeniul 3...25 W, creștere mai accentuată în jurul puterii consumate de 4 W -  $c_e = 0,448$  mm/min - cu circa 5%. Deși tendința de creștere a vitezei de erodare manifestă o dependență aproape liniară la puteri cuprinse între 10...25 W, nu s-a putut continua experimentarea la puteri mai mari de 25 W datorită pericolului de dezlipire a elementului de ghidare a electrodului filiform de pe concentrator.



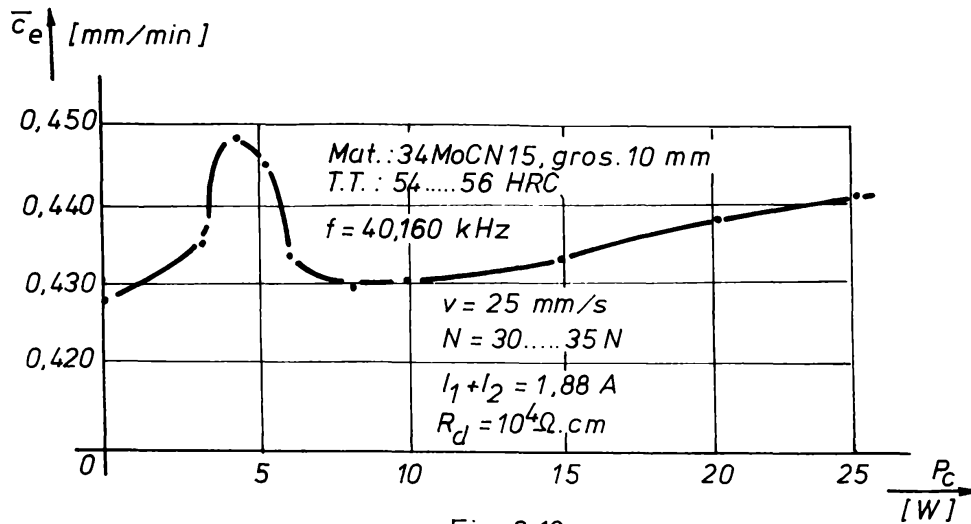


Fig. 6.10

Dependența capacității erozive medii de puterea consumată de la rețea de generatorul de ultrasunete

b) Activarea cu ultrasunete a OT după o direcție perpendiculară pe direcția de avans este ilustrată în fig.6.11. OP fixat pe masa mașinii ELEROFIL-10 se

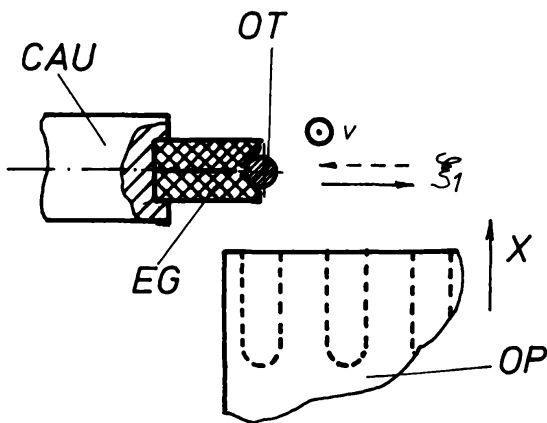


Fig. 6.11

Schema activării electrodului filiform OT cu frecvență ultrasonică în brațul mobil după o direcție X perpendiculară pe direcția de avans

CAU - concentrator adaptor de undă

EG - element de ghidare

OP, OT - obiectul prelucrării (piesa), respectiv de transfer (scula)

v - viteza de deplasare a OT în lungul axei sale

$S_1$  - amplitudinea de vibrație a OT

deplasează după direcția X iar OT descrie oscilații cu frecvență ultrasonică având amplitudinea  $E_1$  perpendiculară pe X. Parametri de lucru au fost identici cu cei din cazul anterior.

Rezultatele cercetărilor experimentale sunt sintetizate în tabelul 6.2 unde, de asemenea,  $c_e$  reprezintă media aritmetică a cinci probe de tăiere consecutive.

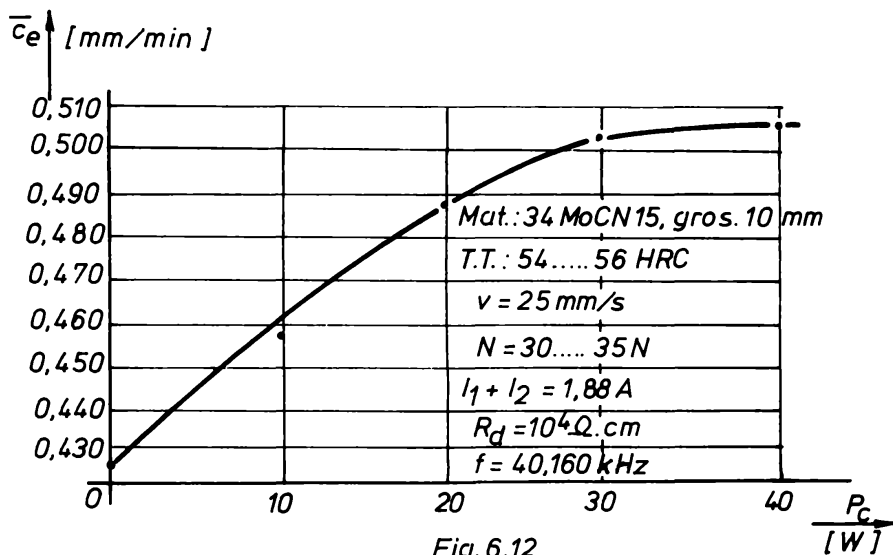
Grafic, dependența vitezei de erodare  $c_e$  a electrodului filiform în funcție de puterea consumată de la rețea  $P_c$  de GUS are alura diagramei din fig.6.12.

Se observă o creștere mai bruscă a capacității erozive  $c_e$  față de nivelul de referință în domeniul 0...20 W o dată cu creșterea

puterii consumate de generator, având o tendință de stabilizare la puteri mai mari de 40 W în jurul valorii de 0,510 mm/min. În acest caz, activarea ultrasonică a OT

TABELUL 6.2

Parametru	Fără ac- tivare US	Cu activare US [W]			
		10	20	30	40
Capacitate me- die erozivă $\bar{c}_e$ [mm/min]	0,428	0,456	0,486	0,504	0,508



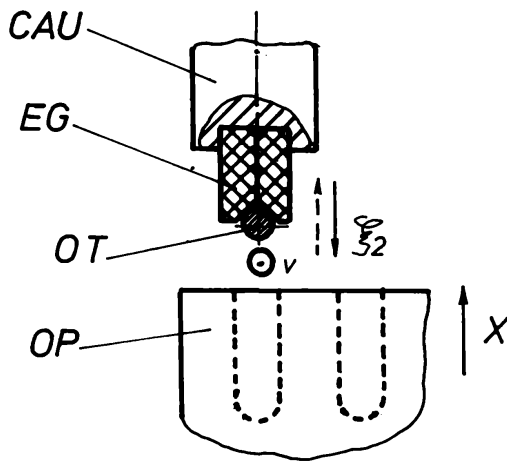
Dependența capacității erozive medii în funcție de puterea consumată de la rețea de generatorul de ultrasunete

conduce la un spor de capacitate erozivă de circa 18 %. Comparativ cu rezultatele obținute la punctul a) - v. fig.6.10- se poate afirma că activarea US a OP după o

direcție perpendiculară pe direcția de avans de lucru într-un punct corespunzător poziției BM în ansamblul instalației experimentale permite prelucrarea cu energii ultraacustice mai mari, deci amplitudini de vibrație mai mari, obținând în final o creștere semnificativă de viteză de erodare.

### 6.3.1.2 Activarea electrodului filiform cu frecvență ultrasonică în brațul fix

a) Activarea cu ultrasunete a OT după o direcție paralelă cu direcția de avans de lucru este prezentată schematic în fig.6.13. Față de CE<sub>2</sub>, dispus în BM, CE<sub>1</sub> se assemblează din lateral față de BF astfel încât direcția sa de oscilație este perpendiculară în spațiu față de cea a convertorului electroacustic din brațul mobil. Mișcarea de avans de lucru este efectuată de semifabricat fixat rigid pe masa mașini ELEROFIL-10 după direcția X, iar electrodul filiform vibrează cu amplitudinea  $\xi_2$  în aceeași direcție cu X.



CAU - concentrator adaptor de undă  
 EG - element de ghidare  
 OT, OP - obiect de transfer (scula), respectiv al prelucrării (piesa)  
 $v$  - viteza de deplasare a OT în lungul axei sale  
 $S_2$  - amplitudinea de vibrație a OT

În timpul încercărilor experimentale au fost menținute constante următorii parametri:  
 - viteza de deplasare a OT în lungul axei sale:

$v = 16 \text{ mm/min}$ ,  
 - tensiunea mecanică în OT  
 $N = 20 \text{ N}$ ,

Fig. 6.13

Schema activării electrodului filiform OT cu frecvență ultrasonică în brațul fix după o direcție X paralelă cu direcția de avans

- frecvența de activare US a OT: 39,900 kHz,
- intensitatea curentului de străpungere a lichidului dielectric:

$I_1 + I_2 = 1,54 \text{ A}$ ;

- rigiditatea lichidului dielectric:  $R_d = 10^4 \text{ Ohm}$ .

Față de cazul precedent - v. subparagraful 6.3.1.1 - parametri de regim sunt ușor inferiori, materialul de prelucrat OP rămânând același: 34 MoCN 15, grosime 10 mm și duritate 54...56 HRC. Suplimentar, pe lângă măsurătorile de capacitate erozivă s-a determinat pe microscopul universal și mărimea fantei de tăiere  $\bar{g}$ .

Rezultatele experimentărilor sunt prezentate sintetic în tabelul 6.3, unde  $\bar{v}_e$  și  $\bar{g}$  reprezintă viteza de erodare, respectiv fanta de tăiere (capul de

TABELUL 6.3

Parametru	Fără activare US	Cu activare US [W]		
		30	40	50
Capacitate erozivă $\bar{v}_e$ [mm/min]	0,376	0,413	0,406	0,402
Cap de lucru $\bar{g}$ [mm]	0,393	0,388	0,387	0,389

lucru) calculate ca medie aritmetică pentru cinci încercări succesive.

Dependența grafică dintre  $\bar{c}_e$ ,  $\bar{g}$  și amplitudinea de vibrație corespunzătoare puterii electrice consumate de generatorul de ultrasunete de la rețea este ilustrată în fig. 6.14.

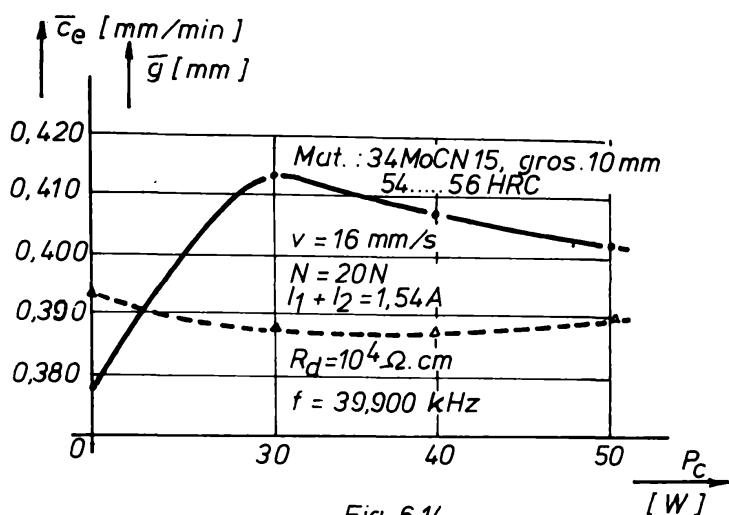


Fig. 6.14

Dependența capacității erozive și a capului de lucru (valori medii) în funcție de puterea consumată de la rețea de generatorul de ultrasunete

trează o valoare aproape constantă în intervalul de amplitudini de vibrație explorat.

b) Activarea cu ultrasunete a OT după o direcție perpendiculară pe direcția de avans de lucru este prezentată schematic în fig. 6.15. OP este fixat pe masa

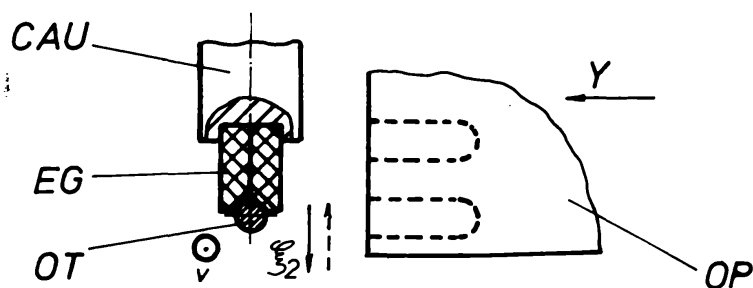


Fig. 6.15

Schema activării electrodului filiform OT cu frecvență ultrasonică în brațul fix după o direcție Y perpendiculară pe direcția de avans

CAU - concentrator adaptor de undă  
OT, OP - obiect de transfer (scula), respectiv al prelucrării (piesa)

$v$  - viteza de deplasare a OT în lungul axei sale  
 $\xi_2$  - amplitudinea de vibrație a OT

Capacitatea erozivă a prelucrării  $\bar{c}_e$  prezintă un maxim la amplitudini de vibrație a OT corespunzător puterii absorbite de la rețea  $P_e = 30$  W și semnifică o creștere cu circa 8% față de proba martor. În schimb capul de lucru  $\bar{g}$  se măsoară cu aproape 0,005 mm față de prelucrarea prin EDM fără activare US, dar păstrează o valoare aproape constantă în intervalul de amplitudini de vibrație explorat.

mașinii ELEROFIL-10, iar EF se deplasează împreună cu mecanismul de antrenare a electrodului filiform după direcția Y. Similari cazului a), rezultatele încercărilor experimentale sunt sintetizate în tabelul 6.4.

Grafic, dependența dintre acești parametri și puterea absorbită de la rețea de generatorul de ultrasunete este ilus-

TABELUL 6.4

Parametru	Fără activare US	Cu activare US [W]		
		30	50	70
Capacitate erozivă medie $\bar{c}_e$ [mm/min]	0,378	0,418	0,409	0,400
Cap de lucru $\bar{g}$ [mm]	0,393	0,384	0,385	0,385

tratată în fig.6.16. Alura curbelor este asemănătoare cazului precedent

- v. fig.6.14 - unde OT a fost oscilat cu frecvența ultrasonică  $f = 39,900$  kHz

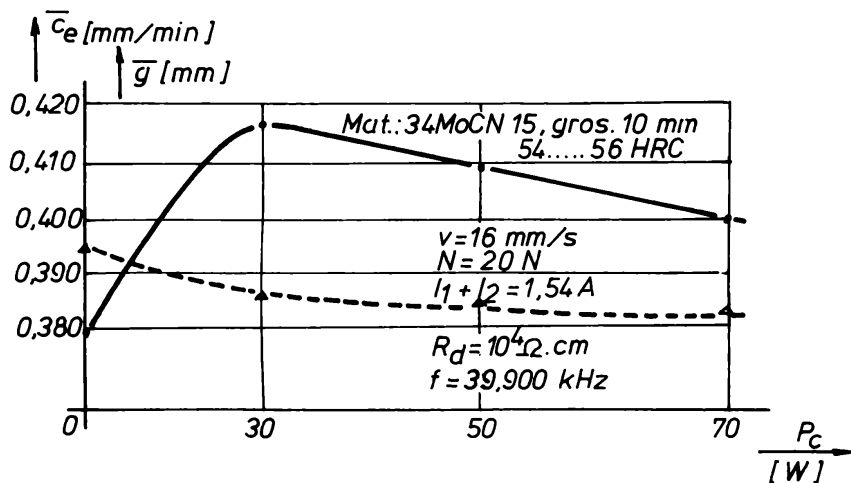


Fig. 6.16

Dependența capacității erozive și a capului de lucru (valori medii) în funcție de puterea consumată de la rețeaua de generatorul de ultrasunete

după direcția X. Se remarcă același maxim de viteză de erodare la  $P_c = 30$  W, fiind cu circa 11 % mai mare decât în situația prelucrării prin electroeroziune fără activare US, după care  $\bar{c}_e$  scade lent o dată cu creș-

terea amplitudinii de vibrație chiar dacă puterea consumată de GUS a ajuns până la valori de 70 W. În același timp, capul de lucru  $\bar{g}$  este în medie cu 0,003 mm mai mic decât în cazul a) și rămâne constant indiferent de mărimea puterii de activare cu ultrasunete.

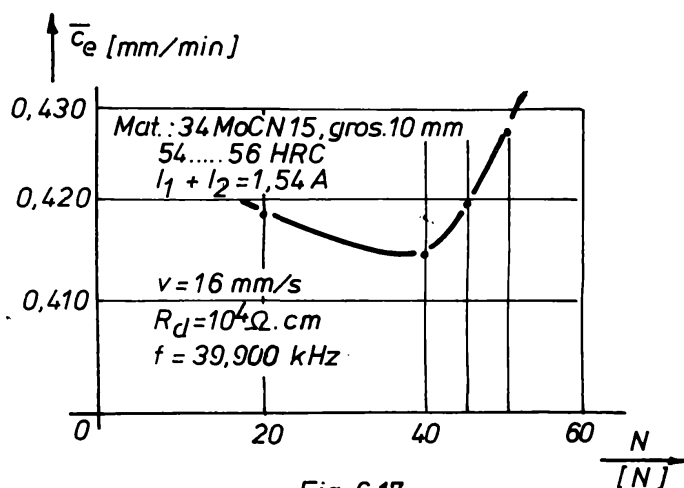
Menținând în continuare parametri de regim constanți, s-a urmărit determinarea unei dependențe între capacitatea erozivă a prelucrării  $\bar{c}_e$  și tensiunea mecanică  $N$  în electrodul filiform la amplitudinea de vibrație (puterea consumată  $P_c = 30$  W) corespunzător productivității maxime. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.5.

Grafic, dependența dintre viteza de erodare  $\bar{c}_e$  și tensiunea mecanică

TABELUL 6.5

Parametru	Tensiunea mecanică N [N]			
	20	40	45	50
Capacitatea erozivă medie $\bar{c}_e$ [mm/min]	0,418	0,414	0,418	0,427

N în electrodul filiform este prezentată în fig.6.17. Practic,  $\bar{c}_e$  depinde foarte puțin de N în electrodul filiform.



Dependența capacității erozive medii în funcție de tensiunea mecanică în electrodul filiform

puțin de N în electrodul filiform. Se observă că variația curbei prezintă un minim la 40 N; se poate lucra cu tensiuni mecanice în OT în jur de 20 N - nu mai mici pentru că este influențată negativ precizia dimensională prin efectul câmpului electromagnetic dintre OT și OP [65,75] - sau de 50 N - nu mai mari pentru a proteja electrodul filiform la solici-tări mecanice ce conduc la de-

formarea și ruperea acestuia.

### 6.3.2 Activarea electrodului filiform cu frecvență ultrasonică în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu

Activarea OT cu frecvență ultrasonică în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu s-a efectuat cu ajutorul instalației experimentale a cărei schemă bloc este prezentată în fig.6.18. Fie GUS<sub>1</sub> generatorul de US care transmite semnal de înaltă frecvență convertorului electroacustic CE<sub>1</sub> montat în BM - v. fig.6.1 -, respectiv GUS<sub>2</sub> cuplat cu CE<sub>2</sub> rigidizat de BF. Alimentarea fiecărui generator de ultrasunete se face direct de la rețea prin câte un autotransformator ATR și wattmetru W<sub>1</sub> sau W<sub>2</sub>, respectiv fiecare generator de ultrasunete se află în legătură directă cu câte un frecvențmetru F<sub>1</sub> sau F<sub>2</sub>. Practic, fiecare GUS acționează independent, astfel că în cursul cercetărilor experimentale s-au efectuat diverse combinații între puterile consumate de generatoare urmărind o optimizare a mărimilor de ieșire din sistem - capacitate erozivă, precizie

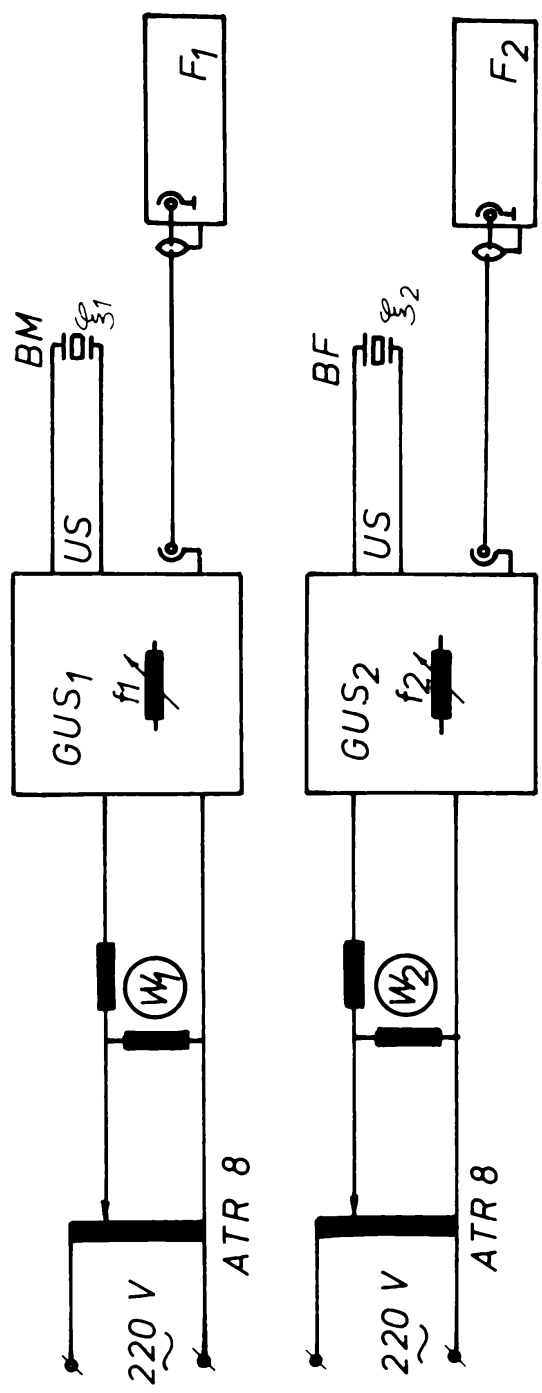


Fig. 6.18  
 Schema electrică de principiu a activării electrozodului filiform cu frecvență ultrasonică în două puncte

BM, BF - braț mobil, braț fix; GUS1, GUS2 - generatoare de semnal de înaltă frecvență (ultrasunete); ATR 8 - autotransformator;  $W_1, W_2$  - wattmetre;  $F_1, F_2$  - frecvențmetre;  $f_1, f_2$  - frecvențele GUS1 și GUS2;  $\xi_1, \xi_2$  - amplitudinile de vibrație în cele două puncte

dimensională și de formă, rugozitatea suprafeței -.

Experimentările au fost efectuate diferențiat, pe semifabricate distincte ca formă și dimensiuni, corelat cu mărimea parametrului de ieșire urmărit. Schema de principiu a activării OT cu frecvență US în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu este ilustrată în fig.6.19.

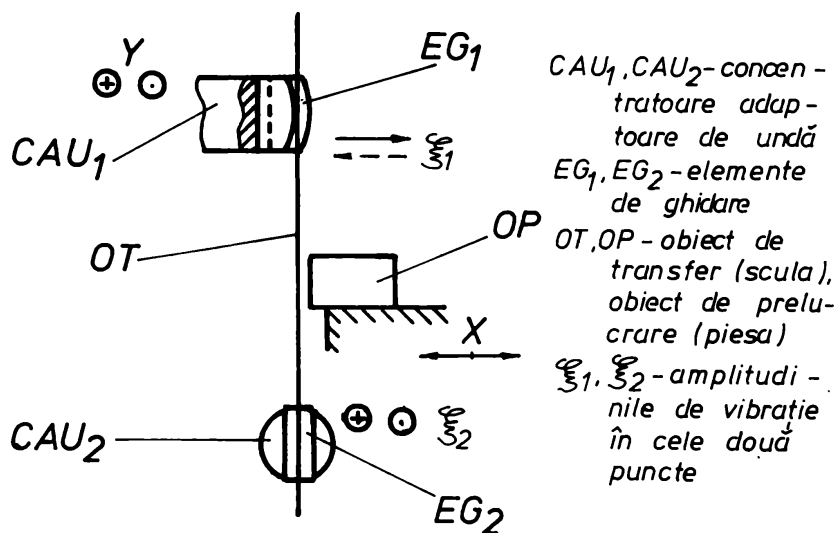


Fig. 6.19

Schema activării ultrasonice a electrozudului fili-form după două direcții perpendiculare în spațiu X și Y

OP este fixat pe masa mașinii ELEROFIL-10 și se deplasează după direcția X, iar CAU<sub>1</sub> și CAU<sub>2</sub> rigidizate de BM, respectiv de BF, se deplasează după direcția Y.

CAU<sub>1</sub> cu EG<sub>1</sub> este dispus în spațiu perpendicular față de CAU<sub>2</sub> cu EG<sub>2</sub>, astfel încât EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> vibrează în același sens cu X, respectiv cu Y; amplitudinile celor două mișcări  $\xi_1$  și  $\xi_2$  fiind perpendiculare una față de cealaltă, se compun având drept rezultat apariția undelor flexurale [59,60,62,64,73,106].

amplitudinile celor două mișcări  $\xi_1$  și  $\xi_2$  fiind perpendiculare una față de cealaltă, se compun având drept rezultat apariția undelor flexurale [59,60,62,64,73,106].

### 6.3.2.1 Aspecte privind variația capacității erozive în funcție de parametri de lucru

În cursul acestor cercetări experimentale au fost uzinate OP sub formă de plăci din oțel de grosime 10 mm - v. fig.6.7 - confecționate din 34 MoCN 15 tratate termic la 54...56 HRC, în care s-au efectuat tăieri pe lungimea de 15 mm și s-a cronometrat durata efectivă a prelucrării.

Parametri procesului tehnologic au fost următorii:

- viteza de deplasare a OT în lungul axei sale.  $v$  - 16 mm/s,
- tensiunea mecanică în OT:  $N$  - 20 N;
- intensitatea curentului electric la străpungerea lichidului dielectric:

$$I_1 + I_2 = 1,54 \text{ A};$$

- frecvența de activare US a OT:     - în BM: 40,160 kHz
- în BF: 39,900 kHz

- rigiditatea lichidului dielectric:  $R_1 = 10^4 \text{ } \Omega\text{cm}$ .



Dintre multiplele variante de activare a electrodului filiform în EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> din punctul de vedere al variației amplitudinilor de vibrație ξ<sub>1</sub> și ξ<sub>2</sub> prin prisma modificării controlate a puterilor absorbite de la rețea de GUS<sub>1</sub> și GUS<sub>2</sub>, se consideră relevante rezultatele centralizate în tabelul 6.6.

TABELUL 6.6

Parametru	Fără activare US	Cu activare US P <sub>e1</sub> /P <sub>e2</sub> [W]			
		3/15	4/25	4/30	5/35
Capacitate erozivă medie $\bar{c}_e$ [mm/min]	0,378	0,435	0,464	0,473	0,463

Alura dependenței dintre  $\bar{c}_e$  și combinația optimă a raportului dintre puterile electrice absorbite de la rețea de GUS<sub>1</sub>, respectiv GUS<sub>2</sub>, adică P<sub>e1</sub>/P<sub>e2</sub>, este redată în diagrama din fig.6.20.

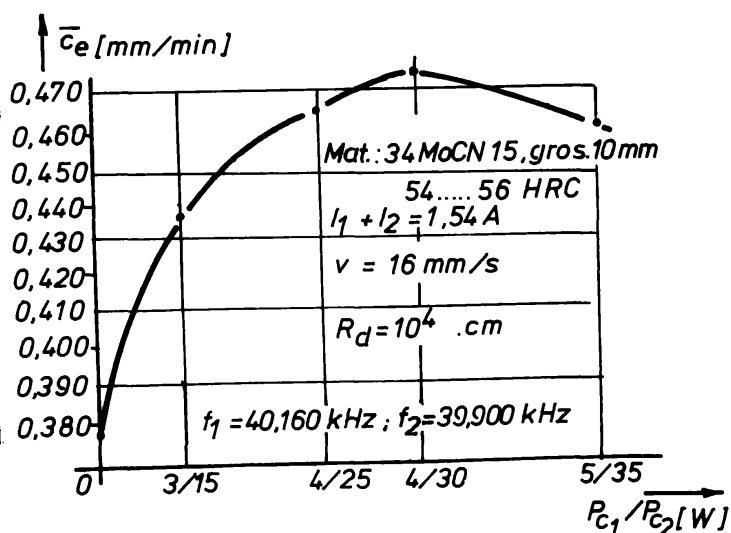


Fig. 6.20

Dependența capacității erozive medii în funcție de combinația optimă a raportului dintre puterile electrice absorbite de la rețea de generatoarele de ultrasunete

Se observă că există un optim al raportului dintre amplitudinile de vibrație a electrodului filiform în EG<sub>1</sub> și EG<sub>2</sub> a cărui rezultantă se află în legătură directă cu puterile electrice absorbite de generatoarele de ultrasunete și care conduce la un maxim de viteză de erodare  $\bar{c}_e$ ; pentru cazul experimentat, acest optim se situează în domeniul puterilor consumate 4/25...4/35 W.

Comparativ cu varianta de activare a electrodului într-un singur punct, creșterea de capacitate erozivă a prelucrării este mai pronunțată - la același nivel energetic US - cu aproximativ 11 %.

În continuare, cercetările experimentale au vizat debitarea unor tronsoane dintr-un semifabricat confecționat din C 120 tratat termic la 60...62 HRC, având grosimea variabilă în trepte de 10, 20, 40 și 80 mm și configurația

geometrică ilustrată în fig.6.21.

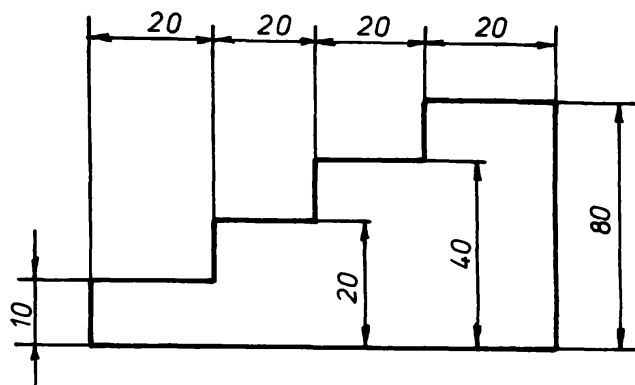


Fig. 6.21

Vedere din lateral a semifabricatului confecționat din C 120

Sensul prelucrării a fost după axa X iar parametri de regim au avut următoarele valori:

- viteza de deplasare a OT în lungul axei sale: reglabilă în trepte,  $v = 16, 25, 40$  și  $55 \text{ mm/s}$ ;

- tensiunea mecanică în electrodul filiform:

$N = 35 \text{ N}$ ;

- puterea electrică con-

sumată de generatoarele de ultrasunete:

- BM: 4 W

- BF: 30 W

- frecvența de activare US a OT:

- în BM: 40,160 kHz

- în BF: 39,900 kHz

- rigiditatea lichidului dielectric:  $R_d = 10^4 \text{ } \Omega \text{cm}$ .

Rezultatele încercărilor experimentale sunt prezentate centralizat în tabelul 6.7.

TABELUL 6.7

Parametru	Grosimea OP [mm]			
	10	20	40	80
Capacitatea erozivă medie $c_e$ [mm/min]	0,470	0,271	0,235	0,220
Curent electric de străpungere $I_1 + I_2$ [A]	1,68	2,74	6,74	13,68

Dependența vitezei de erodare  $\bar{v}_e$  și a intensității curentului electric la străpungerea lichidului dielectric  $I_1 + I_2$  în funcție de grosimea semifabricatului este reflectată în diagramele din fig.6.22.

Se remarcă o dependență aproximativ liniară între curentul de



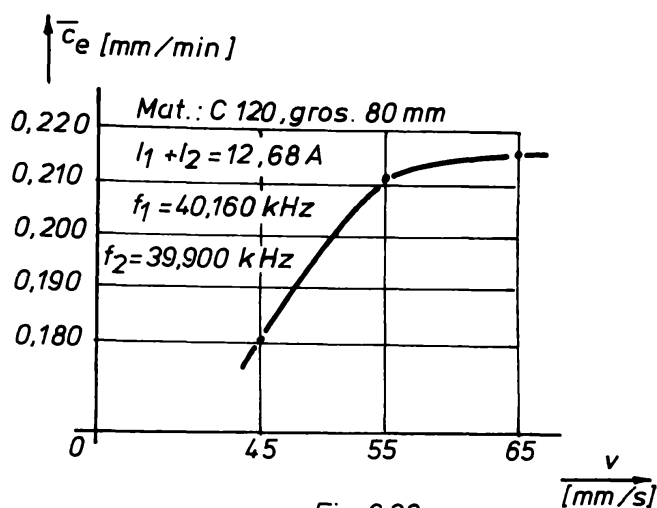


Fig. 6.23

Dependența capacității erozive medii în funcție de viteza de deplasare a electrodului filiform în lungul axei sale

Un alt grup de experimentări a vizat valorificarea posibilităților maxime de prelucrare prin EDM cu activare ultrasonică a electrodului filiform mărit intensitatea curentului electric de străpungere a lichidului dielectric până la valori ce au influențat negativ regimul de prelucrare (ruperea electrodului filiform). Au fost uzinate semifabricate după

șchema din fig. 6.19, practicându-se fante cu lungimea de 15 mm în plăci de oțel (34 MoCn 15 și C 120) tratate termic la 54...56 HRC, respectiv la 60...62 HRC și având grosimi de 10 mm. Parametri regimului de lucru au fost următorii.

- viteza de deplasare a OT în lungul axei sale:  $v = 25$  mm/s;
- tensiunea mecanică în OT:  $N = 40$  N;
- puterea electrică consumată de GUS:
  - în BM: 4 W
  - în BF: 30 W
- frecvența de activare US a OT:
  - în BM: 40,160 kHz
  - în BF: 39,900 kHz
- rigiditatea lichidului dielectric:  $R_d = 10^4$  Ohm.

Astfel, în cazul OP confecționat din 34 MoCn 15, rezultatele cercetărilor experimentale sunt prezentate în tabelul 6.9.

TABELUL 6.9

Parametru	Mod de prelucrare	Curent electric de amorsare $I_1 + I_2$ [A]				
		1,88	2,22	2,90	3,08	3,25
Capacitate erozivă medie $\bar{c}_e$ [mm/min]	Fără activare US	0,500	0,523	0,611	OT se rupe des	
	Cu activare US	0,528	0,570	0,635	0,690	0,719

Cap de lucru $\bar{g}$ [mm]	Fără ac- tivare US	0,455	0,458	0,447	-	-
	Cu acti- vare US	0,462	0,444	0,464	0,456	0,453

Variația vitezei medii de avans de erodare  $\bar{c}_e$  și a capului de lucru (fantei de tăiere)  $\bar{g}$  în funcție de intensitatea curentului electric de amorsare  $I_1 + I_2$  sunt vizualizate în diagramele din fig. 6.24.

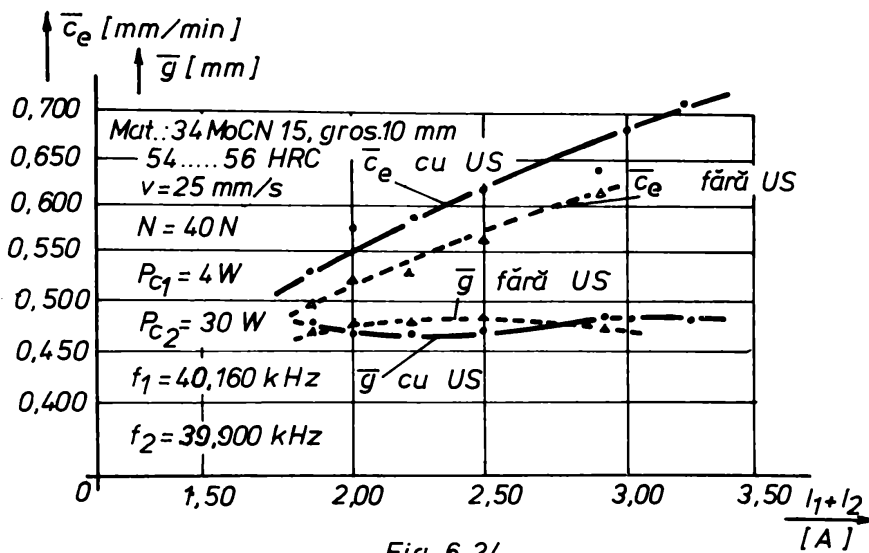


Fig. 6.24

Dependența capacității erozive și a capului de lucru mediu în funcție de intensitatea curentului de amorsare

În general, capacitatea erozivă a prelucrării este mai mare în cazul electrozudului filiform activat ultrasonic cu aproximativ 5 % față de situația clasică de prelucrare prin EDM la aceeași treaptă de curent. Oscilațiile cu frecvență US a OT permit mărirea intensității curentului de amorsare  $I_1 + I_2$ , cu cel puțin două trepte față de prelucrarea normală, astfel încât în valori absolute față de curentul maxim admis în cele două cazuri - cu sau fără vibrarea electrozudului filiform - până la ruperea mecanică a OT, capacitatea erozivă a prelucrării este mai mare cu circa 18 % în situația electrozudului filiform activat cu frecvență US.

Capul (interstițiul) de lucru  $\bar{g}$  prezintă valori sensibil egale în ambele situații și se menține aproximativ constant în domeniul de variație al curentului de străpungere a dielectricului. Această remarcă este importantă pentru tehnologii de proces și pentru programator în determinarea corecției poziției electrozudului filiform față de OP, asigurând o precizie dimensională și de formă relativ ridicată.

Studiind diagrama, se remarcă o creștere a vitezei medii de erodare  $\bar{c}_e$ , cu sau fără vibrarea OT, pe măsură ce crește intensitatea curentului de amorsare  $I_1 + I_2$ , furnizat de generatorul de impulsuri G. În

Prelucrarea semifabricatelor confecționate din C 120 a condus la obținerea unor rezultate asemănătoare cazului precedent - tabelul 6.10 - cu observația că intensitatea maximă a curentului electric de străpungere a dielectricului este inferioară cu două trepte.

TABELUL 6.10

Parametru	Mod de lucru	Curent electric de amorsare $I_1 + I_2$ [A]				
		1,54	2,05	2,56	2,73	2,91
Capacitatea medie erozivă $\bar{v}_e$ [mm/min]	Fără activare US	0,367	0,428	0,452	OT se rupe des	
	Cu activare US	0,384	0,493	0,524	0,548	0,637
Cap de lucru $\bar{g}$ [mm]	Fără activare US	0,321	0,324	0,397	-	-
	Cu activare US	0,295	0,324	0,356	0,357	0,375

În mod analog, variația vitezei medii de erodare  $\bar{v}_e$  și a capului de lucru  $\bar{g}$  este prezentată în diagramele din fig.6.25.

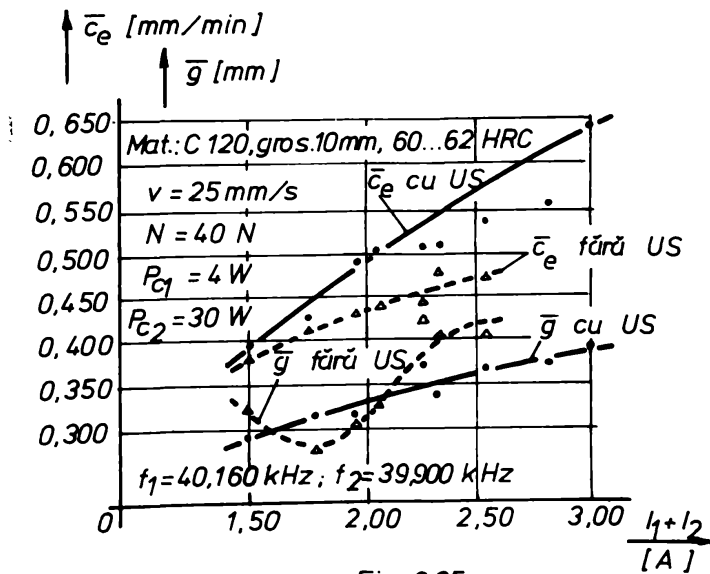


Fig. 6.25

Dependența capacității erozive și a capului de lucru mediu în funcție de intensitatea curentului de amorsare

Se observă că dispersia rezultatelor experimentale este mai mare față de situația anterioară. Totuși, se remarcă o creștere a vitezei medii de erodare  $\bar{v}_e$  proporțional cu creșterea intensității curentului de amorsare  $I_1 + I_2$  furnizat de generatorul de impulsuri de tensiune G, mai pronunțată în cazul activării cu frecvență ultrasonică a electrozudului fili-form.

În general, activarea cu frecvență ultrasonică a OT conduce la o creștere de capacitate erozivă a prelucrării cu circa 6 % față de prelucrarea EDM clasică, iar în valori absolute raportat la nivelul maxim de curent de străpungere a lichidului dielectric  $I_1 + I_2$ , permis de oscilațiile electrodului filiform, cu aproape 14 %.

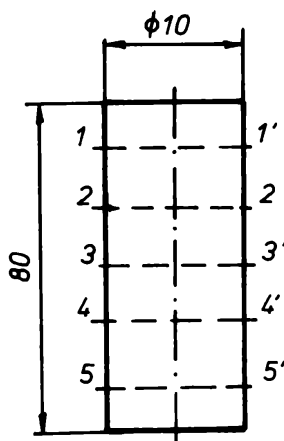
În cazul prelucrării prin electroeroziune cu OT vibrat cu frecvență ultrasonică, capul de lucru  $\bar{q}$  crește proporțional cu creșterea curentului de amorțare  $I_1 + I_2$ , având tendința de stabilitate în jurul valorii de 0,360 mm în domeniul 2,50...3,00 A. În schimb, fără activarea US a electrodului, fanta de tăiere  $\bar{q}$  prezintă un minim la 1,75 A și are tendința de stabilitate între 2,22...2,56 A. Acest lucru influențează negativ precizia dimensională și de formă a piesei prelucrate.

### 6.3.2.2 Rezultate experimentale privind precizia dimensională, de formă și calitatea suprafeței OP

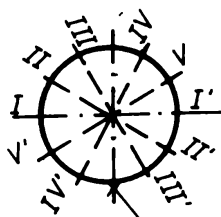
#### a) Precizia dimensională și de formă

În cursul acestor încercări experimentale au fost debitate OP cilindrice din semifabricate confecționate din plăci de oțel C 120 având duritatea 60...62 HRC și grosimea de 80 mm. Configurația geometrică a piesei prelucrate

este ilustrată în fig.6.26.



1-1', 2-2', ..., 5-5' - planuri transversale  
I-I', II-II', ..., V-V' - secțiuni longitudinale



zona de intrare/ieșire a electrodului filiform

Fig. 6.26

Metodologia de determinare a abaterilor dimensionale și de formă ale semifabricatului (piesei)

Măsurătorile au fost efectuate pe mașina de măsurat lungimi cu valoarea diviziunii de 0,001 mm în cinci planuri transversale notate 1 - 1', 2 - 2' ... 5 - 5', respectiv în fiecare plan transversal în câte cinci puncte corespunzător secțiunilor longitudinale I - I', II - II' ... V - V'. Mașina de măsurat lungimi a fost reglată la valoarea nominală de 10 mm, astfel încât:

- abaterea de la dimensiunea nominală se definește ca și diferența maximă dintre dimensiuni-

nile extreme măsurate în oricare din planurile 1 - 1', 2 - 2' ... 5 - 5', respectiv secțiunile I - I', II - II' ... V - V';

- abaterea de la circularitate reprezintă diferența maximă dintre valorile extreme măsurate într-unul din planurile 1 - 1', 2 - 2' ... 5 - 5' după secțiunile I - I', II - II' ... V - V';

- abaterea de la cilindricitate se determină prin însumarea abaterii de la circularitate cu abaterea maximă de la rectilinitate determinată prin semidiferența valorilor extreme măsurate în aceeași secțiune I - I', II - II' ... V - V' după planurile 1 - 1', 2 - 2' ... 5 - 5'.

Parametri regimului de lucru au fost următorii:

- viteza de deplasare a OT în lungul axei sale:  $v = 55 \text{ mm/s}$ ;
- tensiunea mecanică în OT:  $N = 40 \text{ N}$ ;
- intensitatea curentului electric de străpungere a lichidului dielectric:  $I_1 + I_2 = 12,68 \text{ A}$ ;
- puterea electrică consumată de GUS:
  - în BM: 4 W
  - în BF: 30 W
- frecvența de activare US a OT:
  - în BM: 40,160 KHZ
  - în BF: 39,900 KHZ
- rigiditatea lichidului dielectric:  $R_2 = 10^4 \text{ Ohm}$ .

Rezultatele încercărilor experimentale sunt prezentate sintetizat în tabelul 6.11.

TABELUL 6.11

Parametru	Fara activare US a OT					Cu activare US a OT				
	Nr. probei					Nr. probei				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Precizia dimensionă [mm]	$\phi 0,045$ -0,110	$\phi 0,068$ -0,138	$\phi 0,054$ -0,122	$\phi 0,051$ -0,118	$\phi 0,060$ -0,128	$\phi 0,008$ -0,036	$\phi 0,004$ -0,031	$\phi 0,010$ -0,036	$\phi 0,005$ -0,028	$\phi 0,007$ -0,034
Abaterea de la circularitate [mm]	0,055	0,060	0,062	0,058	0,060	0,027	0,022	0,024	0,021	0,026
Abaterea de la cilindricitate [mm]	0,065	0,072	0,075	0,069	0,071	0,031	0,028	0,029	0,027	0,029

Se remarcă o îmbunătățire substanțială a preciziei dimensionale și de formă la prelucrarea prin electroeroziune cu electrod filiform activat ultrasonic față de prelucrarea obișnuită, fapt explicabil prin:

- păstrarea unei poziții relative riguros constante a electrodului filiform vibrat cu frecvență US față de OP și contracararea influenței negative a câmpului



electromagnetic dintre OT și OP datorat descărcărilor electrice în impuls;

- îmbunătățirea condițiilor de evacuare a particulelor erodate din interstițiul tehnologic;

- reâmprospătarea rapidă a lichidului dielectric și readucerea lui la proprietățile avute inițial.

Dispersia dimensiunilor măsurate este cu mult mai redusă în cazul electrodului filiform vibrat cu frecvență US, ajungând de la un câmp de împrăștiere de 0,093 mm, la 0,032 mm, deci o diminuare de aproape trei ori; în același timp, abaterile de formă - circularitate, cilindricitate - s-au redus de peste două ori. Important de subliniat este faptul că în funcție de programul și corecțiile prescrise prin NUMEROM 455 AC pentru mașina ELEROFIL-10, vibrarea cu frecvență ultrasonică a electrodului filiform asigură o apropiere considerabilă a densității de probabilitate și a câmpului de toleranță (împrăștiere) față de valoarea nominală  $\Phi 10 h7$ . Deasemenea, se consideră că prin corectarea impreciziei de formă a OP cu OT vibrat se determină direct mărimea toleranței obținute pentru lotul de piese uzinate.

#### b) Calitatea suprafeței

Măsurările privind rugozitatea suprafeței au fost efectuate pe probe debitate transversal dintr-un semifabricat având configurația geometrică prezentată în fig.6.21, confecționat din oțel C 120 tratat termic la 60...62 HRC. Parametri regimului de lucru au fost următorii:

- viteza de deplasare a electrodului filiform în lungul axei sale: reglabilă în trepte corespunzător fiecărei grosimi a OP,  $v = 16, 25, 40$  și  $55$  mm/s;

- tensiunea mecanică în electrodul filiform:  $N = 40$  N;

- puterea electrică consumată de generatoarele de ultrasunete:

- în BM: 4 W

- în BF: 30 W

- frecvența de activare ultrasonică a electrodului filiform:

- în BM: 40,160 kHz

- în BF: 39,900 kHz

- rigiditatea lichidului dielectric:  $R_d = 10^4 \Omega \text{cm}$ .

Prin cercetările experimentale întreprinse s-a urmărit stabilirea unei corelații între parametrul de rugozitate a suprafeței  $R_a$  și intensitatea curentului electric de amorsare a descărcărilor electrice în impuls  $I_1 + I_2$ . Rezultatele obținute reprezentând media aritmetică a măsurărilor efectuate pe câte cinci probe distincte consecutive sunt prezentate sintetic în tabelul 6.12.

Dependența dintre rugozitatea suprafeței  $R_a$  și regimul de lucru corespunzător fiecărei grosimi de semifabricat, reprezentat prin intensitatea curentului de străpungere a lichidului dielectric  $I_1 + I_2$ , este ilustrată în diagrama

TABELUL 6.12

Parametru	Mod de lucru	Intensitatea curentului de amorsare $I_1 + I_2$ [A]			
		1,86	2,74	8,74	13,66
Rugozitatea suprafeței $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Fără activare US	1,94	2,35	3,08	3,62
	Cu activare US	0,81	0,86	0,96	1,02

din fig.6.27.

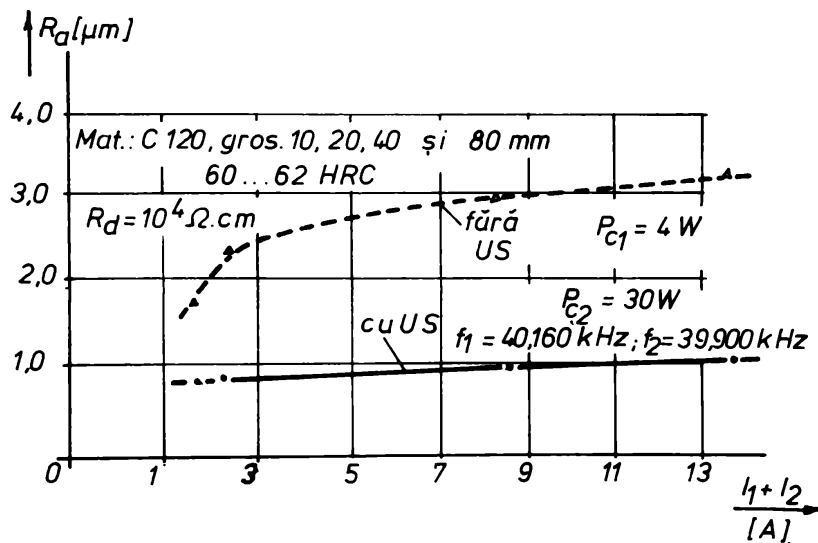


Fig. 6.27

Variația rugozității suprafeței OP în funcție de intensitatea curentului electric de amorsare

Se observă că în situația activării ultrasonice a electrodului filiform se obțin rugozități scăzute ale suprafeței OP având o dispersie foarte mică a câmpului de împrăștiere între 0,8...1,0  $\mu\text{m}$  indiferent de mărimea intensității curentului electric de amorsare. Acest fenomen se explică prin efectul suplimentar de prelucrare și netezire a suprafeței OP obținută cu microcratere rezultate în urma descărcărilor electrice în impuls, datorat abraziunii mecanice a particulelor erodate aflate în câmp ultrasonic înainte de a fi evacuate din spațiul de lucru. Se observă totodată că influența intensității curentului  $I_1 + I_2$ , respectiv a grosimii semifabricatului, este nesemnificativă față de mărimea parametrului  $R_a$ .

În cazul prelucrării prin electroeroziune cu electrod neactivat, valorile rugozității suprafeței OP sunt mult mai mari, fiind cuprinse între

1,94...3,62  $\mu\text{m}$ . Există o dependență direct proporțională între mărimea intensității curentului electric  $I_1 + I_2$  sau grosimea OP și parametru  $R_s$ , cu atât mai evidentă cu cât variațiile de curent  $I_1 + I_2$  sunt la valori mai scăzute.

### 6.3.3 Concluzii privind rezultatele cercetărilor experimentale întreprinse de autor

Cercetările experimentale efectuate pe semifabricate confecționate din plăci de oțel din 34 MoCN 15 și C 120 având grosimi cuprinse între 10 și 80 mm au evidențiat următoarele concluzii:

a) Variantele de activare cu frecvență ultrasonică a electrodului filiform -  $f = 40 \text{ kHz}$  - într-unul sau în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu, după o direcție în sensul sau perpendiculară pe direcția de avans de lucru, au condus la o creștere de capacitate erozivă a prelucrării cu circa 6...20 %. Consider aceste rezultate neconcludente în ceea ce privește influența energiei ultrasonice asupra procesului de prelucrare prin EDM cu electrod filiform, cu atât mai mult cu cât nu a fost realizată o concordanță deplină între tipul de CAU - cilindric în trepte -, factorul de amplificare a amplitudinii de vibrație  $k_s$  și puterea electrică furnizată de GUS pe de o parte, parametri de proces tehnologic - viteza de deplasare în lungul axei  $v$  și de întindere  $N$  a electrodului, intensitatea curentului electric de străpungere a dielectricului  $I_1 + I_2$  etc. - pe de altă parte.

b) Dintre variantele experimentate, s-au identificat combinații între parametri tehnologici și parametri specifici ultrasunetelor care au condus la creșteri ale vitezei de avans de erodare  $\bar{v}_e$  cu 14...18 % față de prelucrarea prin EDM cu electrod filiform neactivat ultrasonic. Mai mult, activarea cu frecvență ultrasonică a OT a permis în toate cazurile experimentate creșterea intensității curentului electric de amorsare  $I_1 + I_2$  a descărcării electrice în impuls cu cel puțin două trepte de curent față de prelucrarea normală prin electroeroziune, fapt confirmat de ruperea repetată a electrodului datorită intensității  $I_1 + I_2$ .

c) Energia ultrasonică transmisă electrodului și implicit, mediului de lucru dintre OT și OP, a permis desfășurarea procesului de prelucrare cu tensiuni mecanice în OT mici, în jur de 20. Prin urmare, electrodul filiform nu este solicitat mecanic, deci nu este supus la alungiri și ruperi datorate uzării lui, fapt ce afectează pozitiv precizia prelucrării; pe de altă parte, se poate lucra cu intensități ale curentului de amorsare relativ mari întrucât uzura electrodului este compensată de tensiunea mecanică  $N$  mai mică.

d) Deasemenea, energia ultrasunetelor transmisă electrodului filiform anihilează total sau parțial efectul de câmp electromagnetic dintre OT și OP

materializat prin atragerea electrozudului către semifabricat, evitând în acest fel apariția scurtcircuitelor cu efecte negative asupra productivității, preciziei și calității suprafeței prelucrate.

e) În schimb, activarea cu ultrasunete a electrozudului filiform a condus la o creștere spectaculoasă a preciziei dimensionale și de formă - abaterea de la circularitate și de la cilindricitate -, reducându-se considerabil dispersia câmpului de împrăștiere a variabilelor aleatoare și apropiind densitatea de maximă probabilitate de cotă nominală prescrisă fără a se mai necesita o corecție suplimentară prin calculator a traiectoriei electrozudului filiform.

f) În același timp, se remarcă o îmbunătățire a calității suprafeței OP la prelucrarea cu electrozud filiform vibrat cu frecvență ultrasonică, comparabilă cu cea a unei operații de finisare prin rectificare, fără a se modifica parametri tehnologici de lucru; dimpotrivă, rezultatele au fost obținute în condiții de productivitate maximă a prelucrării prin electroeroziune cu electrozud filiform activat ultrasonic.

g) Rezultatele obținute confirmă modelul propus de autor la subcap.3.4 în ceea ce privește intensificarea fenomenelor ce însoțesc un act de electroeroziune elementar în câmp ultrasonic - apariția mai facilă a fazei gazoase și scurtarea timpului aleator de pregătire a descărcării, accentuarea efectelor Skin și Pinch, deionizarea mai rapidă a spațiului de lucru și refacerea rigidității sale dielectrice într-un interval de timp mai scurt, prelevarea de noi particole printr-o activare energetică locală suplimentară a stratului superficial conjugat cu creșterea intensității forțelor ce conduc la expulzarea materialului activat - afectând în principal viteza de erodare și rugozitatea suprafeței prelucrate.

h) Mecanismul propus și dezvoltat de autor la subcap.5.3 evidențiază influența descărcărilor electrice în impuls asupra caracteristicilor de prelucrare, îndeosebi a câmpului electromagnetic dintre OT și OP, fapt confirmat de rezultatele cercetărilor experimentale ce au vizat cu preponderență precizia dimensională și de formă.

## CAPITOLUL 7. CONCLUZII FINALE SI CONTRIBUTELE ORIGINALE ALE AUTORULUI

### 7.1 CONCLUZII FINALE

Performanțele ce vizează creșterea parametrului de capacitate erozivă sau viteză de avans de erodare obținute pe plan mondial de cercetători precum M. K. Mișkevici - de circa 2...2,5 ori - sau K. Inoue - de circa 1,8...2,3 ori - sunt în concordanță cu construcția generatoarelor de impulsuri RC din primele generații; în prezent, generatoarele de impulsuri de tensiune performante realizează constant viteze de avans de erodare ridicate fără o activare ultrasonică a electrodului filiform, ajungându-se frecvent la valori de 120...160 mm<sup>2</sup>/min. Din acest motiv mărirea capacității erozive de prelevare a materialului de adaos a semifabricatului cu actualele generatoare de impulsuri de tensiune pe mașini de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform activat ultrasonic este relativ redusă, autorul nedepășind în cursul cercetărilor experimentale efectuate pragul a 20 %. Studiul literaturii de specialitate confirmă faptul că în prezent nu se realizează mașini de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform activat cu frecvență ultrasonică, ci se încearcă o echipare corespunzătoare a acestor mașini cu dispozitive adecvate, printre care și cele ce asigură o vibrație cu ultrasunete a electrodului, pentru a permite extinderea posibilităților și domeniului de utilitate al acestora.

Prin analogie cu studiul fenomenelor și proceselor ce însoțesc efectele cavitaționale în medii lichide, autorul consideră că frecvența de rezonanță de 40 kHz asigurată de convertoarele electroacustice în timpul cercetărilor experimentale cât și cele superioare acesteia, conduc cu preponderență la îmbunătățirea preciziei dimensionale și de formă a piesei finite și mai puțin la creșterea capacității erozive unde se pretează frecvențe mai joase, în jur de 20...27 kHz.

Drept urmare, autorul consideră oportună continuarea cercetărilor experimentale și aprofundarea acestora în domeniul frecvențelor ultrasonice mai scăzute, de pildă 20...22 kHz, utilizând deasemenea transductoare piezoelectrice ceramice tip PZT datorită fiabilității și randamentului superior pe care îi asigură comparativ cu transductoarele magnetostrictive, cât și vibrarea electrodului filiform cu amplitudini mai mici de oscilație.

În aceeași ordine de idei, autorul consideră relevant corelarea în cursul unor cercetări viitoare a frecvenței de rezonanță a convertoarelor electroacustice, îndeosebi a parametrilor acustici specifici undelor flexurale, cu frecvența impulsurilor de tensiune a descărcărilor electrice între electrozi.

## 7.2 CONTRIBUTII ORIGINALE ALE LUCRĂRII

### 7.2.1 Contribuții teoretice

- s-au modelat bazele fizico-chimice și fenomenologice ale prelucrării prin electroeroziune în câmp ultrasonic, propunându-se un mecanism original de prelevare și îndepărtare a particulelor erodate din interstițiul tehnologic;

- s-a compatibilizat modelul general de transmitere a undelor ultrasonice prin sisteme materiale oarecare, cunoscut în literatura de specialitate sub denumirea de ecuația lui Webster, cu modelul particular de propagare a undelor printr-un mediu lichid conceput și dezvoltat de Gogu Constantinescu în teoria sonicității;

- s-a introdus conceptul de "undă flexurală" ca o măsură a modului de vibrație a electrodului filiform în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu cu frecvențe și amplitudini de oscilație diferite;

- s-a conceput un algoritm de calcul pentru concentratoarele adaptoare de undă cilindrice în trepte având o secțiune circulară și o suprafață variabilă

- conică sau catenoidală - la trecerea între tronsoane;

- s-a studiat și dezvoltat tehnica de calcul și proiectare a concentratoarelor adaptoare de undă de secțiune circulară și profil după funcția Bessel;

- s-a stabilit un algoritm de calcul și proiectare a concentratoarelor adaptoare de undă complexe (compuse) precum și a difuzoarelor și s-a definitivat tehnica de programare a acestora pe calculator utilizând metoda diferențelor finite sau de determinare a legii de variație a profilului concentratorului/difuzorului din condițiile inițiale și/sau la limită;

- s-a analizat și sintetizat influența factorilor perturbatori - coeficientul de amplificare a amplitudinii de vibrație, masa și dimensiunile sculei, masa și forma concentratorului - asupra lungimii și frecvenței de rezonanță a concentratoarelor adaptoare de undă simple;

- s-a modelat matematic mecanismul de activare ultrasonică a electrodului filiform, într-un punct sau în două puncte după două direcții perpendiculare în spațiu, stabilind ecuațiile de mișcare ale firului pentru fiecare caz în parte, amplitudinea de vibrație și traiectoriile pe care le are acesta în spațiu la un

moment dat;

- s-a evidențiat și demonstrat influența descărcărilor electrice în impuls asupra caracteristicilor de prelucrare și s-au optimizat parametri de regim de lucru în câmp ultrasonic pentru a contracara efectul negativ al câmpului electromagnetic dintre electrozi asupra preciziei dimensionale.

### 7.2.2 Contribuții în domeniul aplicațiilor practice și industriale

- s-a elaborat un algoritm de calcul și proiectare a concentratoarelor adaptoare de undă și difuzoarelor utilizând metoda diferențelor finite cu aplicații pe calculator;

- s-a elaborat un algoritm de calcul și proiectare a concentratoarelor adaptoare de undă și difuzoarelor determinând legea de variație a profilului acestora, deasemenea cu aplicații pe calculator;

- s-au conceput și proiectat dispozitivele de activare cu ultrasunete a electrodului filiform într-un punct s-au în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu (soluție tehnică originală brevetată) aplicabile în producție;

- s-a conceput și proiectat dispozitivul de recondiționare a electrodului filiform (soluție tehnică originală brevetată) aplicabil industrial;

- s-a conceput și proiectat dispozitivul de înfășurare și bobinare a electrodului filiform pentru mașinile de prelucrare prin electroeroziune (soluție tehnică originală brevetată) aplicabil industrial;

- s-a conceput și proiectat instalația experimentală astfel:

- s-a proiectat și dimensionat convertorul electroacustic, adică ansamblul concentrator adaptor de undă - transductor;

- s-a dimensionat distanța dintre elementele de ghidare și alimentare cu energie electrică a electrodului filiform în concordanță cu construcția subansamblelor "braț fix" și "braț mobil" din alcătuirea mașinii ELEROFIL-10 pe care s-au derulat cercetările experimentale;

- s-a stabilit forma și dimensiunile elementelor de ghidare și alimentare cu energie electrică a electrodului filiform;

- s-au re-proiectat subansamblele "braț fix" și "braț mobil" pentru a cuprinde convertoarele electroacustice într-o structură interschimbabilă pe mașina ELEROFIL-10;

- s-a conceput și realizat în colectiv generatoarele de ultrasunete într-o structură autooscilantă;

- s-a conceput și aplicat o metodologie originală de măsurare a abaterilor de formă a pieselor prelucrate prin electroeroziune cu electrod filiform activat

ultrasonic pe mașina de măsurat lungimi cu o coordonată.

### 7.2.3 Contribuții în domeniul cercetării și încercărilor experimentale

- s-a conceput modelul activării cu ultrasunete a electrodului filiform într-un punct sau în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu;

- s-a stabilit domeniul optim de frecvențe ultrasonice și amplitudini de vibrație care asigură o îmbunătățire a performanțelor utilajelor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform;

- s-a elaborat un ghid tehnologic de prelucrare a unor oțeluri aliate - 34 MoCN 15 și C 120 - tratate termic, activând electrodul filiform într-un singur punct - în brațul fix sau în brațul mobil după o direcție paralelă sau perpendiculară pe direcția de avans de lucru - sau în două puncte după două direcții perpendiculare în spațiu;

- s-au identificat parametri tehnologici care au condus la obținerea unor performanțe superioare în ceea ce privește capacitatea erozivă, precizia dimensională și rugozitatea suprafeței: amplitudinea de vibrație a electrodului filiform, intensitatea curentului electric de amorsare a descărcărilor electrice în impuls, viteza de deplasare a electrodului filiform în lungul axei sale, tensiunea mecanică de întindere a electrodului filiform;

- s-au evidențiat parametri care au influențat mărimea capului de lucru (interstițiul tehnologic) și s-au definit condițiile de stabilitate cu efecte asupra preciziei dimensionale și de formă.



## BIBLIOGRAFIE

1. Achimescu N. - Sistemul de acțiune la prelucrarea prin eroziune electrică, a IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.41-50.
2. Achimescu N. - Studiu comparativ al generării suprafețelor prin eroziune electrică cu și fără influența proceselor de evacuare, a IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.61-66
3. Amza Gh. - Contribuții la studiul fenomenelor de deformare plastică în câmp ultrasonor, Teză de doctorat, Institutul Politehnic București, 1979
4. Amza Gh. - Sisteme ultraacustice, București, Editura Tehnică, Barb D. 1988  
Constantinescu F.
5. Astașev V.K. - Dispozitiv pentru reglarea automată a frecvenței generatoarelor de ultrasunete, Brevet, URSS, nr.483148/31.08.1970
6. Astașev V.K. - Eficiența acordării la rezonanță a sistemelor de Babîtkii V.J. prelucrare cu ultrasunete, Mașinovedenie, URSS, nr.6, 1981, p.3-9
7. Atanasiu N. - Calculul și proiectarea profilului optim al concentratoarelor ultrasonice, Construcții de Mașini, România, 29, nr.2-3, 1977, p.137-142
8. Badea C-tin - Contribuții la îmbunătățirea parametrilor Isar Al. generatoarelor de ultrasunete, a IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.449-454
9. Badea C-tin - Generator de impulsuri pentru mașini de electroeroziune cu electrod filiform, a IV-a Conferință Stoica F. Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, Mișcă T. 1983, p.137-142  
Oprîșiu R.
10. Bajous P. - O nouă metodă pentru determinarea aptitudinilor de deformare în sistemele ultrasonice de încercare la oboseală, Ultrasonics, Marea Britanie, 18, nr.2, 1980, p.61-66

11. Bakuto I.A. - O zavisimosti elektroerozionovo effekta at elektriceskovo rejima rozriada, Zbarnik mancinih FTI AM, Moscova, nr.5, 1959
12. Barbu I. - Elemente de transfer și adaptare ultrasonică pentru  
Gal C. îmbinarea maselor plastice, Tehnic-2000, Timișoara,  
Isar Al. ediția a V-a, 1986  
Pop. Gh.
13. Bădărău E. - Ultraacustica fizică și tehnică, București, Editura  
Grumăzescu M. Tehnică, 1967
14. Bindal V.N. - Măsurarea energiei ultrasonore prin metoda presiunii  
de radiații cu traiectoria fixă, Acustika, Germania, 46,  
nr.2, 1980, p.223-225
15. Buzdugan Gh. - Vibrațiile sistemelor mecanice, București, Editura  
Fetcu L. Academiei, 1975  
Radeș M.
16. Buzdugan Gh. - Măsurarea vibrațiilor, București, Editura Academiei,  
Mihăilescu E. 1979  
Radeș M.
17. Chivers R.C. - Fluctuațiile undelor acustice în medii neomogene,  
Journal of Physics-D Applied Physics, Marea Britanie, 13,  
nr.11, 1980, p.1997-2003
18. Cleșiu S.R. - Studiul și tendințele de dezvoltare a sudării cu  
ultrasunete a materialelor plastice și a metalelor,  
București, Editura OID-ICM, 1989
19. Cleșiu S.R. - Considerații privind utilizarea aliajului AlCu4Mg1,5Mn  
în construcția sonotrodelor exponențiale, Caietul de  
Acustică, Timișoara, Editura Academiei, nr.22, 1986
20. Cleșiu S.R. - Contribuții privitoare la utilizarea echipamentelor  
Ciocani I. de sudare cu ultrasunete tip ESU-150/40 P și 150/20 P  
Nani V. la sudarea materialelor plastice, Caietul de Acustică,  
București, Editura Academiei, nr.25, 1989, p.85-88
21. Constantinescu G. - Teoria sonicității, București, Editura Academiei,  
ediția a II-a, 1985
22. Crecraft D. - Vizualizarea undelor ultrasonore emise de  
traductoare piezoelectrice PVF<sub>2</sub>, Electronics Letters,  
Marea Britanie, 18, nr.1, 1982, p.16-17
23. Van Dijck P.J. - Some results of physical research in EDM, ISEM 4,  
Bratislava, 1974
24. Dragomir E. - Stabilirea unui program de calcul privind mecanismul

- prelevării de metal la prelucrarea prin eroziune electrică,  
a IV-a Conferință Națională de Tehnologii  
Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.69-74
25. Drăgan O. - Ultrasunete de mari energii, București, Editura  
Iancu C. Academiei, 1983  
Amza Gh.  
Drimer D.  
Isarie I.
26. Drăghici G. - Cercetări privind construcția utilajului și  
stabilirea tehnologiei de prelucrare a microalezajelor prin  
eroziune electrică, Teză de doctorat, Institutul Politehnic  
"Traian Vuia" Timișoara, 1980
27. Drews W.D. - Pulverizarea lichidului cu ultrasunete, *Elektronik*,  
Germania, 28, nr,10, 1979, p.83-86
28. Ensmiger D. - Ultrasonics, Marea Britanie, 18, nr.6, 1980, p.123-147
29. Gal C. - Proiectarea asistată de calculator a ghidurilor de undă  
Muntean N. pentru ultrasunete, *Caletul de Acustică*, București,  
Editura Academiei, nr.24, 1986
30. Gherșgal D.A. - Aparate cu ultrasunete, București, Editura Tehnică,  
Fridman V.M. 1962
31. Gogoșe I. - Contribuții la realizarea primei mașini românești  
Săndulescu G. de prelucrat prin electroeroziune cu electrod filiform  
Jitianu Gh. și comandă numerică, sistemul ELEROFIL-10, Casa  
Fânaru N. Oamenilor de Știință și Tehnică pentru Tineret,  
Andreescu M. Brașov, 1980-1981
32. Green R.E. - Efectul microstructurilor metalice asupra atenuării  
ultrasonice, *Journal of Metals*, SUA, 32, nr.8, 1980, p.35-36
33. Hansson I. - Dinamica golurilor în eroziunea ultrasonică  
(vibratorie) prin cavitație, *Journal of Applied Physics*,  
SUA, 51, nr.9, 1980, p.4651-4658
34. Higgins F.P. - Vizualizare interferometrică optică și compunerea  
computerizată a câmpului ultrasonic, *Journal of the  
Acoustical Society of America*, SUA, 68, nr.4, 1980, p.1169  
-1176
35. Iclănzan T. - Probleme ale sistematizării tehnice în aplicațiile  
ultrasunetelor în tehnologie, *Caletul de Acustică*,  
Timișoara, Editura Academiei, nr.22, 1986
36. Iclănzan T. - Tehnologii și echipamente cu ultrasunete, *Indrumător  
pentru lucrări de laborator*, Universitatea Tehnică,

- Timișoara, 1993
37. Inoue K. - Concentrator de oscilații ultrasonice, Brevet, Japonia, nr.56-38163/05.09.1979
  38. Inoue K. - Concentrator de ultrasunete, Brevet, Japonia, nr.56-38164/07.09.1979
  39. Inoue K. - Procédé et dispositif pour l'usinage par électroérosion avec un fil-électrode vibrant, Brevet, Franța, nr.2 350 919/07.10.1979
  40. Isar Al. - Contribuții la proiectarea concentratoarelor de  
Vologencu C. ultrasunete, Tehnic-2000, Timișoara, ediția a III-a, 1984
  41. Isar D. - Proiectarea asistată de calculator a dispozitivelor de  
Isar Al. omogenizare în plan orizontal a distribuției câmpului  
Morun C. acustic în băile de curățire cu ultrasunete, Caietul de  
Acustică, Timișoara, Editura Academiei, nr.22, 1986
  42. Kanderer H. - Nightlinears Meckanik, Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1958
  43. Kazanțev V.A. - The mechanism of ultrasonic cutting, Ultrasonics,  
Rosenberg L.D. vol.3, SUA, oct.-dec. 1965
  44. Marinescu I. - Unele aspecte privind tăierea cu fir pe mașinile de  
Gavrilaș I. prelucrare prin electroeroziune de copiere, a IV-a  
Mihai P. Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale,  
Marinescu R. Timișoara, 1983, p.143-146  
Nieszer M.
  45. Markov A.I. - A study of the ultrasonics diamond drilling of  
Ustinov I.D. nonmetallic materials, Industrial Diamond Review, Marea  
Britanie, 1972, p.97-99
  46. Merkulov L.C. - Raschet ultrazvukovuykh kontsentratorov,  
Akustichskiy Zhurnal, Moscova, nr.3, Tom III, 1957, p.120-238
  47. Mori M. - Studiu fundamental privind prelucrarea ultrasonică cu  
laser, cu un laser cu CO<sub>2</sub>, Bulletin of the Japan Society of  
Mechanical Engineering, Japonia, 15, nr.1, mar.1981, p.53-54
  48. Mironoff N.L. - Thermal effects of erosive pulses, ISEM 5, Wolfsberg,  
1977
  49. Mironoff N.L. - Introduction à l'étude de l'électroérosion, Editura  
Microtehnica, Elveția, 1970
  50. Mițkevici M.K. - Ob elektroerozionnom effekte na vibrinuischih  
elektrodah, Fizicheskie osnovi elektroiskrovoi obrabotki  
materiallov, Moscova, Editura Nauka, 1966

51. Nani V. - Preocupări privind asimilarea și diversificarea echipamentelor cu ultrasunete la Electrotimiș, Caietul de Acustică, Timișoara, Editura Academiei, nr.22, 1986, p.55-58
52. Nani V. - Realizări, preocupări și perspective privind utilizarea ultrasunetelor în industrie, Tehnic-2000, Timișoara, ediția a III-a, 1988, p.228-231
53. Nani V. - Unele constatări privind influența ultrasunetelor asupra amorșării descărcărilor electrice în impuls la prelucrarea prin electroeroziune, Caietul de Acustică, București, Editura Academiei, nr.26, 1990, p.49-52
54. Nani V. - Efecte fizico-chimice într-un mediu de lucru aflat în câmp ultrasonic la prelucrarea prin electroeroziune, Caietul de Acustică, București, Editura Academiei, nr.26, 1990, p.53-56
55. Nani V. - Aprecieri cantitative și calitative asupra gradului de curățire la curățirea cu ultrasunete, Caietul de Acustică, București, Editura Academiei, nr.26, 1990, p.57-60
56. Nani V. - Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă a sistemelor acustice rezonante, Referat 1, Timișoara, mart. 1991
57. Nani V. - L'étude pour la détermination des dimensions aux concentrateurs cylindriques en échelons ayant une surface conique au passage parmi les tronçons, Buletinul științific al Universității Tehnice, Timișoara, Tom 36(50), 1991
58. Nani V. - L'étude des concentrateurs cylindriques en échelons ayant une surface cathénoïdale au passage parmi les tronçons, Buletinul științific al Universității Tehnice, Timișoara, Tom 36(50), 1991
59. Nani V. - Studiul, sinteza și definirea obiectivelor și strategiei de cercetare pe baza documentației și experienței tehnologice existente în domeniul proceselor electroerozive activate cu ultrasunete, Referat 2, Timișoara, sept. 1991
60. Nani V. - Modalități de activare cu ultrasunete a electrozodului filiform utilizat la prelucrarea prin electroeroziune, Caietul de Acustică, București, Editura Academiei, nr.28,

- 1992
61. Nani V. - Activarea ultrasonică într-un punct a electrodului filiform utilizat la prelucrarea prin electroeroziune, Zilele Academice Timișene, a VII-a Conferință de vibrații mecanice, Timișoara, 1993, p.381-386
62. Nani V. - Activarea ultrasonică în două puncte după două direcții rectangulare în spațiu a electrodului filiform utilizat la prelucrarea prin electroeroziune, Zilele Academice Timișene, a VII-a Conferință de vibrații mecanice, Timișoara, 1993, p.387-392
63. Nani V. - Des considerations sur les mécanismes pour la réfection par EDM avec électrode filiforme activé par ultra-sons, Buletinul științific al Universității, Oradea, 1993, p.51-54
64. Nani V. - Des contributions sur les modalités pour l'activation US de l'électrode filiforme à la réfection par EDM, Buletinul științific al Universității, Oradea, 1993, p.55-64
65. Nani V. - Cercetări teoretice și experimentale asupra proceselor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform activate cu ultrasunete, Referat 3, Timișoara, oct.1994
66. Nani V. - Procedeu și instalație pentru recondiționarea  
Dineș M. electrodului filiform la mașini de prelucrat prin electroeroziune, Brevet, România, nr.90671/11.02.1985
67. Nani V. - Dispozitiv de dute-vino pentru mașini de bobinat,  
Dineș M. Brevet, România, nr.96015/13.02.1987
68. Nani V. - Studiul posibilităților de tipizare a echipamentelor de  
Cleșiu S.R. curățire cu ultrasunete imersibile, Caietul de Acustică, București, Editura Academiei, nr.25, 1989
69. Nani V. - L'étude des concentrateurs de section variable et  
Horak C. profil après la fonction Bessel, Buletinul științific al Universității, Oradea, 1992, p.103-106
70. Nani V. - Le calcul des concentrateurs cylindriques en échelons  
Iclănzan T. ayant une section variable au passage parmi les tronçons, Buletinul științific al Universității Tehnice, Tom 36(50), 1991
71. Nani V. - L'étude de l'influence du facteur d'amplification sur la  
Iclănzan T. longueur et sur la fréquence de resonance, Buletinul științific al Universității, Oradea, 1992, p.107-112  
Horak C.

72. Nani V. - Considerații asupra mecanismelor de prelucrare prin  
Iclănzan T. electroeroziune cu electrod activat cu ultrasunete,  
Caietul de Acustică, București, Editura Academiei, nr.28,  
1992
73. Nani V. - Des modalités pour d'activation US de l'électrode  
Iclănzan T. filiforme à la réfection par EDM, Buletinul științific  
Horak C. al Universității Tehnice, Timișoara, Tom 38(52), 1993
74. Nani V. - Recherches théoriques et experimentales au sujet du  
Iclănzan T. processus de réfection à l'aide de EDM avec électrode  
filiforme active par ultra-sons, 10<sup>th</sup> International "FASE"  
Symposium, București, Academia Română, 1993
75. Nani V. - Influența descărcărilor electrice în impuls asupra  
Iclănzan T. caracteristicilor de prelucrare la prelucrarea prin  
electroeroziune cu electrod filiform activat ultrasonic,  
Zilele Academice Timișene, a VII-a Conferință de vibrații  
mecanice, Timișoara, 1993, p.381-386
76. Nani V. - Tipizarea și modularizarea instalațiilor de curățire  
Militaru C. cu ultrasunete, Caietul de Acustică, Timișoara, Editura  
Gal C. Academiei, nr.22, 1986, p.63-66  
Pop Gh.  
Muntean N.
77. Nani V. - Aspecte privind ascuțirea prin eroziune electrochimică  
Nyari T. a sculelor-asc utilizate la finisarea cu ultrasunete a  
filielilor din diamant, Tehnic-2000, Timișoara, ediția a  
V-a, 1986, p.52-67
78. Nani V. - Influența US asupra capacității erozive la prelucrarea  
Iclănzan T. prin EDM cu electrod filiform, Caietul de Acustică,  
București, Editura Academiei, nr.32, 1995
79. Nani V. - Precizia și calitatea prelucrării prin EDM cu electrod  
Iclănzan T. filiform activat US, Caietul de Acustică, București,  
Editura Academiei, nr.32, 1995
80. Nanu A. - Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în  
Nanu D. câmp magnetic, Timișoara, Editura Facla, 1981
81. Nanu A. - Sistem de reglare automată la mașina de prelucrat prin  
Mărcușan A. electroeroziune ERO-1, a IV-a Conferință Națională  
Reviczky A. de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.107-112
82. Nanu A. - Cu privire la influența mărimii interstițiului asupra  
Popovici I. eficienței prelucrării prin eroziune electrică, a IV-a  
Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale,

- Timișoara, 1983, p.217-222
83. Nanu A. - Dispozitiv de avans pentru mașinile de prelucrat prin  
Ghiță M. electroeroziune, Brevet, România, nr.97978/31.05.1987  
Marinceu D.  
Oprea M.  
Nani V.
84. Natting B.E. - Cavitation produced by ultrasonics, Process Physics  
Neppiras E.A. Society, Marea Britanie, vol.63 B, 1950
85. Neppiras E.A. - Acoustic cavitation, Physics Reports, SUA, vol.61,  
nr.3, 1980
86. Nica M. - Dispozitiv de ascuțire electrochimică a mașinilor de  
Iclănzan T. găurit, Brevet, România, nr.91544/13.05.1985  
Nani V.  
Militaru C.
87. Nichici Al. - Fenomene fundamentale la prelucrarea cu scânteii  
electrice cu electrod oscilant, Teză de doctorat, Institutul  
Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1970
88. Nichici Al. - Analiza energetică-informațională a proceselor de  
Popa H. prelucrare prin eroziune, a IV-a Conferință Națională de  
Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.63-68
89. Nichici Al. - Aspecte energetice ale tehnologiilor de prelucrare prin  
eroziune, a IV-a Conferință Națională de Tehnologii  
Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.101-106
90. Nichici Al. - Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini,  
Popovici V. Timișoara, Editura Facla, 1983  
Nica M.  
Achimescu N.  
Popa H.  
Paulescu Gh.
91. Ono A. - Analiza oscilațiilor unei scule ultrasonice prin metoda  
difracției fascicolului laser, Ctrp Annalen, Elveția, 25,  
nr.1, 1976, p.349-354
92. Paulescu Gh. - Aspecte privind calculul concentratoarelor  
ultrasonice conice și cilindrice în trepte, a IV-a  
Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale,  
Timișoara, 1983, p.475-484
93. Paulescu Gh. - Aspecte privind calculul concentratoarelor  
ultrasonice exponențiale și catenoidale, a IV-a  
Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale,



- Timișoara, 1983, p.485-494
94. Paulescu Gh. - Studiul dimensionării concentratoarelor ultrasonice compuse, a IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.495-502
95. Paulescu Gh. - Studiul influenței formei concentratoarelor ultrasonice asupra parametrilor acustici și tehnologici la prelucrarea prin eroziune ultrasonică, Tehnologii neconvenționale- mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini, Timișoara, 1986
96. Paulescu Gh. - Studiul concentratoarelor catenoidale la prelucrarea prin eroziune ultrasonică, Caietul de Acustică, Timișoara, Editura Academiei, nr.22, 1986
97. Perdrix M. - Studiu teoretic și experimental privind efectul stratului de cuplaj asupra răspunsului traductorului ultrasonic de bandă largă, Journal of Physics D-Applied Physic, Marea Britanie, 13, nr.2, 1980, p.185-194
98. Popilov L.Y. - Sprovocnik po elektrocoshim i ultrazvukovim metodam obrabotki materialov, Izd. Mašinostroenie, Leningrad, 1971
99. Popovici I. - Influența factorilor prelucrării asupra ponderii descărcărilor efective la prelucrarea prin eroziune electrică, a IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.75-80
100. Popoviciu O.M. - Evoluția bulelor cavitaționale produse prin scânteii electrice, Teză de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1971
101. Reibold R. - Calibrarea câmpurilor ultrasonice prin utilizarea holografiei optice, Acustika, Germania, 46, nr.2, 1980, p.146-161
102. Rosenberg L.D. - High-intensity ultrasonic field, Plenum Press, New York-London, 1972
103. Savii Gh. - Studiul experimental comparativ al blocurilor ultraacustice destinate instalațiilor tehnologice cu ultrasunete, Buletinul Științific și Tehnic al Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, Mecanica, 18, nr.1, 1973, p.87-94
104. Savii Gh. - Cercetări asupra posibilităților de evidențiere dinamică a unor parametri caracteristici ai blocurilor ultrasonice, a IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, p.463-466
- Botzatu V.

105. Savii Gh. - Orientări în construcția unor echipamente cu  
Nani V. ultrasunete, Caietul de Acustică, București, Editura  
Gal C. Academiei, nr.21, 1985, p.109-112  
Isar Al.  
Militaru C.
106. Savii Gh. - Tipizarea echipamentelor de sudare cu ultrasunete,  
Nani V. Caietul de acustică, București, Editura Academiei, nr.24,  
Cleșiu S.R. 1988, p.145-148
107. Savii Gh. - Metodă și dispozitiv de activare ultrasonică a  
Nani V. electrodului filiform, Brevet, România,  
Militaru C. nr.102596/12.12.1988  
Muntean N.
108. Savii Gh. - Contributions on Ultrasound Activation of Wire-Cut  
Nani V. Electric Discharge Processing, ISEM 9, Nagoya, 1989  
Militaru C.  
Muntean N.
109. Simpson A.M. - Aparat pentru măsurarea continuă a modificărilor în  
viteza ultrasonică, The Review of Scientific Instruments,  
SUA, 51, nr.6, 1980, p.792-794
110. Silaș Gh. - Mecanica. Vibrații mecanice, București, Editura  
Didactică și Pedagogică, 1968
111. Silaș Gh. - Culegere de probleme de vibrații mecanice, București,  
Rădoi M. Editura Tehnică, vol.II, 1973  
Brîndeu L.  
Klepp M.  
Hegedüs A.
112. Skorobogatov V.I - Issledovanie elektriceskih razreadov v kavitationih  
puzirkah, Sb. Primenia Ultraakustiki k Issledovaniiu  
vescesta, Moscova, vol.10, 1960
113. Slavici T. - Contribuții la programarea asistată de calculator a  
mașinilor unelte cu comandă numerică în vederea  
prelucrării entităților geometrice complexe, Teză de  
doctorat, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1994
114. Smodorinov V.V. - Procedeu de reglare automată a frecvenței în  
instalații cu ultrasunete, Brevet, URSS,  
nr.718179/29.08.1979
115. Stanomir D. - Sisteme electroacustice. Câmpul, radiația și  
transducția, București, Editura Tehnică, 1984
116. Sukatska V.A. - Aparat pentru măsurarea vitezei de propagare

- ultrasonică bazat pe un interferometru, Izmeritel 'naia tehnika, URSS, 22, nr.5, 1979, p.587-589
117. Tabakov S.E. - Invertor acustic cu tiristor, Elektropromišlennost Goranov P.I. i priborostroene, Bulgaria, 15, nr.4, 1980, p.137-140
118. Thomas G.H. - O evaluare cu ultrasunet și instrument de control al calității pentru legături adezive, Journal of Adhesion, Marea Britanie, 10, nr.4, 1980, p.293-316
119. Tihonronov A.V. - Despre formarea optimă a concentratoarelor de ultrasunete, Akusticeski Jurnal, URSS, XXVI, nr.2, 1980, p.274-280
120. Vincent A. - Un nou dispozitiv pentru măsurarea vitezei ultrasonice în solide, Journal of Physics-E-Scientific Instruments, Marea Britanie, 13, nr.11, 1980, p.1227-1230
121. Vslivjev A.V. - Circulația suspensiei abrazive la prelucrarea în coordonate cu ultrasunete, Avtomatizația proizvodstvennîh processov v mašinostroenii, Rostov pe Don, 1974, p.66-69
122. Yogurtcu Y.R. - Aparat pentru măsurarea de înaltă precizie a vitezei undelor ultrasonice, Ultrasonics, Marea Britanie, 18, nr.4, 1980, p.155-159
123. Zadlo I. - Cinetica transferului de masă în extracția lichid-lichid în mediu activat cu ultrasunete, Chemische Technik, Germania, 32, nr.7, 1980, p.380
124. \* \* \* - Mașina de prelucrat prin electroeriziune cu electrod filiform și comandă numerică tip ELEROFIL-10, Cartea tehnică, Electrotimiș, Timișoara, 1982
125. \* \* \* - Generator Tehnoson-01, Cartea tehnică, Electrotimiș, Timișoara, 1982
126. \* \* \* - Transductor piezoceramic de putere tip TGUM 150/40-1, Cartea tehnică, Institutul de Fizică și Tehnologia Materialelor, București, 1985